



Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico

# **ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA AL MAR MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS**

**PABLO ANTONIO FEDERICI HERNÁNDEZ**

**ABRIL 2017**

## ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA AL MAR MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS

Pablo Antonio Federici Hernández

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

**PATRICIO WINCKLER G.**  
Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**MATÍAS QUEZADA L.**  
Revisor

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**EUGENIA VALDEBENITO F.**  
Revisor

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **DECLARACIÓN**

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, 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**

¡Un ciclo cerrado, una meta cumplida!

Eternamente agradecido de la vida.

La ayuda que me ha brindado mi mamá, toda mi familia y mis amigos ha sido perpetua y estoy completamente gratificado por ello.

Ciertamente me considero una persona afortunada, pues se me han presentado oportunidades maravillosas a lo largo de mi vida y en mi convicción de retribución quiero devolverlas a otras personas, para así propagar las cadenas del buen vivir.

Gracias al Pato por ser un excelente profesor guía y una mejor persona, a los profesores guías por su disposición y a todas las personas que me ayudaron durante toda esta etapa.

También tengo que agradecer a MixZone Inc y al Instituto de Hidráulica de Cantabria por facilitar licencias académicas de sus respectivos software y por tener la voluntad de responder cientos de dudas a través de correos electrónicos.

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>10</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>12</b>
<b>4. TERMINOLOGÍA .....</b>	<b>13</b>
<b>5. FUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>5.1. GENERALIDADES .....</b>	<b>15</b>
<b>5.1.1. PLANTA DESALINIZADORA .....</b>	<b>15</b>
<b>5.1.2. SALMUERA .....</b>	<b>15</b>
<b>5.1.3. EMISARIO SUBMARINO.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1.4. DILUCIÓN .....</b>	<b>19</b>
<b>5.2. NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE .....</b>	<b>20</b>
<b>5.3. COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA DESDE EL FONDO DEL MAR.....</b>	<b>24</b>
<b>5.4. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA DESDE EL FONDO DEL MAR .....</b>	<b>26</b>
<b>5.4.1. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DEL FENÓMENO.....</b>	<b>26</b>
<b>5.4.2. MODELACIÓN NUMÉRICA CORMIX.....</b>	<b>29</b>
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DEL FENÓMENO.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2. MODELACIÓN NUMÉRICA CORMIX .....</b>	<b>41</b>
<b>6.3. ANÁLISIS SENSIBILIDAD CORMIX1 .....</b>	<b>43</b>
<b>6.3.1. VELOCIDAD DE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR .....</b>	<b>44</b>

6.3.2. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO CON RESPECTO A LA HORIZONTAL .....	45
6.3.3. VELOCIDAD DE DESCARGA .....	47
6.3.4. DIFERENCIA DE DENSIDADES ENTRE EL MEDIO RECEPTOR Y EL CHORRO DESCARGADO .....	48
6.3.5. ÁNGULO DE DIRECCIÓN ENTRE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR Y EL CHORRO DESCARGADO.....	50
6.3.6. ESTRATIFICACIÓN EN LA COLUMNA DE AGUA .....	51
6.3.7. PENDIENTE DE FONDO .....	53
6.4. ANÁLISIS SENSIBILIDAD CORMIX2 .....	56
6.4.1. VELOCIDAD DE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR.....	56
6.4.2. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO CON RESPECTO A LA HORIZONTAL .....	57
6.4.3. VELOCIDAD DE DESCARGA .....	59
6.4.4. ÁNGULO DIRECCIÓN CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR - CHORRO 60	
6.4.5. NÚMERO DE CHORROS DESCARGANDO.....	62
6.4.6. CONFIGURACIÓN DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA .....	64
6.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN .....	67
7. CONCLUSIONES.....	72
8. BIBLIOGRAFÍA.....	74
9. ANEXOS.....	77

## **ÍNDICE DE IMÁGENES**

Imagen 1: Procesos básicos osmosis inversa.....	15
Imagen 2: Esquemas de las diferentes descargas de salmuera en el medio ambiente marino .....	18
Imagen 3: Ejemplo de dilución de un fluido a medida que aumenta la distancia .....	19
Imagen 4: Ejemplo de una descarga de salmuera realizada desde el fondo.....	24
Imagen 5: Regiones en el comportamiento de la salmuera descargada en el mar.....	24
Imagen 6: Comienzo y expansión horizontal de la corriente de densidad .....	25
Imagen 7: Esquema para un chorro individual sumergido hipersalino con 60° de inclinación.....	27
Imagen 8: Esquema de la sección transversal medio receptor ilimitado .....	30
Imagen 9: Ejemplo de secuencia de ejecución de módulos para simular y clasificar chorros con flotabilidad positiva y negativa .....	31
Imagen 10: Variables axiales sección transversal.....	32
Imagen 11: Diagrama de descarga para un chorro individual sumergido.....	35
Imagen 12: Diagrama de clasificación para flujo de flotabilidad negativa, CORMIX1 .....	36
Imagen 13: Interacción entre chorros y paso de chorro 3D a pluma 2D.....	37
Imagen 14: Variables vista en planta CORMIX2.....	37
Imagen 15: Ejemplos de configuraciones de difusores .....	38
Imagen 16: Diagrama de clasificación para flujo de flotabilidad negativa, CORMIX2.....	39
Imagen 17: Representación grafica de las características del chorro estimadas por (Roberts et al., 1997) .....	41
Imagen 18: Comparación de los resultados entre la caracterización teórica (Roberts et al., 1997) y la modelación numérica CORMIX .....	42
Imagen 19: Análisis de sensibilidad velocidad corriente medio receptor, CORMIX1 .....	45
Imagen 20: Análisis de sensibilidad ángulo de inclinación c/r a la horizontal, CORMIX1 .	46
Imagen 21: Análisis de sensibilidad velocidad de descarga, CORMIX1 .....	48

Imagen 22: Análisis de sensibilidad de la diferencia de densidades entre el chorro descargado y el medio receptor, CORMIX1 .....	49
Imagen 23: Análisis sensibilidad del ángulo de dirección entre corriente medio receptor - chorro, CORMIX1 .....	50
Imagen 24: Tipos de perfiles de densidad que permite utilizar CORMIX.....	51
Imagen 25: Análisis de sensibilidad estratificación en la columna de agua, CORMIX1 ....	52
Imagen 26: Análisis de sensibilidad pendiente del fondo, CORMIX1 .....	53
Imagen 27: Análisis sensibilidad velocidad de la corriente del medio receptor, CORMIX257	
Imagen 28: Análisis de sensibilidad del ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal, CORMIX2.....	58
Imagen 29: Análisis de sensibilidad de la velocidad de descarga, CORMIX2 .....	59
Imagen 30: Análisis de sensibilidad del ángulo de la dirección de la corriente del medio receptor con respecto al chorro, CORMIX2 .....	61
Imagen 31: Cantidad de chorros descargando, CORMIX2.....	62
Imagen 32: Análisis de sensibilidad número de chorros, CORMIX2.....	63
Imagen 33: Configuraciones de las boquillas de descarga utilizadas, CORMIX2.....	64
Imagen 34: Análisis de sensibilidad de la configuración de las boquillas de descarga, CORMIX2 .....	65
Imagen 35: Vista aérea de la localidad de Los Molles. Las líneas amarilla, roja y verde no están a escala con respecto a la imagen y solamente se muestran a modo de referencia. ....	67
Imagen 36: Información batimétrica en la localidad de Los Molles.....	69
Imagen 37: Resultados de la modelación numérica del ejemplo de aplicación .....	70
Imagen 38: Alcance de salmuera descargada .....	71
Imagen 39: Esquema de secuencia de trabajo CORMIX .....	77
Imagen 40: Validación de la geometría del subsistema CORMIX2 .....	81

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Clasificación de cuerpos de agua según salinidad .....	16
Tabla 2: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos dentro de la ZPL.....	22
Tabla 3: Expresiones para caracterizar el comportamiento de un chorro individual sumergido.....	28
Tabla 4: Modelos y subsistemas de CORMIX.....	29
Tabla 5: Resumen de parámetros utilizados .....	40
Tabla 6: Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad, CORMIX1 .....	55
Tabla 7: Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad, CORMIX2 .....	66
Tabla 8: Parámetros químicos de la descarga de la planta desalinizadora .....	68

## **1. RESUMEN**

En el presente estudio numérico del comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos, se modelan los fenómenos que ocurren en un medio receptor acuático idealizado desde un punto de vista teórico. Se trata de una estimación de las características geométricas, de dilución y concentración del chorro y de la pluma de salmuera descargada. Una modelación numérica con el software CORMIX entregó una serie de resultados que fueron cuantificados y analizados, además se realizó una comparación con resultados obtenidos mediante una metodología propuesta por Phillip J. Roberts.

Un análisis de sensibilidad de las variables que participan en la simulación del comportamiento de la salmuera descargada, determinó el grado de influencia de cada una de ellas de manera individual. Las variables más influyentes y determinantes en dicho comportamiento se separan en campo cercano y campo lejano. En el campo cercano depende principalmente del ángulo de inclinación del chorro respecto a la horizontal, la velocidad de descarga y el ángulo producido entre el chorro y la corriente del medio receptor; en el campo lejano depende principalmente de la velocidad de la corriente del medio receptor, la diferencia de densidades entre el fluido descargado y el fluido del medio receptor y la pendiente de fondo.

Los procesos de mezcla y dilución más eficientes se producen en el campo cercano, específicamente hasta el punto donde ocurre el impacto del chorro con el fondo. Una vez ocurrido dicho impacto los efectos turbulentos inducidos en la descarga inicial no son importantes y comienza la estratificación del flujo producto de la diferencia de densidades entre ambos fluidos. En esta zona se da comienzo a la región de campo lejano, la cual es característica de no producir importantes procesos de mezcla, salvo en los casos en que la velocidad de la corriente del medio receptor sea significativamente alta. También se determinó que las descargas mediante múltiples chorros producen procesos de mezcla más eficientes con respecto a las descargas mediante un chorro individual.

Se realizó un ejemplo de aplicación de una descarga de salmuera mediante emisario submarino en las cercanías de la localidad de Los Molles; se realizó un diseño de descarga en aguas relativamente profundas y otro en aguas menos profundas mediante múltiples chorros sumergidos. Se recurrió a las especificaciones que impone la normativa ambiental nacional e internacional y se calculó el área de impacto generada por la descarga. Para el caso en estudio se comprobó que en la región de campo cercano los valores de dilución y concentración de salinidad cumplen con las restricciones ambientales. Con ello se minimiza el potencial impacto ambiental que representan las descargas de salmuera en el medio ambiente marino.

## **2. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad la escasez de agua para consumo humano, es un problema que enfrentamos a nivel mundial. Existen zonas en donde la insuficiencia hídrica determina que sus habitantes no cuenten con el agua necesaria para satisfacer sus necesidades (ONU, 2012). Chile no está exento de estas dificultades y es que desde el extremo norte hasta la región metropolitana del país, existe una disponibilidad de agua realmente crítica (Medina y Fernández, 2013). Las plantas desalinizadoras representan una de las alternativas más importantes de producción de agua ya sea para consumo humano, uso industrial y agrícola (LEGCOHK, 2015).

Este proyecto de título consiste en estudiar el comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos. El estudio se centra en simular las descargas de salmuera provenientes de plantas desalinizadoras de osmosis inversa, mediante una caracterización teórica del fenómeno (Roberts et al., 1997) y una modelación numérica utilizando el software CORMIX. Cuando la salmuera es descargada en el medio ambiente marino se puede generar un impacto ambiental si no es realizada adecuadamente (Palomar y Losada, 2011). Por este motivo es importante ejecutar una serie de estudios que establezcan un apropiado diseño de todo el sistema de descarga; en estos se busca determinar la geometría, dilución y concentración de la salmuera descargada de tal manera que se cumplan todas las especificaciones y criterios que impone la normativa ambiental.

La descripción teórica del fenómeno es realizada con el objeto de adquirir un completo entendimiento del fenómeno ocurrente. Básicamente se trata de un estudio de escritorio donde se trabaja con una serie de ecuaciones semiempíricas, de las cuales se obtienen valores de la geometría, dilución y concentración de la salmuera descargada. La modelación numérica se realiza para comparar sus resultados con la caracterización teórica y verificar que ambos métodos entreguen valores relativamente similares. Además, se efectúa un análisis de sensibilidad de todas las variables que definen el comportamiento de la descarga; se busca determinar cuáles son las variables, parámetros y condiciones naturales ambientales que produzcan procesos de mezcla más eficientes. Un ejemplo de aplicación utilizando los parámetros definidos como óptimos permite determinar el área de impacto que se produce al descargar la salmuera en el mar.

La normativa ambiental internacional recomienda que al final del campo cercano los valores de dilución cumplan con los índices de tolerancia definidos, de lo contrario se podrían tener valores de concentración de salmuera muy elevados en el campo lejano, los cuales producirían efectos negativos en el medio ambiente marino. Por otro lado la normativa nacional se preocupa de asegurar que el área de impacto esté correctamente definida y que los valores de la descarga cumplan con los criterios especificados en el D.S. N° 90/2000.

Entre las limitaciones del proyecto hay que mencionar que no se considera el diseño de los emisarios submarinos, ni del sistema de captación de agua de alimentación, ni de los procesos relacionados a la desalación y tampoco la disposición del agua desalinizada.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de este proyecto de título es simular tanto en el campo cercano como lejano, el comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos y definir los parámetros y variables importantes que permitan reducir el potencial impacto ambiental que representan las descargas de salmuera en el medio ambiente marino.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar una caracterización teórica de la descarga de salmuera mediante un chorro individual sumergido utilizando las formulaciones semiempíricas propuestas por (Roberts et al., 1997).
- Desarrollar una modelación numérica de descargas de salmuera de un chorro individual y múltiples chorros utilizando el software CORMIX.
- Realizar un análisis de sensibilidad con los resultados de la modelación numérica CORMIX, de las variables y parámetros que definen el comportamiento de la descarga de salmuera.
- Desarrollar un ejemplo de aplicación utilizando los parámetros definidos como importantes. En particular:
  - Determinar las dimensiones y alcance tanto del chorro como de la pluma de salmuera descargada.
  - Definir el área de impacto o influencia generada.
  - Determinar la distancia a la cual se alcanzan los valores de dilución y concentración admisibles por la normativa ambiental.

## 4. TERMINOLOGÍA

A continuación se presenta una lista con todos los parámetros y variables que son utilizados en este estudio, tanto en la caracterización teórica del fenómeno como en la modelación numérica de CORMIX.

- $\alpha$ : Ángulo de inclinación de la pendiente de fondo [°]
- $\beta$ : Ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal [°]
- $b$ : Mitad del ancho de chorro en la sección transversal
- $A$ : Ancho de la ZPL [m]
- $B$ : Flujo boyante [m<sup>4</sup>/s<sup>2</sup>]
- $BS$ : Ancho de la sección rectangular vista en planta [m]
- $C$ : Concentración salina en un punto determinado
- " " $c$ ": Subíndice de los parámetros que corresponden al eje central del chorro
- $C_0$ : Concentración salina del chorro descargado
- $C_A$ : Concentración salina del medio ambiente
- $D$ : Diámetro de la boquilla de descarga [m]
- $DSTB$ : Distancia perpendicular a la costa, desde la orilla más cercana hasta al punto de descarga
- $ds$ : Separación entre las boquillas de descarga [m]
- $F$ : Número adimensional de Froude
- $g$ : Aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- $H_b$ : Altura de ola en rompiente [m]
- $\gamma$ : Ángulo horizontal entre el difusor y la corriente del medio receptor [°]
- $h_0$ : Altura de la boquilla de descarga con respecto al fondo [m]
- $H_A$ : Profundidad a la cual se realiza la descarga [m]
- $L_D$ : Longitud del difusor [m]
- $m$ : Pendiente del fondo marino
- $M$ : Flujo de cantidad de movimiento [m<sup>4</sup>/s<sup>2</sup>]

- $N$ : Número de boquillas de descarga
- $\rho_0$ : Densidad del fluido del chorro descargado [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_A$ : Densidad del fluido del medio receptor [ $kg/m^3$ ]
- $Q$ : Flujo de volumen [ $m^3$ ]
- $Q_0$ : Caudal de descarga [ $m^3/s$ ]
- $S$ : Dilución en un punto determinado
- $S_i$ : Dilución en el punto de impacto del chorro con el fondo
- $S_m$ : Dilución en el final del campo cercano o en el final de la zona de mezcla
- $\sigma$ : Ángulo de inclinación entre el chorro y la corriente del medio receptor [ $^\circ$ ]
- $\theta$ : Ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal [ $^\circ$ ]
- $U_0$ : Velocidad de descarga del chorro [ $m/s$ ]
- $U_A$ : Velocidad de la corriente del medio receptor [ $m/s$ ]
- $X_i$ : Distancia a la cual se produce el impacto del chorro con el fondo [ $m$ ]
- $X_m$ : Longitud de la capa hipersalina [ $m$ ]
- $X_t$ : Distancia horizontal a la cual el chorro alcanza la altura máxima [ $m$ ]
- $Y_L$ : Espesor de la capa hipersalina [ $m$ ]
- $Y_t$ : Altura máxima alcanzada por el chorro [ $m$ ]

## 5. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 5.1. GENERALIDADES

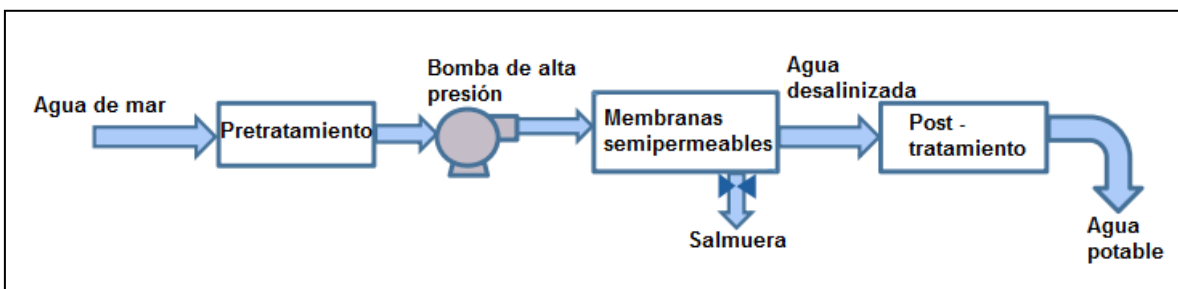
#### 5.1.1. PLANTA DESALINIZADORA

Una planta desalinizadora es una instalación industrial que tiene el objetivo de convertir el agua con altas concentraciones de sales en un recurso hídrico aprovechable, tanto para el consumo humano, uso industrial o agrícola (LEGCOHK, 2015). Las técnicas de desalinización más importantes son las siguientes: osmosis inversa, evaporación instantánea multi-etapa, destilación multi-efecto, destilación solar, congelación, entre otras (Soto et al., 2013). A continuación de manera introductoria se explica el proceso de desalinización por osmosis inversa; esta tecnología es utilizada en más del 60% de las plantas desalinizadoras en todo el mundo (LEGCOHK, 2015).

#### OSMOSIS INVERSA

Es un proceso de desalinización que utiliza membranas semipermeables que permiten el paso de las moléculas de agua, pero no de las sales contenidas en ella. En un primer paso se realiza un pre-tratamiento al agua de alimentación para eliminar los sólidos en suspensión. En el siguiente paso se utiliza una bomba de alta presión para forzar el paso del agua a través de las membranas semipermeables, dejando las sales atrapadas en ellas. Luego se realizan post-tratamientos que dependerán de la calidad del agua de alimentación y del tipo de uso al que esté destinada el agua desalinizada. En términos generales, a partir del agua de alimentación se obtiene entre un 40% y un 45% de agua desalinizada (LEGCOHK, 2015). En la imagen 1 se muestra un esquema básico de los procesos de la osmosis inversa.

Imagen 1: Procesos básicos osmosis inversa



Fuente: LEGCOHK, (2015)

#### 5.1.2. SALMUERA

Cuando la desalinización se realiza mediante osmosis inversa, las plantas desalinizadoras tienen un subproducto principal el cual es la salmuera, que es agua con alta concentración de sales disueltas (Torres, 2004). En el caso de que la salmuera sea descargada en un cuerpo receptor acuático como el medio ambiente marino, ésta tendrá exceso de salinidad y por lo tanto una mayor densidad, convirtiéndola en una descarga de flotabilidad negativa (IHA y CEDEX, 2011). Esta definición se explica en detalle más adelante en el tópico de comportamiento de la salmuera descargada en el mar.

En la tabla 1 se muestran valores de salinidad correspondientes a diferentes cuerpos de agua, que son establecidos arbitrariamente para ayudar a distinguir un ambiente de otro (Fuentes et al., 2002). Se observa que la salmuera puede tener hasta tres veces más la cantidad de sales por litro que el agua de mar.

Tabla 1: Clasificación de cuerpos de agua según salinidad

<b>SALINIDAD (g/L)</b>	<b>Tipo de agua</b>
<b>0 - 0.5</b>	<b>agua dulce</b>
<b>0.5 - 30</b>	<b>agua salobre</b>
<b>30 - 50</b>	<b>agua de mar</b>
<b>50 - 150</b>	<b>salmuera</b>
<b>&gt; 150</b>	<b>hipersalina</b>

Fuente: Fuentes et al., (2002)

Además de la salmuera las plantas desalinizadoras de osmosis inversa tienen otros subproductos tales como aditivos y sustancias químicas, los cuales provienen principalmente de los procesos de la limpieza de filtros, membranas y tuberías (IHA y CEDEX, 2011). En general estos subproductos son ignorados en la práctica debido a que son utilizados en poco volumen y poca frecuencia. Sin embargo, es necesario realizar estudios que corroboren que la concentración de dichas sustancias no representan un riesgo de contaminación al medio ambiente marino (Soto et al., 2013).

Debido a la alta concentración de sales y en algunos casos de aditivos químicos, la descarga de salmuera en el medio ambiente marino puede generar un impacto ambiental si no se realiza adecuadamente. En la bibliografía se han encontrado numerosos estudios que determinan los efectos negativos que podrían producir las plantas desalinizadoras sobre el medio ambiente marino. Los efectos más importantes son los siguientes (Losada y Palomar, 2008):

- Anoxia en los fondos marinos: la salmuera descargada de mayor densidad se hunde, dividiendo la columna de agua en dos capas, el agua de mar de menor densidad se ubica la capa superior y la salmuera de mayor densidad en la capa inferior. Esta diferencia de densidades genera una pycnoclina que dificulta los procesos de mezcla entre ambos fluidos.
- Modificación de las condiciones de luz: la presencia de un fluido de mayor densidad representa una variación en la cantidad de luz que refleja y absorbe el agua, la cual afecta a la fotosíntesis de las especies vegetales marinas.
- Afección a especies marinas: En algunas zonas cercanas a descargas de salmuera, se han detectado importantes reducciones de comunidades de especies.
- Afección al fondo marino: una vez que la salmuera se hunde hacia el fondo del mar se produce una capa que se va expandiendo a través de éste, dicha capa va produciendo una especie de quemadura de todo el fondo marino, afectando principalmente a las especies de algas marinas.

### 5.1.3. EMISARIO SUBMARINO

Un emisario submarino (de ahora en adelante emisario), se entenderá como toda forma de ducto o tubería destinado a descargar, en forma submarina, a cuerpos de aguas marinas costeras hasta las 12 millas náuticas, materias, energía o sustancias en estado líquido, resultantes de un proceso industrial o sanitario. Los emisarios tienen el objetivo de descargar aguas residuales, ya sean contaminantes o no, en un lugar de cuerpo de agua donde la hidrodinámica favorezca la mezcla y dilución de la descarga (Armada de Chile, 2012).

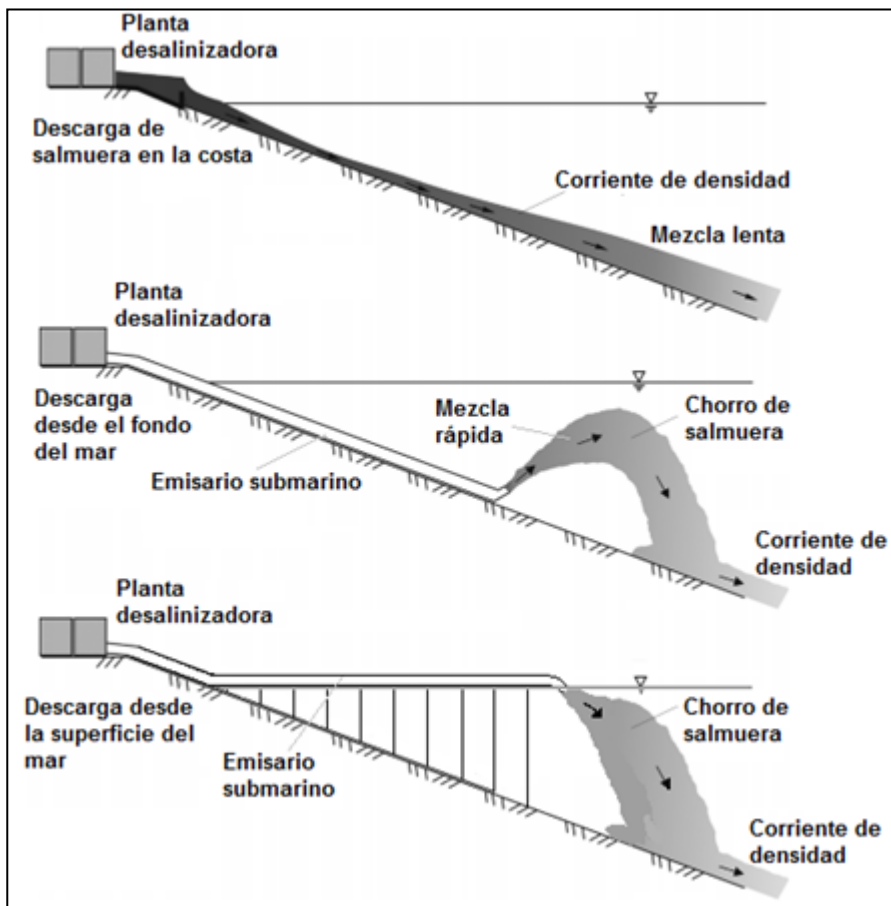
En el diseño de este tipo de proyectos se deben tener en cuenta todos los factores y condiciones bajo los cuales éste será operativo. Para establecer las características de todo el sistema de descarga, es necesario realizar una serie de estudios que determinen los requisitos mínimos de construcción. En estos estudios los aspectos principales a considerar son los siguientes (Malcangio y Petrillo, 2011):

- Condiciones ambientales donde estará emplazado todo el sistema de descarga: morfología del fondo, batimetría, oleaje, mareas, vientos, corrientes, temperatura, densidad, salinidad, biota, entre otros.
- Características de la salmuera descargada: caudal de descarga (máximo y mínimo), densidad y exceso de salinidad. En estos casos también se debe hacer una caracterización del efluente según tabla de cumplimiento D.S. N° 90/2000.
- Criterios económicos: relacionados al costo de construcción, instalación y mantención del emisario, gastos necesarios para adquirir, instalar y mantener en funcionamiento las bombas que impulsarán la descarga y gastos relacionados al consumo de energía

La sección final del emisario corresponde a un difusor el cual juega un rol importante en el funcionamiento de todo el sistema de descarga. Éste tiene el objetivo de depositar el flujo descargado en el medio ambiente marino, descarga que se puede realizar desde el fondo del mar mediante un chorro individual o mediante múltiples chorros (Tate et al., 2012). También se pueden realizar descargas desde la superficie del mar o directamente en la costa (playas, roqueríos, etc.). En este trabajo solo se estudiarán las descargas de chorros sumergidos desde el fondo, ya que dicha configuración genera procesos de mezcla más eficientes (Bleninger et al., 2007). A modo de ejemplo en la imagen 2 se muestra una esquematización de los tres mecanismos de descargas de salmuera que fueron mencionados anteriormente.

Para los propósitos de una modelación numérica, el caudal de descarga de la planta desalinizadora generalmente se asume uniforme y constante a través de cada boquilla de descarga. Cuando se trata de un difusor de múltiples chorros, la pérdida de carga puede ser significativa sobre la sección más larga de éste, produciendo una disminución en la velocidad de descarga en algunas de sus boquillas. En algunos casos se podría dar lugar a una intrusión del fluido del medio receptor al sistema de descarga (Tate et al., 2012).

Imagen 2: Esquemas de las diferentes descargas de salmuera en el medio ambiente marino



Fuente: Bleninger et al., (2007)

Para ayudar a establecer un caudal y velocidad uniforme, el difusor puede ser diseñado en forma cónica o telescópica, es decir, que va disminuyendo su diámetro; para prevenir la intrusión del fluido del medio receptor al sistema de descarga, las boquillas de descarga pueden estar equipadas con válvulas de no retorno (Tate et al., 2012).

La pérdida total de carga en un sistema de descarga, se refiere a la pérdida de presión que se produce debido a: las pérdidas continuas por fricción que se generan por la interacción entre las partículas del fluido y su interacción con las paredes del emisario. Como así mismo las pérdidas singulares que se producen por curvas, estrechamientos, válvulas y caudales de descarga que salen por las boquillas a lo largo del difusor (Tate et al., 2012).

Dado que la dilución del fluido descargado está directamente relacionada con la velocidad de descarga, el objetivo del diseño de un emisario es alcanzar velocidades de salida iguales o lo más cercanas posibles en cada boquilla de descarga y así garantizar niveles de dilución consistentes a lo largo del difusor. En la práctica generalmente se realiza un proceso iterativo de diseño tanto del emisario como del difusor, con el fin de lograr un equilibrio correspondiente entre el rendimiento de dilución y condiciones medio ambientales favorables (Malcangio y Petrillo, 2011).

### 5.1.4. DILUCIÓN

La dilución es la mezcla que se produce entre el flujo descargado y el cuerpo de agua receptor. Este proceso ocurre a medida que el fluido descargado se desplaza e interacciona con el fluido del medio receptor; en dicho desplazamiento se produce incorporación de ambos fluidos entre sí, hasta un punto determinado en donde sus concentraciones se igualan. Este proceso se conoce como entrainment (IHA y CEDEX, 2008).

La dilución se puede expresar mediante la relación entre la diferencia de concentraciones entre el fluido descargado y el fluido del medio receptor (ver Ec. 1). Asumiendo que la densidad es directamente proporcional a la concentración salina, la dilución se puede expresar también a través de la relación entre la diferencia de densidades entre ambos fluidos (IHA y CEDEX, 2008).

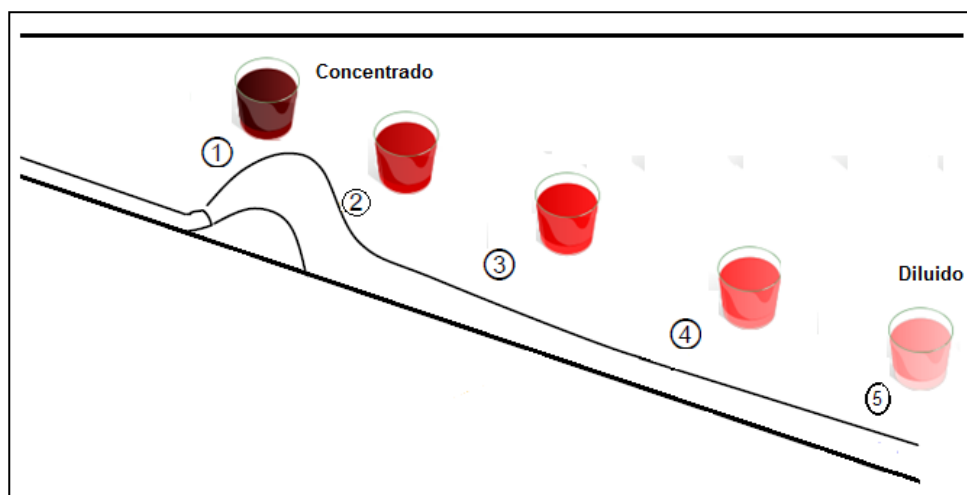
$$S = \frac{C_0 - C_A}{C - C_A} = \frac{\rho_0 - \rho_A}{\rho - \rho_A} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $C_0$  representa la concentración salina del chorro descargado,  $C_A$  es la concentración salina del medio ambiente,  $C$  es la concentración salina en un punto determinado,  $\rho_0$  es la densidad del chorro descargado,  $\rho_A$  es la densidad del medio ambiente y  $\rho$  es la densidad en un punto determinado.

En la imagen 3, se muestra un ejemplo de cómo va aumentando la dilución en un chorro a medida que éste avanza en su recorrido. En el ejemplo se extraen cinco muestras correspondientes a diferentes puntos cada una y se observa cómo va disminuyendo la concentración producto de los procesos de mezcla asociados a la región de campo cercano y campo lejano. La concentración puede expresarse mediante la Ec. 2 donde  $m$  representa la masa de agente o masa contaminante y  $V$  el volumen del mismo.

$$C \equiv \frac{m_{agente}}{m_{agua}} \equiv \frac{V_{agente}}{V_{agua}} \quad \text{Ec. 2}$$

Imagen 3: Ejemplo de dilución de un fluido a medida que aumenta la distancia



Fuente: Elaboración propia

## **5.2. NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE**

A continuación se presenta la legislación ambiental de carácter general y específico aplicable a este tipo de proyectos y/o actividades. Esta legislación está asociada directamente a la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza, el uso y manejo de los recursos naturales, la fiscalización y los permisos ambientales sectoriales requeridos para ejecutar o modificar proyectos de esta índole.

### **CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LA REPÚBLICA**

La Constitución Política de la República garantiza el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación e impone, como deber al Estado, velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza. Adicionalmente faculta a la ley para establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente. Por otra parte, garantiza el derecho de propiedad, la libertad para adquirir toda clase de bienes, el derecho a desarrollar cualquier actividad económica lícita, la igualdad ante la ley y el derecho a no ser discriminado por el Estado o sus organismos en materia económica, todos ellos igualmente tutelados además jurisdiccionalmente.

### **D.L. N° 2222/1978: LEY DE NAVEGACIÓN**

En el artículo 142° (Ley N° 2222, 2005) se prohíbe absolutamente arrojar lastre, escombros o basuras y derramar petróleo o sus derivados o residuos, aguas de relaves, minerales u otras materias nocivas o peligrosas, de cualquier especie que ocasionen daños o perjuicios en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, puertos, ríos y lagos. Sólo la Autoridad Marítima, en conformidad al reglamento, podrá autorizar alguna de las operaciones señaladas anteriormente, debiendo señalar el lugar y la forma de proceder.

### **LEY N° 19300/2010: BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE**

La normativa ambiental aplicable se rige de acuerdo a la Ley N° 19300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19300, 2011). En el Artículo 10° se especifica que los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental SEIA. El impacto ambiental se define como la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

Este tipo de proyectos se encuentran dentro de las especificaciones correspondientes a la letra o) del artículo 10° de la misma ley; 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. Por lo tanto estos sólo pueden ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental, para lo cual deben someterse al SEIA.

El titular del proyecto o actividad que se somete al SEIA lo hace presentando una Declaración de Impacto Ambiental DIA o un Estudio de Impacto Ambiental EIA según lo indicado en el artículo 11° (Ley N° 19300, 2011). Cuando un proyecto o actividad se presenta en el SEIA mediante una DIA, ésta debe contener las siguientes materias:

- Una descripción del proyecto o actividad
- Los antecedentes necesarios que justifiquen la inexistencia de aquellos efectos, características o circunstancias del artículo 11° (Ley N° 19300, 2011) que puedan dar origen a la necesidad de efectuar un EIA
- La normativa ambiental aplicable y la forma en la que se cumplirá
- La indicación de los permisos ambientales sectoriales, y los antecedentes asociados a los requisitos y exigencias para el respectivo pronunciamiento.

### **LEY N° 20417/2010: ESTABLECE INSTITUCIONALIDAD AMBIENTAL**

Créase la Superintendencia del Medio Ambiente que tendrá por objeto ejecutar, organizar y coordinar el seguimiento y fiscalización de las Resoluciones de Calificación Ambiental, de las medidas de los Planes de Prevención y de Descontaminación Ambiental, del contenido de las Normas de Calidad Ambiental y Normas Emisión, y de los Planes de Manejo, cuando corresponda y de todos aquellos otros instrumentos de carácter ambiental que establezca la ley.

### **D.S. N° 90/2000 NORMA DE EMISIÓN PARA LA REGULACIÓN DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS DESCARGAS DE RESIDUOS LÍQUIDOS A AGUAS MARINAS Y CONTINENTALES SUPERFICIALES**

La Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (DS N° 90, 2001), tiene como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos de agua receptores, esta norma establece la concentración máxima de contaminantes para residuos líquidos descargados.

En la tabla 2 se muestran los límites máximos permitidos para las descargas de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro y fuera de la Zona de Protección Litoral ZPL respectivamente. Esta tabla regula la cantidad de contaminantes que se pueden descargar de forma directa en el mar; se observa que estas carecen de criterios que regulen directamente la salinidad de las descargas de salmuera. En rojo se señalan los posibles contaminantes que estarían presentes en una descarga de salmuera. Más adelante en el tópico del ejemplo de aplicación, se mostrarán valores reales de la concentración de los parámetros químicos presentes en una descarga de salmuera, dichos valores pertenecen a un EIA presentado por una empresa privada (GHD, 2011), en el marco de un proyecto de una planta desalinizadora para una minera.

Tabla 2: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos dentro de la ZPL

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO	
		Dentro ZPL	Fuera ZPL
Aceites y grasas	mg/L	20	350
Aluminio	mg/L	1	10
Arsénico	mg/L	0.2	0.5
Cadmio	mg/L	0.02	0.5
Cianuro	mg/L	0.5	1
Cobre	mg/L	1	3
Coliformes fecales o termotolerantes	NMP/100 ml	1000-70	x
Índice de fenol	mg/L	0.5	1
Cromo hexavalente	mg/L	0.2	0.5
Cromo total	mg/L	2.5	10
DBO5	mg O2/L	60	100
Estaño	mg/L	0.5	1
Fluoruro	mg/L	1.5	6
Fósforo	mg/L	5	10
Hidrocarburos totales	mg/L	10	20
Hidrocarburos volátiles	mg/L	1	2
Hierro disuelto	mg/L	10	15
Manganeso	mg/L	2	4
Mercurio	mg/L	0.005	0.02
Molibdeno	mg/L	0.1	0.5
Niquel	mg/L	2	4
Nitrógeno total kjeldahl	mg/L	50	x
PH	unidad	6,0 - 9,0	5,5 - 9,0
Plomo	mg/L	0.2	1
SAAM	mg/L	10	15
Selenio	mg/L	0.01	0.03
Sólidos sedimentables	m1/1/h	5	50
Sólidos suspendidos totales	mg/L	100	700
Sulfuros	mg/L	1	2
Zinc	mg/L	5	10
Temperatura	°C	30	x

Fuente: DS N° 90, (2001)

### D.S. N° 40/2013: REGLAMENTO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Corresponde al Servicio de Evaluación Ambiental SEA la administración del SEIA, así como la coordinación de los organismos del Estado involucrados en el mismo, para los efectos de obtener los permisos o pronunciamientos correspondientes. Regula los criterios aplicables para determinar si se producen los efectos, características o circunstancias señalados en la Ley N° 19.300, el contenido de los EIA y de las DIA, el proceso de evaluación de éstos, las directrices para facilitar la participación ciudadana, así como la utilización de las normas de calidad ambiental y normas de emisión, vigentes en Chile. También contiene normas relativas al plan de seguimiento y fiscalización, a los permisos ambientales sectoriales, al seguro ambiental y autorizaciones provisorias.

## **D.F.L. N° 340/1992: REGLAMENTO SOBRE CONCESIONES MARÍTIMAS**

En el Reglamento Sobre Concesiones Marítimas (Armada de Chile, 2006), se establece que las concesiones marítimas de terreno de playa, la playa, el fondo de mar y las porciones de agua, son bienes nacionales de uso público, es decir, patrimonio de todos los chilenos y pueden ser entregadas en concesión a personas naturales o jurídicas. En tal sentido, cualquier persona, empresa, organización o servicio público que desee desarrollar un proyecto en dichos sectores, debe contar previamente con una autorización otorgada por el Ministerio de Defensa Nacional por medio de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas. El Ministerio de Defensa Nacional es el organismo que tiene la facultad privativa de permitir el uso y goce de sectores de terreno de playa fiscales (80 metros medidos desde la línea de más alta marea); playa (comprendida entre la línea de baja y de alta marea); fondo de mar y porciones de agua.

## **CIRCULAR QUE ESTABLECE PROCEDIMIENTOS PARA FIJAR EL ANCHO DE LA ZONA DE PROTECCIÓN LITORAL ZPL**

En este documento se define la Zona de Protección Litoral ZPL (Armada de Chile, 2012). Ésta es un ámbito territorial de aplicación de la norma que corresponde a la franja de playa, agua y fondo de mar adyacente a la costa continental o insular, delimitada por una línea superficial imaginaria, medida desde la línea de baja marea de sicigia, que se orienta paralela a ésta y que se proyecta hasta el fondo del cuerpo de agua, fijada por la Autoridad Marítima.

## **DIRECTRICES PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PROYECTOS INDUSTRIALES DE DESALACIÓN EN JURISDICCIÓN DE LA AUTORIDAD MARÍTIMA**

En el año 2015 se crearon las Directrices para la Evaluación Ambiental de Proyectos Industriales de Desalación en Jurisdicción de la Autoridad Marítima (Armada de Chile, 2015). Éstas son recomendaciones que tienen el objetivo de definir los requerimientos básicos que deben contener los EIA y DIA asociados a proyectos de plantas desalinizadoras en jurisdicción de la Autoridad Marítima. Debido a que en la tabla 2 falta información de criterios y valores específicos relacionados a las descargas provenientes de las plantas desalinizadoras; y en concordancia con el artículo 11° del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (DS N° 40, 2013), se detallan las siguientes especificaciones y recomendaciones:

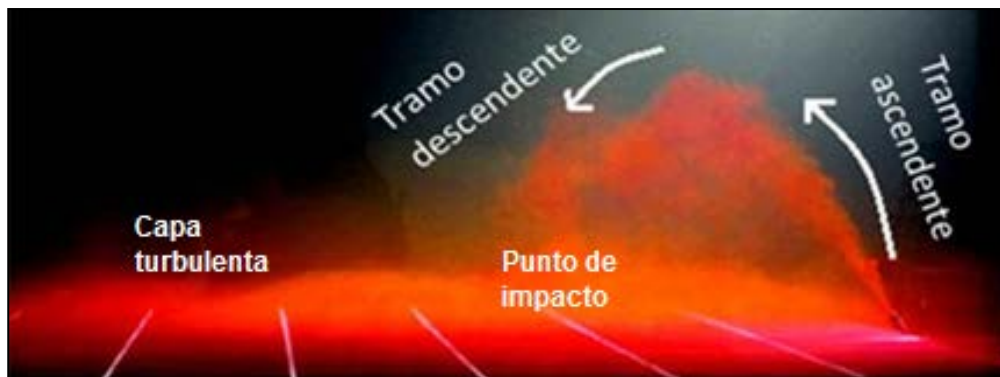
- Norma secundaria española (Real Decreto 927, 1988): esta norma considera como aceptable un incremento no mayor al 10% de la salinidad base en el medio marino.
- NWQMS, (1992). Esta norma Australiana y neozelandesa establece como estándar ambiental aceptable un incremento no mayor al 5% de la salinidad base en el medio marino receptor.
- EPA, (1986): Esta norma de los Estados Unidos recomienda que con el objetivo de proteger el hábitat natural, la variación de salinidad a partir de su nivel base no debe exceder 4 psu en áreas permanentemente ocupadas por plantas con aptitud para consumo como alimento o formadoras de hábitat.

### 5.3. COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA DESDE EL FONDO DEL MAR

El comportamiento de la salmuera descargada desde el mar depende de las características del difusor y del medio receptor donde se realiza la descarga (IHA y CEDEX, 2008). Este estudio se centra en el comportamiento de la salmuera descargada en un medio receptor idealizado. Como se mencionó anteriormente, la salmuera descargada en el medio tiene flotabilidad negativa, por lo que tenderá a hundirse hacia el fondo.

Una vez que el chorro sale eyectado de las boquillas de descarga con un cierto ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, el flujo describe un movimiento parabólico, donde el chorro asciende producto del impulso inicial en la descarga y luego desciende hacia el fondo debido a la flotabilidad negativa (IHA y CEDEX, 2008). En la imagen 4 se muestra un ejemplo del movimiento ascendente y descendente del chorro de salmuera descargado desde el fondo.

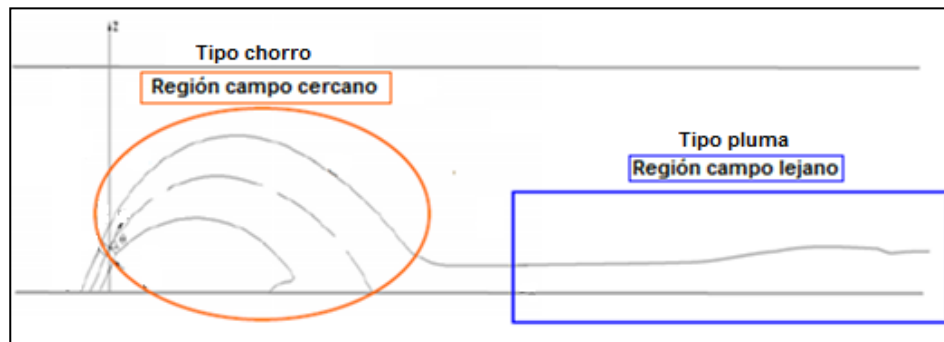
Imagen 4: Ejemplo de una descarga de salmuera realizada desde el fondo



Fuente: Elaboración propia

Cuando se descarga un chorro de manera continua en cualquier cuerpo de agua, se distinguen dos regiones principales: la región de campo cercano y la región de campo lejano (Losada y Palomar, 2008). La imagen 5 muestra un esquema donde se aprecian estas dos regiones en un chorro individual sumergido.

Imagen 5: Regiones en el comportamiento de la salmuera descargada en el mar



Fuente: Losada y Palomar, (2008)

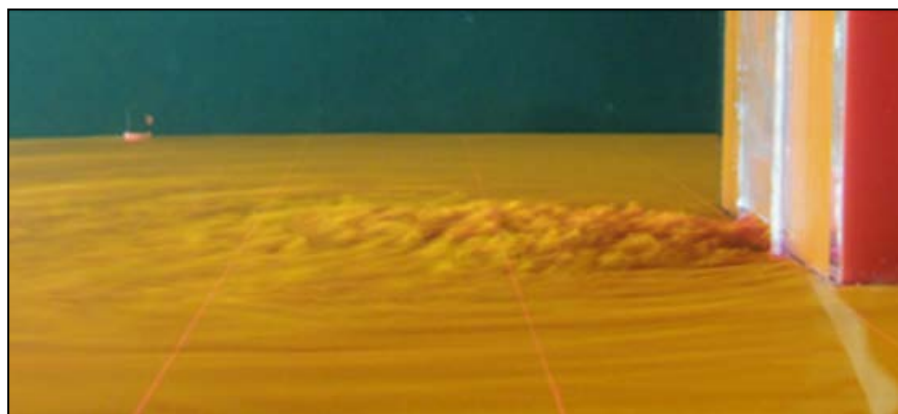
La región de campo cercano que se encuentra situada alrededor del punto de descarga, es la zona donde el comportamiento de la salmuera es del tipo chorro y depende de las características del difusor y de la diferencia de densidad entre ambos fluidos (ECOGUA, 2011). Los fenómenos físicos están referidos principalmente a la cantidad de movimiento generado por el impulso inicial de la descarga y la flotabilidad negativa que tiende a hundir hacia el fondo el flujo descargado.

En esta región se produce la mayor dilución, debido a los procesos de mezcla relacionados a las altas velocidades inducidas por la impulsión en la descarga y a la turbulencia generada en la zona de impacto del chorro con el fondo. Las variaciones de los parámetros geométricos y de dilución corresponden a escalas de tiempo y espacio de minutos y metros, respectivamente (Palomar y Losada, 2011).

Luego de que el chorro impacta con el fondo se produce el colapso de la turbulencia asociada a la descarga. En esta zona comienza la estratificación del flujo producto de la diferencia de densidades y se forma una corriente hipersalina característica de la región de campo lejano. Ésta es la zona donde el comportamiento de la salmuera es del tipo pluma y ahora está determinado por las características del medio ambiente (rugosidad y pendiente del fondo, velocidad y dirección de la corriente) la diferencia de densidades entre ambos fluidos y las características del flujo en esta región (espesor, concentración y momentum) (Pérez et al., 2015). Las variaciones de los parámetros geométricos y de dilución corresponden a escalas de tiempo y espacio de kilómetros y horas-días respectivamente (Palomar y Losada, 2011).

La corriente de densidad que se forma después de que el chorro impacta con el fondo, se va expandiendo en función de la dirección de la corriente del medio receptor y por la pendiente del fondo. En el caso de que la dilución en el campo cercano no haya sido suficiente, la corriente de densidad puede alcanzar grandes distancias, afectando de forma negativa el fondo del medio receptor (Pérez et al., 2015). Se recomienda que la orientación del difusor sea de manera tal que el chorro descargado tenga la misma dirección que la corriente del medio receptor y apunte en la dirección hacia aguas más profundas, de manera de favorecer los procesos de mezcla (IHA y CEDEX, 2011). En la imagen 6 se muestra el comienzo y la expansión de la corriente de densidad después de producirse el impacto del chorro con el fondo.

Imagen 6: Comienzo y expansión horizontal de la corriente de densidad



Fuente: Pérez et al., (2015)

## **5.4. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DESCARGADA DESDE EL FONDO DEL MAR**

Simular el comportamiento de la salmuera descargada en un medio receptor es un proceso complejo, ya que se busca estimar las características de un fenómeno dinámico, turbulento y aleatorio. En un medio ambiente marino se supone una alta cantidad de escenarios posibles. Debido a esto es necesario generar un modelo que permita estimar el comportamiento del fenómeno con ciertas simplificaciones (IHA Y CEDEX, 2011).

Un modelo es una representación teórica y simplificada de los fenómenos ocurrientes en el mundo real. Éstos tienen dos utilidades fundamentales (Escudero, 2010): i) reducir la complejidad, permitiendo ver las características importantes que están detrás de un proceso e ignorando detalles de menor importancia que harían el análisis innecesariamente laborioso, y ii) realizar predicciones, que se puedan ratificar o desmentir mediante experimentos y observaciones.

Los modelos que permiten simular el comportamiento de la salmuera descargada en el mar, son una herramienta de predicción esencial para la evaluación de impacto ambiental en un proyecto de desalinización. Sin embargo, no proporcionan una información exacta de lo que va a ocurrir en la realidad. Las predicciones resultantes de un modelo deben ser comparadas y validadas por estudios de campo (Escudero, 2010), con el objetivo de que sirvan para tomar decisiones en el diseño y ejecución de proyectos de desalinización.

La primera parte del proceso de simulación del comportamiento de la salmuera corresponde a una caracterización teórica del fenómeno. En esta etapa se estiman las características geométricas, de dilución y concentración del chorro descargado, mediante formulaciones semiempíricas las cuales fueron obtenidas a través de diferentes experimentos de descargas de chorros con flotabilidad negativa en un laboratorio y del análisis dimensional del fenómeno (Roberts et al., 1997).

La segunda parte del proceso de simulación corresponde a una modelación numérica utilizando el software CORMIX (Doneker y Jirka, 2007). La elección de éste se debe a que es uno de los software más utilizados en la simulación de descargas de chorros de salmuera (Torres, 2004). Una licencia académica facilitada gratuitamente por la empresa MixZon Inc, permitió la utilización de dicho software. Además de CORMIX existen otros programas en el mercado actual que permiten realizar este tipo de simulaciones; entre los más importantes destacan Visual Plumes, VisJet y brlHne. También existen modelos que se especializan en simular comportamientos de campo lejano, tales como Delft-3D y Mike3, los cuales integran nuevas variables y restricciones en su funcionamiento.

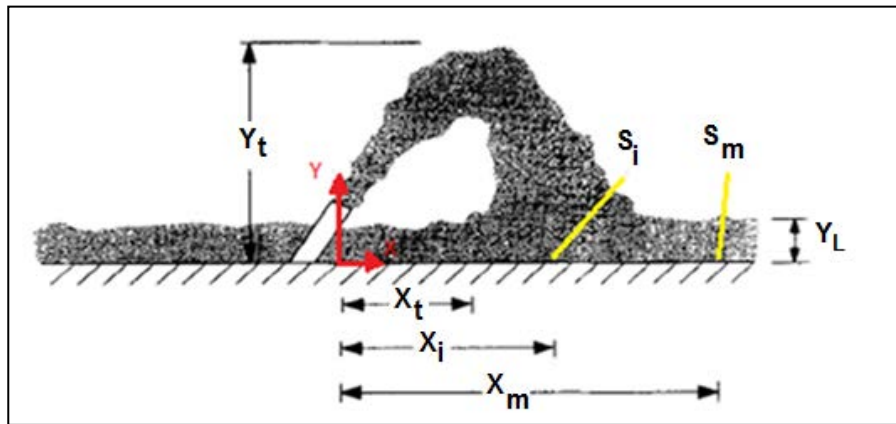
### **5.4.1. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DEL FENÓMENO**

Para realizar la caracterización teórica del fenómeno se utilizó como referencia el texto de (Roberts et al., 1997). Éste trata de una serie de experimentos que fueron realizados en un laboratorio, en los que se descargan chorros de flotabilidad negativa en un medio receptor estacionario, con un ángulo de inclinación de 60° respecto a la horizontal. Se proponen expresiones normalizadas para la dilución, la altura máxima alcanzada, la distancia a la cual se produce el impacto del chorro con el fondo y coeficientes experimentales adimensionales.

Según los autores la inclinación de 60° del chorro con respecto a la horizontal, es la inclinación óptima para maximizar la dilución en un medio receptor en reposo, cuando se descarga desde el fondo de éste. (Palomar y Losada, 2011).

En la imagen 7 se muestra un esquema que define la geometría para un chorro individual sumergido en el fondo, con un ángulo de inclinación de 60° con respecto a la horizontal.  $Y_t$  representa la altura máxima alcanzada por el chorro,  $X_t$  es la distancia horizontal a la que se produce la altura máxima,  $y_L$  es el espesor de la capa hipersalina,  $S_i$  es la dilución en el punto de impacto entre el chorro y el fondo,  $S_m$  es la dilución mínima alcanzada por la pluma hipersalina antes de igualar su concentración con la del agua,  $X_i$  es la distancia a la cual se produce el impacto del chorro con el fondo y  $X_m$  es la longitud de la capa hipersalina.

Imagen 7: Esquema para un chorro individual sumergido hipersalino con 60° de inclinación



Fuente: Roberts et al., (1997)

El análisis dimensional del fenómeno de una descarga de salmuera desde el fondo del mar permite expresar una serie de magnitudes físicas en función de las variables más influyentes en su comportamiento. Estas variables se relacionan entre sí para formar flujos axiales, los cuales a su vez se relacionan entre sí para formar escalas de longitud. Por lo tanto, las principales fuerzas que determinan el comportamiento de la salmuera descargada pueden ser representadas por los flujos axiales, las escalas de longitud y los coeficientes experimentales adimensionales. Las variables menos influyentes en el fenómeno son consideradas como parámetros fijos. Los flujos axiales son caracterizados por (Roberts et al., 1997) mediante las expresiones de flujo de volumen ( $Q$ ), flujo de momentum ( $M$ ) y flujo boyante ( $B$ ), las tres expresiones se muestran en la Ec. 3:

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 U_0; \quad M = uQ = \frac{\pi}{4} D^2 U_0^2; \quad B = \frac{\pi}{4} D^2 U_0 g'_0 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $g'_0 = g \frac{(\rho_0 - \rho_A)}{\rho_A}$  corresponde a la aceleración reducida debido a la diferencia de densidad de ambos fluidos,  $\rho_0$  es la densidad del fluido que se descarga,  $\rho_A$  es la densidad del medio receptor y  $g$  la aceleración de gravedad,  $D$  es el diámetro de la boquilla del dispositivo difusor y  $u$  es la velocidad de descarga. Con las expresiones anteriores se pueden definir las siguientes dos escalas de longitud (ver Ec. 4):

$$L_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} ; L_Q = \frac{Q}{M^2} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $L_m$  representa la distancia a partir de la cual el comportamiento del flujo pasa de estar dominado por la cantidad de momentum transmitida en la descarga a estar dominado por la flotabilidad.  $L_Q$  representa la distancia a partir de la cual el flujo de volumen del fluido del medio ambiente (entrainment) se hace aproximadamente igual al flujo de volumen inicial.

Todas las variables definidas en la imagen 6 se pueden calcular con expresiones que dependen del diámetro de la boquilla de descarga, del número de Froude densimétrico  $F$  y coeficientes experimentales adimensionales (Roberts et al., 1997). El número de Froude es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de gravedad y las fuerzas de inercia, en este caso la inercia está inducida por la flotabilidad negativa de la salmuera. Éste se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$F = U_0 / \sqrt{g'_0 D} \quad \text{Ec. 5}$$

En la tabla 3 se muestran las expresiones utilizadas para caracterizar el comportamiento de un chorro individual sumergido en el fondo con un ángulo de inclinación de  $60^\circ$  respecto a la horizontal, el cual descarga un flujo de flotabilidad negativa en un medio receptor en reposo de fondo plano. Las características geométricas corresponden a estimaciones del borde exterior superior del chorro.

Tabla 3: Expresiones para caracterizar el comportamiento de un chorro individual sumergido

VARIABLE	TIPOLOGÍA	ECUACIÓN NORMALIZADA	COEFICIENTE	FUENTE
Altura máxima alcanzada por el chorro	Ec. 6	$Y_t = DFC_1$	$C_1 = 2,2$	Ec. 11 Roberts 1997
Distancia horizontal de la altura máxima	Ec. 7	$X_t = Y_t/tg\alpha$	-	Aproximación propuesta
Distancia donde impacta el chorro con el fondo	Ec. 8	$X_i = DFC_2$	$C_2 = 2,4$	Ec. 17 Roberts 1997
Dilución en el punto de impacto	Ec. 9	$S_i = FC_3$	$C_3 = 1,6 \pm 12\%$	Ec. 13 Roberts 1997
Dilución al final del campo cercano	Ec. 10	$S_m = FC_4$	$C_4 = 2,6 \pm 15\%$	Ec. 14 Roberts 1997
Longitud de la capa hipersalina	Ec. 11	$X_m = DFC_5$	$C_5 = 9,0$	Ec. 17 Roberts 1997
Espesor de la capa hipersalina	Ec. 12	$Y_L = DFC_6$	$C_6 = 0,7$	Ec. 17 Roberts 1997

Fuente: (Roberts et al., 1997)

### 5.4.2. MODELACIÓN NUMÉRICA CORMIX

The Cornell Mixing Zone Expert System CORMIX es un software desarrollado en la Universidad de Cornell en conjunto con la Environmental Protection Agency de Estados Unidos. Se trata de una serie de sistemas de modelación para el análisis, predicción y diseño de las descargas de contaminantes en diversos cuerpos de agua, con énfasis en las características geométricas y de dilución en el campo cercano.

CORMIX incluye herramientas para la simulación del comportamiento en campo cercano y campo lejano de chorros con flotabilidad positiva, neutra y negativa. El software contiene una serie de subsistemas y módulos para simular diferentes configuraciones de descarga: CORMIX 1 para un chorro individual sumergido, CORMIX 2 para múltiples chorros sumergidos, CORMIX 3 para descargas en la superficie, entre otros (Doneker y Jirka, 2007). En el anexo 1 se muestra un esquema que resume la secuencia de lo que un usuario debe realizar para obtener resultados del software

En la tabla 4 se muestra un resumen de todos los subsistemas y modelos contenidos dentro del software CORMIX con sus respectivas aplicaciones. En este trabajo se utilizan los subsistemas CORMIX1 y CORMIX2 para chorros individuales y múltiples chorros respectivamente.

Tabla 4: Modelos y subsistemas de CORMIX

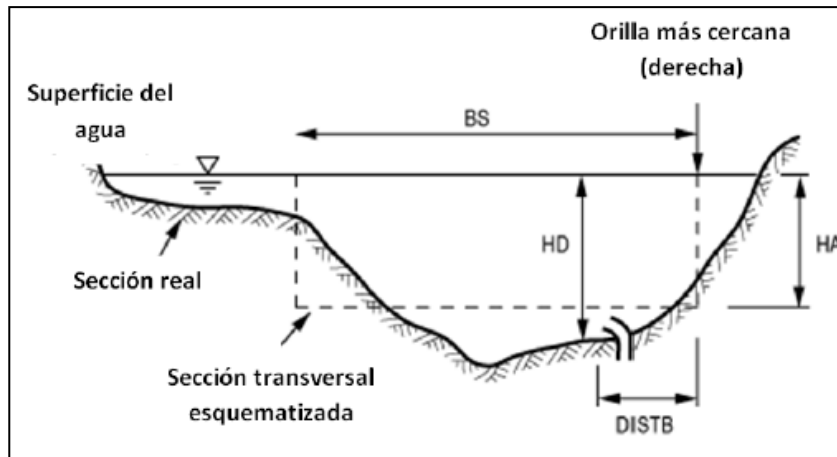
<i>Campo cercano y lejano</i>	<b>Modelos basados en el análisis dimensional</b> (Escala de longitud)	<b>CORMIX 1</b>	Subsistema de CORMIX. Vertido sumergido, mediante chorro individual, con emisario submarino apoyado en el fondo y cercano a la superficie (D-CORMIX) Flujos de flotabilidad positiva, negativa o neutra.
		<b>CORMIX 2</b>	Subsistema de CORMIX. Vertido sumergido, mediante tramo difusor de chorros múltiples, con emisario submarino apoyado en el fondo. Flujos de flotabilidad positiva, negativa o neutra.
		<b>CORMIX 3</b>	Subsistema de CORMIX. Vertidos directos superficiales Flujo de flotabilidad positiva, en general. Opción de flujos de flotabilidad negativa (D-CORMIX).
		<b>D-CORMIX</b>	Subsistema de CORMIX. Vertido emergido y sumergido cercano a la superficie del medio receptor--- mediante CORMIX1 (flujos invertidos) Vertidos directos superficiales desde la línea de costa---mediante CORMIX3 (flujos invertidos). Flujos de flotabilidad negativa
	<b>Modelos basados en la integración numérica de ecuaciones</b>	<b>CORJET</b>	Módulo de CORMIX. Vertido sumergido mediante chorro individual o chorros múltiples, con emisario cercano al fondo. Flujos de flotabilidad positiva, negativa o neutra Modelo euleriano tridimensional.

Fuente: Doneker y Jirka, (2007)

Los subsistemas CORMIX1 y CORMIX2 basan su modelado en el análisis dimensional del fenómeno. Este tipo de análisis asume importantes simplificaciones de las cuales derivan una serie de escalas de longitud, flujos axiales y formulaciones que permiten caracterizar el comportamiento de la descarga de salmuera (IHA y CEDEX, 2007).

CORMIX1 y CORMIX2 requieren que se defina la sección transversal del medio receptor como un canal rectangular uniforme, limitado o ilimitado. Este procedimiento es conocido como esquematización. Para simular una descarga con flotabilidad negativa el programa exige una esquematización ilimitada en aguas profundas, para así evitar la interacción del chorro con la superficie (Doneker y Jirka, 2001). En la imagen 8 se muestra la sección transversal de un esquema que define un medio receptor ilimitado y rectangular.  $H_A$  es la profundidad a la cual se realiza la descarga,  $BS$  es el ancho de la sección rectangular y  $DISTB$  es la distancia perpendicular a la costa, desde la orilla más cercana hasta el punto de descarga.

Imagen 8: Esquema de la sección transversal medio receptor ilimitado

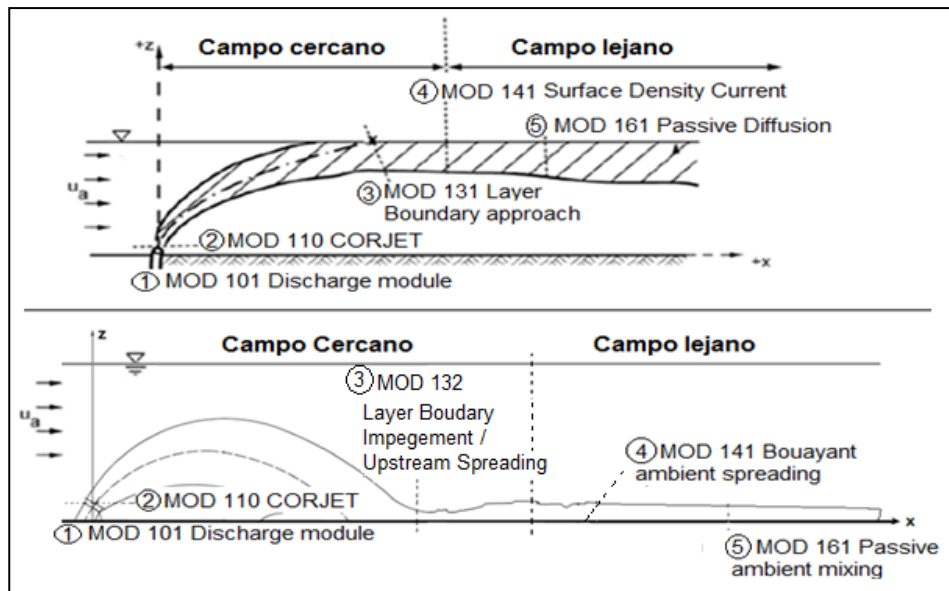


Fuente: Doneker y Jirka, (2007)

CORMIX tiene un riguroso esquema de clasificación de flujo, que divide cualquier situación en un tipo de flujo con determinadas características hidrodinámicas. El programa ejecuta un conjunto de módulos predictivos que se procesan de acuerdo a un protocolo que pertenece a cada tipo de flujo. En los tópicos siguientes de CORMIX1 y CORMIX2 se mostrarán los diagramas correspondientes a cada subsistema. En todos los casos se asume un régimen estacionario. Un fluido discurre en régimen estacionario cuando su velocidad en cada punto es siempre la misma, aunque varíe de unos puntos a otros (en un punto dado del fluido la velocidad no depende del tiempo).

En la imagen 9 se muestran dos ejemplos de secuencias de ejecución de módulos que CORMIX utiliza para simular el comportamiento de una descarga individual. La parte superior de la imagen corresponde a un chorro de flotabilidad positiva (Jirka y Doneker, 2001), mientras que la parte inferior corresponde a un chorro de flotabilidad negativa (dicho esquema es de elaboración propia porque en la bibliografía no se encontró un ejemplo de este tipo de descargas).

Imagen 9: Ejemplo de secuencia de ejecución de módulos para simular y clasificar chorros con flotabilidad positiva y negativa



Fuente: Arriba: Jirka y Doneker, (2001); abajo: elaboración propia

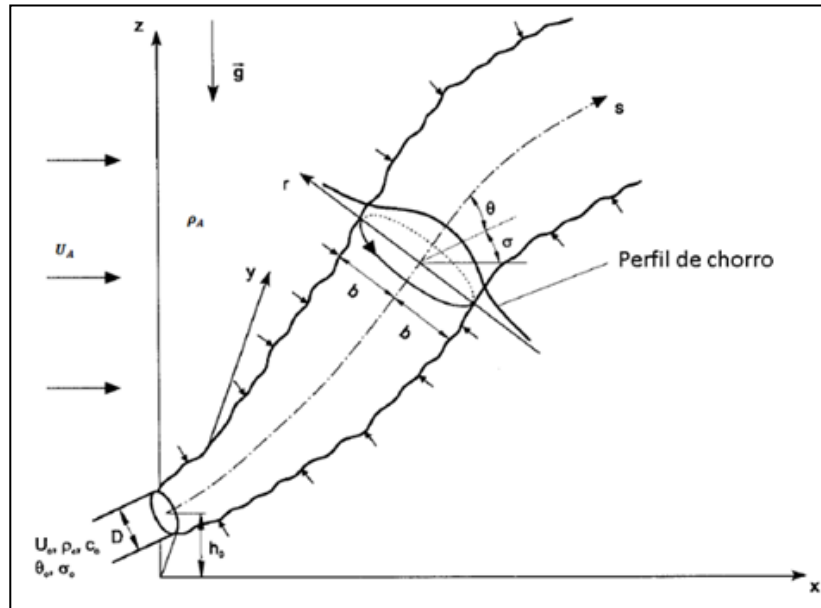
## CORJET

CORJET es un módulo de cálculo del chorro para el campo cercano, válido hasta el lugar donde se produce el impacto del chorro con el fondo. Este módulo es aplicado por CORMIX1 y CORMIX2 cuando detectan que no existe interacción de los chorros con la superficie ni con los bordes laterales, es decir cuando asume una esquematización de un medio receptor ilimitado. El módulo permite predecir las características de la trayectoria del chorro, así como la dilución y concentración de éste para un chorro individual y múltiples chorros sumergidos en ambientes no limitados. La principal limitación de esta herramienta es que considera al medio receptor como infinito, con lo cual sólo deberá usarse una vez que se ha demostrado que la descarga se realiza en aguas profundas, es decir, en un flujo hidrodinámicamente estable y sin interacciones con los límites (Jirka, 2004).

CORJET es un modelo euleriano estacionario tridimensional que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes integradas en la sección transversal del chorro, obteniendo la evolución de las variables con respecto al tiempo en el eje central del chorro (IHA y CEDEX, 2009a). La integración implica asumir un medio receptor ilimitado y la caracterización tridimensional se consigue asumiendo auto semejanza (o self similarity) entre secciones y una distribución tipo Gauss para las variables en la sección transversal (Jirka, 2004).

En la imagen 10 se muestra un esquema de definición para un chorro de flotabilidad positiva en un medio receptor ilimitado y estratificado. Se usa el sistema de coordenadas cartesianas  $x, y, z$ . Sí se llega a tomar en cuenta, la corriente tiene la misma dirección que el eje  $x$  y se asume constante en toda la sección; el eje  $z$  está orientado en el sentido opuesto de la gravedad  $g$ . El ambiente tiene densidad constante  $\rho_A$ .

Imagen 10: Variables axiales sección transversal



Fuente: Jirka, (2004)

La fuente del chorro con diámetro  $D$  se localiza en la coordenada  $(0, 0, h_0)$  donde  $h_0$  es la altura de la boquilla sobre el fondo. Ésta tiene un ángulo de inclinación  $\theta_0$  con respecto a la horizontal.  $b$  corresponde a la mitad del ancho del chorro. Existe un ángulo  $\sigma_0$  que define la orientación de la proyección vertical del chorro con respecto al eje  $x$ . El chorro tiene una descarga continua con una velocidad constante  $U_0$  y una concentración  $c_0$  que representa la masa de salmuera (Jirka, 2004).

Las ecuaciones de gobierno se expresan a través de flujos axiales, que para una distribución tipo Gauss son (IHA y CEDEX, 2009a):

- Flujo de volumen:

$$Q = \pi b^2 (U_c + 2U_A \cos\theta \cos\sigma) \quad \text{Ec. 13}$$

- Flujo de momentum:

$$M = \pi \frac{b^2}{2} (U_c + 2U_A \cos\theta \cos\sigma)^2 \quad \text{Ec. 14}$$

- Flujo de flotabilidad:

$$J = \pi b^2 g'_c \left( U_c \frac{\lambda^2}{1+\lambda^2} + \lambda^2 U_A \cos\theta \cos\sigma \right) \quad \text{Ec. 15}$$

- Flujo de masa contaminante:

$$Q_c = \pi b^2 C_c \left( U_c \frac{\lambda^2}{1+\lambda^2} + \lambda^2 U_A \cos\theta \cos\sigma \right) \quad \text{Ec. 16}$$

Las fuerzas principales que actúan sobre cada porción de chorro sumergido son las siguientes (IHA y CEDEX, 2009a):

- Fuerza de intrusión actuando en la dirección del eje  $x$ , debido a la cantidad de movimiento transmitida en la descarga y a la diferencia de velocidades entre la salmuera descargada y el medio receptor.
- Fuerza de flotabilidad actuando en la dirección del eje  $z$ , debido a la diferencia de densidad entre la salmuera descargada y el medio receptor.
- Fuerza de arrastre actuando perpendicular al chorro, debido a la presencia de corriente en el medio receptor.

Las ecuaciones de Navier Stokes integradas en la sección transversal y expresadas a través de los flujos axiales mencionados en el párrafo anterior, se pueden expresar de la siguiente manera (IHA y CEDEX, 2009a):

- Ecuación de Continuidad:

$$\frac{dQ}{ds} = E \quad \text{Ec. 17}$$

- Ecuación de Conservación de Momentum  $x$ :

$$\frac{d(M \cos\theta \cos\sigma)}{ds} = E u_A + F_D \sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\sigma} \quad \text{Ec. 18}$$

- Ecuación de Conservación de Momentum  $y$ :

$$\frac{d(M \cos\theta \sin\sigma)}{ds} = -F_D \frac{\cos^2\theta \sin\sigma \cos\sigma}{\sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\sigma}} \quad \text{Ec. 19}$$

- Ecuación de Conservación de Momentum  $z$ :

$$\frac{d(M \sin\theta)}{ds} = \pi \lambda^2 b^2 g'_0 - F_D \frac{\cos\theta \sin\theta \cos\sigma}{\sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\sigma}} \quad \text{Ec. 20}$$

- Ecuación de Conservación del Flujo de Flotabilidad:

$$\frac{dJ}{ds} = Q \frac{g}{\rho_{ref}} \frac{d\rho_A}{dz} \sin\theta \quad \text{Ec. 21}$$

- Ecuación de Conservación de Masa Contaminante:

$$\frac{dQ_c}{ds} = 0 \quad \text{Ec. 22}$$

- Ecuación de Trayectoria del Chorro:

$$\frac{dx}{ds} = \cos\theta\cos\sigma ; \frac{dy}{ds} = \cos\theta\sen\sigma ; \frac{dz}{ds} = \sen\theta \quad \text{Ec. 23}$$

El término  $E$  (ver Ec. 24) es un coeficiente que representa la incorporación de flujo del medio receptor al chorro; este efecto entrainment se produce debido a dos mecanismos (Jirka, 2004): i) cizallamiento por sentido de la corriente (Streamwise shear), en donde el exceso de velocidad del chorro sobre el medio receptor produce inestabilidades que generan un entrainment de manera uniforme en la periferia del chorro, y ii) cizallamiento azimutal (Azimuthal shear) en donde el flujo del medio receptor pasa alrededor e interactúa con el chorro provocando inestabilidades que establecen circulaciones internas tipo vórtice.

$$E = 2\pi b U_c \left( \alpha_1 + \alpha_2 \frac{\sen\theta}{F^2} + \alpha_3 \frac{U_A \cos\theta \cos\sigma}{U_c + U_A} \right) + 2\pi b U_A \sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\sigma} \alpha_4 |\cos\theta \cos\sigma| \quad \text{Ec. 24}$$

Donde  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  y  $\alpha_4$  corresponden a constantes que fueron deducidas a partir de los experimentos en chorros. Por otro lado el término  $F_D$  (ver Ec 25) corresponde a la fuerza de arrastre sobre el chorro debido la presencia de una corriente en el medio receptor

$$F_D = C_D \sqrt{2} b U_A^2 (1 - \cos^2\theta \cos^2\sigma) \quad \text{Ec. 25}$$

Donde  $C_D$  es el coeficiente de fricción el cual CORJET considera  $C_D = 1.3$  (IHA y CEDEX, 2009a).

### ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE MEZCLA EN EL CAMPO LEJANO

CORMIX1 y CORMIX2 aplican el módulo de cálculo que se basa en el volumen de control para modelar la capa de esparcimiento horizontal (spreading layer). El software asume, luego de que se produce el impacto del chorro con el fondo, que el flujo se expande radialmente conservando el flujo de volumen y la masa de contaminante, pero no el flujo de cantidad de movimiento, que pasa de ser vertical (tramo descendente del chorro) a horizontal (expansión radial de la pluma). En este tramo se homogeniza la concentración horizontal y vertical de la pluma, haciendo depender la expansión de la flotabilidad (IHA y CEDEX, 2009b).

Una vez que se alcanza el colapso de la turbulencia, CORMIX considera el inicio de la estratificación del flujo, es decir, el final del campo cercano y el comienzo del campo lejano. CORMIX modela la capa de mezcla con un nuevo módulo (buoyant ambient spreading), donde la pluma hipersalina se expande lateralmente por efecto de la gravedad, y disminuye su espesor, afectada por las corrientes en el medio receptor.

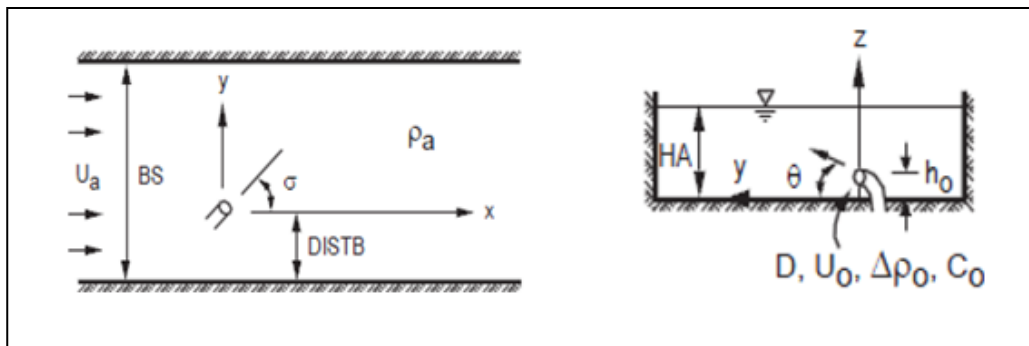
El módulo passive ambient mixing caracteriza la corriente de gravedad en campo lejano, donde los procesos de mezcla son pasivos e inducidos por la dinámica del medio receptor. En esta zona la pluma aumenta su anchura y espesor y los valores de dilución aumentan de manera imperceptible.

## CORMIX1

El subsistema CORMIX1 permite simular descargas de flotabilidad positiva, neutra y negativa, mediante un chorro individual sumergido en el fondo o cercano a éste. El subsistema permite tener en cuenta las siguientes condiciones del medio receptor: velocidad y dirección de la corriente, estratificación de la columna de agua, pendiente y rugosidad del fondo. La corriente del medio receptor se considera en una sola dirección y uniforme en todo el ancho de la sección (Jirka y Doneker, 1991a).

En la imagen 11 se muestra el diagrama de una descarga de chorro individual sumergido. Se incluyen las variables que utiliza CORMIX1 en una vista en planta y una de la sección transversal respectivamente, donde  $H_A$  corresponde a la profundidad total de la esquematización o la carga de agua,  $BS$  el ancho de la sección,  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la boquilla con respecto a la horizontal,  $\sigma$  es el ángulo que se produce entre el chorro descargado y la corriente del medio receptor,  $U_A$  es la velocidad uniforme de la corriente del medio receptor,  $h_0$  corresponde a la altura de la boquilla con respecto al fondo,  $\rho_A$  es la densidad del medio receptor,  $\rho_0$  es la densidad del chorro descargado,  $D$  es el diámetro de la boquilla de descarga y  $C_0$  es la concentración del fluido descargado.

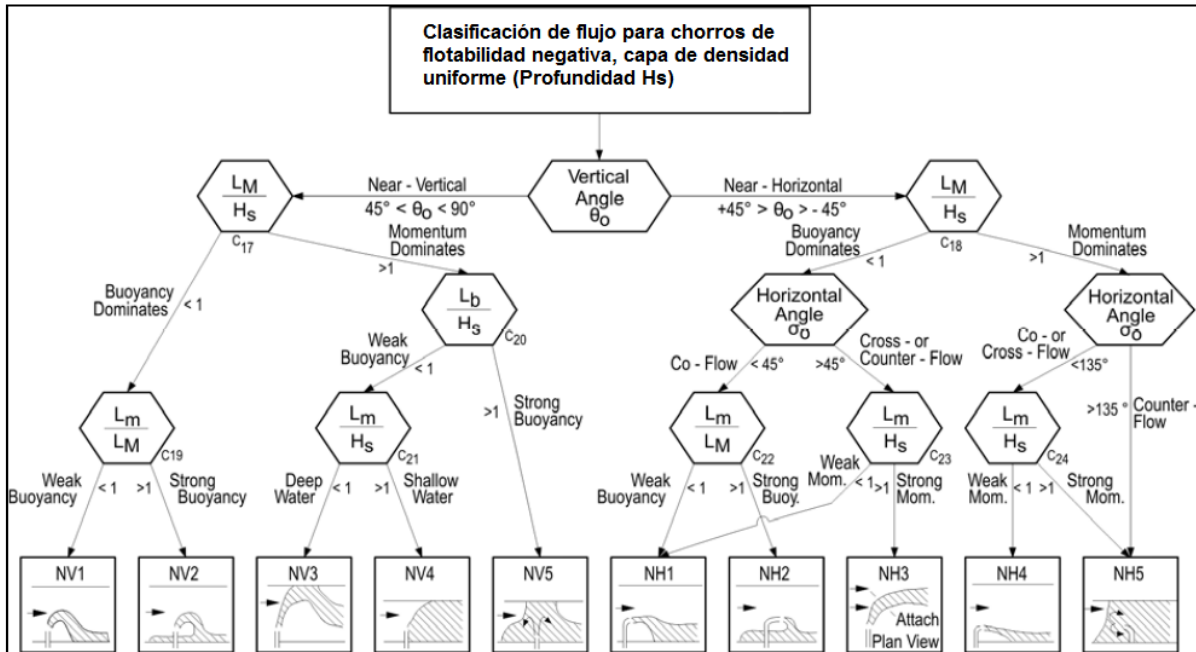
Imagen 11: Diagrama de descarga para un chorro individual sumergido



Fuente: (Doneker y Jirka, 2007)

Como se mencionó anteriormente, CORMIX1 identifica el flujo más similar dentro de su esquema de clasificación de flujos y aplica fórmulas semiempíricas correspondientes a la clase de flujo seleccionada (IHA y CEDEX, 2007). En la imagen 12 se muestra un diagrama para clasificar el flujo para un chorro individual de flotabilidad negativa.

Imagen 12: Diagrama de clasificación para flujo de flotabilidad negativa, CORMIX1



Gerhard Jirka et al. (1991a)

## CORMIX2

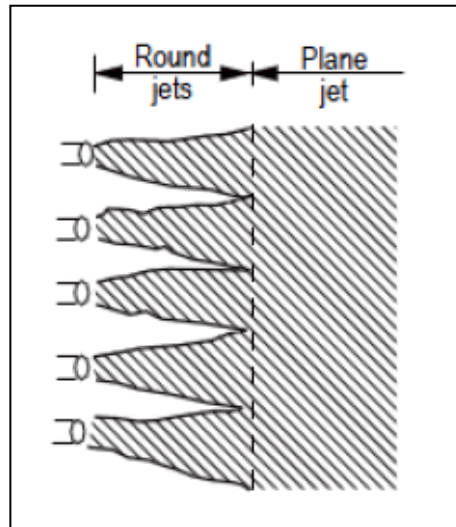
El subsistema CORMIX2 permite modelar descargas mediante múltiples chorros, por medio de un difusor sumergido. Es aplicable para chorros de flotabilidad positiva, neutra y negativa. Al igual que CORMIX1 permite tener en cuenta las mismas condiciones del medio receptor (velocidad y dirección de la corriente, estratificación en la columna de agua, pendiente y rugosidad del fondo). La velocidad de la corriente del medio receptor se considera unidireccional y uniforme (Jirka y Doneker, 1991b). En las descargas mediante múltiples chorros, el subsistema distingue dos tipos de casos:

- Chorros que no interactúan entre sí (se comportan como chorros individuales). Esto ocurre cuando existe una distancia entre las boquillas de descarga mayor que el ancho de cada chorro individual, antes de que ocurra el impacto con el fondo.
- Chorros que sí interactúan entre sí. En este caso CORMIX2 asume la hipótesis de descarga mediante ranura equivalente (slot equivalent diffuser).

La hipótesis de descarga mediante ranura equivalente asume que el flujo de descarga a través de un difusor con boquillas equidistantes, cuyos chorros 3D sí interactúan, es equivalente al flujo de descarga a través de una ranura lineal con la misma longitud que el difusor, el mismo flujo de caudal, el mismo flujo de cantidad de movimiento y la misma flotabilidad y concentración. Este flujo en ranura equivale a un chorro plano de sección rectangular, de modo que el problema 3D de chorros se transforma en 2D, lo que facilita su resolución numérica (IHA y CEDEX, 2009c).

La imagen 13 muestra desde una vista en planta, el paso de un chorro 3D a una pluma 2D, el ejemplo se trata del caso de un difusor que descarga con una boquilla por chorro, unilaterales y orientadas hacia la misma dirección.

Imagen 13: Interacción entre chorros y paso de chorro 3D a pluma 2D

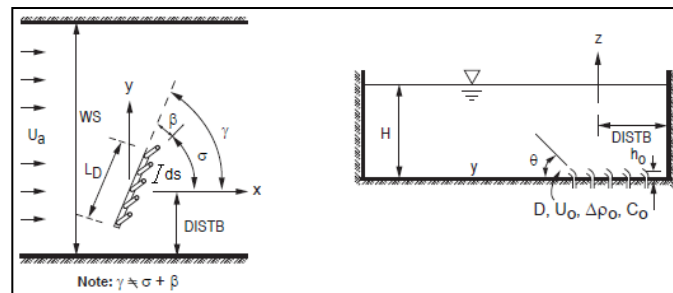


Fuente: IHA y CEDEX, (2009c)

La interacción entre chorros supone una transición desde los perfiles de distribución tipo Gauss hacia un perfil horizontal de concentraciones homogéneas a lo ancho de la pluma que se forma al considerar la mezcla completa entre los chorros. Sin embargo, CORMIX2 no simula este cambio suave sino que automáticamente homogeniza la concentración y lo considera como un flujo bidimensional (IHA y CEDEX, 2009c).

En la imagen 14 se muestra la definición del diagrama de una descarga de múltiples chorros sumergidos. En el cual se observan las variables que utiliza CORMIX2 en una vista en planta y de la sección transversal, respectivamente. Además de las variables que fueron definidas en CORMIX1, aparecen las siguientes:  $L_D$  corresponde a la longitud del difusor,  $ds$  corresponde a la separación entre boquillas de descarga,  $\beta$  corresponde al ángulo horizontal de los chorros respecto al difusor y  $\gamma$  corresponde al ángulo horizontal entre el difusor y la corriente del medio receptor.

Imagen 14: Variables vista en planta CORMIX2



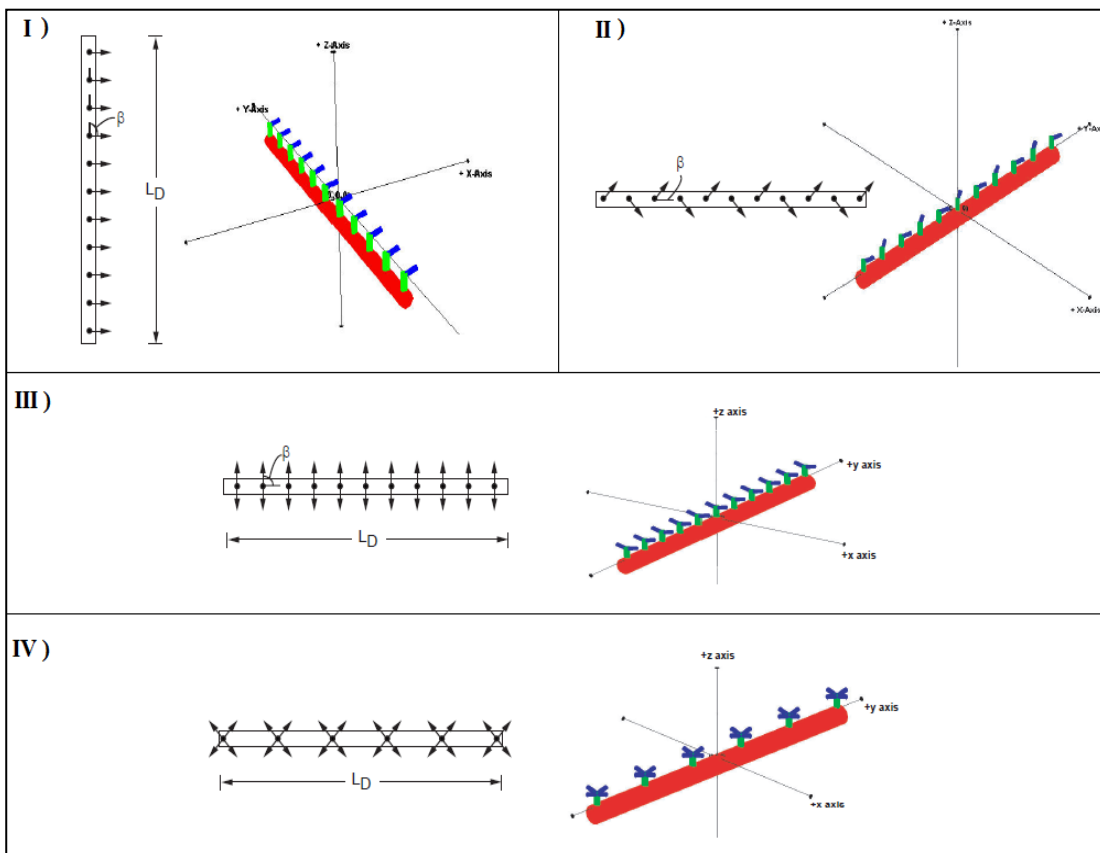
Fuente: (Doneker y Jirka, 2007)

Teóricamente este subsistema puede analizar tres configuraciones de difusores distintas:

- Difusores con una boquilla de descarga por elevador (riser): en estos las descargas pueden ser unilaterales, bilaterales o alternas.
- Difusores con dos boquillas de descarga por elevador: en estos las descargas pueden también pueden ser unilaterales, bilaterales y alternas. En algunos casos dependiendo de la configuración del difusor, CORMIX2 puede asumir que éste descarga el caudal equivalente a dos boquillas por elevador con una sola boquilla.
- Difusores con varias boquillas de descarga por elevador: el rango de valores permitidos es de 3 a 32 boquillas por elevador. En algunos casos dependiendo de la configuración del difusor, CORMIX2 puede asumir que éste descarga con una sola boquilla por elevador el caudal equivalente al número de boquillas ó asume la hipótesis de descarga mediante ranura equivalente.

A modo de ejemplo en la imagen 15 se muestran cuatro configuraciones de difusores, las cuales son las siguientes: I) descarga de una boquilla por elevador unidireccional. II) descarga de una boquilla por elevador bilateral alterna. III) descarga de dos boquillas por elevador bilaterales. IV) descarga de varias boquillas por elevador.

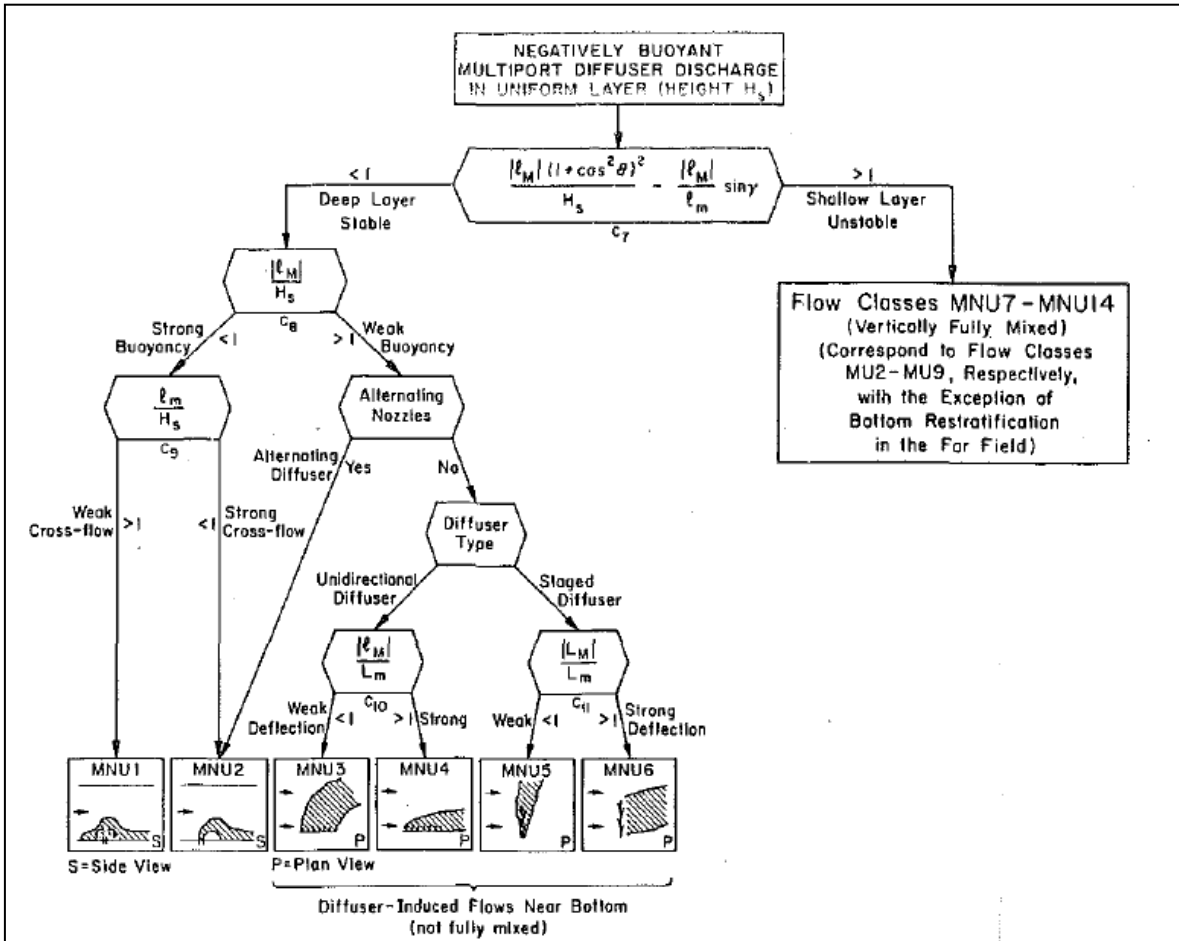
Imagen 15: Ejemplos de configuraciones de difusores



Fuente: Doneker y Jirka, (2007)

Al igual que CORMIX1 en la simulación de descargas de múltiples chorros CORMIX2 lo que hace es identificar el flujo más similar dentro de su esquema de clasificación de flujos y aplica las fórmulas semiempíricas correspondientes a la clase de flujo seleccionada (Jirka y Doneker, 1991b). En la imagen 16 se muestra un diagrama del procedimiento de clasificación de flujo para chorros de flotabilidad negativa para múltiples chorros. En éste se utiliza un criterio de estabilidad para dividir el comportamiento de la descarga en una capa profunda estable y otra capa poco profunda estable.

Imagen 16: Diagrama de clasificación para flujo de flotabilidad negativa, CORMIX2



Fuente: Gerhard Jirka et al. (1991b)

El comportamiento de la capa profunda estable está dividido en una flotabilidad fuerte y flotabilidad débil; en estos casos el tipo de difusor controla el movimiento general de la descarga, sin producirse una mezcla vertical completa. Por otro lado la capa poco profunda inestable sí producirá una mezcla completa en las cercanías del difusor y son análogas a las descargas de flotabilidad positiva (Gerhard et al., 1991).

## 6. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en la caracterización teórica del fenómeno (Roberts et al., 1997) y en la modelación numérica realizada con CORMIX. Para mostrar los resultados se utilizó la herramienta computarizada MATLAB, donde se desarrollaron códigos que permiten resolver todas las ecuaciones que definen el comportamiento de la descarga y generan graficas que contienen información de la geometría, dilución y concentración (ver anexo 2).

### 6.1. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DEL FENÓMENO

Se refiere a la estimación de las características geométricas, de dilución y concentración de un chorro individual sumergido en el fondo, con un ángulo de inclinación de  $60^\circ$  con respecto a la horizontal. Para estimar dichas características se utilizan las ecuaciones expuestas en la tabla 2.

El chorro es descargado en un medio ambiente uniforme, no se considera corriente del medio receptor, rugosidad del fondo ni la profundidad a la que se produce la descarga. Las variables y parámetros utilizados por Roberts et al., (1997) son: i) densidad del fluido de descarga  $\rho_0 = 1200 [kg/m^3]$ , ii) densidad del medio receptor  $\rho_A = 1025 [kg/m^3]$ , iii) diámetro de la boquilla del difusor  $D = 0.10 [m]$ , iv) caudal de descarga  $Q = 0.10 [m^3/s]$ , vi) velocidad de la descarga  $U_0 = 12.73 [m/s]$  y vii) ángulo de inclinación  $\theta = 60^\circ$  del chorro con respecto a la horizontal (fondo plano). La velocidad de descarga del efluente se puede estimar a partir del caudal y el diámetro mediante la expresión  $u = 4Q/\pi d^2$  y también se puede estimar el valor del número de Froude  $F = 31.13$ . La tabla 5 muestra un resumen de los parámetros utilizados.

Tabla 5: Resumen de parámetros utilizados

$g [m/s]$	9.8	$d [m]$	0.1	$S_i$	32.93
$\rho_0 [kg/m^3]$	1200	$U_0 [m/s]$	12.73	$S_m$	87.16
$\rho_A [kg/m^3]$	1025	$Fr$	31.13	$X_i [m]$	7.47
$g'0$	1.673	$Y_t [m]$	6.85	$X_m [m]$	28.01
$Q [m^3/s]$	0.1	$X_t [m]$	3.95	$Y_l [m]$	2.18

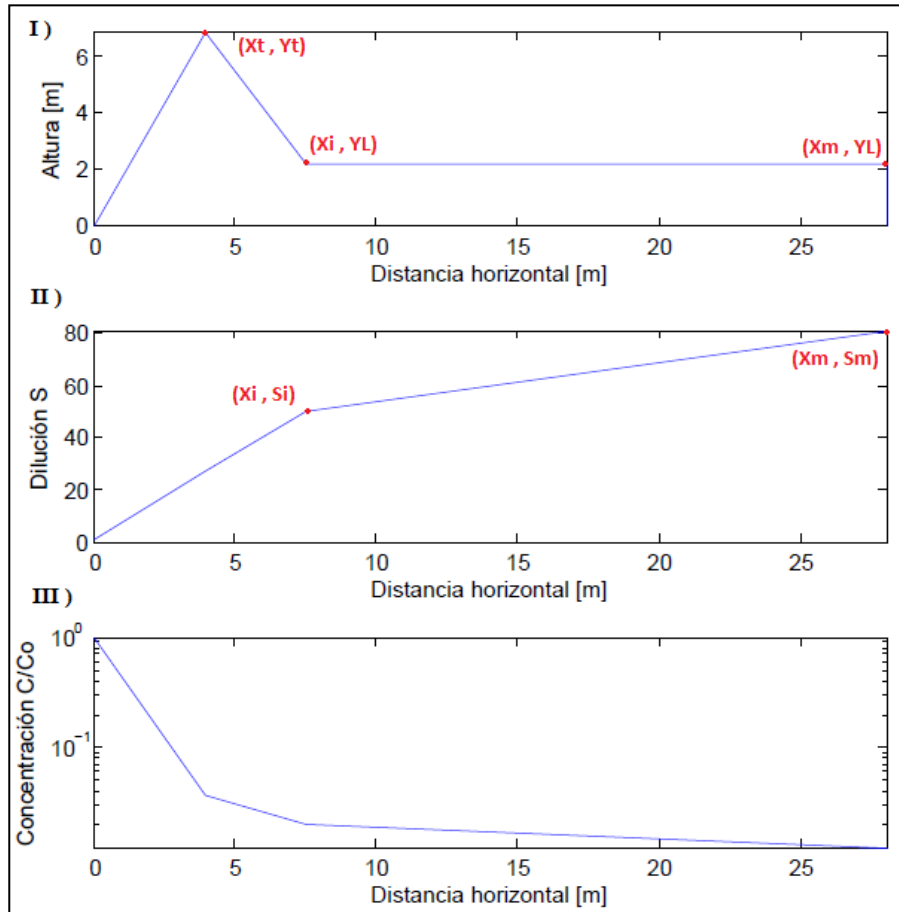
Fuente: Elaboración propia

En la imagen 17 se observa el resultado gráfico de la caracterización teórica. El gráfico I) muestra tres puntos:  $(X_t, Y_t)$  corresponde a la altura máxima alcanzada por el chorro,  $(X_i, Y_L)$  corresponde al punto donde el chorro impacta con el fondo y  $(X_m, Y_L)$  corresponde al límite de la zona de mezcla. El final de la zona de mezcla es definido como la ubicación donde la descarga induce colapsos de turbulencia.

El gráfico II) muestra tres puntos:  $S_i$  corresponde a la dilución en el lugar donde el chorro impacta el fondo,  $S_m$  corresponde a la dilución en el final de la zona de mezcla y  $S_*$  corresponde a una interpolación lineal entre los valores de  $S_m$  y  $S_i$ . Se observa que la dilución aumenta luego de que el chorro impacta con el fondo; probablemente debido a los efectos turbulentos que se producen.

El gráfico III) muestra la concentración calculada mediante la expresión:  $C = 1/S$  y se representa en una escala logarítmica para tener una mejor visualización. La curva muestra cómo va disminuyendo la concentración de salmuera a medida que el chorro avanza longitudinalmente; se aprecia que antes de que ocurra el impacto del chorro con el fondo la curva tiene una mayor pendiente con respecto al final de la zona de mezcla. Esto se debe a que los procesos de mezcla son más eficientes en el campo cercano que en el campo lejano.

Imagen 17: Representación grafica de las características del chorro estimadas por (Roberts et al., 1997)

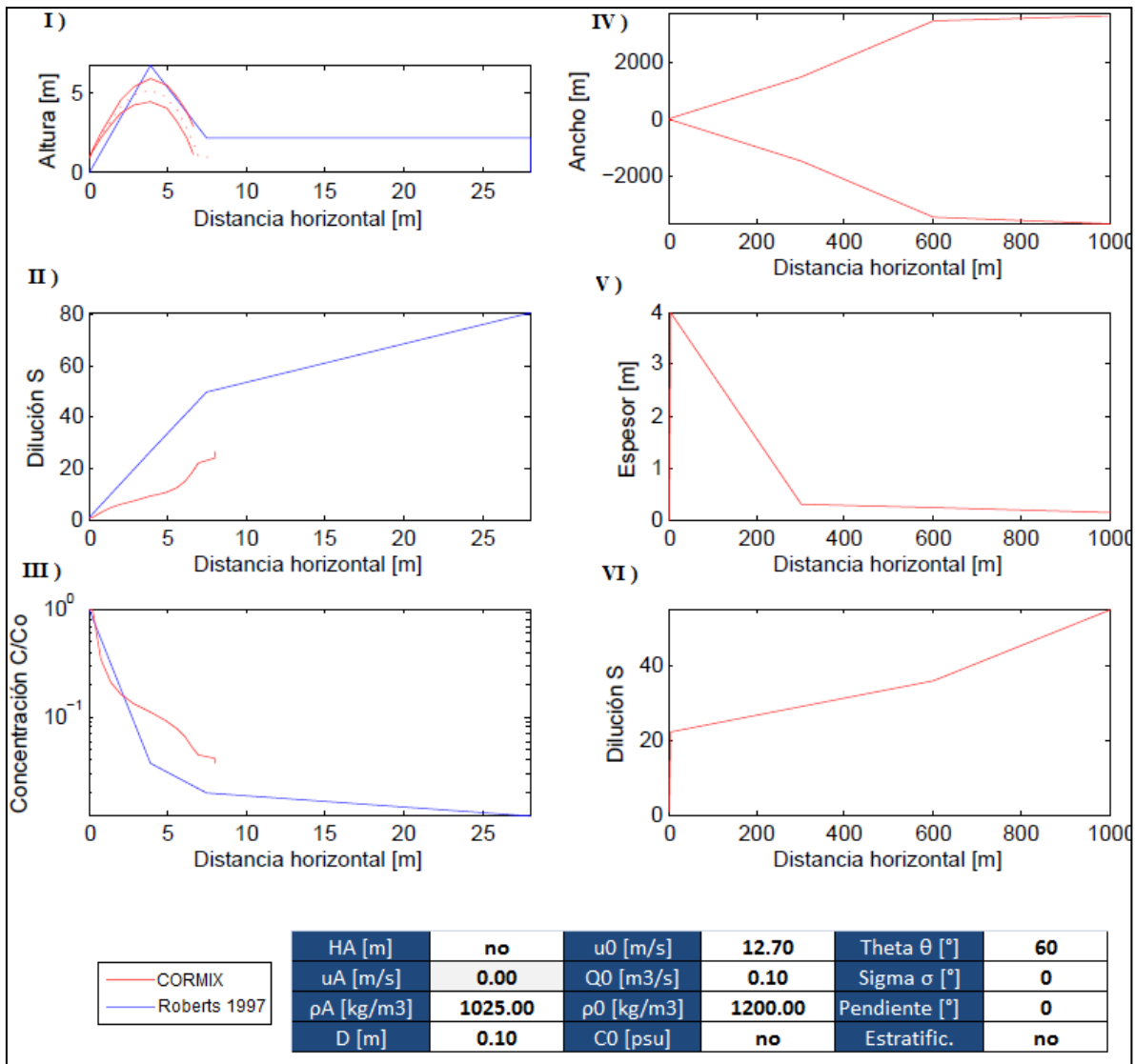


Fuente: Elaboración propia

## 6.2. MODELACIÓN NUMÉRICA CORMIX

La modelación numérica realizada con el software CORMIX entrega información del comportamiento de la salmuera descargada tanto en el campo cercano como en el campo lejano. Para efecto de todas las imágenes siguientes, los gráficos I, II y III corresponden a la región de campo cercano mientras que los gráficos IV, V y VI corresponden a la región de campo lejano. En la imagen 18 se muestran los resultados entregados por CORMIX; en este caso se utilizaron los mismos parámetros que Roberts et al., (1997). También se muestra una comparación gráfica con los resultados obtenidos con la caracterización teórica y se logra evidenciar que ambos métodos entregan valores similares.

Imagen 18: Comparación de los resultados entre la caracterización teórica (Roberts et al., 1997) y la modelación numérica CORMIX



Fuente: Elaboración propia

El gráfico I corresponde a la geometría alcanzada por el chorro. La línea roja continua corresponde a los bordes del chorro calculados por CORMIX, los cuales se definen como perfiles autosemejantes mediante una distribución gaussiana. La línea continua azul corresponde el borde exterior superior del chorro estimado mediante la caracterización teórica. Se observa que la geometría, hasta el punto de impacto del chorro con el fondo estimada por ambos métodos es muy similar. Luego de que ocurre el impacto del chorro con el fondo, CORMIX sobreestima al alcance de la pluma en el campo lejano.

El gráfico II corresponde a la dilución. Se aprecia que CORMIX subestima dichos valores con respecto a la caracterización teórica, con diferencias hasta más del 50% antes de que ocurra el impacto del chorro con el fondo. El software entrega valores de dilución y concentración en la línea central del chorro mientras que las estimaciones hechas por

Roberts et al., (1997) entregan valores en el borde inferior. Esta diferencia no tiene mayor importancia para este tipo de estudio, pues en éste se busca estimar el alcance, dilución y concentración de la pluma longitudinalmente.

El gráfico III muestra la concentración adimensional en una escala logarítmica para facilitar la comparación dados los valores de dilución, CORMIX sobreestima la concentración. Los autores del programa Jirka y Doneker, estiman un error potencial de los resultados obtenidos respecto de mediciones in situ, de aproximadamente  $\pm 50\%$  para cualquier tipo de descarga (CEDEX y IHA, 2009b).

El gráfico IV muestra al alcance de la pluma de salmuera descargada en el campo lejano. En este caso la descarga está diseñada con una velocidad de corriente igual a cero. Cuando esto ocurre, CORMIX indica que sus estimaciones en el campo lejano son ajenas a la realidad y advierte que la descarga se podría diseñar en un lugar con mayor velocidad de la corriente del medio receptor.

El gráfico V muestra la altura del chorro en las cercanías al punto de descarga y luego el espesor de la pluma de salmuera que tendrá en el campo lejano. Se observa que la altura del chorro va descendiendo significativamente a medida que avanza en su recorrido.

En el gráfico VI se muestra la dilución que sufre la salmuera desde el punto de descarga hasta el final del campo lejano. La pendiente de la curva de dilución luego de que se produce el impacto del chorro con el fondo es mucho menos inclinada que antes de dicho punto, puesto que los procesos de mezcla son menos eficientes en el campo lejano.

### 6.3. ANÁLISIS SENSIBILIDAD CORMIX1

Con el propósito de identificar cuáles son las variables relevantes en la caracterización de las descargas de salmuera mediante emisarios; se presenta un análisis de sensibilidad del subsistema CORMIX1 con las variables que definen el comportamiento de la descarga. En este análisis se modifican cada una de las variables influyentes de manera individual, manteniendo constantes el resto de ellas.

Un análisis de sensibilidad considera una función dependiente o función objetivo, de  $n$  variables mutuamente independientes  $F_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ . Una aproximación formal a éste puede ser la expresión del diferencial (Winckler, 2016):

$$dF_n = \frac{\partial F_n}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial F_n}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial F_n}{\partial x_n} dx_n \quad \text{Ec. 26}$$

La función objetivo es la dilución en el final del campo cercano, debido a que en esta zona finalizan los efectos turbulentos asociados a la impulsión y se producen los procesos de mezcla y dilución más eficientes. Por lo tanto, si al final del campo cercano no se ha desarrollado una dilución que cumpla con las especificaciones de la normativa ambiental, probablemente los valores de concentración de salmuera serán significativamente altos en el campo lejano.

Para el análisis se considera un chorro individual sumergido en el fondo con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal  $\theta = 60^\circ$ , descargando salmuera a través de una boquilla de diámetro  $D = 0.4 [m]$ , con un caudal de descarga  $Q_0 = 0.8 [m^3/s]$ , una velocidad de descarga  $U_0 = 6.36 [m/s]$ , una densidad del chorro  $\rho_0 = 1050 [kg/m^3]$ , una velocidad de la corriente del medio receptor  $U_A = 0.15 [m/s]$ , una densidad del medio receptor  $\rho_A = 1025 [kg/m^3]$ , un ángulo de dirección que se produce entre la corriente del medio receptor y el chorro descargado  $\sigma = 0^\circ$ , (es decir la corriente tiene la misma orientación que el eje  $x$ ) y por último una pendiente de fondo  $\alpha = 0^\circ$ . Las variables que se irán modificando de manera individual son las siguientes:

- Velocidad de la corriente del medio receptor  $U_A$
- Ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal  $\theta$
- Velocidad de descarga  $U_0$
- Densidad del chorro descargado  $\rho_0$
- Ángulo de dirección entre la corriente del medio receptor y el chorro descargado  $\sigma$
- Estratificación en la columna de agua  $\rho_A$
- Pendiente del fondo  $\alpha$

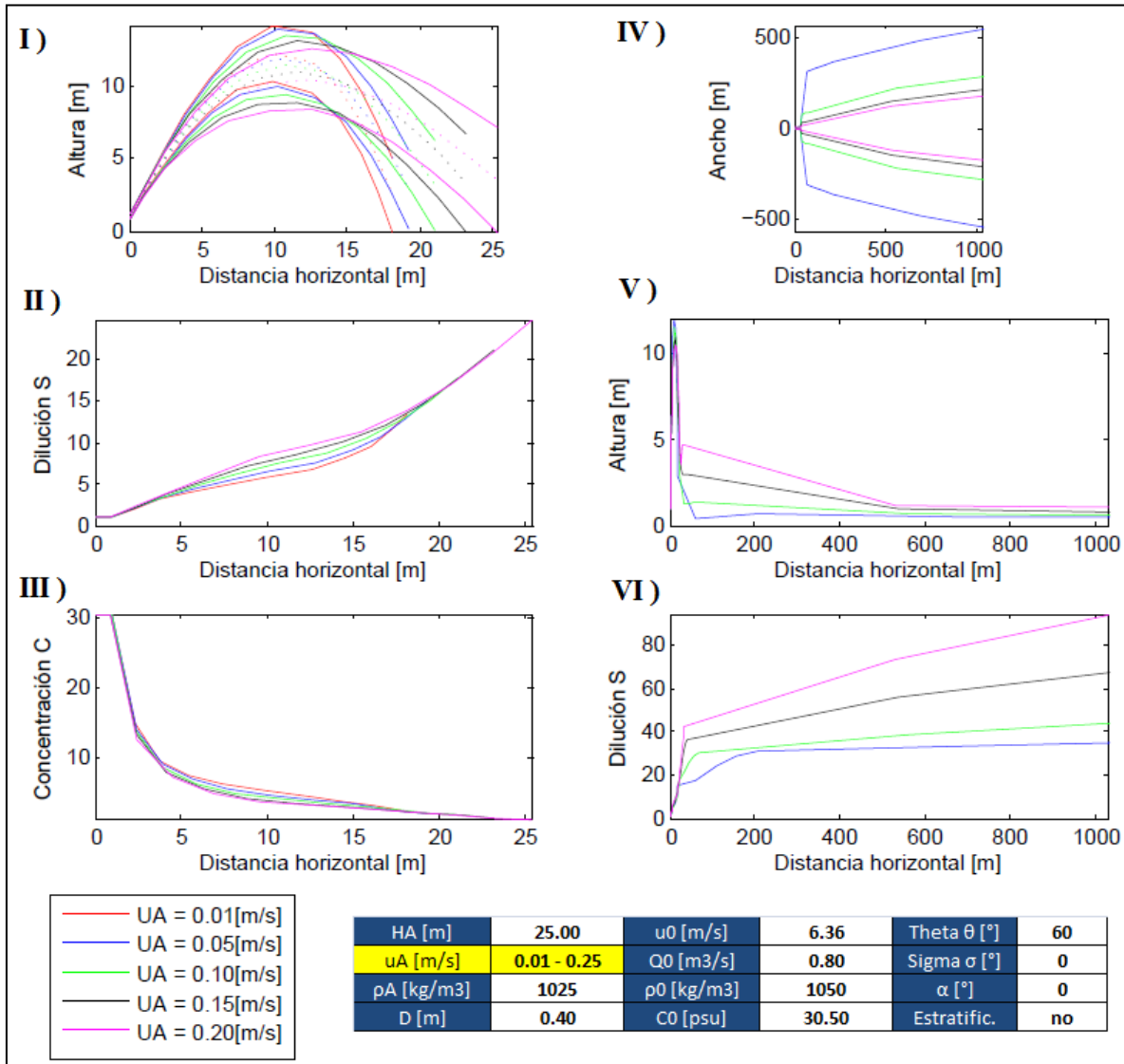
### 6.3.1. VELOCIDAD DE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR

En la imagen 19 se muestran los resultados producto de la variación del parámetro de la velocidad de la corriente del medio receptor  $U_A$  desde  $0.01 [m/s]$  hasta  $0.20 [m/s]$ . En el gráfico I se observa que a medida que la velocidad de la corriente aumenta, los chorros disminuyen su altura máxima alcanzada, pero incrementan la distancia de impacto del chorro con el fondo. En el gráfico II y en el gráfico III se aprecian que los valores de dilución y concentración no sufren variaciones importantes.

En los gráficos IV, V y VI se muestra la comparación de cuatro resultados y no de los cinco correspondientes. La razón de esta omisión es que CORMIX sobreestima el alcance de la pluma en el campo lejano cuando la velocidad de la corriente del medio receptor es muy baja (en este caso  $U_A = 0.01 [m/s]$ ), entregando resultados ajenos a la realidad. Al momento de ejecutar una simulación utilizando  $U_A = 0.01 [m/s]$ , el software emite un aviso mencionando que la intrusión de agua a la capa hipersalina es muy grande y probablemente sus resultados no son realistas. Recomiendan simular utilizando un valor mínimo de  $U_A = 0.03 [m/s]$ .

En el gráfico IV se observa que a medida que aumenta la velocidad de la corriente del medio receptor, el ancho de las plumas disminuye. En el gráfico V se observa que a medida que aumenta la velocidad de la corriente del medio receptor, el espesor de la pluma también aumenta, aunque no de forma significativa. En el gráfico VI se aprecia que la dilución en el campo lejano, a diferencia del campo cercano tiene variaciones importantes. En el caso de la velocidad de la corriente del medio receptor  $U_A = 0.20 [m/s]$  la dilución al final de éste puede ser hasta más del 100% mayor que en el final del campo cercano.

Imagen 19: Análisis de sensibilidad velocidad corriente medio receptor, CORMIX1



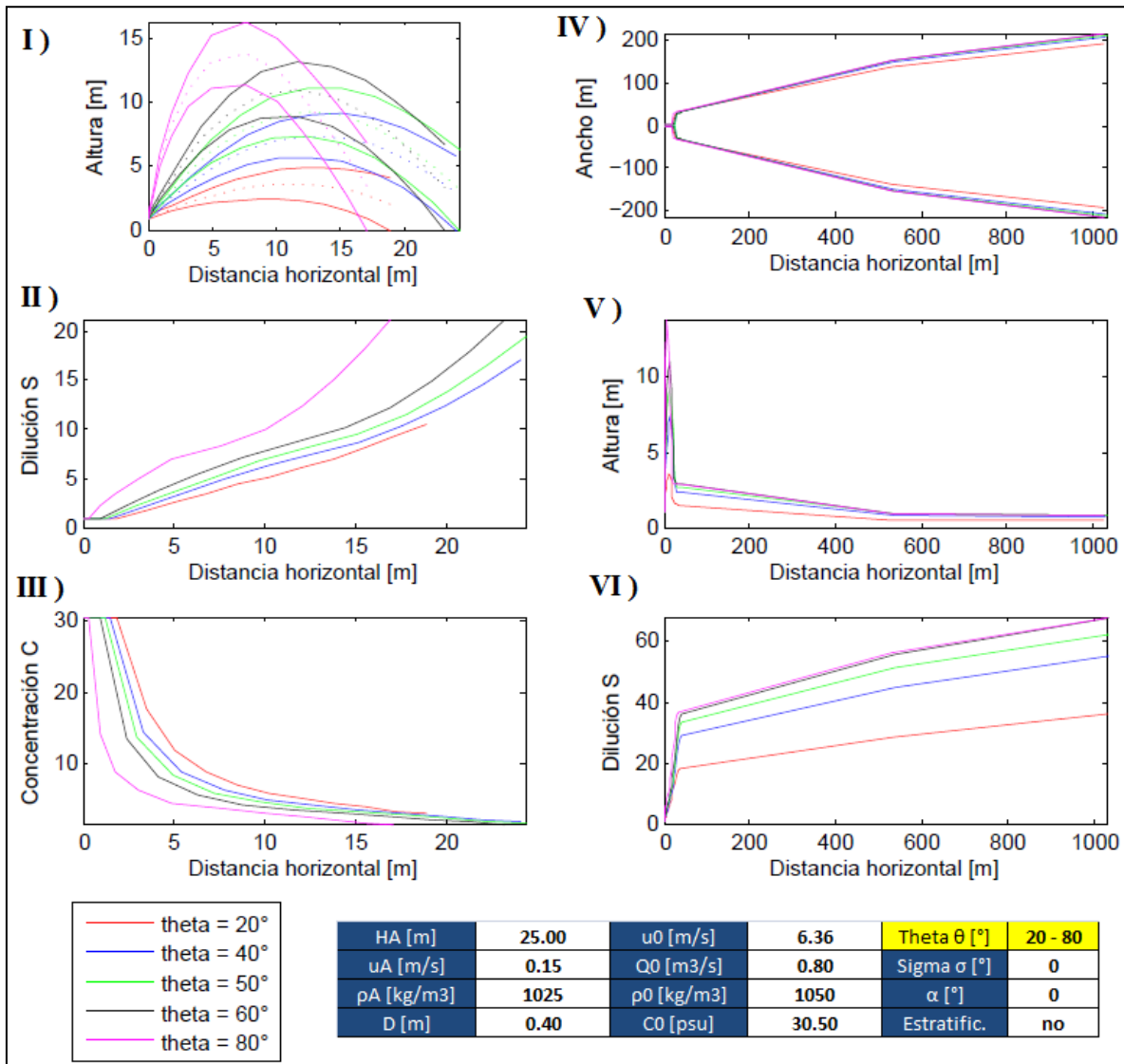
Fuente: Elaboración propia

Se concluye que la velocidad de la corriente del medio receptor solo tiene un alto grado de influencia en el comportamiento de la geometría y la dilución de la salmuera en el campo lejano. Por lo tanto es fundamental que los datos usados al momento de diseñar la descarga representen adecuadamente la realidad. Idealmente se requieren mediciones in situ para obtener datos de dirección y velocidad de la corriente del medio receptor. Además se puede ver que la dilución en el campo cercano está dominada por las características del chorro y no las del medio receptor.

### 6.3.2. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO RESPECTO A LA HORIZONTAL

En la imagen 20 se muestran los resultados producto de la variación del ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal  $\theta$ , para siete resultados diferentes variando desde los  $20^\circ$  hasta los  $80^\circ$ .

Imagen 20: Análisis de sensibilidad ángulo de inclinación c/r a la horizontal, CORMIX1



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico I se aprecia que la geometría está directamente relacionada con la inclinación de los chorros con respecto a la horizontal. Por un lado, mientras más vertical sea dicha inclinación mayor será la altura alcanzada y mientras menor sea la inclinación mayor será la distancia del punto de impacto del chorro con el fondo. Se observa que la mayor altura alcanzada por el chorro se produce cuando el ángulo  $\theta = 80^\circ$ , mientras que

la menor altura se produce cuando el  $\theta = 20^\circ$ . En el gráfico II se observa que los ángulos de  $60^\circ$  y  $80^\circ$  producen valores de dilución relativamente similares; la única diferencia es que el ángulo de  $80^\circ$  produce un máximo de dilución en una menor distancia de impacto del chorro con el fondo, pero al mismo tiempo consigue mayor altura máxima. En el gráfico III se aprecia que los menores valores de concentración están relacionados al ángulo de  $80^\circ$ .

Respecto a los resultados en el campo lejano, en el gráfico IV se aprecia que el ancho de las plumas no tiene variación importante, en tanto que el gráfico V muestra que tampoco existen grandes diferencias en la altura de la pluma. En el gráfico VI se observa que el comportamiento de la dilución sí tiene importantes diferencias en el campo lejano, debido a la eficiencia de los procesos de mezcla en el campo cercano; las pendientes de las curvas de dilución son mucho más pronunciadas en el campo cercano que en el campo lejano. Los ángulos  $\theta = 80^\circ$  y  $\theta = 60^\circ$  generan procesos de mezcla más eficientes, alcanzado valores máximos relativamente similares.

Se concluye que la inclinación del chorro respecto a la horizontal es fundamental a la hora de diseñar una descarga, sobre todo en el estudio de la región del campo cercano. Ángulos de inclinación más verticales suponen mayores valores de dilución en menores distancias recorridas y procesos de mezcla más eficientes, pero también requieren mayores profundidades de descarga para evitar interacciones con la superficie.

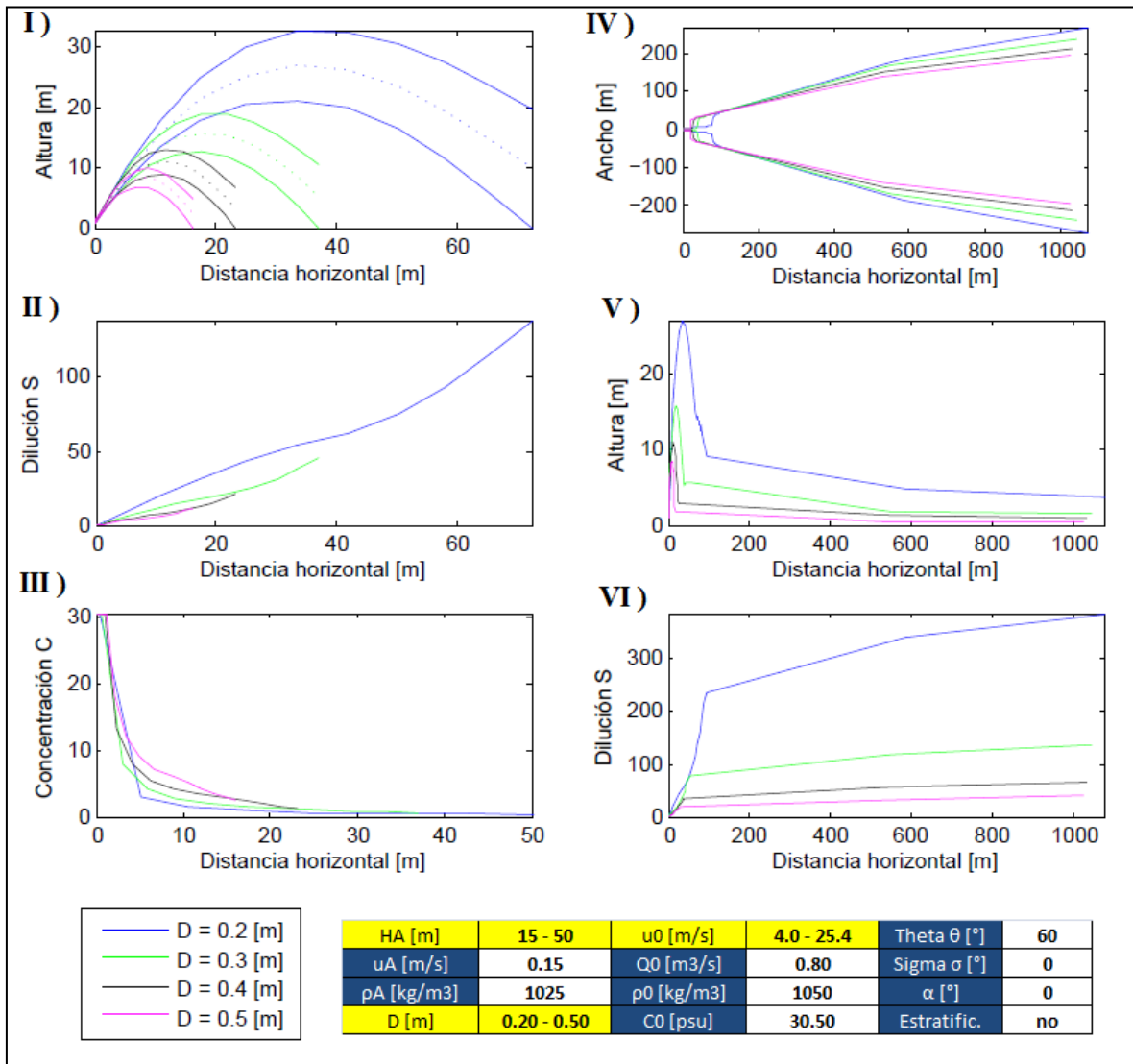
### 6.3.3. VELOCIDAD DE DESCARGA

En la imagen 21 se muestran los resultados producto de la variación de la velocidad de descarga  $U_0$ . Para provocar dicha variación se mantuvo constante el valor del caudal de descarga  $Q_0$  y se fue variando el valor del diámetro de la boquilla de descarga desde  $D = 0.2 [m]$  hasta  $D = 0.5 [m]$ . En el gráfico I se aprecia que mientras mayor es la velocidad de descarga (menor sea el diámetro de la boquilla) mayor es la altura máxima alcanzada y la distancia de impacto del chorro con el fondo. El gráfico II muestra que el mayor valor de dilución se produce con la mayor velocidad de descarga y el gráfico III muestra que el menor valor de concentración está relacionado al mayor valor de la velocidad de descarga.

El gráfico IV muestra que los anchos de las plumas de salmuera en el campo lejano no tienen diferencias importantes; aunque se aprecia que el mayor ancho de la pluma está relacionado al mayor valor de velocidad de descarga. En el gráfico V se observa que la altura de la pluma en el campo lejano será mayor mientras la velocidad de la descarga sea mayor. En el gráfico VI se aprecia que gran parte de la dilución que se desarrolla en todo el recorrido del chorro se logra a pocos metros de la descarga, ya que las curvas de dilución tienen una pendiente importante en dicha zona.

Se concluye que la velocidad de descarga tiene un alto grado de influencia en los resultados en el campo cercano y es fundamental a la hora de diseñar una descarga. En el campo cercano este parámetro permite definir, la profundidad a la cual se descarga y cuan eficientes son los procesos de mezcla en ambas regiones de estudio.

Imagen 21: Análisis de sensibilidad velocidad de descarga, CORMIX1



Fuente: Elaboración propia

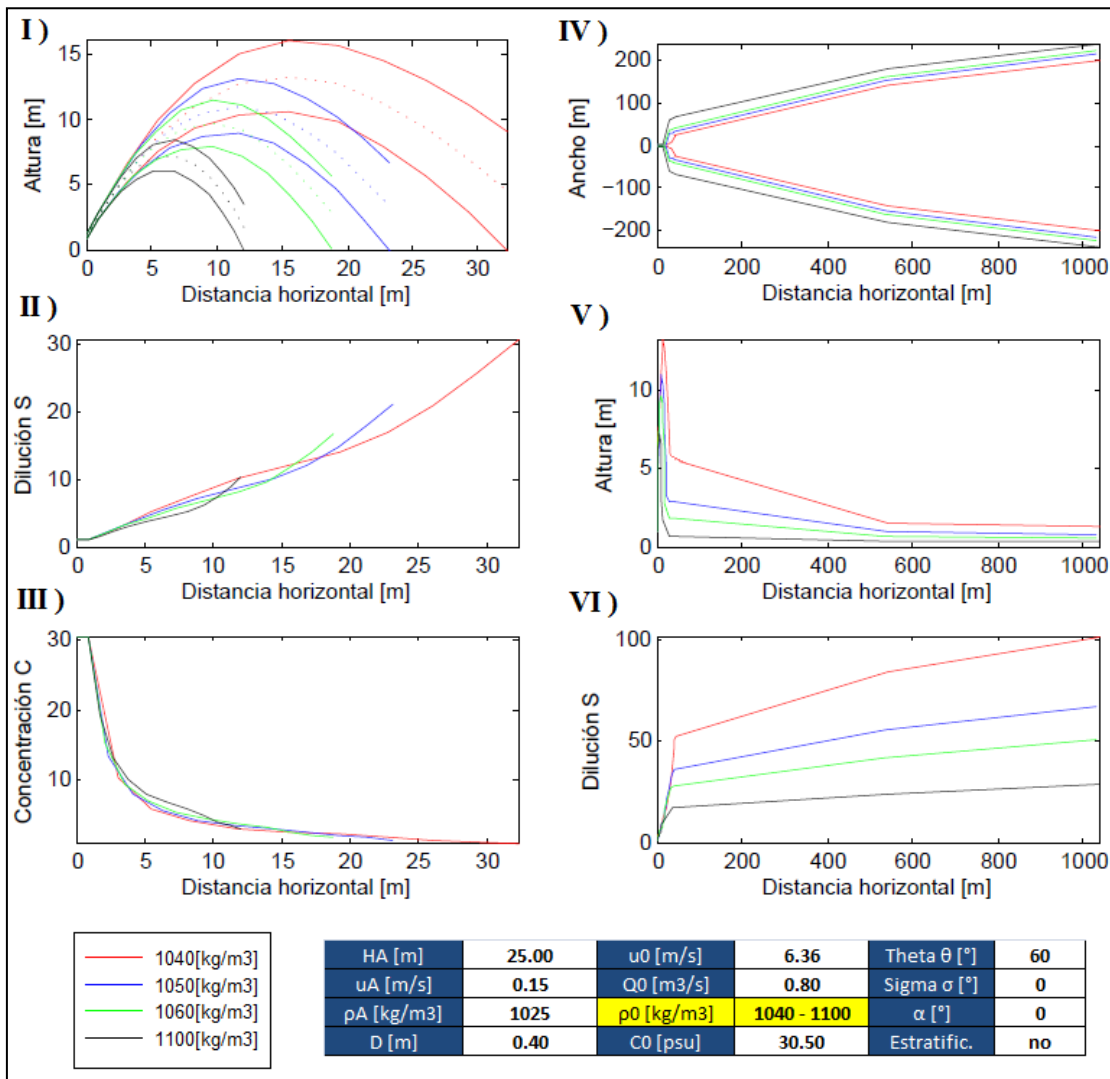
#### 6.3.4. DIFERENCIA DE DENSIDADES ENTRE EL MEDIO RECEPTOR Y EL CHORRO DESCARGADO

En la imagen 22 se muestran los resultados producto de la variación de la diferencia de densidades entre el medio receptor y el chorro descargado. Se comparan cuatro resultados distintos variando la densidad del fluido descargado desde  $1040 [kg/m^3]$  hasta  $1100 [kg/m^3]$ . En el gráfico I se observa que mientras menor sea la densidad del fluido descargado, mayor será la altura máxima alcanzada y la distancia de impacto del chorro con el fondo. En el gráfico II se aprecia que las descargas de chorros más densos tendrán procesos de mezcla menos eficientes y por lo tanto menores valores de dilución. El gráfico III muestra menor concentración para chorros de menor densidad. El ancho de la pluma en el campo lejano mostrado en el gráfico IV no tiene diferencias importantes, aún cuando el chorro de mayor densidad produce el ancho mayor.

Por otro lado el chorro de menor densidad mostrado en el gráfico V produce la mayor altura de la pluma. El gráfico VI muestra al igual que en el campo cercano que la mayor dilución se genera en el chorro de menor densidad. Esto es debido a que mientras mayor sea la diferencia de densidades entre ambos fluidos, la estratificación será más importante y la capa de salmuera tenderá a hundirse hacia el fondo rápidamente; ocurrido esto los procesos de mezcla se convierten menos eficientes y el alcance de la salmuera alcanza mayores distancias.

Por lo tanto se concluye que la diferencia de densidades entre el medio receptor y el chorro descargado tiene un alto grado de influencia en los resultados tanto para el campo cercano como lejano. En el campo cercano permite definir la profundidad a la cual se realizará la descarga y en el campo lejano permite determinar cuán eficientes son los procesos de mezcla.

Imagen 22: Análisis de sensibilidad de la diferencia de densidades entre el chorro descargado y el medio receptor, CORMIX1

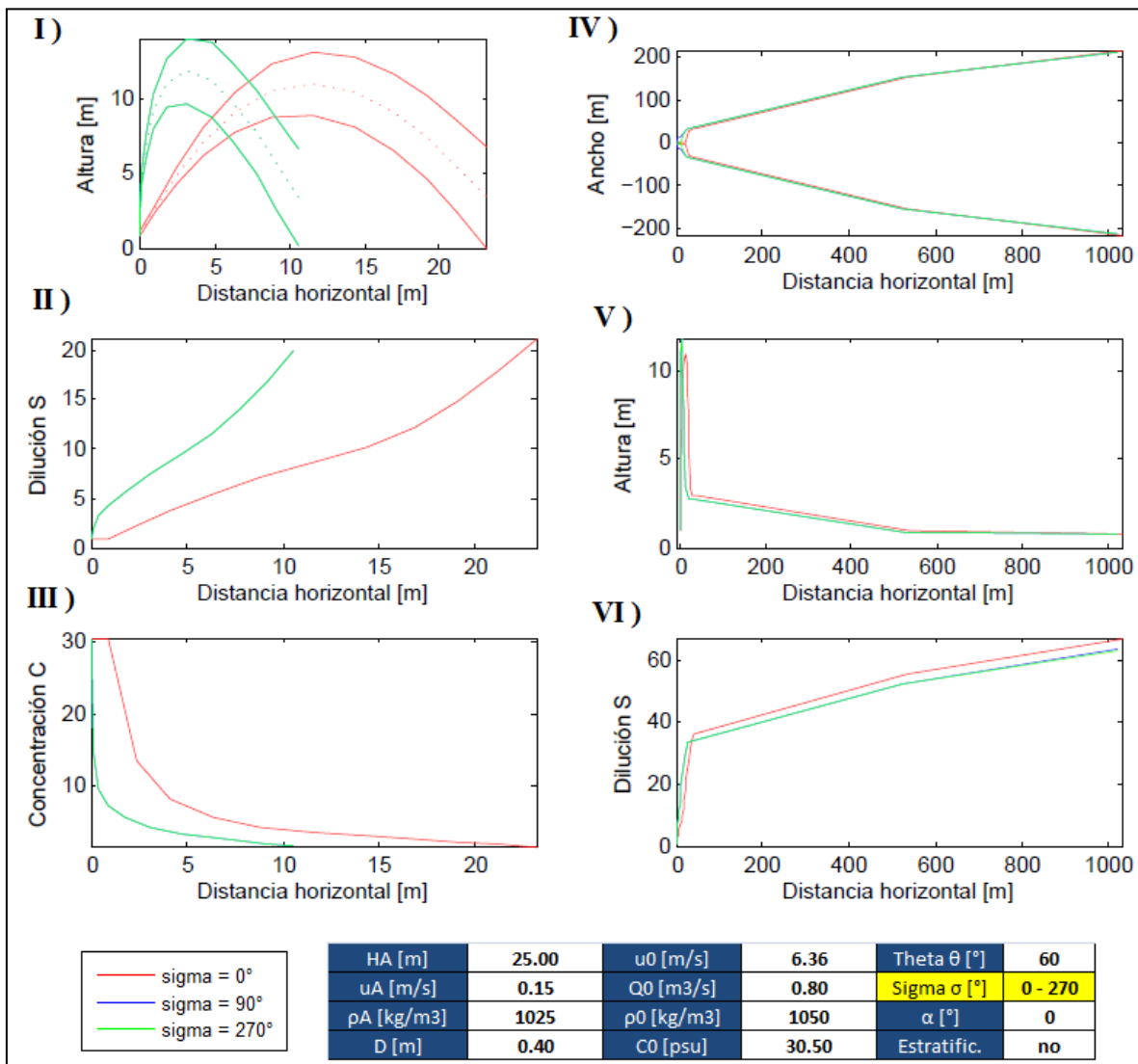


Fuente: Elaboración propia

### 6.3.5. ÁNGULO ENTRE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR Y EL CHORRO DESCARGADO

En la imagen 23 se muestran los resultados producto de la variación del ángulo entre la corriente del medio receptor y el chorro descargado  $\sigma$ . En un principio el análisis considera la comparación de cuatro resultados, pero en la imagen se aprecian solamente dos, ya que los resultados correspondientes a  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  son completamente iguales (la diferencia entre ambos radica en las direcciones opuestas que avanzan cada uno). En el caso de  $\sigma = 180^\circ$ , CORMIX no puede realizar dicha simulación y advierte 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 acumulaciones de concentración en el campo cercano. Esta situación es difícil de analizar, y también constituye un diseño indeseable".

Imagen 23: Análisis sensibilidad del ángulo de dirección entre corriente medio receptor - chorro, CORMIX1



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico I muestra que direcciones de la corriente del medio receptor respecto al chorro descargado de  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  producen alturas máximas relativamente similares que el ángulo  $\sigma = 0^\circ$ , pero la distancia de impacto de chorro con el fondo es significativamente menor. Con respecto a la dilución, en el gráfico II se muestra que sus valores máximos son relativamente similares; en el caso de ángulos  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  el máximo se alcanza en una menor distancia recorrida, debido a que los procesos de mezcla son más eficientes en el campo cercano. En el gráfico III se observa que se alcanza menor concentración para los ángulos  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  en menor distancia recorrida.

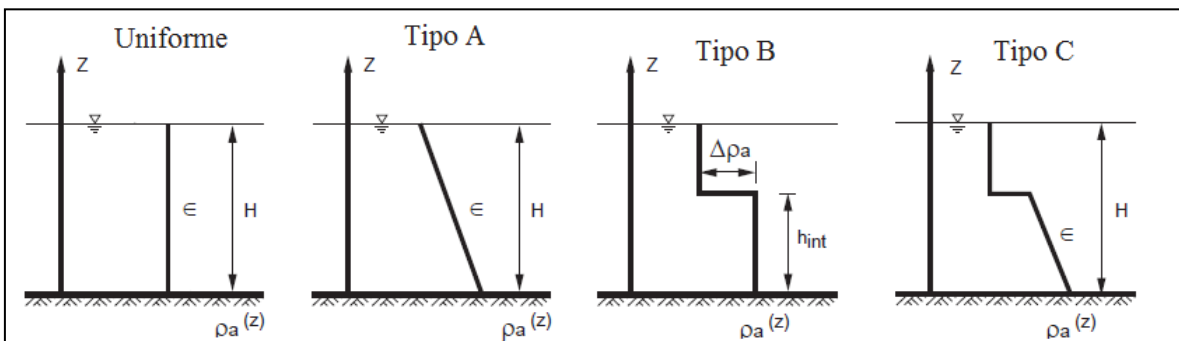
Con respecto al ancho y altura de la pluma en el campo lejano, en el gráfico IV y gráfico V se aprecia que no existen diferencias importantes. En el gráfico VI se observa, y a diferencia del campo cercano, que los procesos de mezcla son más eficientes para el ángulo  $\sigma = 0^\circ$  pues dicha configuración genera valores de dilución mayores.

Se concluye que la dirección de la corriente del medio receptor respecto al chorro tiene un alto grado de influencia en los resultados para el campo cercano, mientras que para el campo lejano su influencia es prácticamente imperceptible. Es importante tener en cuenta la restricción del software CORMIX de no poder simular el comportamiento de la descarga para  $\sigma = 180^\circ$ .

### 6.3.6. ESTRATIFICACIÓN EN LA COLUMNA DE AGUA

CORMIX permite simular descargas con distintos perfiles de densidad en la columna de agua (ver imagen 24). Por defecto, el software asume una densidad uniforme. La configuración Tipo A corresponde a un perfil de densidad lineal. La configuración Tipo B corresponde a un perfil de dos capas con una densidad constante y un salto de densidad. La configuración Tipo C corresponde a un perfil de densidad superficial constante separada por un salto de densidad en la parte inferior. A continuación se presentan los resultados con cada configuración.

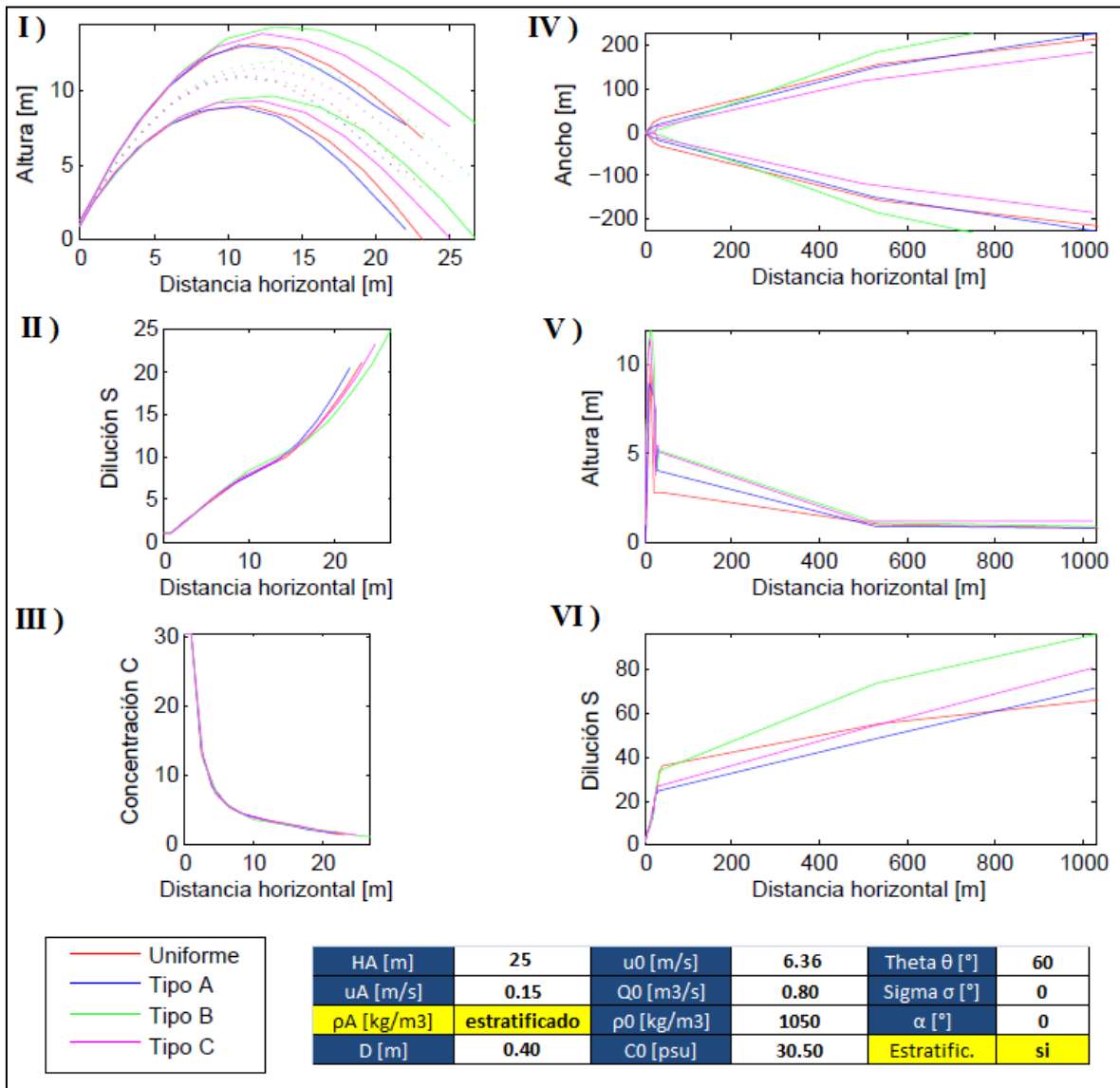
Imagen 24: Tipos de perfiles de densidad que permite utilizar CORMIX



Fuente: (Doneker y Jirka, 2007)

En la imagen 25 se muestran los resultados producto de la variación de la estratificación en la columna de agua  $\rho_A$ . Se comparan cuatro resultados: i) densidad uniforme  $\rho_A = 1025 [kg/m^3]$ , ii) estratificación Tipo A:  $1025 - 1028 [kg/m^3]$  iii) estratificación Tipo B:  $1025 - 1028 [kg/m^3]$  y iv) estratificación Tipo C:  $\rho_A = 1025 - 1028 - 1030 [kg/m^3]$ .

Imagen 25: Análisis de sensibilidad estratificación en la columna de agua, CORMIX1



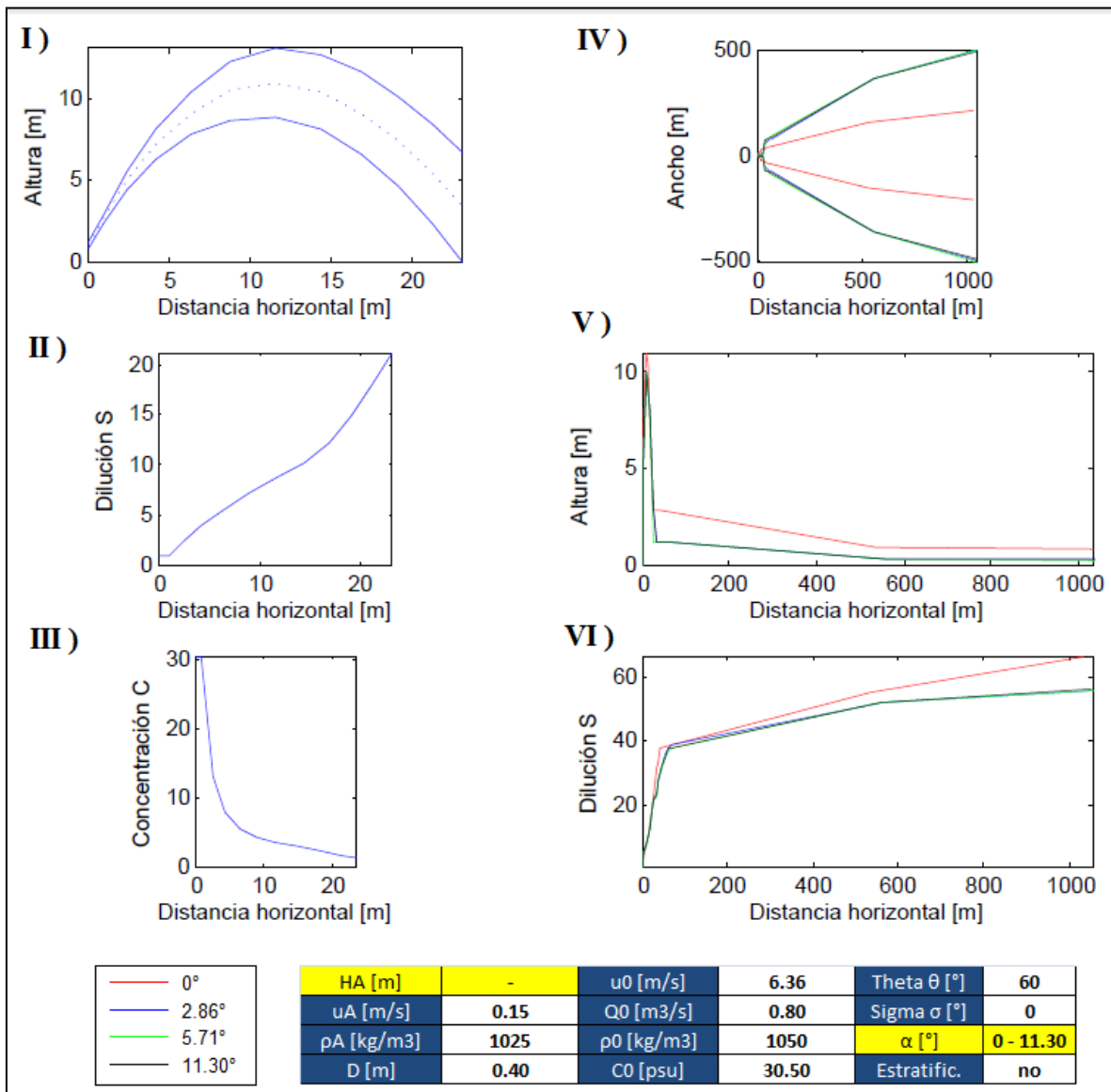
Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico I se observa que no existen diferencias importantes en la geometría de los chorros en el campo cercano. En el gráfico II y en el gráfico III se aprecian que tanto los valores de dilución y concentración no presentan diferencias importantes. Con respecto al análisis del campo lejano, el gráfico IV y el gráfico V muestran, al igual que en el campo cercano, que no existen importantes diferencias en los anchos y alturas de la pluma. Por otro lado en el gráfico VI se muestra que la configuración que produce procesos de mezcla más eficientes en el campo lejano y por lo tanto mayores valores de dilución, es la estratificación Tipo B. Se concluye que el parámetro de estratificación de la columna de agua tiene poca influencia en los resultados tanto en el campo cercano como lejano y por lo tanto no es fundamental a la hora de diseñar una descarga.

### 6.3.7. PENDIENTE DE FONDO

En la imagen 26 se muestran los resultados producto de la variación de la pendiente de fondo  $\alpha$ . Se comparan cuatro resultados variando  $\alpha$  desde  $0^\circ$  hasta  $11.30^\circ$ . En los gráficos I, II y III se muestra un solo resultado, debido a que en esta zona la introducción de un ángulo de inclinación de la pendiente de fondo no produce ninguna variación o modificación en los resultados. La razón de esto es que el modulo CORJET asume dentro de sus hipótesis una esquematización de fondo plano.

Imagen 26: Análisis de sensibilidad pendiente del fondo, CORMIX1



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico IV se aprecia que los anchos de la pluma calculados con pendiente de fondo son significativamente diferentes con respecto al ancho calculado con fondo horizontal. La principal razón de esta diferencia se debe a la influencia de la flotabilidad negativa de la capa hipersalina que se va expandiendo horizontalmente sobre el fondo. Cuando se trata de un fondo plano, la flotabilidad negativa desacelera el flujo, pues ésta lo empuja hacia el fondo; mientras que cuando se trata de un fondo inclinado la flotabilidad negativa le otorga una aceleración al flujo pendiente abajo, alcanzando mayores distancias y produciendo un ancho de mayor dimensión.

El gráfico V muestra que la mayor altura de la pluma en el campo lejano está asociada a la simulación sin pendiente de fondo. Esto debido a la flotabilidad negativa del flujo de la capa hipersalina, ya que un flujo con mayor aceleración desplazándose pendiente abajo, tendrá mayor alcance horizontal pero con una menor altura.

En el gráfico VI se observa que la simulación sin pendiente de fondo produce mayores valores de dilución en el campo lejano, este resultado tiene un cierto nivel de contradicción con las explicaciones que se mencionaron en los dos párrafos anteriores, ya que un flujo más acelerado desplazándose mayores distancias debería suponer procesos de mezcla más eficientes y por lo tanto mayores valores de dilución.

Se concluye que pendiente de fondo en el campo cercano no tiene ningún grado de influencia en los resultados, mientras que en el campo lejano podría tener una alta influencia en el alcance de los anchos de las plumas. Los autores del software CORMIX recomiendan: i) diseñar las descargas con una esquematización de fondo plano, ii) diseñar la descarga con una esquematización de fondo inclinado, iii) realizar una comparación entre sus resultados y iv) en base a las características reales del fondo tanto de la rugosidad como de la inclinación de la pendiente, obtener las conclusiones correspondientes al caso y aplicarlas a la hora de diseñar la descarga.

## RESUMEN DE RESULTADOS

En la tabla 6 se aprecia un resumen de los resultados del análisis de sensibilidad realizado para CORMIX1, donde se muestran los valores de las alturas máximas alcanzadas  $Y_t$ , las distancias de impacto de los chorros con el fondo  $X_i$  y las diluciones que se producen al final del campo cercano  $S_m$ . También se muestran los porcentajes de variabilidad de cada una de las variables analizadas con respecto a los valores de referencia (aquellos que tienen el porcentaje de variabilidad igual a cero). Las variables que presentan mayor diferencias entre sus resultados están identificadas con las casillas de color rojo y son las siguientes:

- Velocidad de descarga  $U_0$  (mediante una modificación del diámetro  $D$ ): produciendo diferencias de más del 500% en los valores de dilución y más del 100% en ambos valores de la geometría del chorro.
- Ángulo de inclinación del chorro respecto a la horizontal  $\theta$ : produciendo diferencias de -50% para valores de dilución y más del -50% en la altura máxima alcanzada por el chorro.
- Densidad del chorro descargado  $\rho_0$ : produciendo diferencias cercanas al  $\pm 50\%$  tanto en la geometría del chorro como en la dilución.

- Ángulo de dirección entre la corriente del medio receptor y el chorro descargado  $\sigma$ : produciendo diferencias de más del -100% en la distancia de impacto del chorro con el fondo y de -38% en la dilución.

A modo de recordatorio, las variables que son analizadas en la tabla 6 están involucradas en el campo cercano y son las siguientes:

- $Y_t$ : altura máxima alcanzada por el chorro
- $X_i$ : distancia de impacto del chorro con el fondo
- $S_m$ : dilución al final del campo cercano

Tabla 6: Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad, CORMIX1

Variable modificada	Valor modificado	Parámetros de cálculo		Resultados CORMIX			% de variabilidad		
		U0 [m/s]	F	Yt [m]	Xi [m]	Sm	Yt	Xi	Sm
UA [m/s]	0.01	6.36	20.58	12.30	18.30	-	12	-21	-
UA [m/s]	0.05	6.36	20.58	11.95	19.24	30.91	9	-17	-15
UA [m/s]	0.10	6.36	20.58	11.48	21.03	32.66	4	-9	-10
UA [m/s]	0.15	6.36	20.58	11.00	23.18	36.16	0	0	0
UA [m/s]	0.20	6.36	20.58	10.50	25.40	42.25	-5	10	17
$\theta$ [°]	20	6.36	20.58	3.57	18.21	18.10	-68	-21	-50
$\theta$ [°]	40	6.36	20.58	7.35	24.07	29.10	-33	4	-20
$\theta$ [°]	50	6.36	20.58	9.50	24.31	33.20	-14	5	-8
$\theta$ [°]	60	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\theta$ [°]	80	6.36	20.58	13.82	17.09	36.70	26	-26	1
D [m]	0.20	25.46	116.00	27.00	72.37	234.00	145	212	547
D [m]	0.30	11.31	42.50	15.83	37.05	77.70	44	60	115
D [m]	0.40	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
D [m]	0.50	4.07	11.78	8.37	16.07	20.02	-24	-31	-45
$\rho_0$ [kg/m3]	1040	6.36	26.57	13.30	32.25	52.50	21	39	45
$\rho_0$ [kg/m3]	1050	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\rho_0$ [kg/m3]	1060	6.36	17.39	9.69	18.75	28.50	-12	-19	-21
$\rho_0$ [kg/m3]	1110	6.36	11.08	7.23	12.04	17.09	-34	-48	-53
$\sigma$ [°]	0	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\sigma$ [°]	90	6.36	20.58	11.88	10.59	33.90	8	-54	-6
$\sigma$ [°]	180	6.36	20.58	11.47	-7.42	22.30	4	-132	-38
$\sigma$ [°]	270	6.36	20.58	11.88	10.59	33.90	8	-54	-6
Estrat.	No	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
Estrat.	Tipo A	6.36	20.58	10.97	21.98	24.66	0	-5	-32
Estrat.	Tipo B	6.36	20.58	11.98	26.70	33.61	9	15	-7
Estrat.	Tipo C	6.36	20.58	11.56	24.43	26.77	5	5	-26
$\alpha$ [°]	0	6.36	20.58	11.00	23.18	36.10	0	0	0
$\alpha$ [°]	2.86	6.36	20.58	11.00	23.18	38.50	0	0	6
$\alpha$ [°]	5.71	6.36	20.58	11.00	23.18	38.10	0	0	5
$\alpha$ [°]	11.30	6.36	20.58	11.00	23.18	38.30	0	0	6

Fuente: Elaboración propia

## 6.4. ANÁLISIS SENSIBILIDAD CORMIX2

Al igual que con CORMIX1, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar el grado de influencia de cada una de las variables que definen la geometría, dilución y concentración tanto en el campo cercano como el campo lejano de la salmuera descargada. La función objetivo del análisis de sensibilidad es la dilución en el final del campo cercano, esto es debido a que en esta zona se acaban los efectos turbulentos asociados a la impulsión inicial transmitida en la descarga y es donde se producen procesos de mezcla y dilución más eficientes.

Para el análisis se consideran 5 chorros sumergidos descargando mediante un difusor de longitud  $L_D = 300 [m]$ . Cada chorro descarga mediante una sola boquilla con un ángulo de inclinación de  $\theta = 60^\circ$  respecto a la horizontal, el diámetro de las boquillas es de  $D = 0.15 [m]$ , la velocidad de descarga es de  $U_0 = 9.05 [m/s]$  y el caudal de descarga es el mismo que fue utilizado para el análisis de CORMIX1  $Q_0 = 0.8 [m^3/s]$ . Las variables que se modifican de manera individual son la siguientes:

- Velocidad de la corriente del medio receptor  $U_A$
- Ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal  $\theta$
- Velocidad de descarga  $U_0$
- Ángulo de inclinación del chorro con respecto a la corriente del medio receptor  $\sigma$
- Número de chorros descargando  $N$
- Configuración de las boquillas de descarga

### 6.4.1. VELOCIDAD DE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR

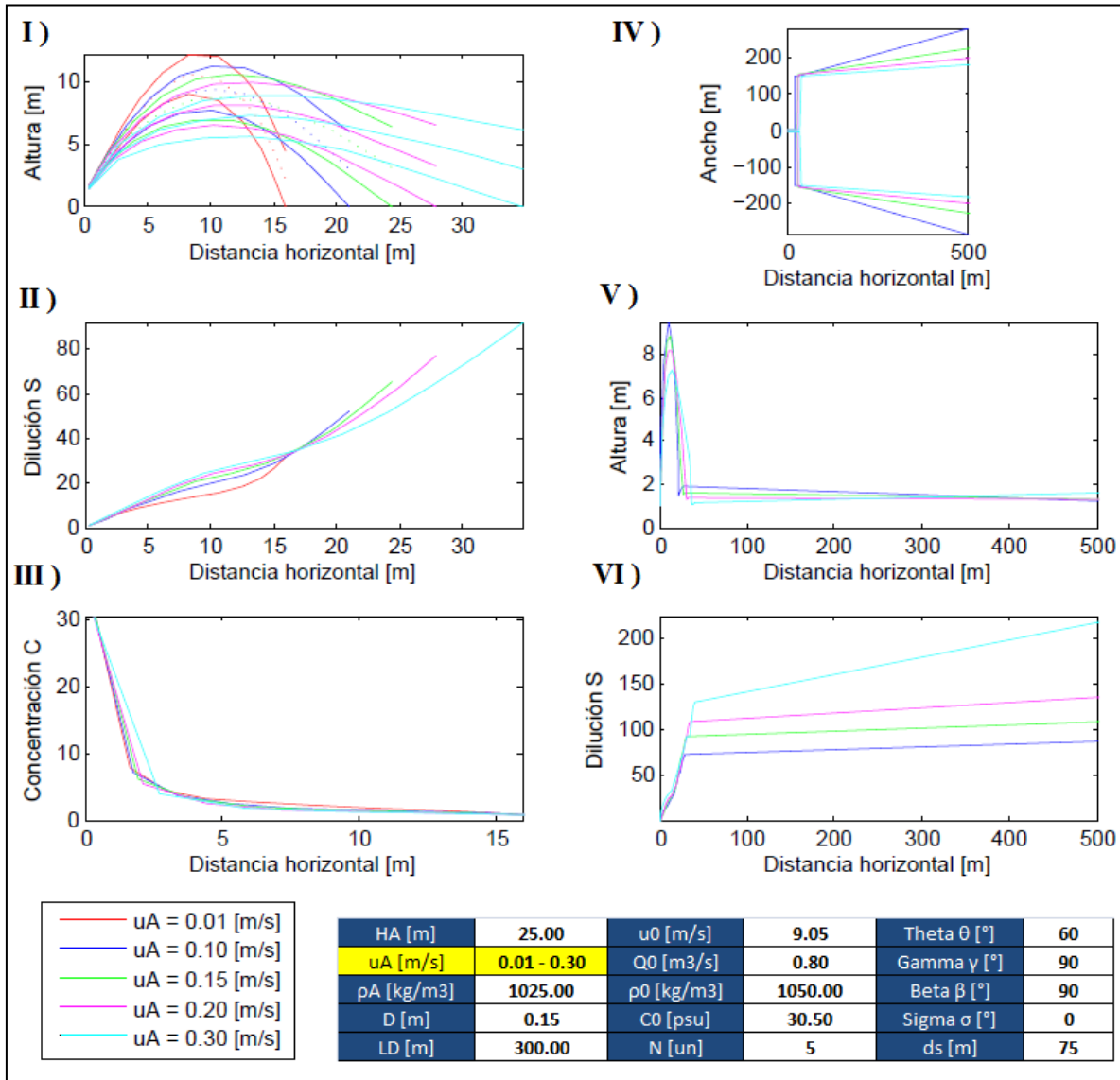
En la imagen 27 se muestran los resultados producto de la variación de la velocidad del medio receptor  $U_A$ . Se comparan cinco resultados variando  $U_A$  desde  $0.01 [m/s]$  hasta  $0.20 [m/s]$ . En el gráfico I se observa que a medida que la velocidad de la corriente aumenta, las alturas máximas alcanzadas por los chorros disminuyen y a su vez aumentan la distancia de impacto con el fondo. En el gráfico II y en el gráfico III se aprecian que los valores de dilución y concentración no tienen diferencias importantes.

En los gráficos IV, V y VI se muestra la comparación de cuatro resultados y no de los cinco correspondientes. La razón de esto es que con una velocidad de la corriente del medio receptor  $U_A = 0.01 [m/s]$ , CORMIX sobreestima el alcance de la pluma y los valores de dilución en el campo lejano entregando resultados ajenos a la realidad. En el gráfico IV se observa que a medida que aumenta la velocidad de la corriente del medio receptor el ancho de las plumas disminuyen pero no de manera significativa.

En el gráfico V se observa que las alturas que alcanzan las plumas en el campo lejano no tienen importantes diferencias. En el gráfico VI se aprecia que a diferencia del campo cercano, la dilución tiene variaciones importantes, por ejemplo para  $U_A = 0.20 [m/s]$  la dilución al final del campo lejano puede ser hasta más del 200% mayor que en el final del campo cercano.

Se concluye que la velocidad de la corriente del medio receptor tiene un alto grado de influencia en el comportamiento de la geometría del chorro en el campo cercano y en el comportamiento de la dilución en el campo lejano.

Imagen 27: Análisis sensibilidad velocidad de la corriente del medio receptor, CORMIX2

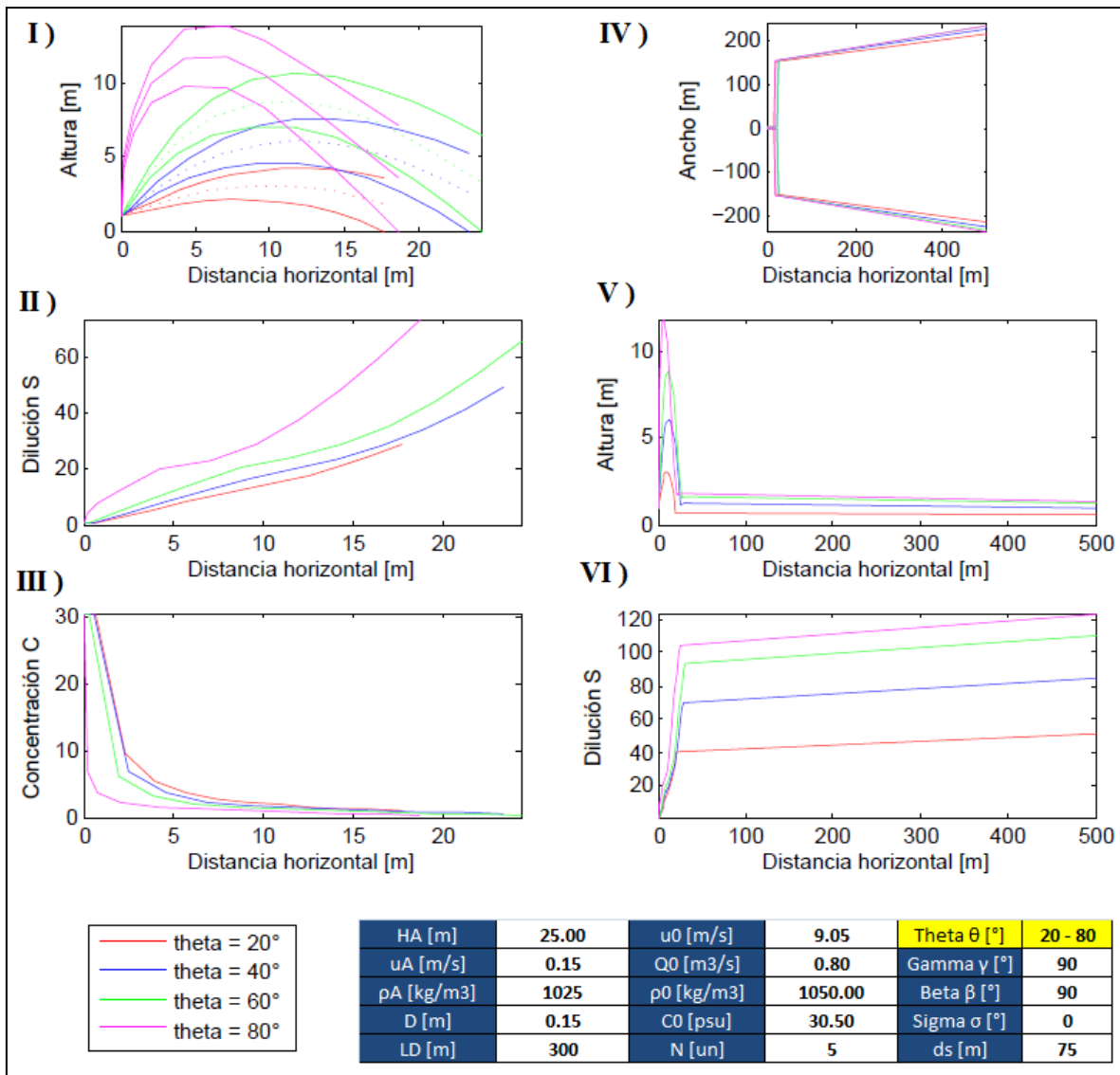


Fuente: Elaboración Propia

#### 6.4.2. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO CON RESPECTO A LA HORIZONTAL

En la imagen 28 se muestran los resultados producto de la variación del ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal. Se comparan cinco resultados variando desde  $\theta = 20^\circ$  hasta  $\theta = 80^\circ$ . En el gráfico I se observa que la geometría de los chorros en el campo cercano depende directamente de la inclinación de los chorros con respecto a la horizontal; por un lado mientras más vertical sea dicha inclinación, mayor será la altura alcanzada y mientras más horizontal sea la inclinación, mayor será la distancia del punto de impacto del chorro con el fondo.

Imagen 28: Análisis de sensibilidad del ángulo de inclinación del chorro con respecto a la horizontal, CORMIX2



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico II se aprecia que el ángulo  $\theta = 80^\circ$  produce mayores valores de dilución en una menor distancia recorrida, aunque dicha diferencia con respecto a los valores relacionados al ángulo  $\theta = 60^\circ$  no son tan importantes. En el gráfico III se aprecia que los menores valores de concentración están relacionados al ángulo de  $\theta = 80^\circ$ .

En el gráfico IV se muestra que el ancho de las plumas no tiene ninguna variación importante; el gráfico V indica que tampoco existen grandes diferencias en la altura de la pluma en el campo lejano. En el gráfico VI se observa que el comportamiento de la dilución sí tiene importantes diferencias en el campo lejano, debido a la eficiencia de los procesos de mezcla en el campo cercano. Los ángulos  $\theta = 80^\circ$  y  $\theta = 60^\circ$  producen los procesos de mezclas más eficientes, ambos alcanzando valores de dilución relativamente

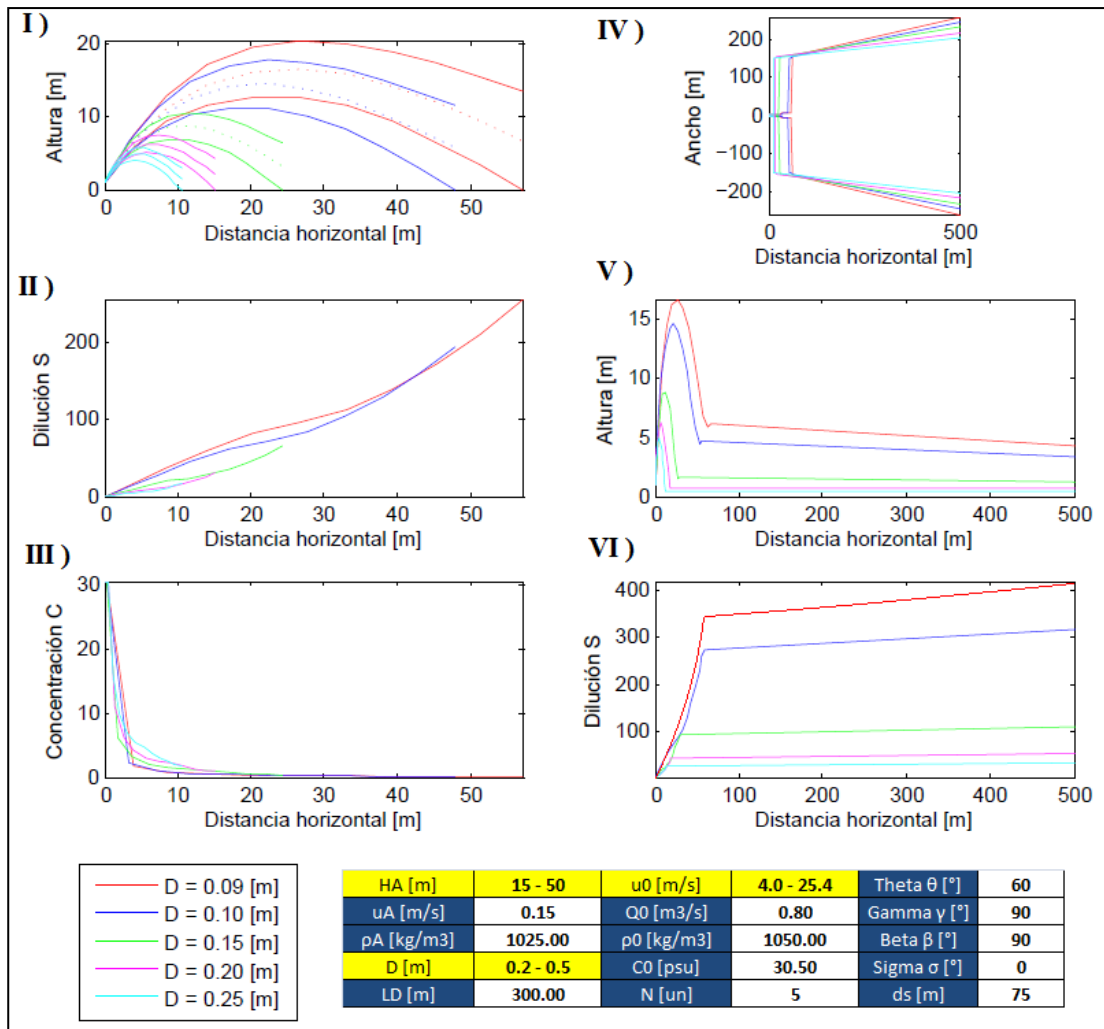
similares, los cuales pueden ser hasta 100 veces mayores que en comparación con el ángulo  $\theta = 20^\circ$ .

Se concluye que la inclinación del chorro respecto a la horizontal es fundamental a la hora de diseñar una descarga. En la región de campo cercano está directamente relacionado a la profundidad a la cual se realizará la descarga. Por otro lado, chorros más verticales suponen mayores valores de dilución y por ende procesos de mezcla más eficientes.

### 6.4.3. VELOCIDAD DE DESCARGA

En la imagen 29 se muestran los resultados producto de la variación de la velocidad de descarga  $U_0$ , para provocar dicha variación se mantuvo constante el caudal de descarga  $Q_0$  y se fue variando el valor del diámetro de la boquilla de descarga desde  $D = 0.09 [m]$  hasta  $D = 0.50 [m]$ .

Imagen 29: Análisis de sensibilidad de la velocidad de descarga, CORMIX2



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico I se aprecia que mientras mayor sea la velocidad de descarga, mayor será la altura máxima y la distancia de impacto del chorro con el fondo. El gráfico II muestra que el mayor valor de dilución se produce con la mayor velocidad de descarga y el gráfico III muestra que el menor valor de concentración está relacionado al máximo de la velocidad de descarga.

El gráfico IV muestra que los anchos de las plumas de salmuera en el campo lejano no tienen diferencias importantes. En el gráfico V se observa que la altura de la pluma en el campo lejano es mayor mientras la velocidad de la descarga sea mayor. En el gráfico VI se aprecia que gran parte de la dilución se logra en el campo cercano, ya que desde esta zona en adelante las pendientes de las curvas de dilución son prácticamente horizontales.

Se concluye que la velocidad de descarga tiene un alto grado de influencia en los resultados en el campo cercano. En el campo cercano este parámetro permite definir la profundidad a la cual se descarga y es determinante con respecto a la eficiencia de los procesos de mezcla.

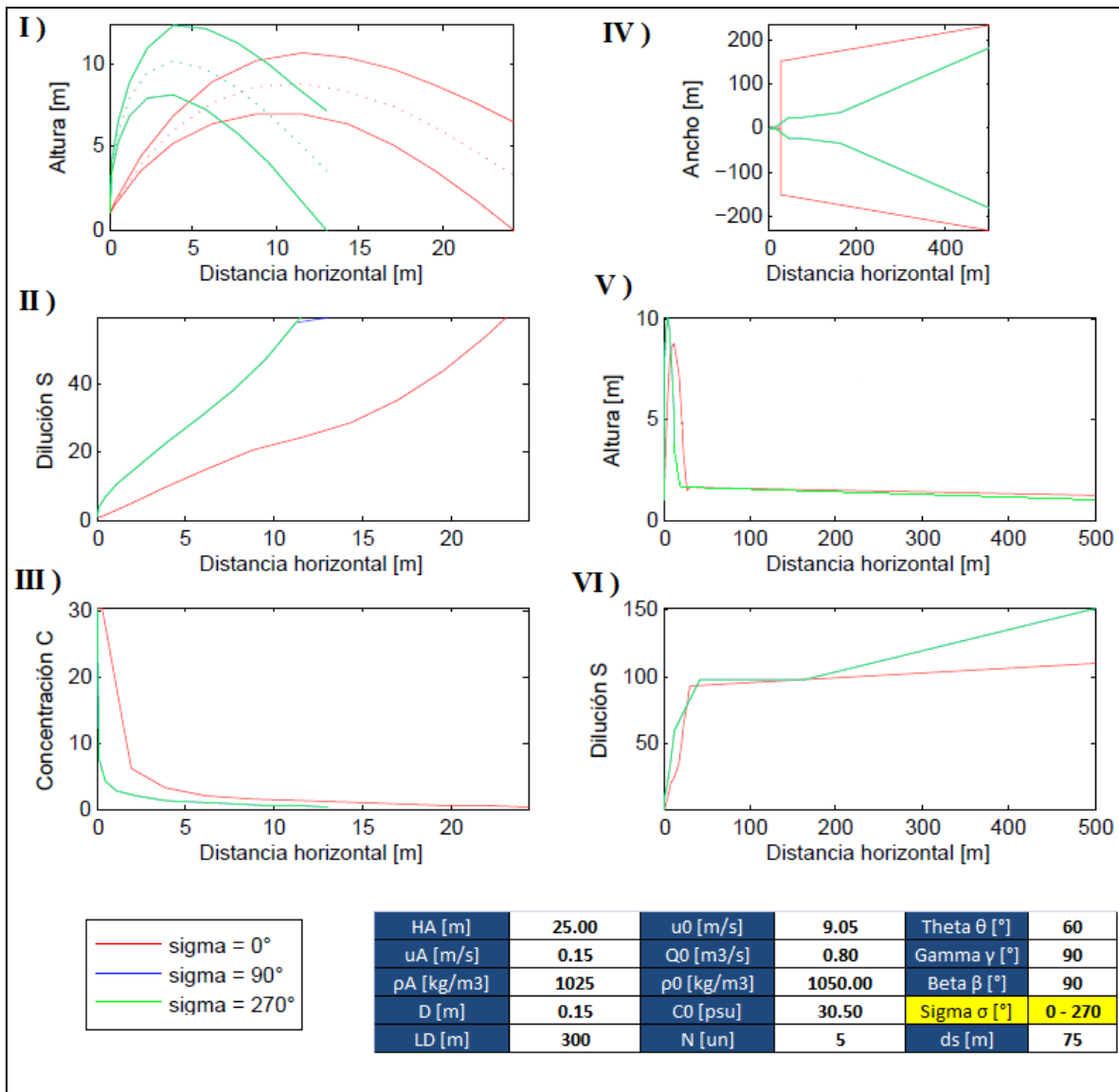
#### **6.4.4. ÁNGULO ENTRE LA CORRIENTE DEL MEDIO RECEPTOR Y EL CHORRO DESCARGADO**

En la imagen 30 se muestran los resultados producto de la variación del ángulo entre la corriente del medio receptor y el chorro descargado  $\sigma$ . En un principio el análisis considera la comparación de cuatro resultados, pero en la imagen se aprecian solamente dos, ya que los resultados correspondientes a  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  son completamente iguales (la diferencia entre ambos radica en las direcciones opuestas que avanzan cada uno). En el caso de  $\sigma = 180^\circ$ , CORMIX no puede realizar dicha simulación y advierte 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 acumulaciones de concentración en el campo cercano. Esta situación es difícil de analizar, y por lo tanto constituye un diseño indeseable".

El gráfico I muestra que los ángulos de dirección de la corriente del medio receptor respecto al chorro descargado de  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  producen alturas máximas relativamente similares que el ángulo  $\sigma = 0^\circ$ . Por el contrario, la distancia de impacto del chorro con el fondo es significativamente menor. Con respecto a la dilución, en el gráfico II se muestra que sus valores máximos son relativamente similares (en el caso de ángulos  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  dicho valor máximo se alcanza en una menor distancia recorrida), lo que habla de que los procesos de mezcla son más eficientes en el campo cercano para estas configuraciones. En el gráfico III se observa que se alcanzan menores valores de concentración para los ángulos  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$  en menor distancia recorrida.

Con respecto a los anchos y las alturas de las plumas en el campo lejano, en el gráfico IV y gráfico V respectivamente se aprecia que no existen diferencias importantes. En el gráfico VI se observa que los procesos de mezcla son más eficientes para los ángulos  $\sigma = 90^\circ$  y  $\sigma = 270^\circ$ , pues dicha configuración genera valores de dilución mayores.

Imagen 30: Análisis de sensibilidad del ángulo de la dirección de la corriente del medio receptor con respecto al chorro, CORMIX2



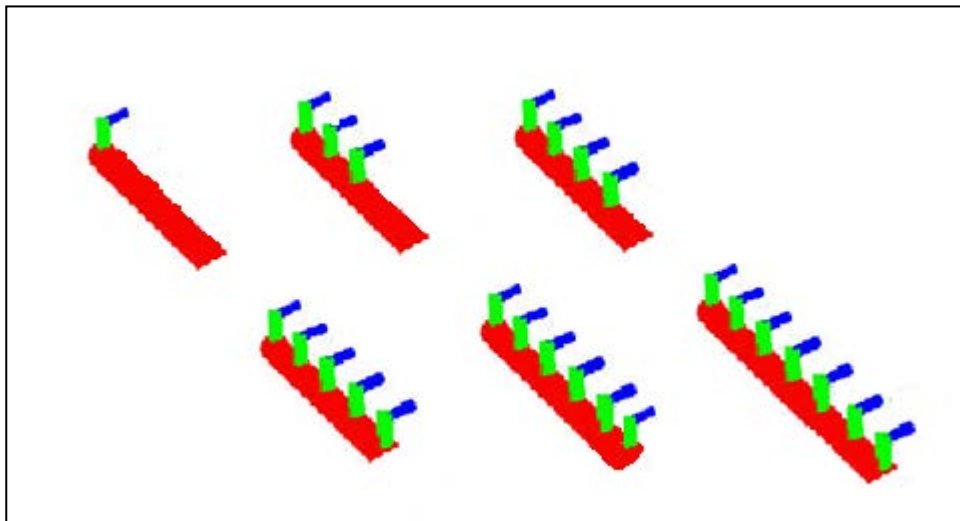
Fuente: Elaboración Propia

En este punto del estudio se tiene una discrepancia con respecto a los resultados obtenidos ya que en el análisis realizado para CORMIX1 se concluye que el ángulo que produce procesos de mezcla más eficientes en el campo lejano es el ángulo  $\sigma = 0^\circ$ . Para este caso se tuvo que revisar de manera más detallada la bibliografía disponible y se encontró un documento (Tong y Stolzenbach, 1979) que valida los resultados de CORMIX2 (ver anexo 2). Debido a la inconsistencia de los resultados se hace complejo establecer las conclusiones correspondientes.

#### 6.4.5. NÚMERO DE CHORROS DESCARGANDO

En la imagen 31 se muestran los distintos números de chorros o elevadores  $N$  que se utilizaron para realizar este análisis, estos varían desde  $N = 1$  hasta  $N = 7$ ; los cuales descargan de manera simultánea con igual velocidad. Esto se logra manteniendo el caudal de descarga constante, variando el diámetro de las boquillas y asumiendo que no existe pérdida de carga. En estos casos el diámetro varía desde  $D = 0.12 [m]$  hasta  $D = 0.40 [m]$ .

Imagen 31: Cantidad de chorros descargando, CORMIX2



Fuente: Elaboración propia

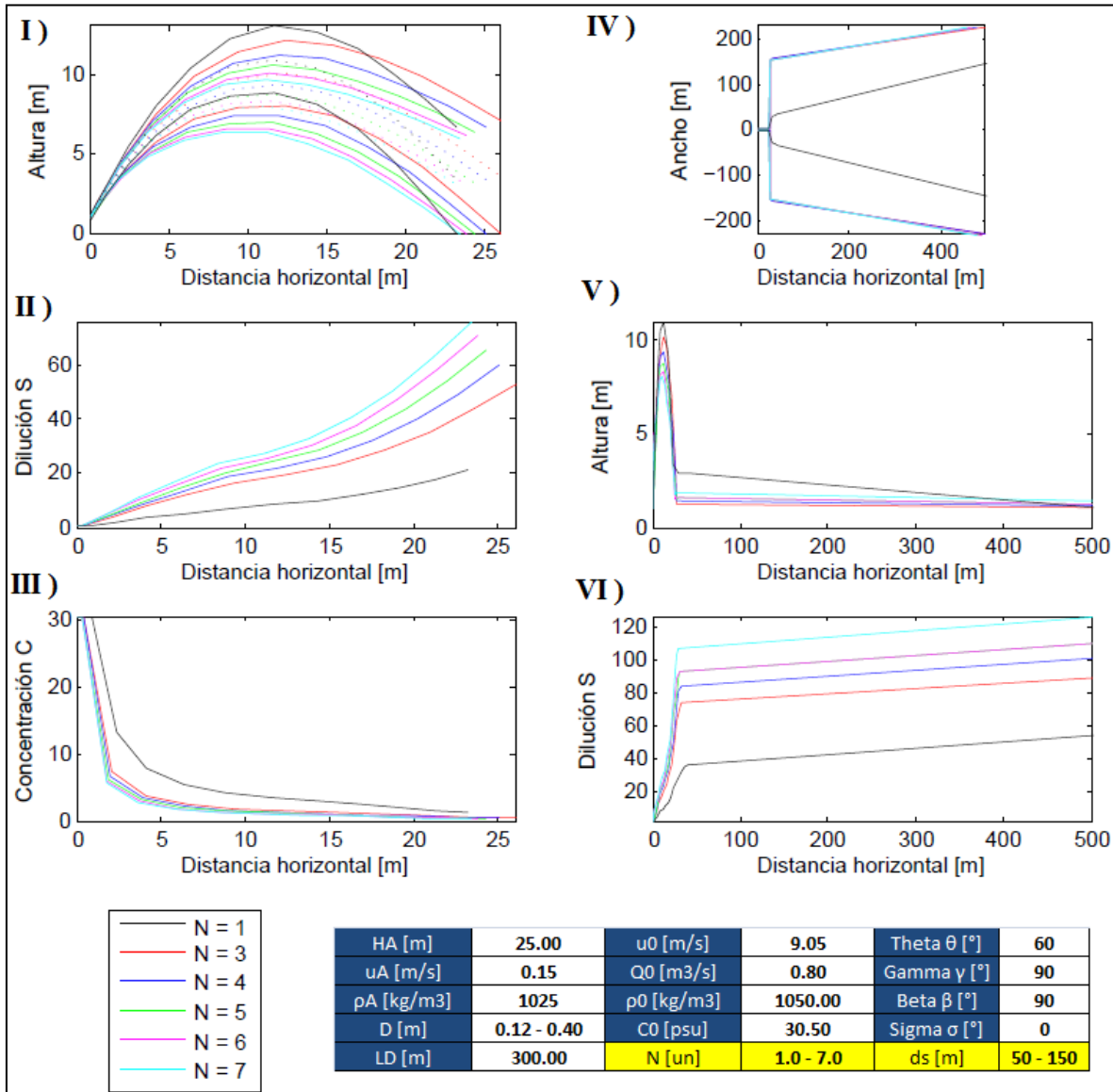
En la imagen 32 se observan los resultados producto de la variación del número de chorros que descargan. En el gráfico I se aprecia que la geometría de los chorros en el campo cercano no tiene importantes diferencias; la descarga mediante chorro individual alcanza la altura máxima y la descarga mediante siete chorros alcanza la menor altura. En el gráfico II se observa cómo van aumentando los valores de dilución a medida que aumenta la cantidad de chorros que descargan, siendo la descarga mediante siete chorros la que produce los procesos de mezcla más eficientes. En el gráfico III se muestra que los menores valores de concentración están asociados a la mayor cantidad de chorros que descargan.

En el gráfico IV se aprecia que existe una importante diferencia entre el ancho de la pluma de un chorro individual respecto al de múltiples chorros. Esto se debe a que los múltiples chorros descargan la salmuera con mayor velocidad que un chorro individual y también ocupan mayor superficie para descargar. Por otro lado se observa que no existen diferencias importantes en el ancho de las plumas cuando se trata de múltiples chorros.

El gráfico V muestra que no existen importantes diferencias en las alturas de la pluma en el campo lejano, siendo el chorro individual el que produce la mayor altura. En el gráfico VI se observa que en el campo lejano no se producen procesos de mezcla muy eficientes, pues gran parte de la dilución se logra en el campo cercano.

Se concluye que el número de chorros tienen un alto grado de influencia en la geometría y dilución en el campo cercano. Claramente los procesos de mezcla son mucho más eficientes cuando se trata de múltiples chorros descargando en comparación con un chorro individual.

Imagen 32: Análisis de sensibilidad número de chorros, CORMIX2

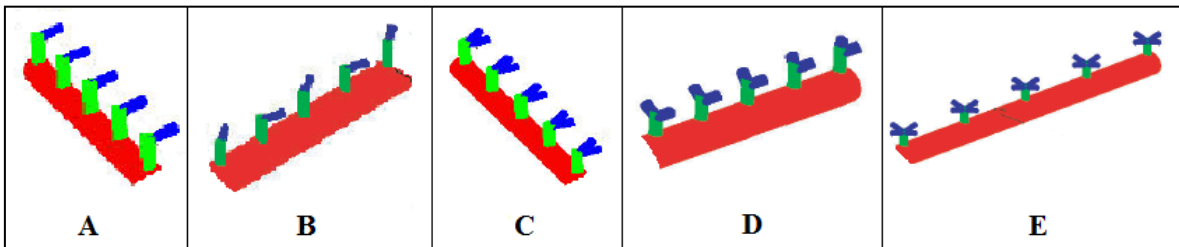


Fuente: Elaboración Propia

#### 6.4.6. CONFIGURACIÓN DE LAS BOQUILLAS DE DESCARGA

En la imagen 33 se muestran las cinco distintas configuraciones de las boquillas de descarga por elevador que se utilizaron para realizar este análisis. La configuración A se trata de una sola boquilla por elevador descargando en la misma dirección, la configuración B se trata de una sola boquilla por elevador descargando en direcciones aleatorias, la configuración C se trata de dos boquillas por elevador descargando en una sola dirección, la configuración D se trata de dos boquillas por elevador descargando en direcciones aleatorias y la configuración E que se trata de cuatro boquillas por elevador descargando en forma de roseta. Todas las configuraciones tienen: i) mismo ángulo de inclinación respecto a la horizontal, ii) mismo caudal y iii) misma distancia de separación entre chorros.

Imagen 33: Configuraciones de las boquillas de descarga utilizadas, CORMIX2



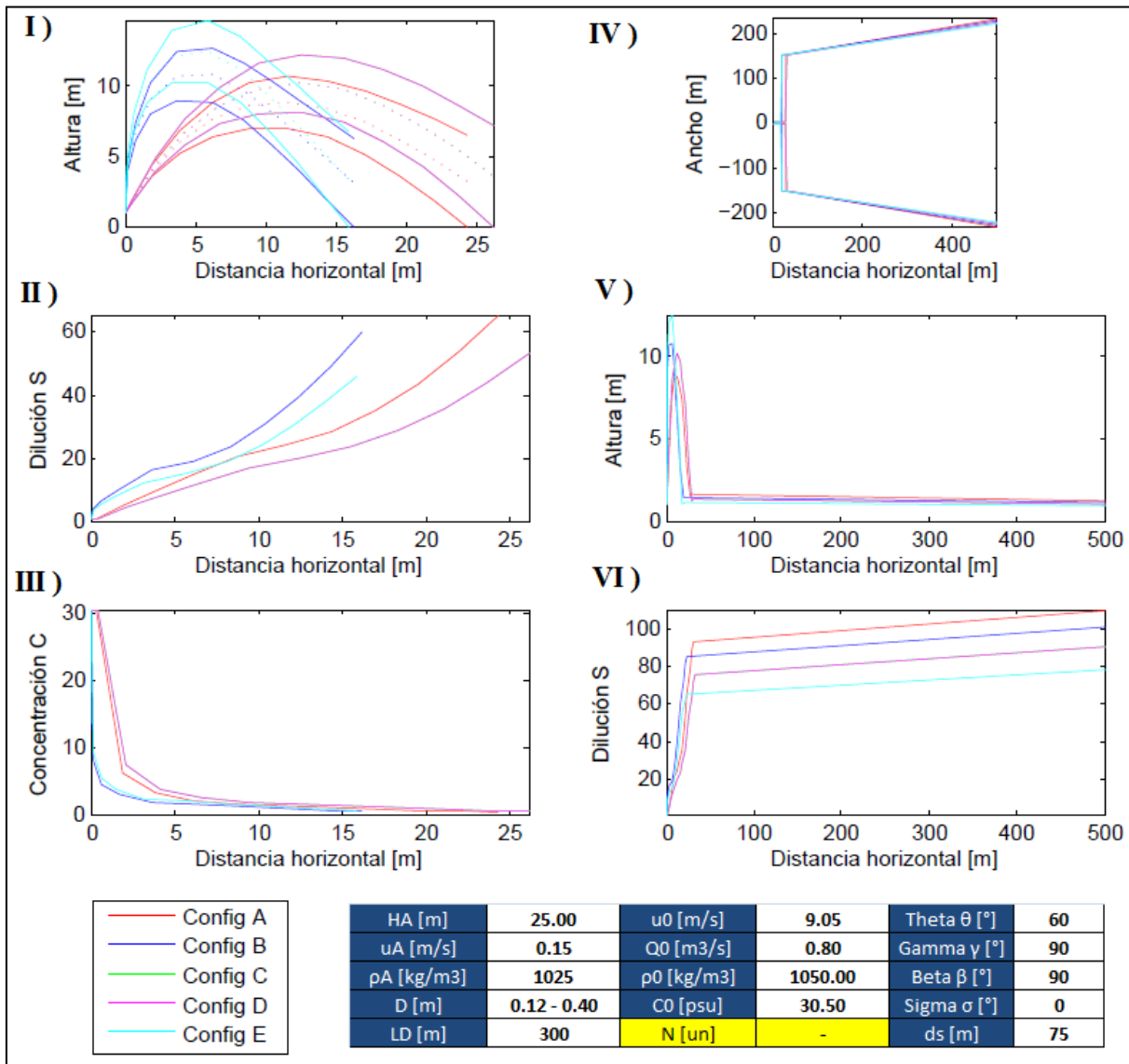
Fuente: (Doneker y Jirka R. D., 2007)

En la imagen 34 se muestran los resultados producto de la variación de la configuración de las boquillas de descarga. En esta se aprecian solo cuatro resultados y no los cinco correspondientes. Esto se debe a las hipótesis y simplificaciones que asume el software CORMIX para simular la configuración C y la configuración D, las cuales entregan exactamente los mismos resultados.

En el gráfico I se observa que la geometría de los chorros en el campo cercano tiene importantes diferencias, donde la configuración E alcanza la mayor altura, por otro lado tanto la configuración C como la D tienen la mayor distancia de impacto del chorro con el fondo. En el gráfico II se aprecia que la configuración A es la que produce mayores valores de dilución; la configuración B alcanza valores de dilución relativamente similares que la configuración A pero en menor distancia recorrida, lo que se traduce en procesos de mezcla más eficientes. El gráfico III muestra que los menores valores de concentración están asociados a la configuración B y a la configuración E, pero esta última alcanza a recorrer poca distancia antes de impactar con el fondo.

Con respecto al ancho y la altura de las plumas en el campo lejano, el gráfico IV y el gráfico V muestran respectivamente que no existen importantes diferencias en sus resultados. En el gráfico VI se observa que gran parte de la dilución es lograda en el campo cercano, pues las pendientes de las curvas de dilución se vuelven prácticamente horizontales en el campo lejano. Por otro lado se aprecia que, al igual que en el campo cercano la configuración A es la que produce mayores valores de dilución. Se concluye que el parámetro de la configuración de las boquillas de descarga tiene un alto grado de influencia tanto en la geometría como en la dilución del campo cercano, mientras que para el campo lejano no representa diferencias importantes.

Imagen 34: Análisis de sensibilidad de la configuración de las boquillas de descarga, CORMIX2



Fuente: Elaboración propia

## RESUMEN DE RESULTADOS

En la tabla 7 se resumen de los resultados del análisis de sensibilidad realizado para CORMIX2. En esta tabla se muestran los valores de las alturas máximas alcanzadas  $Y_t$ , las distancias de impacto de los chorros con el fondo  $X_i$  y las diluciones que se producen al final del campo cercano  $S_m$ . También se muestran los porcentajes de variabilidad de cada una de las variables analizadas con respecto a los valores de referencia (estos son los que tienen el porcentaje de variabilidad igual a cero). Las variables que presentan mayores diferencias entre sus resultados son prácticamente las mismas que las resultantes del análisis para CORMIX1 (identificadas con las casillas de color rojo) entre las cuales están las siguientes:

- $U_0$ : produciendo diferencias de más del 200% en los valores de dilución y cercanas al 100% en ambos valores de la geometría del chorro
- $\theta$ : produciendo diferencias de alrededor del -50% para valores tanto de dilución como de la geometría del chorro
- $\rho_0$ : produciendo diferencias cercanas al  $\pm 50\%$  tanto en la geometría del chorro como en la dilución
- $U_A$ : produciendo diferencias cercanas al 50% tanto en la distancia de impacto del chorro con el fondo como en la dilución
- $\sigma$ : produciendo diferencias cercanas al -50% en la distancia de impacto del chorro con el fondo
- $N$ : produciendo diferencias hasta más del -50% en los valores de dilución

Tabla 7: Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad, CORMIX2

Variable modificada	Valor modificado	Parámetros de cálculo		Resultados CORMIX			% de variabilidad		
		U0	F	Yt [m]	Xi [m]	Sm	Yt	Xi	Sm
UA [m/s]	0.01	9.05	47.8	10.59	15.93	-	20	-35	-
UA [m/s]	0.10	9.05	47.8	9.47	20.96	73.5	7	-14	-21
UA [m/s]	0.15	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
UA [m/s]	0.20	9.05	47.8	8.17	27.83	108.9	-7	14	17
UA [m/s]	0.30	9.05	47.8	7.28	34.71	130.4	-17	43	40
$\theta$ [°]	20	9.05	47.8	3.08	17.69	40.5	-65	-27	-56
$\theta$ [°]	40	9.05	47.8	6.07	23.39	69.8	-31	-4	-25
$\theta$ [°]	60	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
$\theta$ [°]	80	9.05	47.8	11.78	18.7	103.7	34	-23	12
D [m]	0.09	25.15	117.4	16.58	57.29	361.7	88	135	289
D [m]	0.10	20.37	131.7	14.52	47.93	273.0	65	97	194
D [m]	0.15	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
D [m]	0.20	5.09	23.3	6.27	15.18	43.7	-29	-38	-53
D [m]	0.25	3.29	13.3	4.91	10.55	24.7	-44	-57	-73
$\sigma$ [°]	0	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
$\sigma$ [°]	90	9.05	47.8	10.16	13.06	98.6	15	-46	6
$\sigma$ [°]	180	-	-	-	-	-	-	-	-
$\sigma$ [°]	270	9.05	47.8	10.16	13.06	98.6	15	-46	6
N [un]	1	9.05	47.8	11.00	23.18	36.1	25	-5	-61
N [un]	3	9.05	47.8	10.14	26.00	74.6	15	7	-20
N [un]	4	9.05	47.8	9.39	25.12	84.8	7	3	-9
N [un]	5	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
N [un]	6	9.05	47.8	8.37	23.77	100.2	-5	-2	8
N [un]	7	9.05	47.8	8.04	23.18	107.6	-9	-5	16
Config. Boq.	A	9.05	47.8	8.81	24.34	92.9	0	0	0
Config. Boq.	B	9.05	47.8	10.77	16.24	84.8	22	-33	-9
Config. Boq.	C	9.05	47.8	10.18	26.15	75.3	16	7	-19
Config. Boq.	D	9.05	47.8	10.18	26.15	75.3	16	7	-19
Config. Boq.	E	9.05	47.8	12.49	15.89	65.1	42	-35	-30

Fuente: Elaboración propia

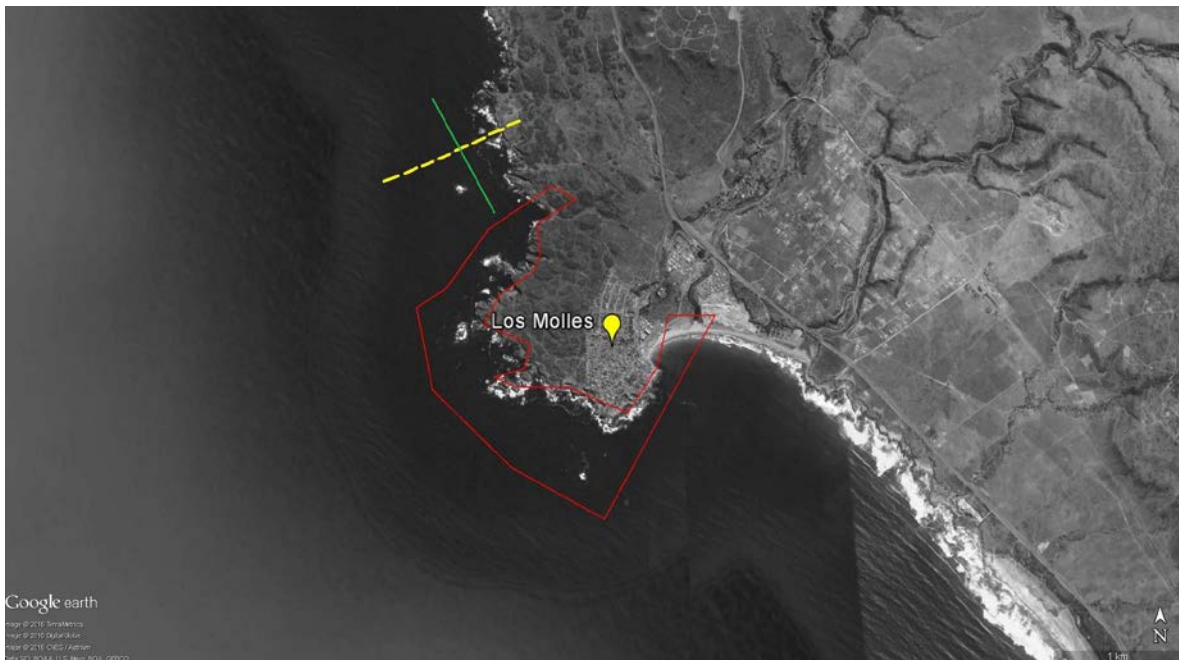
## 6.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación de una descarga de salmuera realizada mediante emisario submarino proveniente de una planta desalinizadora. El ejemplo ubica dicha planta en la costa cercana a Los Molles. Ésta es una localidad turística, pesquera y rural perteneciente a la comuna de La Ligua, provincia de Petorca, Región de Valparaíso, la cual está ubicada en las coordenadas UTM 263000 *m E* 6430400 *m S*.

En la imagen 35 se muestra una vista aérea de la localidad de Los Molles. La línea roja representa la zona de concesión marítima perteneciente al Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, la cual tiene fecha de vencimiento hasta el 31/12/2025 (Armada de Chile, 2006). Al interior de dicha zona probablemente no se podrá realizar ningún tipo de intervención a fines de un proyecto de ingeniería, pues éste interrumpiría de forma significativa las actividades de pesca que se realizan. Al sur de la concesión probablemente tampoco se podrá realizar ningún tipo de intervención, ya que se encuentra ubicada la Playa Los Molles la cual tiene una alta concurrencia de personas en las épocas de vacaciones, sobre todo en verano (González, 2016).

Por lo tanto sólo queda disponible la zona norte de la concesión marítima para instalar el emisario a través del cual se descargará la salmuera proveniente de la planta desalinizadora. La línea amarilla discontinua muestra una posible ubicación del emisario y la línea verde muestra el ancho de la ZPL en el sector. Este valor fue calculado con la siguiente expresión  $A = 1.6 [ 1.28 * H_b / m ]$  (Armada de Chile, 2012) y con parámetros arbitrarios establecidos solamente con el objetivo de poder desarrollar el ejemplo.

Imagen 35: Vista aérea de la localidad de Los Molles. Las líneas amarilla, roja y verde no están a escala con respecto a la imagen y solamente se muestran a modo de referencia.



Fuente: Elaboración propia

Se considera que la planta desalinizadora utiliza la técnica de osmosis inversa para realizar sus procesos de desalinización y que el agua de alimentación de la planta tiene buenos niveles de calidad; por lo tanto no se necesitarán grandes cantidades de aditivos químicos en sus procesos de desalinización. En la tabla 8 se muestra la caracterización teórica de los parámetros químicos concentrados en la descarga. Estos corresponden a datos entregados en el EIA para la Planta Desaladora Sur Antofagasta (GHD, 2011). También se muestran sus respectivos límites máximos permisibles, los cuales fueron presentados anteriormente (ver tabla 2 en el tópico de la normativa ambiental). Debido a que todos los parámetros se encuentran dentro de los límites permisibles, la descarga se podría realizar dentro de la ZPL, pero por factores de seguridad y flexibilidad en la concentración de los parámetros la descarga se realizará fuera de la ZPL.

Tabla 8: Parámetros químicos de la descarga de la planta desalinizadora

Parámetro	Unidad	Concentración Caracterización teórica	Límite máximo permisible
Aluminio	mg/lit	< 0.5	1
Arsénico	mg/lit	0.007	0.2
Cadmio	mg/lit	0.075	0.2
Cianuro	mg/lit	< 0.05	0.5
Cobre	mg/lit	0.05	1
Índice de Fenol	mg/lit	< 0.001	0.5
Cromo Hexavalente	mg/lit	< 0.006	0.2
Cromo	mg/lit	< 0.5	2.5
Estaño	mg/lit	< 0.05	0.5
Fluoruro	mg/lit	1.5	1.5
Manganeso	mg/lit	0.05	2
Mercurio	mg/lit	< 0.0001	0.005
Molibdeno	mg/lit	< 0.01	0.1
Niquel	mg/lit	< 0.05	2
pH	mg/lit	7.7 - 8.2	6.0 - 9.0
Plomo	mg/lit	0.18	0.2
Selenio	mg/lit	< 0.001	0.01
Sólidos suspendidos	mg/lit	22	300
Sólidos totales disueltos	mg/lit	58369	N/A
Conductividad	uS/cm	79869	N/A
Temperatura	°C	17	N/A
Sulfuro	mg/lit	< 0.05	5
Zinc	mg/lit	< 0.01	5

Fuente: (GHD, 2011)

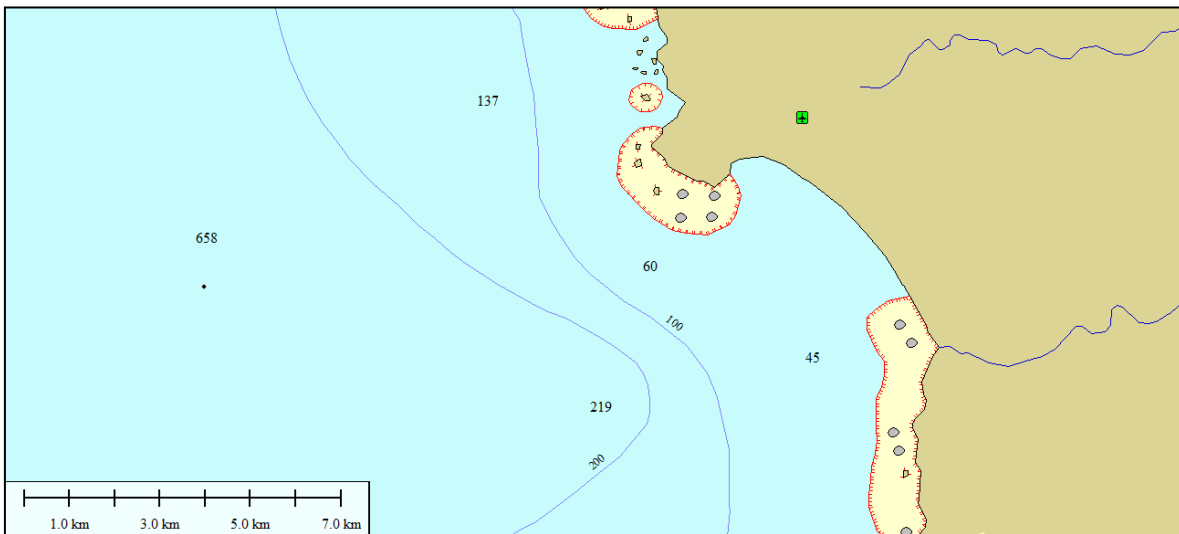
Las características  $U_A$ ,  $\rho_A$  y  $C_A$  del agua de alimentación de la planta, que son requeridas para realizar la modelación numérica de la descarga de salmuera con el software CORMIX, se definirán utilizando información de los antecedentes disponibles en las cercanías a la localidad de Los Molles. Es impetuoso mencionar que un proyecto de ingeniería real requiere este tipo de datos resultantes de mediciones in situ y de sus estudios correspondientes.

La información batimétrica será obtenida a través de la Carta Náutica Electrónica del SHOA N° 4000 (CNE SHOA N° 4000, 2006). El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada SHOA recomienda realizar un levantamiento batimétrico específico para el cálculo de la pendiente, realizado conforme a las Especificaciones Técnicas para la ejecución de Sondajes (SHOA N° 3105 2003). La pendiente se calculará como un promedio de la pendiente del sector con información de los veriles de 45, 60 y 100 [m] (Armada de Chile, 2012), se determinará mediante el cociente:

$$m = \frac{v}{d} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde  $m$  es la pendiente en el veril de  $v$  metros;  $v$  el valor del veril en metros y  $d$  la distancia desde la línea de más baja marea al veril  $v$  en metros. En la imagen 36 se muestra la información de los veriles batimétricos en las cercanías de la localidad de Los Molles y el valor aproximado de la pendiente de fondo es  $\alpha = 2.35^\circ$ .

Imagen 36: Información batimétrica en la localidad de Los Molles

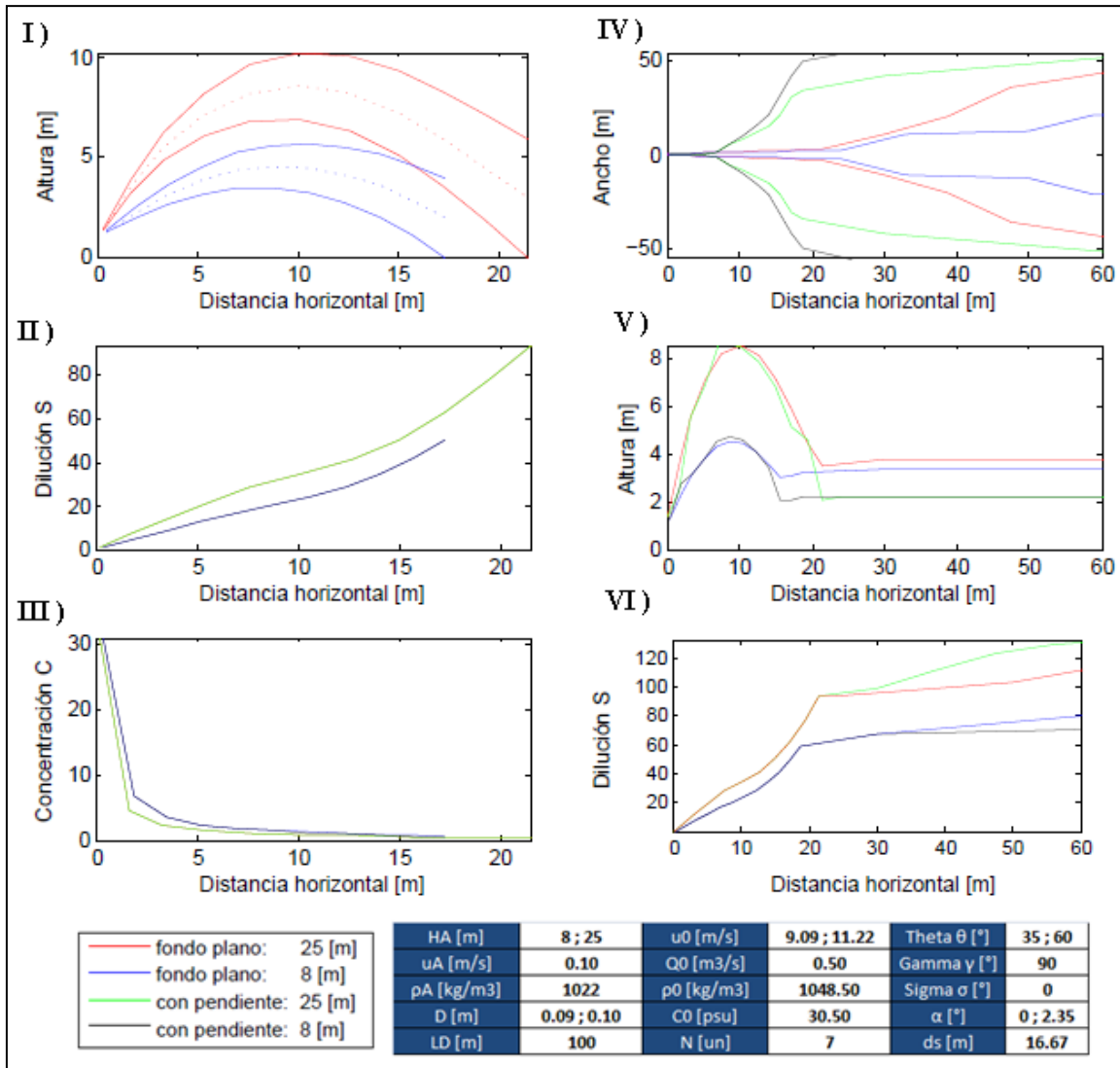


Fuente: (CNE SHOA N° 4000, 2006)

Se utilizará la Norma Australiana y Neozelandesa (NWQMS, 1992) como referencia para establecer los límites de la concentración de salinidad de la descarga. En esta se establece como estándar ambiental aceptable un incremento no mayor al 5% de la salinidad base en el medio marino receptor, luego de que ocurre el impacto del chorro con el fondo, es decir, la zona donde termina el campo cercano.

El diseño de la descarga de salmuera proveniente de la planta desalinizadora se evalúa para profundidades de  $H_A = 25$  [m] y  $H_A = 8$  [m]. Una de las principales diferencias entre ambos diseños es el costo total de cada proyecto; una descarga a mayor profundidad requiere emisarios de mayor longitud, implicando mayores gastos en construcción y faenas de instalación más complejas. En cada diseño de descarga se realizan dos modelaciones numéricas; una tomando en cuenta la pendiente de fondo y otra asumiendo fondo plano, por lo tanto se tendrán cuatro escenarios de resultados, de los cuales se determinará cual genera una zona de impacto menor.

Imagen 37: Resultados de la modelación numérica del ejemplo de aplicación



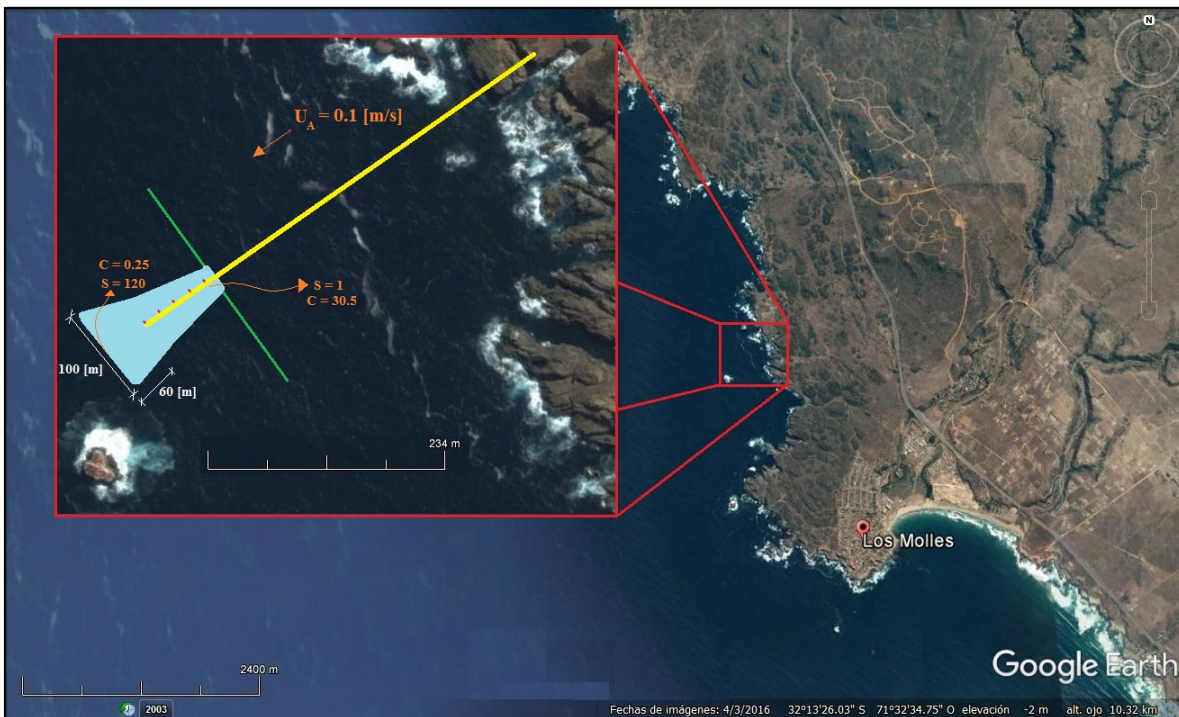
Fuente: Elaboración propia

En la imagen 37 se muestran los resultados de las modelaciones numéricas que corresponden a cada uno de los posibles escenarios definidos. Como fue mencionado anteriormente, el software CORMIX no toma en cuenta el parámetro de la pendiente de fondo para simular la descarga en el campo cercano. Debido a esto en los gráficos I, II y III correspondientes hasta la zona donde se produce el impacto del chorro con el fondo, se aprecian solo dos resultados la línea roja correspondiente al escenario de fondo plano a 25 [m] y la línea azul correspondiente al escenario de fondo plano a 8 [m]; los escenarios con pendiente entregan los mismos resultados a iguales profundidades. Los gráficos VI, V y VI muestran información hasta la zona donde termina el campo cercano. Se omite mostrar información del campo lejano debido a que los procesos de mezcla son altamente eficientes y en una poca distancia recorrida se logran alcanzar altos valores de dilución.

En el gráfico I se aprecia que existe una importante diferencia entre la altura máxima que alcanza cada chorro, siendo la de mayor profundidad la que alcanza mayor altura. Esto se debe principalmente al ángulo de inclinación de las boquilla respecto a la horizontal; las que se encuentran a 8 [m] de profundidad tienen un  $\theta = 35^\circ$ , mientras que las que se encuentran a 25 [m] de profundidad tienen un  $\theta = 60^\circ$ . El gráfico II muestra que la descarga realizada a 25 [m] tiene una mayor distancia de recorrido antes de impactar el chorro con el fondo y procesos de mezcla más eficientes.

Los gráficos IV y V muestran la geometría de las descargas hasta la zona donde termina el campo cercano. El gráfico VI muestra los valores de dilución y se aprecia que la descarga con pendiente a 8 [m] de profundidad es la que produce los procesos de mezcla menos eficientes; por lo tanto dicho diseño de descarga representa el peor escenario de los cuatro posibles. De igual manera todos los escenarios posibles entregan valores de la concentración de la salmuera inferiores al 5% antes de que se produzca el impacto de los chorros con el fondo. Por lo tanto la pluma de salmuera en el campo lejano no representaría un agente contaminante al medio ambiente marino.

Imagen 38: Alcance de salmuera descargada



Fuente: Elaboración propia

En la imagen 38 se muestra de manera aproximada el alcance que tendría la salmuera, ésta representa al escenario con pendiente a los 25 [m] de profundidad, el cual sería el que desarrolla la mayor dilución en el campo cercano. El área achurada de color celeste  $A = 6000 [m^2]$  corresponde aproximadamente al área de la pluma de salmuera ( ver gráfico IV de la imagen 37). La línea amarilla representa la posible orientación y ubicación del emisario y la línea verde el ancho de la ZPL.

## 7. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones son enumeradas continuación según el orden de desarrollo del trabajo y de la presentación de los resultados:

- a. La comparación de resultados entre la descripción teórica del fenómeno y la modelación numérica realizada con CORMIX, es adecuada, sobre todo en el campo cercano. Por lo tanto se concluye que ambos métodos son aplicables a la hora de pre-diseñar una descarga de salmuera, siempre y cuando se tengan en consideración sus hipótesis, simplificaciones y restricciones.
- b. La descripción teórica del fenómeno sirve para pre-diseñar una descarga de salmuera en aguas profundas, en donde las velocidades de las corrientes del medio receptor sean muy bajas, idealmente cercanas a cero y en donde la pendiente del fondo sea aproximadamente horizontal. Llevando el ejemplo a un caso en la vida real, podría tratarse de una descarga de salmuera en zonas abiertas del océano a más de 20 [m] de profundidad, en un sitio donde las corrientes del medio receptor tengan un comportamiento aproximadamente uniforme y de bajas intensidades. Un lago de similares características con una profundidad importante, también podría ser un ejemplo de aplicación en la vida real para la descripción teórica del fenómeno.
- c. La modelación numérica realizada con CORMIX permite ampliar el abanico de posibles escenarios de descargas en la vida práctica, pues éste considera otras variables ambientales que en la descripción teórica del fenómeno se ignoran. Estas variables son las siguientes: la velocidad de la corriente del medio receptor uniforme y unidireccional, distintas configuraciones de la densidad del medio receptor, distintas configuraciones del difusor y la pendiente y la rugosidad del fondo. Sin embargo es necesario precisar que dentro de sus limitaciones, CORMIX asume una serie de hipótesis y simplificaciones que lo dejan fuera de alcance en ambientes donde el flujo es inestable.
- d. El análisis de sensibilidad permitió definir parámetros óptimos que ayudarían a disminuir los riesgos de contaminación y minimizar el potencial impacto ambiental al medio ambiente marino. Se determinó que: i) el ángulo de inclinación del chorro respecto a la horizontal  $\theta = 60^\circ$  genera los procesos de mezcla más eficiente, ii) velocidades de corrientes relativamente altas ayudan a diluir la salmuera concentrada con mayor eficiencia, iii) la orientación del chorro tenga la misma dirección que la corriente del medio receptor genera procesos de mezclas más eficientes y iv) descargas mediante múltiples chorros entregan mayores valores de dilución en menor distancia recorrida que las descargas mediante chorro individual.
- e. Las descargas mediante múltiples chorros modeladas a través de CORMIX2 generan procesos de mezcla más eficientes que las descargas de chorros individuales modeladas con CORMIX1. El análisis de sensibilidad comprobó que ambos subsistemas tienen un comportamiento similar respecto a la variabilidad de sus resultados.
- f. En el campo cercano cuando el comportamiento de la salmuera descargada es del tipo chorro; los parámetros fundamentales al momento de diseñar la descarga son los siguientes: i) ángulo de inclinación del chorro respecto a la horizontal, ii) velocidad de descarga y iii) dirección de la corriente del medio receptor respecto al chorro.

- g. En el campo lejano cuando el comportamiento de la salmuera descargada es del tipo pluma; los parámetros fundamentales son los siguientes: i) velocidad y dirección de la corriente del medio receptor, ii) diferencia de densidades entre ambos fluidos y iii) ángulo de inclinación de la pendiente de fondo.
- h. Se concluyó que la velocidad y dirección de la corriente del medio receptor tiene un alto grado de influencia en el comportamiento de la pluma de salmuera. Por lo tanto es fundamental que los datos usados al momento de diseñar la descarga representen adecuadamente la realidad. Idealmente se requieren mediciones in situ con instrumentos confiables y adecuados.
- i. Se concluyó que el parámetro de la inclinación del chorro con respecto a la horizontal tiene un alto grado de influencia en el comportamiento del chorro. Éste está directamente relacionado con la profundidad a la cual se diseña la descarga.
- j. Se determinó que con altas velocidades de descarga se obtienen procesos de mezcla más eficientes en el campo cercano y por lo tanto los más altos valores de dilución en pequeñas distancias recorridas. No obstante es imperioso mencionar que dichas altas velocidades implican altos costos en proyectos de ingeniería reales; principalmente por factores de construcción y operación de todo el sistema de descarga.
- k. Cuando aparece el parámetro de la pendiente de fondo en la simulación del fenómeno, el efecto de la gravedad produce una aceleración pendiente abajo sobre el flujo de la capa hipersalina que se va expandiendo horizontalmente sobre el fondo. Esto produce anchos de mayor dimensión en comparación a cuando no hay presencia de la pendiente de fondo. CORMIX en su simulación si considera la rugosidad del fondo asociada a la fricción.
- l. Es impetuoso mencionar que no se encontró bibliografía que valide los resultados para el subsistema CORMIX2 con respecto a las diluciones. El único documento encontrado solamente se encarga de validar la geometría para un difusor que descarga a través de ocho corros sumergidos con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal  $\theta = 90^\circ$ .
- m. En el ejemplo de aplicación de una descarga de salmuera proveniente de una planta desalinizadora, se utilizaron parámetros definidos como óptimos para diseñar y se determinó el área de impacto o de influencia generada en el medio ambiente marino. A través de este ejemplo se comprobó, que antes del final de la región del campo cercano los valores de la concentración de salinidad cumplen con la normativa (NWQMS, 1992). Esta establece un incremento no mayor al 5% de la salinidad base en el medio marino receptor como límite estándar ambiental aceptable.
- n. En Chile no existe una ley específica que establezca los límites de los parámetros químicos y físicos presentes en una descarga de salmuera. Actualmente La DIRECTEMAR está trabajando en un documento que serán las directrices para la evaluación de proyectos relacionados a desalinización.

## 8. **BIBLIOGRAFÍA**

- Armada de Chile: D. G. T. M. y M. M. ORDINARIO N° 12600/679. Establece procedimientos para fijar el ancho de la zona de protección litoral. 2012
- Armada de Chile: D. G. T. M. y M. M. Reglamento sobre Concesiones Marítimas. 2006
- Armada de Chile: D. G. T. M. y M. M. Directrices para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalinización en jurisdicción de la autoridad marítima. 2015
- Blenninger T. y Jirka G. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. 2007
- Carta Náutica Electrónica SHOA N° 4000. Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso. 2006
- Doneker R. y Jirka G. CORMIX user manual. 2007
- Doneker R. y Jirka G. CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine waste water disposal. 2001
- D. S. N° 90: Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia. Establece Normas de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales. 2001
- D. S. N° 40: Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia. Reglamento del Sistema de Evaluación Ambiental. 2013
- ECOAGUA Ingenieros. Estudio de la descarga de salmuera, Planta Desalinizadora Sur Antofagasta. 2011
- EPA: US Environmental Protection Agency. Aquatic Life Ambient Water Quality Criteria. 1986
- Escudero J. Que es un modelo. 2010
- Fuentes F. y Massol-Deyá A. Manual de laboratorios: Ecología de microorganismos. 2002
- GHD. Declaración de Impacto Ambiental Planta Desaladora Sur Antofagasta. 2011
- Gerhard Jirka et al.: Hydrodynamic Classification of Submerged Single-Port Discharges 1991a
- Gerhard Jirka et al.: Hydrodynamic Classification of Submerged Multi-Port Discharges 1991b
- González J. Centro de pesca artesanal y apoyo comunitario asociado al turismo gastronómico, marítimo y de productos artesanales. 2016

- IHA y CEDEX: Instituto Ambiental de Hidráulica de Cantabria y el Centro de Estudios de Puertos y Costas. Metodología de diseño de los vertidos al mar de la salmuera, para reducir el impacto ambiental de las plantas desalinizadoras. 2011
- IHA y CEDEX: Instituto Ambiental de Hidráulica de Cantabria y el Centro de Estudios de Puertos y Costas. Teoría de chorros y plumas hiperdensas. 2008
- IHA y CEDEX: Instituto Ambiental de Hidráulica de Cantabria y el Centro de Estudios de Puertos y Costas. Descripción general de los modelos del software CORMIX. 2007
- IHA y CEDEX: Instituto Ambiental de Hidráulica de Cantabria y el Centro de Estudios de Puertos y Costas. Módulo CORJET. 2009a
- IHA y CEDEX: Instituto Ambiental de Hidráulica de Cantabria y el Centro de Estudios de Puertos y Costas. Subsistema CORMIX1. 2009b
- IHA y CEDEX: Instituto Ambiental de Hidráulica de Cantabria y el Centro de Estudios de Puertos y Costas. Subsistema CORMIX2. 2009c
- Jirka G. y Doneker R. Systems for mixing zone analysis of brine CORMIX. 2001
- Jirka G. Integral model for turbulent bouyant jets in unbounded stratified flows. Part I single round jet. 2004
- Jirka G. y Doneker R. CORMIX1 an expert system for mixing zone analysis of conventional and toxic single port aquatic discharges. 1991a
- Jirka G. y Doneker R. CORMIX1 an expert system for mixing zone analysis of conventional and toxic for multiport aquatic discharges. 1991b
- LEGCOHK: Legislative Council of the Hong Kong Special Administration. Seawater desalation technologies. 2015
- Ley N° 19300: Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. 2011
- Ley N° 2222: D. G. T. M y M. M. Ley de Navegación. 2005
- Losada I. y Palomar P. Desalinización de agua marina en España: Aspectos a considerar en el diseño de vertidos para protección del medio marino. 2008
- Malcangio D. y Petrillo A. Brine outfalls: State of the art. 2011
- Medina E. y Fernández J. Informe nacional sobre la gestión de agua en Chile. 2013
- NWQMS: National Water Quality Management Strategy. Australian and New Zeland Guidelines for Fres and Marine Water Quality. 2000

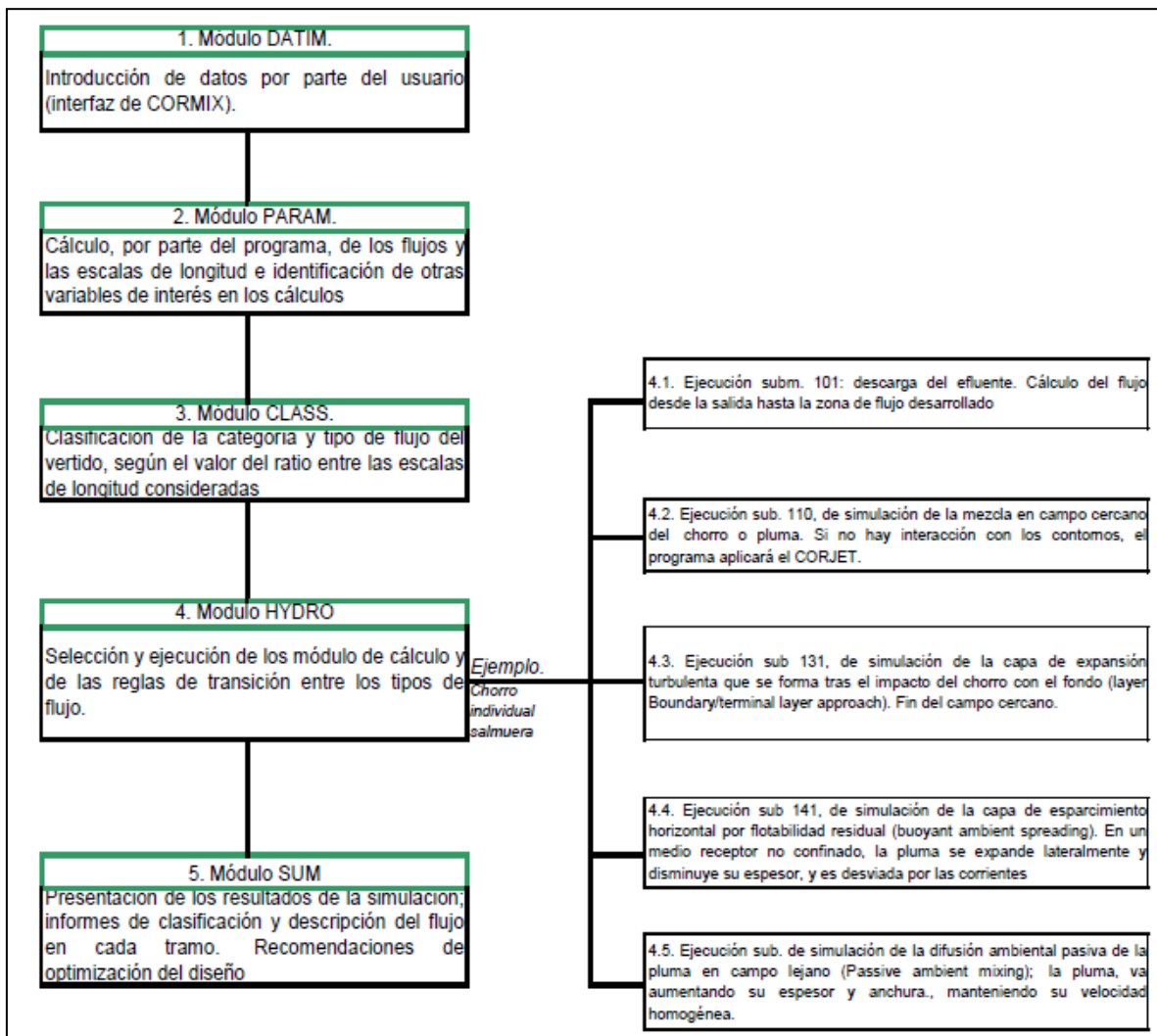
- ONU: Organización de las Naciones Unidas. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el desarrollo sostenible. 2012
- Palomar P. y Losada I. Impacts of brine discharge on the marine environment, modelling as a predictive tool. 2011
- Pérez D., Palomar P., Castañedo S. y Alvarez A. Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar. 2015
- Real Decreto 927/1988: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España. Estándar de Calidad Secundaria del Agua. 1988
- Roberts et al. Mixing in inclined dense jets. 1997. Journal of Hydraulic Engineering 1997.
- SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Pub N° 3105. Especificaciones Técnicas para la ejecución de Sondajes. 2003
- Soto G., Soto M y Sáez C. Desalación de agua de mar mediante sistema de osmosis inversa para provisión de agua potable en Isla Damas. 2013
- Tate P., Scutarò S. y Cathers B. Marine outfalls. Springer Handbook of Ocean Engineering. 2012
- Tong S. y Stolzenbach K. Submerged discharges of dense effluent. Water Resources and Hydrodynamics Department of Civil Engineering. MIT. 1979
- Torres M. La desalación de agua de mar y el vertido de salmuera. CEDEX. 2004
- Winckler P. Modelado de procesos costeros. Apuntes de clases. 2016

## 9. ANEXOS

### ANEXO 1: ESQUEMA DE SECUENCIA DE TRABAJO CORMIX

En la imagen 39 se muestra un esquema que resume la secuencia de trabajo por parte de un usuario en cualquiera de los subsistemas o módulos del software CORMIX. Esta secuencia resulta transparente al usuario, que únicamente interactúa con la interfaz de introducción de datos y con las hojas de resultados (IHA y CEDEX,2007):

Imagen 39: Esquema de secuencia de trabajo CORMIX



Fuente: (IHA y CEDEX, 2007)

## ANEXO 2: CÓDIGO MATLAB PARA GRAFICAR LOS RESULTADOS

```

% =====
%% Descripción
% =====
% ALGORITMO DE CALCULO DE PLUMA DE SALMUERA
% Función: Calcula la geometría de una pluma de descarga para una
% inclinación de 60° con respecto a la horizontal
% Autor: Pablo Federici
% Tutor: Patricio Winckler
% Archivo: 60°.m
% Fecha: 22/4/2016
% Texto: Roberts et al. (1997). Mixing in inclined dense jets.

% =====
%% Inicialización
% =====
clear all; clc; close all;
lim = 1 %input('Usa restricción a Froude? (Sí = 1 / No = 0): ');

% =====
%% Declaración de constantes
% =====

ro0 = 1200;          % Densidad efluente (depende de la eficiencia del proceso)
roa = 1025;          % Densidad medio
Q = 0.1;             % Caudal de descarga [m3/s]
g = 9.8;             % Aceleración de gravedad
d = 0.1;             % Diámetros [m]
Fmin = 20;           % Número de Froude mínimo (Roberts, 1997)

% =====
%% Cálculos
% =====

N = length(d);          % Cantidad de diámetro
gprima0 = g*((ro0-roa)/roa); % Densidad modificada

for i = 1:N;
    u(i) = (4*Q)/(pi*(d(i)^2)); % Velocidad para descarga de sección circular
    F(i) = u(i)/((gprima0*d(i))^0.5); % Número de Froude (Appendix II; Roberts, 1997)
    if lim == 1
        if F(i) < Fmin
            F(i) = 0;
        end
    end
end

c1 = 2.2;             % Coeficiente Yt (Ec.11; Roberts, 1997)
c2 = 2.4;             % Coeficiente Xi (Tabla 2; Roberts, 1997)
c3 = 1.6;             % Coeficiente Si (Ec.13; Roberts, 1997)
c4 = 2.6;             % Coeficiente Sm (Ec.14; Roberts, 1997)
c5 = 9.0;             % Coeficiente Xm (Tabla 2; Roberts, 1997)
c6 = 0.7;             % Coeficiente Yl (Tabla 2; Roberts, 1997)

Yt = c1.*d.*F;       % Altura máxima
Xt = Yt/tand(60);    % Distancia de la altura máxima
Xi = c2.*d.*F;       % Distancia donde impacta el chorro con el fondo
Si = c3.*F;          % Dilución en el lugar de impacto
Sm = c4.*F;          % Dilución mínima
Xm = c5.*d.*F;       % Longitud capa densa de salmuera (campo lejano)
Yl = c6.*d.*F;       % Altura capa densa de salmuera (campo lejano)

X = [ 0*Xt ; Xt ; Xi ; Xm ; 1*Xm ];
Y = [ 0*Yt ; Yt ; Yl ; Yl ; 0*Yt ];
S = [ ones(1,1) ; ones(1,1) ; Si ; Sm ; Sm];
    
```

```
for j = 1:N
    S(2,j) = (S(3,j) - 1)/X(3,j)*X(2,j) + 1;
end
```

$$C = 1./S;$$

```
% =====
%% Ploteo
% =====
```

```
figure(1)
subplot(3,2,1)
set(gcf,'position',[25 50 800 600]);
for r = 1:N;
    plot(X(:,r),Y(:,r),'-o');
    hold all
end
```

```
x1 = [0 ; 0.25 ; 0.81 ; 1.41 ; 2.08 ; 2.90 ; 3.93 ; 4.93 ; 5.62 ; 6.17 ; 6.61 ; 6.97 ; 8 ; 30];
y1 = [1 ; 1.43 ; 2.38 ; 3.30 ; 4.17 ; 4.90 ; 5.24 ; 4.83 ; 4.05 ; 3.10 ; 2.09 ; 1.05 ; 1 ; 1];
plot(x1,y1,'r'); hold all
```

```
x2 = [0;0.2500000000000000;0.8100000000000000;1.4100000000000000;2.0900000000000000;2.9000000000000000;3.9300000000000000;4.9400000000000000;5.6600000000000000;6.2100000000000000;6.6400000000000000];
```

```
y2 = [1;1.4300000000000000;2.3800000000000000;3.3100000000000000;4.1800000000000000;4.9100000000000000;5.2500000000000000;4.8400000000000000;4.0100000000000000;3.0600000000000000;2.0400000000000000];
```

```
b2 = [0.0500000000000000;0.0600000000000000;0.1800000000000000;0.3000000000000000;0.4300000000000000;0.5800000000000000;0.7500000000000000;0.7800000000000000;0.7900000000000000;0.8500000000000000;0.9200000000000000];
```

```
yo = y2+b2;
yd = y2-b2;
plot(x2,yo,'r-'); hold all
plot(x2,yd,'r-'); hold all
```

```
xlabel('Distancia horizontal [m]')
ylabel('Altura [m]')
axis equal
ylim([0 max(max(Y))]);
xlim([0 max(max(X))]);
leg = legend('Roberts','CORMIX');
set(leg,'location','northeastoutside','fontsize',10);
```

```
subplot(3,2,3)
set(gcf,'position',[25 50 600 600]);
for r = 1:N;
    plot(X(:,r),S(:,r),'-o');
    hold all
end
```

```
s1 = [1 ; 1 ; 2.9 ; 4.7 ; 6.2 ; 7.5 ; 9 ; 10.6 ; 12.7 ; 15.3 ; 18.5 ; 22.1 ; 24 ; 26.5];
plot(x1,s1,'r'); hold all
```

```
xlabel('Distancia horizontal [m]')
ylabel('Dilución S')
ylim([0 max(max(S))]);
xlim([0 max(max(X))]);
%leg = legend('Roberts','CORMIX LC');
%set(leg,'location','northeastoutside','fontsize',6)
```

```
subplot(3,2,5)
set(gcf,'position',[25 50 600 600]);
for r = 1:N;
```

```
semilogy(X(:,r),C(:,r),'-o');
hold all
end
c1 = 1./s1;
semilogy(x1,c1,'r'); hold all

xlabel('Distancia horizontal [m]')
ylabel('Concentración C/Co')
grid off
ylim([0 max(max(C))])
xlim([0 max(max(X))])
%leg = legend('Roberts','CORMIX LC');
%set(leg,'location','northeastoutside','fontsize',6)

subplot(3,2,2)
set(gcf,'position',[25 50 800 600]);

xh1 = [0;300;600.110000000000;1274.900000000000;1949.700000000000];
bv1 = [0;0.0100000000000000;0.0300000000000000;0.0700000000000000;0.0800000000000000];
bh1 = [0;1500;3483.870000000000;3690.100000000000;3885.390000000000];
hb1 = -1.*bh1;
plot(xh1,bh1,'r'); hold all
plot(xh1,hb1,'r'); hold all
xlabel('Distancia horizontal [m]')
ylabel('Ancho [m]')
%axis equal
ylim([min(min(hb1)) max(max(bh1))]);
xlim([min(min(xh1)) max(max(xh1))]);

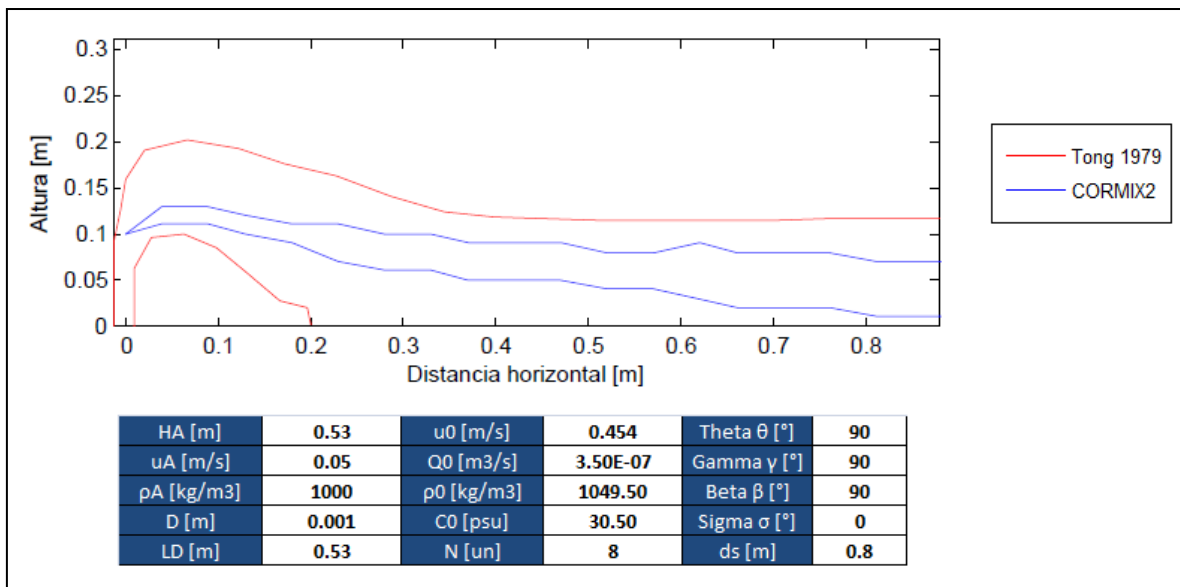
subplot(3,2,4)
set(gcf,'position',[25 50 800 600]);
plot(xh1,bv1,'r'); hold all
xlabel('Distancia horizontal [m]')
ylabel('Espesor [m]')
%axis equal
ylim([0 max(max(bv1))]);
xlim([min(min(xh1)) max(max(xh1))]);

subplot(3,2,6)
set(gcf,'position',[25 50 800 600]);
xs = [7;600;1274;1949];
sx = [22.1;35.7;57.8;65.7];
plot(xs,sx,'r'); hold all
xlabel('Distancia horizontal [m]')
ylabel('Dilución S')
%axis equal
ylim([0 max(max(sx))]);
xlim([min(min(xs)) max(max(xs))]);
% =====
```

## ANEXO 2: VALIDACIÓN DEL SUBSISTEMA CORMIX2

En la imagen 40 se muestra la reproducción de la validación de la geometría del subsistema CORMIX2 realizado por (Tong y Stolzenbach, 1979). Como fue mencionado anteriormente este documento valida el subsistema para una descarga mediante un difusor con una sola boquilla de descarga por elevador con un ángulo  $\theta = 90^\circ$ , descargando en un medio receptor homogéneo con un ángulo  $\sigma = 0^\circ$ , en la tabla adjunta en la imagen se aprecian todos los parámetros utilizados para dicha validación.

Imagen 40: Validación de la geometría del subsistema CORMIX2



Fuente: Elaboración propia