



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE CORRIENTES SALINAS INDUCIDAS POR
SALMUERA DE DESALINIZACIÓN EN LA ZONA COSTERA DE LA PLANTA
DESALINIZADORA MINERA CANDELARIA, REGIÓN DE ATACAMA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DANIELA BELÉN MUÑOZ ALVARADO

PROFESOR GUÍA:

YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALDO MUÑOZ SEPÚLVEDA

LUIS ZAMORANO RIQUELME

Powered@NLHPC: Este trabajo fue parcialmente apoyado por la infraestructura de
supercómputo del NLHPC (ECM-02)

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: DANIELA MUÑOZ ALVARADO
FECHA: NOVIEMBRE 2021
PROF. GUÍA: YARKO NIÑO CAMPOS

MODELACIÓN NUMÉRICA DE CORRIENTES SALINAS INDUCIDAS POR SALMUERA DE DESALINIZACIÓN EN LA ZONA COSTERA DE LA PLANTA DESALINIZADORA MINERA CANDELARIA, REGIÓN DE ATACAMA

La actual escasez del recurso hídrico se manifiesta en el crecimiento exponencial de infraestructura de desalinización, que busca satisfacer de agua dulce a la comunidad e industrias. Esta expansión genera que los flujos de rechazo (salmuera), producidos como un subproducto del proceso de desalinización, también aumenten. En general, dichos flujos son devueltos al mar, alterando la dinámica costera y condiciones naturales de desarrollo de vida marina. Ante esto, el presente estudio tiene por objetivo construir un modelo numérico en el software OpenFOAM, para evaluar la dilución de chorros de salmuera eyectados a través de un sistema difusor multipuerto. La zona de estudio abarca el sector costero donde ocurren las descargas de salmuera de la planta desalinizadora Minera Candelaria. Las simulaciones utilizan las ecuaciones promediadas de Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS por sus siglas en inglés), con el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ para el cierre de turbulencia. El análisis del fenómeno físico contempla un modelo bidimensional y uno tridimensional. Para este último, las simulaciones involucran la variabilidad en corrientes ambientales, con una velocidad U_a . Los resultados fueron comparados con modelos comerciales y con experimentos de chorros densos inclinados de Baum & Gibbes (2020), como una forma de validarlos. En relación con los modelos comerciales, el modelo numérico entregó dimensiones de chorros similares a las que entregan softwares comerciales para plumas que aún no impactan con el lecho marino. En escenarios donde el lecho restringe la pluma, las diferencias de las concentraciones predichas son apreciables. Para la condición más desfavorable de dilución ($U_a = 0$), la corriente salina tiende a desplazarse en la dirección de la pendiente de fondo, alcanzando excesos salinos de 1 psu en distancias superiores a los 40 m aguas abajo del difusor. La comparación con los estudios de Baum & Gibbes (2020) muestran las mayores similitudes para una condición de U_a nula, con discrepancias para $U_a \neq 0$ en parámetros como la distancia X_i de impacto del chorro y su dilución S_i en ese instante, diferencia adjudicada a la extensión del dominio. No obstante, las tendencias de crecimiento de las variables que describen el chorro denso ante la variación de U_a , son análogas. El modelo numérico demostró nuevas perspectivas de análisis relacionadas a la concentración de salinidad en el fondo marino, el efecto de la pendiente en el arrastre de la corriente salina y la capa estratificada producida por la constante eyección de salmuera al ambiente. Además, el enfoque transitorio permitió examinar la variabilidad de estos parámetros en el tiempo.

Para mi familia...

...y para mí.

Agradecimientos

Cuando comencé esta experiencia llamada universidad, siempre vi lejano este momento, de sentarme y escribir mis agradecimientos en mi trabajo final. Lo cierto es que todo pasó muy rápido. El proceso no estuvo exento de agotamiento y algunas frustraciones, pero siempre lo disfrutado fue más grande. Hoy me siento feliz y muy feliz.

En primer lugar, agradezco a mi familia, por su amor incondicional. Gracias por confiar y apoyarme en todas mis decisiones. Gracias por siempre querer lo mejor para mí, a pesar de todo lo que discrepemos, sé que esa siempre es la razón de fondo.

En segundo lugar, agradezco a las personas que me ayudaron a desarrollar esta memoria. Al profesor Yarko por guiarme desde un principio con mucho interés en lo que hacía y motivarme en el transcurso. Gracias Aldo por la buena disposición y por permitirme aprender de tus conocimientos. Gracias Luis por cada comentario y sugerencia para mejorar. Y Gracias Christian por ayudarme con cada duda que tuve en el camino. Les agradezco por acompañarme en este trabajo, que fue un poco solitario pero enriquecedor en muchas formas.

En tercer lugar, agradezco a cada persona que se ha cruzado en mi camino, de cada una aprendo, de lo bueno y no tan bueno. Con especial cariño agradezco a aquellas que me han dado su amistad. A mis amigas que hice los primeros días de universidad: Francisca, Sofía, Rocío, Isadora y Javiera, que han sido mi apoyo femenino en todos estos años. A Francisca por ser una gran amiga desde un inicio y adoptarme como una hermana. Eres una de las mejores cosas que me ha dado la universidad. A mis amigos hidráulicos Mario, Daniel y Montserrat por compartir largas horas de estudio, conversaciones, cervezas y anécdotas. Gracias a todos por hacer entretenido este proceso. Además, agradezco a mis amigos de épocas colegiales que siempre han estado presente dándome ánimos, a Katia, Cristian, Francisco y Diego. A todos los admiro y atesoro con cariño.

En último lugar, y no por ello, menos importante, agradecer a la queen T.S. por darme un gran repertorio musical en largas noches de estudio y trabajo.

Termino este escrito, con mucha esperanza pensando en lo que viene. Espero que algún día mis conocimientos y ganas de mejorar el mundo colaboren entre sí, y puedan convertirse en un aporte para algo o alguien.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Metodología	2
1.3.1 Caracterización de la hidrodinámica de la región de estudio y la disposición de salmuera	2
1.3.2 Implementación del modelo numérico.....	2
1.3.3 Análisis y comparación de los resultados	3
1.4 Organización del informe.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	4
2.1 Desalinización	4
2.1.1 Proceso de desalinización	4
2.1.2 Disposición de la salmuera	4
2.2 Descarga superficial al océano	6
2.2.1 Análisis chorros densos inclinados.....	9
2.2.1.1 Ecuaciones gobernantes.....	11
2.2.1.2 Modelo de turbulencia	12
2.2.2 Impacto ambiental y normativa.....	13
2.3 Modelos CFD	16
2.4 Planta desalinizadora Minera Candelaria	16
2.5 Comentarios	20
CAPÍTULO 3: MODELO CONCEPTUAL	23
3.1 Propiedades ambientales	23
3.2 Propiedades de descarga	24
3.3 Condiciones de borde y dimensiones generales.....	26
3.4. Ecuaciones del modelo.....	26
3.5 Modelo de turbulencia.....	26
CAPÍTULO 4: MODELO NUMÉRICO EN OPENFOAM	30
4.1 OpenFOAM	30
4.1.1 Solver twoLiquidMixingFoam.....	31
4.2 Configuración del modelo.....	31

4.2.1 Condiciones de borde	31
4. 2. 2. Condiciones iniciales	33
4.2.2.1 Velocidad.....	33
4.2.2.2 Presión.....	34
4.2.2.3 Modelo de turbulencia	34
4.2.3 Mallado	35
4.2.3.1 Discretización temporal	38
4. 3 Casos de simulación	38
4.3.1 Modelo 2D	38
4.3.2 Modelo 3D	39
CAPÍTULO 5: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
5.1 Caso 2D	40
5.2 Caso 3D	45
5.2.1 Análisis general.....	45
5.2.2 Análisis comparativo.....	49
5.2.3. Análisis de chorros densos inclinados	54
5.2.4 Análisis corrientes de densidad.....	59
5.2.5 Análisis fondo marino	62
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	71

Índice de Figuras

Figura 2.1: Paso único y múltiple para un sistema de osmosis inversa.....	5
Figura 2.2: Etapa única y múltiple para un sistema de osmosis inversa.	5
Figura 2.3: Descarga de efluentes con boyancia negativa, (a) descarga en la costa a través de un canal o vertedero, y (b) descarga sumergida a través de una tubería y boquilla o difusor.	8
Figura 2.4: Definiciones para chorro denso inclinado de difusores, en (a) un coflujo, en (b) un contraflujo.....	10
Figura 2.5: Definición de ángulo ϕ_a en chorros densos inclinados.....	10
Figura 2.6: Ubicación geográfica de Planta desalinizadora Minera Candelaria y zonas de captación y descarga de aguas..	17
Figura 2.7: Variables de diseño del difusor	18
Figura 2.8: Vista en corte de dilución para $U_a = 0.35$ m/s.....	21
Figura 2.9: Vista en corte de dilución para $U_a = 0.5$ m/s.....	21
Figura 2.10: Vista en planta del área de influencia de la pluma salina.	22
Figura 3.1: Modelo conceptual y dimensiones del modelo 3D.....	28
Figura 3.2: Geometría del difusor multipuerto.....	29
Figura 3.3: Modelo conceptual y dimensiones del modelo 2D.....	29
Figura 4.1: Carpetas y diccionarios contenidos en un caso de OpenFOAM.....	31
Figura 4.2: Patches para modelo tridimensional.	33
Figura 4.3: Malla para modelo de dos dimensiones.	36
Figura 4.4: Vista en corte de malla para modelo en tres dimensiones.	37
Figura 5.1: Dilución en el tiempo para la eyección de un chorro. $U_a=0$ m/s.....	42
Figura 5.2: Dilución en el tiempo para la eyección de dos chorros. $U_a=0$ m/s.	43
Figura 5.3: Vectores de magnitud de velocidad para el caso de dos portas en funcionamiento, con $U_a=0$ m/s.....	44
Figura 5.4.: Vista en planta del comportamiento transitorio de dilución.	47
Figura 5.5: Vista en corte de la dilución del chorro de la primera porta del difusor, bajo un estado permanente	48
Figura 5.6: Vista en corte de la dilución del chorro de la última porta del difusor, bajo un estado permanente.....	48
Figura 5.7: Salinidad en el tiempo para los casos simulados en las Figuras 5.5 y 5.6.	49
Figura 5.8: Escenario de comparación previo al impacto con el fondo marino para un 10% de exceso salino.....	51
Figura 5.9: Escenario de comparación previo al impacto con el fondo marino para un 5% de exceso salino.....	52
Figura 5.10: Comparación modelo en OpenFOAM y modelos comerciales Visjet y Cormix para un 10% de exceso salino. Escenario permanente en modelo numérico..	53

Figura 5.11: Comparación modelo en OpenFOAM y modelo Visjet para un 5% de exceso salino. Escenario permanente en modelo numérico.	54
Figura 5.12: Altura máxima Z_t terminal del chorro. Comparación con experimentos de Baum & Gibbes (2020).	55
Figura 5.13: Distancia X_t terminal del chorro. Comparación con experimentos de Baum & Gibbes (2020)..	56
Figura 5.14: Distancia X_i de impacto. Comparación con experimentos de Baum & Gibbes (2020)..	57
Figura 5.15: Dilución de impacto S_i del chorro. Comparación con experimentos de Baum & Gibbes (2020).	58
Figura 5.16: Corrientes de densidad en el tiempo para una velocidad ambiental U_a nula. Vista en corte z-y.	61
Figura 5.17: Salinidad en el tiempo para la simulación de la Figura 5.16.	62
Figura 5.18: Salinidad en el fondo marino para una velocidad ambiental U_a nula en estado permanente.....	63

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Regulaciones internacionales para la descarga de salmuera..	14
Tabla 2.2: Sensibilidad de los hábitats marinos a las descargas de salmuera.....	15
Tabla 2.3: Características del difusor.	18
Tabla 2.4: Características del efluente.....	19
Tabla 3.1: Parámetros de descarga Planta desalinizadora Minera Candelaria y parámetros ambientales en zona circundante.	25
Tabla 3.2: Resumen valores de salinidad para referencias de Tabla 2.1.	25
Tabla 3.3: Constantes empíricas del modelo k- ϵ	27
Tabla 4.1: Condiciones de borde fijadas en carpeta 0 de OpenFOAM.	32
Tabla 4.2: Niveles de refinado para mallas de dos y tres dimensiones.	38
Tabla 4.3: Casos de simulación modelo en dos dimensiones.....	39
Tabla 4.4: Casos de simulación modelo de tres dimensiones.....	39
Tabla 5.1: Tabla resumen para parámetros de chorros densos inclinados.....	59

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Actualmente, los efectos de la escasez hídrica son evidentes en el norte de Chile, impactando en usos de agua del tipo sanitario, minero y agrícola. El abastecimiento de estas actividades utiliza como principal fuente el agua dulce continental, proveniente de la cordillera y de almacenamientos de acuíferos. La desalinización de aguas costeras pretende subsanar el agotamiento de estas fuentes convencionales, las necesidades básicas de la población y el uso de agua dulce en diversas actividades de producción.

Acorde a Panagopoulos (2019), una planta desaladora genera dos productos de relevancia, el primero corresponde al agua permeada (que luego de otros procesos se convierte en potable), y el segundo, a un caudal de rechazo, denominado salmuera. Este último suele ser devuelto al mar mediante emisarios submarinos, aplicándose en algunos casos, un sistema de difusores. El flujo anómalo de alta densidad evacuado se diluye y propaga en el entorno de descarga debido al arrastre de aguas ambientales menos densas. Dicho lo anterior, este estudio pretende analizar las corrientes de densidad originadas por vertido de salmuera, con enfoque en la planta desalinizadora Minera Candelaria, ubicada en la comuna de Caldera, región de Atacama, la cual genera descargas a través de un sistema de difusores multipuerto.

Las plantas de ósmosis inversa de agua de mar generalmente tienen una tasa de recuperación de agua del 40% al 55% (Turek et al., 2017), la que puede variar según el volumen de agua a tratar y su composición iónica. Variaciones en los porcentajes de recuperación, equivalen a cambios en el comportamiento de la interacción salmuera-agua de mar (pluma salina).

Así como la densidad de la descarga es un factor determinante en la propagación de la pluma salina, también es necesario considerar el mecanismo de evacuación. La investigación de Wood & Silverman (2020) demuestra que el uso de difusores genera anomalías salinas pequeñas pero robustas que se propagan cientos de kilómetros, en cambio, una premezcla de salmuera con agua de mar evita la generación de corrientes de densidad.

Aparentemente, los factores que inciden en el comportamiento de la pluma salina corresponden en gran medida, a las condiciones del vertido. Sin embargo, no se debe omitir el impacto de las condiciones de estratificación naturales en el traslado de la corriente salina, según mencionan Wood & Silverman (2020).

La alteración de los niveles naturales de salinidad marina impacta directamente a la dinámica del agua costera y la vida acuática del entorno. Dependiendo del grado de perturbación, determinadas condiciones pueden verse más afectadas que otras. El exponencial crecimiento de instalaciones desaladoras para abastecer zonas de escasez hídrica genera el interés de modelar y analizar el comportamiento de salmuera de rechazo, que tiene como principal destino el mar, siendo el medio ambiente acuático y la vida que aloja, los principales perjudicados de un proceso que se vuelve una necesidad en el planeta.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Modelar y analizar la pluma salina generada por descargas de salmuera originadas por la Planta desalinizadora Minera Candelaria, con enfoque en el campo cercano.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la hidrodinámica de la región de estudio y la disposición de salmuera.
- Modelar numéricamente el comportamiento del chorro denso inclinado, producido por descargas de salmuera provenientes de la planta desaladora Minera Candelaria.
- Comparar resultados con modelos comerciales implementados en la industria del diseño. Además, contrastar los parámetros que caracterizan al chorro denso inclinado con valores de la literatura.

1.3 Metodología

1.3.1 Caracterización de la hidrodinámica de la región de estudio y la disposición de salmuera

La primera etapa consta de un estudio del entorno marino de descarga, a modo de determinar las características del flujo en condiciones naturales (parámetros que identifiquen, por ejemplo, regímenes de velocidad). Para esto se estudia: la batimetría de la zona, proporcionada por investigaciones previas; y, condiciones de turbulencia y difusividad de la zona, determinadas posterior a una revisión bibliográfica.

También, se requiere identificar los parámetros que describen el vertido de salmuera en la salida de los emisarios submarinos, obtenidos de informes de libre acceso correspondiente a la planta desalinizadora.

1.3.2 Implementación del modelo numérico

La adaptación de la zona de estudio tendrá lugar en el software OpenFOAM, el cual utiliza métodos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). OpenFOAM presenta diversas herramientas para resolver distintos fenómenos relacionados con la dinámica de fluidos, empaquetados en aplicaciones denominadas solucionadores o solvers. Para ello, el primer paso corresponde a seleccionar aquel solver que se ajuste de mejor manera a las condiciones que se desean estudiar.

Una vez definido el solucionador, se generan las condiciones geométricas que definan el campo cercano y el sistema de difusión de los chorros. Posteriormente se ingresan al sistema los parámetros que describen el chorro de salmuera y la hidrodinámica de la región marina (ambos generados en la etapa anterior), y condiciones de borde que caractericen el volumen de control, procurando que represente las condiciones reales de dilución. Este procedimiento se configura para cada una de las simulaciones.

1.3.3 Análisis y comparación de los resultados

El análisis contempla una descripción de la dilución de salmuera en el campo cercano de descarga, a través de la examinación de distintas perspectivas del modelo. Aquí, también deben establecerse las principales limitaciones del modelo, cumplimiento de normativa vigente y potenciales efectos en el ecosistema marino.

La comparación involucra dos partes. Primero, contrastes con modelos comerciales, estableciendo las zonas donde se alcanzan determinados niveles de dilución. Los datos de dichos modelos son obtenidos de estudios anteriores y a través de la implementación del software en cuestión. La segunda parte considera una validación general con datos experimentales, obtenidos de información bibliográfica.

1.4 Organización del informe

El trabajo lo componen cinco capítulos, descritos a continuación:

El Capítulo 2 *Marco teórico*, abarca una revisión bibliográfica general del proceso de desalinización y el tratamiento de la salmuera producida. A partir de aquí, el capítulo estudia en profundidad las descargas de salmuera en el mar: la descripción del fenómeno, su aplicabilidad con modelos numéricos y sus principales impactos.

El Capítulo 3 *Modelo conceptual*, establece el comportamiento general del modelo y las variables que describen la hidrodinámica del sistema en su estado natural e intervenido.

El Capítulo 4 *Modelo numérico*, incluye una breve investigación del software OpenFOAM y las principales variables para su configuración. Además, quedan establecidos los escenarios de simulación.

El Capítulo 5 *Presentación y análisis de resultados*, examina en detalle los resultados generados por el modelo en OpenFOAM, y las respectivas comparaciones con datos experimentales y modelos adicionales.

El Capítulo 6 *Conclusiones*, resume los análisis fundamentales del capítulo anterior y su validez. También, entrega comentarios y recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Desalinización

2.1.1 Proceso de desalinización

Los métodos de desalinización del tipo membrana más utilizados corresponden a sistemas de osmosis inversa (desde ahora, OI) y electrodiálisis (Turek et al., 2017). La desalinización por OI consiste en aplicar una presión superior a la presión osmótica del agua de origen, permitiendo que el agua pura recorra las membranas semipermeables, separándose de las partículas disueltas. Por otro lado, la electrodiálisis elimina iones de sal de la fuente de agua bajo la exposición de una corriente eléctrica directa (Voutchkov et al., 2013). En definitiva, las fuerzas impulsoras en la desalinización por OI y electrodiálisis corresponden a la presión y la corriente eléctrica, respectivamente.

Según indica Voutchkov et al. (2018) la configuración de sistemas de OI pueden dividirse en:

- Sistemas de OI de paso único y múltiple (ver Figura 2.1). Se denominan múltiples a aquellos que vuelven a tratar el permeado de OI de paso único.
- Sistemas de OI de una o más etapas (ver Figura 2.2). En esta técnica, cada etapa trabaja de forma independiente, sin embargo, el caudal afluyente a tratar depende de la etapa anterior. En este sentido, posterior a la primera etapa, el caudal que se somete a tratamiento puede provenir del agua permeada (sistemas SWRO) o del concentrado (sistemas BWRO).

El porcentaje de recuperación de agua en procesos de OI está limitada por la salinidad retenida y su presión osmótica relacionada (Turek et al., 2017). Generalmente los procesos de OI se realizan en una sola etapa o paso, sin embargo, la implementación de múltiples etapas permite aumentar los niveles de recuperación de agua. Una configuración de una sola etapa convierte entre el 35% al 50% del agua de mar en potable. Por otro lado, los sistemas SWRO y BWRO de 2 etapas alcanzan el 60% al 65% y el 75% respectivamente (Voutchkov et al., 2018; Efraty et al., 2012).

2.1.2 Disposición de la salmuera

La industria de desalinización ha desarrollado diversos enfoques para la eliminación de salmuera. Dentro de ellos están las descargas a aguas superficiales, descargas a redes de alcantarillado, evaporación mediante estanques, inyección a pozos profundos y aplicaciones en tierra (Chang et al., 2015; Panagopoulos et al., 2019).

La descarga a aguas superficiales ocurre a través de estructuras de desagüe, con recepción directa a cuerpos de agua abiertos como el océano, ríos, lagos y bahías. Este método se considera la opción menos costosa y es implementado por más del 90% de plantas desalinizadoras de agua de mar a escala global (Panagopoulos et al., 2019; Ziolkowska et al., 2015).

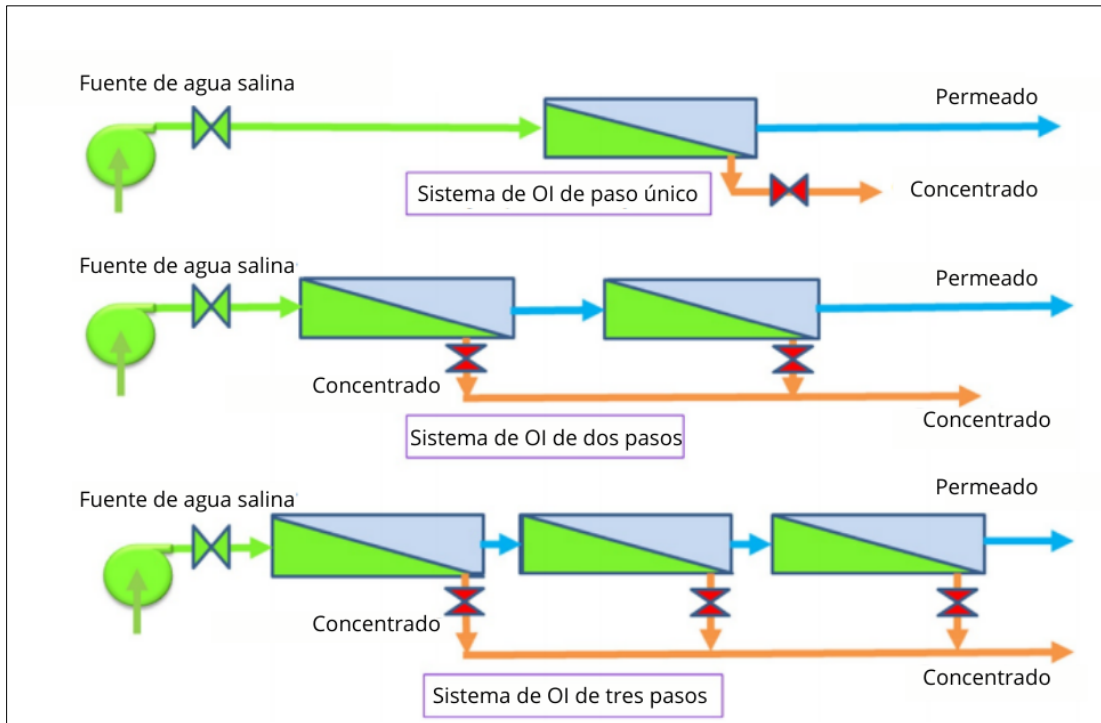


Figura 2.1: Paso único y múltiple para un sistema de osmosis inversa.
Fuente: Adaptado de Voutchkov (2018).

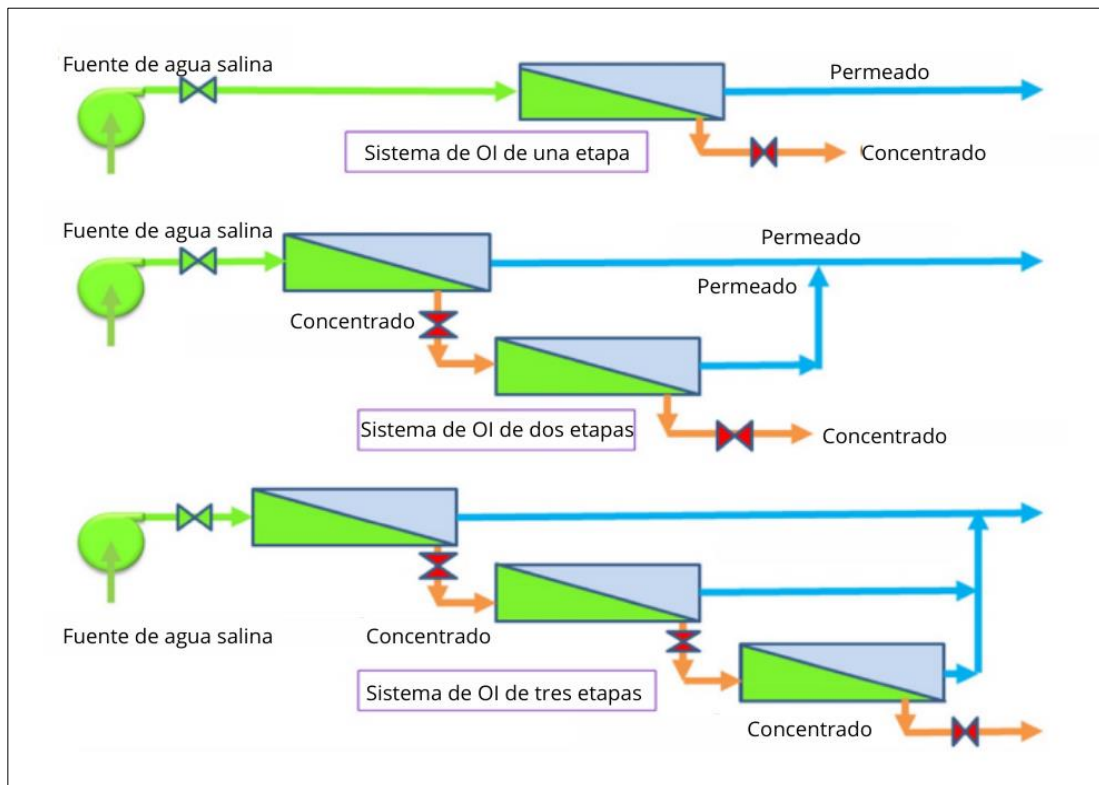


Figura 2.2: Etapa única y múltiple para un sistema de osmosis inversa.
Fuente: Adaptado de Voutchkov (2018).

La descarga por alcantarillado vierte el concentrado de salmuera al sistema de recolección de aguas residuales más cercano, el cual transporta la mezcla a una planta de tratamiento local. Producto de la limitada capacidad de estas plantas, el proceso se dificulta cuando los valores de salinidad y volumen del concentrado son elevados. Como consecuencia de este impacto, la descarga hacia alcantarillados se reduce a plantas desalinizadoras de pequeña escala (Greenlee et al., 2009; Panagopoulos et al., 2019).

La inyección a pozos profundos consiste en una inyección de salmuera por debajo de los acuíferos de agua dulce, a magnitudes de profundidad que varían entre cientos a miles de metros. Este enfoque no se ha usado el tiempo suficiente para descartar infiltraciones salinas hacia los acuíferos superiores, por lo que se esperan contaminaciones secundarias (Chang et al., 2015; Greenlee et al., 2009). El costo de su implementación es mayor a las alternativas anteriores, por ende, su aplicación surge a causa de la inviabilidad de otros métodos (Panagopoulos et al., 2019).

Los estanques de evaporación eliminan directamente el concentrado de salmuera bajo la acción de energía solar. Su contenido se dispone en cuencas poco profundas, ubicadas en áreas secas o semisecas para abarcar mayor exposición solar (Rodríguez et al., 2012).

Finalmente, las aplicaciones terrestres se efectúan por riego mediante aspersion a cultivos y pastos resistentes a niveles elevados de salinidad, con potenciales impactos en los acuíferos ubicados en el subsuelo del área irrigada (Panagopoulos et al., 2019).

2.2 Descarga superficial al océano

Las plantas de desalinización alteran las condiciones naturales del mar mediante la evacuación de una variedad de productos. El desecho más evidente y directo corresponde a la salmuera, la cual, además de presentar elevadas concentraciones de sal, puede alcanzar cuantiosos valores de turbidez y temperatura (Bleninger et al., 2008). Más aún, en el concentrado de salmuera se detectan productos químicos empleados en el proceso de control biológico como antiincrustantes, biocidas (residuos de cloro y subproductos de desinfección), boro, productos de limpieza, metales pesados (provenientes de materiales que aseguran la resistencia a la corrosión del concentrado de salmuera) y coagulantes (Chang et al., 2015; Lettermann et al., 2007; Voutchkov et al., 2013).

Los sistemas de emisarios que transportan caudales de salmuera al océano se pueden clasificar en sistemas abiertos y sumergidos (ver Figura 2.3). Por un lado, los sistemas abiertos se ubican en la costa y descargan mediante canales abiertos. Por otro lado, los sistemas sumergidos descargan mar adentro a través de tuberías acostadas en el fondo marino (Kress et al., 2019). El vertido directo a la costa posee capacidades de mezcla muy bajas comparado a descargas sumergidas, esto, a causa de un transporte horizontal que sólo sigue la pendiente del lecho marino (Bleninger et al., 2008).

El comportamiento del chorro evacuado al mar depende de tres tipos de factores (Fischer et al., 1979):

1. Parámetros del chorro
2. Parámetros medioambientales
3. Factores geométricos

Los parámetros del chorro incluyen la velocidad y niveles de turbulencia iniciales, flujos de masa, flujos de momentum y el flujo asociado al contaminante, que, en este caso, corresponde al concentrado de salmuera.

Los parámetros medioambientales abarcan niveles de turbulencia naturales, velocidades de corrientes y estratificaciones de densidad. Según Fishcer (1979), cuando el chorro alcanza una boyancia 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.

Complementario a lo anterior, el efecto del oleaje también influye en el comportamiento del chorro, facilitando su dilución en el ambiente (Palomar et al., 2011). Las escalas de longitud en las que se dispersa la salmuera aumentan considerablemente en un entorno con oleaje, en comparación a ambientes estancados (De Padova et al., 2020).

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.

Los procesos de mezcla que ocurren en el mar se relacionan a variaciones de salinidad entre el efluente y el cuerpo receptor (Bleninger et al., 2008), pero, además a cambios en la temperatura. Este último causado por la instalación de plantas desalinizadoras térmicas, o la co-descarga con agua de enfriamiento proveniente de plantas de energía (Kress et al., 2019). En este sentido, los procesos que se manifiestan en verano difieren a los de épocas invernales, es decir, en el análisis cobra relevancia considerar la variabilidad estacional.

Con el fin de optimizar la dispersión y dilución de la salmuera se han adoptado variadas técnicas, como sistemas de difusores a la salida de los emisarios submarinos, e incluso premezclados de salmuera con agua de enfriamiento proveniente de plantas de energía (Bleninger et al., 2008). Para el caso de los difusores, estos se componen de una serie de boquillas que promueven la mezcla de la salmuera y evitan su acumulación en el lecho marino (Missimer et al., 2018), reduciéndolos a niveles seguros (Abessi et al., 2018).

Wood & Silverman (2020) utilizaron el modelo de circulación oceánica hidrodinámica MIKE3D-HD para analizar la distribución salina de dos modelos de descarga en la costa mediterránea de Israel: (1) un modelo de difusor con múltiples portas, y, por otro lado, (2) un

modelo que simula un vertido de salmuera combinado con agua de refrigeración procedente de una central eléctrica contigua a la planta desalinizadora.

Del estudio se extrae que, el segundo diseño (2), en contraste al primero (1), reduce con mayor eficacia los efectos dinámicos en el campo cercano, vale decir, las anomalías salinas se concentran en la superficie cercana a la costa y la boyancia negativa de la pluma se compensa casi por completo en esta zona. Por el contrario, el primer modelo diluye rápidamente la anomalía salina, pero la pluma mantiene una boyancia negativa, trasladándose a campos lejanos como una corriente de densidad.

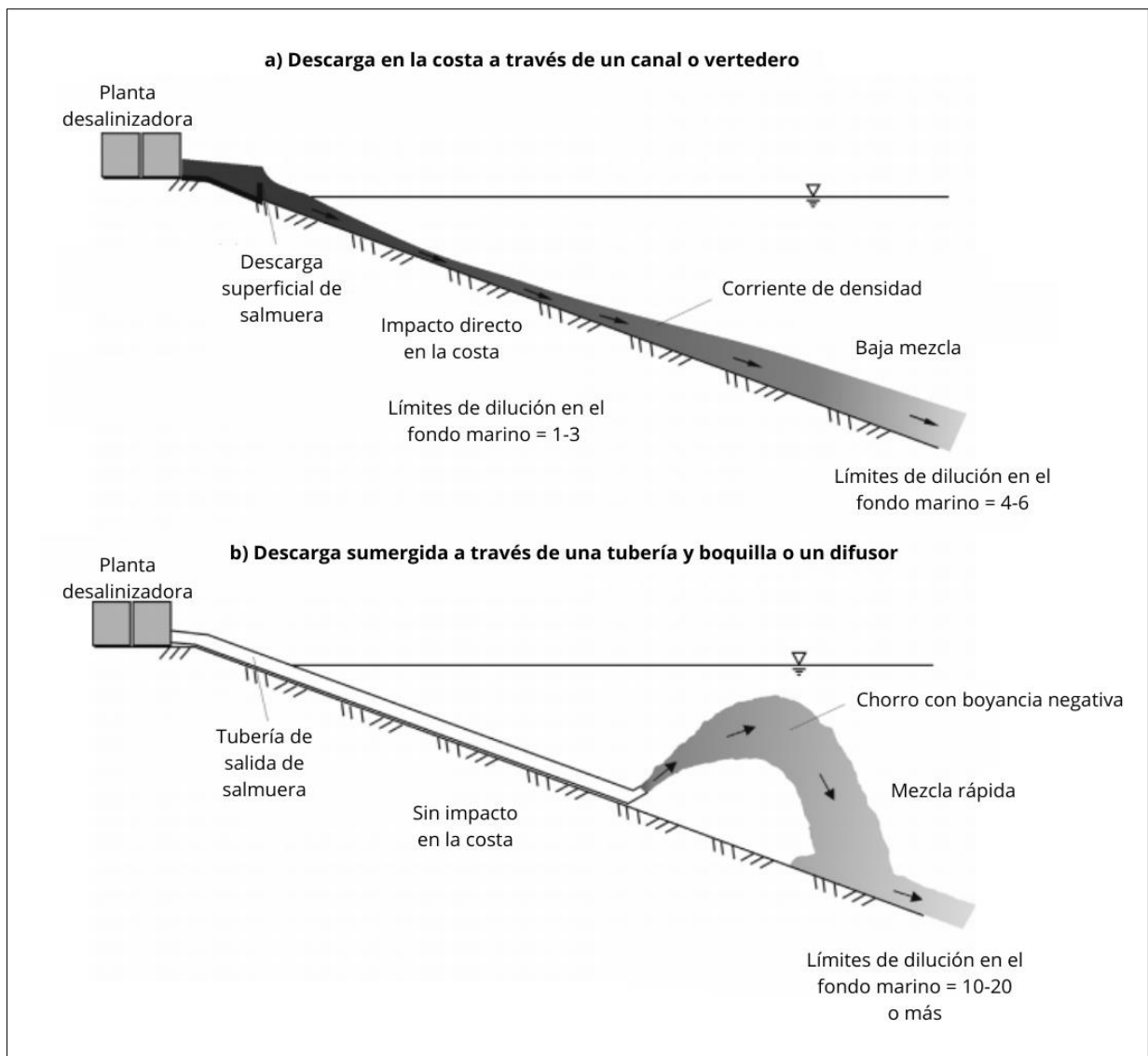


Figura 2.3: Descarga de efluentes con boyancia negativa, (a) descarga en la costa a través de un canal o vertedero, (b) descarga sumergida a través de una tubería y boquilla o difusor.

Fuente: Adaptado de Bleninger (2007).

2.2.1 Análisis chorros densos inclinados

En el comportamiento de los chorros densos inclinados gobierna la interacción entre la descarga de momentum y boyancia. En la Figura 2.4 se presentan las principales características de un efluente con densidad ρ_d y velocidad U_d que es descargado a un ambiente de densidad ρ_0 y velocidad U_a (Baum et al., 2020). Respecto a la Figura 2.4:

- La altura H_0 indica la altura a la que se encuentra emplazado el difusor.
- La variable Z_t corresponde a la máxima altura que alcanza el flujo. El chorro se eleva producto del momentum vertical, siendo continuamente contrarrestado por acción de la boyancia negativa hasta elevarse a una altura Z_t . La distancia horizontal a la que se consigue dicha altura queda representada por X_t .
- El impacto del chorro con el límite inferior ocurre a una distancia X_i con una dilución S_i .
- El ángulo formado entre el plano horizontal y las portas se denomina θ_0 . Una inclinación de $\theta_0=60^\circ$ es ampliamente validado para este tipo de flujos (Abessi et al., 2015a, Voutchkov et al., 2013).

El tipo de interacción entre el efluente y el océano permite disgregar el dominio horizontal en tres campos. El campo cercano lo limita el colapso del chorro de salmuera, y dominan procesos advectivos y de turbulencia. El campo intermedio se ubica entre el colapso del flujo y los procesos de mezcla activa. Por último, en el campo lejano la dilución depende de la difusión y la turbulencia del ambiente (Baum et al., 2020).

Asumiendo un flujo completamente turbulento y las aproximaciones de Boussinesq ($\rho_d - \rho_0 \ll \rho_0$), para un vertido de salmuera con un ángulo de inclinación θ_0 fijo, Abessi & Roberts (2017) determinaron la relación (2.1), la cual varía según la configuración del difusor. El término θ_0 debe incorporarse a la derecha de la ecuación (2.1) en los casos que se desee examinar el comportamiento del chorro ante una variabilidad de θ_0 .

$$\frac{X_t}{dF_d}, \frac{Z_t}{dF_d}, \frac{X_i}{dF_d}, \frac{S_i}{F_d} = f(u_r, F_d, \phi_\alpha) \quad (2.1)$$

En (2.1): F_d corresponde al Froude densimétrico del efluente dado por $F_d = U_d/\sqrt{g'_0 d}$, donde $g'_0 = g(\rho - \rho_0)/\rho_0$ (el término $(\rho - \rho_0)/\rho_0$ se denomina densidad local del flujo inferior o corriente de densidad, Niño et al., 2019), d es el diámetro del orificio de cada porta, g la aceleración de gravedad y U_d la velocidad de descarga de salmuera ; $u_r = U_a/U_d$, donde U_a corresponde a la velocidad ambiental; y ϕ_α el ángulo en planta que relaciona una aproximación del flujo transversal y la dirección de la descarga. En la Figura 2.5, $\phi_\alpha = 0^\circ$ para un coflujo y $\phi_\alpha = 180^\circ$ para un contraflujo.

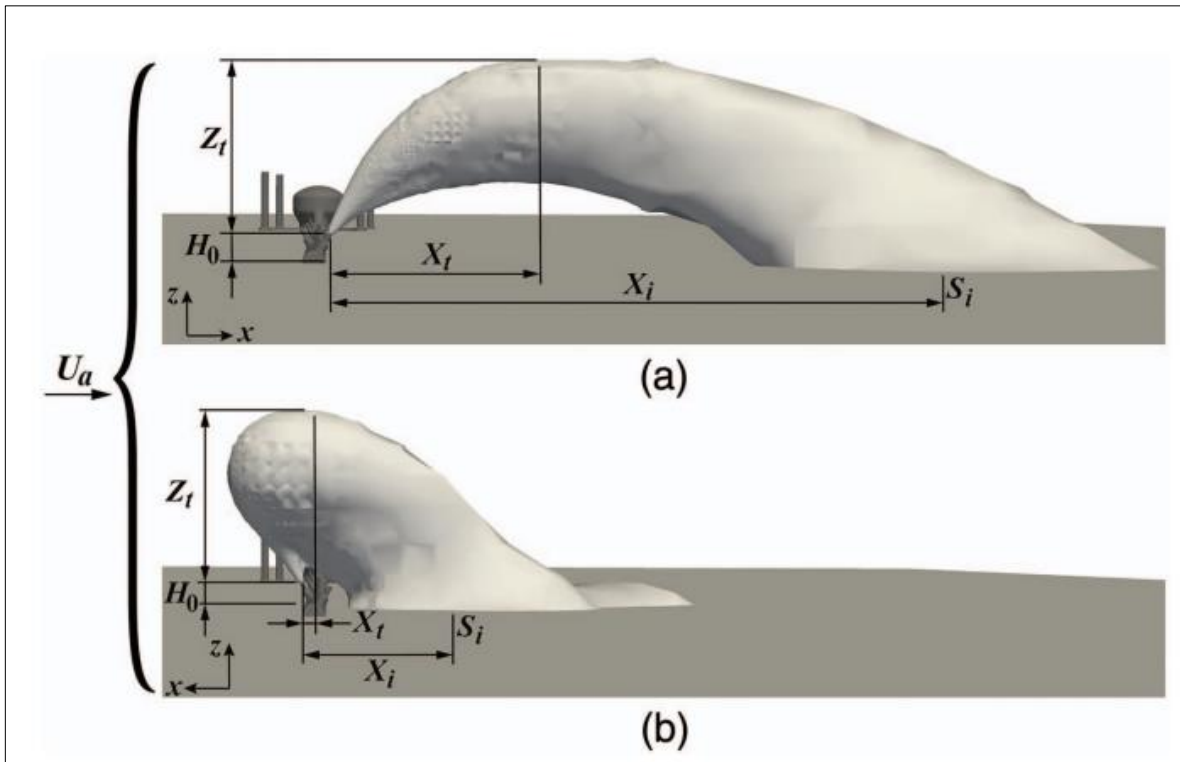


Figura 2.4: Definiciones para chorro denso inclinado de difusores, en (a) un coflujo, y en (b) un contraflujo.
 Fuente: Recuperado de Baum et al. (2020).

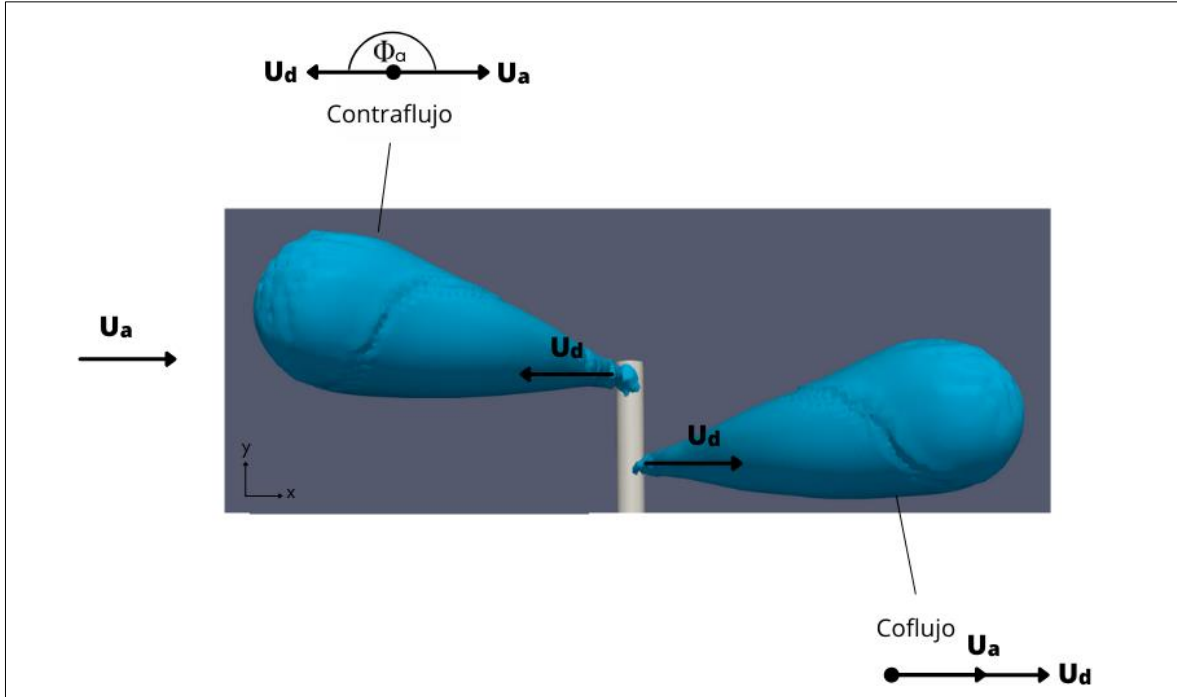


Figura 2.5: Definición de ángulo ϕ_α en chorros densos inclinados. Para la velocidad ambiental U_a de la figura, $\phi_\alpha=180^\circ$ en un chorro contraflujo y $\phi_\alpha=0^\circ$ en un chorro coflujo.
 Fuente: Elaboración propia.

En descargas donde el difusor está integrado por múltiples portas, la variable que indica la distancia L_p entre portas debe ser considerada en la relación (2.1) (Abessi et al., 2017), quedando:

$$\frac{X_t}{dF_d}, \frac{Z_t}{dF_d}, \frac{X_i}{dF_d}, \frac{S_i}{F_d} = f\left(u_r, F_d, \phi_a, \frac{L_p}{dF_d}\right) \quad (2.2)$$

En otras palabras, las características del flujo de salmuera a la salida del difusor y las distribuciones de concentración en el fondo marino quedan determinadas por las variables u_r, F_d, ϕ_a y L_p .

2.2.1.1 Ecuaciones gobernantes

A continuación, se detalla las ecuaciones gobernantes, el modelo de turbulencia y constantes de interés que han sido empleadas para algunos estudios de chorros densos inclinados, y que se aplicarán en la metodología de esta investigación.

Las ecuaciones que gobiernan los modelos CFD para chorros densos inclinados se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles (Zhang et al., 2017).

Las Ecuaciones Promediadas de Reynolds (desde ahora, RANS por sus siglas en inglés), usadas comúnmente en la industria (Zhang et al., 2017), se fundamentan en que el flujo turbulento presenta fluctuaciones cuasi-aleatorias, posibles de analizar estadísticamente de la siguiente forma (Niño et al., 2020):

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (2.3)$$

donde u_i es la velocidad instantánea en la dirección x_i , \bar{u}_i la velocidad promedio, y u_i' la fluctuación de dicha variable. Análogamente se tiene para la presión:

$$p = \bar{p} + p' \quad (2.4)$$

Acorde a Zhang (2017) y Pope (2002), las formulaciones promediadas en la turbulencia para continuidad y momentum (bajo el enfoque RANS) quedan dadas en notación tensorial, respectivamente, por:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j) = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_i u_j) = \frac{-\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \mu \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} (\bar{u}_i) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.6)$$

La ecuación de transporte en notación tensorial queda expresada como:

$$\frac{\partial(\overline{\rho\phi})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho\phi u_j}) = \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}(\Gamma\overline{\phi}) - \frac{\partial Q_j}{\partial x_j} \quad (2.7)$$

donde: u_i corresponde a la velocidad en la dirección i ; ρ la densidad del fluido; p la presión; t el tiempo; g la aceleración de gravedad; μ la viscosidad dinámica del fluido; Γ la difusividad escalar; ϕ un escalar de concentración; τ_{ij} las tensiones de Reynolds; y Q_j el flujo escalar turbulento. Además, el enfoque RANS aplica las aproximaciones de Boussinesq para cuantificar τ_{ij} y Q_j :

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.8)$$

$$Q_j = \Gamma_t \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x_j} \quad (2.9)$$

donde μ_t es la viscosidad turbulenta de remolinos; k la energía cinética turbulenta; δ_{ij} el delta de Kronecker; y Γ_t la dispersividad turbulenta.

Para la modelación de chorros densos asociados a difusores multipuerto, Baum & Gibbes (2020) implementan un enfoque RANS cuasi-permanente, el que permite mejorar la eficiencia computacional del modelo. Por lo tanto, las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7) quedan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j}) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) = \frac{-\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \overline{\rho} g_i + \mu \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}(\overline{u_i}) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho \phi u_j}) = \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}(\Gamma \overline{\phi}) - \frac{\partial Q_j}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

2.2.1.2 Modelo de turbulencia

La metodología RANS requiere de una ecuación de cierre, por lo que Baum & Gibbes (2020) implementan el modelo de turbulencia de dos ecuaciones $k - \omega$ Shear Stress Transport (SST). El modelo de turbulencia SST fue propuesto por Menter (1993) y consiste en una combinación de los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega$, a modo de obtener mayor precisión en flujos delimitados por paredes. En la región de la capa límite más próxima a la pared, el modelo $k - \omega$ SST actúa según las bases del

modelo $k - \omega$, mientras que fuera de la capa límite se convierte en el modelo $k - \epsilon$ (López et al., 2017).

La versión de flujo incompresible para el modelo $k - \omega$ SST se presenta en el Anexo A.

2.2.2 Impacto ambiental y normativa

De acuerdo con Voutchkov (2013), las consideraciones que se deben abordar en los potenciales impactos ambientales incluyen: (1) una evaluación de la dispersión de la descarga; (2) evaluación de la toxicidad del efluente; (3) evaluación cumplimiento normativa de la calidad del agua del efluente; y (4) determinación de umbral de tolerancia de organismos marinos respecto a la salinidad.

Dispersión de la descarga

Las regulaciones de calidad de agua correspondiente a descargas de concentrado de salmuera son escasas en el mundo (Abessi et al., 2018). La Tabla 2.1 resume algunas de las normativas internacionales relacionadas a los valores de salinidad permitidos, según lo tipificado en la SCCWRP (2012).

Calidad del efluente en el punto de descarga

En Chile, el Decreto Supremo DS90 regula los límites de descargas de contaminantes a aguas marinas y continentales superficiales, pero no establece límites relacionados a concentraciones salinas en la descarga ni en su entorno.

Tolerancia de organismos marinos y ecosistemas costeros

Diversos estudios e investigaciones han demostrado que una constante exposición a salinidades por sobre los niveles naturales podría perjudicar la integridad de organismos marinos, incluidos vertebrados, invertebrados, pastos marinos y poliquetas, correspondiente a gusanos que habitan en el océano (Kress et al., 2019; Lattemann et al., 2008; Petersen et al., 2018), especialmente si el efluente es descargado en cuerpos receptores sensibles.

Para identificar la vulnerabilidad de un medio marino, Hopner & Windelberg (1996) dividen los hábitats del mundo en 15 categorías, jerarquizándolos según su sensibilidad al concentrado de salmuera. En la Tabla 2.2, una sensibilidad 1 alude a zonas de baja sensibilidad, por el contrario, una sensibilidad 15 aboga a hábitats que son sensibles a una gran variedad de impactos. Como se explicará en la sección 2.4, la zona de estudio puede clasificarse con un nivel de sensibilidad 10.

La salinidad y la temperatura son factores sustanciales que manejan la distribución de las especies marinas. Gran parte de estos organismos se adaptan a cambios en las condiciones naturales del agua (Lattemann et al., 2008), sin embargo, especies como el plancton unicelular poseen baja tolerancia a aumentos de sal en su hábitat (Missimer et al., 2018).

Tabla 2.1: Regulaciones internacionales para la descarga de salmuera.
Fuente: Adaptado de Abessi (2018).

Región/Autoridad	Límite salinidad	Punto de cumplimiento (relativo a la descarga)	Fuente
Iran DOE	Incremento $\leq 10\%$	200 m	Ley medioambiental de Iran
Oman	Incremento ≤ 2 ppt	300 m	Sultanato de Oman
Abu Dabi, Emiratos Arabes Unidos	Incremento $\leq 5\%$	Borde zona de mezcla	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 $\leq 5\%$	-	-
Perth, Australia/ Western	Incremento ≤ 1.2 ppt a 50 m y ≤ 0.8 ppt a 1000m	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 zona de mezcla	Okinawa Bureau for Enterprises
EE.UU. EPA	Incremento ≤ 4 ppt	-	EPA EE.UU.

Tabla 2.2: Sensibilidad de los hábitats marinos a las descargas de salmuera.
Fuente: Adaptado de Hopner & Windelberg (1996).

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 y playa de baja energía
8	Sabkhas costeras
9	Fiordos
10	Bahía poco profunda de baja energía y laguna semicerrada
11	Esteras de algas (cianobacterias)
12	Bahía de algas y bajíos
13	Arrecifes de coral
14	Marisma salina
15	Manglar

Respecto a los organismos marinos (principales afectados), se realiza una descripción según su movilidad y hábitat, clasificándose en plancton, nekton y bentos (Kress et al., 2019):

- 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 (u 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 lecho marino.

Los organismos móviles pueden simplemente alejarse de zonas con salinidad elevada. A la inversa, organismos sésiles como las plantas y corales son más vulnerables a estas alteraciones (Missimer et al., 2018).

Posidonia oceánica, por ejemplo, es una fanerógama marina endémica del mar Mediterráneo muy sensible a perturbaciones ambientales, las evidencias muestran que ante aumentos de salinidad su crecimiento disminuye, específicamente, para salinidades superiores a 38 psu (Capó et al., 2020; Chang et al., 2015). Sobrepasos de 50 psu generan un estrés tal en esta planta, ocasionándoles el 100% de mortalidad (Chang et al., 2015).

2.3 Modelos CFD

La modelación de descarga de salmuera se lleva a cabo bajo una serie de metodologías y/o criterios. Los métodos tradicionales para informar el diseño del difusor y evaluar el cumplimiento normativo aplican ampliamente argumentos de escala semiempíricos o modelos de arrastre integral (Baum et al., 2020). Los modelos de arrastre integral utilizan herramientas comerciales para modelar condiciones en el campo cercano (Palomar et al., 2012).

Los modelos integrales proporcionan una base sólida para el diseño y la regulación, sin embargo, su capacidad para adaptarse a los procesos hidrodinámicos ambientales, las interacciones del sustrato y las configuraciones de difusores multipuerto es limitada (Baum et al., 2020) Estos procesos complejos pueden resolverse utilizando métodos de CFD.

Entre los métodos numéricos para implementar CFD, se encuentra el método de volúmenes finitos. Su objetivo consiste en transformar una ecuación diferencial parcial en ecuaciones algebraicas discretas a través de la integración de elementos discretos. Para esto se siguen dos pasos: primero, el dominio geométrico es discretizado en volúmenes finitos o elementos no-superpuestos; luego, cada ecuación diferencial se integra sobre cada elemento, resultando en ecuaciones algebraicas que representan leyes de conservación de interés (Moukalled et al., 2015).

2.4 Planta desalinizadora Minera Candelaria

La planta desalinizadora y su infraestructura asociada se ubican en una zona aledaña al Puerto Punta Padrones, a 3 km de la ciudad de Caldera, provincia de Copiapó, región de Atacama, específicamente en 70°51' de latitud sur y 27°4' de longitud Oeste. La Figura 2.6 muestra un mapa con la ubicación de la planta, la zona de captación de agua de mar y la zona de descarga de concentrado de salmuera.

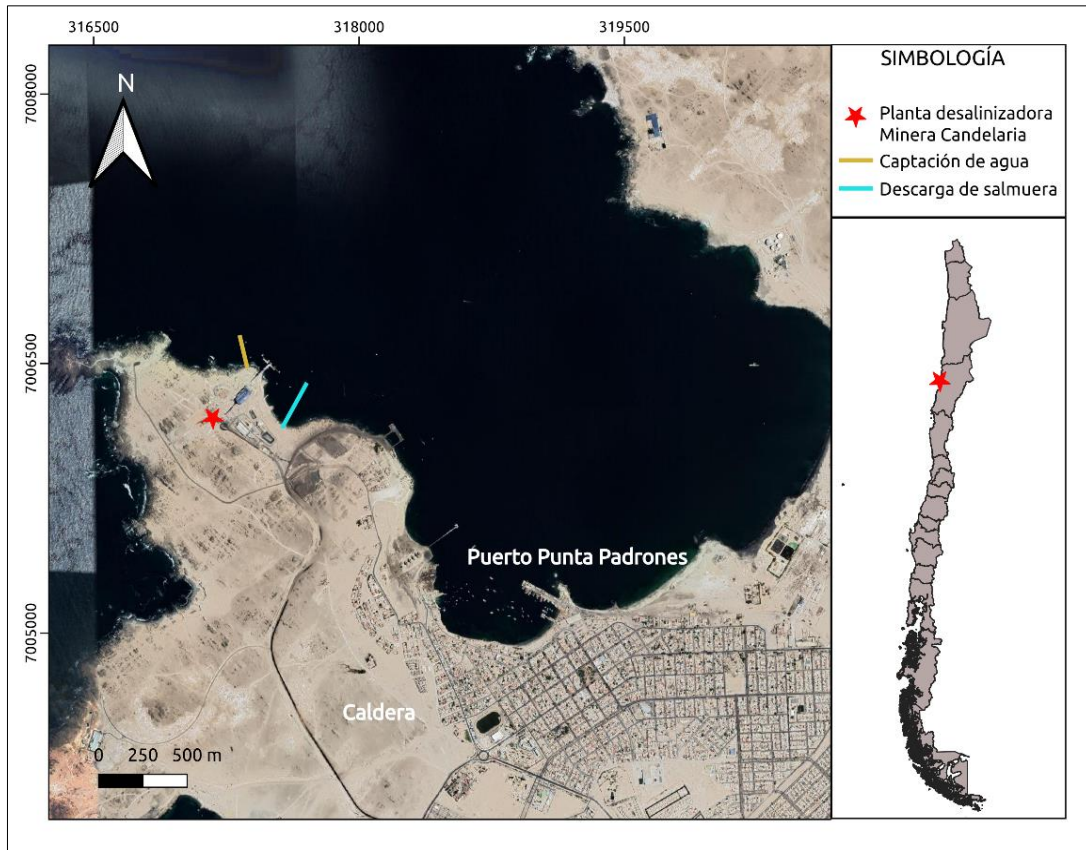


Figura 2.6: Ubicación geográfica de Planta desalinizadora Minera Candelaria y zonas de captación y descarga de aguas.
Fuente: Elaboración propia.

El sector donde se encuentra emplazada la planta presenta arena suelta con algunas puntas rocosas. El interior de la bahía es poco profundo, mientras que la parte exterior aumenta en profundidad (ARKA, 2010). Conforme a lo anterior y a lo dispuesto en la Tabla 2.2, el hábitat se clasifica con un nivel de sensibilidad de 10 (bahía poco profunda de baja energía y laguna semicerrada).

La planta opera con un sistema de osmosis inversa, y descarga la salmuera de rechazo a través de un difusor de longitud L y diámetro ϕ_d . Las especificaciones técnicas del sistema de descarga se observan en la Figura 2.7 y están registradas en la Tabla 2.3.

La Tabla 2.4 denota las principales características del efluente de salmuera para los meses de septiembre y diciembre, en relación con el estudio de ARCADIS (2010). Aquí, la salinidad de exceso es evaluada respecto a la salinidad del medio marino. Además, para este caso se establece que los estándares ambientales se alcanzan con un exceso máximo del 10% en relación con la salinidad del mar (PRDW, 2010).

Tabla 2.3: Características del difusor.
Fuente: Adaptado de PRDW (2010).

Parámetro	Valor
d: Profundidad media	-22 m NRS ¹
ϕ_d : Diámetro del difusor	650 mm
L: Longitud del difusor	18 m
n: Número de portas	10
e: Espaciamiento de portas	4 m
ϕ_p : Diámetro de portas	150 mm
Tipo de boquilla	Duckbill
Ángulo c/r a la horizontal de portas	60°

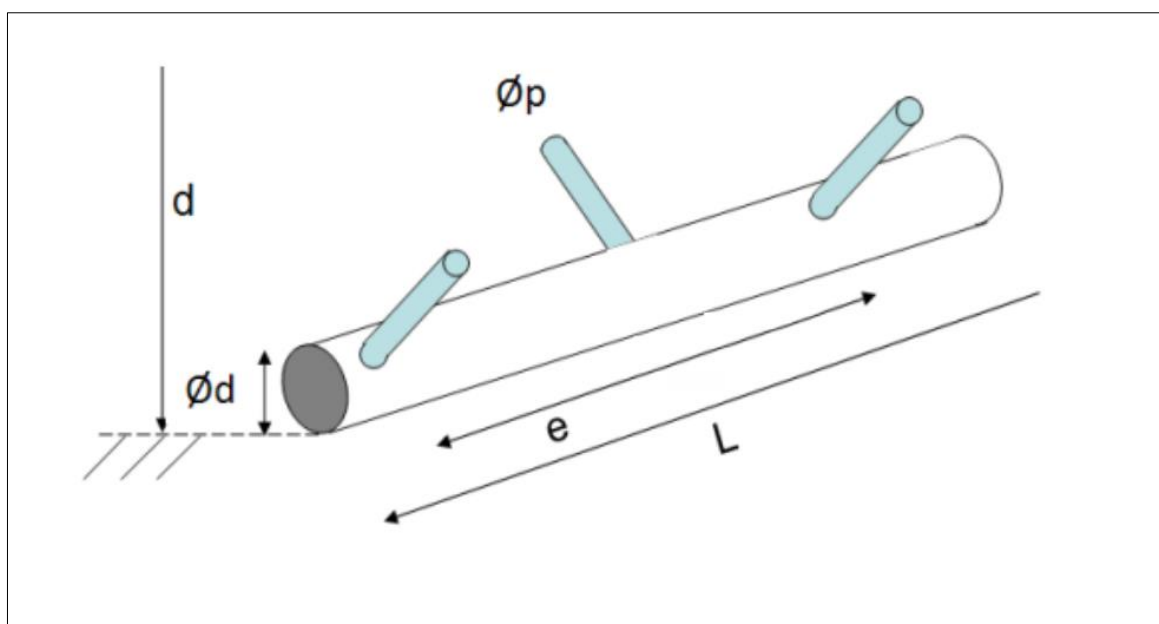


Figura 2.7: Variables de diseño del difusor.
Fuente: Adaptado de PRDW (2010)

¹ Nivel de Reducción de Sondas

Tabla 2.4: Características del efluente.
Fuente: Recuperado de ARCADIS (2010).

Parámetro	Septiembre	Diciembre
Caudal mínimo	393 L/s	393 L/s
Caudal máximo	655 L/s	655 L/s
Temperatura	13°C	15°C
Salinidad	60.95 psu	60.9 psu
Densidad	1046.0 kg/m ³	1045.2 kg/m ³

Respecto a la vida marina circundante, el estudio de ARCADIS (2010) identifica:

- Comunidades planctónicas: En el periodo invernal del 2009 la comunidad fitoplanctónica estuvo compuesta de 44 especies, mientras que, en el periodo estival se alcanzaron 22 especies. En ambos casos, las especies dominantes conforman el grupo de las diatomeas.
- Comunidades intermareales: Se observa una homogeneidad de especies a nivel temporal y espacial-horizontal. En particular, se registran parches significativos de *P.purpuratus* estables en el tiempo, por lo que modificaciones de esta especie parecen ser un buen indicador de alteraciones en las condiciones ambientales en la zona.
- Comunidades submareales: La comunidad bentónica presenta una alta riqueza el área contigua a Punta Padrones con densidades de individuos que varían entre 8900 y 12200 individuos por m².
- Fauna ictica: Se registraron tres especies típicas de la zona, entre ellas, la especie *Cheilodactylus variegatus* (Bilagay), *Pinguipes chilensis* (rollizo) y *Chromis crusma* (Castañeta Común). Las primeras dos corresponden a objetivos de pesca artesanal y consumo fresco.

En el año 2010, cuando el proyecto se encontraba en fase de diseño, la Compañía Contractual Minera Candelaria, a través de la empresa ARCADIS Chile solicitó los servicios de PRDW Aldunate Vásquez para la realización de un estudio del comportamiento y dilución en el océano producto de descargas de salmuera.

El modelo de dilución se obtuvo del modelo integral Cormix v3.0, con los siguientes escenarios para la modelación de campo cercano: (1) velocidad de la corriente $U_a = [0.05\text{cm/s}, 0.1\text{m/s}, 0.2\text{m/s}, 0.35\text{m/s} \text{ y } 0.5 \text{ cm/s}]$ (ARCADIS, 2010), (2) Dirección de la corriente a favor y en contra de la descarga, y (3) para un $Q_{min}=393 \text{ L/s}$ y $Q_{max}=655 \text{ L/s}$. La velocidad U_a corresponde a mediciones realizadas con un ADCP a 5 m de altura desde el fondo.

Las Figuras 2.8 y 2.9 exponen los resultados en corte para las velocidades ambientales $U_a=0.35$ m/s y $U_a=0.5$ m/s respectivamente. La Figura 2.10 muestra una vista en planta del área de influencia de la pluma salina. En base a estos resultados, en esta memoria se pretende analizar y comparar la distribución de la pluma salina bajo los supuestos de un modelo numérico CFD implementado en OpenFOAM.

2.5 Comentarios

De la revisión bibliográfica se extraen las siguientes conclusiones:

- El sistema de descarga de salmuera puede componerse de una sola tubería hasta sistemas de difusión más complejos. Actualmente, este último es uno de los más aplicados, puesto que optimiza la dilución y dispersión de la descarga en la zona de mezcla activa. Con el objetivo de acrecentar la dilución y disminuir anomalías salinas, algunas plantas premezclan la salmuera con agua de mar.
- Diversos estudios demuestran el impacto en la biota marina ante una alteración de los niveles naturales de salinidad. En organismos más sensibles puede significar una disminución en su crecimiento, e incluso la mortandad.
- Los modelos de arrastre integral, que involucran softwares comerciales, son ampliamente aplicados en la industria para determinar condiciones de diseño y el cumplimiento de regulaciones ambientales. No obstante, las principales limitaciones en estos enfoques derivan en que los resultados se acotan a una región de campo cercano, no modelan interacciones con límites ni interacciones entre plumas. Por lo tanto, para efectos comparativos con el modelo numérico, se deben considerar las zonas que cumplan con estas condiciones.
- La totalidad de las normativas estudiadas, asociadas a la dispersión de descargas de salmuera, son de origen extranjero.
- Experimentos con modelación en CFD (específicamente en OpenFOAM), como los de Baum & Gibbes (2020), comprueban significantes avances en el estudio del comportamiento del chorro salino eyectado y su dilución en zonas lejanas.

De acuerdo con lo anterior, la hipótesis de trabajo se centra en comprobar que el modelo numérico implementado en OpenFOAM es capaz de representar las interacciones entre la salmuera eyectada y el cuerpo receptor. Para esto, se seguirán los principales enfoques del estudio de Baum & Gibbes (2020).

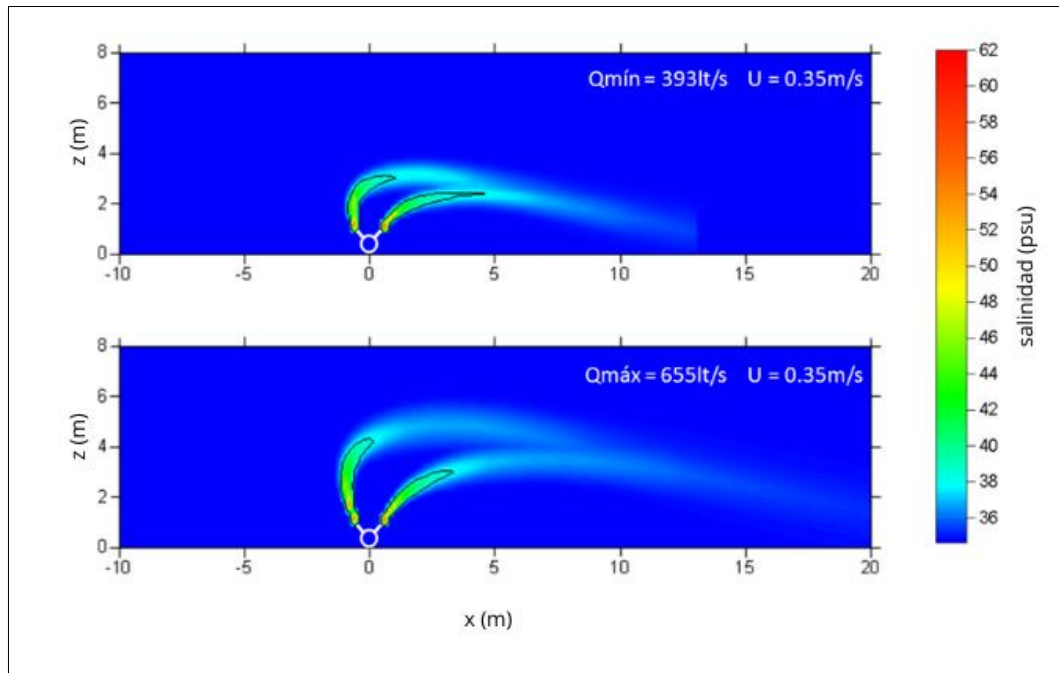


Figura 2.8: Vista en corte de dilución para $U_a = 0.35$ m/s. La línea negra indica el estándar ambiental requerido, en donde se alcanza el 10% de exceso salino.
Fuente: Adaptado de PRDW (2010).

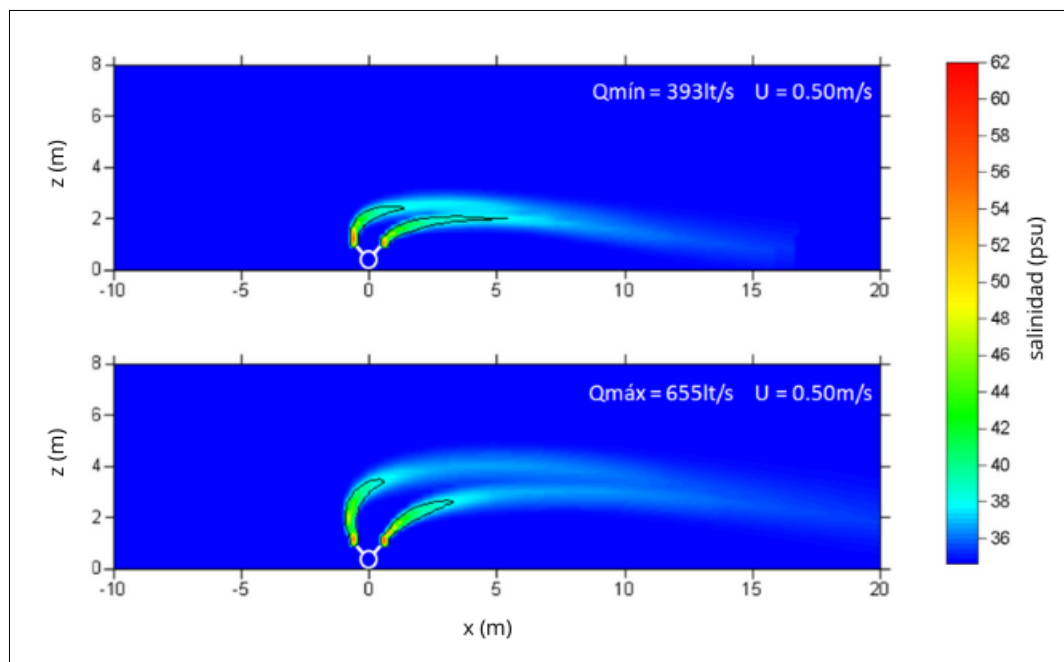


Figura 2.9: Vista en corte de dilución para $U_a = 0.5$ m/s. La línea negra indica el estándar ambiental requerido, en donde se alcanza el 10% de exceso salino.
Fuente: Adaptado de PRDW (2010).

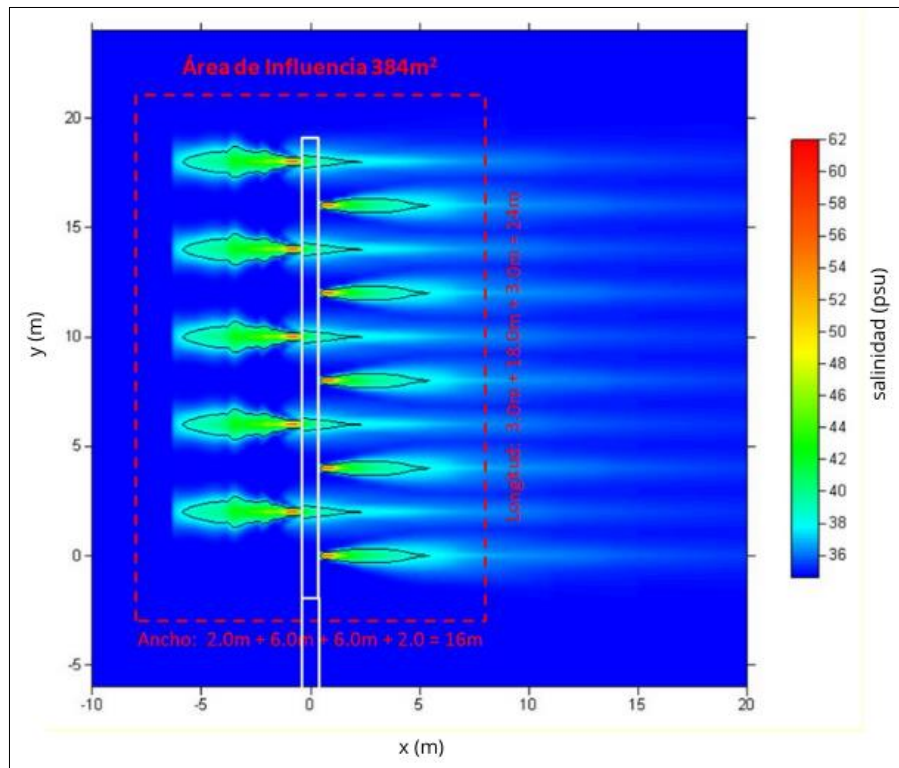


Figura 2.10: Vista en planta del área de influencia de la pluma salina.
 Fuente: Adaptado de PRDW (2010).

CAPÍTULO 3: MODELO CONCEPTUAL

Este capítulo tiene como objetivo establecer las variables principales que condicionan el modelo numérico, relacionadas a la hidrodinámica del entorno en su estado natural e intervenido.

3.1 Propiedades ambientales

Las corrientes marinas corresponden a una de las forzantes con mayor implicancia en el comportamiento del modelo. Según su origen pueden clasificarse en: corrientes de densidad causadas por diferencia de densidad y temperatura; corrientes de arrastre, forzadas por el viento; corrientes de marea, ocasionadas por la variación en el nivel de mar; y corrientes generadas por olas. En condiciones naturales se considera que no existe presencia de corrientes de densidad. Además, dada la ubicación del sistema difusor, los efectos por marea y olas se desprecian.

En el estudio de dilución realizado por PRDW en 2010 no existe información relacionada a mediciones de viento, sin embargo, se dispone de mediciones realizadas con un correntómetro multicapas de tipo ADCP, capaz de generar perfiles de magnitudes y direcciones en la columna de agua. Las probabilidades de ocurrencia y de no excedencia de magnitud de corrientes muestran que:

- Para corrientes marinas en capas profundas (5 m de altura desde el fondo) predomina la dirección NW, es decir, la dirección perpendicular al sistema de difusión.
- La máxima corriente registrada en dirección perpendicular al emisario alcanza los 0.24 m/s, a una elevación de 5 m desde el suelo.
- La magnitud máxima de corriente es de 0.33 m/s, a una elevación de 5 m desde el suelo.

Para el caso se utilizan las mismas consideraciones de velocidad que PRDW, por lo que U_a corresponde a la magnitud de velocidad media a 5 m desde el fondo del lecho marino.

La empresa también cuenta con perfiles de densidad en una columna de agua de ~ 20 m de altura, para los meses de septiembre y diciembre. Las mediciones fueron realizadas con un dispositivo CTD en el sector de Punta Padrones. En ellas se identifica que para el mes de septiembre las variaciones de densidad en la profundidad se consideran despreciables, alcanzando un valor promedio de 1026.1 kg/m³. En cambio, en diciembre, la superficie tiene una densidad promedio de 1024.7 kg/m³ y el fondo una de 1025 kg/m³.

En este trabajo solo se estudian las condiciones asociadas al mes de septiembre, con el objetivo de analizar el escenario de mayor contenido salino. En consecuencia, se considera que inicialmente la columna de agua presenta un perfil de densidad constante, equivalente a 1026.1 kg/m^3 .

Otras constantes

En los estudios de chorros densos inclinados, Baum (2020) y Zhang (2017) emplean un número turbulento de Schmidt de 0.7, una difusividad de $1.4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, y una viscosidad cinemática de $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Aquí, se debe notar que los aportes por difusividad en el campo cercano son menores en comparación a procesos dominantes como la advección, la flotabilidad y la dinámica de la corriente.

3.2 Propiedades de descarga

Las propiedades de descarga utilizadas en las simulaciones se ajustan a una operación del 100% de la planta. En este sentido, el caudal total de salida corresponde a $Q_T=0.655 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando que el flujo se distribuye uniformemente en las 10 portas del difusor, se tiene $Q_0=0.0655 \text{ m}^3/\text{s}$. Bajo estas condiciones, la descarga ocurre con un número de Froude densimétrico $F_d=21.95$. Definido por:

$$F_d = U_d / \sqrt{g'_0 d} \quad (3.1)$$

donde U_d corresponde a la velocidad media de descarga, d el diámetro de la porta de salida y $g'_0 = g(\rho - \rho_0)/\rho_0$.

Conforme al informe de dilución presentado por PRDW en 2010, las condiciones ambientales para densidad y salinidad varían durante el año. Existe una diferencia apreciable en los meses de septiembre y diciembre. En la Tabla 3.1 se resumen los valores ambientales y de descarga para cada uno de los meses. Como se comentó anteriormente, para la ejecución del modelo se consideran los parámetros correspondientes al mes de septiembre.

El análisis de cumplimiento de normativa contempla las referencias de la Tabla 2.1. La Tabla 3.2 resume la salinidad admisible (S_{adm}) y salinidad de exceso admisible (S_{ex_adm}) para cada una de las fuentes. S_{adm} corresponde a la salinidad que cumple con los requisitos de la normativa, y S_{ex_adm} indica la diferencia entre la salinidad admisible y la ambiental. Para el análisis se seleccionan: incrementos $\leq 10\%$, para comparar con el estudio de dilución existente; incrementos $\leq 5\%$, para analizar un caso intermedio; e incrementos $\leq 1 \text{ ppt}$, correspondiente al caso más restrictivo. Aquí, se puede asumir que 1 ppt equivale a 1 psu .

Tabla 3.1: Parámetros de descarga Planta desalinizadora Minera Candelaria y parámetros ambientales en zona circundante. S_{adm}^* y $S_{ex_adm}^*$ corresponden a los valores más restrictivos por normativa.

	Septiembre	Diciembre
Q_T (m ³ /s)	0.655	0.655
ρ_0 (kg/m ³)	1026.1	1025.0
ρ_d (kg/m ³)	1046.0	1045.2
S_a (psu)	34.55	34.50
S_d (psu)	60.95	60.90
$S_{exc_adm}^*$ (psu)	1.00	1.00
S_{adm}^* (psu)	35.55	35.50

Tabla 3.2: Resumen valores de salinidad para referencias de Tabla 2.1.

Región/Autoridad	Límite salinidad	S_{exc_adm} (psu)		S_{adm} (psu)	
		Sep	Dic	Sep	Dic
Iran DOE	Incremento $\leq 10\%$	3.46	3.45	38.01	37.95
Oman	Incremento ≤ 2 ppt	2.00	2.00	36.55	36.5
Abu Dabi, Emiratos Arabes Unidos	Incremento $\leq 5\%$	1.73	1.73	36.28	36.23
Carlsbad, California, EE.UU.	Absoluto ≤ 40 ppt	5.45	5.50	40.00	40.00
Huntington Beach, California, EE.UU.	Absoluto ≤ 40 ppt salinity (expresada como la dilución de la descarga en un radio de 7.5:1)	5.45	5.50	40.00	40.00
Western, Australia (pautas)	Incremento $\leq 5\%$	1.73	1.73	36.28	36.23
Perth, Australia/ Western	Incremento ≤ 1.2 ppt a 50m y ≤ 0.8 ppt a 1000m	1.20	1.20	35.75	35.70
Sydney, Australia	Incremento ≤ 1 ppt	1.00	1.00	35.55	35.50
Gold Coast, Australia	Incremento ≤ 2 ppt	2.00	2.00	36.55	36.50
Okinawa, Japón	Incremento ≤ 1 ppt	1.00	1.00	35.55	35.50
EE.UU. EPA	Incremento ≤ 4 ppt	4.00	4.00	38.55	38.50

3.3 Condiciones de borde y dimensiones generales

Las Figuras 3.1 y 3.2 esquematizan la geometría del modelo 3D y sus dimensiones generales. El modelo 2D queda representado por la Figura 3.3.

La cota inicial del sistema de difusores se ubica a -20 m NRS con una pendiente del 12% en el sentido del emisario. El sistema difusor está compuesto por una tubería de largo $L=18$ m y diámetro $D=650$ mm, con $n=10$ portas (cinco en cada brazo del difusor) de diámetro $d=150$ mm cada una, distanciadas por $L_p=2$ m. Para examinar el ángulo en planta entre la dirección de la corriente y la dirección de propagación del flujo de salmuera se utiliza ϕ_a (Baum et al., 2020). Aquí, $\phi_a=0^\circ$ para contraflujo y $\phi_a=180^\circ$ para coflujo. La dirección de descarga queda determinada por el ángulo θ_0 , que según las condiciones de diseño equivale a $\theta_0=60^\circ$ respecto a la horizontal.

Las entradas al modelo corresponden al flujo causado por la corriente marina, proveniente de la dirección transversal del sistema de difusores; y el efluente de salmuera, evacuado en cada una de las portas. Puesto que el chorro de salmuera no alcanza la superficie libre, se considera como una tapa rígida. El fondo marino se modela como una pared con velocidades nulas, de modo que, las caras restantes del modelo representan las salidas de flujo en el sistema.

En la columna de agua actúa la presión hidrostática y como fue señalado anteriormente, se considera que no existe una estratificación de densidad inicial.

3.4. Ecuaciones del modelo

En relación con la bibliografía, las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la turbulencia para fluidos incompresibles permiten describir el comportamiento del modelo. Para este estudio se implementan las formulaciones (2.5), (2.6) y (2.7), que respectivamente, aluden a la ecuación de continuidad, momentum y transporte.

3.5 Modelo de turbulencia

El interés inicial de esta memoria consiste en examinar el comportamiento general de los chorros de salmuera, por lo que se decide ocupar el modelo $k - \epsilon$. Bajo este supuesto, las predicciones asociadas a las tasas de disipación turbulenta en regiones cercanas a las paredes (especialmente en el fondo marino) podrían tener baja precisión.

Este modelo de turbulencia se utiliza como un modelo de cierre para la metodología RANS. Lo componen dos ecuaciones, donde k corresponde a la energía cinética turbulenta y ϵ a la tasa de disipación de energía cinética turbulenta.

Incluyendo el término boyante, las ecuaciones de transporte para k y ϵ simplificadas, quedan dadas respectivamente, por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G + P - \epsilon \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P + G) (1 + c_{3\epsilon} R_f) - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.3)$$

donde v_t corresponde a la viscosidad cinemática turbulenta, P la producción de energía cinética turbulenta, G al término boyante y R_f al número de flujo de Richardson ($R_f = -\frac{G}{P+G}$). Las variables $\sigma_k, \sigma_\epsilon, c_{1\epsilon}, c_{2\epsilon}$ y $c_{3\epsilon}$ representan constantes empíricas del sistema, cuyos valores se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Constantes empíricas del modelo $k-\epsilon$.

σ_k	σ_ϵ	$c_{1\epsilon}$	$c_{2\epsilon}$	$c_{3\epsilon}$
1.00	1.30	1.44	1.92	0.80

El modelo calcula la viscosidad cinemática turbulenta v_t como:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.4)$$

donde C_μ es una constante empírica igual a 0.09.

El término del modelo asociado a la boyancia no se considera en este estudio, por lo que $G=0$. Sus implicancias en los resultados se interpretan en el Capítulo 5.

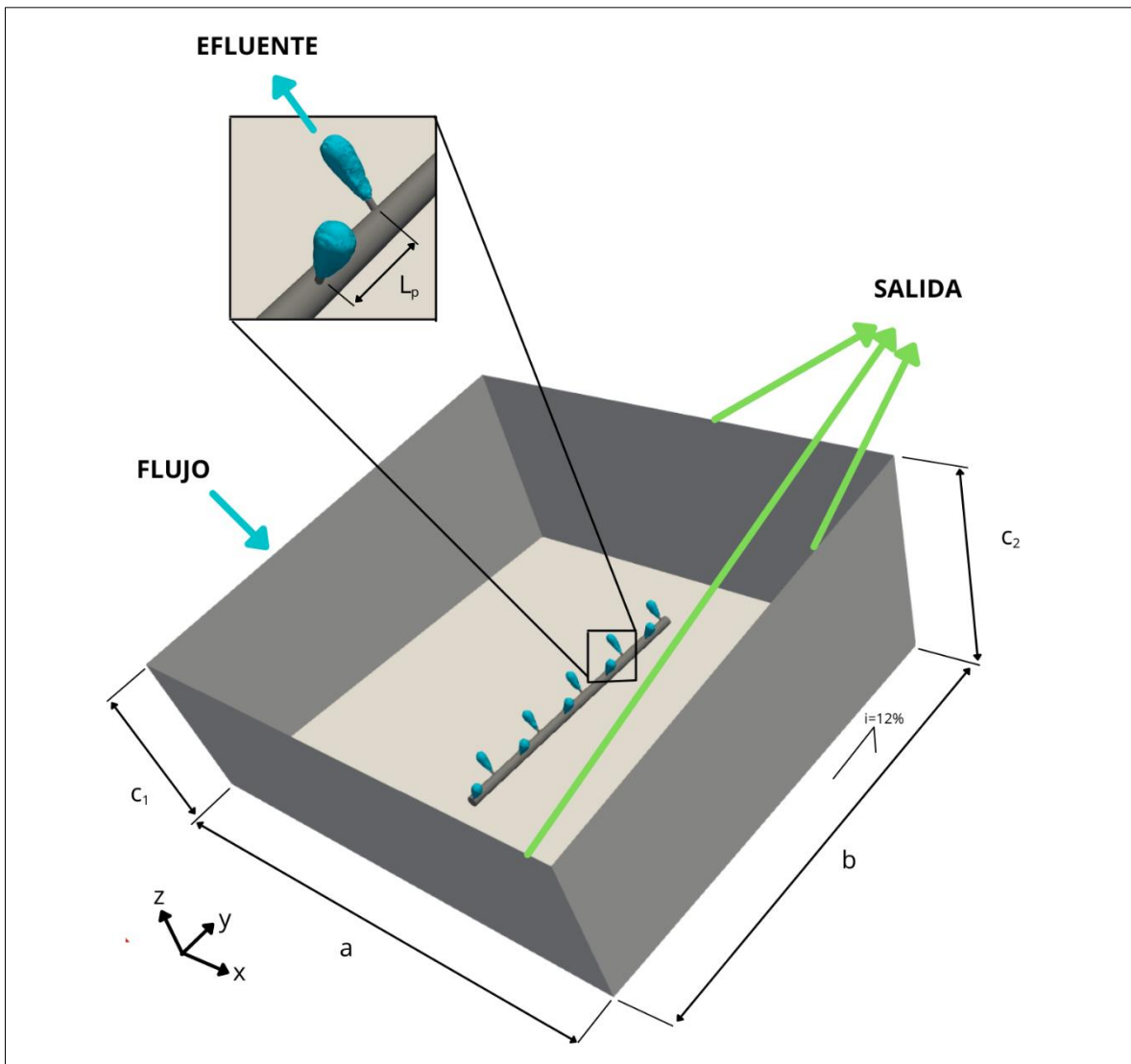


Figura 3.1: Modelo conceptual y dimensiones del modelo 3D. Las flechas en color celeste denotan la entrada de flujo en el sistema, mientras que las flechas en color verde corresponden a la salida de flujo. Las variables a , b , c_1 y c_2 varían según el escenario de simulación.

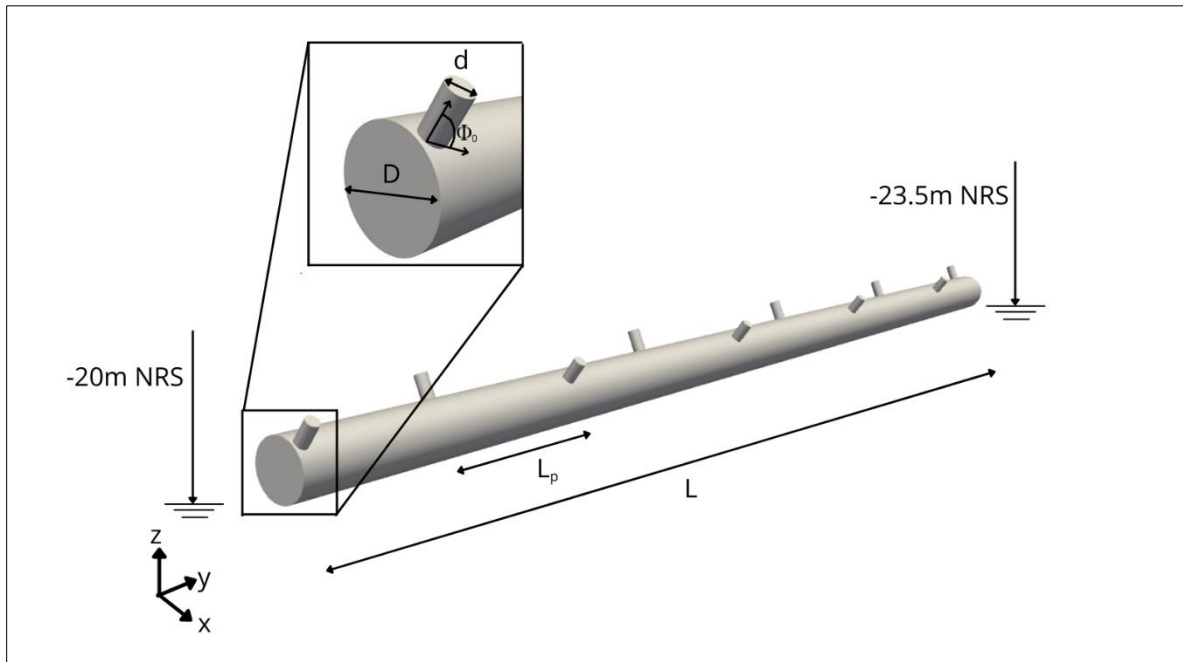


Figura 3.2: Geometría del difusor multipuerto.

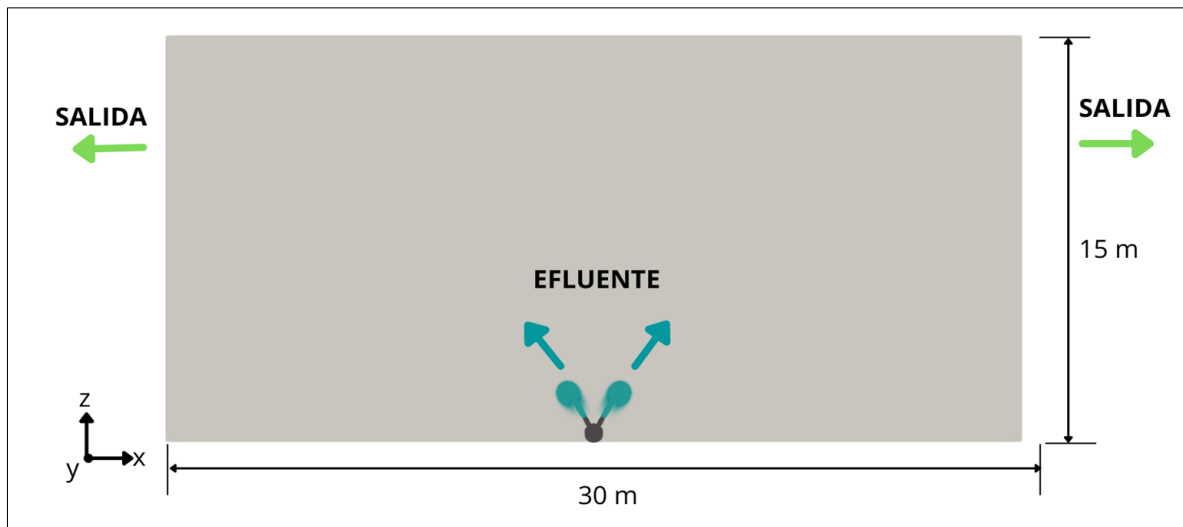


Figura 3.3: Modelo conceptual y dimensiones del modelo 2D. Las flechas en color celeste denotan la entrada de flujo en el sistema, mientras que las flechas en color verde corresponden a la salida de flujo.

CAPÍTULO 4: MODELO NUMÉRICO EN OPENFOAM

Este capítulo expone la metodología de creación de modelos CFD en dos y tres dimensiones. Estos pretenden describir el comportamiento de descargas de salmuera en un cuerpo receptor marino, bajo condiciones de diseño específicas de la planta desalinizadora Minera Candelaria. En primera instancia se simplifica el sistema con un modelo bidimensional, con el objetivo de reconocer la conducta general de dilución para una y dos portas del sistema difusor. Posteriormente, se elabora un modelo en tres dimensiones que incluye el sistema completo de difusión.

4.1 OpenFOAM

OpenFOAM es un software de código abierto que utiliza volúmenes finitos, y es capaz de resolver una gran variedad de problemas industriales (Moukalled et al., 2015).

En OpenFOAM, un modelo requiere construir una estructura de carpetas con un formato estándar, que los solucionadores o solvers utilizan para identificar las condiciones de borde, condiciones iniciales, grilla de cálculo, entre otros requerimientos. Esta estructura consiste en un directorio con tres carpetas: *system*, *constant* y *0*.

La carpeta *system* contiene los archivos de configuración relacionados al procedimiento de resolución del problema. Para inicializar una simulación se deben tener al menos tres diccionarios (formato en OpenFOAM que transmite palabras claves para ser entendidas por el usuario): *controlDict*, *fvSolution* y *fvSchemes*. El diccionario *controlDict* controla parámetros de ejecución del caso como el tiempo, formato de escritura de datos de salida, y además se pueden añadir librerías para el tratamiento de datos. En *fvSolution* se almacenan los solucionadores para cada ecuación del caso y algoritmos de control. En el diccionario *fvSchemes* se ejecutan los esquemas de discretización usados en el caso. En particular, para este trabajo, en el directorio *system* se adicionan los diccionarios *blockMeshDict* y *snappyHexMeshDict* que controlan el mallado; el diccionario *decomposePar* para subdividir el dominio; el diccionario *surfaceFeatureExtract* para la extracción de los contornos de un dibujo; y los diccionarios *extrudeMesh* y *createPatchDict* que prestan utilidad para transformar un caso 3D a uno 2D.

El directorio *constant* contiene al menos, información relacionada a la malla del caso en una subcarpeta con el nombre *polyMesh*, y además almacena información característica de propiedades físicas del caso como *transportProperties*, *turbulenceProperties* y *g*. Además, para utilizar la herramienta *snappyHexMesh* se requiere adicionar una subcarpeta con el nombre *triSurface* que contenga los archivos de dibujos en 3D.

Finalmente, la carpeta *0* contiene archivos de los campos de interés en el problema a resolver, por ejemplo, campos de velocidad, presión, concentración y tasa de disipación de turbulencia. En cada uno el usuario debe especificar las condiciones de borde e iniciales para cada parche generado en la malla.

En la Figura 4.1 se visualiza el contenido inicial en el directorio de un caso de simulación implementado en esta memoria.

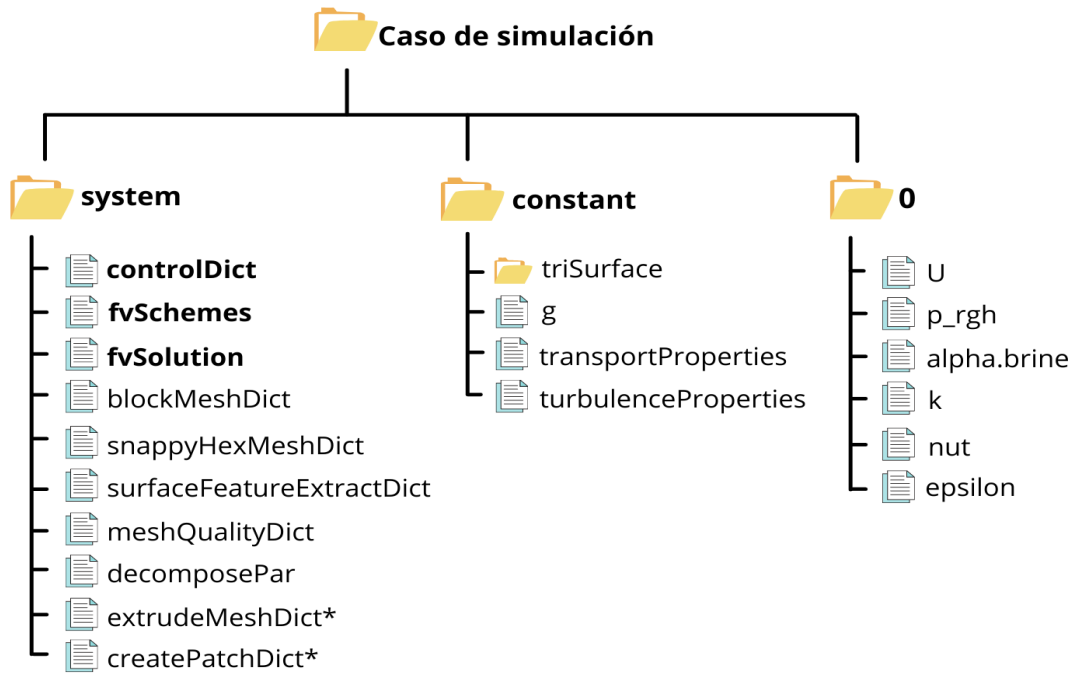


Figura 4.1: Carpetas y diccionarios contenidos en un caso a simular. En negrita se destacan las carpetas y diccionarios mínimas para inicializar un caso en OpenFOAM. Con * se alude a los diccionarios empleados en simulaciones 2D.

4.1.1 Solver twoLiquidMixingFoam

Para este trabajo se utiliza la versión v2006 de OpenFOAM. Dentro del software se hallan una amplia gama de solucionadores que resuelven ecuaciones específicas según sea el caso. El solver *twoLiquidMixingFoam* es de tipo multifase y resuelve ecuaciones de flujo transiente para la mezcla de dos fluidos incompresibles. El flujo generado por este solucionador reside en la diferencia de densidad impuesta en un inicio. Los cambios en su concentración quedan representados por la variable *alpha.brine*, la que indica la fracción de salmuera presente en el agua.

4.2 Configuración del modelo

4.2.1 Condiciones de borde

Para configurar las condiciones de borde en OpenFOAM se divide el sistema en patches, término apodado para un conjunto de caras que tienen una condición física en común. El modelo lo conforman seis patches: *inlet*, *effluent*, *outlet*, *freeSurface*, *diffuser* y *bottom*. El borde *inlet*

representa el ingreso de la corriente marina, *effluent* la entrada de salmuera, *outlet* la salida de flujo, *freeSurface* la cara que está en contacto con la atmósfera, *diffuser* la estructura compuesta por el emisario y las portas, y *bottom* el fondo marino. La Figura 4.2 muestra los patches para el caso tridimensional.

La Tabla 4.1 visibiliza las condiciones de borde impuesta en cada patch del modelo y cada variable.

Para el caso de k , ν y ϵ se utilizan las funciones empíricas de pared *WallFunctions*, las cuales describen la región turbulenta cercana a una pared. Su uso requiere ajustar el espaciamiento en la pared, a modo de verificar la condición y^+ . Sin embargo, como se comentó en el capítulo anterior, el enfoque de este estudio se centra en la dilución asociada a turbulencia ambiental, por lo que cobra poca relevancia chequear este parámetro. En consecuencia, para un mejor uso de *WallFunctions* conviene mejorar el grillado en zonas próximas a la pared y aplicar un modelo de turbulencia que permita describir dichas zonas.

Tabla 4.1: Condiciones de borde fijadas en carpeta 0 de OpenFOAM.

Patch	alpha.brine	U	p_rgh	k	nut	epsilon
<i>inlet</i>	fixedValue (valor=0)	fixedValue (valor=Ua)	zeroGradient	fixedValue (valor=0.0185)	calculated	fixedValue (valor~0)
<i>effluent</i>	inletOutlet	flowRate InletVelocity (valor=Q ₀)	zeroGradient	fixedValue (valor=0.0003)	calculated	fixedValue (valor=0.56)
<i>outlet</i>	inletOutlet	zeroGradient	fixedMean	zeroGradient	calculated	zeroGradient
<i>freeSurface</i>	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	calculated	zeroGradient
<i>diffuser</i>	zeroGradient	noSlip	zeroGradient	kqRWall Function	nutkWall Function	epsilonWall Function
<i>bottom</i>	zeroGradient	noSlip	zeroGradient	kqRWall Function	nutkWall Function	epsilonWall Function

El enfoque del modelo bidimensional se centra en analizar el comportamiento general del vertido de salmuera, razón por la cual no se incorpora el efecto de la corriente marina en el sistema. Por lo tanto, las condiciones de borde aplicadas corresponden a *effluent*, *outlet*, *freeSurface*, *diffuser* y *bottom* de la Tabla 4.1.

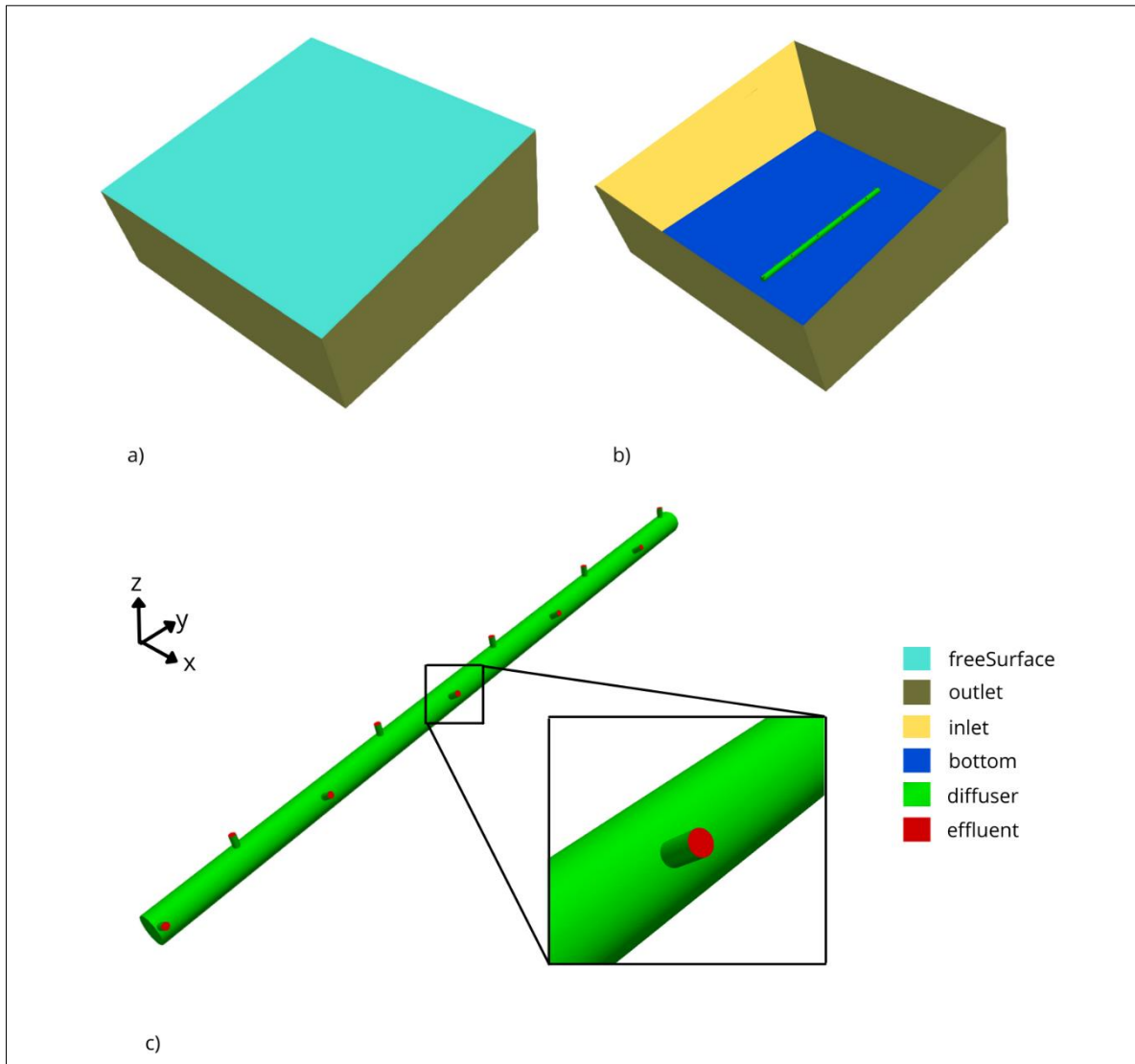


Figura 4.2: Patches para modelo tridimensional. La Figura a) muestra las caras exteriores del volumen de control, la Figura b) muestra las caras interiores, y la Figura c) presenta los patches para el sistema de difusión.

4. 2. 2. Condiciones iniciales

4.2.2.1 Velocidad

Los casos de modelación, como se explicará más adelante, se separan en dos estados. El primero, un caso general sin velocidad ambiental, y el segundo, un sistema alterado por dichas velocidades. En el primer estado solo existe velocidad inicial en las salidas de las portas, generada por el caudal de diseño Q_T . Para el segundo estado, se le suma a lo anterior, una velocidad ambiental uniforme constante.

El modelo bidimensional solo considera velocidades asociadas al caudal eyectado de las portas. La estimación de dicha velocidad requiere calcular previamente el área de salida, correspondiente al área del patch *effluent*.

4.2.2.2 Presión

Suponiendo que las caras en donde hay salida de flujo (Figura 3.1 y 3.3) no se ven afectadas por la presión, se establece que la presión en dichos puntos equivale a la presión hidrostática. Como se analiza en el Capítulo 5, para asegurar dicha condición resulta imprescindible generar un dominio lo suficientemente grande, según sea el escenario simulado.

4.2.2.3 Modelo de turbulencia

Para efectos del estudio se aplica el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$, como fue expuesto en la sección 3.5. Las aproximaciones iniciales para la energía cinética turbulenta y tasa de disipación vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$k = \frac{2}{3}(U_{ref}I)^2 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{0.164k^{1.5}}{0.07l} \quad (4.2)$$

donde U_{ref} corresponde a la magnitud de la velocidad media característica, I la intensidad de turbulencia y l el largo escalar de turbulencia. Para la condición de borde *inlet*, U_{ref} corresponde a la magnitud de la corriente marina, en cambio, para la condición de *effluent* se emplea la magnitud de la velocidad de salida de una boquilla.

El coeficiente l puede ser aproximado a (Baum et al., 2020):

$$l = 0.07D_h \quad (4.3)$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (4.4)$$

donde D_h el diámetro hidráulico, A el área de flujo y P el perímetro mojado.

Baum & Gibbes (2020) demostraron una baja sensibilidad en su modelo ante variaciones en la intensidad de turbulencia ambiental I_a . Para efectos del problema se adopta una intensidad media de $I_a=5\%$. El cálculo de la intensidad de turbulencia en la descarga I_d , viene dado por (Russo et al., 2016):

$$I_d = 0.16Re^{-1/8} \quad (4.5)$$

donde Re corresponde al número de Reynolds de la descarga.

4.2.3 Mallado

Para generar la malla se implementa la herramienta *snappyHexMesh*, la cual construye mallas en tres dimensiones compuestas por hexaedros. El procedimiento involucra crear (1) una malla de fondo con *blockMesh*, (2) dibujar la geometría del difusor multipuerto, (3) la aplicación de *snappyHexMesh* y (4) un refinado acorde a la dirección del gradiente de concentración. Para definir algunos de los niveles de refinamiento se utiliza el parámetro $\alpha = \frac{c-C_0}{C_d-C_0}$, donde c corresponde a la concentración salina local, C_d a la concentración salina de descarga y C_0 a la concentración salina ambiental.

En (1), la malla de fondo impone el ancho máximo de celda. La relación radio de celda debe ser aproximadamente 1 en superficies cercanas a la geometría de (2), a modo de aumentar la convergencia de la herramienta *snappyHexMesh*. La confección del difusor multipuerto en (2) tiene lugar en las aplicaciones FreeCAD y SALOME.

Una vez integrada la malla de fondo y la geometría correspondiente, *snappyHexMesh* en (3) se encarga de remover las celdas internas del dibujo 3D (la herramienta también permite ejecutar el procedimiento contrario) y refinar sus regiones externas. Para este último, *snappyHexMesh* puede refinar zonas próximas a los bordes de la geometría, y zonas definidas por cajas y esferas.

Dadas las particularidades del problema a modelar, el refinado en (4) debe ajustarse conforme al avance de la pluma salina y sus cambios en concentración salina. Dado que la herramienta de autorefinado, ideal para este tipo de casos, no viene integrada en el solucionador, se decide adoptar un refinado manual. Los métodos de refinado adoptados para el caso 2D y 3D se explican a continuación.

Caso 2D

La trayectoria del chorro muestra que los gradientes de concentración más elevados ocurren a la salida de cada porta, correspondiendo, en consecuencia, a las zonas con celdas de mayor refinado. Para caracterizar este fenómeno en la malla se decide generar cajas con distinto nivel de refinado. La Figura 4.3 muestra la configuración adoptada y la Tabla 4.2 el resumen con el valor para cada nivel de refinado.

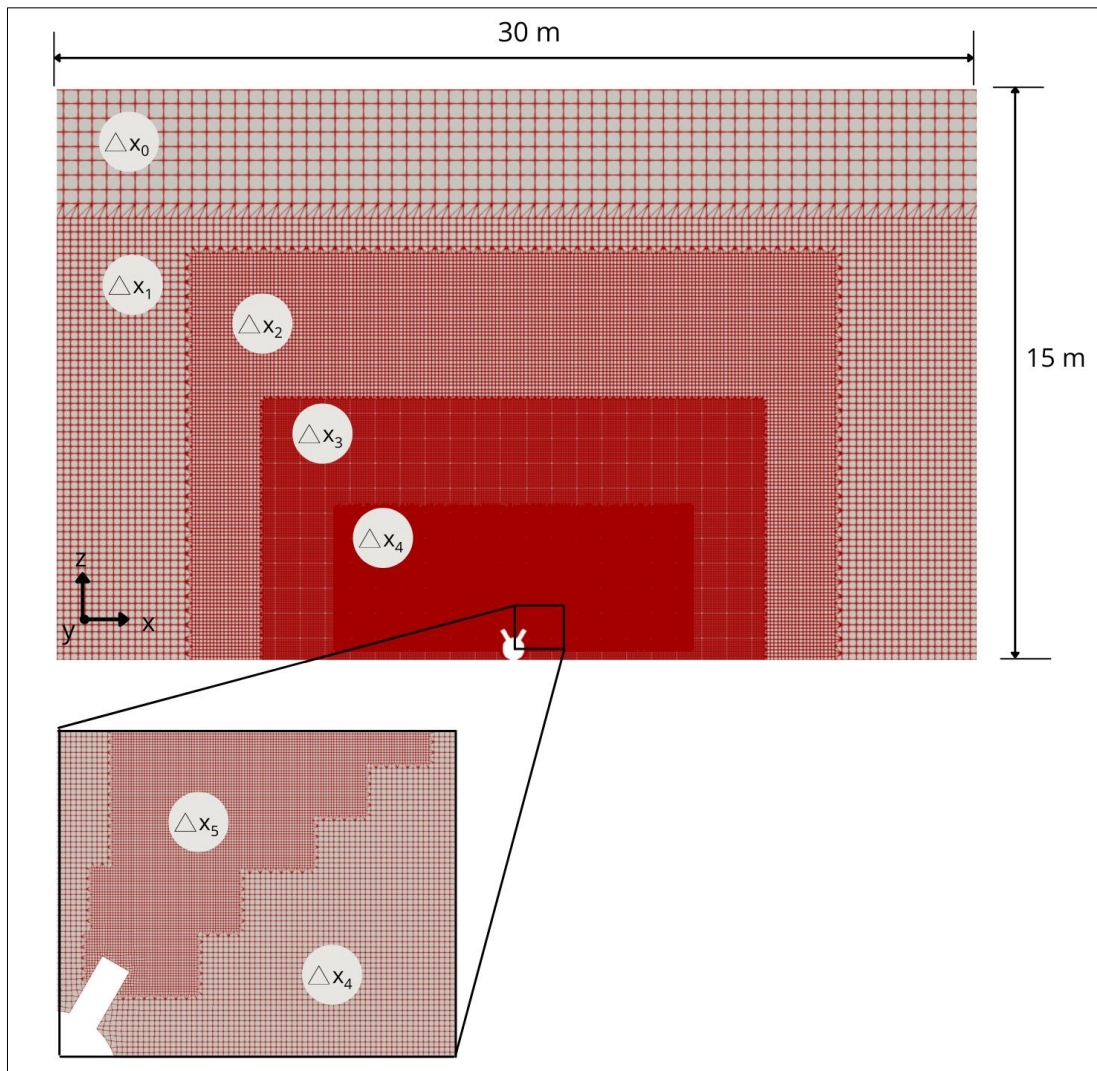


Figura 4.3: Malla para modelo de dos dimensiones.

De acuerdo con investigaciones previas (como la de Baum et al., 2020) y para condiciones de diseño similares, anchos de celda del orden de ~ 15 mm representan adecuadamente la trayectoria de concentración a la salida de cada porta. Entonces, se genera una caja con ancho de celda cercano a 15 mm que cubra la zona delimitada por la máxima altura que alcanza el chorro y la distancia de impacto con el suelo. Posteriormente, con la finalidad de reducir el costo computacional, se ajustan los anchos de celda por un nivel menor de refinamiento, verificando que el comportamiento sea semejante a la situación previa.

Bajo esta configuración se generan cuatro cajas de refinamiento, construyendo un modelo de 147000 celdas. Las celdas más refinadas poseen un ancho de ~ 15 mm, y corresponden a zonas donde $\alpha > 70\%$. Mientras menor sea el valor de α , mayor es el ancho de celda.

Caso 3D

Siguiendo el mismo principio que para el caso bidimensional, se genera una malla de fondo con un ancho máximo de celda de 1 m y luego se refinan las zonas que siguen la trayectoria del chorro. A diferencia del caso 2D, las cajas de refinado se reemplazan por contornos de iso-concentraciones.

Inicialmente, se observa el comportamiento del chorro para un grillado con anchos de celda similares a la de fondo. Posteriormente, se extraen tres contornos de iso-concentraciones en formato STL, equivalentes a excedencias de α del 10%, 5% y 2%. Cada contorno se exporta y modifica en el programa informático Blender, con el objetivo de asegurar una geometría cerrada. Dicha geometría se añade en los diccionarios que controlan el mallado con *snappyHexMesh*, incorporando el nivel de refinado deseado para cada contorno. Este procedimiento se repite hasta asegurar mínimas variancias del comportamiento del chorro entre una iteración y la siguiente.

Para la configuración anterior, las celdas alrededor de cada porta tienen un ancho ~ 18 mm y aumentan conforme a la reducción de α . Además, para zonas más lejanas al difusor, se generan cajas con niveles menores de refinado. La Figura 4.4 muestra un panorama general del mallado tridimensional y en la Tabla 4.2 se presentan los valores para cada nivel de refinado adoptado.

El número de celdas varía entre 1.320.000 a 4.654.000 según sea el caso de simulación. Esta diferencia la acentúan dos factores, primero, la magnitud de la corriente ambiental, produciendo contornos de iso-concentraciones desiguales entre escenarios, y segundo, la extensión del dominio.

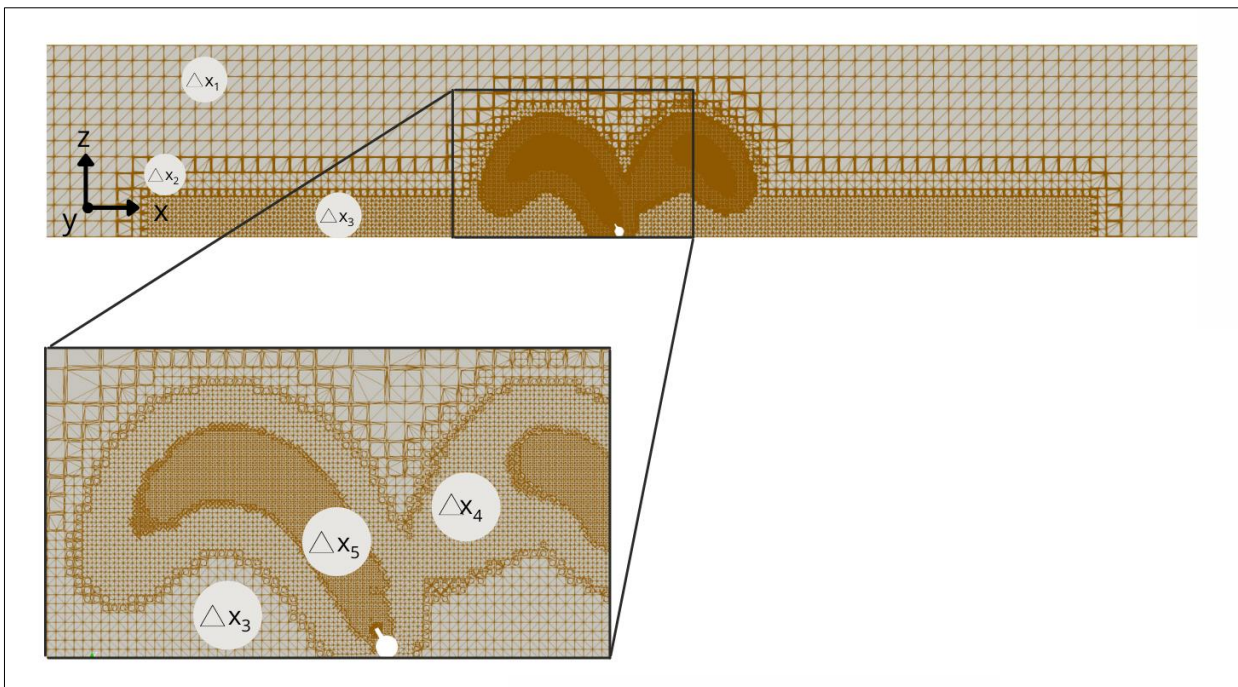


Figura 4.4: Vista en corte para malla para modelo en tres dimensiones.

Tabla 4.2: Niveles de refinado para mallas de dos y tres dimensiones.

Modelo	2D	3D
Δx_0 (m)	0.4000	1.0000
Δx_1 (m)	0.2000	0.5000
Δx_2 (m)	0.1000	0.2500
Δx_3 (m)	0.0500	0.1250
Δx_4 (m)	0.0250	0.0625
Δx_5 (m)	0.0125	0.0312

4.2.3.1 Discretización temporal

El espacio temporal Δt se ajusta a los largos de celda de cada malla, es decir, se tiene que cumplir que el Número de Courant-Friedrichs-Lewy:

$$CN = U \frac{\Delta x}{\Delta t} \leq 1 \quad (4.6)$$

donde U corresponde a la velocidad media en la celda, Δt el tiempo que demora el flujo en moverse en una celda con velocidad U , y Δx el ancho de celda. Para un caso tridimensional, Δx queda expresado como:

$$\Delta x = \frac{V}{A} = \frac{\text{volumen celda}}{\text{Área superficial total}} \quad (4.7)$$

Para asegurar esta condición, en el diccionario *controlDict* se impone $CN \leq 0.9$. Con este parámetro fijo, Δt alcanza órdenes de magnitud de milésimas de segundos.

4. 3 Casos de simulación

4.3.1 Modelo 2D

Como se mencionó en párrafos anteriores, la finalidad de este modelo consiste en observar y analizar el comportamiento general del solucionador ante la inyección de un fluido denso en el sistema. Para ello, en primera instancia se analiza el caso con una y dos portas en funcionamiento. Como se explicará más adelante, el comportamiento del chorro no es el esperado, por lo que se examina la variabilidad de la pluma salina ante cambios en los parámetros de diseño.

Según lo anterior, se estudian los casos presentados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Casos de simulación modelo en dos dimensiones.

Caso	θ_0 (°)	U_d (m/s)	U_a (m/s)	N° de portas en funcionamiento	Tiempo de simulación
A1	60	3.7	0	1	~4 días con 10 núcleos
A2	60	3.7	0	2	
A3	45	3.7	0	2	
A4	60	2.1	0	2	

4.3.2 Modelo 3D

Las simulaciones en tres dimensiones pretenden analizar el comportamiento de la dilución para variaciones en la magnitud de velocidad de corriente U_a . Con el objeto de reducir el costo computacional asociado y generar un modelo representativo para cada valor de U_a , el dominio y el número de celdas varían en cada caso, tal como se muestra en la Tabla 4.4. Con fines comparativos se incorpora el cálculo del término $u_r F_d$, donde:

$$u_r = \frac{U_a}{U_d} \quad (4.8)$$

Se aplican las mismas condiciones de diseño del difusor para todos los casos, rigiéndose con las dimensiones estipuladas en los informes recuperados del SEIA.

Tabla 4.4: Casos de simulación en modelo de tres dimensiones.

Caso	θ_0 (°)	U_d (m/s)	U_a (m/s)	$u_r F_d$ (-)	Parámetros geométricos (Figura 3.1)	N° de celdas	Tiempo de simulación
B1	60	3.7	0.00	0.00	a=80m; b=95m; c ₁ =9.2m; c ₂ =20.6m	4 654 000	~12 días con 56 núcleos
B2	60	3.7	0.35	2.07	a=40m; b=40m; c ₁ =9.8m; c ₂ =14.6m	1 320 000	~6 días con 40 núcleos
B3	60	3.7	0.50	2.96	a=45m; b=40m; c ₁ =9.8m; c ₂ =14.6m	1 427 000	

CAPÍTULO 5: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo pretende examinar los principales resultados del modelo generado en OpenFOAM. La primera parte de este capítulo contempla el análisis de un modelo bidimensional, y la segunda se enfoca en un modelo tridimensional. Para este último, los niveles de dilución se comparan con resultados de los modelos comerciales Visjet y Cormix. También, los parámetros de caracterización de cada chorro se contrastan con valores de la literatura, a modo de validar los resultados.

5.1 Caso 2D

Las Figuras 5.1 y 5.2 describen la evolución del chorro salino en el tiempo, para una y dos portas del difusor, respectivamente. En la Figura 5.1 el impacto con el fondo marino ocurre cercano al tiempo $t=100$ seg, logrando una altura máxima de ~ 8 m y una distancia horizontal de impacto de ~ 10 m. Para la eyección de dos chorros, correspondiente a la Figura 5.2, el impacto ocurre unos segundos antes (en comparación al caso de una porta), la altura máxima alcanza los ~ 6 metros y la distancia horizontal de impacto muestra un orden de magnitud similar a la altura máxima.

Todas las capturas de la Figura 5.1 reflejan que los mayores gradientes de concentración se trasladan en el sentido horizontal del vector inicial de velocidad U_d , pero también, una fracción menor de concentraciones adopta el sentido opuesto. En otras palabras, desde el estado inicial la dilución ocurre en todo el dominio, razón por la cual se presume que, ante la puesta en marcha de dos portas, la conducta de un chorro incide en la del chorro contiguo. Esta interacción entre chorros explicaría por qué los valores de la altura máxima de impacto y el tiempo en que ocurre dicho evento son inferiores en el segundo caso (Figura 5.2).

Bajo la acción de dos portas, la sucesión de imágenes indica que, una vez producido el impacto, los chorros comienzan a atraerse, incrementan su altura máxima, reducen la distancia horizontal de impacto y finalmente se fusionan. Dicho estado persiste en el tiempo en forma de ‘llama’, como se observa en el tiempo $t=650$ seg, oscilando de un lado hacia otro. Esta permanente transición en la conducta del chorro también ocurre cuando funciona una sola porta.

En base a estos resultados se decide variar las condiciones de diseño, a modo de determinar la variabilidad en el comportamiento de los chorros. De estas simulaciones (las variables de diseño específicas se muestran en la Tabla 4.3) se determina que, en un modelo bidimensional, los chorros presentan trayectorias de dilución independientes para condiciones de diseño en las que: (1) el ángulo de descarga con respecto a la horizontal $\theta_0 \leq 45^\circ$ o, (2) el caudal Q_0 evacuado en cada porta no excede $0.037 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente al 57% del caudal original. Esto demuestra que la inclinación y velocidad de descarga influyen directamente en la conducta de los chorros.

Para las condiciones de diseño originales, el momentum del efluente y la turbulencia dominan el proceso de dilución sobre cualquier otro tipo de transporte, como la boyancia. El análisis de vectores de velocidad de la Figura 5.3 muestra que posterior al impacto del chorro con el límite inferior, velocidades comienzan a trasladarse en dirección al difusor. Como consecuencia, el chorro es impulsado hacia su interior y su curvatura se agudiza, promoviendo una eventual mezcla.

Dado lo anterior, se cree que la causa de dicho efecto puede explicarse por la configuración bidimensional del problema, puesto que las caras no resueltas en el modelo actuarían como paredes en el sistema. Bajo dichas circunstancias, el chorro enfrenta tres superficies de impacto, el lecho marino y las dos caras no resueltas, propagando velocidades en diferentes direcciones.

A partir del tiempo $t=100$ s de la Figura 5.2, comienza a suscitarse la formación de una capa densa. En la última captura: para un 5% de concentración de exceso respecto a la concentración ambiental, el límite superior de la capa alcanza los 8 m de altura; para un 10% de exceso, el límite superior ronda los 6 m. La extensión de ambas capas abarca todo el dominio del modelo, por lo que se prevé que los niveles de dilución sobrepasan a los dispuestos en la normativa ambiental. Además, para un 10% de exceso salino, los resultados muestran grandes brechas con los del modelo Cormix (Figuras 2.8 y 2.9), sin considerar por supuesto, la variabilidad adicional producto de una velocidad ambiental.

En resumen, el modelo bidimensional proporciona resultados poco confiables respecto al comportamiento de dilución real de los chorros. Esto se fundamenta, principalmente, por las caras no resueltas del sistema que actúan como paredes y difunden vectores de velocidad que perturban la conducta inicial del chorro. Además, el modelo muestra una alta sensibilidad a la magnitud de velocidad con la que se eyectan los chorros y la inclinación de salida.

Comportamiento chorro en el tiempo

$U_a = 0$ m/s

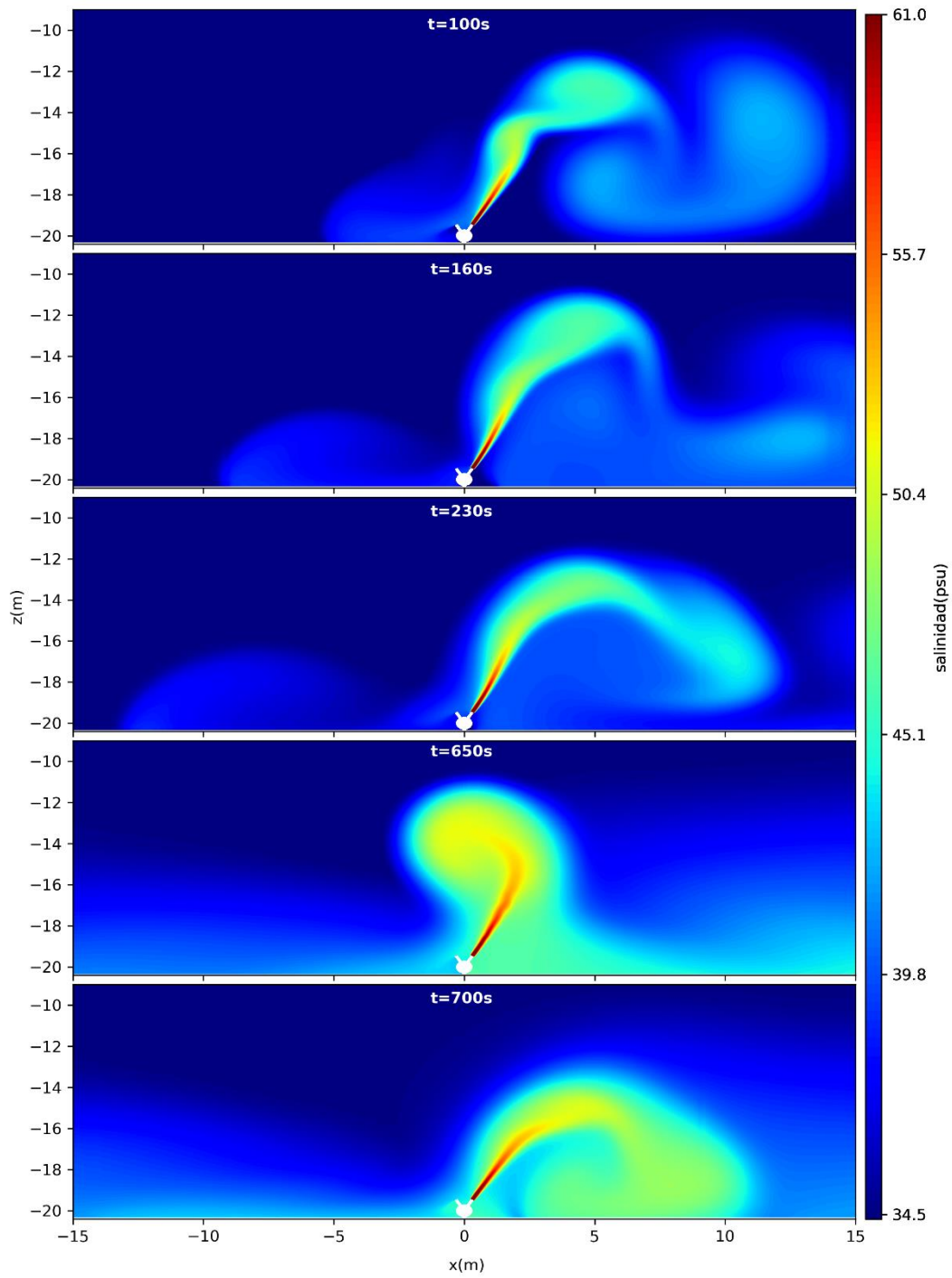


Figura 5.1: Dilución en el tiempo para la eyección de un chorro. $U_a=0$ m/s.

Comportamiento chorro en el tiempo

$U_a = 0$ m/s

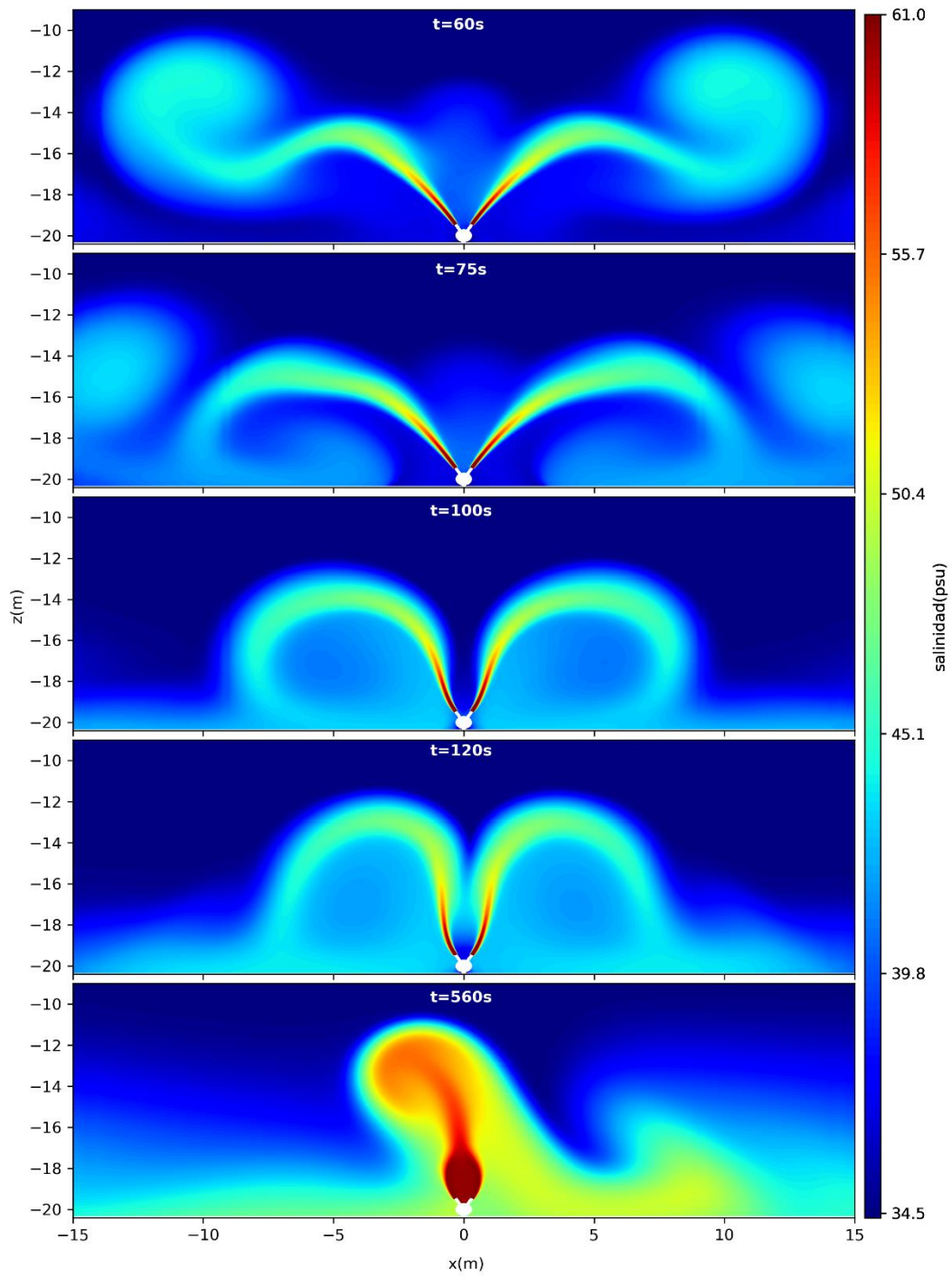


Figura 5.2: Dilución en el tiempo para la eyección de dos chorros. $U_a=0$ m/s.

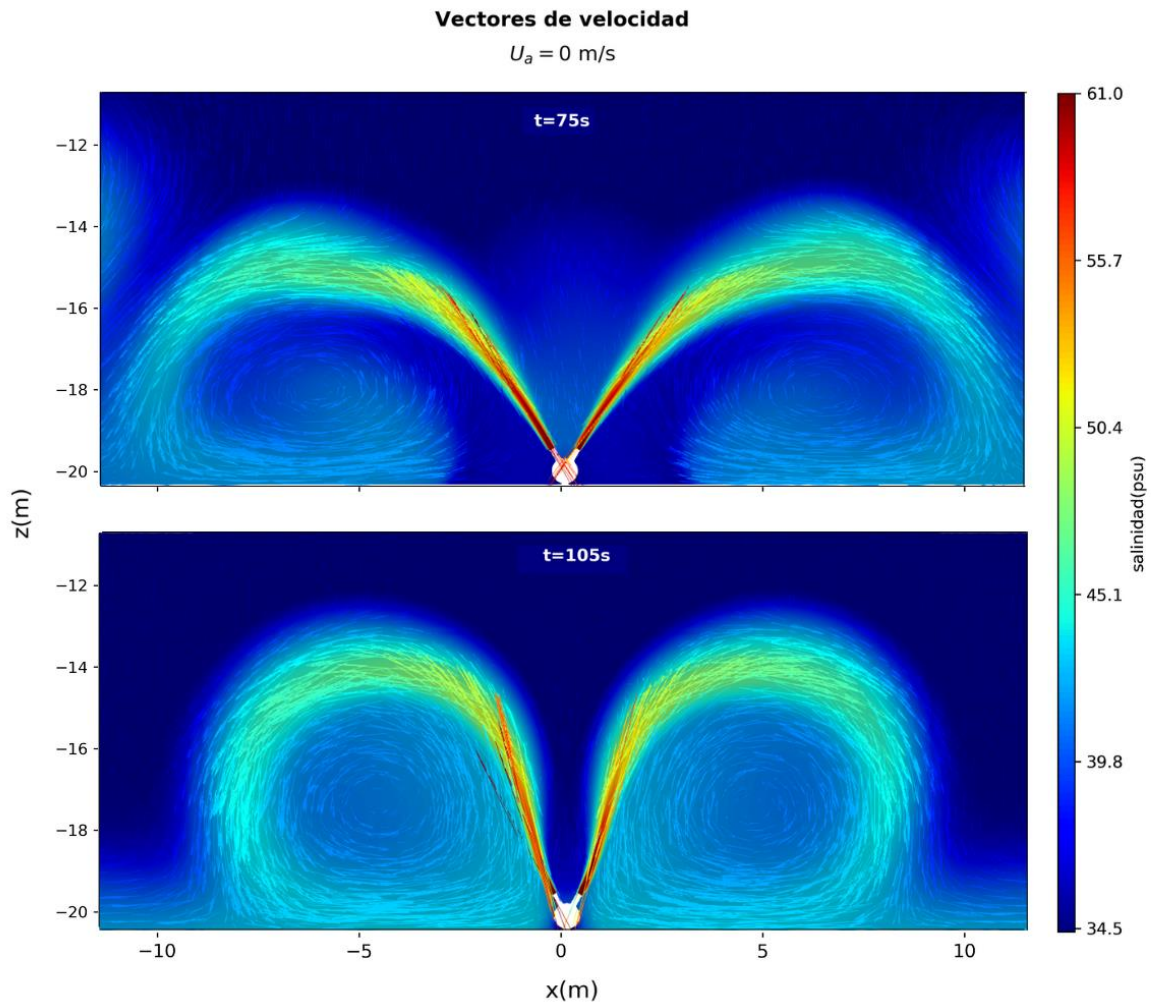


Figura 5.3: Vectores de magnitud de velocidad para el caso de dos portas en funcionamiento, con $U_a=0 \text{ m/s}$. En esta figura los vectores están escalados en un factor 2.4. En $t=75 \text{ seg}$ ocurre el impacto del chorro con el fondo. La condición posterior al impacto queda representada en $t=105 \text{ seg}$.

5.2 Caso 3D

En esta sección se presentan resultados para tres simulaciones, las que difieren en la magnitud de la velocidad ambiental U_a , número de celdas y extensión del dominio (ver Tabla 4.4). El volumen de control para el modelo en donde U_a nula, excede considerablemente en comparación a los demás escenarios. Esto implica un mayor costo computacional, pero concede nuevas perspectivas de discusión, como se expone en las secciones 5.2.4 y 5.2.5.

5.2.1 Análisis general

Acorde a los resultados y a la literatura revisada, en el comportamiento de los chorros dominan procesos de transporte del tipo advectivos y difusivos. Las fuerzas advectivas predominan desde el instante que los chorros eyectan de cada porta, hasta lograr su altura máxima (este tramo evidencia claramente la variabilidad en los gradientes de concentración). Luego, los chorros descienden bajo la acción de fuerzas boyantes y comienzan a fusionarse, dando lugar a gradientes de concentración irregulares. A esta región, limitada por el impacto de la salmuera con el fondo marino, según diversos autores, corresponde al campo cercano de dilución (Palomar et al., 2011; Baum et al., 2020). Posteriormente, el desarrollo de una corriente de gravedad guía la dispersión de la pluma salina en el ambiente, y la dilución queda sujeta a procesos difusivos y a la turbulencia del medio. Esta zona se entiende como campo lejano de dilución.

En el proceso de descarga, a ambos lados del chorro, ocurre la formación de vórtices que se arrastran hasta la zona de impacto. Según Abessi & Roberts (2014), cuando los chorros tienen una conducta independiente, dichos vórtices pueden extenderse en tres dimensiones, sin embargo, cuando sucede la fusión, tienden a bidimensionalizarse, lo que podría traducirse en una reducción importante en la dilución. La explicación para este fenómeno, según los experimentos que realizaron, radica en el espaciamiento de las portas y la ocurrencia del efecto Coanda.

En difusores multipuerto, el efecto Coanda alude a la deflexión de los chorros causada por la presencia de un límite cercano o la interacción con chorros adyacentes, ocasionando fuerzas de presión capaces de desplazar esta corriente hacia el límite o en la dirección de los otros chorros (Abessi et al., 2014). Las consecuencias más notables suelen darse cuando la corriente descendente intenta reincorporarse a la circulación ascendente, acentuando la curvatura del chorro, y reduciendo la distancia de impacto y la dilución.

El comportamiento general de cada simulación queda expuesto en la Figura 5.4 correspondiente a una vista en planta de los modelos. Las imágenes revelan la influencia que tiene la corriente marina U_a en la conducta de cada chorro. Para $U_a = 0.35$ m/s y $U_a = 0.5$ m/s (Figura 5.4b y 5.4c respectivamente) tanto los chorros contraflujo y coflujo adquieren la misma dirección y sentido de la velocidad ambiental, por lo que las alteraciones salinas quedan situadas en un solo

lado del difusor. Al contrario, una velocidad de corriente nula (Figura 5.4a) genera dilución a ambos lados del difusor.

Ante un escenario sin intervención de U_a , los chorros mantienen su simetría hasta el instante del impacto. Luego, ocurre un cambio en el patrón de flujo arrastrado, y los chorros tienden a acomodarse hasta alcanzar un estado permanente. No obstante, para este caso en particular, se observan fluctuaciones mínimas en la dirección de los chorros. En presencia de corrientes marinas el efluente de salmuera parece encontrar un equilibrio más estable y en un espacio temporal más reducido (estado permanente de las Figuras 5.4b y 5.4c).

Diversas normas determinan que la salinidad en el borde de mezcla no debe exceder el 5% respecto a la salinidad inicial (Tabla 2.1). Este nivel de salinidad queda representado por el límite máximo de la escala de colores de las Figuras 5.5 y 5.6, correspondiente a los chorros en estado permanente de la primera y última porta del difusor, respectivamente. Dicho estado de permanencia se verifica en la Figura 5.7, observándose que los niveles de salinidad se mantienen constantes en el tiempo a partir de un tiempo determinado. Este análisis contempla tres celdas seleccionadas en un punto intermedio entre la salida del chorro y el límite del dominio.

La capa densa estratificada y la zona de impacto son evidentes en condiciones inactivas de corriente ambiental (Figura 5.5a y Figura 5.6a), no así, en los casos que $U_a \neq 0$ (Figuras 5.5b, 5.5c, 5.6b y 5.6c), en donde la distancia horizontal de impacto ocurre próxima al límite del dominio, impidiendo analizar la formación de la corriente salina.

Para corrientes nulas, el chorro eyectado de la primera porta muestra un comportamiento dispar a los demás chorros, especialmente si se compara con el de la última porta (más lejana a la costa). Este chorro, en contraste con el primero, alcanza una distancia horizontal de impacto menor, una curvatura más acentuada y gradientes de concentración más elevados en la zona de campo cercano.

Factores como la pendiente del lecho marino y el efecto Coanda podrían explicar la asimetría entre los chorros y las diferencias de dilución. Inclusive, la dispersión de salmuera descargada en las últimas portas se ve influenciada de sobremanera por el desplazamiento de los demás chorros, los cuales adquieren la dirección de la pendiente de fondo.

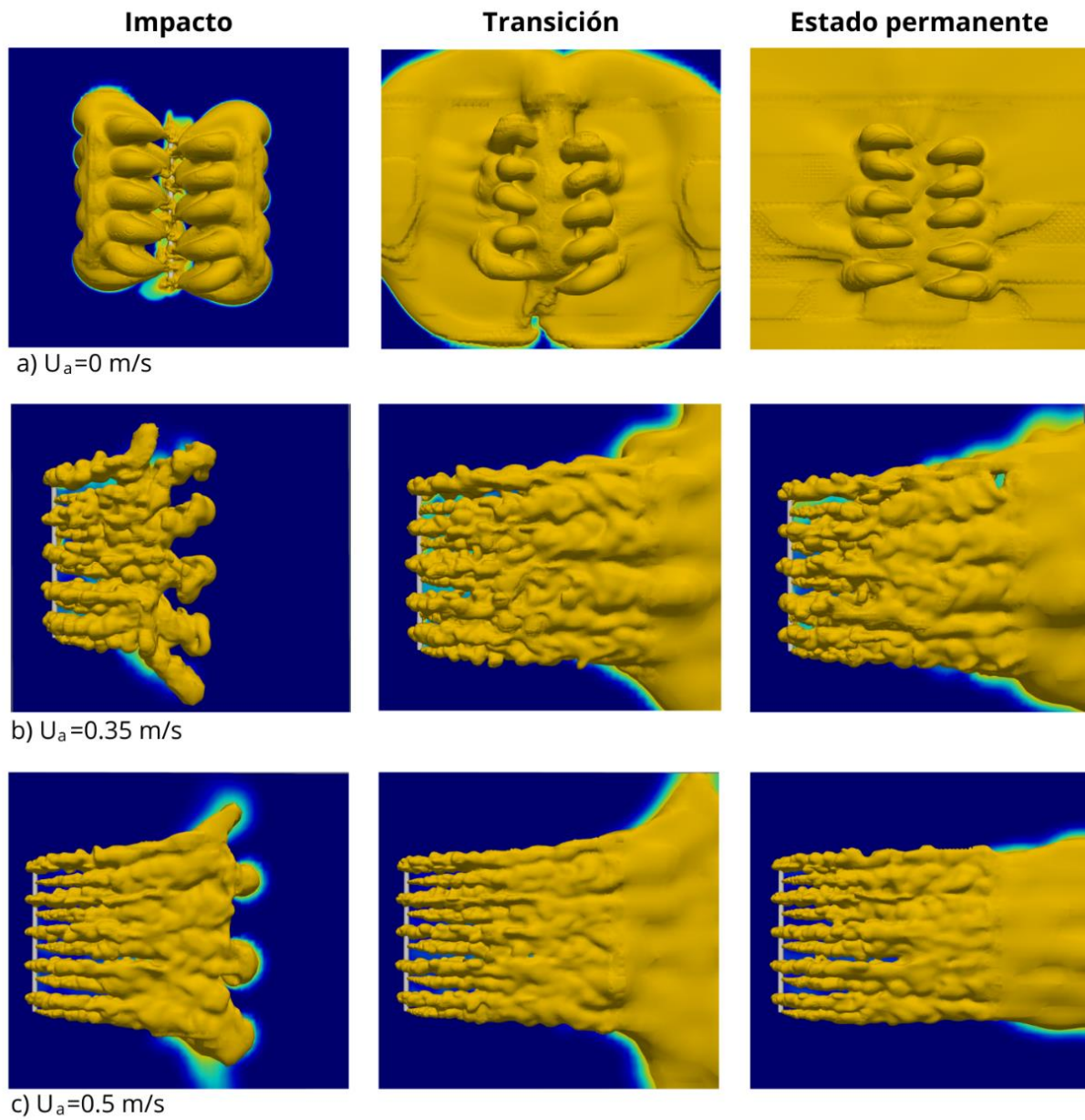


Figura 5.4.: Vista en planta del comportamiento transitorio de dilución. El color amarillo representa los contornos asociados al 1% de salinidad de exceso.

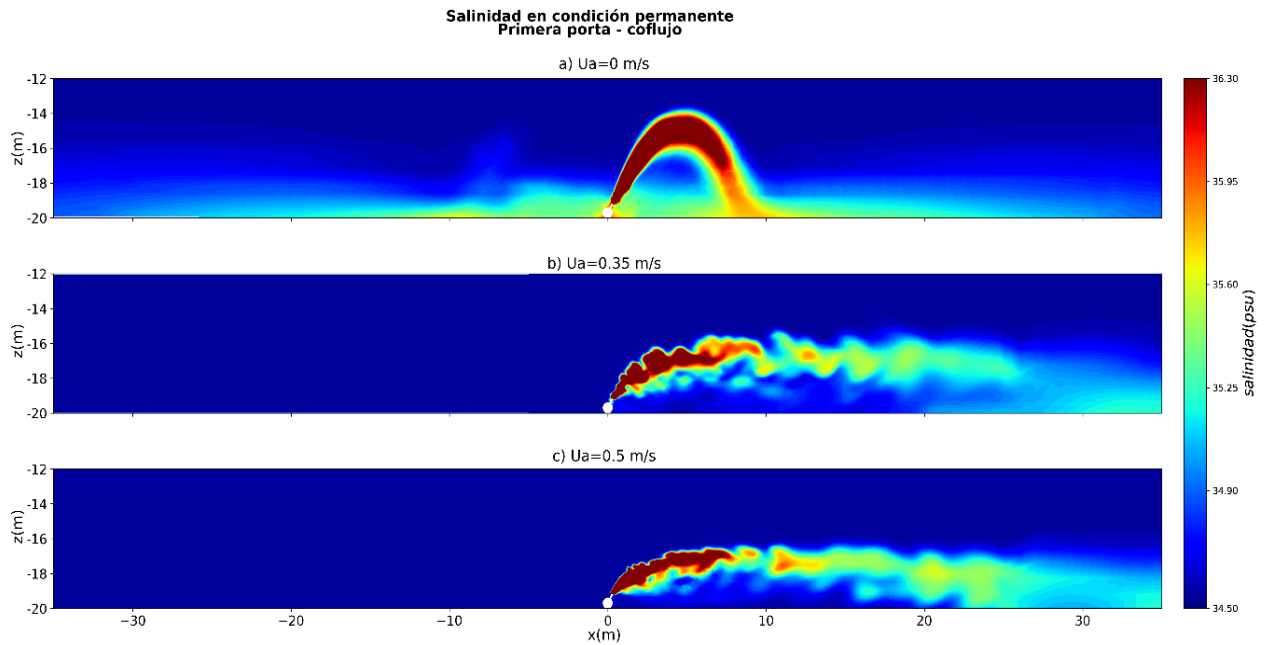


Figura 5.5: Vista en corte de la dilución del chorro de la primera porta del difusor, bajo un estado permanente. La primera porta se ubica en el lado derecho del sistema de difusor, por lo que actúa como un chorro coflujo. El mínimo valor de la escala de salinidad indica la salinidad ambiental, por otro lado, el máximo corresponde al 5% de exceso salino.

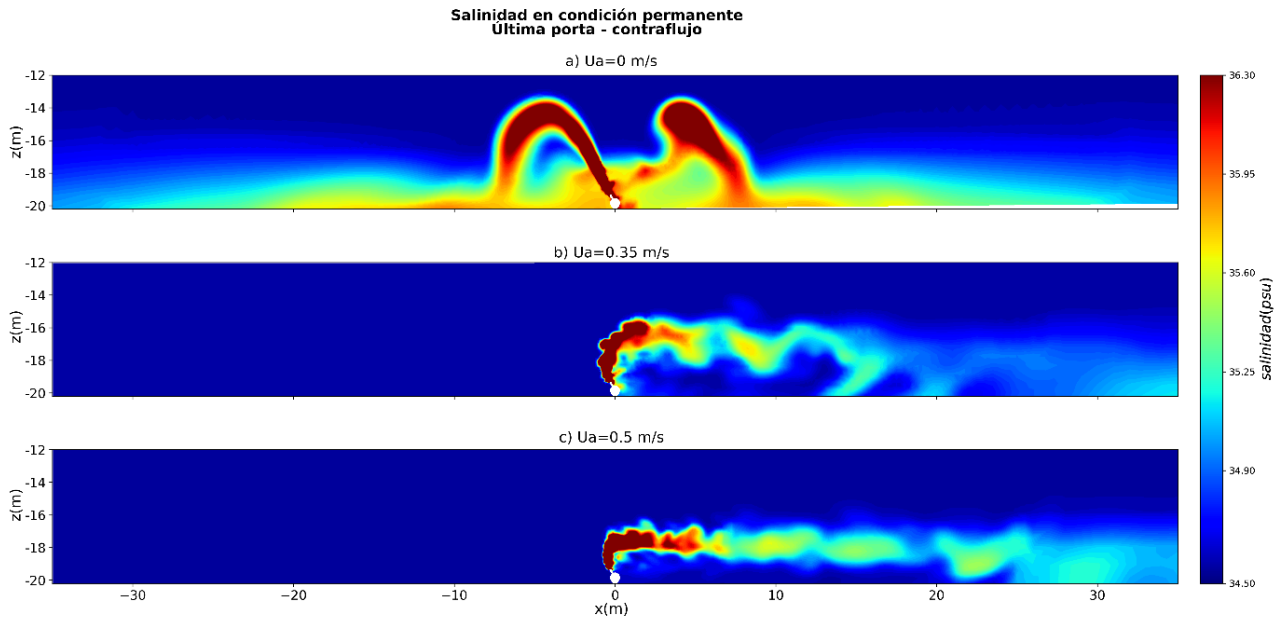


Figura 5.6: Vista en corte de la dilución del chorro de la última porta del difusor, bajo un estado permanente. La última porta se ubica en el lado izquierdo del sistema de difusor, por lo que actúa como un chorro contraflujo. El mínimo valor de la escala de salinidad indica la salinidad ambiental, por otro lado, el máximo corresponde al 5% de exceso salino.

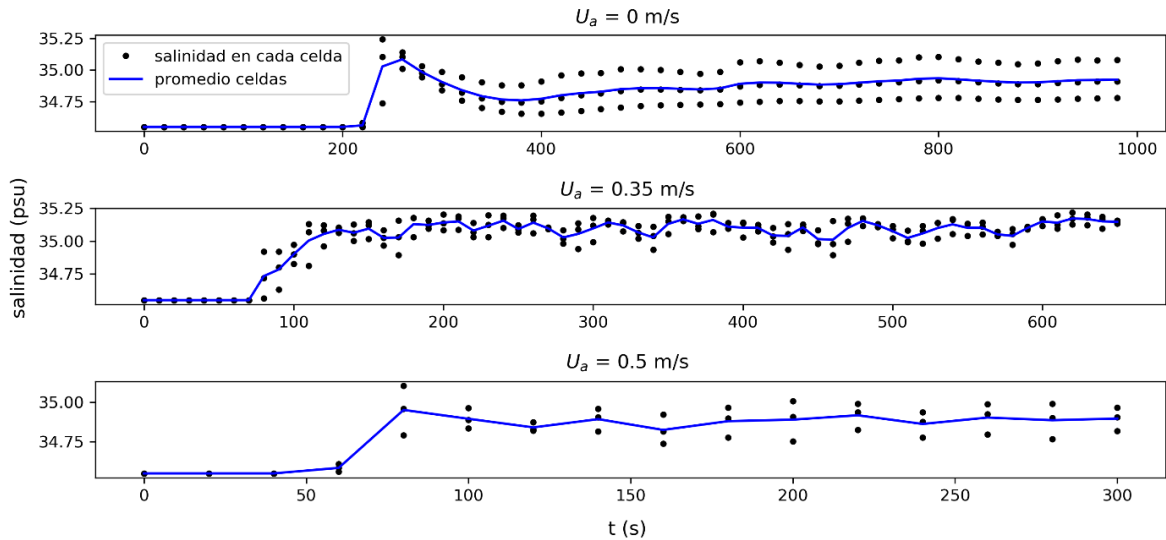


Figura 5.7: Salinidad en el tiempo para los casos simulados en las Figuras 5.5 y 5.6. La serie de tiempo contempla tres celdas seleccionadas de regiones intermedias entre la salida del chorro y el límite del dominio.

5.2.2 Análisis comparativo

Los diseñadores de sistemas difusores, como el multipuerto, utilizan con frecuencia los modelos de arrastre integral como una herramienta predictora de dilución en el campo cercano. Estos enfoques no modelan la interacción con los límites, por lo que sus resultados quedan acotados a la zona previa de impacto de los chorros con el lecho marino. Además, los softwares Cormix y Visjet (modelos a comparar) poseen nula sensibilidad a la profundidad de la columna de agua, no disponen de gráficos para la evolución de las variables, y en particular, el modelo Visjet no detecta la fusión entre chorros (Palomar et al., 2011).

Con el objetivo de generar comparaciones bajo los mismos estándares, las condiciones de salinidad a examinar representan una situación previa al impacto del chorro con el suelo (Figuras 5.8 y 5.9). Las Figuras 5.10 y 5.11 muestran las principales diferencias cuando el modelo en OpenFOAM alcanza su estado permanente. Para esto, el análisis del modelo diseñado contempla las dos últimas portas del sistema difusor, asumiendo que aquí ocurren las condiciones más desfavorables de dilución.

La disponibilidad de datos del modelo Cormix queda restringida al estudio realizado por PRDW en 2010, el que determina que la salinidad no debe superar el 10% de exceso respecto a la salinidad ambiental. Por lo tanto, la comparación de los tres modelos en cuestión considera dicho porcentaje de exceso (Figura 5.8).

La Figura 5.8 muestra que todos los modelos logran la dilución requerida en los mismos órdenes de magnitud para la dirección vertical y horizontal (perpendicular al emisario). Las

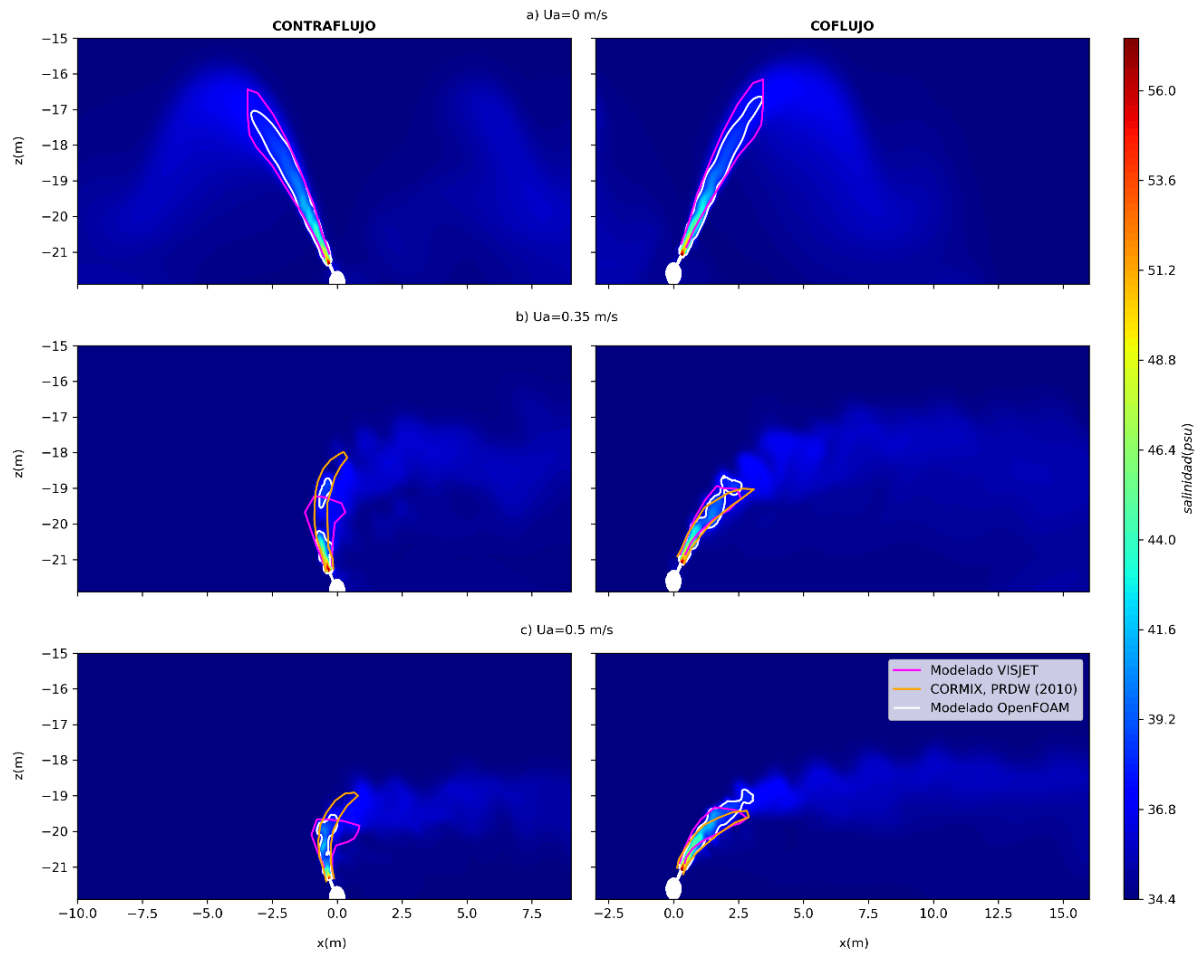
mayores fluctuaciones ocurren en chorros de contraflujo (Figuras 5.8b y 5.8c). Aquí, el modelo de OpenFOAM diluye el 10% de exceso salino en una distancia más acotada respecto a los modelos Visjet y Cormix. Para estos resultados, según la normativa de Iran (Tabla 2.1), el sistema diluye dicho exceso en distancias horizontales menores a las máximas permitidas. Este mismo ejercicio fue realizado para un estado permanente del modelo OpenFOAM, obteniéndose resultados similares a los expuestos (Figura 5.10).

Del mismo modo, para un 5% de exceso salino, el modelo en Visjet subestima la altura del chorro respecto al modelo en OpenFOAM (Figura 5.9). Esta propiedad se mantiene para el modelo en OpenFOAM de estado permanente (Figura 5.11), sin embargo, para el caso con u_a nula (Figura 5.11a), los valores de concentración alcanzan el fondo marino. Los contornos originados fuera del rango de comparación, observables en las Figuras 5.9a y 5.11a, aluden a niveles de concentración de chorros de dirección opuesta. Si bien, para el caso, los chorros no interfieren entre ellos, se prevé la ocurrencia de este fenómeno para niveles de concentraciones inferiores.

En definitiva, para una condición previa al impacto, los resultados exponen el mismo orden de magnitud entre modelos. En cambio, para un estado permanente del modelo OpenFOAM, las principales discrepancias se acentúan para niveles de concentración de exceso $\frac{c-c_a}{c_a} \leq 5\%$ (con c la concentración local y c_a la concentración ambiente), especialmente en una situación de velocidad ambiental cercana a 0.

Los modelos Cormix y Visjet, según lo mencionado en párrafos anteriores, no tienen la capacidad de interpretar el comportamiento posterior al impacto del chorro. La Figura 5.4 muestra la transformación de los chorros en el tiempo, adoptando características muy diferentes a las de un inicio, asociadas a efectos propios del impacto y la geometría del sistema. Por lo tanto, resulta interesante analizar la variabilidad en el tiempo para cada chorro y el desplazamiento de la corriente salina inducida por la pendiente de fondo.

**Contornos para 10% de exceso de salinidad
Condición previa al impacto del chorro**



comparaciones consideran el modelo en OpenFOAM ($t=100$ seg) y los modelos comerciales Visjet y Cormix. Los datos del modelo Cormix solo están disponibles para los casos $U_a=0.35$ m/s y $U_a=0.5$ m/s.

**Contornos para 5% de exceso de salinidad
Condición previa al impacto del chorro**

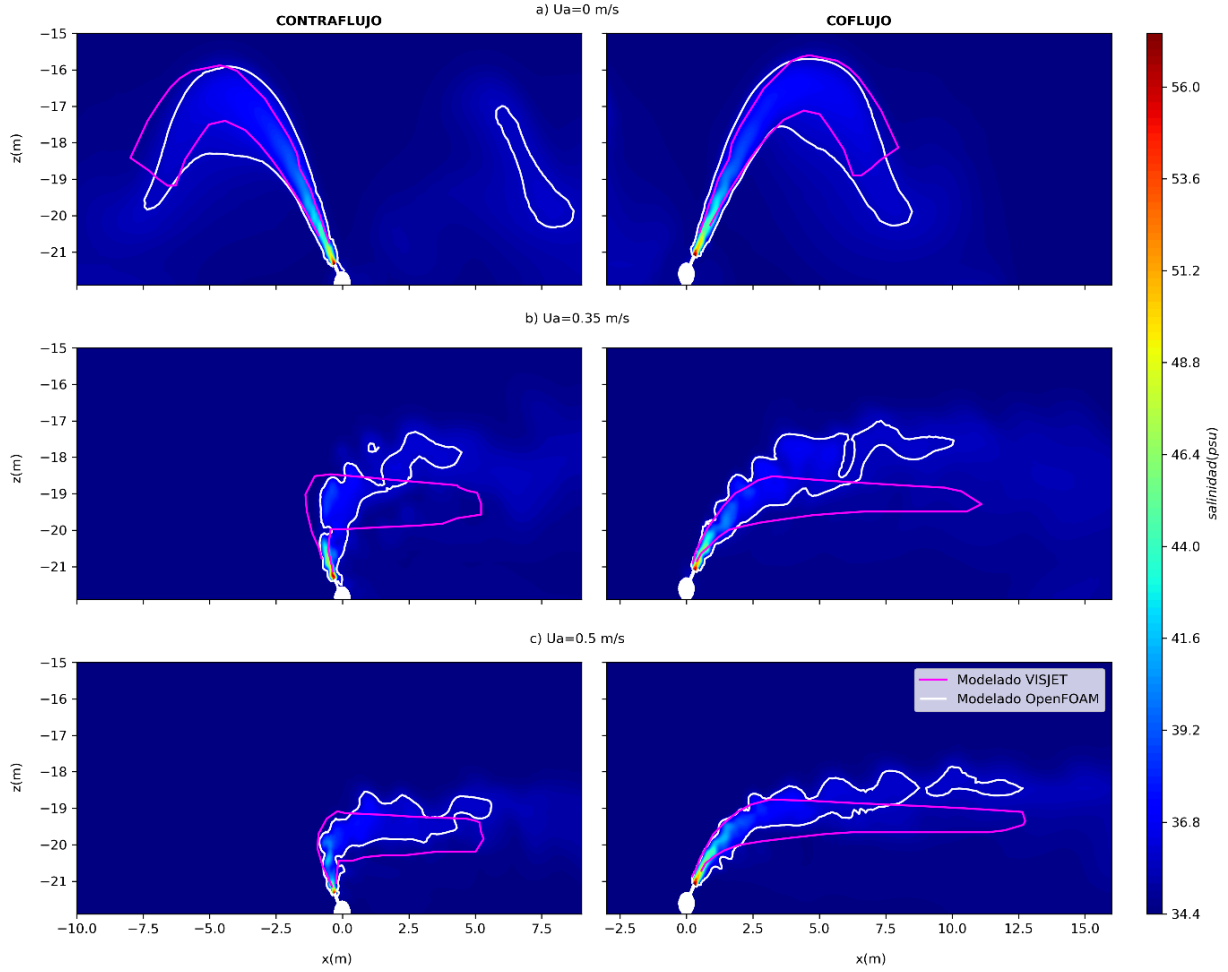


Figura 5.9: Escenario de comparación previo al impacto con el fondo marino para un 5% de exceso salino. Las comparaciones consideran el modelo en OpenFOAM ($t=100$ seg) y el modelo comercial Visjet.

**Contornos para 10% de exceso de salinidad
Condición permanente**

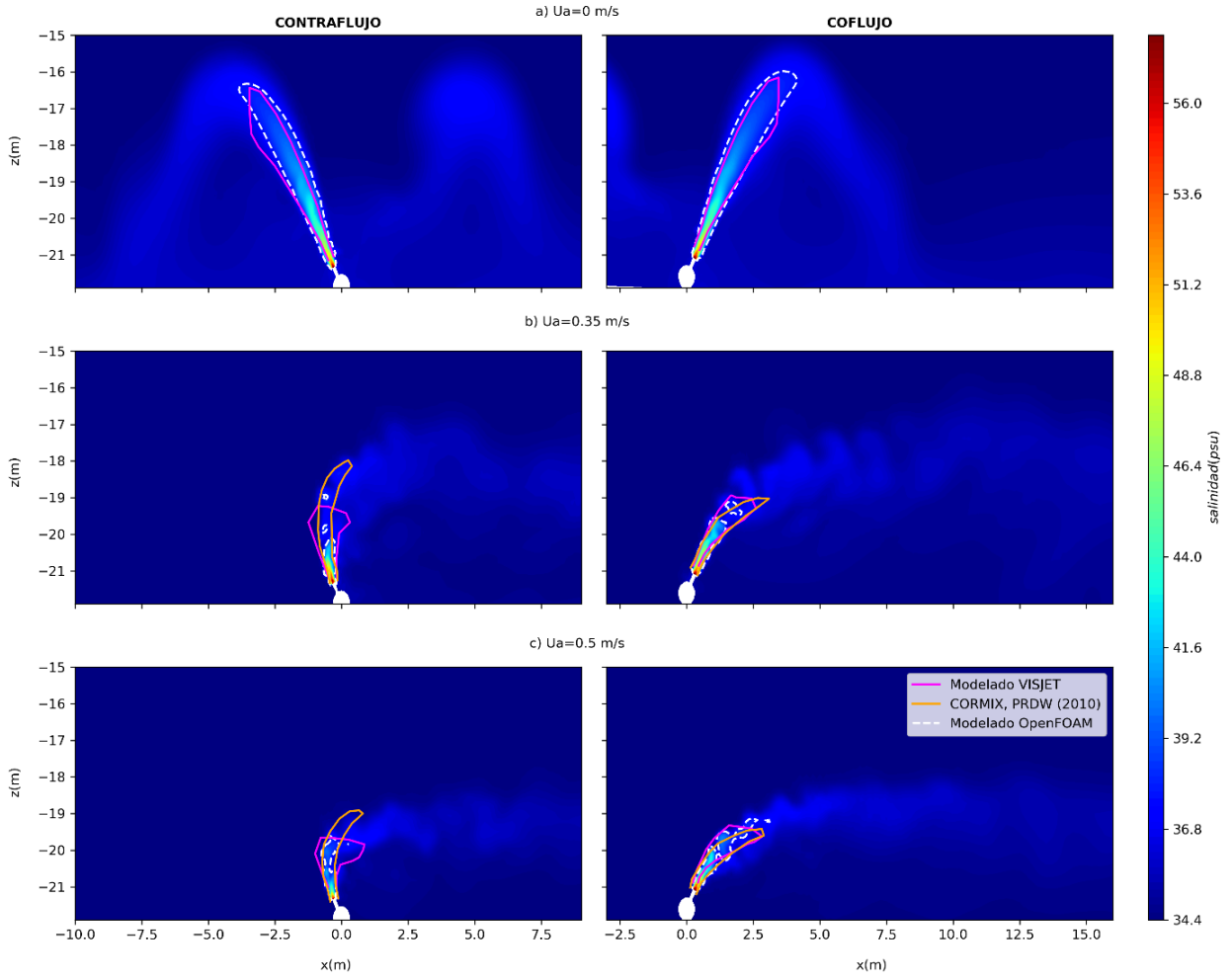


Figura 5.10: Comparación modelo en OpenFOAM y modelos comerciales Visjet y Cormix para un 10% de exceso salino. Escenario permanente en modelo numérico. Los datos del modelo Cormix solo están disponibles para los casos $U_a=0.35$ m/s y $U_a=0.5$ m/s.

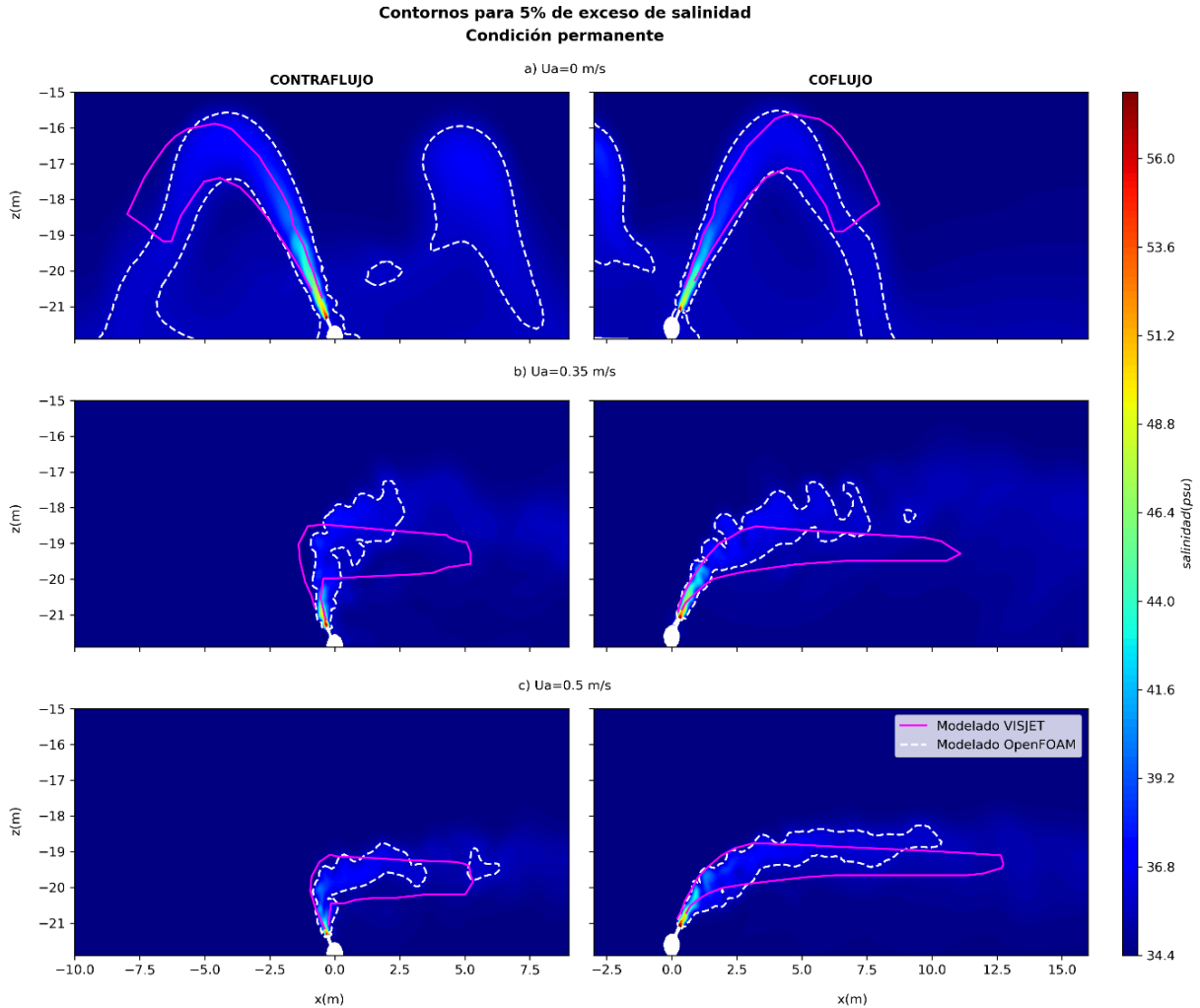


Figura 5.11: Comparación modelo en OpenFOAM y modelo Visjet para un 5% de exceso salino. Escenario permanente en modelo numérico.

5.2.3. Análisis de chorros densos inclinados

El análisis cuantitativo obedece a los parámetros Z_t , X_t , X_i y S_i expuestos en la sección 2.2.1 de este informe. La magnitud de cada variable queda definida por iso-concentraciones de un 1% respecto a la concentración inicial, al igual que los experimentos de Baum & Gibbes (2020), suponiéndolos comparables. Los autores aplican un enfoque RANS cuasi-permanente, y los resultados de esta memoria apuntan a un régimen transitorio que alcanza condiciones permanentes.

A diferencia de un análisis puramente permanente, la transitividad permite analizar las alteraciones dinámicas que sufre el chorro en contacto con superficies como el fondo marino. A

modo de generar resultados comparables, para esta sección solo se consideran los resultados permanentes del modelo numérico en OpenFOAM,

La **altura máxima** Z_t queda registrada en la Figura 5.12. Cada altura Z_t se ajusta a la altura H_0 (medida desde el suelo hasta la salida de la porta) de Baum & Gibbes (2020). Como tendencia general para las velocidades ambientales U_a analizadas, Z_t crece con el aumento de U_a .

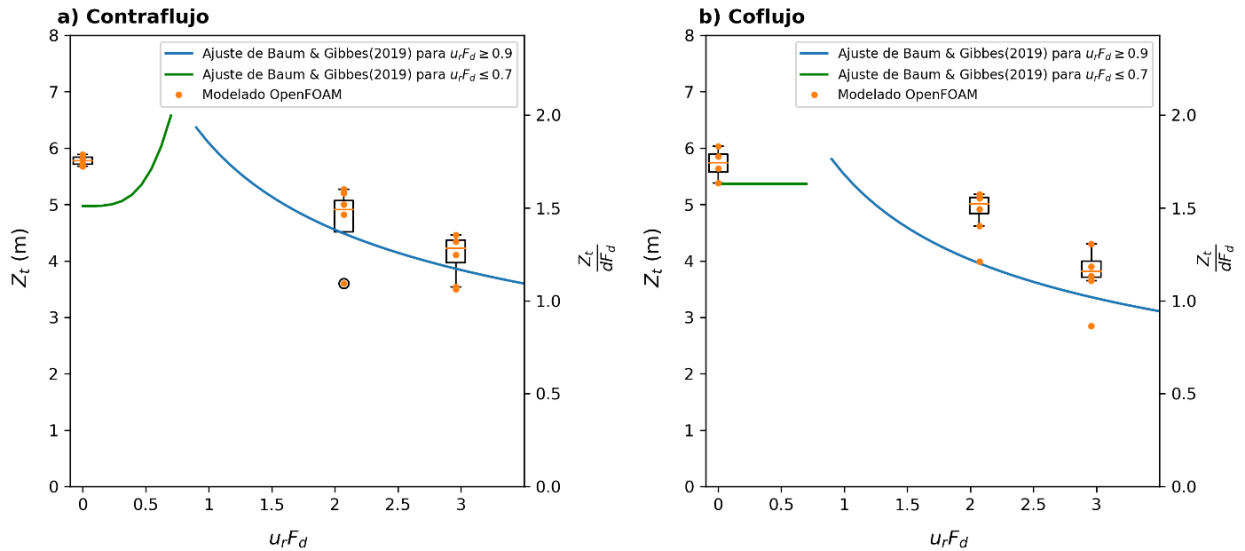


Figura 5.12: Altura máxima Z_t terminal del chorro. Comparación con experimentos de Baum & Gibbes (2020). La caja de error representa la altura mínima Z_t (barra inferior), el primer cuartil de Z_t (borde inferior de la caja), la mediana de Z_t (barra en la mitad de color amarillo), el tercer cuartil de Z_t (borde superior de la caja), y la altura máxima Z_t para cada chorro de una determinada velocidad ambiental. Las circunferencias de color negro indican valores de Z_t atípicos de la muestra que no debiesen ser considerados en el análisis.

Los valores adimensionales $\frac{Z_t}{d F_d}$ presentan un orden similar al ajuste de Baum & Gibbes (2020), a excepción del caso $u_r F_d \leq 0.7$ en contraflujo (línea verde de la Figura 5.12a). Los ajustes asociados a estas restricciones (líneas verdes de las Figuras 5.12a y 5.12b) no proporcionan un mismo valor para la condición $u_r F_d=0$. Este caso en particular no forma parte de los escenarios investigados por los autores, sin embargo, dadas las nulas alteraciones externas para el caso $U_a=0$, cobra sentido lógico que el modelo numérico genere alturas análogas para chorros contraflujo y coflujo.

En su mayoría, las primeras portas del difusor consiguen las alturas Z_t mínimas, correspondiendo, además, a las alturas más lejanas de la media.

La Figura 5.13 presenta la **distancia** X_t **donde ocurre la altura máxima**. Aquí, existe un mayor grado de sensibilidad para X_t en los casos $u_r F_d=2.07$ y $u_r F_d=2.96$ en comparación a

$u_r F_d = 0$, puesto que el cálculo de la altura máxima Z_t corresponde a un promedio que considera las fluctuaciones de turbulencia. Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran que este efecto provoca que múltiples puntos del dominio horizontal alcancen una altura Z_t .

Los valores extraídos del modelo diseñado muestran que el aumento de la velocidad ambiental conlleva un incremento de la distancia X_t . Los resultados de chorros en contraflujo (Figura 5.13a) presentan un ajuste similar a los de Baum & Gibbes (2020). Para el caso de coflujo (Figura 5.13b), X_t sobrestima los valores del ajuste cuando $u_r F_d \geq 0.9$, aún así, siguen una pendiente de alza semejante.

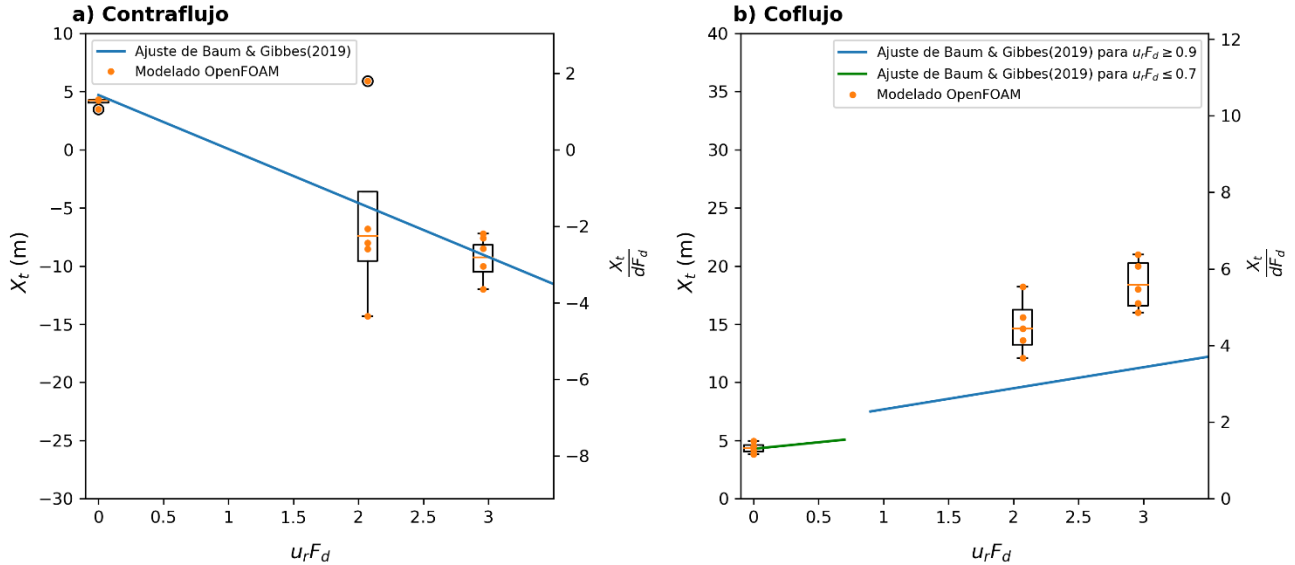


Figura 5.13: Distancia X_t terminal del chorro. Comparación con experimentos de Baum & Gibbes (2020). La caja de error representa la distancia mínima X_t (barra inferior), el primer cuartil de X_t (borde inferior de la caja), la mediana de X_t (barra en la mitad de color amarillo), el tercer cuartil de X_t (borde superior de la caja), y la distancia máxima X_t para cada chorro de una determinada velocidad ambiental. Las circunferencias de color negro indican valores de X_t atípicos de la muestra que no debiesen ser considerados en el análisis.

La Figura 5.14 denota la **distancia X_i de impacto**. Para estas variables, los datos quedan sesgados a la extensión del dominio modelado, especialmente en los casos $u_r F_d = 2.07$ y $u_r F_d = 2.96$, en los que el impacto ocurre en zonas cercanas al límite del dominio, como muestran las Figuras 5.5b, 5.5c, 5.6b y 5.6c. Aquí surge la importancia de analizar la repercusión de las condiciones de borde del modelo en la estimación de X_i , y, en consecuencia, de S_i . En experimentos con un dominio reducido (no se presentan en este estudio), la condición de borde asociada a la salida de flujo del sistema interviene en el comportamiento de los chorros, actuando como una condición de borde aguas abajo. Esta característica ocurre con mayor predominancia en el caso $U_a = 0$, sin embargo, al amplificar el volumen de control el efecto se vuelve despreciable.

A pesar de lo anterior, los resultados obtenidos para $u_r F_d = 2.07$ y $u_r F_d = 2.96$ podrían ubicarse dentro de la banda de errores de los experimentos de Baum & Gibbes (2020), y así, justificar su validez. Sin embargo, los autores no estudiaron los escenarios que se consideran en esta memoria,

imposibilitando dicho análisis. En consecuencia, no es posible determinar la validez de X_i para estos casos.

Por el contrario, la distancia X_i de los chorros con $u_r F_d=0$ muestra un comportamiento análogo al ajuste en cuestión, que, además, corresponde a la simulación con el volumen de control más extenso.

El crecimiento de la variable X_i indica la misma tendencia que la variable X_t .

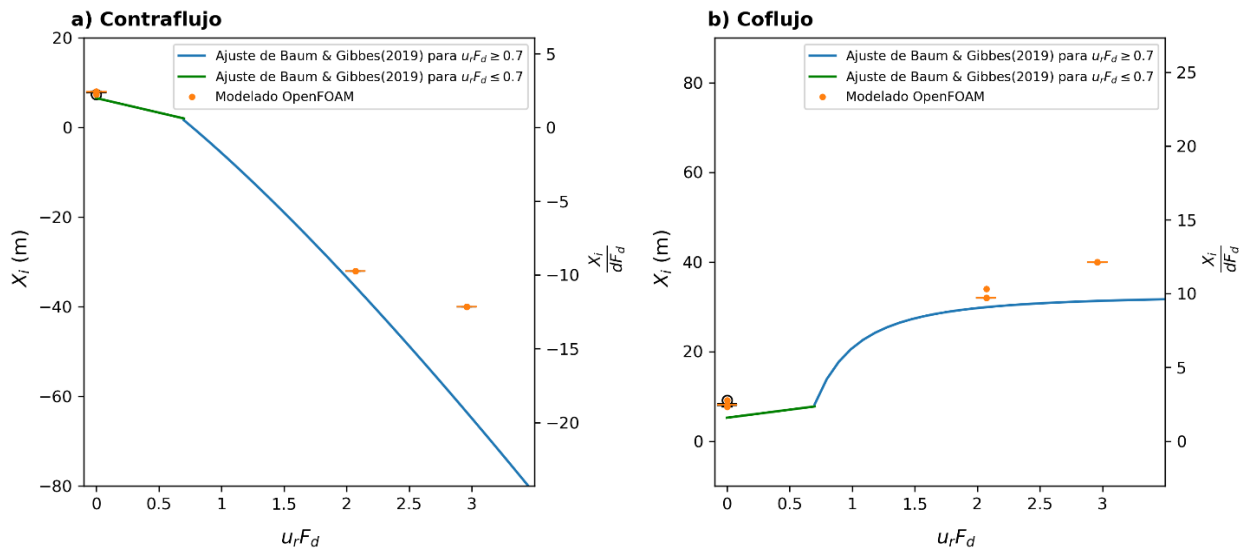


Figura 5.14: Distancia X_i de impacto. Comparación con experimentos de Baum & Gibbs (2020). La caja de error representa la distancia mínima X_i (barra inferior), el primer cuartil de X_i (borde inferior de la caja), la mediana de X_i (barra en la mitad de color amarillo), el tercer cuartil de X_i (borde superior de la caja), y la distancia máxima X_i para cada chorro de una determinada velocidad ambiental. Las circunferencias de color negro indican valores de X_i atípicos de la muestra que no debiesen ser considerados en el análisis.

Finalmente, la Figura 5.15 muestra los resultados de **dilución S_i en la zona de impacto**. Para este parámetro aplica el mismo razonamiento de X_i , por lo que los datos de $u_r F_d=2.07$ y $u_r F_d=2.96$ no califican en la comparación, sin embargo, los resultados para $u_r F_d=0$ presentan un ajuste análogo a los de la literatura.

Las curvas en azul para $u_r F_d \geq 0.7$ indican que los chorros contraflujo proporcionan diluciones mayores al coflujo, esto a causa de una expansión del ancho del chorro (chorros contraflujo de las Figuras 5.4b y 5.4c). Dadas las restricciones de dominio explicadas anteriormente, no es posible analizar este efecto en detalle.

La dilución corresponde a un parámetro de especial interés para determinar el cumplimiento de la normativa ambiental y potenciales impactos en comunidades bénticas de la zona. De acuerdo con algunas de las legislaciones estudiadas (Tabla 2.1) para un 10% de exceso salino, la dilución S_i es de 7.6; para un 5% de exceso, S_i es 13.2; y para salinidades que no superen 1 psu (caso más restrictivo), la dilución S_i es de 26.4.

Para los resultados de dilución en el impacto del chorro con el fondo, la normativa más restrictiva sólo no se cumple en una condición $u_r F_d=0$. Para los ajustes de Baum & Gibbes (2020), dicha normativa no se cumple para $u_r F_d \leq 0.7$, es decir, para velocidades ambientales $U_a \leq 0.12\text{m/s}$.

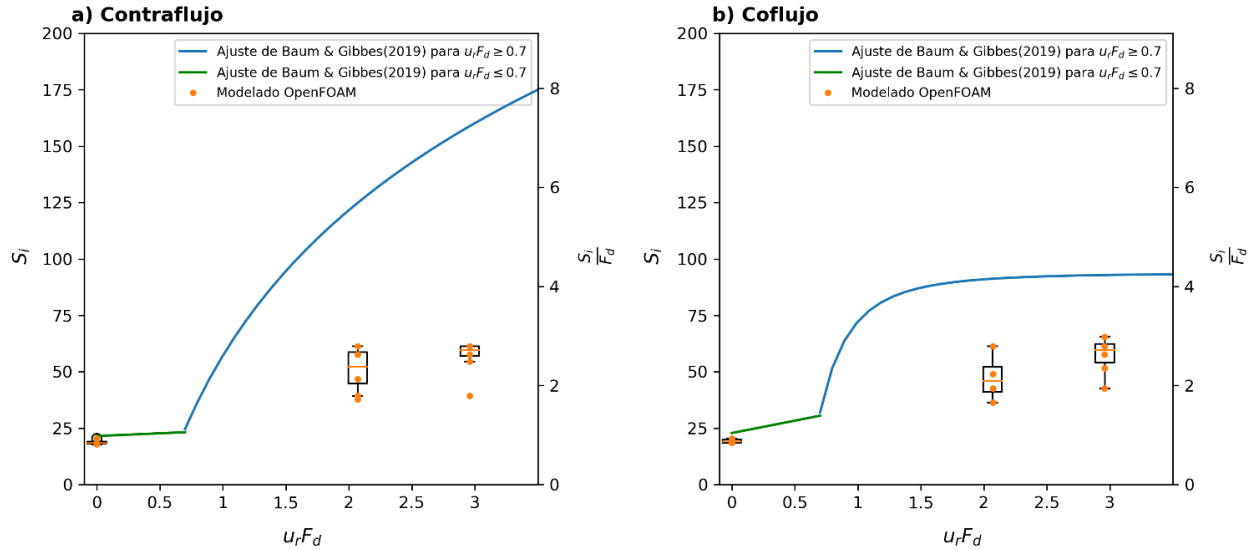


Figura 5.15: Dilución de impacto S_i del chorro. Comparación con experimentos de Baum & Gibbes (2020). La caja de error representa la dilución mínima S_i (barra inferior), el primer cuartil de S_i (borde inferior de la caja), la mediana de S_i (barra en la mitad de color amarillo), el tercer cuartil de S_i (borde superior de la caja), y la dilución máxima S_i para cada chorro de una determinada velocidad ambiental. Las circunferencias de color negro indican valores de S_i atípicos de la muestra que no debiesen ser considerados en el análisis.

La Tabla 5.1 expone el resumen de los datos obtenidos del análisis. En síntesis, las variables Z_t y X_t exhiben los mejores ajustes a los resultados de Baum & Gibbes (2020). Para X_i y S_i , las principales discordancias ocurren para $u_r F=2.07$ y $u_r F=2.96$, correspondiente a los casos en que el área de impacto acontece en el borde del dominio, por lo que X_i y S_i quedan limitados a este efecto. Como solución se propone la extensión del dominio o el análisis de velocidades ambientales inferiores.

Tabla 5.1: Tabla resumen para parámetros de chorros densos inclinados. Se presenta el promedio y desviación estándar de cada variable, las que consideran los chorros de todas las portas.

	Caso	B1	B2	B3
Velocidad de la corriente	U_a (m/s)	0.00	0.35	0.50
	$u_r F_d$ (-)	0.00	2.07	2.96
Z_t (m)	Coflujo	6.35 ± 0.25	5.36 ± 0.48	4.29 ± 0.53
	Contraflujo	6.36 ± 0.09	5.38 ± 0.68	4.59 ± 0.45
X_t (m)	Coflujo	4.43 ± 0.45	14.82 ± 2.29	18.36 ± 2.11
	Contraflujo	-4.22 ± 0.46	8.71 ± 3.29	9.06 ± 1.96
X_i (m)	Coflujo	8.45 ± 0.70	32.40 ± 0.90	40.00 ± 0.00
	Contraflujo	-8.09 ± 0.62	32.00 ± 0.00	40.00 ± 0.00
S_i (-)	Coflujo	19.61 ± 1.08	46.41 ± 9.47	55.75 ± 8.89
	Contraflujo	18.93 ± 1.08	48.55 ± 10.65	54.83 ± 9.16

5.2.4 Análisis corrientes de densidad

Una vez ocurrido el impacto del chorro con el lecho marino, la salmuera se convierte en una corriente de densidad. Factores como la pendiente geométrica acentúan este proceso, transportando las anomalías salinas a zonas lejanas respecto a la ubicación del difusor y acrecentando el área de influencia.

La Figura 5.16 refleja la transitividad en el transporte de salmuera para el caso $U_a = 0$ en un corte y-z, correspondiente a la dirección del emisario submarino. La sucesión de imágenes denota la influencia de la inclinación de fondo en la distribución y traslado de concentraciones.

La última captura de la Figura 5.16 representa un estado permanente de dilución. Dicha condición se comprueba con la serie de tiempo de la Figura 5.17, la cual considera el análisis de tres celdas ubicadas en una región intermedia entre la salida de los chorros y el límite del dominio.

Del estado permanente se observa que la capa estratificada limitada por 1 psu de exceso (normativa más restrictiva) se extiende 20 m aguas abajo, con un espesor máximo de ~2.7 m. Para un corte perpendicular (x-z), en la ubicación de la última porta (Figura 5.6a), la extensión en el eje x consigue ~9 m (posterior a la zona de impacto), por lo que el espesor decrece en una distancia más acotada. En la Figura 5.16, la zona aguas arriba del emisario también produce una capa densa, pero con concentraciones inferiores.

Por lo tanto, para un escenario con velocidad ambiental nula y luego del impacto, el transporte de salmuera ocurre en todas las direcciones, sin embargo, la pendiente de fondo indica la dirección dominante. Esta última, en comparación a otras direcciones, muestra valores más prominentes en la extensión y grosor de la capa densa estratificada.

La captura final refleja que las irregularidades salinas abarcan todo el dominio del modelo, extendiéndose 60 metros aguas abajo de la última porta. Dadas las limitaciones de este estudio, los análisis expuestos no superan un tiempo $t > 1500$ seg de operación de la planta. La acción continua de la planta bajo las mismas circunstancias podría incrementar las magnitudes de concentración que componen la zona estratificada. En este sentido, los efectos a largo plazo son desconocidos.

El modelo de turbulencia implementado en este estudio no incluye el término asociado a la boyancia. Para analizar su influencia, consideremos el número de Richardson gradiente:

$$R_i = \frac{N^2}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (5.1)$$

donde N corresponde a la frecuencia de boyancia:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}} \quad (5.2)$$

R_i indica el ratio entre la energía potencial disponible para la mezcla vertical y la energía cinética turbulenta. Al no considerar N en el análisis, en la mezcla predomina la cinética, por lo cual existe una alta capacidad de mezcla. En virtud de lo anterior, se presume una sobrestimación de los niveles de dilución de la capa estratificada.

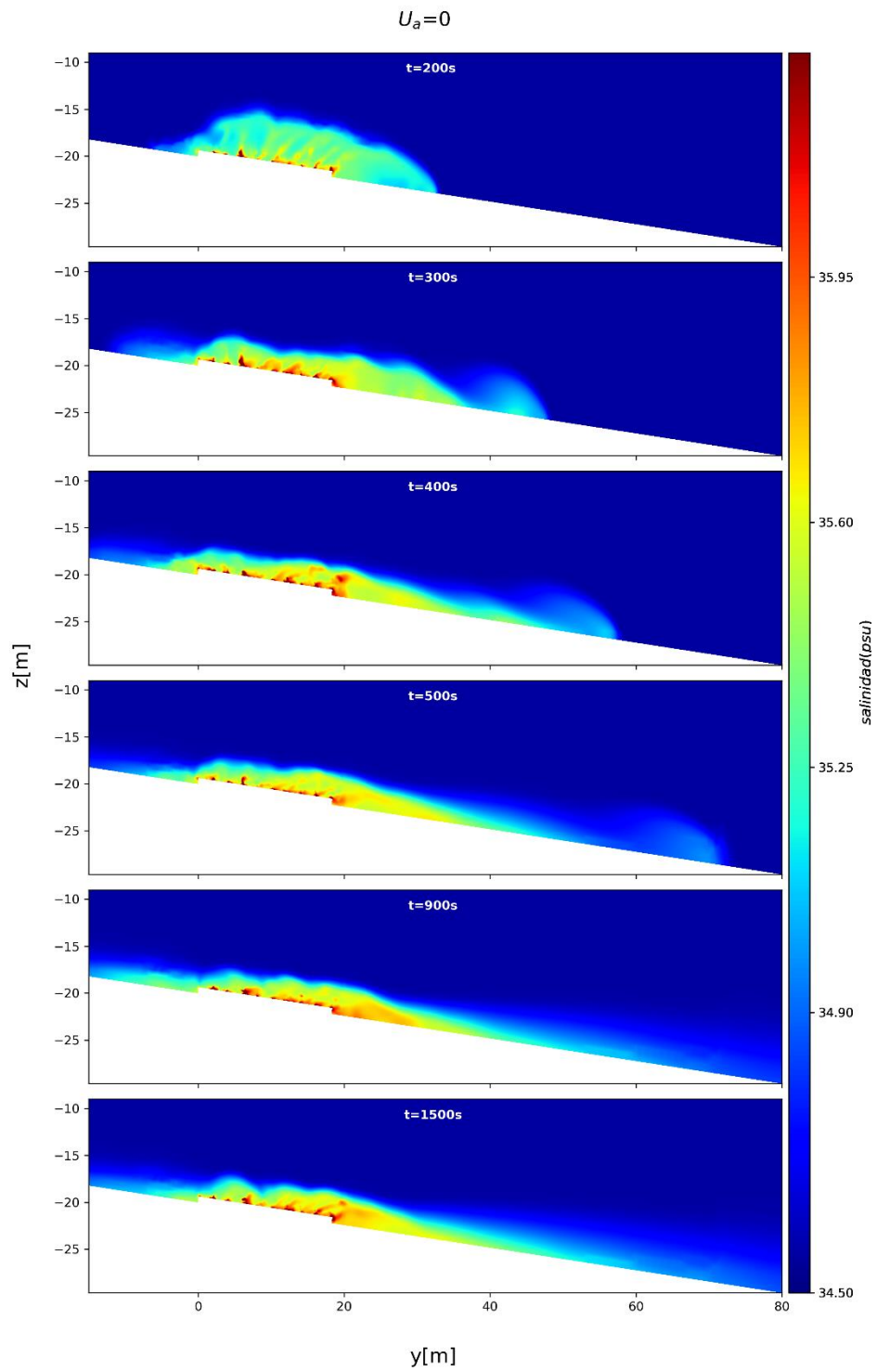


Figura 5.16: Corrientes de densidad en el tiempo para una velocidad ambiental U_a nula. Vista en corte z - y .

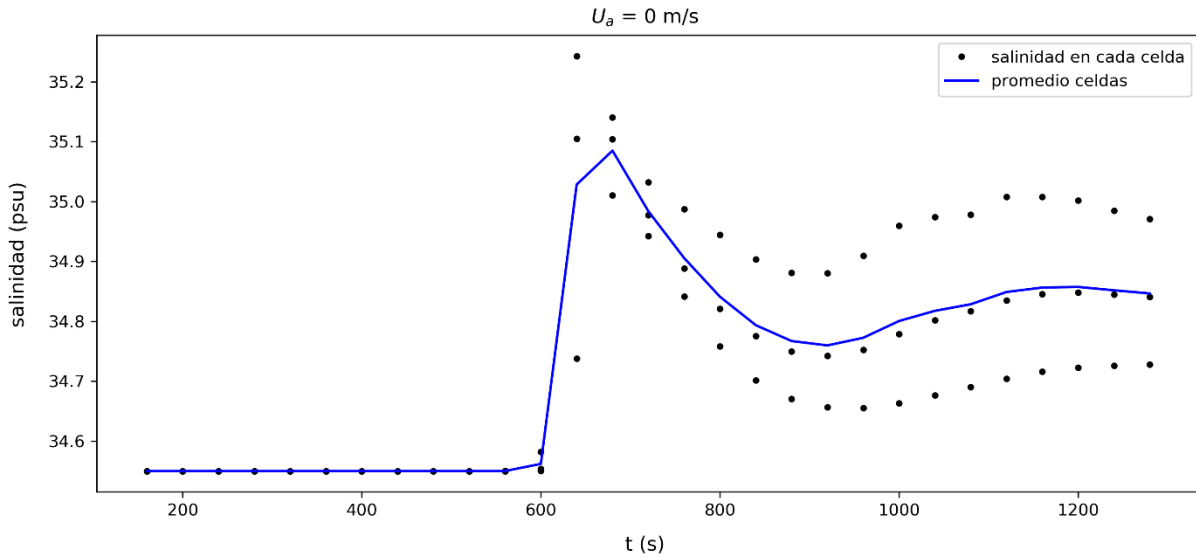


Figura 5.17: Salinidad en el tiempo para la simulación de la Figura 5.16. La serie de tiempo contempla tres celdas seleccionadas de regiones intermedias entre la salida del chorro y el límite del dominio.

5.2.5 Análisis fondo marino

La Figura 5.18 muestra una vista en planta de la distribución de concentraciones para el caso de U_a nulo. La curva en color negro corresponde al límite donde se cumple 1 psu de exceso, correspondiente a la normativa más restrictiva (respecto a lo estudiado).

Complementario a la sección previa se observa que la principal dirección de transporte ocurre en el eje y , en el sentido de la pendiente de fondo.

La zona de impacto de cada chorro queda caracterizada por niveles de salinidad levemente mayores respecto al área circundante. El radio de influencia de los chorros eyectados por las primeras portas es inferior en contraste a los demás, es decir, la dilución es más efectiva. Coincidentemente estos corresponden a los chorros que mayor desplazamiento alcanzan. Anteriormente se comentó que este fenómeno estaría asociado a la mayor área de dilución disponible que tienen los primeros chorros de cada lado del emisario.

Para obtener una mayor confiabilidad en las condiciones salinas de fondo se recomienda comprobar condiciones de borde en paredes y ejecutar un modelo de turbulencia que modele en detalle las interacciones con paredes.

Condición permanente $U_a = 0$ m/s

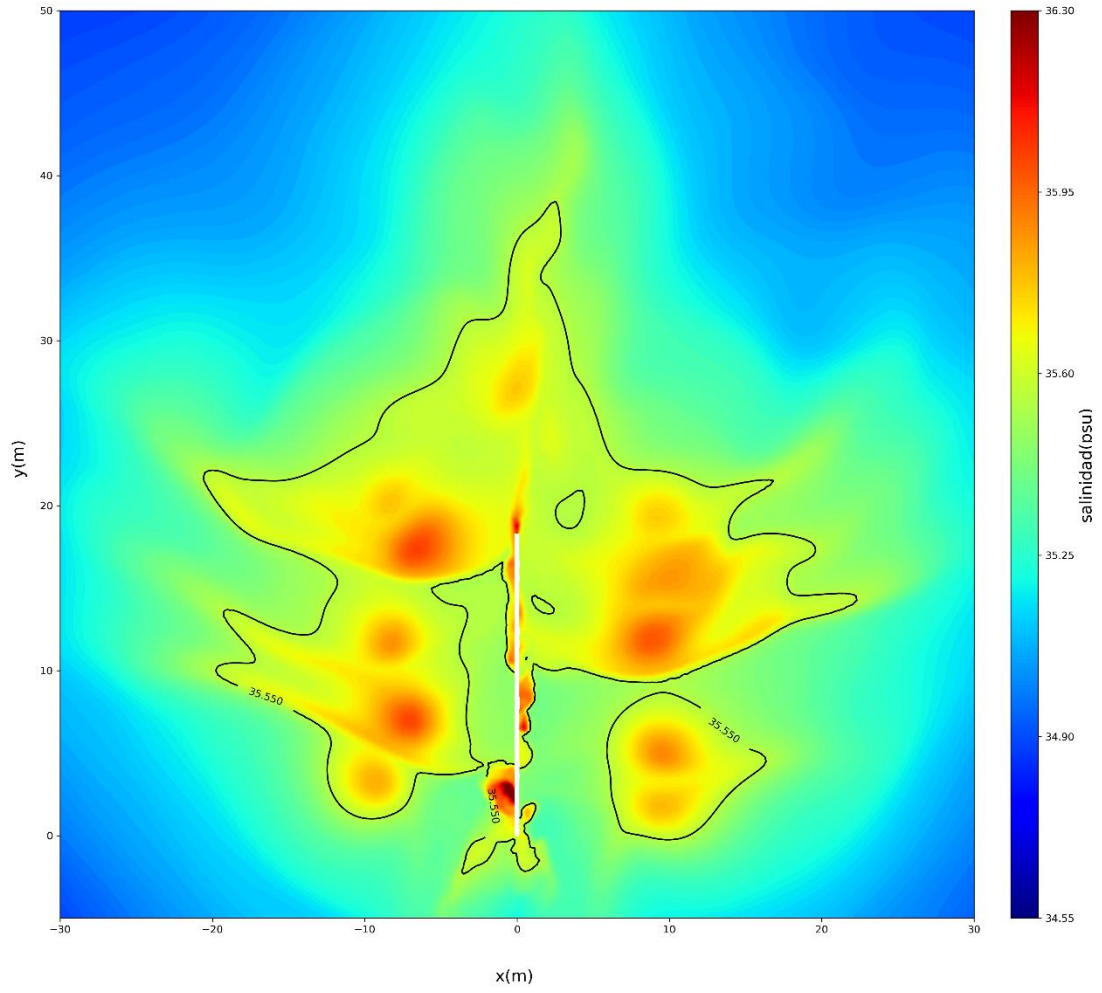


Figura 5.18: Salinidad en el fondo marino para una velocidad ambiental U_a nula en estado permanente.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

En esta memoria fueron aplicadas simulaciones numéricas del tipo CFD para caracterizar los fenómenos físicos en cuestión. Puntualmente, este trabajo caracteriza la trayectoria de chorros salinos descargados mediante un sistema difusor multipuerto alternado perteneciente a la Planta desalinizadora Minera Candelaria, situada en la ciudad de Caldera. La estructura en cuestión la compone un emisario submarino con cinco portas a cada lado, que, en total, vierten un caudal de $0.655 \text{ m}^3/\text{s}$.

El análisis abarcó dos partes, primero, un modelo bidimensional capaz de describir características generales de transporte; y segundo, un modelo tridimensional ajustado a condiciones realistas de la descarga. Por un lado, los escenarios bidimensionales simulados varían en las condiciones de diseño y el número de portas en funcionamiento. Por otro lado, en los modelos tridimensionales, la variabilidad de los escenarios reside en la magnitud de la velocidad ambiental uniforme U_a , contemplándose tres casos: (1) $U_a = 0$, (2) $U_a = 0.35 \text{ m/s}$ y (3) $U_a = 0.5 \text{ m/s}$. La velocidad (2) corresponde a la más alta registrada por estudios previos en la zona y (3) a un caso de examinación adicional, sin embargo, las mediciones efectuadas en la zona establecen que las corrientes ambientales predominantes son inferiores a las analizadas. En (1) se ejecuta un modelo simplificado que no considera corriente ambiental.

El modelo en dos dimensiones colaboró en el entendimiento del solucionador aplicado y la validación de las condiciones de borde, no obstante, los resultados fueron catalogados como no válidos por dos razones. Primero, la fusión entre chorros impide el desplazamiento horizontal esperado, y segundo, los altos niveles de salinidad en la zona de mezcla indican la poca efectividad del sistema difusor, difiriendo ampliamente con los resultados del modelo Cormix. También, el modelo bidimensional muestra una alta sensibilidad a la velocidad e inclinación de descarga.

Los resultados del modelo tridimensional demostraron consistencia en los valores de dilución respecto a los obtenidos en los modelos comerciales Cormix y Visjet. Además, una comparación general con datos experimentales de Baum & Gibbes (2020) demostró la validez de la mayoría de los resultados numéricos.

La examinación cualitativa (Figuras 5.4, 5.5 y 5.6) mostró el efecto de U_a en el transporte de la pluma salina. Para U_a nula los chorros mantienen un comportamiento simétrico previo al impacto, luego se acomodan hasta alcanzar un estado permanente (para esta situación los chorros manifiestan una conducta semi estable en el tiempo, con cambios despreciables en su trayectoria, verificable en la Figura 5.7). Para los casos (2) y (3), los chorros adoptan la dirección y sentido de la corriente ambiental, impactando en áreas cercanas al límite del dominio.

El estudio de Palomar (2011) expone las limitantes de modelos comerciales como Cormix y Visjet. Entre ellas, no se modela: la interacción con los límites, por lo que los resultados quedan acotados a un escenario previo al impacto de los chorros con el suelo; el campo lejano; el efecto Coanda; y la recirculación de salinidad producto del impacto. Además, el software Visjet no modela la fusión entre las plumas salinas. En contrapuesta, los modelos CFD asumen menos

hipótesis simplificadoras y consiguen describir la dilución desde el campo cercano al lejano, pero en un dominio acotado.

Los resultados que comparan el modelo generado (previo al impacto) con los softwares en cuestión (Figuras 5.8 y 5.9) muestran que las diluciones requeridas alcanzan órdenes de magnitud similares. Las principales diferencias surgen con el modelo CFD en condiciones permanentes y para concentraciones $\frac{c-c_a}{c_a} \leq 0.05$ (Figura 5.11). Aquí, dichas concentraciones tocan el fondo marino y se distribuyen en él, correspondiente a un fenómeno más realista del comportamiento del chorro.

Las Figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 muestran las comparaciones efectuadas con los experimentos de Baum & Gibbes (2020), los cuales utilizan los parámetros adimensionales $\frac{Z_t}{dF_d}$, $\frac{X_t}{dF_d}$, $\frac{X_i}{dF_d}$ y $\frac{S_i}{dF_d}$ para la descripción del chorro denso inclinado. La variabilidad de los resultados de dichos autores queda determinada por bandas de errores, que van desde $u_r F_d=0$ a $u_r F_d=1.6$, fuera del rango de los escenarios estudiados. Por lo tanto, los resultados de esta memoria solo se comparan con los ajustes de sus experimentos.

De acuerdo al análisis, las variables Z_t y X_t presentan los mejores ajustes a la literatura. Los parámetros X_i y S_i , en cambio, muestran discrepancias para $u_r F_d=2.07$ y $u_r F_d=2.96$ ($U_a = 0.35\text{m/s}$ y $U_a = 0.5\text{m/s}$ respectivamente), escenarios en los que el impacto ocurre en áreas cercanas a los límites del dominio. Esto impide contrastar las estimaciones para X_i y S_i , además, en relación a lo comentado en el capítulo anterior, las condiciones de borde de salida pueden influir en el comportamiento del chorro para un dominio acotado (este efecto solo fue comprobado para $U_a = 0$, sin embargo, ante una extensión de la geometría la influencia de la condición de borde en la trayectoria del chorro se disipa), según sea el caso.

Para una validación íntegra de las variables Z_t , X_t , X_i y S_i las principales recomendaciones consideran: incrementar el dominio para los casos de U_a estudiados; agregar un análisis para corrientes marinas inferiores a 0.35 m/s , correspondiente a la velocidad de corriente más alta registrada por estudios previos; y comparar el modelo con otros resultados experimentales.

El modelo efectuado para $U_a = 0$ contempla un análisis de campo lejano, del cual fue posible examinar las concentraciones en el lecho marino y el transporte de la corriente salina. Los modelos comerciales, como fue mencionado anteriormente, no resuelven este tipo de fenómenos, los cuales contribuyen a nuevas perspectivas para la estimación de la influencia salina y su impacto en la vida marina circundante.

El análisis en cuestión muestra que, una vez producido el impacto, el traslado de salmuera ocurre en todas las direcciones, predominando la trayectoria asociada a la pendiente de fondo (Figura 5.12 y 5.13). Su constante eyección al ambiente forma una capa densa estratificada, que, para el caso, se presume una subestimación en los niveles de concentración que la componen, puesto que el modelo de turbulencia no incluye el término boyante.

La concentración salina en el fondo permite estimar el área que excede una concentración en particular y la extensión que abarca en el lecho marino. Para el caso (Figura 5.13), las diluciones

varían en cada zona de impacto, fenómeno que podría verse influenciado por la pendiente de fondo y la ocurrencia del efecto Coanda. Para las condiciones de diseño implementadas, la distribución espacial de salinidad evidencia un cumplimiento en todas las normativas señaladas en la Tabla 2.1, tanto en la dirección x transversal al difusor, como en la dirección y (con $y > 20$ m) longitudinal al difusor.

En Chile no existe regulación ambiental asociada a la dispersión de descargas salinas en el océano. Esto cobra especial relevancia si la biota marina que reside en las costas es endémica de la zona, puesto que las reacciones ante anomalías salinas son desconocidas. Además, diversos estudios comprueban la alta sensibilidad de algunos organismos a alteraciones salinas en su hábitat, causándoles incluso, la muerte.

El enfoque CFD puesto en práctica, en contraste a modelos comerciales, demostró perspectivas adicionales de examinación, sobre todo en la descripción de los chorros posterior al impacto, las concentraciones acumuladas en el fondo marino y la formación de la capa estratificada.

Las simulaciones del tipo transiente proporcionaron un entendimiento del comportamiento del chorro hasta adquirir la permanencia o semi-permanencia. No obstante, el modelo diseñado queda sujeto a un costo computacional elevado, superando en varios órdenes de magnitud a los proporcionados por los softwares de uso actual. El estudio realizado por Baum & Gibbes (2020) pretende solucionar dicha problemática, ejecutando un enfoque cuasi-permanente que reduce notablemente los tiempos de computación. Por ello, se recomienda comparar ambos puntos de vista bajo las mismas condiciones geométricas y de diseño implementadas en este estudio.

El modelo numérico generado presenta un panorama general de la dilución en el sistema. Para futuros trabajos podría considerarse: implementación del modelo de turbulencia $k - \omega$ SST para describir adecuadamente el comportamiento de chorros en las paredes; corrientes marinas no uniformes en la vertical; estratificación de densidad propia de la zona; análisis de campo lejano para $U_a \neq 0$; distribución no uniforme de caudal de salmuera en las portas del difusor; efecto de las olas en la dilución de salmuera; efectos de la marea en la variación de densidad ambiental; efectos en la conducta de los chorros producto de la porosidad del suelo marino; y las potenciales infiltraciones salinas hacia capas de suelo más profundas.

BIBLIOGRAFÍA

Abessi, O., Roberts, J. 2014a. Multiport diffusers for dense discharges. *Journal of Hydraulic Engineering* 140 (2): 04014032

Abessi, O., Roberts, J. 2015a. Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering* 141 (8): 06015009.

Abessi, O., Roberts, J. 2017. Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water. *Journal of Hydraulic Engineering* 143 (6): 04017003.

Abessi, O., Roberts, J. 2018. Rosette diffusers for dense effluents in flowing currents. *Journal of Hydraulic Engineering* 144 (1): 06017024.

Abessi, O. 2018. Sustainable desalination handbook. Chapter 7: Brine Disposal and Management-Planning, Design, and Implementation. Elsevier.

ARCADIS. 2010. Estudio de Impacto Ambiental Planta Desalinizadora Minera Candelaria. Recuperado de: <https://www.sea.gob.cl/>

ARKA. 2010. Informe de evaluación arqueológica subacuática modificación layout proyecto “Planta desaladora Minera Candelaria”, comuna de Caldera, III región de Atacama. Recuperado de: <https://www.sea.gob.cl/>

Baum, M., Gibbes, B., 2020. Field-Scale Numerical Modeling of a Dense Multiport Diffuser Outfall in Crossflow. *Journal of Hydraulic Engineering* 146(1): 05019006.

Bleninger, T., Jirka, G., 2008. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination* 221, 585-597.

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.

Chang, J. 2015. Understanding the role of ecological indicator use in assessing the effects of desalination plants. *Desalination* 365, 416-433.

De Padova, D., Mossa, M., Sibilla, S. 2020. Numerical investigation of the behaviour of jets in a wave environment. *Journal of Hydraulic Research* 58: 618-627.

Efraty, A., Gal, Z. 2012. Closed circuit desalination series no 7: retrofit design for improved performance of conventional BWRO system. *Desalination and Water Treatment* 41 (1) 301–307.

ESI-OpenCFD, 2020. OpenFOAM: User Guide version 8. OpenCFD Ltd.

Fischer, H., List, J., Koh, R., Imberger, J., Brooks, N. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, Inc.

Greenlee, L., Lawler, D., Freeman, B., Marrot, B., Moulin, P., Ce, P. 2009. Reverse osmosis desalination : Water sources , technology , and today ’ s challenges. *Water Research* 43, 2317-2348

Höpner, T., Windelberg, J. 1996. Elements of environmental impact studies on the coastal desalination plants. *Desalination* 108, 11–8.

Kress, N. 2019. *Marine impacts of seawater desalination: Science, Management, and Policy*. Elsevier.

Lattemann, S., Höpner, T. 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220(1–3), 1–15

López, E., Zappa, A., Wild, C. 2017. Determinación de las características aerodinámicas de perfiles para aerogeneradores de baja potencia utilizando dinámica de fluidos computacional. *Mecánica Computacional XXXV*, 925-940.

Menter, F. 1993. Zonal two equation $k - \omega$ turbulence models for aerodynamics flows. En 24th Fluid Dynamics Conference, 93-2906. AIAA, Orlando, Florida.

Miozzi, M., Lalli, F., P. Romano ,G. 2010. Experimental investigation of a free-surface turbulent jet with Coanda effect. *Exp Fluids* (2010) 49: 341-353.

Missimer, T., Maliva, R. 2018. Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination : Intakes and outfalls. *Desalination* 434, 198-215.

Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M. (2015). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*. Springer Publishing Company.

Niño, Y. 2018. Density currents. En Apunte de curso Hidrodinámica Ambiental. Universidad de Chile.

Niño, Y. 2018. Flow and transport equations in Surface waters. En Apunte de curso Hidrodinámica Ambiental. Universidad de Chile.

Palomar, P., Lara, J., Losada, I., Rodrigo, M., Álvarez, A. 2012. Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination* 290, 14-27.

Palomar, P., Losada, I.J. 2011. Impacts of brine discharge on the marine environment. Modelling as a predictive tool. Environmental Hydraulic Institute “IH Cantabria”, Universidad de Cantabria.

Panagopoulos, A., Haralambous, K., Loizidou, M., 2019. Science of the Total Environment Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of the Total Environment* 693.

Petersen, K., Frank, H., Paytan A., Bar-Zeev, E. 2018. Sustainable desalination handbook. Chapter 11: Impacts of Seawater Desalination on Coastal Environments. Elsevier.

Pope, S. 2002. *Turbulent Flow*, UK: Cambridge University Press.

PRDW-AV. 2010. Proyecto Planta Desalinizadora Minera Candelaria: Evaluación de pluma de descarga de agua salada en el medio marino. Recuperado de: <https://www.sea.gob.cl/>

Rodríguez, F., Santiago, D., Franquiz, N., Ortega, J., Veza, J., 2012. Comparison of evaporation rates for seawater and brine from reverse osmosis in traditional salt works: empirical correlations. *Water Sci. Technol. Water Supply* 12 (2), 234–240.

SCCWRP. 2012. Management of brine discharges to coastal waters recommendations of a science advisory panel. Southern California Coastal Water Research Project, Technical Report 694.

Russo, F., and N. T. Basse. 2016. “Scaling of turbulence intensity for low-speed flow in smooth pipes.” *Flow Meas. Instrum.* 52 (Dec): 101–114.

Turek, M., Mitko, K., Piotrowski, K., Dydo, P., Laskowska, E., Jakóbi-Kolon, A., 2017. Prospects for high water recovery membrane desalination. *Desalination* 401, 180–189.

Voutchkov, N., 2013. *Desalination Engineering: Planning and Design*, McGraw-Hill.

Voutchkov, N., 2018. Sustainable desalination handbook. Chapter 1: Membrane Desalination—Process Selection, Design, and Implementation. Elsevier.

Wood, E., Silverman, J., Galanti, B., Biton, E., 2020. Modelling the distributions of desalination brines from multiple sources along the Mediterranean coast of Israel. *Water Research* 173.

Zhang, S., Law, A., Jiang, M. 2017. Large eddy simulations of 45° and 60° inclined dense jets with bottom impact. *Journal of Hydro-environment Research* 15 (1), 54–66.

Ziolkowska, J. 2015. Is Desalination Affordable? — Regional Cost and Price Analysis. *Water Resour Manage* 29,1385–1397.

ANEXOS

A. Ecuaciones del modelo $k - \omega$ SST

La versión de flujo incompresible para este modelo se escribe como:

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^2 \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{D\rho\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (\text{A.2})$$

Las constantes ϕ genéricas se obtienen como sigue:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (\text{A.3})$$

El set 1 para ϕ_1 :

$$\begin{aligned} \sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \alpha_1 = 0.31, \beta^* = 0.09, \\ \kappa = 0.41, \gamma_1 = \beta_1 / \beta^* - \sigma_{\omega1} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Las constantes para el set 2 (ϕ_2) corresponden al modelo *standard k - ϵ* :

$$\begin{aligned} \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, \\ \kappa = 0.41, \gamma_2 = \beta_2 / \beta^* - \sigma_{\omega2} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

La función F_1 es definida como:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1) \quad (\text{A.6})$$

$$\text{arg}_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right) \quad (\text{A.7})$$

donde y es la distancia a la pared más cercana, y:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right) \quad (\text{A.8})$$

La viscosidad turbulenta cinemática ν_t queda definida como:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (\text{A.9})$$

donde Ω es el valor absoluto para la vorticidad y F_2 es dado por:

$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2) \quad (\text{A.10})$$

$$arg_2 = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega}\right) \quad (\text{A.11})$$

En las ecuaciones τ_{ij} corresponde a las tensiones de Reynolds, ρ la densidad del fluido, k la energía cinética turbulenta, u_i la velocidad en la dirección i , μ_t la viscosidad dinámica turbulenta del fluido y ω es la tasa específica de disipación turbulenta.