



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniera Civil Oceánica

CÁLCULO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA PLUMA DE DESCARGA DE UNA
DESALADORA

Paula Ignacia Tatán Montecino

Enero 2023

CÁLCULO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA PLUMA DE DESCARGA DE UNA
PLANTA DESALADORA

Paula Ignacia Tatán Montecino

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
SERGIO BIDART L.	_____	_____
MAURICIO REYES G.	_____	_____
PATRICIO WINCKLER G.	_____	_____

A Odín y Lulú, mi vida

DECLARACIÓN

Este trabajo, considerado tanto en su totalidad como alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, ni institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal; ya sea para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría partir a agradeciendo a mi Mamá y Papá quienes fueron los que me impulsaron a seguir este proceso, quienes a lo largo de mi vida me han entregado valores, conocimientos, experiencias y amor, quienes me demostraron que si se puede salir adelante. Mamita, muchas gracias por siempre buscar lo mejor para mí y mi hermano, por sacarnos darnos un futuro mejor, de todo el sacrificio que hiciste por años para que tengamos un futuro mejor. Papito, mi subversivo favorito, gracias por enseñarme a nunca dejarme pisotear, y pelear por lo que creemos justo y, sobre todo, gracias por aceptarme como una hija.

En según lugar a mi hermanito querido, Eros Marrazzotti como se decía él, mi bullanguero preferido y mi compañero de estadio, gracias por estar conmigo siempre y darme ánimos a tu forma, eres mi mayor orgullo, te amo un montón.

En tercer lugar, a mi amigo, compañero y confidente, quién ha tenido que aguantar gran parte de esta carga, sobre todo en el último mes. Muchas gracias amor, por ser quien me alienta a seguir cada día, y por intentar mostrarme el lado lindo de este camino. Te amo

A mi familia, Abuelas, Tata, tías, tíos, primas y primos, por celebrar mis logros como si fueran de ellos y por entregarme un amor incondicional.

Que hubiese sido de este proceso sin mis amigos, Juank, Ale, Mati, Michel, Alex, Jorge, de verdad gracias por levantarme cada vez que me vieron mal. Y una especial mención a Goodeve, quién me ayudó a centrar y ordenar mi mente durante el desarrollo de esta memoria.

No quiero dejar a de agradecer a un gran profesor Matías Quezada, quién junto con Ariel, Felipe y Diego me mostraron la luz en un momento donde solo veía oscuridad. Gracias a ustedes pude terminar este proceso.

Y, por último, pero sin quitarle la importancia, a Benja y el equipo de DHI por facilitarme una licencia gratuita y estudiantil de MIKE para desarrollar mi memoria.

RESUMEN

La memoria se centra en estudiar los procesos de mezcla de la pluma salina descargada al mar mediante emisarios submarinos. Mediante un modelo numérico comercial como MIKE, se simulan distintos escenarios en un cuerpo geométrico simplificado. Se sensibilizan cinco variables propias de la descarga y del medio para evaluar la relevancia que tienen en el proceso de mezcla.

El desarrollo se realiza en dos partes: La primera consiste en la configuración e implementación del modelo numérico. Y la segunda, en el análisis comparativo para campo cercano, en donde los resultados obtenidos se contrastan con los de Federici (2017), y otro para campo lejano, en donde se evalúan las variables que tienen una participación más activa en el área de influencia.

Del estudio se obtiene que las variables propias de la descarga son en gran parte, las responsables que el proceso de dilución se desarrolle de forma óptima en el campo cercano y, posterior, las variables del medio, como la velocidad o la salinidad culminan con la dilución en campo lejano. Por otra parte, posterior al análisis en campo lejano se recomienda al evaluador de impacto ambiental tomar ciertas consideraciones con los proyectos realizados con MIKE como, solicitar un *test* de convergencia espacial y temporal para asegurar que no hayan variaciones en los resultados, y para un análisis cercano a los difusores, utilizar un software que sea capaz de simular la trayectoria y geometría.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	ALCANCES Y LIMITACIONES	3
4.	MARCO TEÓRICO.....	4
4.1	Desalinización	4
4.2	Descarga de salmuera mediante emisarios submarinos	5
4.3	Área de influencia.....	6
4.4	Forzantes Hidrodinámicas.....	7
4.5	Procesos de mezcla	8
4.6	Software MIKE 3 Flow Model FM	9
4.7	Estudio de Referencia	15
4.8	Normativa Vigente	16
5.	METODOLOGÍA	19
5.1	Configuración del modelo numérico	20
5.2	Análisis comparativo.....	26
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
6.1	Campo cercano	29
6.2	Campo Lejano	36
6.3	Área de Influencia.....	42
7.	CONCLUSIONES.....	44
8.	REFERENCIAS.....	46

ANEXO

ANEXO 1: Configuración del modelo en MIKE.....	49
ANEXO 2: Ubicación punto de descarga en las coordenadas 503.83, 507.19, -19.5	51

FIGURAS

Figura 4.1: Esquema básico de una planta desalinizadora mediante Osmosis Inversa.....	4
Figura 4.2: Descarga sumergida a través de una tubería y boquilla o un difusor.....	5
Figura 4.3: a) Emisario con una descarga simple; b) Emisario con un difusor de múltiples boquillas	6
Figura 4.4: Ejemplo de definición de área de influencia, donde se muestra la distribución temporal de exceso de salinidad 5% en la columna de agua en mes representativo de verano. Coquimbo.	7
Figura 4.5: Esquema simplificado del perfil de la velocidad horizontal de las corrientes para forzantes a) viento, b) marea y c) oleaje en un medio no estratificado.	8
Figura 4.6: Esquema de descarga de choro	9
Figura 4.7: Esquema definición modelo integrado jet de campo cercano. MIKE 3 FM.	13
Figura 4.8: Datos de salida del chorro en campo cercano	14
Figura 5.1: Diagrama de flujo de metodología propuesta para el desarrollo de la memoria. Con color rojo los datos de entrada al modelo.....	19
Figura 5.2: Ventana inicial MIKE 3 Flow Model	21
Figura 5.3: Hydrodynamic Module MIKE 3 Flow Model.....	21
Figura 5.4: Esquema configuración caso inicial MIKE. a) Vista en planta; b) Vista lateral.....	22
Figura 5.5: Esquema descarga de salmuera.....	23
Figura 5.6: a) Malla $\Delta x = 25 \text{ m}$; b) Malla $\Delta x = 5 \text{ m}$; c) Malla $\Delta x = 1 \text{ m}$; d) Malla $\Delta x = 0,5 \text{ m}$	23
Figura 6.1: Distancia máxima horizontal del chorro de salmuera en el campo cercano obtenida mediante <i>MIKE</i> y <i>CORMIX</i> (<i>Federici, 2017</i>).....	31
Figura 6.2: Gráfico de dispersión entre los alcances máximos horizontales de MIKE 3 Flow Model y CORMIX.	33
Figura 6.3: Dilución al fin del campo cercano entre <i>MIKE</i> y <i>CORMIX</i> (<i>Federici, 2017</i>).....	34
Figura 6.4: Gráfico de dispersión entre las diluciones al fin del campo cercano entre CORMIX y MIKE	36
Figura 6.5: Salinidad según la variación de velocidad en campo lejano con respecto a la inclinación del chorro en la vertical	37

Figura 6.6: Comportamiento de la salinidad en el campo lejano con respecto a la inclinación de la descarga.....	38
Figura 6.7: Comportamiento de la salinidad en el campo lejano con respecto a la disminución de velocidad en la descarga.....	39
Figura 6.8: Comportamiento de la salinidad en el campo lejano con respecto al incremento de salinidad en la descarga.....	40
Figura 6.9: Comportamiento de la salinidad en campo lejano con respecto a la orientación del chorro	41
Figura 6.10: Área de influencia para el Caso N°18. a) $\Delta x = 25 \text{ m}$; b) $\Delta x = 5 \text{ m}$; c) $\Delta x = 1 \text{ m}$; d) $\Delta x = 0,5 \text{ m}$	43

TABLAS

Tabla 4.1: Regulaciones Internacionales para la descarga de salmuera	18
Tabla 5.1: Listado de casos a simular. Los número en negrita representan las variaciones que se realizan a cada variable.....	25
Tabla 5.2: Resultados CORMIX de campo cercano obtenidos por Federici (2017). Distancia horizontal y dilución.....	26
Tabla 6.1: Distancia y dilución al fin del campo cercano mediante MIKE.....	30
Tabla 6.2: Diferencias porcentuales en el alcance máximo entre <i>MIKE</i> y <i>CORMIX</i> (Federici, 2017)	32
Tabla 6.3: Diferencias porcentuales en la dilución entre <i>MIKE</i> y <i>CORMIX</i>	35

1. INTRODUCCIÓN

Las proyecciones indican que Chile sufrirá una disminución en disponibilidad de recursos hídricos, provocado por la reducción de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas (MOP, 2020). La escasez hídrica es un problema creciente en el país debido a la sequía y al cambio climático. En consecuencia, el mercado chileno ha tenido que buscar opciones para satisfacer la demanda de agua potable buscando nuevas técnicas de extracción de agua, siendo las plantas desalinizadoras fuentes capaces de proporcionar un suministro de agua capaz de abastecer a la comunidad y a los sectores minero y agrícola.

Sin embargo, existen impactos ambientales asociados a la descarga de salmuera en el mar, que dependen de las propiedades fisicoquímicas del vertido y la susceptibilidad de los ecosistemas costeros frente a la descarga. Por ejemplo, con respecto a la salinidad, hay que señalar que los organismos marinos se encuentran un equilibrio osmótico con el medio ambiente que les rodea, y un aumento en la concentración de sales de este medio originará la muerte, sobre todo en larvas e individuos jóvenes. No obstante, la sensibilidad ante los incrementos de salinidad varía de unas especies a otras; al igual que otras especies, algas como las silíceas pueden tolerar elevadas salinidades, pero siempre tras un periodo de aclimatación (Fariñas Iglesias, 2022).

Este proyecto se centra en estudiar, mediante un modelo numérico comercial, el proceso de mezcla de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos en una geometría simplificada. La simulación se realiza mediante el software *MIKE 3 Flow Model*, que se basa en las ecuaciones tipo RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations). Se sensibilizan cinco variables propias de la descarga y del medio para evaluar la relevancia que tienen en el proceso de mezcla. Los resultados de este modelo son contrastados con los obtenidos por Federici (2017), quién utilizó *CORMIX* para caracterizar el campo cercano. Además, se evalúan las variaciones que sufre la salmuera en el campo lejano y el área de influencia.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta memoria es estudiar el área de influencia de la descarga de salmuera de un emisario submarino, mediante un modelo hidrodinámico basado en las ecuaciones tipo RANS.

Los objetivos específicos son:

1. Implementar un modelo de geometría simple y condiciones ambientales controladas.
2. Efectuar un análisis de sensibilidad de las variables que rigen el proceso de mezcla en campo cercano y lejano.
3. Comparar los resultados con los modelos empíricos implementados por Federici (2017).
4. Evaluar el área de influencia de una descarga de salmuera en el modelo de geometría simple.
5. Generar recomendaciones al SEIA para evaluar proyectos de modelación mediante *MIKE 3 Flow Model*.

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

Para efectos de esta memoria:

1. El análisis comparativo se estudia tomando los resultados entregados por Federici (2017) y son contrastados con los obtenidos con *MIKE*. No se hará un análisis exhaustivo de las ecuaciones de gobierno de cada modelo.
2. Se desconoce la entrada de datos que realizó Federici (2017) en CORMIX, por lo tanto, los parámetros que no se encuentren mencionados en esta memoria han sido configurado según las recomendaciones del manual de *MIKE*, cuyos valores vienen por defecto.
3. Las condiciones ambientales considerada en este estudio como forzante son las corrientes influyendo en la descarga de salmuera.

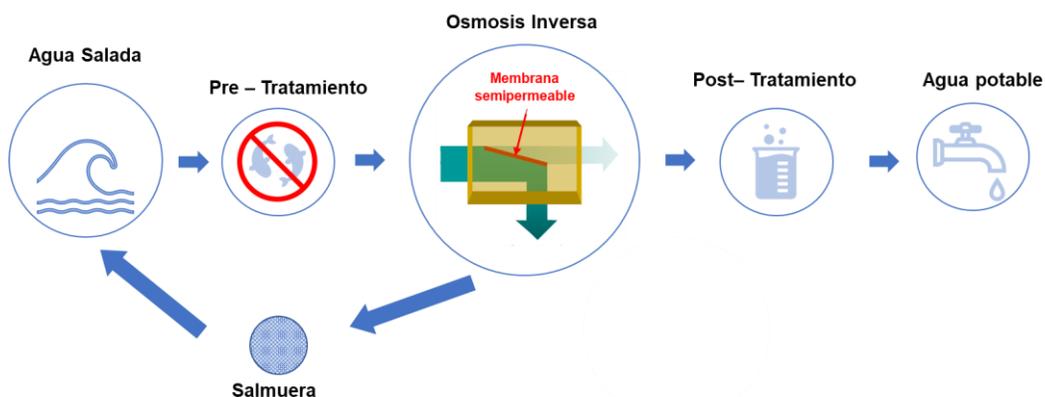
4. MARCO TEÓRICO

4.1 DESALINIZACIÓN

La desalinización consiste en un proceso de tratamiento del agua de mar mediante el cual se le extrae la sal que naturalmente posee y se convierte en agua potable, agua de riesgo o insumo para procesos mineros o industriales. Existen diferentes métodos para minimizar los niveles de salinidad en el agua, aunque el proceso de **osmosis inversa** es el sistema de desalinización más extendido y avanzado en todo el mundo.

En el proceso de desalinización vía Osmosis Inversa (OI) se utilizan membranas semipermeables que permiten el paso de las moléculas de agua, pero no de las sales contenidas en ella. Según muestra la Figura 4.1, en la primera etapa del proceso se realiza un pretratamiento al agua que, mediante filtros, busca eliminar la mayor cantidad sólidos. Luego, bombas de alta presión fuerzan el paso del agua a través de las membranas semipermeables, dejando alrededor del 99% de las sales en ella. Finalmente, al agua desalinizada se le realiza un postratamiento para agregar minerales y sales esenciales para el consumo humano y, la salmuera retenida es devuelta al mar mediante emisarios submarinos (LEGCOHK, 2015).

Figura 4.1: Esquema básico de una planta desalinizadora mediante Osmosis Inversa



Fuente: Elaboración propia

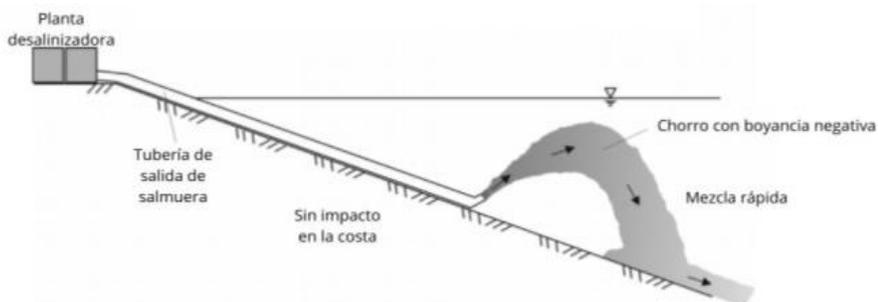
4.2 DESCARGA DE SALMUERA MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS

La circular D.G.T.M. Y M.M. ordinaria N° A-53/004 define a un emisario submarino como “toda forma de ducto destinado a descargar materias, energía o sustancias en estado acuoso, resultantes de un proceso industrial o sanitario, en forma submarina o subacuática, a cuerpo de aguas marinas costeras, hasta las 12 millas náuticas”.

El sistema de vertido de salmuera influye en su mezcla y dilución en el agua marina. Entre los sistemas más utilizados se encuentran a) el vertido directo superficial, b) sobre estructuras porosas, c) con emisario submarino de chorro único o d) con difusor con múltiples boquillas (Palomar et al., 2008).

Según la configuración, el vertido mediante emisarios submarinos se encuentra dentro los sistemas que maximizan la dilución de la salmuera. Por ejemplo, una leve inclinación de las boquillas del difusor hacia la superficie (Figura 4.2) facilita la dilución de la salmuera, pues debido a su mayor densidad, experimenta un movimiento parabólico. En su tramo ascendente, este movimiento está forzado por la cantidad de movimiento transmitida en la impulsión. Una vez alcanzado el punto de máxima altura, se da paso al movimiento descendente, donde domina la gravedad y la diferencia de densidad con el fluido receptor. Tras el impacto del chorro con el fondo, se forma una capa turbulenta que conlleva a una mezcla y dilución adicional, pero mucho más lenta de la salmuera (Palomar et. al, 2008).

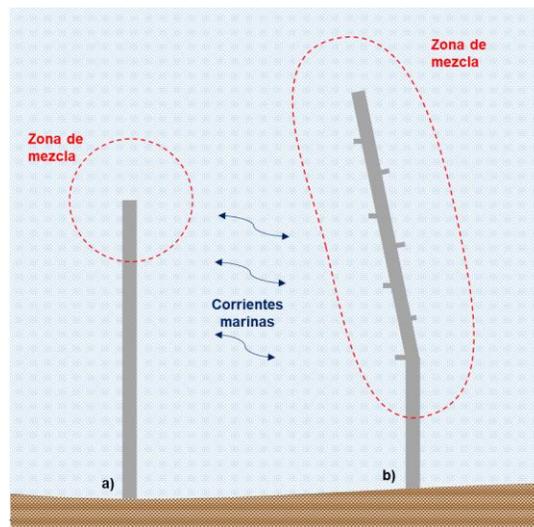
Figura 4.2: Descarga sumergida a través de una tubería y boquilla o un difusor



Fuente: (Bleninger & Jirka, 2008)

Estos emisarios cuentan con distintos tramos según los criterios de diseño y las condiciones locales en las que se encuentren. La sección final de emisario corresponde a un difusor el cual juega un rol importante en el funcionamiento de todo el sistema de descarga. El difusor puede diseñarse mediante uno o múltiples chorros que se descargan a partir de una serie de boquillas cuya configuración depende del diseño. Además, la sección de la descarga puede tener una forma cónica o telescópica (que disminuya su diámetro), lo ayuda a establecer un flujo uniforme a lo largo del difusor.

Figura 4.3: a) Emisario con una descarga simple; b) Emisario con un difusor de múltiples boquillas



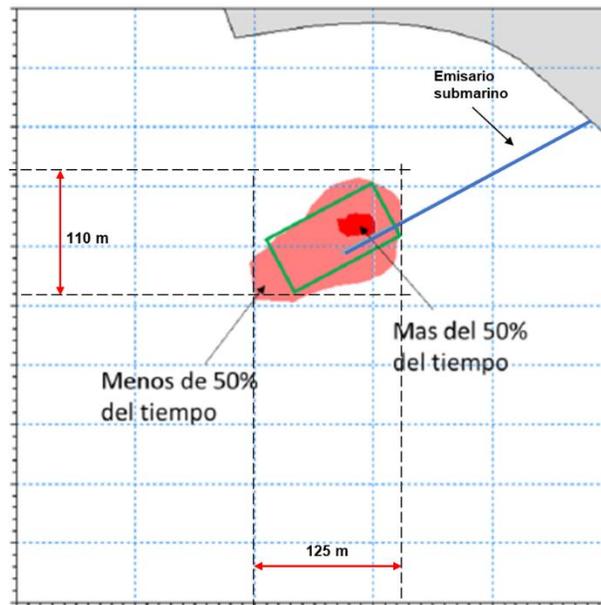
Fuente: Adaptación de (Fariñas Iglesias, 2022)

4.3 ÁREA DE INFLUENCIA

Según el Servicio de Evaluación Ambiental (2017), se define el Área de influencia como el “espacio geográfico, cuyos atributos, elementos naturales o socioculturales deben ser considerados con la finalidad de definir si el proyecto o actividad genera o presenta alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley, o bien para justificar la inexistencia de dichos efectos, características o circunstancias”. Sin embargo, para efectos de este estudio, el área de influencia se abordará según la Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de

mezcla de descargas salinas y térmicas asociadas a proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras (Winckler, 2021), que define el área de influencia en el mar de una planta desaladora como “el lugar geométrico, visto en planta, donde se exceden límites máximos admisibles de variables como la salinidad en la columna de agua”. La Figura 4.4 muestra un ejemplo de definición de área de influencia desarrollado en el marco de una consultoría.

Figura 4.4: Ejemplo de definición de área de influencia, donde se muestra la distribución temporal de exceso de salinidad 5% en la columna de agua en mes representativo de verano. Coquimbo.



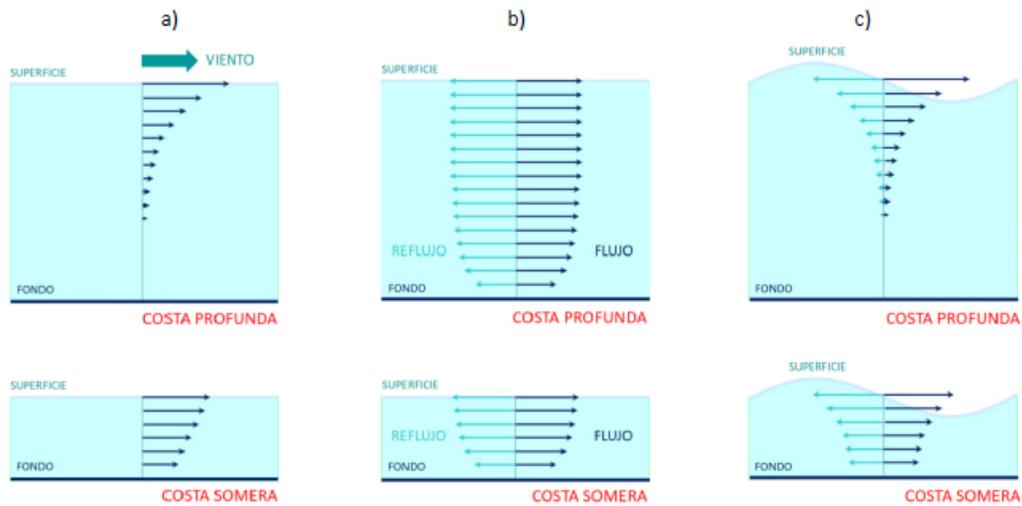
Fuente: (Jaime Illanes y Asociados, 2022)

4.4 FORZANTES HIDRODINÁMICAS

Para definir el área de influencia de una descarga en un cuerpo de agua, se debe caracterizar el campo hidrodinámico en un dominio lo suficientemente grande para incluir la escala de los procesos físicos relevantes (Figura 4.5). Por ejemplo, los esfuerzos de corte ejercidos por el viento sobre la superficie del océano se traducen en una transferencia de energía desde la atmósfera a la superficie del agua. Por otra parte, las corrientes mareales corresponden a un flujo predominantemente horizontal que acompaña el ascenso y descenso periódico del nivel del mar

generado por el movimiento relativo de la tierra, la luna y el sol. Finalmente, el oleaje, experimenta distintos procesos costeros desde que se propaga de aguas profundas a aguas someras, como el refracción, asomeramiento, reflexión, difracción y rotura (Winckler, 2021).

Figura 4.5: Esquema simplificado del perfil de la velocidad horizontal de las corrientes para forzantes a) viento, b) marea y c) oleaje en un medio no estratificado.



Fuente: Winckler (2021)

4.5 PROCESOS DE MEZCLA

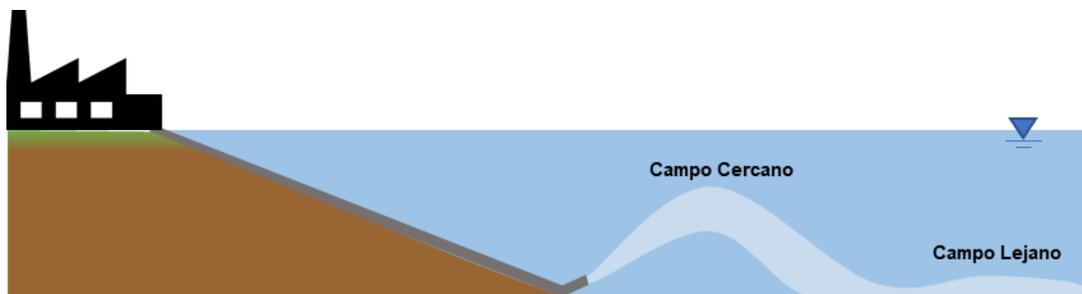
Los procesos de mezcla que describen la dilución de salmuera en el mar se dividen en cuatro. La advección es un proceso de transporte, en donde una sustancia o propiedad, como la salinidad, se mueve de un lugar a otro por efecto del flujo. La difusión se divide en molecular o turbulenta; la primera se asocia al movimiento térmico de las partículas de un fluido y la última a un proceso de mezcla debido a la presencia de remolinos¹. Otro proceso es la reacción, en la cual un efluente transforma su estructura molecular y enlaces al mezclarse con agua, generando

¹ Según Winckler (2021), la difusión turbulenta predomina en el océano como mecanismo de mezcla, por lo que sólo se modela con esta.

otras sustancias debido a reacciones de tipo químicas, físicas o biológicas. Finalmente, la dispersión es un artefacto matemático que surge producto de la modelación de un fenómeno tridimensional mediante ecuaciones en dos dimensiones, en campos variados de velocidad.

Al momento de ser descargada al mar, la pluma de descarga describe una trayectoria parabólica en la región de campo cercano según se aprecia en Figura 4.6. La eficiencia del proceso de mezcla en esta región depende de la configuración del sistema de vertido, de las características físicas del efluente y las del medio receptor. Una vez que la pluma choca con el fondo marino, los procesos turbulentos disminuyen y el flujo se estratifica, formando una pluma que se comporta como una corriente de gravedad, característica del campo lejano. En esta región, el flujo depende de la diferencia de densidad de la salmuera y las particularidades del medio, como la batimetría, la rugosidad del fondo y las corrientes de fondo (Winckler, 2021).

Figura 4.6: Esquema de descarga de choro



Fuente: Elaboración propia

4.6 SOFTWARE MIKE 3 FLOW MODEL FM

MIKE 3 Flow Model ha sido desarrollado para aplicaciones como la descarga de plumas salinas en entornos oceanográficos, costeros y estuarios (DHI, 2023). En esta sección se presentan los elementos esenciales que describen este modelo.

4.6.1 MODELACIÓN DEL CAMPO LEJANO

El modelo se basa en la solución numérica de las ecuaciones tipo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) que incluyen las ecuaciones de continuidad, momentum, y cierre turbulento. La superficie libre se tiene en cuenta utilizando un enfoque de transformación de coordenadas sigma.

Ecuaciones de Navier Stokes

El modelo no hidrostático se basa en las ecuaciones incompresibles de Navier Stokes, bajo los supuestos de Boussinesq y con la superficie libre descrita en función de la altura. En el sistema de coordenadas cartesianas la ecuación de continuidad para un flujo incompresible se escribe como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 4.1$$

Y la ecuación de conservación de momento se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \\ = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial x} \\ - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} + F_u - F_{vx} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad 4.2$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} \\
= fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} - g \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial y} \\
- \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} + F_v - F_{vy} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial v}{\partial z} \right)
\end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + F_v - F_{vz} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial w}{\partial z} \right) \tag{4.4}$$

En donde t es el tiempo; x, y y z las coordenadas cartesianas; η la elevación de la superficie; u, v y w las velocidades en las direcciones x, y y z ; q la presión; $f = 2\Omega \sin\phi$ el parámetro de Coriolis siendo Ω la velocidad angular y ϕ la latitud; v_t^v la viscosidad turbulenta vertical; g la aceleración de gravedad; p_A la presión atmosférica en la superficie; ρ la densidad del agua; ρ_0 la densidad de referencia del agua y $F_v = (F_{vx}, F_{vy}, F_{vz})$ la fuerza de arrastre debido a la vegetación. Este último término no es considerado en el modelo, ya que la descarga se efectúa en un fondo liso e impermeable. Puesto que se asume un flujo incompresible, la densidad no depende de la presión, pero sí de la temperatura (T) y la salinidad (S), a través de la ecuación de estado de la UNESCO (1981):

$$\rho = \rho(T, S) \tag{4.5}$$

Ecuaciones de Transporte para la temperatura y salinidad

La temperatura (T) y salinidad (S) siguen la ecuación general de transporte-difusión:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_t + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ts}^v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} \quad 4.6$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ts}^v \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad 4.7$$

donde D_{ts}^v es el coeficiente de difusión turbulenta horizontal; \hat{H} un término fuente debido al intercambio de calor con la atmósfera; F_t y F_s son los términos de difusión horizontal:

$$F_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ts}^h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ts}^h \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad 4.8$$

$$F_s = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ts}^h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ts}^h \frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad 4.9$$

Los coeficientes de difusión horizontal y vertical pueden ser un valor constante o determinarse como la viscosidad turbulenta escalada, para efectos de este estudio se considera un valor contante de $0,02 \text{ m}^2/\text{s}$. En la superficie ($z = \eta$), las condiciones de borde para la temperatura y la salinidad son

$$D_{ts}^h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{\rho_0 c_p} \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad 4.10$$

Y en el fondo marino ($z = -d$) las condiciones de borde son

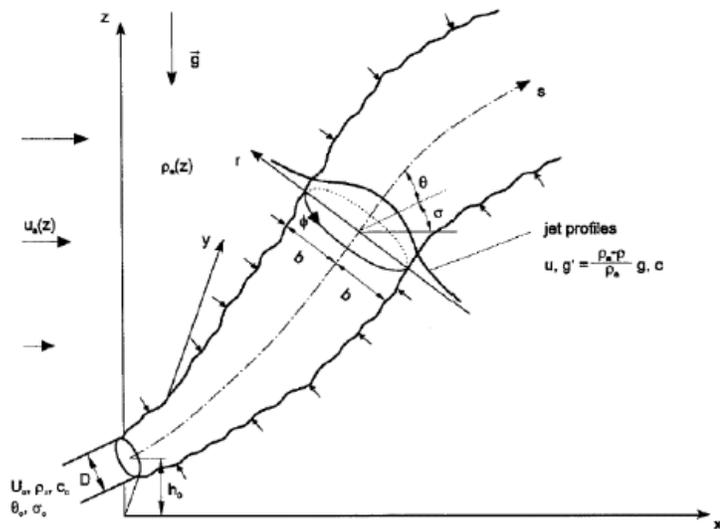
$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \qquad \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \qquad 4.11$$

Aquí Q_n es el flujo de calor neto en la superficie y $c_p = 4217 \frac{J}{kg^\circ K}$ es el calor específico del agua.

4.6.2 MODELACIÓN DEL CAMPO CERCANO

MIKE 3 tiene cuatro tipos de fuentes dentro de su configuración: *Simple source*, *Standard source*, *Connected source* y *Jet source*. La simulación de esta última se basa en el acomplamiento dinámico de la solución de chorros integrada en el campo cercano y el modelo de flujo hidrodinámico de campo cercano cuyas ecuaciones se describen en la sección precedente. La solución de campo cercano se basa en la ecuación del modelo de chorro integral descrita por (Jirka, 2004). Esta determina la solución de estado estacionado del chorro resolviendo la ecuación de conservación del flujo y momento, salinidad y temperatura bajo condiciones ambientales definidas.

Figura 4.7: Esquema definición modelo integrado jet de campo cercano. MIKE 3 FM.



Fuente: (Jirka, 2004)

MIKE genera un archivo de salida con los cálculos del chorro en campo cercano (Figura 4.8). El archivo contiene información sobre las características del chorro en el punto en que se convierte pasivo, es decir, cuando termina el campo cercano e inicia el campo lejano.

Figura 4.8: Datos de salida del chorro en campo cercano

	Time	1:Point 1: x end position [meter]	2:Point 1: y end position [meter]	3:Point 1: z end position [meter]	4:Point 1: Discharge [meter ³ /sec]	5:Point 1: Characteristic width [meter]	6:Point 1: Dilution factor [0]	7:Point 1: Distance [meter]	8:Point 1: Stop code [Integer]
0	01-01-2018 00:00:00	523.079	516.766	-20	22.2543	3.36025	29.6857	21.4996	2

Fuente: Elaboración propia

El archivo contiene siete elementos para cada descarga:

1. Posición final en x
2. Posición final en y
3. Posición final en z
4. Ancho característico
5. Factor de dilución
6. Distancia
7. Código de parada

Para determinar cuando el chorro se vuelve pasivo, es decir, cuando el flujo termina el campo cercano, se invocan distintos criterios de parada:

1. Si el chorro alcanza la superficie
2. Si el chorro toca el fondo
3. Si el momento del chorro es menor o cercano al momento inducido por el flujo ambiente – el exceso de momento del chorro es menor que el 1% del momento inducido por el flujo ambiental. Esto ocurre en los flujos cruzados fuertes.
4. Si el chorro se extingue en las condiciones de estancamiento. Esto ocurre si la velocidad de chorro cae por debajo de 1 cm/s.

5. Si el chorro experimenta dos veces la inversión de flotabilidad. Esto ocurre en ambientes estratificados con grandes gradientes de densidad.
6. Si la trayectoria del chorro supera una distancia máxima de recorrido especificada por el usuario. La distancia de recorrido se define aquí como la distancia en la horizontal (eje x) desde la posición inicial del chorro hasta la posición final.
7. Si el chorro presenta una fuerte curvatura como, por ejemplo, si entra en un flujo ambiental fuerte y opuesto.
8. Si el chorro alcanza un límite de dominio (abierto o cerrado)

4.7 ESTUDIO DE REFERENCIA

En el año 2017, Pablo Federici realiza un estudio numérico del comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos, se modelan los fenómenos que ocurren en un medio idealizado desde el punto de vista teórico. Las modelaciones realizadas con el software *CORMIX* le entregaron una serie de resultados que fueron cuantificados y analizados. Además, sensibilizó variables que participan en el proceso de dilución de salmuera y determinó el grado de influencia de cada una de ellas de forma individual. El campo cercano depende principalmente del ángulo de inclinación, velocidad y dirección del chorro. Además, concluye que los procesos de mezcla y dilución más eficientes se producen específicamente hasta el punto donde ocurre el impacto del chorro en el fondo (Federici, 2017).

Para este estudio se toman 22 casos, cuyas variables corresponden a: Variables propias de la descarga como la salinidad descargada, diámetro del *jet*, dirección e inclinación del chorro; y variables propias del medio como la velocidad de la corriente y la salinidad del medio.

4.7.1 CORMIX

The *Cornell Mixing Zone Expert System (CORMIX)* es un modelo de la zona de mezcla y un sistema de apoyo a la toma de decisiones para la evaluación del impacto ambiental de las zonas de mezcla reglamentarias. La metodología de *CORMIX* contiene sistemas para modelar descargas de difusores de un solo puerto,

multipuerto y fuentes de descarga superficiales. Los efluentes considerados pueden ser descargas de salmuera.

4.8 NORMATIVA VIGENTE

La **Constitución Política de República de Chile** establece en el artículo 19, N°8: “El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Es deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza”. Por otra parte, la **Ley N° 19.300**² en el artículo 10 indica que “Los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualesquiera de sus fases, que deberán someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental”. Y, específicamente en la letra o): “Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de aguas o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos”.

Finalmente, la **Ley N° 2222**³, en el Título IX, Artículo 142 prohíbe “Arrojar lastre, escombros o basuras y derramar petróleo o sus derivados o residuos, aguas de relaves de minerales u otras materias nocivas o peligrosas, de cualquier especie, que ocasionen daños o perjuicios en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, y en puertos, ríos y lagos”. A raíz de las normativas mencionadas anteriormente, surgen las siguientes guías para evaluar a través del SEIA la descarga de salmuera al mar.

Guía para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima: La DGTM Y MM ORD. N°12600/05/1447 aprueba los lineamientos para que se publique en el año 2021 esta guía que establece los requerimientos mínimos exigidos por la Autoridad Marítima para la evaluación

² Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente

³ Ley de Navegación

ambiental de plantas desaladoras industriales⁴, en las etapas de línea base, construcción, operación y cierre. Esta abarca desde el sistema de captación hasta el sistema de descarga, el cual será abordado en este proyecto.

Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas: La DGTM Y MM ORD. N°12600/05/1403 aprueba los lineamientos para que se publique en noviembre del 2021 esta guía que busca definir los estudios de modelación necesarios para delimitar el área de influencia de las descargas de agua de mar asociadas a plantas desalinizadoras y centrales termoeléctricas que descarguen en aguas oceánicas, fiordos y estuarios bajo jurisdicción de la Autoridad Marítima.

Por otra parte, actualmente en Chile no existe ninguna normativa que establezca los límites admisibles de salinidad para la descarga de salmuera. Sin embargo, el Reglamento del Sistema de Evaluación Ambiental sugiere utilizar normativas de referencia de países con similitudes en sus componentes climáticas, como EE. UU., Australia, Japón, entre otros (Tabla 4.1).

⁴ Se habla de una desalinizadora de uso industrial cuando la capacidad de producción supera los 1000 m³ por día.

Tabla 4.1: Regulaciones Internacionales para la descarga de salmuera

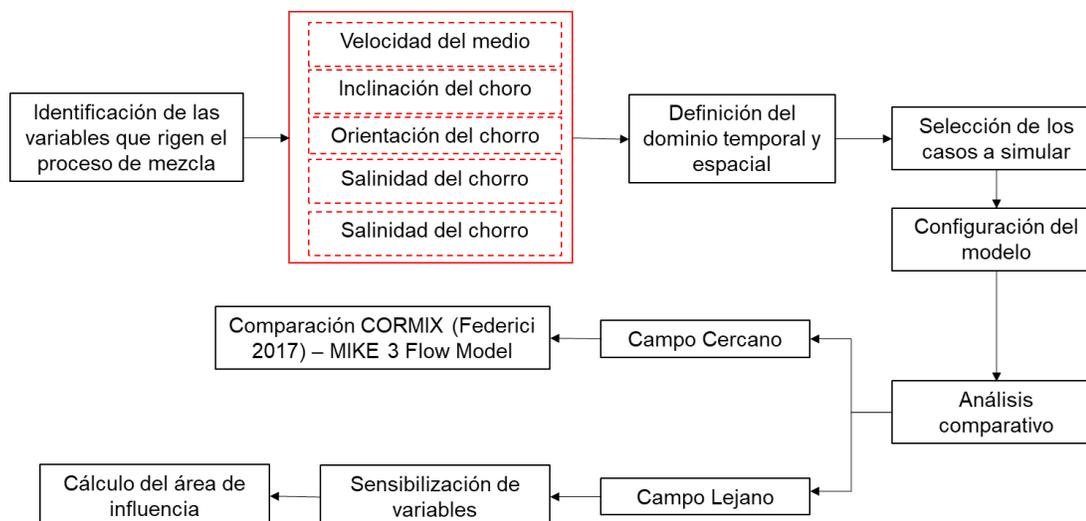
Región/Autoridad	Limite salinidad	Punto de cumplimiento (relativo a la descarga)	Fuente
Iran DOE	Incremento $\leq 10\%$	200 m	Ley medioambiental de Iran
Oman	Incremento ≤ 2 ppt	300 m	Sultanato de Oman
Abu Dabi, Emiratos Arabes Unidos	Incremento $\leq 5\%$	Borde zona de mezcla	SCCWRP
Carlsbad, California, 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.

Fuente: (Muñoz, 2021)

5. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología propuesta en el diagrama de flujo de la Figura 5.1. La memoria se desarrolla en dos etapas, la primera consiste en la configuración del modelo numérico MIKE 3 Flow Model FM, incorporando las condiciones propias de la descarga y del medio, la discretización temporal y espacial, además la selección de simulaciones a realizar. Posterior a esto se realizan análisis comparativos. Para el campo cercano, se toman los resultados obtenidos por Federici (2017) y se contrastan con los de este trabajo y por último, para el campo lejano se estudia cuáles son las variables que influyen más en el proceso de mezcla, y se selecciona un caso para el cálculo del área de influencia, tomando como máximo admisible de salinidad lo propuesto por la normativa australiana (5% de exceso).

Figura 5.1: Diagrama de flujo de metodología propuesta para el desarrollo de la memoria. Con color rojo los datos de entrada al modelo.



Fuente: Elaboración propia

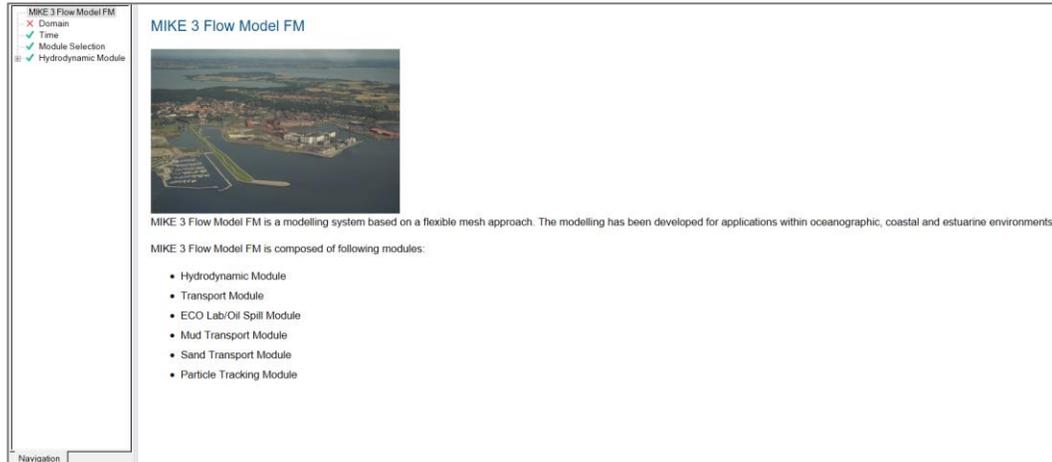
5.1 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Para crear un modelo de plumas salinas, se necesitan datos de entrada que representen su comportamiento en el océano, entre los que destacan la salinidad y la temperatura tanto del medio como de la descarga, la velocidad de las corrientes del océano, las características del difusor y la batimetría del fondo.

La interfaz de **MIKE 3 Flow Model** es amigable al usuario. Al abrir la aplicación se encuentra una ventana con 4 secciones: En la sección **Domain** se carga la malla en formato *.mesh* y se define la cantidad de capas en la vertical que tendrá. En la sección **Time** se define el tiempo de simulación del modelo. La sección **Module Selection** se deja por defecto, y en la sección **Hydrodynamic Module** se configuran las características del medio y de la descarga en 21 sub-secciones. Ahí se definen las ecuaciones de gobierno, la densidad del agua⁵ y se configura el *source* (descarga de salmuera). Es necesario definir las condiciones iniciales, tanto del medio (salinidad, temperatura, velocidad de la corriente) como del mismo chorro (salinidad, temperatura, diámetro, caudal, inclinación con respecto a la horizontal y dirección). En el ANEXO 1 *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* se encuentra un paso a paso de cómo se configuran los casos utilizados en este proyecto.

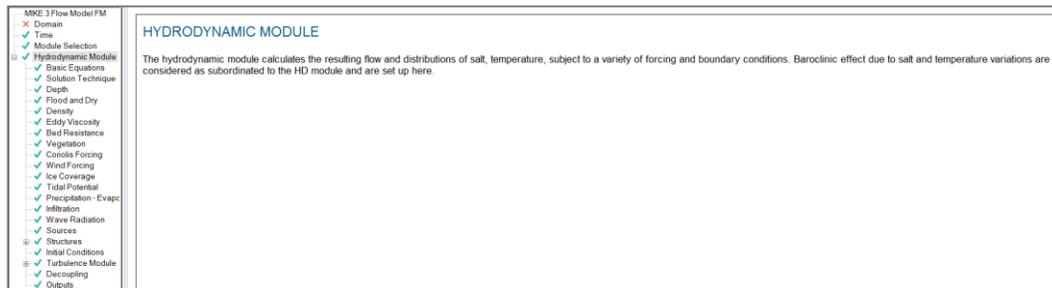
⁵ Esta puede estar en función de la salinidad, temperatura o ambas.

Figura 5.2: Ventana inicial MIKE 3 Flow Model



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3: Hydrodynamic Module MIKE 3 Flow Model



Fuente: Elaboración propia

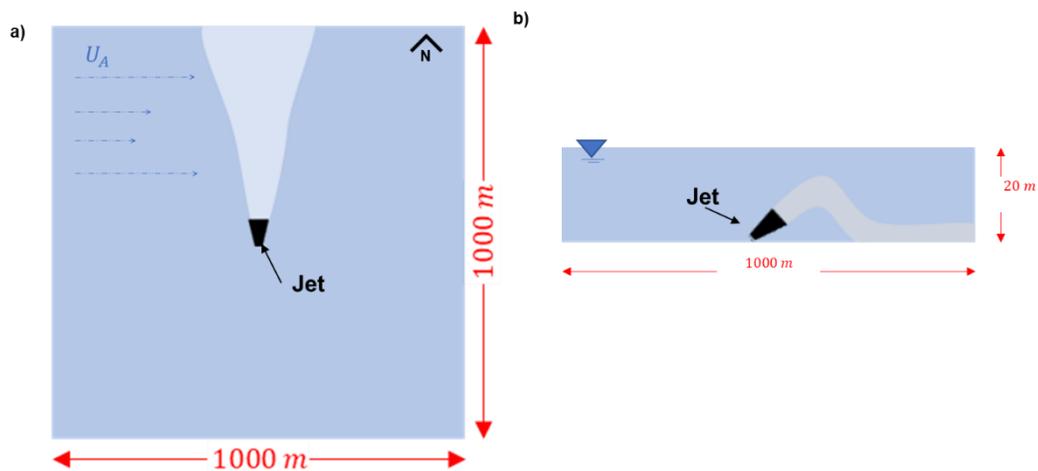
5.1.1 CONDICIONES DEL MEDIO

Dentro de las variables que influyen en el proceso de mezcla en el medio se encuentran las **corrientes**. Estas son fundamentales en la dilución de la salmuera, ya que producen una turbulencia ambiente que ayuda significativamente al proceso de mezcla. En los casos a simular se considera una corriente de $U_A = 0,15 \text{ m/s}$ uniforme y constante en la columna de agua en dirección oeste-este. Con respecto a la **salinidad**, *MIKE* permite tener una constante o variable en la columna de agua. Se utiliza una salinidad constante de $S_A = 32,5 \text{ PSU}$ para todos los casos simulados lo que equivale a una densidad de $\rho_A = 1025 \text{ kg/m}^3$.

5.1.2 CONDICIONES DE LA DESCARGA

El proceso de mezcla es también dependiente de las variables propias de la descarga, que al igual que las del medio serán fundamentales al momento de optimizar la dilución de la salmuera. Dentro de ellas están el **diámetro del jet**, que afecta a la velocidad de la descarga y así mismo al proceso de dilución. Para efectos de cálculo se utiliza un *jet* de $D = 0,4 \text{ m}$, un **caudal** de descarga de $Q = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ y una **velocidad** de descarga de salmuera de $U_0 = 6,37 \text{ m/s}$. La **salinidad** de la descarga se asume aproximadamente el doble del medio; entonces se utiliza $S_A = 62 \text{ PSU}$, equivalente a una densidad de $\rho_0 = 1050 \text{ kg/m}^3$. La **dirección e inclinación del jet** con respecto a la horizontal y a la vertical respectivamente. Este está orientado horizontalmente al norte, con un ángulo $\sigma = 0^\circ$ con una inclinación en la vertical de $\theta = 60^\circ$. Según se observa la Figura 5.4, en la vista en planta, la corriente llega de forma perpendicular a la descarga.

Figura 5.4: Esquema configuración caso inicial MIKE. a) Vista en planta; b) Vista lateral

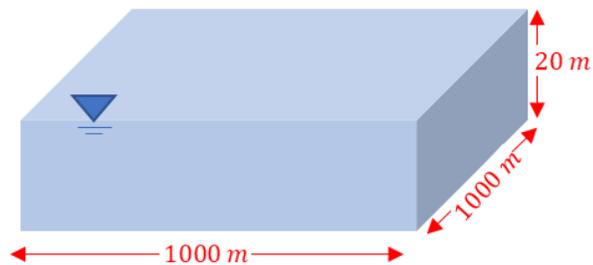


Fuente: Elaboración propia

5.1.3 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

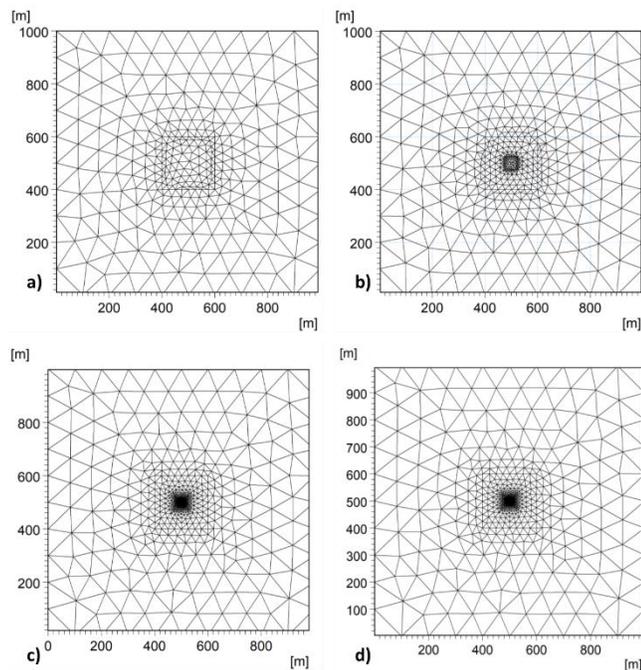
Las descargas se realizan en una piscina rectangular de $1000 \times 1000 \text{ m}$ con un fondo plano y una profundidad uniforme de 20 m (Figura 5.5). Las cuatro mallas utilizadas se crearon en el software *Surface-water Modeling System (SMS)*.

Figura 5.5: Esquema descarga de salmuera



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.6: a) Malla $\Delta x = 25 \text{ m}$; b) Malla $\Delta x = 5 \text{ m}$; c) Malla $\Delta x = 1 \text{ m}$; d) Malla $\Delta x = 0,5 \text{ m}$



Fuente Elaboración propia

5.1.4 DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

Para lograr que el modelo sea estable debe cumplir con la condición de Courant-Friedrich-Levy (CFL). El número de CFL para un flujo se define como:

$$CFL = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad 5.1$$

Donde h es la profundidad; u y v las velocidades en x e y respectivamente; g la aceleración de gravedad, Δx y Δy escalas de longitud características en las direcciones x e y respectivamente; Δt el intervalo temporal. Las escalas de longitud característica se aproximan mediante la longitud de borde mínima para cada elemento y profundidad del agua y la componente de velocidades evaluada en el centro del elemento. Para asegurar la condición, MIKE impone $CFL \leq 0,8$.

En las modelaciones solo se trabaja con velocidades en la componente horizontal, por lo tanto: $\Delta x = 0,5$; $\Delta t = 0,01 \text{ s}$; $u = 0,15 \frac{m}{s}$; $v = 0 \frac{m}{s}$; $h = 20 \text{ m}$.

$$CFL = 0,56 \leq 0,8$$

Esto indica que la modelación se encuentra estable cumpliendo la condición de Courant.

5.1.5 CASOS PARA SIMULAR

En la Tabla 5.1 se muestran los 22 casos a simular. Estos fueron tomados del análisis de sensibilidad realizado por Federici (2017), quien se basó en una serie de experimentos en laboratorio realizados por Robert et al. (1997), en los que descargan chorros con flotabilidad negativa con un ángulo de inclinación de 60° respecto a la horizontal (el cual maximiza la dilución en un medio receptor en reposo cuando se descarga desde el fondo).

Se sensibilizan las siguientes variables que caracterizan a la descarga de salmuera:

1. velocidad de la corriente
2. ángulo de inclinación del chorro
3. velocidad del chorro
4. salinidad del chorro
5. ángulo entre la corriente y éste último.

Tabla 5.1: Listado de casos a simular. Los número en **negrita representan las variaciones que se realizan a cada variable.**

Caso	D m	U _o m/s	Q _o m3/s	S _o psu	U _A m/s	S _A psu	σ	θ	
1	0,4	6,37	0,8	62	0,01	32,5	0	60	Velocidad corriente
2	0,4	6,37	0,8	62	0,05	32,5	0	60	
3	0,4	6,37	0,8	62	0,1	32,5	0	60	
4	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	60	
5	0,4	6,37	0,8	62	0,2	32,5	0	60	
6	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	20	Inclinación del chorro
7	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	40	
8	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	50	
9	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	60	
10	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	80	
11	0,2	25,46	0,8	62	0,15	32,5	0	60	Velocidad descarga
12	0,3	11,32	0,8	62	0,15	32,5	0	60	
13	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	60	
14	0,5	4,07	0,8	62	0,15	32,5	0	60	
15	0,4	6,37	0,8	49	0,15	32,5	0	60	Salinidad descarga
16	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	60	
17	0,4	6,37	0,8	74	0,15	32,5	0	60	
18	0,4	6,37	0,8	126	0,15	32,5	0	60	
19	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	0	60	Dirección del chorro
20	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	90	60	
21	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	180	60	
22	0,4	6,37	0,8	62	0,15	32,5	270	60	

Fuente: Elaboración propia

5.2 ANÁLISIS COMPARATIVO

5.2.1 CAMPO CERCANO

Como se menciona en la sección 4.6, *MIKE* resuelve el campo cercano mediante la formulación de Jirka (2004) y, solo entrega ciertos datos como la distancia máxima horizontal alcanzada por el chorro, y la dilución una vez terminado el campo cercano, que son comparados con los resultados obtenidos por Federici (2017) (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Resultados CORMIX de campo cercano obtenidos por Federici (2017). Distancia horizontal y dilución.

Caso N°	X m	Dilución
1	18,3	
2	19,24	30,91
3	21,03	32,66
4	23,18	36,16
5	25,4	42,25
6	18,21	18,1
7	24,07	29,1
8	24,31	33,2
9	23,18	36,1
10	17,09	36,7
11	72,37	234
12	37,05	77,7
13	23,18	36,1
14	16,07	20,02
15	32,25	52,5
16	23,18	36,1
17	18,75	28,5
18	12,04	17,09
19	23,18	36,1
20	10,59	33,9
21		
22	10,59	33,9

Fuente: Adaptación Federici (2017)

En la tabla de resultado de Federici no menciona porqué el caso N°1 no presenta un valor de dilución. Además, el caso N°21 no se considera en el análisis del campo cercano, ya que de acuerdo con lo mencionado por Federici (2017): “CORMIX no

fue capaz de realizar la simulación y advirtió con el siguiente mensaje “*el impulso de descarga se opone a la dirección de la corriente del medio receptor, esto conduce a complicados patrones de recirculación y acumulación de concentración en el campo cercano. Esta situación es difícil analizar y también constituye a un diseño inestable*”.

Para evaluar si existe alguna relación directa o indirecta entre los resultados de ambos softwares, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson (ecuación 5.2). Este puede tomar valores entre -1 y 1 los que indican una correlación inversa o directa respectivamente (Hérmendez Lalinde, et al., 2018).

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad 5.2$$

En donde σ_{XY} corresponde a la covarianza entre ambas variables; σ_X desviación estándar de la variable X; σ_Y desviación estándar de la variable Y.

5.2.2 CAMPO LEJANO

Para este análisis de sensibilidad, se utilizan los mismos casos de la Tabla 5.1 pero esta vez, se estudia el comportamiento mediante la salinidad, desplazamiento y tamaño que tendrá la pluma salina en el campo lejano.

El difusor se encuentra ubicado en el centro del dominio espacial, exactamente en las coordenadas (503.83, 507.19, -19.5) (ver

ANEXO 2), por lo tanto, para medir el desplazamiento se toman dos puntos de referencia: a) el lanzamiento b) el fin del campo cercano.

Una vez ocurrido esto, se seleccionan aquellos casos que, en campo lejano, excedan el 5% de salinidad según la normativa australiana. Para todas las simulaciones, la salinidad del medio corresponde a 32,5 *PSU* , por lo tanto:

Límite Admisible	34,125 <i>PSU</i>
-----------------------------	--------------------------

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 CAMPO CERCANO

6.1.1 MIKE

En la Tabla 6.1 se encuentran los resultados de distancia y dilución en el fin del campo cercano entregados por MIKE. Cada variable que se sensibiliza se encuentra representada con un color: La velocidad del medio (verde), inclinación del chorro (azul); velocidad del chorro (naranja); salinidad del chorro (amarillo); orientación del chorro (gris).

En la velocidad del medio (Casos N° 1, 2, 3, 4 y 5) se observa que existe una relación directamente proporcional entre esta y la distancia horizontal, además, en el caso N°1 se presenta la menor distancia alcanzada ya que, al ser casi nula la velocidad que actúa el chorro se desplaza según la velocidad de descarga. Por otra parte, la dilución posee un comportamiento similar a la distancia horizontal, pero presenta variaciones mayores con respecto al caso base.

La siguiente variable corresponde a la inclinación del chorro (Casos N°6, 7, 8, 9 y 10). Existe un incremento en la distancia máxima hasta que llega un ángulo de $\theta = 60$ (Caso N°9) y disminuye nuevamente. Esto no se repite en la dilución ya que aumenta a medida que el chorro se inclina más, pero las variaciones van disminuyendo.

Con color naranja la velocidad de descarga (Casos N° 11, 12, 13 y 14) indica que mientras menor es la velocidad, menor es la distancia recorrida y así mismo menor es la dilución. Con respecto al caso base, el Caso N°11 es el que presenta un resultado que sobresale ya que, las variaciones corresponden a 200% y 593%, para la distancia horizontal y la dilución respectivamente.

La penúltima variación corresponde a la salinidad del chorro descargado (Casos N° 15, 16, 17 y 18), esta variable presenta una relación inversamente proporcional con el alcance máximo y la dilución. Ya que, mientras más salinidad posea el chorro,

más “pesado” se hace, lo que dificulta el desplazamiento y así mismo producto de la disminución de la turbulencia la dilución disminuye.

Y, por último, la dirección del chorro presenta la mayor distancia en el caso base, cuando este se encuentra orientado hacia el norte y la corriente le llega de forma ortogonal.

Tabla 6.1: Distancia y dilución al fin del campo cercano mediante MIKE

Caso N°	X m	Dilución	Variación con respecto al caso base	
			X m	Dilución
1	16,83	15,39	-27%	-48%
2	18,11	17,95	-22%	-40%
3	20,30	22,84	-12%	-23%
4	23,08	29,69	0%	0%
5	26,36	37,72	14%	27%
6	15,59	9,64	-32%	-68%
7	20,84	20,81	-10%	-30%
8	22,53	26,16	-2%	-12%
9	23,08	29,69	0%	0%
10	19,46	29,77	-16%	0%
11	69,16	205,81	200%	593%
12	35,74	65,59	55%	121%
13	23,08	29,69	0%	0%
14	16,83	16,45	-27%	-45%
15	33,87	49,13	47%	66%
16	23,08	29,69	0%	0%
17	18,90	22,52	-18%	-24%
18	12,58	12,58	-45%	-58%
19	23,08	29,69	0%	0%
20	15,95	26,20	-31%	-12%
21				
22	15,46	26,20	-33%	-12%

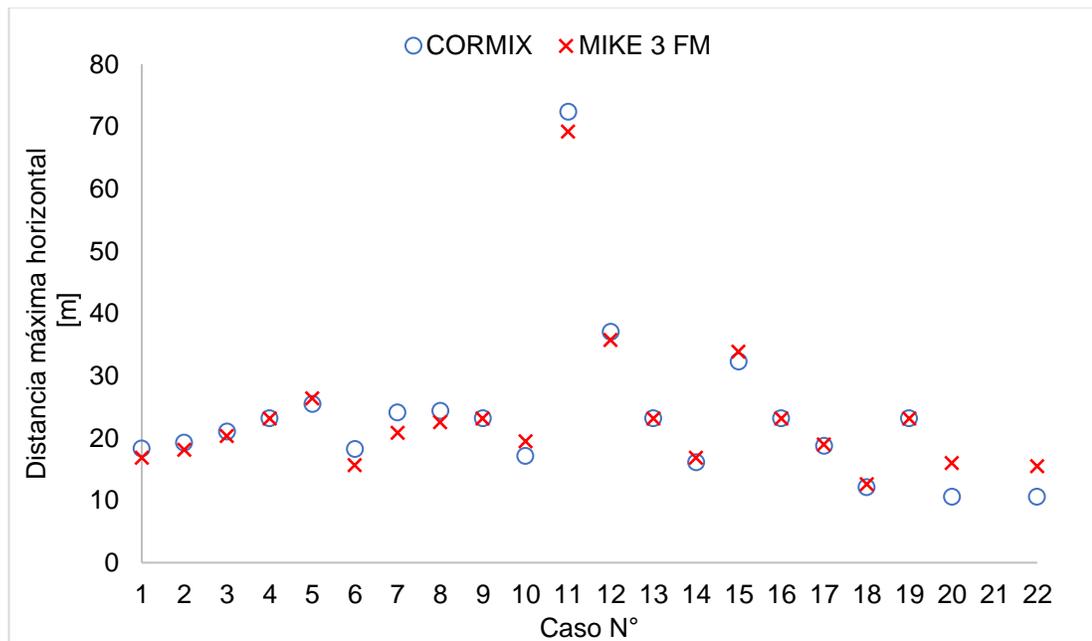
Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, a modo de síntesis. El caso N°11 presenta una mayor dilución de salmuera y un mayor alcance horizontal. En contraste, el caso N°18 representa la configuración que descarga una salinidad de 126 PSU, la cual posee una menor distancia horizontal y dilución.

6.1.2 MIKE – CORMIX

Dado que gran parte del proceso de dilución de salmuera ocurre en el campo cercano, un buen diseño del difusor (y sus jets) genera una dilución eficiente, además de una disminución significativa del área de influencia. El alcance máximo horizontal del chorro en el campo cercano depende de variables como la salinidad y velocidad de la descarga y del medio receptor, además de la dirección e inclinación del chorro. En la Figura 6.1 se muestran los alcances máximos horizontales entregados por *CORMIX* (círculo azul) y *MIKE* (cruz roja) para los 22 casos de la Tabla 5.1. El mayor alcance horizontal para ambas aplicaciones ocurre en el Caso N° 11 cuando se disminuye el diámetro del *jet* y así mismo se genera un aumento en la velocidad de salida de la salmuera de 6,37 m/s a 25,46 m/s.

Figura 6.1: Distancia máxima horizontal del chorro de salmuera en el campo cercano obtenida mediante *MIKE* y *CORMIX* (Federici, 2017).



Fuente: Elaboración propia

Se observa que los resultados obtenidos en *MIKE* no presentan grandes variaciones respecto a los expuestos por Federici (2017). En la Tabla 6.2 se aprecia que las diferencias porcentuales entre ambos no superan el 10%, a excepción de los casos

6, 7, 10, 20 y 22, y así mismo, gran parte de los alcances máximos horizontales de *MIKE* son mejores a los calculados por *CORMIX*.

Tabla 6.2: Diferencias porcentuales en el alcance máximo entre *MIKE* y *CORMIX* (Federici, 2017)

Caso N°	CORMIX	MIKE 3 FM	Diferencia
1	18,3	16,83	-8,0%
2	19,24	18,11	-5,9%
3	21,03	20,30	-3,5%
4	23,18	23,08	-0,4%
5	25,4	26,36	3,8%
6	18,21	15,59	-14,4%
7	24,07	20,84	-13,4%
8	24,31	22,53	-7,3%
9	23,18	23,08	-0,4%
10	17,09	19,46	13,9%
11	72,37	69,16	-4,4%
12	37,05	35,74	-3,5%
13	23,18	23,08	-0,4%
14	16,07	16,83	4,7%
15	32,25	33,87	5,0%
16	23,18	23,08	-0,4%
17	18,75	18,90	0,8%
18	12,04	12,58	4,5%
19	23,18	23,08	-0,4%
20	10,59	15,95	50,6%
22	10,59	15,46	46,0%

Fuente: Elaboración propia

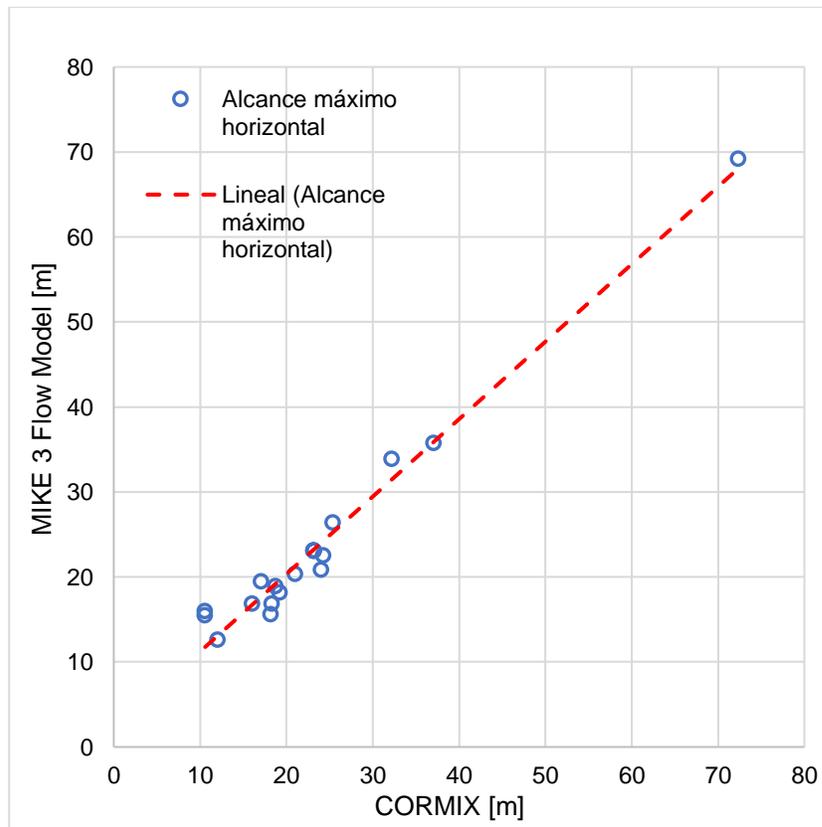
Para cuantificar la correlación que existe entre ambos resultados, mediante el coeficiente de correlación de Pearson (ecuación 5.2):

$$r = \frac{143,951}{12,567 \cdot 11,606} = 0,987$$

6.1

Por lo tanto, r corresponde a un valor positivo muy cercano a uno, lo que indica una correlación directa entre ambas variables. Esto se complementa con la Figura 6.2, en donde los valores de alcance máximo horizontal se encuentran muy cercanos a la línea de tendencia y se encuentran en una dirección ascendente.

Figura 6.2: Gráfico de dispersión entre los alcances máximos horizontales de MIKE 3 Flow Model y CORMIX.

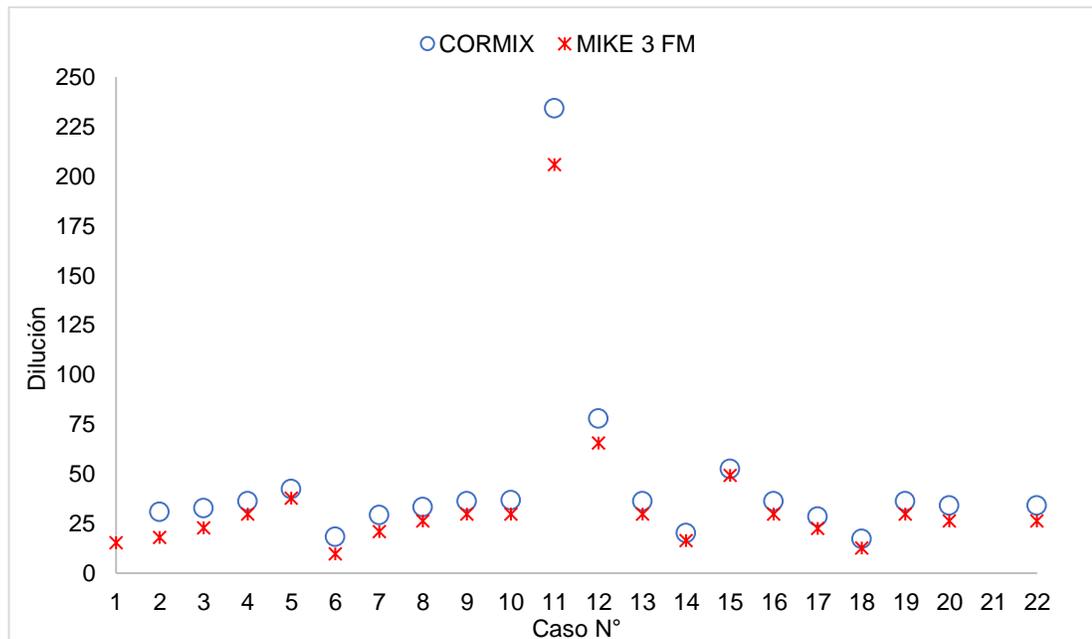


Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la dilución (disminución de salinidad por unidad de volumen de agua de mar a medida que se desplaza el chorro) ayuda a evaluar si la descarga opera en forma óptima. En la Figura 6.3 se muestra la dilución en el final del campo cercano que entregan MIKE y CORMIX. La máxima dilución también ocurre en el caso N°11, lo que indica que el diámetro del difusor tiene una relación inversamente proporcional con la dilución ya que, a tener un menor diámetro se genera un aumento en la velocidad de salida y así mayor turbulencia que ayuda al proceso de

dilución. Por otra parte, se observa que las diluciones que entrega *MIKE* se encuentran por debajo de las calculadas por *CORMIX* en todos los casos, lo que puede ser fuente de una subestimación de la salinidad y, por tanto, del área de influencia. En la Tabla 6.3 se aprecia que las diluciones calculadas en *MIKE* son en promedio 20% menores que las de *CORMIX*; solamente los casos 2 y 6 presentan diferencias por sobre la media de 42% y 47%, respectivamente.

Figura 6.3: Dilución al fin del campo cercano entre *MIKE* y *CORMIX* (Federici, 2017)



Fuente: Elaboración propia

En base al documento científico de *MIKE* (DHI, 2023), el software realiza el cálculo de campo cercano de forma interna y solo entrega al usuario un archivo de salida según lo señalado en la sección 4.6. Por lo tanto, en ciertos casos la salinidad máxima admisible según la normativa utilizada se logra en la zona de campo cercano, por lo que no es posible visualizarlo gráficamente con *MIKE*. En cambio, *CORMIX* entrega una visualización del comportamiento de la dilución y la geometría aproximada de la pluma.

Tabla 6.3: Diferencias porcentuales en la dilución entre MIKE y CORMIX

N°	CORMIX	MIKE	Diferencia
1			
2	30,91	17,95	-42%
3	32,66	22,84	-30%
4	36,16	29,69	-18%
5	42,25	37,72	-11%
6	18,1	9,64	-47%
7	29,1	20,81	-28%
8	33,2	26,16	-21%
9	36,1	29,69	-18%
10	36,7	29,77	-19%
11	234	205,81	-12%
12	77,7	65,59	-16%
13	36,1	29,69	-18%
14	20,02	16,45	-18%
15	52,5	49,13	-6%
16	36,1	29,69	-18%
17	28,5	22,52	-21%
18	17,09	12,58	-26%
19	36,1	29,69	-18%
20	33,9	26,20	-23%
22	33,9	26,20	-23%

Fuente: Elaboración propia

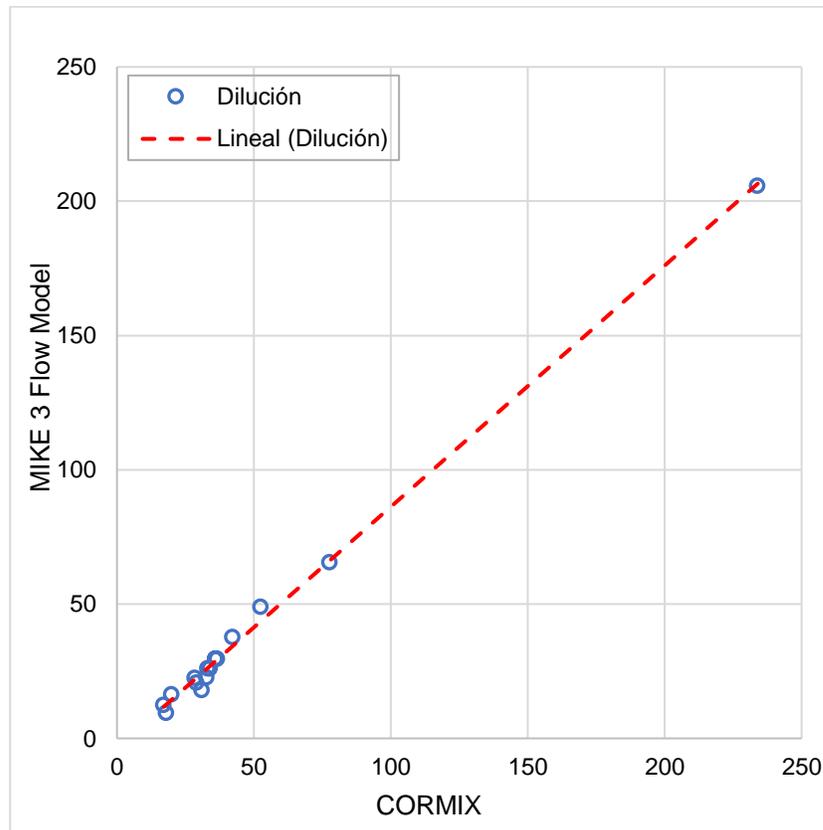
De acuerdo con el Coeficiente de Correlación de Pearson (r):

$$r = \frac{1815,938}{45,060 \cdot 40,373} = 0,998$$

6.2

Por lo tanto, al igual que con la variable anterior, ambas diluciones presentan un coeficiente de correlación muy cercano a uno, lo que indica una correlación directa entre ambas variables. Complementado el resultado, en la Figura 6.4 se observa que, gran parte de los datos se encuentran ordenados de forma ascendente y muy cercanos a la línea de tendencia.

Figura 6.4: Gráfico de dispersión entre las diluciones al fin del campo cercano entre CORMIX y MIKE

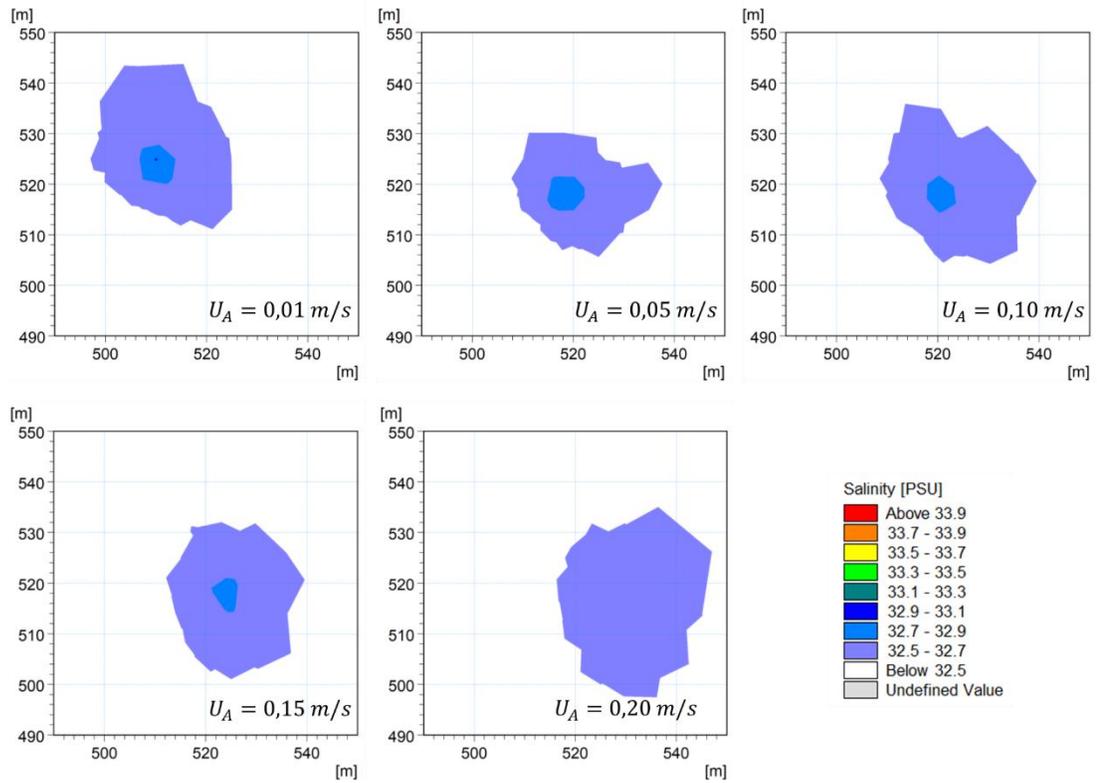


Fuente: Elaboración propia

6.2 CAMPO LEJANO

La velocidad en el medio (U_A) es la primera variable para sensibilizar. Según se indica en la Figura 6.5, en los cinco casos (N° 1, 2, 3, 4 y 5) ésta llega de forma perpendicular al chorro. Además, la mancha de salinidad se desplaza hacia la derecha a medida que la velocidad va aumentando. La salinidad oscila entre los 32,5 *PSU* (salinidad del medio) y los 33 *PSU*, por lo que se encuentra dentro de la normativa. Ello sugiere que el sistema de descarga funciona de forma eficiente y que el área de influencia se encuentra dentro del campo cercano. Cabe destacar que la velocidad del medio es un parámetro que depende exclusivamente de la zona en donde se diseñe el emisario, por lo tanto, es necesario realizar mediciones y conocer exactamente las velocidades de la zona.

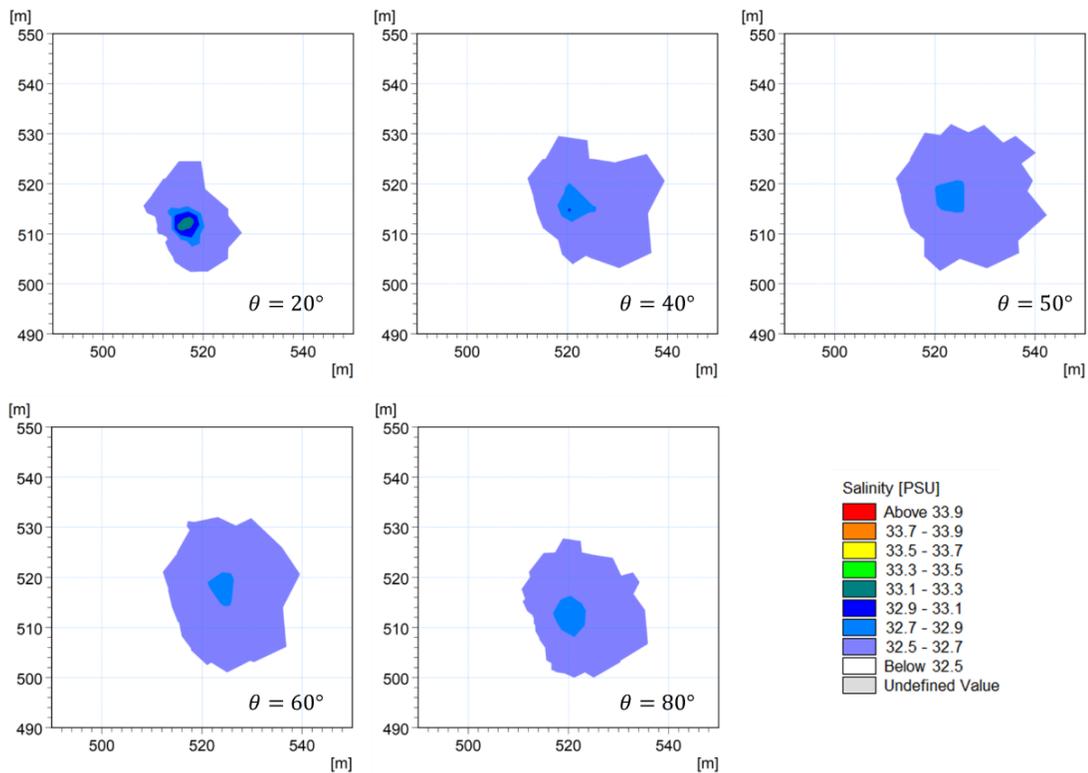
Figura 6.5: Salinidad según la variación de velocidad en campo lejano con respecto a la inclinación del chorro en la vertical



Fuente: Elaboración propia

La segunda variable sensibilizada es la inclinación del chorro (θ) con respecto a la horizontal. En la Figura 6.6 se aprecia que, para todos los casos, la salinidad se mueve desde los 32,5 *PSU* hasta los 32,9 *PSU* a excepción de $\theta = 20^\circ$ (Caso N°6), que presenta salinidades en el centro de 33,3 *PSU*. Sin embargo, siguen encontrándose dentro de la normativa, lo que indica una configuración óptima del *jet*. Cabe destacar que, a diferencia de la variación de velocidad del medio mencionada en párrafo anterior, aquí no se producen grandes desplazamientos con respecto a la descarga.

Figura 6.6: Comportamiento de la salinidad en el campo lejano con respecto a la inclinación de la descarga

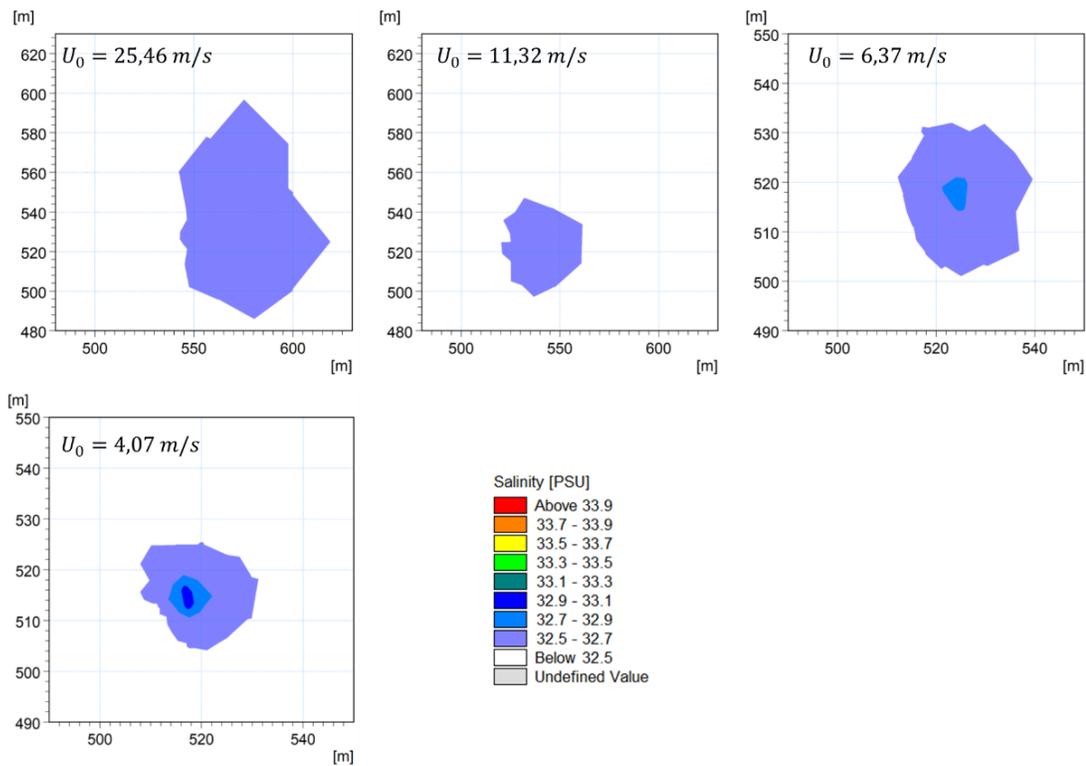


Fuente: Elaboración propia

Si siguiendo con la sensibilización de variables, en la Figura 6.7 se enseña la velocidad de descarga. Se observa que en el Caso N°11 ($U_0 = 25,46 \text{ m/s}$), el área hipersalina es la más grande y presenta un desplazamiento significativo recorriendo alrededor de los 100 m en los ejes x (este) e y (norte). Sin embargo, la salinidad en

el comienzo del campo cercano es similar a la del medio (32,51 *PSU*) lo que indica que en el campo lejano el área salina aumenta su tamaño y termina de mezclarse con el medio. Por otra parte, se aprecia que a menos velocidad el área disminuye y las concentraciones aumentan en pequeñas cantidades, sin superar los 33 *PSU*. Para concluir, el área de influencia en los cuatro casos se encuentra en el campo cercano, por lo que el difusor funciona de forma eficiente.

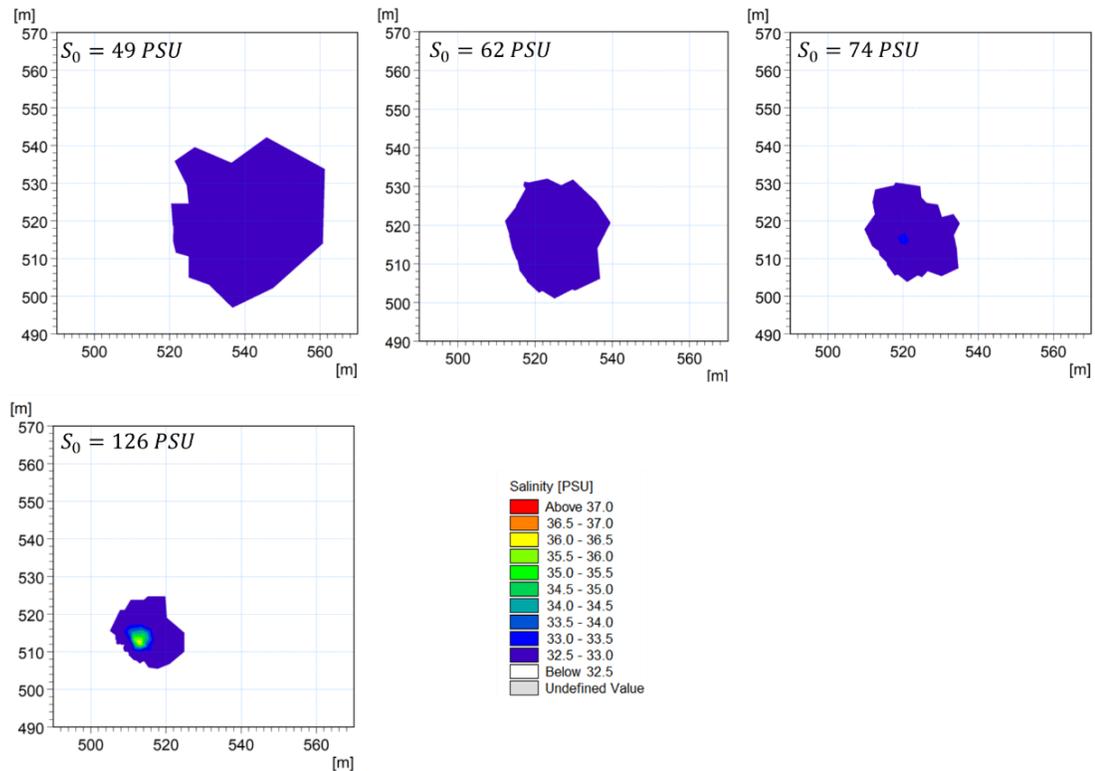
Figura 6.7: Comportamiento de la salinidad en el campo lejano con respecto a la disminución de velocidad en la descarga



En la Figura 6.8 se aprecia la sensibilización de la salinidad que descarga el chorro al medio. En el caso N°15 ($S_0 = 49 \text{ PSU}$) se observa un desplazamiento notorio en dirección al eje x , generado producto de la disminución en la densidad de la descarga, que a su vez hace que la salmuera descargada sea “más liviana” y derive con la corriente del medio. Producto de ello, la dilución solo excede en 0,05 *PSU* la salinidad base del medio, respetando los límites máximo admisible de salinidad. Ahora bien, a medida que la salinidad de descarga aumenta, el área hipersalina

disminuye, pero no así la concentración. En el caso N°17 ($S_0 = 74 \text{ PSU}$) se aprecia una salinidad en el centro del área de 33 PSU y un desplazamiento mucho menor. Finalmente, en el caso N°18 ($S_0 = 126 \text{ PSU}$) es notorio el aumento de salinidad y se excede el máximo admisible. En el centro del área, la salinidad alcanza $36,1 \text{ PSU}$, siendo este el único caso en que el área de influencia se presente en el campo lejano (por ende, es la pluma más grande y salina). Es importante destacar que este es un caso ficticio, ya que en una planta desalinizadora usualmente se descarga el doble de salinidad del medio, que oscila alrededor de los 62 PSU . En la siguiente sección se analiza en más detalle este caso.

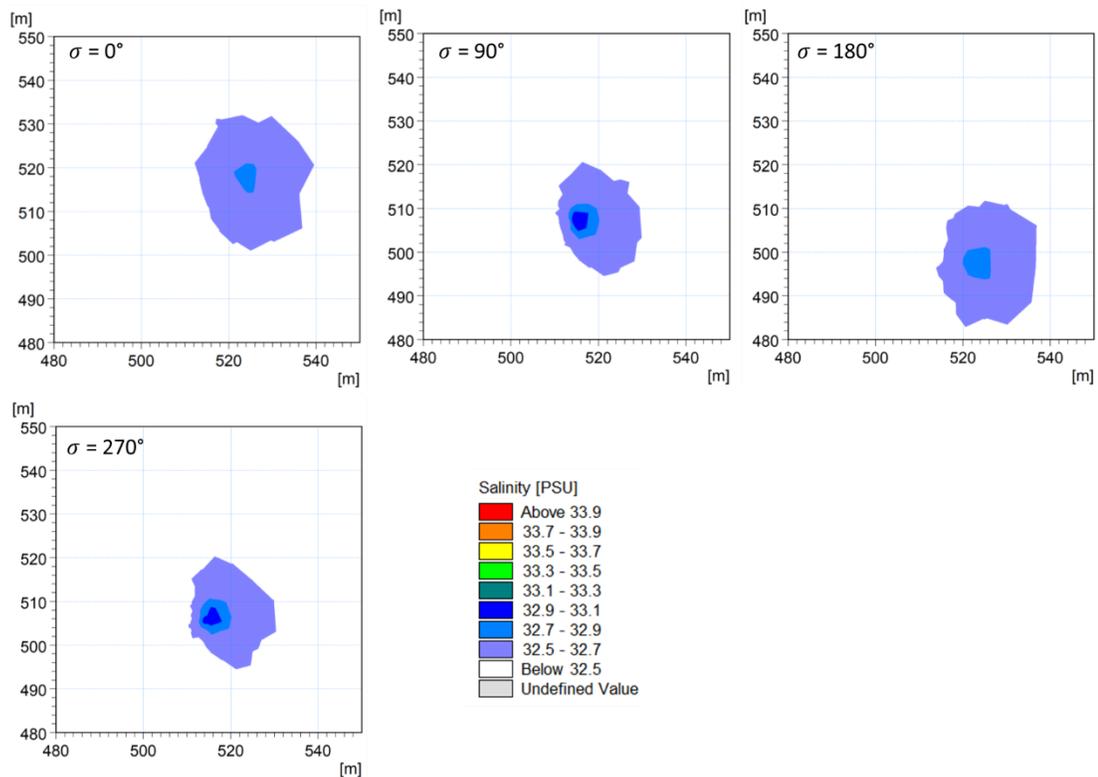
Figura 6.8: Comportamiento de la salinidad en el campo lejano con respecto al incremento de salinidad en la descarga



Finalmente, en la Figura 6.9 se sensibiliza la orientación del chorro que, al igual que las otras variables que caracterizan a la descarga, cumple un rol importante en el campo cercano. Cabe destacar que $\sigma = 0^\circ$ indica que la descarga se orienta al norte.

Con respecto al desplazamiento del área hipersalina, se observa que: Para $\sigma = 180^\circ$ a diferencia de los casos N° 19, 20 y 21 gran parte de la mancha se encuentra por debajo del punto de descarga debido a la orientación sur del chorro. El comportamiento de la salinidad es similar a gran parte de los casos anteriores, moviéndose entre la salinidad base y los 33 *PSU*, a excepción del Caso N°20 que la corriente llega de forma paralela al chorro, donde existe un pequeño incremento de 33,5 *PSU*.

Figura 6.9: Comportamiento de la salinidad en campo lejano con respecto a la orientación del chorro



En resumen, salvo una excepción, en todos los casos donde se analizan variables propias del chorro, el área de influencia se encuentra dentro del campo cercano. En el caso N°18 la salmuera descargada no es capaz de ser disuelta con las configuraciones utilizadas

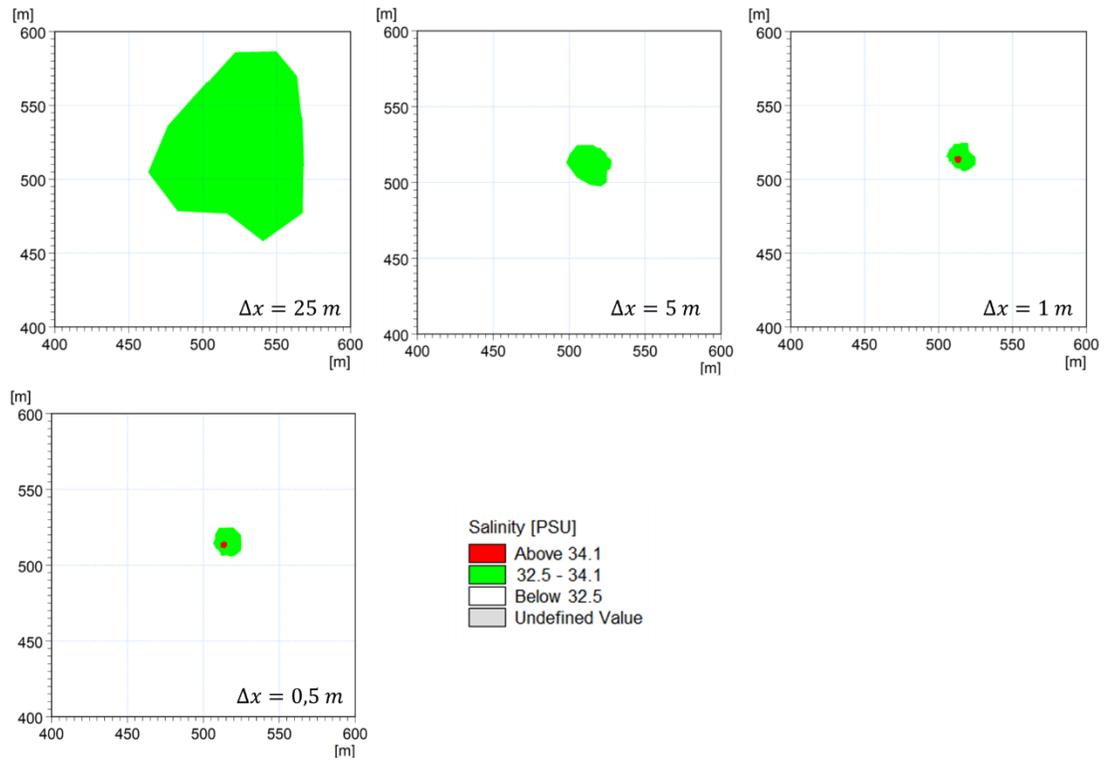
6.3 ÁREA DE INFLUENCIA

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo anterior, se analiza sólo el Caso N°18 ya que, es el único que muestra valores de salinidad superiores al admisible según la normativa australiana (5% exceso de salinidad con respecto al medio). En la Figura 6.10 se muestran cuatro áreas hipersalinas con las distintas mallas (Ver Figura 5.6). Estas se encuentran ordenadas en forma descendente según el tamaño de sus elementos. En *a)* se encuentra el área de mayor tamaño para una grilla con elementos de 25 m, donde la salinidad se encuentra por debajo del máximo admisible. A medida que los elementos de la malla se vuelven de menor tamaño, el área disminuye significativamente y la salinidad aumenta, llegando así a exceder los límites permisibles por la norma. Esto último, es posible observarlo en las imágenes *c)* y *d)*, que además de presentar las mallas con elementos más finos, poseen salinidades en el centro de hasta los 37 PSU.

Para realizar una correcta modelación es primordial realizar un *test* de convergencia⁶ para asegurar que el tamaño escogido para los elementos de la grilla y los saltos de tiempo utilizados son adecuados para que, el software sea capaz de simular la descarga de salmuera de forma que, la representación se parezca lo más posible a un caso real.

⁶ Un test de convergencia es una herramienta que se utiliza para determinar si una serie de datos estadísticos ha convergido a un valor constante.

Figura 6.10: Área de influencia para el Caso N°18. a) $\Delta x = 25\text{ m}$; b) $\Delta x = 5\text{ m}$; c) $\Delta x = 1\text{ m}$; d) $\Delta x = 0,5\text{ m}$



Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

Se analizan los resultados de distintos escenarios de simulación para una descarga de salmuera en un dominio numérico idealizado. Los casos para simular se toman del estudio realizado por Federici (2017) y los resultados obtenidos con MIKE son contrastados con este último para ver similitudes. Además, se estudia el grado de importancia que tienen las distintas variaciones en la dilución de salmuera en el campo lejano.

En cuanto al análisis de sensibilidad realizado con MIKE se desprende que, la variable que más influye en la dilución es la velocidad del chorro, ya que, a mayor velocidad se genera una mayor difusión turbulenta, lo que genera una mayor dilución. Sin embargo, descargar la salmuera con altas velocidades puede generar daños en el ecosistema, por lo que, una forma de maximizar la dilución es la reconfiguración de la inclinación del chorro. Por otra parte, las variables propias de la descarga, como el diámetro del *jet*, velocidad y salinidad de la descarga e inclinación y orientación del chorro, influyen de forma más directa en el campo cercano, lo que indica que una buena configuración ayuda a una dilución más eficiente.

Respecto al análisis comparativo con los resultados obtenidos por Federici (2017), el alcance máximo horizontal presenta un coeficiente de correlación $r = 0,987$ y la dilución un $r = 0,998$. Estos valores indican que los resultados de ambos softwares, a pesar de no ser iguales, poseen una correlación favorable. Con respecto a las diferencias de ambos softwares, dado a los alcances y limitaciones de este estudio, se recomienda profundizar en los parámetros (viscosidad, temperatura, coeficiente de difusión) que se han dejado por defecto.

De acuerdo con la sensibilización en campo lejano, el mayor desplazamiento del área hipersalina con respecto al punto de descarga se genera por: un aumento en la velocidad del medio, una disminución en la salinidad de la descarga lo que hace al "chorro más liviano y fácil de desplazar". Por otra parte, con respecto a la salinidad en esta zona, solamente el caso N° 18 se encuentra por sobre lo permitido por la

normativa australiana, lo que indica que, una correcta configuración y estudio del sistema de descarga y de las condiciones del medio en donde se emplaza el emisario para verter el rechazo, ayuda a optimización de la dilución.

En relación a lo anterior, mientras menor sea el tamaño del área de influencia de la descarga, menor será el impacto ambiental generado en el ecosistema, es por esto que: a modo de recomendación al momento de la evaluación de proyectos de plantas desalinizadora que utilicen MIKE 3 Flow Model, se debe considerar que: MIKE resuelve el campo cercano de forma interna y entrega datos de dilución, posición en x , y y z al fin de éste, por lo tanto, *MIKE* puede utilizarse para hacer un diseño preliminar de la descarga sabiendo los datos de longitud y dilución en el fin del campo cercano. Sin embargo, para conocer el comportamiento que tendrá la salmuera en la zona cercana a los difusores, es necesario utilizar un software como CORMIX, capaz de predecir, visualizar y simular la trayectoria, forma, concentración y dilución de este campo. Además, para el análisis de campo lejano se debe considerar la resolución de la malla y el tiempo de simulación. Para esto, solicitar un *test* de convergencia de estas dos variables corroborará que, el tamaño escogido para los elementos de la grilla y los saltos de tiempo utilizados en el cómputo no afectan el resultado final.

Finalmente, las plantas desalinizadoras son proyectos de gran envergadura que altera de uno u otra forma el ecosistema en donde se ubicarán. Actualmente, Chile, se encuentra atrasado en cuanto a las normativas que las rigen, y sin duda, es necesario seguir avanzando en cuanto a la legislación ambiental. Sin embargo, en pocos años se han publicado guías, como la creada por Patricio Winckler, que ayudan y orientan a realizar una correcta modelación de las plumas salinas.

8. REFERENCIAS

- Aguas Antofagasta Grupo Epm. (2021). *Aguas Antofagasta Grupo Epm 2021*. Obtenido de <https://www.desalar.cl/>
- Armada de Chile: D.G.T.M Y M.M. (2021). *Guía para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima*. Valparaíso.
- Armada de Chile: D.G.T.M. Y M.M. (2012). *ORDINARIA N° A-53/004*. Circular, Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante, Valparaíso.
- Armada de Chile: D.G.T.M. Y M.M. (2021). *ORDINARIA N°12600/05/1403*. Valparaíso.
- Banat, F. (2007). *Economic and technical assessment of desalination technologies*. Geneva: Jordan University of Science and Technology.
- Bleninger, T., & Jirka, G. (2008). *Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants*. *Desalination*. Alemania: ELSEVIER.
- C.C GmbH. (2022). © *Boll & Kirch Filterbau GmbH*. Obtenido de <https://www.bollfilter.com/es/aplicaciones/filtracion-de-tratamiento-de-agua/planta-de-desalinizacion>
- Carrión, M. (2020 de Marzo de 2020). *El Ágora: Diario del Agua*. Obtenido de <https://www.elagoradiario.com/agorapedia/cuanta-agua-planeta/>
- Danoun, R. (2007). *Desalination Plants: Potencial impacts of brine discharge on marine life*. Australia: The University of Sydney.
- DHI. (2023). *MIKE 3 Flow Model FM: Hydrodynamic and Transport Module. Scientific Documentation*. Powered by DHI.
- Fariñas Iglesias, M. (2022). *Vertido de salmueras: Emisarios y modelización*. ALADYR ESPAÑA.

- Federici, P. (2017). *Estudio numérico del comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Hernández Lalinde, J. D., Espinosa Castro, F., Rodríguez, J. E., Chacón Rangel, J. G., Cristian Andrés, T., Arenas Torrado, M. K., . . . Bermúdez Pirela, V. J. (2018). *Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones*. Venezuela.
- Jaime Illanes y Asociados. (2022). *Anexo C4-4: Modelación Descarga de Salmuera*.
- Jirka, G. (2004). *Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part1: Single Round Jet*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- LEGCOHK. (2015). *Seawater desalation technologies*. Legislative Council of the Hong Kong Special Administration.
- MiINSEGPRES. (2022). *Ley N° 19.300: LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE*. Valparaíso: Biblioteca del Congreso Nacional. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- MOP. (2020). *Mesa Nacional de Agua - Primer Informe*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Muñoz, D. (2021). *Modelación numérica de corrientes salinas inducida por salmuera de desalinización en la zona costera de la planta desalinizadora Minera Candelaria, Región de Atacama*. Universidad de Chile. Santiago: Memoria para Optar al Título de Ingeniería Civil.
- Palomar Herrero, P., & Losada Rodríguez, I. (2008). *Desalinización de agua marina en España: Aspectos a considerar en el diseño del sistema de vertido para protección del medio marino*. Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil.
- Palomar, P., Lara, J., Losada, I., Rodrigo, M., & Álvarez, A. (2012). *Near field brine discharge modelling part 1 : Analysis of commercial tools*. España: Elsevier.

Prats, D. (2022). *Desalación de agua por osmosis Inversa. Factores de diseño* . España: ALADYR.

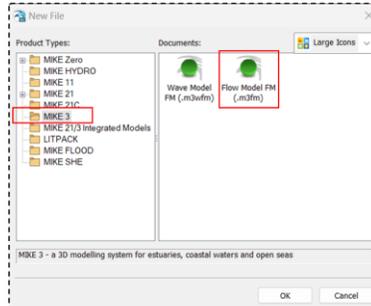
Robert, D., Johnston, E., & Knott, N. (2010). *Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies*. *Water research* 44:5117-5128.

SEA. (2017). *Guía para la descripción del área de influencia*. Santiago: Gobierno de Chile.

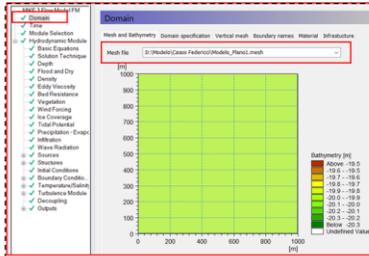
UNESCO. (1981). *The practical salinity scale 1978 and international equation of state of seawater 1980*. technical papers in marine science.

Winckler, P. (2021). *Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.

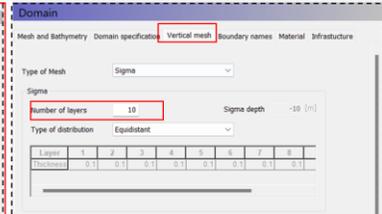
ANEXO 1: Configuración del modelo en MIKE



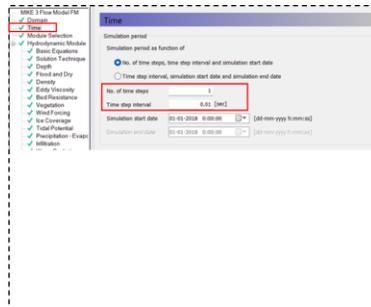
Paso 1: Abrir MIKE 3 Flow Model Fm



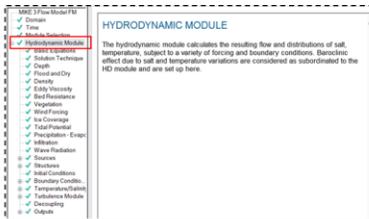
Paso 2: Hacer click en *Domain*. Se abrirá la opción para cargar la malla es formato *.mesh*



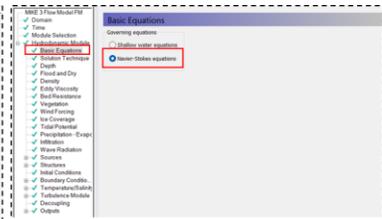
Paso 3: En la misma sección, abrir la pestaña de *vertical mesh* para definir la cantidad de capas en la vertical.



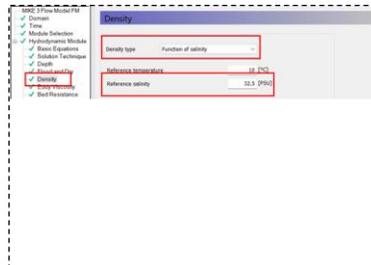
Paso 4: Hacer click en *Time* para seleccionar el periodo de simulación y los intervalos. Tener en consideración el N° de courant.



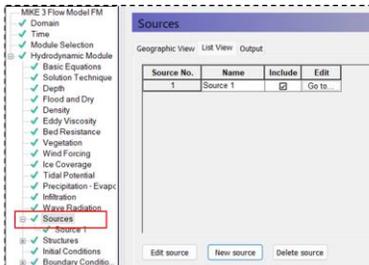
Paso 5: Ir a la sección *Hydrodynamic Module*. Ahí se definen las condiciones del chorro y el medio donde será descargado.



Paso 6: Hacer click en *Basic equations*. Y ahí se deben seleccionar *Navier-Stokes equations*



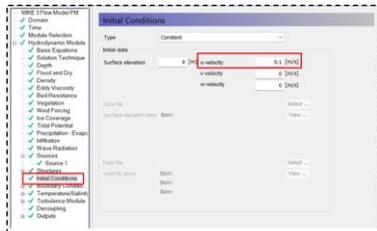
Paso 7: Hacer click en *Density*. Aquí es necesario definir que la densidad se medirá en función de la salinidad y la *reference salinity* 32.5 PSU



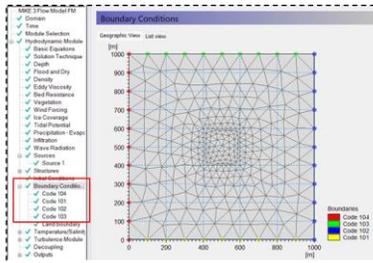
Paso 8: Hacer click en *Source*. Seleccionar *New Source* para definir las condiciones del chorro a simular.



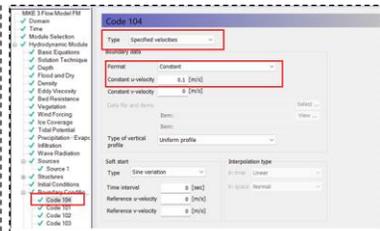
Paso 9: Se debe definir la ubicación de la descarga en los 3 ejes. Luego, el *Source type Jet*, el caudal de *discharge*, diámetro, inclinación y dirección.



Paso 10: Ir a la pesta de *Initial Conditions* y ahí seleccionar la velocidad inicial del modelo. Para todos los casos, la velocidad irá en el eje x.



Paso 11: Hacer click en *Boundary Conditions*.



Paso 12: Seleccionar los bordes verticales para ingresar la velocidad. Al igual que en el Paso 10, solo en la horizontal.

ANEXO 2: Ubicación punto de descarga en las coordenadas (503.83, 507.19, -19.5)

