



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA DE  
DESCARGA DEL EMISARIO SUBMARINO DE QUINTERO,  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS”**

**Daniela Andrea Arregui Cruz**

Octubre 2012

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA DE DESCARGA DEL  
EMISARIO SUBMARINO DE QUINTERO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
MODELOS NUMERICOS”**

Daniela Andrea Arregui Cruz.

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

SR, MARIO CÁCERES

Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

SRA. CAROLINA CALVETE

Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

GERARDO LEIGHTON

Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **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 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 propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a sus derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.*

**Mario Cáceres**

*Profesor Guía*

**Daniela Arregui Cruz**

*Alumna Memorista*

## AGRADECIMIENTOS

*El presente trabajo es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyéndolo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.*

*Agradecer a toda mi familia, en especial a mis padres y a mi hermano que me acompañaron a lo largo del camino, brindándome la fuerza necesaria para continuar y momentos de ánimo; así mismo ayudándome en lo que fuera posible, dándome consejos y orientación, estoy muy agradecida especialmente a mi mamá, gracias.*

*Agradecer, también, a las increíbles personas que conocí en mis años de Universidad, con quienes formamos una gran y linda amistad, quienes fueron mi familia viña marina y siempre estuvieron conmigo en los momentos de pena y alegría. Especialmente a Soledad Hidalgo, quien además de acompañarme en la etapa universitaria me acompañó en la etapa más linda de mi vida...la espera de Florencia, mi hija, gracias amiga.*

*Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a María Karina Oyarce por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis. Debo destacar, por encima de todo, su disponibilidad y paciencia; no cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado y, además, ha significado el surgimiento de una incipiente amistad*

*Finalmente, el más sincero agradecimiento a mi profesor guía, Mario Cáceres, por toda la ayuda prestada a lo largo de este camino.*

*Daniela Arregui Cruz*

**DEDICATORIA**

*A Vicky y Ricardo, mis padres, por su amor y apoyo incondicional; gracias por estar siempre presentes en mi vida, por estar en los buenos y malos momentos, por hacerme la persona que soy y por sentirse siempre orgullosos de mí.*

*A mi hija, Florencia, por ser la alegría de mi vida, quien me prestó el tiempo que le pertenecía para terminar este trabajo y es, y será por siempre, mi fuente de inspiración para seguir adelante.*

## RESUMEN

El presente estudio se orientó a determinar el comportamiento de la pluma generada por la descarga de aguas servidas del emisario de ESVAL al medio ambiente marino, en la Bahía de Quintero. Para ello, se emplearon los modelos computacionales Visual Plumes para dilución inicial, RMA2 para la simulación hidrodinámica y RMA4 para transporte de contaminantes. Se dispuso de datos de corrientes, viento, mareas, temperatura, salinidad, coliformes y otras variables de la columna de agua, para contrastar y relacionar los datos modelados.

Los datos de corrientes fueron altamente correlacionados en la componente  $u$  con los datos modelados por RMA2, mientras que en la componente  $v$  estuvieron en un rango satisfactorio para los casos analizados (sicigias y cuadraturas), aspecto que podría atribuirse a limitaciones de esta herramienta computacional. Luego de simular el campo de corrientes generado bajo distintos escenarios de forzamiento externo por mareas y viento, se observó que la corriente tiene una magnitud promedio mucho mayor en sicigias (0,081 m/s) que en cuadratura (0,033 m/s). El campo de corrientes obtenido indica que en condiciones de pleamar las corrientes ingresan a la bahía y en bajamar las corrientes salen de la bahía

La modelación de la pluma de dispersión con Visual Plumes sugiere que ésta se mantiene en los 38 m de profundidad y se diluye totalmente a 90 m del punto de descarga. Mediante RMA4 se simuló el transporte del contaminante, determinándose que los valores se encontraban bajo los límites de descarga máxima de la normativa vigente, de 1000 coliformes NMP/100ml dentro de ZPL; 70 coliformes NMP/100ml en áreas de manejo, y ausencia de concentraciones para contacto directo en la costa, con lo cual se determinó que el emisario cumple con la legislación chilena vigente.

## INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1-1
1.1	GENERALIDADES.....	1-1
1.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	1-3
1.3	ALCANCES.....	1-4
2	MARCO TEÓRICO.....	2-1
2.1	PROCESOS DE MEZCLA PARA DESCARGAS MULTIORIFICIO SUMERGIDAS.....	2-1
2.1.1	DESCARGA.....	2-1
2.1.2	PROCESOS DE CAMPO CERCANO.....	2-2
2.1.3	PROCESOS DE CAMPO INTERMEDIO.....	2-5
2.1.4	PROCESOS DE CAMPO LEJANO.....	2-6
2.2	MODELOS COMPUTACIONALES .....	2-8
2.2.1	MODELO INTEGRAL DE PLUMA DE CAMPO CERCANO .....	2-9
2.2.2	MODELOS INTEGRALES DE PLUMA de CAMPO LEJANO .....	2-10
2.3	NORMATIVA CHILENA VIGENTE.....	2-16
2.3.1	D.S. Nº 90/2000 MINSEGPRES: “Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales “ .....	2-16
2.3.2	NCH 1333.Of 78: “Requisitos de calidad del agua para diferentes usos” .....	2-20
3	OBJETIVOS.....	3-1
3.1	OBJETIVO GENERAL .....	3-1
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3-1
4	METODOLOGÍA.....	4-1
4.1	GENERALIDADES.....	4-1
4.1.1	EMISARIO TERRESTRE.....	4-2
4.1.2	Planta de tratamiento preliminar de aguas servidas .....	4-4
4.1.3	Emisario submarino .....	4-6
4.2	RESTRICCIONES DEL ENTORNO.....	4-8
4.3	RESTRICCIONES AMBIENTALES.....	4-8
4.4	CONDICIONES NATURALES .....	4-9

4.4.1	Batimetría del sector .....	4-9
4.4.2	Corrientes marinas.....	4-11
4.4.3	Mareas.....	4-11
4.4.4	VIENTOS .....	4-11
4.4.5	Columna de agua.....	4-12
4.5	MODELACION DE LA DILUCIÓN INICIAL .....	4-14
4.6	MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN.....	4-14
5	RESULTADOS .....	5-18
5.1	CORRIENTES.....	5-18
5.2	MAREAS.....	5-23
5.3	VIENTOS .....	5-24
5.4	COLUMNA DE AGUA .....	5-26
5.4.1	Temperatura .....	5-26
5.4.2	Salinidad .....	5-26
5.4.3	Oxígeno disuelto .....	5-26
5.4.4	Análisis bacteriológico .....	5-27
5.4.5	ANÁLISIS QUÍMICO .....	5-28
5.4.6	Transparencia del agua .....	5-29
6	MODELACIÓN.....	6-1
6.1	DETERMINACIÓN DE LA DILUCIÓN INICIAL .....	6-1
6.2	MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN.....	6-2
6.2.1	Simulación con modelo hidrodinámico RMA2.....	6-2
6.2.2	Simulación con modelo de dispersión rma4 .....	6-15
7	CONCLUSIÓN.....	7-1
7.1	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL TRABAJO .....	7-1
7.1.1	Visual Plumes .....	7-1
7.1.2	RMA2.....	7-2
7.1.3	RMA4.....	7-3
7.2	RECOMENDACIONES .....	7-3

8 REFERENCIAS .....8-1

## **LISTADO DE FIGURAS .....**

Figura 1-1: Esquema Emisario Submarino .....	1-2
Figura 2-1: Patrones típicos del chorro flotante bajo diversas condiciones del ambiente .....	2-3
Figura 2-2: Ejemplos de condiciones de estabilidad e inestabilidad de campo cercano para las descargas sumergidas en aguas con profundidad limitada .....	2-5
Figura 2-3: Procesos de expansión flotante aguas bajo de la región de campo cercano .....	2-7
Figura 2-4: Zona de Protección Litoral.....	2-17
Figura 4-1: Ubicación del proyecto. ....	4-2
Figura 4-2: Imagen satelital ubicación emisario terrestre .....	4-3
Figura 4-3: Cámara de carga.....	4-3
Figura 4-4: Emisario terrestre .....	4-4
Figura 4-5: Imagen satelital de la ubicación del emisario submarino.....	4-7
Figura 4-6: Áreas de Manejo de la Bahía de Quintero.....	4-8
Figura 4-7: Carta náutica Bahía de Quintero .....	4-10
Figura 4-8: Plano batimétrico obtenido del Software Surfer 8.0. ....	4-10
Figura 4-9: Estaciones de muestreo .....	4-13
Figura 4-10: Región de la modelación .....	4-15
Figura 4-11: Batimetría de la región de modelación (profundidades en m) .....	4-16
Figura 4-12: Malla de elementos finitos utilizada en modelación hidrodinámica .....	4-17
Figura 5-1: Vector progresivo de la corriente en la capa profunda. ....	5-20
Figura 5-2: Vector progresivo de la corriente en la capa intermedia.....	5-21
Figura 5-3: Vector progresivo de la corriente en la capa superficial .....	5-22
Figura 5-4: Rosa y Distribución de Frecuencia de Viento - Bahía de Quintero.....	5-25
Figura 5-5: Estaciones de muestreo .....	5-27
Figura 6-1: Comportamiento vertical de la pluma .....	6-2
Figura 6-2: Simulación dinámica Escenario 4 (marea promedio en sicigia) .....	6-6
Figura 6-3: Simulación dinámica Escenario 14 (pleamar en sicigia).....	6-7
Figura 6-4: Simulación dinámica Escenario 15 (bajamar en sicigia).....	6-8
Figura 6-5: Simulación dinámica Escenario 1 (pleamar en cuadratura) .....	6-12
Figura 6-6: Simulación dinámica Escenario 4 (bajamar en cuadratura) .....	6-13
Figura 6-7: Simulación dinámica Escenario 15 (marea promedio en cuadratura) .....	6-14
Figura 6-8: Escenarios analizados por el modelo de calidad de agua RMA4 en sicigia .....	6-16
Figura 6-9: Escenarios analizados por el modelo de calidad de agua RMA4 en cuadratura.....	6-17

## LISTADOS DE TABLAS

Tabla 2-1: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marina dentro de la zona de protección litoral .....	2-18
Tabla 2-2: Límites máximos de concentración para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marina fuera de la zona de protección litoral. ....	2-19
Tabla 2-3: Requisitos del agua para recreación con contacto directo .....	2-22
Tabla 4-1: Coordenadas del Proyecto .....	4-1
Tabla 4-2: Caudales de diseño Planta Tratamiento preliminar de Aguas Servidas .....	4-5
Tabla 4-3: Remoción de parámetros .....	4-5
Tabla 4-4: Características Emisario Submarino .....	4-6
Tabla 4-5: Parámetros de diseño.....	4-14
Tabla 5-1: Estadística básica de las magnitudes de corrientes (m/s).....	5-18
Tabla 5-2: Frecuencia del rango de magnitud de la corriente.....	5-18
Tabla 5-3: Frecuencia de la dirección de la corriente. ....	5-19
Tabla 5-4: Nivel de marea en Bahía de Quintero .....	5-23
Tabla 5-5: Estadística básica del viento (Agosto-Noviembre 2006) .....	5-24
Tabla 5-6: Resultados de Parámetros Microbiológicos.....	5-28
Tabla 5-7: Resultado de Parámetros Químicos.....	5-29
Tabla 5-8: Parámetros físicos.....	5-30
Tabla 6-1: Escenario de modelación en sicigia .....	6-3
Tabla 6-2: Escenario de modelación en cuadratura .....	6-9

## LISTADOS DE GRÁFICOS

Gráfico 5-1: Registro de marea en sicigia.....	5-23
Gráfico 5-2: Registro de marea en cuadratura. ....	5-24
Gráfico 5-3: Distribución de Frecuencia de Viento – Bahía Quintero.....	5-25
Gráfico 6-1: Comparación de magnitudes de corrientes SHOA v/s RMA2 (sicigia).....	6-4
Gráfico 6-2: Correlación componente u – serie observada v/s modelación de corrientes en sicigia .....	6-5
Gráfico 6-3: Correlación componente v – serie observada v/s modelación de corrientes en sicigia. ....	6-5
Gráfico 6-4: Comparación de magnitudes de corrientes SHOA v/s RMA2 (cuadratura).....	6-10
Gráfico 6-5: Correlación componente u – serie observada v/s modelación de corrientes en cuadratura .....	6-10
Gráfico 6-6: Correlación componente v – serie observada v/s modelación de corrientes en cuadratura .....	6-11

## **1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 GENERALIDADES**

A medida que la tecnología avanza y las poblaciones humanas se van desarrollando, también crece la generación de desechos y desperdicios, los cuales son depositados tanto en tierra firme como en el océano. Chile posee una extensión lineal de 4.200 kilómetros de costa, con una vasta zona de influencia sobre el Océano Pacífico. Esta característica geográfica ha acrecentado, en los últimos años, el interés por salvaguardar esta gran fuente de recursos de potenciales fenómenos de contaminación por descargas costeras.

En contraposición a los vertimientos en tierra, las aguas marinas tienen la virtud de degradar y transformar ciertos vertidos, de forma tal, que no se generen disfunciones en el ecosistema. Esta facultad viene dada por las particulares propiedades de solubilidad, salinidad, absorción de rayos solares, turbulencia y la gran capacidad de oxidación que posee el océano.

La descarga de estos desechos al mar puede realizarse mediante emisarios submarinos, los cuales consisten en un conjunto de tuberías, equipos y accesorios destinados a descargar residuos líquidos de origen doméstico o industrial bajo la superficie del mar.

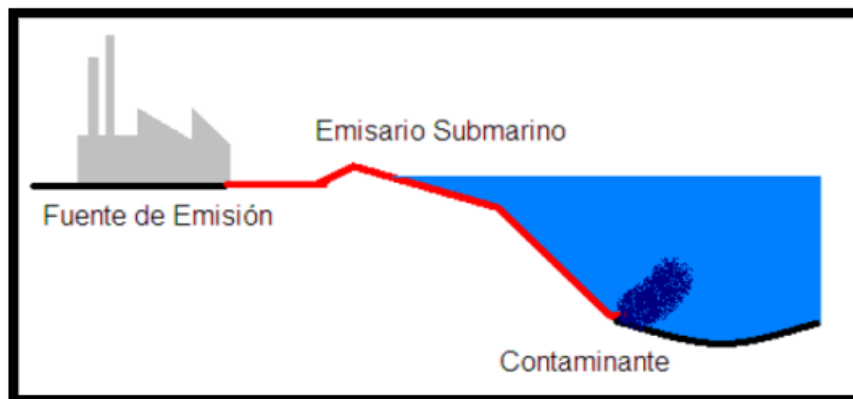
Un emisario submarino tiene por objeto realizar una descarga de aguas residuales, en un lugar de un cuerpo de agua donde la hidrodinámica favorezca la dilución y dispersión del efluente, tratando en forma natural las descargas biodegradables.

Los emisarios submarinos son una buena solución técnica y económica para satisfacer la permanente demanda de descargas de residuos líquidos, siempre y cuando, estas descargas cumplan con normas de emisión estricta y debidamente fiscalizada. En especial, hay que señalar que los emisarios no son aconsejables cuando se trate de contaminantes tóxicos altamente persistentes (en general no biodegradables), en que su dispersión en el medio acuático sólo provocará un daño mayor.

Para los desechos de origen orgánico y doméstico, específicamente aguas servidas o aguas negras, los emisarios submarinos se han venido adoptando como una solución viable a este problema, al disponer las aguas servidas de las zonas saneadas en un lugar del océano, realizando el tratamiento mediante una autodepuración natural sin producir daño al ecosistema acuático y al litoral costero.

Previo a la descarga, los desechos pasan por una Planta de Tratamiento Preliminar, en la cual son retenidos los sólidos (basuras), neutralizadas las grasas y aceites, y luego conducidos en grandes caudales como cargas de lodo al océano, lejos de la costa. El mar se usa como fuente de recurso de tratamiento terciario, el cual dentro de parámetros establecidos y gracias a su alto poder aeróbico, biodegrada y neutraliza los residuos de origen orgánico y doméstico producido normalmente por la población.

**Figura 1-1: Esquema Emisario Submarino**



Fuente: Elaboración propia.

Hay varios mecanismos que controlan las características de dispersión de un emisario submarino de aguas servidas. Estos mecanismos, usualmente se consideran en tres fases: dilución inicial, que ocurre durante los primeros minutos al salir las aguas residuales del emisario submarino y ascender en la columna de agua; transporte, y dispersión horizontal del campo de aguas residuales.

El presente trabajo analiza el comportamiento de la pluma de descarga de aguas servidas del emisario submarino de ESVAL, ubicado en la Bahía de Quintero, mediante tres herramientas de modelación computacional.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

De acuerdo a la ley N° 19.300 del 9 de marzo de 1994, sobre Bases Generales del Medio Ambiente; considera la predicción y evaluación de los impactos ambientales de proyectos cuyas características exigen realizar y contar con la aprobación de un Estudio de Impacto Ambiental, y de la implementación de Planes de Monitoreo Ambiental, lo cual generó en Chile, formalmente, la necesidad de contar con herramientas de evaluación, incluyendo modelos y un aparato para la gestión de estas evaluaciones.

En la costa de la Bahía de Quintero, existe un gran número de instalaciones y fábricas que descargan residuos al mar, tales como Oxiquim, Muelle Ventanas, Pesquera Quintero, Emisario Codelco, Chilgener, Estero Campiche y Codelco, Fundición y Refinería Ventanas, etc. Además de los efectos particulares de cada descarga, es altamente probable que se produzca un efecto combinado de las descargas en conjunto, un aspecto de compleja evaluación ambiental, cuya solución requiere de un estudio de mayor envergadura. Asimismo, son escasas las iniciativas para dar cumplimiento a la ley antes mencionada

Una de tales fuentes la constituye el emisario submarino de ESVAL, que descarga las aguas servidas en el sector de la boca de la bahía. Aunque existen planes de vigilancia de los vertidos realizados por dicha empresa, en cumplimiento de la normativa legal, las características de dispersión de la pluma quedan insuficientemente cubiertas con las herramientas tradicionales de medición. Para los propósitos del presente trabajo, se realiza un primer avance en el conocimiento de los patrones de dispersión de la pluma de descarga en la bahía, considerando sólo esta fuente por separado, utilizando herramientas de modelación. La modelación hidrodinámica y de pluma de descarga de los sistemas acuáticos, constituye una herramienta de gran utilidad para la comprensión de los fenómenos y para la predicción del impacto de acciones específicas; siendo

recomendada para la toma de decisiones sobre evaluación del impacto ambiental de un proyecto y en el control de un programa de monitoreo. Con una validación adecuada, los modelos permiten obtener una descripción de los campos de velocidad de las corrientes, dispersión y otras variables, en un extenso campo espacial y con alta resolución temporal, condiciones que no pueden ser cubiertas con los métodos de adquisición de datos tradicionales.

El presente proyecto estudia el comportamiento de la descarga contaminante del emisario submarino de Quintero, perteneciente a la Empresa Sanitaria de Valparaíso (ESVAL), para determinar la dispersión de contaminantes y las concentraciones alcanzadas en la zona de impacto bajo dos escenarios típicos: marea en sicigia y en cuadratura, ambos incluyendo las condiciones de viento dominante.

### **1.3 ALCANCES**

Para determinar la dilución de contaminantes, es necesario estudiar algunos parámetros oceanográficos (tales como corrientes, mareas, temperatura, salinidad y densidad). También se debe contar con el viento, la batimetría del sector donde se produce el vertido, y las características del emisario (largo, diámetro y configuración).

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 PROCESOS DE MEZCLA PARA DESCARGAS MULTIORIFICIO SUMERGIDAS

La distribución de la pluma y en consecuencia, del destino del efluente, están determinados por los procesos hidrodinámicos de mezcla; y estos a su vez, están gobernados por las condiciones del ambiente marino y las características de la descarga. Los procesos de mezcla del efluente con el medio receptor ocurren en tres regiones: **campo cercano**, **campo intermedio** y **campo lejano**, dependiendo de la distancia y tiempo transcurridos desde el punto de descarga.

Los mecanismos que controlan las características de dilución de un emisario submarino son usualmente considerados en tres fases: a) dilución inicial que ocurre durante los primeros minutos, luego de salir las aguas residuales del emisario submarino y ascender en la columna de agua receptora correspondiente al denominado campo cercano; b) transporte que ocurre en el campo intermedio y c) dispersión horizontal del campo de aguas residuales denominado campo lejano.

#### 2.1.1 DESCARGA

Las condiciones de descarga son descritas tanto por las características geométricas de la estructura de descarga, como por las condiciones dinámicas del cuerpo de agua receptor y del contaminante. Un emisario submarino con difusor multiorificio, es una estructura lineal que consiste en una serie de orificios o inyectoros separados un cierto espacio uno del otro, en los que tubos verticales son montados o conectados a dicha estructura apoyada en el lecho marino. A través de los tubos verticales el efluente es descargado, a gran velocidad dentro del ambiente marino receptor.

Las características geométricas corresponden a la longitud y la orientación de la línea del difusor, el espaciamiento entre los orificios, diámetro del orificio, elevación sobre el fondo marino y los detalles constructivos. Mientras que las características dinámicas incluyen los

parámetros de descarga del efluente tales como caudal, temperatura, densidad y tipo de contaminante.

### **2.1.2 PROCESOS DE CAMPO CERCANO**

Los procesos de campo cercano son lo que ocurren durante la mezcla inicial. La dilución inicial ocurre en los primeros minutos al salir los Residuos Industriales Líquidos (RILES) y/o aguas servidas del emisario submarino y moverse en la columna de agua.

Existen tres fenómenos que afectan la dilución inicial, los que se detallan a continuación:

- Mezcla causada por el impulso del efluente al salir del emisario submarino.
- Boyantez y velocidades verticales ascendentes de la corriente, causadas, entre otros agentes, por la diferencia de densidad entre las aguas residuales y las aguas de mar (diferencias en temperatura y salinidad), y por el efecto del viento superficial, que hacen que el campo de aguas negras ascienda en la columna de agua, mezclándose con agua de mar.
- Efecto de la corriente advectiva que causa una mezcla lateral de agua de mar renovadora en el campo de las aguas residuales.

Además, hay que precisar que los procesos de mezcla del campo cercano son aquellos en los que también la orientación geométrica del emisario submarino tiene efecto predominante en el comportamiento del flujo (trayectoria y mezcla).

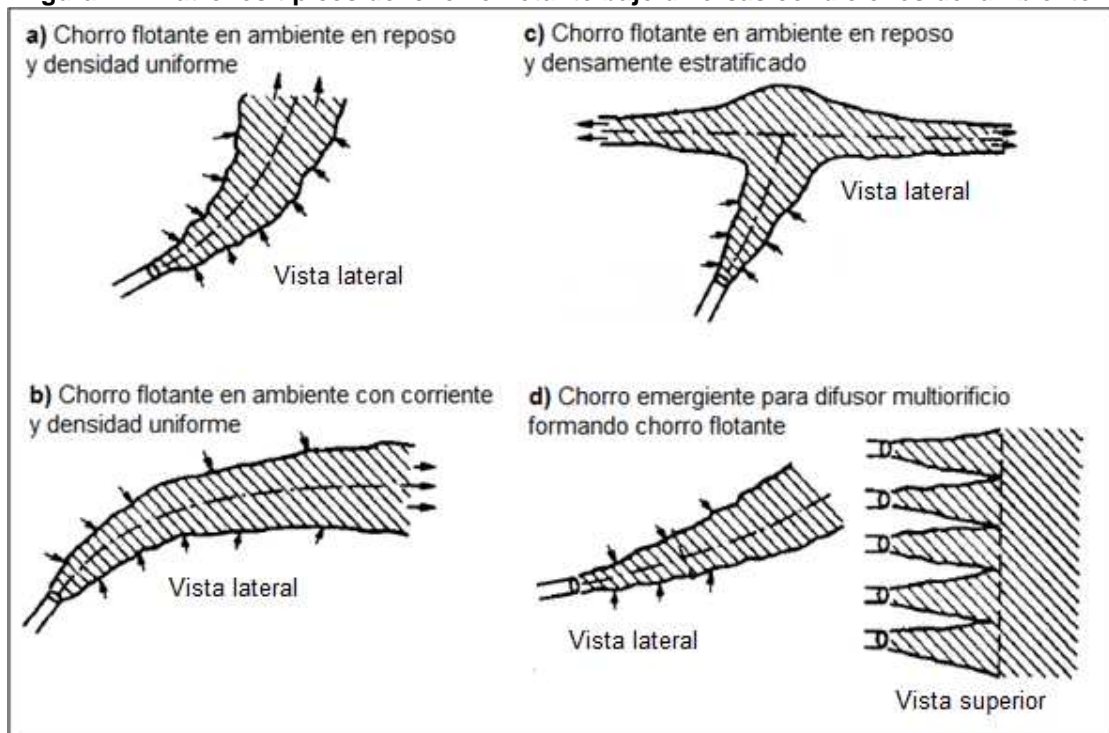
#### **2.1.2.1 MEZCLADO DE UN CHORRO SUMERGIDO**

La diferencia entre las velocidades del fluido descargado y el medio ambiente marino provocan que al ingresar el fluido al ambiente marino, se origine turbulencia. El ancho de esta zona turbulenta, aumenta en la dirección del flujo, incorporando flujo menos turbulento y generando dilución.

La Figura 2-1 muestra el modelo de flujo bajo distintas condiciones ambientales, dependiendo de la orientación de la descarga y de la dirección de la aceleración. Se muestran las curvas de trayectoria en un ambiente en reposo con densidad uniforme (Figura 2-1.a.), bajo el efecto de las corrientes (Figura 2-1b.) y de la estratificación (Figura 2-1c.). La Figura 2-1.d, muestra que los chorros redondos individuales y flotantes de un difusor multiorificio se comportan independientemente hasta su interacción. El efluente es descargado en chorros turbulentos circulares desde los orificios y, siendo menos denso que el agua receptora del mar, sube hacia la superficie.

Dependiendo del espacio entre los orificios, de la velocidad de salida y la profundidad del medio receptor, los chorros pueden emerger juntos antes de llegar a la superficie o a una altura máxima de ascenso.

**Figura 2-1: Patrones típicos del chorro flotante bajo diversas condiciones del ambiente.**



Fuente: US Environmental Protection Agency 1996. Manual de Usuario CORMIX.

[http://water.epa.gov/scitech/datait/models/allocation/upload/2006\\_08\\_22\\_models\\_cormix\\_users.pdf](http://water.epa.gov/scitech/datait/models/allocation/upload/2006_08_22_models_cormix_users.pdf).

### **2.1.2.2 INTERACCIÓN CON LAS CAPAS LÍMITES**

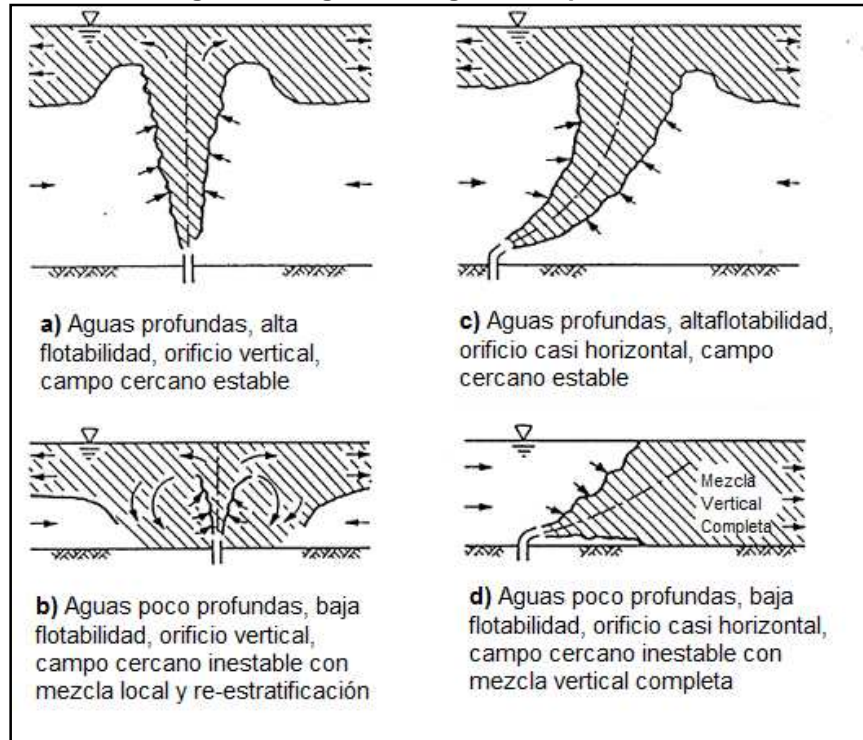
Debido a una combinación de momentum ascendente y flotabilidad positiva, la pluma sube hasta la capa superficial y se completa el proceso de dilución inicial. Así, la interacción con la capa superficial define la transición de la mezcla desde el campo cercano al campo lejano.

La interacción en la región de borde puede ser gradual o precipitada. Existen también condiciones de borde en la superficie, en el fondo del cuerpo receptor y en su interior. En este último caso, la fricción entre capas por la presencia de la pycnoclina, determina una capa límite en la interfase.

A pesar de que el proceso de interacción con las capas límites ocurre en el campo intermedio, ya que separa los procesos de mezcla de campo cercano de los de campo lejano, ésta se considera como un proceso de mezcla de campo cercano, debido a las interacciones dinámicas de la pluma con el fondo del mar.

Dependiendo de las características geométricas y dinámicas, pueden ocurrir varios fenómenos de interacción. La Figura 2-2 muestra el comportamiento de plumas bidimensionales resultantes de difusores multiorificio. La Figura 2-2.a y Figura 2-2.c, se refieren a condiciones de “descarga estable” o “aguas profundas”, por el contrario, la Figura 2-2.b y Figura 2-2.d, muestran condiciones de “descarga inestable” o “aguas poco profundas”. En zonas de aguas poco profundas, las interacciones de borde entre la pluma y el fondo influenciarán fuertemente la hidrodinámica del proceso de mezcla.

**Figura 2-2: Ejemplos de condiciones de estabilidad e inestabilidad de campo cercano para las descargas sumergidas en aguas con profundidad limitada**



Fuente: US Environmental Protection Agency 1996. Manual de Usuario CORMIX.

[http://water.epa.gov/scitech/datait/models/allocation/upload/2006\\_08\\_22\\_models\\_cormix\\_users.pdf](http://water.epa.gov/scitech/datait/models/allocation/upload/2006_08_22_models_cormix_users.pdf).

### 2.1.3 PROCESOS DE CAMPO INTERMEDIO

El campo intermedio se refiere a la zona donde la pluma interactúa con el cuerpo acuático receptor, a distancias substancialmente mayores a la profundidad del agua. El orden de magnitud de la profundidad del agua es típicamente utilizada para definir las dimensiones de la región de campo cercano.

Los campos intermedios pueden ocurrir cuando un difusor multiorificio representa una fuente de momentum grande con un efecto relativamente débil de flotabilidad. Tal difusor tendrá un campo cercano inestable con condiciones de agua poco profundas. Para ciertas geometrías de difusor (por ejemplo tipos de difusor unidireccionales y con cierto ángulo de los orificios) se pueden inducir movimientos fuertes en ambientes marinos poco

profundos, en forma de corrientes verticalmente mezcladas que arrastran lateralmente el agua y pueden extenderse sobre largas distancias antes de que se re-estratifiquen o disipen su momentum.

#### **2.1.4 PROCESOS DE CAMPO LEJANO**

Los procesos de campo lejano son caracterizados por el transporte longitudinal del efluente mezclado debido a la velocidad de la corriente del medio marino. La trayectoria y dilución de la pluma son controladas por la turbulencia del medio receptor, el movimiento de expansión flotante y la difusión pasiva, esto implica que más allá de las características del chorro, lo que controla estos procesos son las características del medio marino.

##### **2.1.4.1 MOVIMIENTO DE EXPANSIÓN FLOTANTE**

Las diferencias de densidad entre el flujo mezclado y el medio receptor, producen las fuerzas flotantes y procesos de expansión. Estos procesos de expansión flotante son expansiones horizontales transversales del flujo de mezcla del efluente, mientras que al mismo tiempo son advectados por la corriente del medio marino.

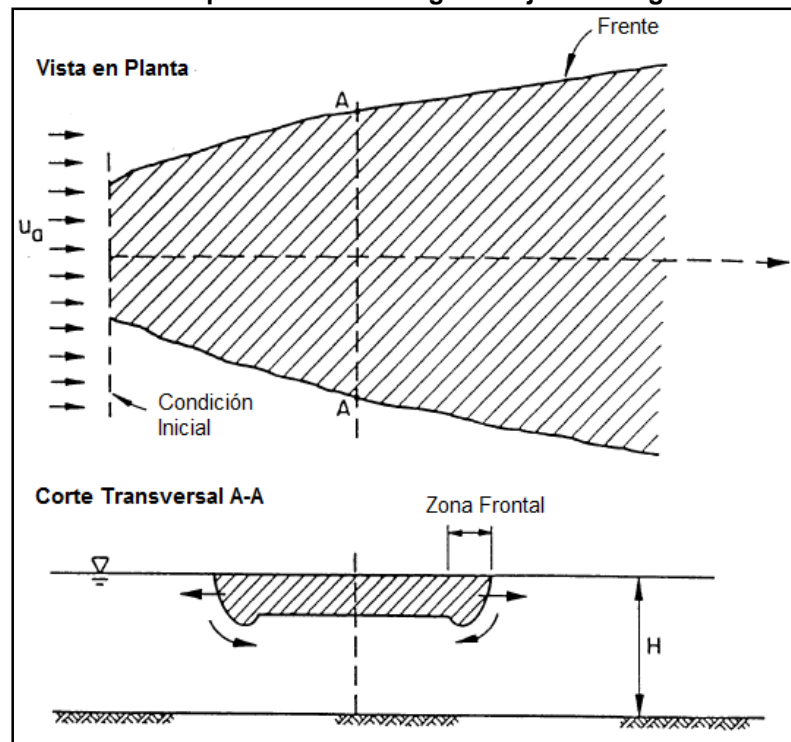
Dependiendo de la estratificación del cuerpo receptor y del tipo de flujo de campo cercano, la expansión puede ocurrir en:

- La superficie del agua.
- El fondo.
- Una pycnoclina.
- El nivel de equilibrio de la densidad en un fluido ambiente continuamente estratificado.

La Figura 2-3 muestra un proceso de expansión flotante a partir de una descarga, en un ambiente no estratificado con corriente. Una consecuencia de esta expansión flotante es una rápida expansión lateral de la mezcla de efluente sobre grandes distancias en la dirección transversal. Durante la expansión lateral la razón de mezcla es generalmente

muy pequeña y el grosor de la capa disminuye. Esto es aún mayor en el caso de fuerte estratificación.

**Figura 2-3: Procesos de expansión flotante aguas bajo de la región de campo cercano**



Fuente: US Environmental Protection Agency 1996. Manual de Usuario CORMIX.  
[http://water.epa.gov/scitech/datait/models/allocation/upload/2006\\_08\\_22\\_models\\_cormix\\_users.pdf](http://water.epa.gov/scitech/datait/models/allocation/upload/2006_08_22_models_cormix_users.pdf).

#### 2.1.4.2 DIFUSIÓN PASIVA

La turbulencia existente en el medio ambiente marino es el mecanismo de mezcla dominante a distancias suficientemente grandes del punto de descarga. El grado de difusión es influenciado por efectos dinámicos, geometría costera o batimetría y cantidad de estratificación del medio marino.

Los efectos dinámicos corresponden a las corrientes a gran escala, corrientes de marea, corrientes inducidas por viento, afluencias locales en ríos o debido a los efectos de la densidad. Las características batimétricas importantes del ambiente a tomar en

consideración son las costas abiertas (aproximadamente unidireccional), las costas complejas tales como bahías, islas (donde deben ser considerados los patrones de circulación), estuarios (aproximadamente unidireccionales), y complejos abiertos (que tienen oscilaciones de marea o movimientos baroclínicos).

Una vez identificadas las tres zonas de los procesos físicos de mezcla y de transporte anteriormente expuestas, se debe considerar lo siguiente: la conservación de la masa, la conservación del momentum, el transporte de sal, calor u otros componentes, las distintas densidades del medio (ecuación de estado), los gradientes de densidad horizontales (efectos baroclínicos), las fuerzas de marea en bordes abiertos, la tensión de corte variable en tiempo y espacio sobre la superficie y fondo del medio acuoso.

Para solucionar las ecuaciones de transporte, estado y conservación de masa y momentum previamente nombradas, los modelos usados requieren una serie de datos de entrada que son ingresados como condiciones iniciales, condiciones de borde y parámetros de descarga.

## **2.2 MODELOS COMPUTACIONALES**

Con el fin de simular el comportamiento de la pluma generada por la descarga del emisario de ESVAL, se utilizan en este estudio distintos tipos de modelos. En general, existen modelos completos, que cubren al campo cercano y al campo lejano, y modelos de zona, que cubren sólo una parte del dominio de la descarga.

Los Modelos de Zona se dividen en modelos de campo cercano y modelos de campo lejano. Dentro de los modelos denominados de campo cercano, existen tres tipos de modelos para predecir el comportamiento de la descarga, estos son: formulaciones empíricas, modelos diferenciales y modelos integrales de pluma. En este trabajo sólo se emplearán modelos integrales de pluma.

Al igual que los modelos completos, los modelos de zona poseen la desventaja de que no resuelven el comportamiento de la pluma de descarga en el campo intermedio.

### 2.2.1 MODELO INTEGRAL DE PLUMA DE CAMPO CERCANO

Los modelos de campo cercano utilizan ecuaciones hidrodinámicas para la conservación de la masa, el momentum, la flotabilidad y la concentración. Las distribuciones de velocidad, temperatura y flotabilidad se asumen Gaussianas, y las ecuaciones tridimensionales parciales se integran sobre la sección transversal de la pluma para resolver las ecuaciones diferenciales ordinarias, describiendo la variación axial de cierta velocidad característica en el ancho y diferencia en la densidad.

Estos modelos poseen las siguientes suposiciones:

- Se considera sólo la zona de flujo de chorro flotante sin interacciones de borde o de “re-arrastre” del efluente.
- Para los modelos integrales el flujo de campo es ilimitado.
- En la dimensión vertical se asume presión hidrostática, puesto que el efluente se descarga en un flujo ambiente infinito, rectangular, sin turbulencia.

En este estudio se utiliza el programa VISUAL PLUMES (VP), que evalúa los parámetros básicos de la zona de inicio del campo cercano de la mezcla, como la altura de la pluma, el ancho y alto iniciales y la concentración inicial o dilución. Esta evaluación la realiza a partir de valores estadísticos de la densidad del perfil marino en el lugar del difusor, de las corrientes y de los parámetros de diseño del difusor (longitud, número de difusores, distribución de difusores, ángulo de salida, etc.).

El software VP simula plumas simples y sumergidas en ascenso en condiciones de ambiente estratificado y descargas superficiales flotantes. Sus interfaces de usuario incluyen gráficos, ficheros de entrada de series de tiempo, unidades específicas de usuario, capacidad de acumulación conservadora del agente contaminante en mareas, capacidad del análisis de sensibilidad y un modelo del decaimiento de agentes patógenos

"Multi-stressor" que predice la mortalidad de coliformes basado en la temperatura, la salinidad, el aislamiento solar y la absorción de la luz en la columna de agua.

La capacidad del archivo de serie de tiempo proporciona una manera de simular el funcionamiento del emisario submarino durante largos períodos de tiempo. La mayoría de las variables del efluente y del ambiente marino, se pueden ingresar mediante archivos con datos variables en el tiempo. La capacidad del archivo series de tiempo es asistida por los gráficos "resumen", es decir, los gráficos que se centran en indicadores totales del funcionamiento, como diluciones o concentraciones en la zona de mezcla.

## **2.2.2 MODELOS INTEGRALES DE PLUMA DE CAMPO LEJANO**

El objetivo de los modelos para el campo lejano es la obtención de una solución para la ecuación de conservación de la masa del agente contaminante. Dicha ecuación considera advección, difusión y decaimiento. En la zona del campo lejano se pueden utilizar modelos que simulan el comportamiento del fluido a través del análisis euleriano y lagrangiano. En este estudio se utiliza el modelo euleriano RMA2 para la región del campo lejano.

### **2.2.2.1 MODELO RMA2**

El modelo RMA2 utiliza el método de elementos finitos para resolver un sistema de ecuaciones que describen las condiciones hidrodinámicas de una determinada área, la cual es definida a través de una malla de elementos finitos. Esta aplicación permite calcular las elevaciones de la superficie del agua y las componentes horizontales de la velocidad.

Las soluciones vienen de la ecuación de Navier-Stokes para flujos turbulentos teniendo en cuenta el número de Reynolds. La fricción se calcula utilizando la ecuación de Manning o la ecuación de Chezy y los coeficientes de viscosidad turbulenta se utilizan con el fin de caracterizar la turbulencia de la corriente.

Las características del RMA2 son las siguientes:

- Identifica y permite corregir errores en la implementación de la malla de elementos finitos.
- Permite reiniciar una simulación desde una corrida previa del RMA2 y continuar con la misma.
- Considera los efectos de rotación de la tierra (aceleración de Coriolis).
- Permite aplicar las tensiones originadas por el viento.
- Permite usar alternativamente distintos coeficientes de intercambio turbulento, valores del  $n^0$  de Manning, temperatura, etc.
- Permite utilizar ecuaciones que asignan automáticamente en forma dinámica valores de  $n^0$  de Manning de acuerdo a la profundidad de cada nodo de la malla.
- Permite utilizar el número de Peclet<sup>1</sup> para asignar automáticamente en forma dinámica los coeficientes de intercambio turbulento en cada nodo de la malla.
- Permite modelar incluso hasta con 5 diferentes tipos de estructuras de control de flujo.
- Permite calcular el caudal que atraviesa las líneas de continuidad preseleccionadas.
- Permite considerar los efectos de corrientes secundarias en curvas.
- Permite simular el secado y vuelta a inundar de sectores del área modelada en función de las variaciones de nivel sin necesidad de generar una nueva grilla de elementos finitos.
- Acepta una gran variedad de condiciones de borde.

El modelo general RMA2 integra en profundidad las ecuaciones integrales de flujo de masa y conservación del momento en dos direcciones horizontales.

---

<sup>1</sup> Es un número adimensional que relaciona la velocidad de advección de un flujo y la velocidad de difusión.

Las ecuaciones generales del RMA2 son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[ \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g u \rho n^2}{R^{1/3}} [u^2 + v^2] - \tau_x - v 2\Omega \sin \Phi &= 0 \\
 h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[ \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v \rho n^2}{R^{1/3}} [u^2 + v^2] - \tau_y - u 2\Omega \sin \Phi &= 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial t} + h \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} &= 0
 \end{aligned}$$

Donde:

h : Profundidad (m)

u, v : Velocidades en dirección x e y (m/s)

x, y : Coordenadas cartesianas (m)

t : Tiempo (s)

$\rho$  : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$E_x, E_y$  : Coeficiente de viscosidad turbulenta (kg·seg<sup>-1</sup> /m)

g : Aceleración de gravedad (m/s<sup>2</sup>)

a : Elevación del fondo (m)

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

$\tau_x, \tau_y$  : Fricción del viento (Pa)

$\Phi$  : Latitud en coordenadas geográficas

#### 2.2.2.2 MODELO RMA4

El modelo RMA4 fue diseñado con el propósito de investigar procesos físicos que son responsables de la distribución de contaminantes en el ambiente. Este software permite evaluar las concentraciones de un máximo de 6 contaminantes, tanto conservativos como no conservativos<sup>2</sup>. Resuelve numéricamente las ecuaciones de conservación de masa del

<sup>2</sup> Contaminantes conservativos: Son aquellos que su estructura química se mantiene a lo largo del tiempo a pesar de su interacción con el medio receptor.

Contaminantes no conservativos: Son aquellos cuya estructura química se modifica al interactuar con el medio o por autodegradación como en el caso de los contaminantes orgánicos o biológicos.

contaminante y está diseñado para simular los procesos advectivos y difusivos, considerando una distribución vertical uniforme en el ambiente acuático.

RMA4 tiene las siguientes características:

- Lee archivos de geometría unidimensional y/o bidimensional, o permite la especificación manual de la geometría.
- Lee resultados hidrodinámicos unidimensional y/o bidimensional del modelo RMA2, o permite la especificación manual del campo de velocidad.
- Permite modelar la precipitación/evaporación especificada en el modelo hidrodinámico RMA2.
- Permite manejar todas las estructuras de control de flujo unidimensional disponibles en el modelo RMA2.
- Permite reiniciar una simulación desde una corrida previa del RMA4 y continuar con la misma.
- Permite calcular concentraciones de condición límite por nodo, línea o carga de masa.
- Permite modelar hasta 6 constituyentes conservativos o no conservativos usando un decaimiento de primer orden.

Las limitaciones que posee el RMA4 son las siguientes:

- Se limita a una situación unidimensional y bidimensional en las que la concentración se encuentra bastante bien mezclada en la dirección vertical.
- Aumenta el error de las concentraciones en sistemas estratificados, donde la concentración del contaminante es influida por la distribución de densidad del fluido.

A continuación se describe la ecuación del modelo de calidad de agua, aplicado para la simulación de la pluma de un emisario de aguas servidas, asumiendo un contaminante no conservativo. La ecuación de transporte de masa tiene la siguiente forma:

$$h \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} - \sigma + kc + \frac{R(c)}{h} \right)$$

Donde

- c : Concentración del contaminante (kg/m<sup>3</sup>)  
 D<sub>x</sub>, D<sub>y</sub> : Coeficiente de dispersión (m<sup>2</sup>/s)  
 σ : Fuente/sumidero del contaminante (kg/m<sup>3</sup>\*s)  
 k : Decaimiento de contaminante (s<sup>-1</sup>)  
 R(c) : Tasa de lluvia/evaporación (m/s)

El término de evaporación y precipitación es eliminado de la ecuación general, debido que el proceso a evaluar en el presente trabajo, es la dispersión de aguas residuales en el mar. Por lo tanto, la ecuación de conservación de masa bidimensional, se reduce a la siguiente forma:

$$h \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} - \sigma + kc \right) = 0$$

Para la integración de la ecuación de conservación, se utilizan velocidades promedio en la vertical, los coeficientes de difusión horizontal han de tener en cuenta el efecto de cizalle vertical. Este efecto se debe a que la distribución de la velocidad vertical no es uniforme, lo que significa que en las zonas de mayor velocidad, la sustancia diluida en el fluido, se mueva más rápidamente que en las zonas de menor velocidad, lo que implica una importante dispersión de la sustancia que no se tiene en cuenta al utilizar el promedio. Los coeficientes asociados a cizalles se denominan coeficientes de dispersión y se estiman a partir de la fórmula de Elder.

$$D_t = 5.9U^*h$$

$$U^* = \sqrt{ghS}$$

Donde:

$D_t$  : Coeficiente de dispersión en dirección del flujo (m<sup>2</sup>/s).

h : Profundidad (m).

$U^*$  : Velocidad de fricción (m/s).

S : Pendiente de la superficie libre.

g : Aceleración de gravedad (m/s<sup>2</sup>).

Teniendo en cuenta que la velocidad de fricción para aguas costeras suele ser del orden de 6% de la velocidad del flujo (WES-HL. 2000.), se obtiene la siguiente formulación:

$$D_f = 0.4U^*h$$

Sin embargo, la experiencia señala que los coeficientes de dispersión obtenidos en la calibración de los modelos son, en muchas ocasiones, mayores que los calculados con la fórmula teórica u otras semejantes. Resultados empíricos (WES-HL. 2000.), sugieren la aplicación de las siguientes soluciones:

$$D_f = 0.5(u) \Delta l - \Delta t^2$$

$$D_f = K_1 \Delta l u \quad \text{con } K_1 = \frac{0.03}{0.15}$$

$$D_t = K_2 \Delta t u u \quad \text{con } K_2 = \frac{0.07}{0.34}$$

Donde:

$D_{f,t}$  : Coeficiente de dispersión en dirección del flujo.

$\Delta l$  : Tamaño de la celda en dirección del flujo (m)

u : Velocidad del flujo (m/s).

$\Delta t$  : Intervalo de tiempo utilizado en el cálculo (s)

$K_{1,2}$  : Coeficientes.

El coeficiente de dispersión perpendicular al flujo  $D_t$  podría considerar un orden de magnitud menor que  $D_f$  . La proyección de los coeficientes de dispersión sobre los ejes x e y se pueden calcular a partir de la siguiente expresión:

$$D_x = \left[ \left( \frac{\cos \alpha}{D_l} \right)^2 + \left( \frac{\sin \alpha}{D_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$D_y = \left[ \left( \frac{\sin \alpha}{D_l} \right)^2 + \left( \frac{\cos \alpha}{D_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$\alpha$  = arcotangente (v·u)

### 2.3 NORMATIVA CHILENA VIGENTE

A continuación se presenta una recopilación de la normativa chilena vigente que regula y fiscaliza los proyectos que involucran la descarga al mar de residuos líquidos.

#### 2.3.1 D.S. Nº 90/2000 MINSEGPRES: “Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales “

Este Decreto establece normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a la descarga de residuos líquidos en aguas marinas y continentales superficiales. En él se fijan las concentraciones máximas de contaminantes permitidas, para residuos líquidos descargados por las fuentes emisoras, a los cuerpos de agua marinos y continentales superficiales.

Esta normativa define distintos parámetros que tienen relación con las descargas de contaminantes en los cuerpos de agua receptor; uno de los más relevantes para proyectos de emisarios submarinos es la denominada Zona de Protección Litoral (ZPL).

**Zona de Protección Litoral:** Es un ámbito territorial de aplicación de la presente 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 que se orienta paralela a ésta y que se proyecta hasta el fondo del cuerpo de agua, fijada por la

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) en conformidad a la siguiente ecuación:

$$A = \left[ \frac{\{1,28 \times H_b\}}{m} \right] \times 1,6$$

Donde:

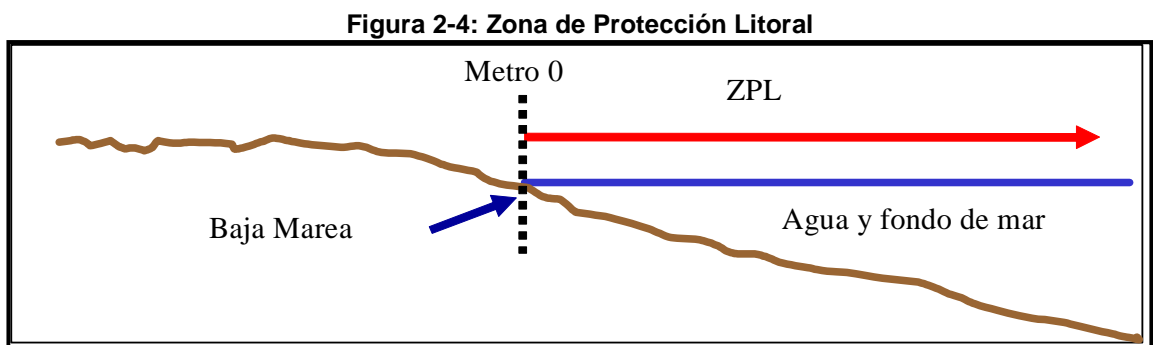
$H_b$  = altura media de la rompiente (m).

$m$  = pendiente del fondo.

$A$  = ancho zona de protección de litoral (m).

Para el cálculo de  $H_b$  se deberá utilizar el método HindCasting u otro equivalente autorizado por la DIRECTEMAR.

Los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en cuerpos de agua marinos, se muestran en dos tablas (Tablas 2-1 y 2-2), la primera para descargas dentro de la ZPL, y la segunda, para descargas fuera de esta zona; ambas se grafican a continuación:



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2-1: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marina dentro de la zona de protección litoral**

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permissible
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	1
Arsénico	mg/L	As	0,2
Cadmio	mg/L	Cd	0,02
Cianuro	mg/L	CN <sup>-</sup>	0,5
Cobre	mg/L	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000-70*
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr <sup>6+</sup>	0,2
Cromo Total	mg/L	Cr Total	2,5
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	DBO <sub>5</sub>	60
Estaño	mg/L	Sn	0,5
Fluoruro	mg/L	F <sup>-</sup>	1,5
Fósforo	mg/L	P	5
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	10
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCT	1
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
Manganeso	mg/L	Mn	2
Mercurio	mg/L	Hg	0,005
Molibdeno	mg/L	Mo	0,1
Níquel	mg/L	Ni	2
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
PH	Unidad	pH	6,0-9,0
Plomo	mg/L	Pb	0,2
SAAM	mg/L	SAAM	10
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Sedimentables	m1/1/h	S SED	5
Sólidos Suspendidos	mg/L	SS	100
Sulfuros	mg/L	S <sup>2-</sup>	1
Zinc	mg/L	Zn	5
Temperatura	°C	T°	30

\*En áreas aptas para la acuicultura y áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100 ml para coliformes fecales.

Fuente: D.S. N° 90/2000 MINSEGPRES

**Tabla 2-2: Límites máximos de concentración para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marina fuera de la zona de protección litoral.**

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permissible
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	350
Sólidos Sedimentables	ml/1/h	S SED	50
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	700
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0,5
Cadmio	mg/L	Cd	0,5
Cianuro	mg/L	CN <sup>-</sup>	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	1
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr <sup>6+</sup>	0,5
Cromo Total	mg/L	Cr Total	10
Estaño	mg/L	Sn	1
Fluoruro	mg/L	F <sup>-</sup>	6
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	20
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCT	2
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0,02
Molibdeno	mg/L	Mo	0,5
Níquel	mg/L	Ni	4
PH	Unidad	pH	5,5-9,0
Plomo	mg/L	Pb	1
SAAM	mg/L	SAAM	15
Selenio	mg/L	Se	0,03
Sulfuro	mg/L	S <sup>2-</sup>	5
Zinc	mg/L	Zn	5

Fuente: D.S. Nº 90/2000 MINSEGPRES

La legislación actual no establece límites para la descargas de coliformes fecales fuera de la Zona de Protección Litoral.

En la actualidad todas las fuentes emisoras deben cumplir con esta normativa.

### **2.3.2 NCH 1333.OF 78: “Requisitos de calidad del agua para diferentes usos”**

Esta norma establece un criterio de calidad del agua, de acuerdo a requerimientos científicos (referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos) según el uso determinado; con el objeto de proteger y conservar la calidad de las aguas de la degradación producida por contaminación de residuos.

El vaciamiento de residuos contaminantes a masas o cursos de agua deberá ajustarse a los requerimientos de calidad especificados para cada uso, teniendo en cuenta la capacidad de autopurificación y dilución del cuerpo receptor, de acuerdo a estudios que efectúe la autoridad competente en cada caso particular.

Esta norma es aplicable a las aguas destinadas a los siguientes usos:

- Agua para consumo humano.
- Agua para consumo animal.
- Riego.
- Recreación y estética.
- Estética.
- Recreación con contacto directo.
- Recreación sin contacto directo.
- Vida acuática.

Para efecto de este proyecto de titulación, se aplicarán los conceptos de recreación y estética por si la pluma llegase a devolverse hacia la costa.

**Estética:** El agua destinada a usos estéticos, deberá estar exenta de las siguientes sustancias atribuibles a descarga o vaciamiento de residuos:

- Materias que sedimenten formando depósitos objetables.
- Desechos flotantes, aceite, espuma y otros sólidos.

- Sustancias que produzcan color, olor, sabor o turbiedad objetable.
- Materias, incluyendo radionucleidos, en concentraciones o combinaciones que sean tóxicas o que produzcan reacciones fisiológicas indeseables en seres humanos, peces, otros animales y plantas.
- Sustancias y condiciones, o combinaciones de éstas, en concentraciones que produzcan vida acuática indeseable.

**Recreación sin contacto directo:** El agua destinada a recreación sin contacto directo debe cumplir los mismos requisitos que se indican para recreación con contacto directo, en las siguientes características:

- Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales.
- Aceites flotantes y grasas.
- Aceites y grasas emulsificadas.
- Sustancias que produzcan olor o sabor inconvenientes.

**Recreación con contacto directo:** El agua destinada a recreación con contacto directo (natación, buceo, esquí acuático) debe cumplir como mínimo con los requisitos que se indican en la Tabla 2-3.

**Tabla 2-3: Requisitos del agua para recreación con contacto directo**

<b>Características</b>	<b>Requisito</b>
pH	6,5 a 8,3 excepto si las condiciones naturales de las aguas muestren valores diferentes, pero en ningún caso menor de 5,0 o mayor de 9,0
Temperatura, °C máximo	30
Claridad mínimo*	Visualización de discos de Secchi a 1,2 m de profundidad
Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales	Ausentes
Aceites flotantes y grasas, mg/L máximo*	5
Aceites y grasas emulsificadas, mg/L máximo*	10
Color, unidades Escala Pt-Co máximo*	100 Ausencia de colorante artificial
Turbiedad, unidades Escala Sílice máximo*	50
Coliformes Fecales /100 ml máximo*	1000
Sustancias que produzcan olor o sabor inconvenientes	Ausentes

\*: Estos valores pueden ser modificados en caso de que la Autoridad Competente así lo determine.

Fuente: NCH 1333 of 78

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diagnosticar el impacto sobre el medio ambiente marino de la Bahía de Quintero proveniente del emisario submarino de aguas servidas ubicado en la Bahía de Quintero sobre el medio ambiente marino.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las condiciones hidrodinámicas forzadas por la marea mediante herramientas de modelación.
- Determinar las dimensiones, comportamiento y concentraciones de la pluma contaminante descargada por el emisario submarino.

##### **3.2.1.1**

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 GENERALIDADES

El presente estudio analiza el impacto de la pluma de descarga del emisario submarino instalado en el marco del proyecto "*Planta de tratamiento de aguas servidas y emisario submarino Quintero*", ubicado en la bahía y comuna del mismo nombre, provincia de Valparaíso, Región de Valparaíso (Figura 4-1), de propiedad de la Empresa Sanitaria de Valparaíso (ESVAL, 2003).

La bahía de Quintero, se ubica aproximadamente en la latitud 32°46`S y longitud 71°31`W, limita al sur con Punta Lilenes y al norte con Punta Ventanilla, y su boca está abierta hacia el noreste.

Las obras que conforman el proyecto citado son las siguientes:

- Emisario Terrestre: Conduce el agua tratada, entre la Planta de Tratamiento y el borde costero, posee una longitud de 140 metros.
- Planta de tratamiento preliminar de Aguas Servidas: se ubica en calle Arturo Prat N° 216 y 224, entre las calles Camilo Henríquez y Santiaguillo.
- Emisario Submarino con cámara de carga: La ubicación del emisario está en la localidad Punta Liles siguiendo la prolongación al mar.

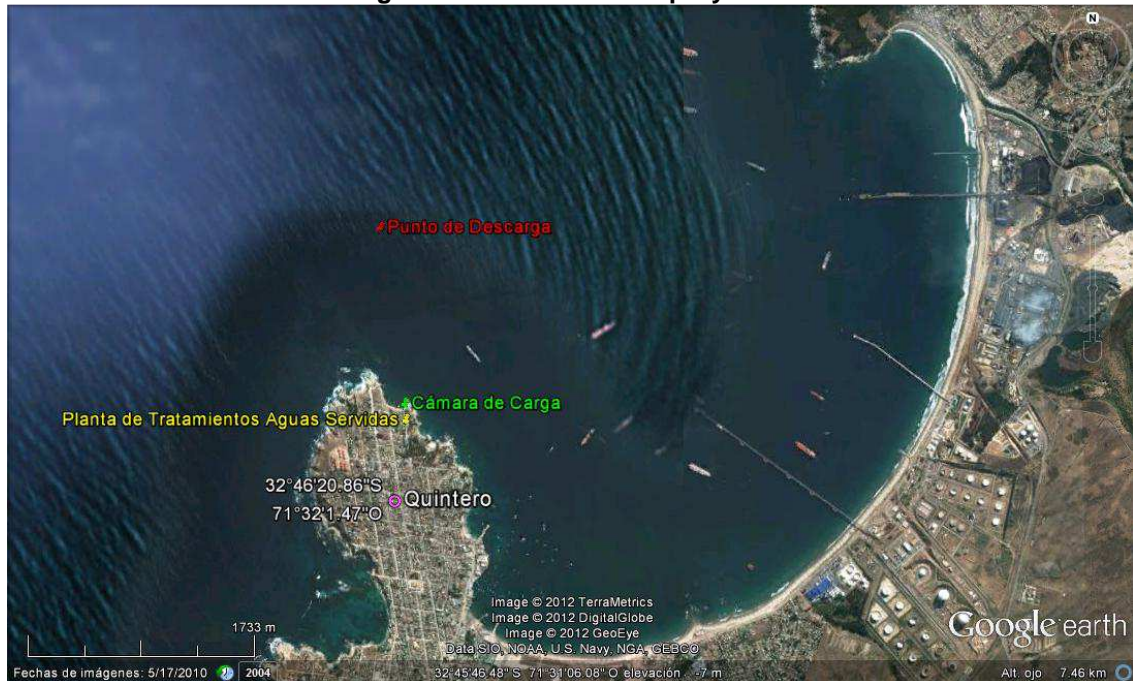
Las coordenadas del proyecto, se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 4-1: Coordenadas del Proyecto**

	Latitud	Longitud
Planta de Tratamiento Aguas Servidas	32° 46' 06.5018" S	71° 31' 55.3944" W
Cámara de Carga	32° 46' 02.5013" S	71° 31' 55.7805" W
Punto de Descarga (Emisario Submarino)	32° 45' 19.1166" S	71° 32' 03.0033" W

Fuente: ESVAL, 2003

**Figura 4-1: Ubicación del proyecto.**



Fuente: Elaboración propia (reproducción parcial Google Earth)

#### **4.1.1 EMISARIO TERRESTRE**

Corresponde a la tubería de conducción del efluente de la planta de tratamiento hasta la cámara de carga del emisario submarino, que se ubica en el borde costero, frente al eje de calle Arturo Prat (Figuras 4-2, 4-3 y 4-4).

El diseño considera la expulsión del aire desde esta cañería hacia el interior de la planta de tratamiento, para ser tratada por el equipo de desodorización. El caudal de diseño de esta obra es de 212 L/s.

**Figura 4-2: Imagen satelital ubicación emisario terrestre**



Fuente: Elaboración propia (reproducción parcial Google Earth)

**Figura 4-3: Cámara de carga**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-4: Emisario terrestre**



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.1.2 PLANTA DE TRATAMIENTO PRELIMINAR DE AGUAS SERVIDAS**

La empresa sanitaria de Valparaíso, ESVAL, construyó una planta de tratamiento preliminar de aguas servidas, en calle Arturo Prat N° 216 y 224 con el fin de realizar un tratamiento preliminar a la totalidad de las aguas servidas de Quintero.

El tratamiento preliminar, se diseñó para la eliminación de los sólidos gruesos, basuras y remoción de las arenas, aceites y grasas, para así evitar sedimentaciones en el emisario submarino, protegiéndolo y aumentando su vida útil, y permitiendo dar cumplimiento a la normativa ambiental de descargas y de calidad de las aguas del cuerpo receptor.

Dicho tratamiento se realiza en una planta de tipo modular compacta, con dos módulos de tratamiento en paralelo, a los que se adicionan otros dos módulos cuando el aumento de caudal a tratar, así lo amerite. Cada módulo trata 60 L/s aproximadamente y esta equipada con una cámara desarenadora aireada y sistemas de separación, remoción de sólidos filtrables, grasas, aceites y arenas.

Los caudales de diseño de la Planta de tratamiento preliminar, se grafican en la siguiente tabla:

**Tabla 4-2: Caudales de diseño Planta Tratamiento preliminar de Aguas Servidas**

Año	Período No-Punta			Período Punta		
	Población Servida	Caudal Medio (l/s)	Máximo (l/s)	Población Servida	Caudal Medio (l/s)	Máximo (l/s)
2002	13.093	34	78	32.734	51	110
2005	14.411	37	86	36.034	55	118
2010	17.981	44	101	61.635	87	178
2015	19.654	47	108	67.37	94	191
2020	21.419	50	115	73.421	102	204
2023	22.55	52	120	77.297	107	212

Fuente: ESVAL, 2003.

La vida útil del proyecto es de 20 años, por lo que se estima que la población para el año 2023 en un período de no punta, sería de aproximadamente 22.550 habitantes, mientras que en horario punta, el número de habitantes llegaría a los 77.297 (época estival).

El objetivo de la planta es asegurar la depuración del efluente, con el objeto de alcanzar los siguientes valores mínimos:

**Tabla 4-3: Remoción de parámetros**

Parámetro	Remoción
Sólidos 3 mm	Remoción total
DBO5	Remoción de la materia orgánica en el rango 15 – 25%
Sólidos sedimentables y arenas:	Remoción de un 90% porción > 0.2 mm
Aceites y grasas:	Remoción de un 80 – 90%
Contenido de humedad en residuo de rejillas finas	Menor que 65%

Fuente: ESVAL, 2003.

#### 4.1.3 EMISARIO SUBMARINO

Las características de diseño del emisario, se determinaron de manera de dar cumplimiento a la normativa ambiental vigente, considerando que la concentración de la pluma de dispersión que llega a la zona de protección litoral (ZPL) sea de 1000 NMP/100 ml, límite máximo permitido para calidad de las aguas de uso recreacional con contacto directo, de acuerdo a NCh 1333/78 (Capítulo 2.3.2).

De acuerdo a los cálculos realizados, la Zona de Protección Litoral (ZPL) corresponde a 102 m, el emisario se encuentra a una distancia de 200 m desde el nivel de más baja marea en sicigia, por lo tanto, la descarga se realiza fuera de la ZPL.

**Tabla 4-4: Características Emisario Submarino**

<b>Características Emisario Submarino</b>	
Ubicación	Sector Punta Liles
Diámetro	500 mm
Longitud total	1.350 m
Profundidad de la descarga	51 m
Tipo de Difusor	Colineal
Longitud del difusor	50 m
Diámetro del difusor	500 mm
Portas	10
Diámetro portas	100 mm
Material	Polietileno de Alta Densidad PN 6

Fuente: ESVAL, 2003.

**Figura 4-5: Imagen satelital de la ubicación del emisario submarino.**



Fuente: Elaboración propia (reproducción parcial Google Earth)

## 4.2 RESTRICCIONES DEL ENTORNO

El trazado del emisario submarino consideró las concesiones de acuicultura existentes en la zona (DIRECTEMAR, 2006) y la existencia de áreas de manejo de la bahía de Quintero.

**Figura 4-6: Áreas de Manejo de la Bahía de Quintero.**



Fuente: [www.conapach.cl](http://www.conapach.cl)

## 4.3 RESTRICCIONES AMBIENTALES

En la bahía de Quintero, no se evidenció la existencia de usos que restringieran, desde el punto de vista ambiental, la instalación de un emisario submarino en la zona. Sin embargo, se aprecia la existencia de balnearios en el borde costero, es decir playas usadas de manera masiva para recreación con contacto directo, tanto para el baño como para deportes náuticos. Por ende, la descarga del emisario submarino debe cumplir con lo

dispuesto en la NCH 1.333/78 MOP, en cuanto a mantener las condiciones aceptables de las aguas de los balnearios existentes.

#### **4.4 CONDICIONES NATURALES**

Para la instalación de emisarios submarinos es necesario conocer la topografía del fondo marino, corrientes marinas y todas las condiciones naturales que afectan a la dispersión de los contaminantes.

##### **4.4.1 BATIMETRÍA DEL SECTOR**

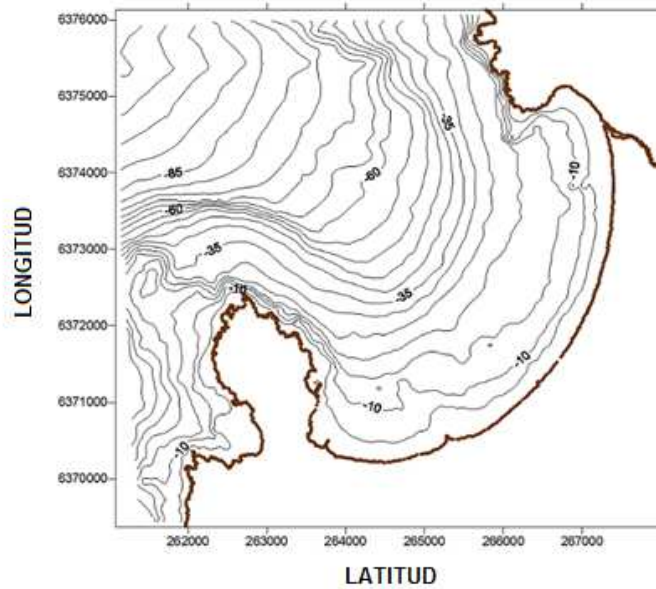
La profundidad en la que se encuentra el punto de descarga del emisario, determina la dilución inicial y condiciona el diseño de la estructura. Las condiciones topográficas del fondo marino se estudiaron mediante digitalización de las sondas de la carta náutica N° 4321 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (Fig. 4-6). La digitalización se realizó con el software computacional Didger versión 3.0 de 2001, y posteriormente se confeccionó la grilla con el programa Surfer versión 8.0 (Fig. 4-7). Esta digitalización permitió posteriormente modelar el caso en estudio, con los software computacionales mencionados en esta memoria.

**Figura 4-7: Carta náutica Bahía de Quintero**



Fuente: Carta Náutica Bahía Quintero N°4321 SHOA.

**Figura 4-8: Plano batimétrico obtenido del Software Surfer 8.0.**



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4.2 CORRIENTES MARINAS**

Se obtuvieron datos de corrientes marinas para analizar la hidrodinámica, determinar la dilución inicial, la inmersión, la predicción de dilución y transporte lejano, como también para validar el modelo hidrodinámico.

Los datos de corrientes fueron entregados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA, 2008), obtenidos en la campaña efectuada en Quintero entre el 2 de Agosto y el 16 de Septiembre de 2008 utilizando un instrumento ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) de 600 kHz fondeado en latitud 32°44'24"S y longitud 71°31'00"W. La profundidad de fondeo fue de 38 m bajo el NRS. El intervalo de muestreo fue de 10 minutos y el tamaño de las celdas verticales fue de 1 m. El análisis de los datos se realizó considerando cinco niveles (capas) en la columna de agua, con el fin de reflejar de buena manera el patrón de corrientes.

#### **4.4.3 MAREAS**

Los datos de nivel del mar para este estudio, fueron obtenidos de la Publicación N°3009, Tablas de Marea de la Costa de Chile, 2008, del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA); se utilizaron los datos de marea en sicigia y cuadratura con el fin de modelar el patrón de corrientes y posteriormente el comportamiento de la pluma de descarga.

Se realizó un análisis no armónico de las mareas considerando los registros del Puerto de Valparaíso, los cuales se corrigieron de acuerdo a lo señalado en la Tabla de Marea para la Bahía de Quintero.

#### **4.4.4 VIENTOS**

Los datos de viento utilizados en este estudio fueron obtenidos del Proyecto de Título para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico de la Universidad de Valparaíso (2009),

elaborado por Karina Oyarce denominado “Evaluación de herramienta tecnológica como apoyo a las estrategias frente a derrames de hidrocarburos en el mar”.

Las intensidades y direcciones del viento histórico fueron obtenidas a través de una estación meteorológica a 10 [m] de altura ubicado en la siguiente coordenada geográfica, latitud 32°46'20.38"S y longitud 71°29'24.63"O.

La programación del equipo se realizó cumpliendo con los requerimientos SHOA, ajustando una frecuencia de muestreo cada 20 segundos, con una resolución de almacenamiento de 1 dato cada 10 minutos.

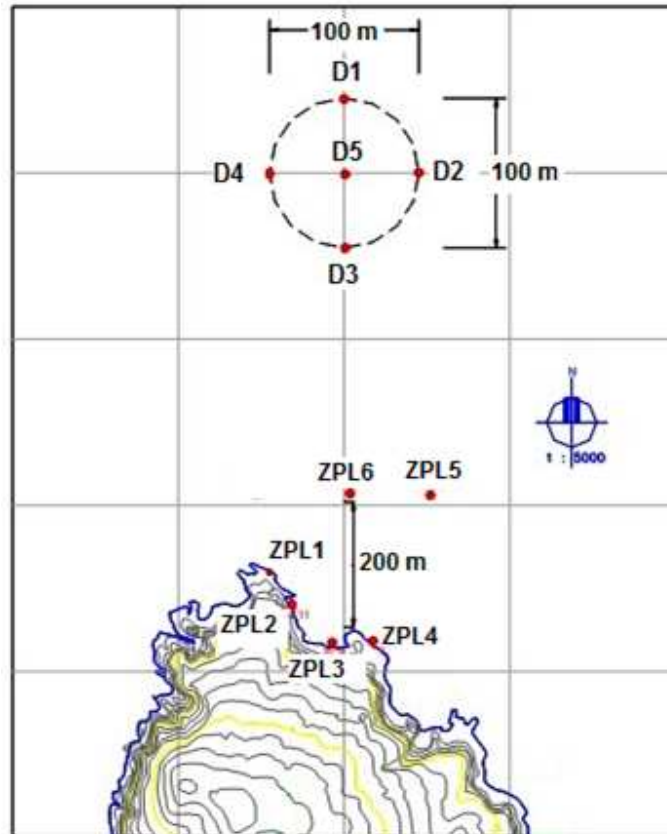
Se utilizó una estación marca HOBO, estación de última generación, que por sus características permite la detección automática de los parámetros de interés, es decir, no se requieren escritura de rutinas, solo es requerido para ajustar los sensores. Permite además trabajar hasta con 15 sensores de cualquier tipo o en combinación.

Los datos de vientos, fueron utilizados para determinar las condiciones hidrodinámicas correspondientes a la Bahía de Quintero y como dato de entrada para la modelación.

#### **4.4.5 COLUMNA DE AGUA**

Para el estudio de la columna de agua, se tomaron los datos de ESVAL (2003) realizados en una campaña oceanográfica el 11 de febrero de 2003. Se tomaron datos de salinidad, temperatura, transparencia del agua y oxígeno disuelto, en las estaciones ZPL1 a ZPL6, y D1 a D5 de la Figura 4-9.

**Figura 4-9: Estaciones de muestreo.**



Fuente: ESVAL, 2003.

Las mediciones se realizaron con un instrumento STD, modelo Aanderaa para profundidades discretas. Las profundidades de muestreo fueron cada 5 m, partiendo desde la superficie (5m) hasta llegar al fondo (51m).

Para la toma de muestras de agua a profundidad, se usó una botella oceanográfica marca General Oceanic modelo NISKIN de 5 litros de capacidad. También se determinó la transparencia del agua con el método de la profundidad visible del Disco Secchi.

Todos los muestreos se realizaron desde una embarcación anclada en cada sitio, y posicionada geográficamente desde la costa, con métodos topográficos convencionales a través del método de radiación.

La recolección, preservación, tratamiento y análisis de las muestras de agua, se realizaron de acuerdo con técnicas aceptadas por el Servicio de Preservación del Medio Ambiente Acuático, de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante.

#### 4.5 MODELACION DE LA DILUCIÓN INICIAL

Para evaluar la dilución inicial, se utilizó el programa Visual Plumes para el compuesto que sobrepasa la norma de descarga (coliformes fecales), obteniéndose el valor del nivel de dilución alcanzado, así como la cantidad de contaminante remanente y la posición estimada de la pluma de contaminante respecto al punto de descarga.

Se utilizaron los siguientes datos de diseño del emisario (Tabla 5-1) para configurar el modelo de campo cercano VISUAL PLUMES.

**Tabla 4-5: Parámetros de diseño**

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL VERTIDO DE AGUAS SERVIDAS			
Diámetro de boquilla (m)	0,1	Caudal total de vertido (m <sup>3</sup> /s)	0,212
Altura de la boquilla con respecto al fondo (m)	0,5	Densidad del efluente (kg/m <sup>3</sup> )	1100
Ángulo inclinación de descarga (°)	90	Temperatura del efluente (°C)	20
Separación entre boquillas (m)	10	Número total de boquillas	10

Fuente: ESVAL, 2003.

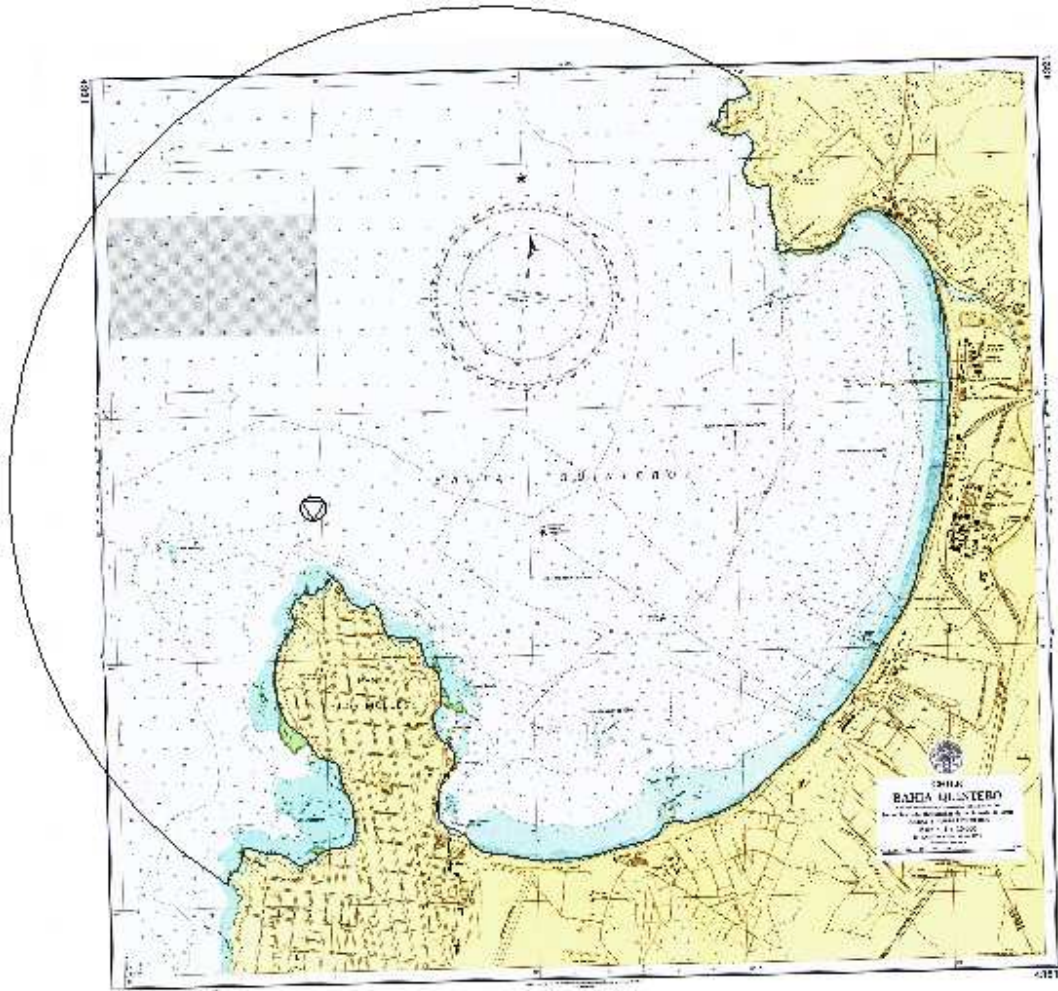
#### 4.6 MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN

Se efectuó una simulación del efecto de dispersión, mediante la aplicación conjunta de un modelo hidrodinámico para la determinación del campo de corrientes generadas por marea (RMA2) y un modelo de dispersión de contaminantes (RMA4), en un dominio de integración que abarca el área de influencia del emisario y las áreas de manejo potencialmente afectas a contaminación. La Figura 4-10 muestra el límite del dominio

para la modelación. El triángulo indica la posición del emisario. La Figura 4-11 muestra la batimetría y la Figura 4-12 la malla irregular de elementos finitos del dominio del modelo.

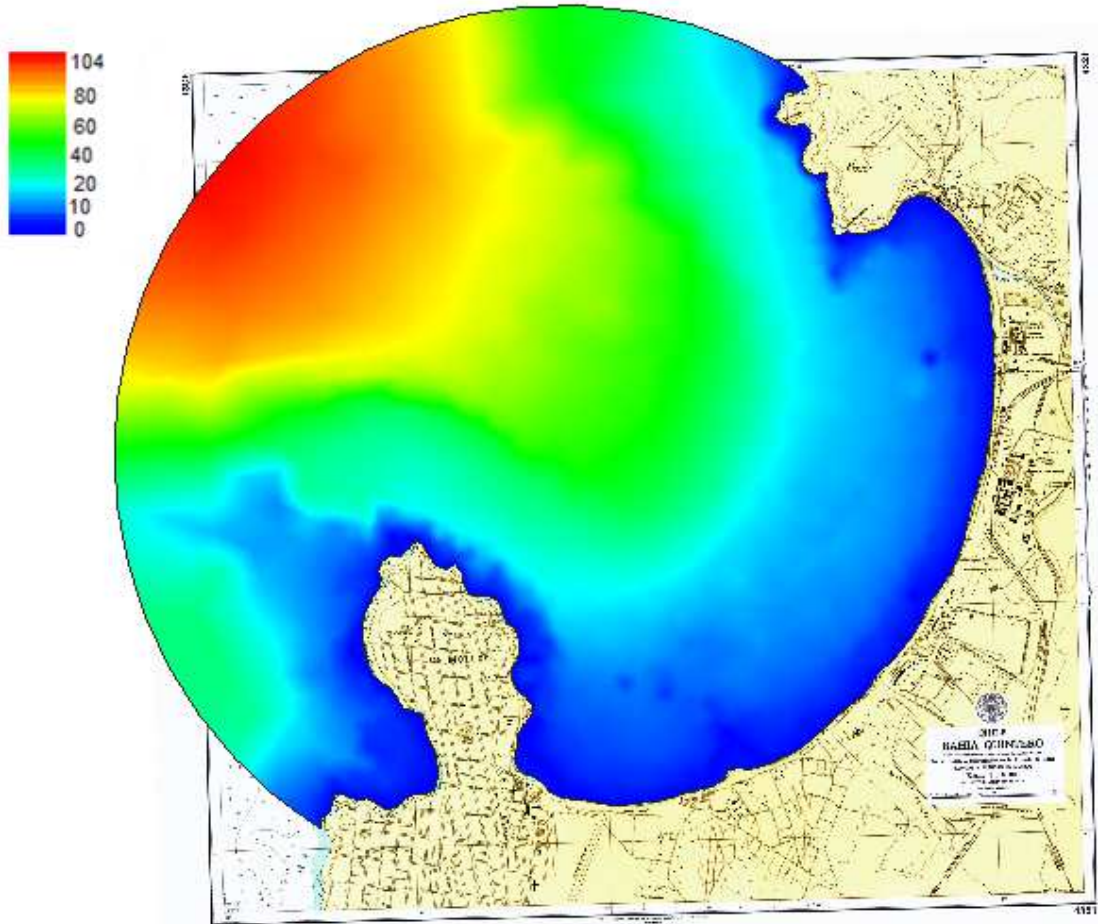
Se seleccionaron 20 escenarios de simulación, que correspondieron a combinaciones de las distintas fases de la marea con condiciones de sicigias y cuadraturas. Cada una de dichas combinaciones, fue también forzada por viento de 6.75 m/s proveniente de la dirección SW (máximo valor observado para el período Agosto/Noviembre 2006)

**Figura 4-10: Región de la modelación**



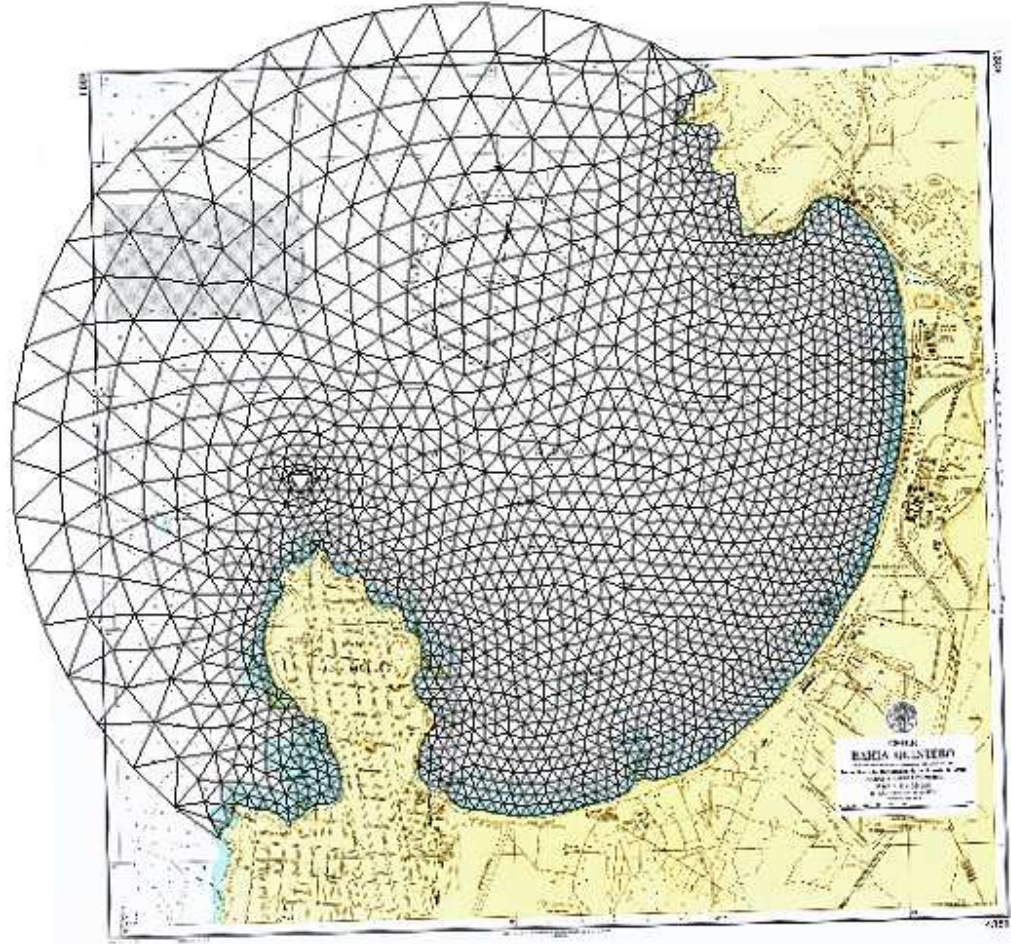
Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-11: Batimetría de la región de modelación (profundidades en m)**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-12: Malla de elementos finitos utilizada en modelación hidrodinámica**



Fuente: Elaboración propia

## 5 RESULTADOS

### 5.1 CORRIENTES

La Tabla 5-1 muestra que la máxima intensidad (0.83 m/s) se registró en la capa superficial (2,0 m). La distribución de frecuencia de magnitud de la corriente indica que en los niveles intermedio y profundo predominan corrientes de baja intensidad (menores a 0.11 m/s) abarcando más del 90% de los registros. Mientras que en el nivel superficial se registraron corrientes superiores a 0.21 m/s, excediendo el 20%.

**Tabla 5-1: Estadística básica de las magnitudes de corrientes (m/s)**

VALOR ESTADISTICO	PROFUNDIDAD (m)				
	2	7	17	27	37
MÁXIMO	0.830	0.532	0.253	0.338	0.315
MINIMO	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
MEDIA	0.193	0.082	0.063	0.056	0.055
VARIANZA	0.013	0.002	0.001	0.001	0.001

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5-2: Frecuencia del rango de magnitud de la corriente.**

Rango de Magnitud (m/s)	Profundidad				
	2	7	17	27	37
0.01 - 0.10	22.44%	71.14%	85.17%	89.87%	93.66%
0.11 - 0.20	36.44%	26.67%	14.49%	9.66%	6.06%
0.21 - 0.30	24.15%	1.97%	0.34%	0.45%	0.26%
0.31 - 0.40	11.23%	0.19%	0.00%	0.02%	0.02%
0.41 - 0.50	4.43%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%
0.51 - 0.60	1.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%
>0.61	0.30%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>TOTAL</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Elaboración propia.

La dirección predominante de las corrientes (Tabla 5-3) a nivel superficial fue variable con direcciones N, NE y E, abarcando en conjunto casi el 50% de los datos analizados; en

profundidad las direcciones predominaron al E, SE y S; al igual que en el nivel intermedio. En general se puede apreciar una tendencia de las corrientes hacia el primer cuadrante en superficie y hacia el segundo en profundidad.

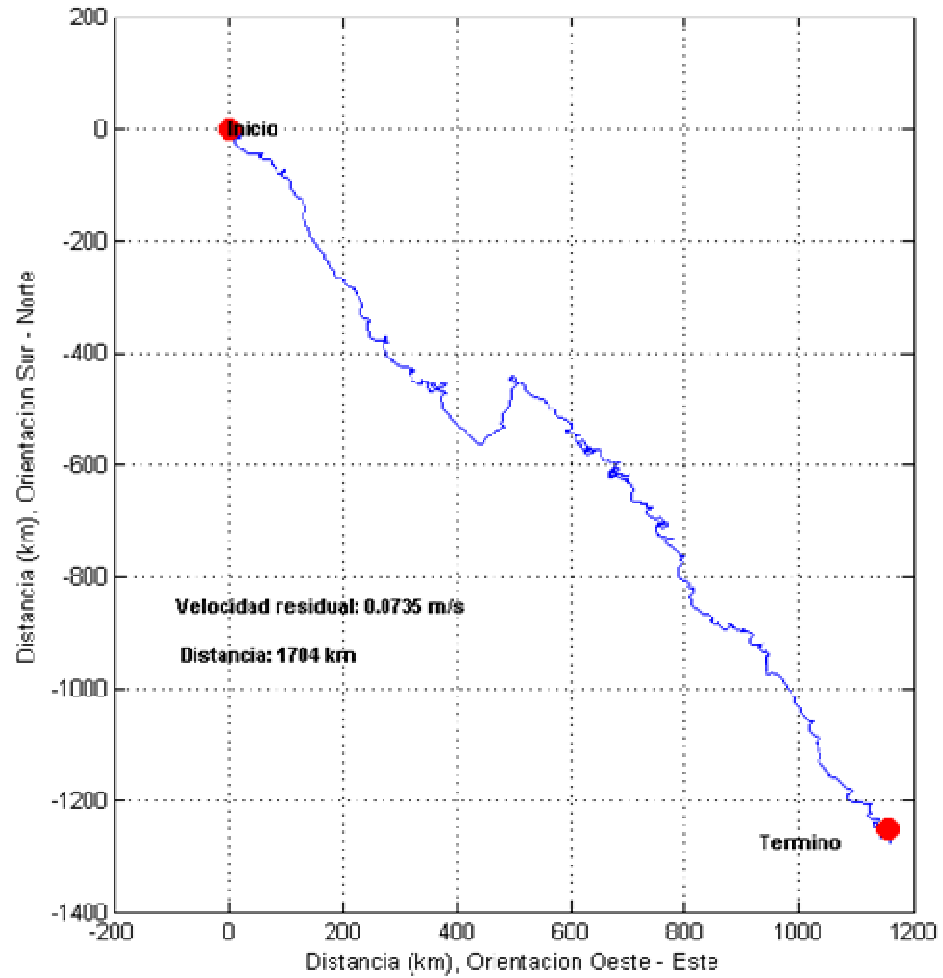
**Tabla 5-3: Frecuencia de la dirección de la corriente.**

DIRECCIÓN	PROFUNDIDAD (m)				
	2	7	17	27	37
N	12.55%	10.50%	7.89%	6.90%	6.35%
NE	22.96%	12.07%	11.40%	11.00%	8.29%
E	14.20%	15.41%	17.49%	17.33%	18.33%
SE	10.03%	15.84%	20.91%	23.41%	25.86%
S	10.76%	14.37%	18.90%	19.56%	16.29%
SW	10.87%	11.37%	10.95%	9.79%	9.94%
W	9.86%	11.21%	6.77%	6.34%	8.71%
NW	8.76%	9.23%	5.68%	5.68%	6.21%
<b>TOTAL</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Elaboración propia.

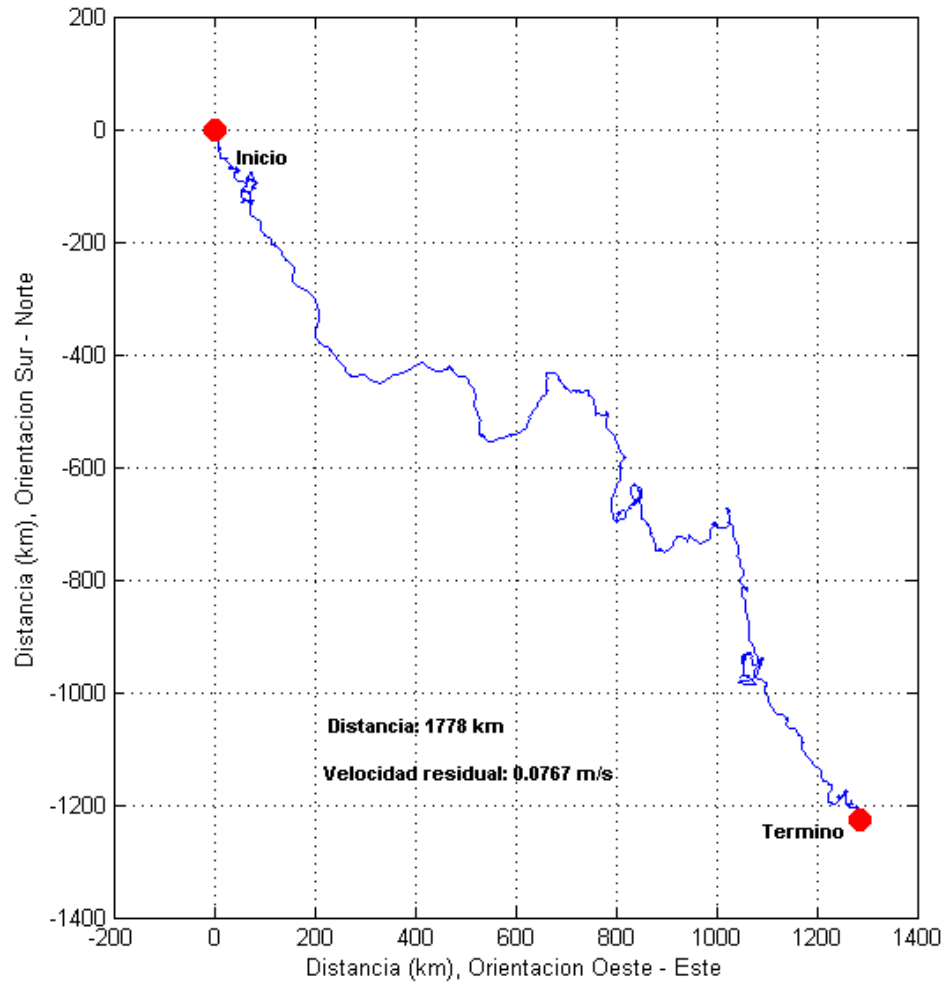
Los vectores progresivos de las corrientes a niveles profundo, intermedio y superficial se muestran en las figuras 5-1, 5-2 y 5-3, respectivamente. La posición de término corresponde a la ubicación estimada que tendría una partícula después de 45 días de mediciones. Estos vectores sugieren que en las capas profundas e intermedia hay predominancia en la dirección hacia el sureste, mientras que en la capa superficial es hacia el norte y noreste.

**Figura 5-1: Vector progresivo de la corriente en la capa profunda.**



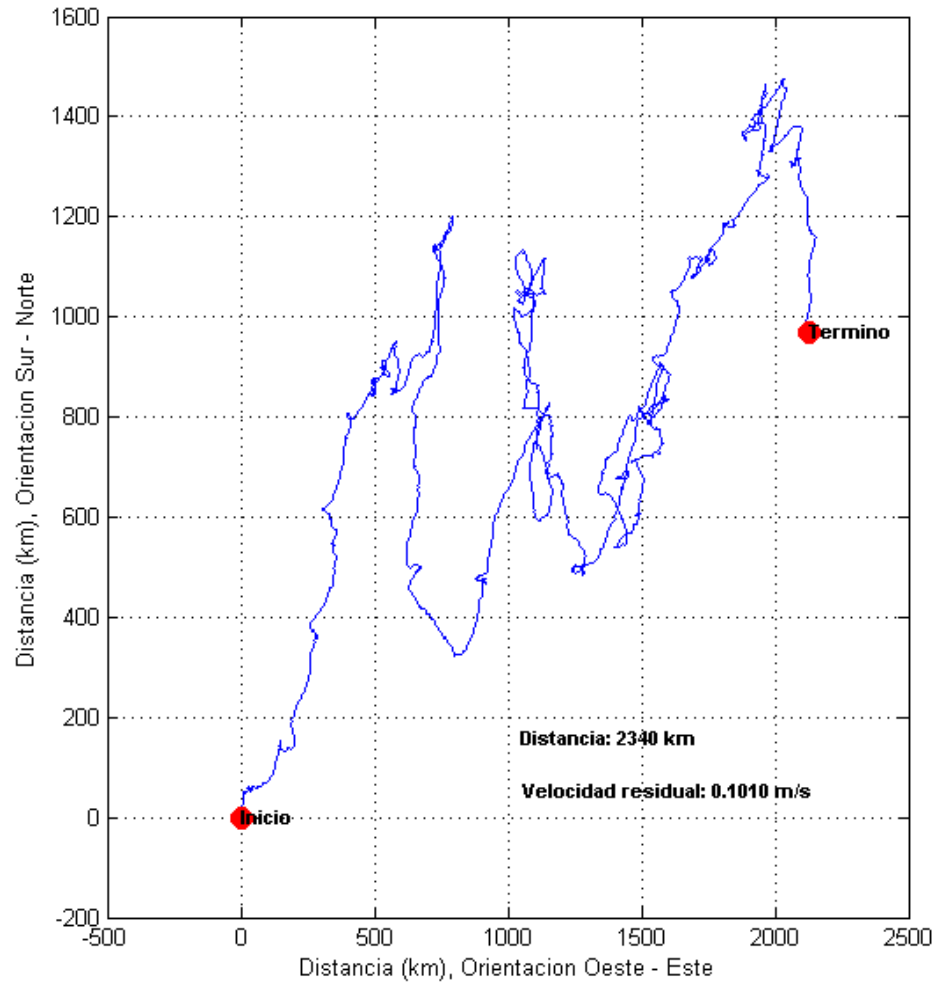
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5-2: Vector progresivo de la corriente en la capa intermedia.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5-3: Vector progresivo de la corriente en la capa superficial**



Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 MAREAS

El tipo de marea característica para la localidad de Quintero es semi-diurno, correspondiente al patrón típico del litoral central de Chile, esto quiere decir que, existen dos pleamares y dos bajamares en un día.

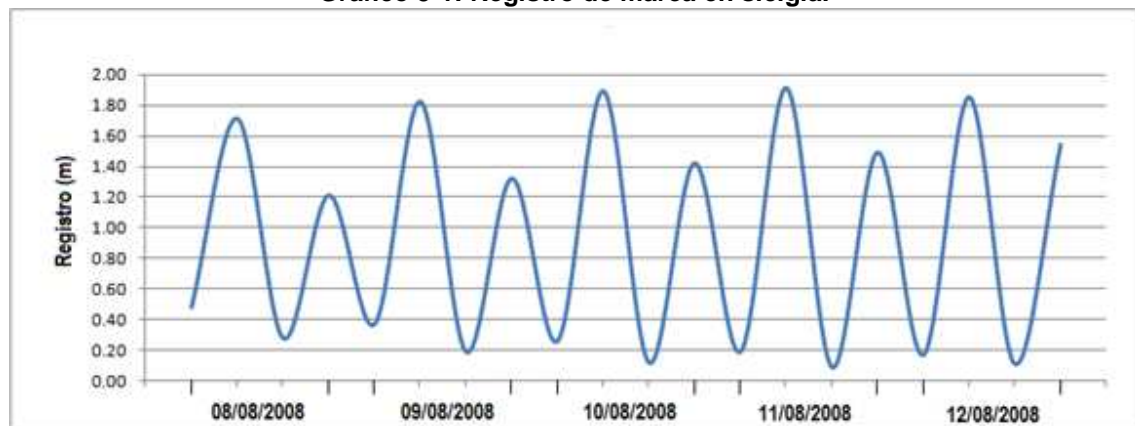
El máximo rango de la marea en sicigia, es del orden de 1,8 m (figura 5-1), mientras que en cuadratura llega hasta 0,4 m (figura 5-2)

**Tabla 5-4: Nivel de marea en Bahía de Quintero**

Resumen Mareal	Registros (m)
Promedio NMM	0.9
Promedio Plea Mayor	1.54
Promedio Baja Menor	0.4
Plea Mayor	1.97
Baja Menor	0.8

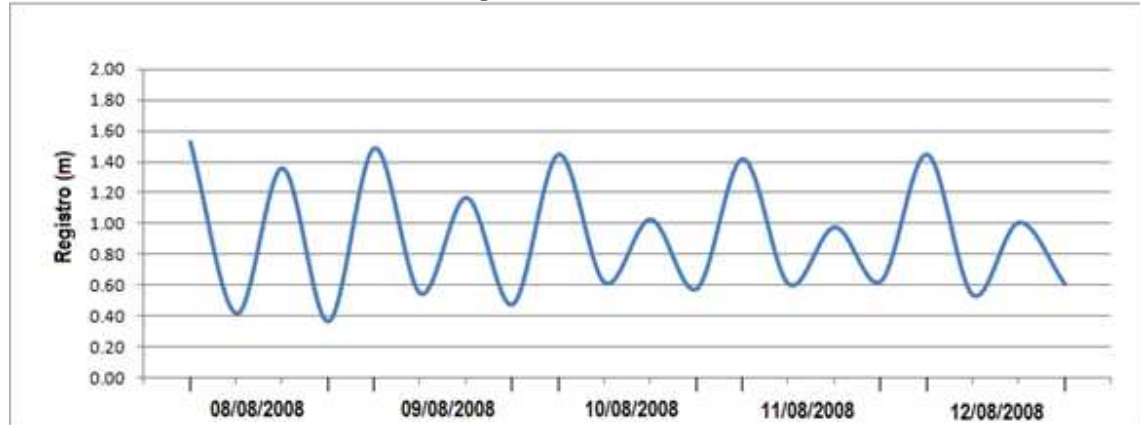
Fuente: SHOA, 2008.

**Gráfico 5-1: Registro de marea en sicigia.**



Fuente: SHOA, 2008.

**Gráfico 5-2: Registro de marea en cuadratura.**



Fuente: SHOA, 2008.

### 5.3 VIENTOS

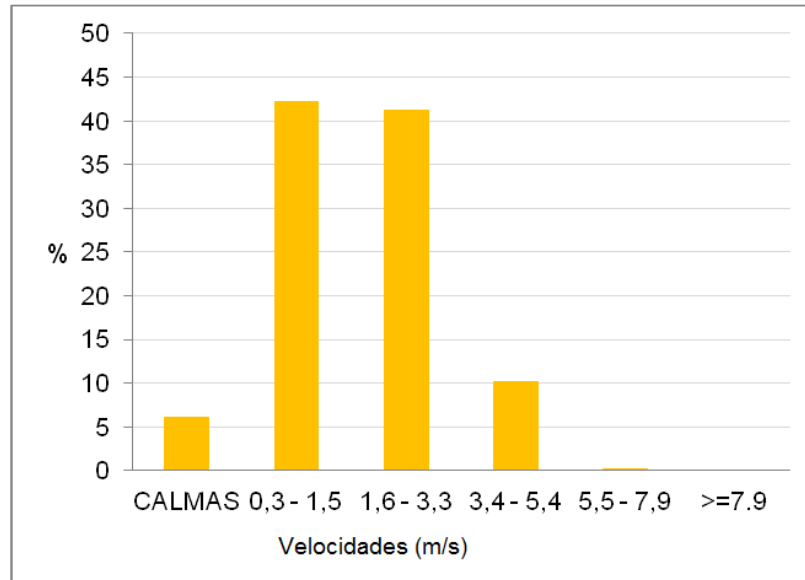
La tabla 5-5 y la figura 5-3 muestran que, en general, para el período agosto-noviembre, la magnitud del viento fue moderada, con promedios en torno a los 2 m/s. Las direcciones de los vientos más intensos provienen del oeste, y los de baja intensidad provienen desde el este.(figura 5-4)

**Tabla 5-5: Estadística básica del viento (Agosto-Noviembre 2006)**

Valor Estadístico	Magnitud m/s
Máximo	6,75
Mínimo	0,00
Media	1,84
Varianza	1,30

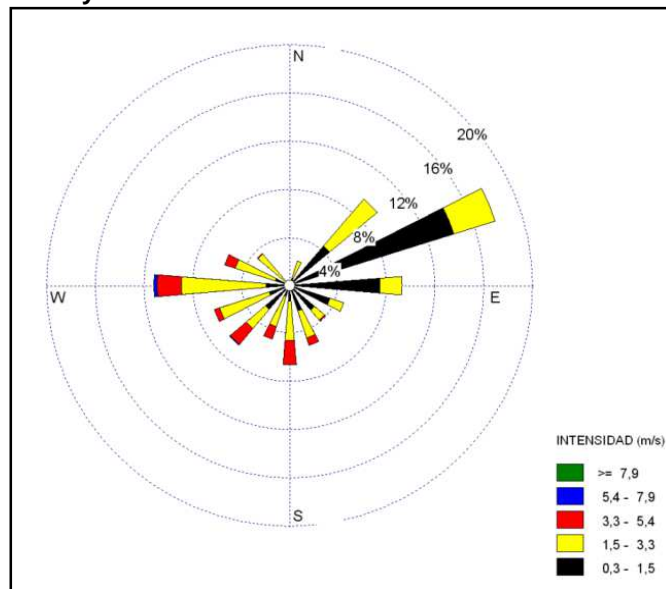
Fuente: Oyarce, 2009.

**Gráfico 5-3: Distribución de Frecuencia de Viento – Bahía Quintero**



Fuente: Oyarce, 2009.

**Figura 5-4: Rosa y Distribución de Frecuencia de Viento - Bahía de Quintero.**



Fuente: Oyarce. 2009.

## **5.4 COLUMNA DE AGUA**

### **5.4.1 TEMPERATURA**

La temperatura superficial fue de 14,7°C, evidenciando una disminución hacia la capa de fondo marino donde se alcanzaron valores de 12,7°C.

Los resultados que arroja el análisis de la columna de agua del sector en estudio, demuestran una baja variabilidad térmica. En los primeros 10 m se observa una capa homogénea con valores cercanos a los 14°C, para luego descender rápidamente con la profundidad (30 m), que corresponde a la región termoclina. Bajo esta capa la temperatura decrece gradualmente hasta alcanzar valores mínimos de 12,7 °C a 51 m de profundidad.

Los valores de temperatura detectados en la zona, pueden ser considerados normales, ya que están dentro del rango estacional que se encuentra en estas latitudes. Un estudio realizado por Semar (1991) señala que en la costa de Quintero, el rango de temperaturas medido estuvo entre los 14,1 a 15,8°C, en verano y entre los 11,8 y 12,1°C en invierno.

### **5.4.2 SALINIDAD**

Al igual que para el caso de la temperatura, la salinidad posee una pequeña variabilidad. Los valores oscilan entre los 34,3 a 34,5 PSU entre la superficie y el fondo.

Los valores de salinidad superficial medidos, son típicos de la zona central de Chile; según el Atlas Oceanográfico de Chile (SHOA, 1996), donde frente a la costa de Quintero se observan valores superficiales entre 33,9 y 34,4.

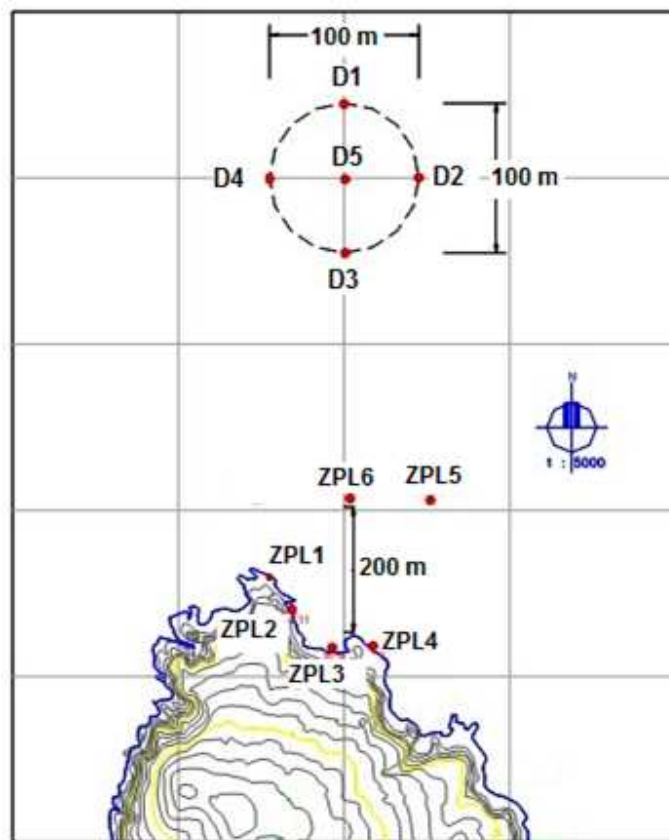
### **5.4.3 OXIGENO DISUELTO**

El contenido de oxígeno disuelto (OD) en la columna de agua, varía entre 5,1 a 9,6 mg/L, siendo más alto en superficie que en el fondo marino.

#### 5.4.4 ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO

Todos los resultados que arroja este análisis, son considerados bajos por la norma NCH 1333; sin embargo, se observó un valor de 200 NPM/100ml en la zona de descarga (punto 4), el cual es un valor alto aislado, a 1300 metros de la costa.

**Figura 5-5: Estaciones de muestreo.**



Fuente: ESVAL. 2003.

**Tabla 5-6: Resultados de Parámetros Microbiológicos**

Muestra	Unidad	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
D1	NMP/100ml	Exento	Exento
D2	NMP/100ml	Exento	Exento
D3	NMP/100ml	15	15
D4	NMP/100ml	>200	20
D5 superficie	NMP/100ml	18	18
D5 fondo	NMP/100ml	Exento	Exento
ZPL1 superficie	NMP/100ml	18	11
ZPL1 fondo	NMP/100ml	20	Exento
ZPL2 superficie	NMP/100ml	5	Exento
ZPL2 fondo	NMP/100ml	Exento	Exento
ZPL3 superficie	NMP/100ml	9	Exento
ZPL3 fondo	NMP/100ml	Exento	Exento
ZPL4	NMP/100ml	11	Exento
ZPL5	NMP/100ml	30	5
ZPL6	NMP/100ml	22	4

Fuente: [http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id\\_expediente=6250](http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=6250)

#### 5.4.5 ANÁLISIS QUÍMICO

Todos los valores observados de grasas y aceites, se encontraron bajo el valor límite recomendado por el D.S. N° 90/2000 para fuentes emisoras. El valor más alto encontrado, correspondió a 39 mg/L en el punto 7, en superficie, dicho punto se encuentra a 200 metros de la costa; otro valor alto se presentó en el punto 5, muestra de fondo (lugar de la descarga del emisario proyectado) de 32,2 mg/l. Sin embargo, estos valores encontrados en el lugar de emplazamiento del emisario, son más altos que el límite máximo permitido para descargar residuos líquidos dentro de la ZPL y menores que la norma si se descarga fuera de la ZPL, como es el caso del emisario de Quintero.

**Tabla 5-7: Resultado de Parámetros Químicos**

Muestra	Unidad	Grasas y Aceites	Detergentes
D1	mg/l	10.2	0.98
D2	mg/l	22.4	1.00
D3	mg/l	7.8	1.00
D4	mg/l	9.9	0.92
D5 superficie	mg/l	25.8	0.94
D5 fondo	mg/l	32.2	0.95
ZPL1 superficie	mg/l	16.0	0.94
ZPL1 fondo	mg/l	16.6	0.84
ZPL2 superficie	mg/l	39.0	1.00
ZPL2 fondo	mg/l	16.6	0.99
ZPL3 superficie	mg/l	17.2	1.00
ZPL3 fondo	mg/l	13.2	1.00
ZPL4	mg/l	10.2	0.98
ZPL5	mg/l	19.8	1.10
ZPL6	mg/l	11.8	1.00

Fuente: [http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id\\_expediente=6250](http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=6250)

#### 5.4.6 TRANSPARENCIA DEL AGUA

La columna de agua presentó alta transparencia en todos los sitios de muestreo. El disco Secchi fue visible entre 7 y 9 metros de profundidad.

El resultado del muestro realizado de todos los parámetros físicos descritos anteriormente, se muestran en la Tabla 5-8.

**Tabla 5-8: Parámetros físicos**

Estación	Temperatura (°C)	Salinidad	PH	Disco Secchi (m)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
D1	14.9	34.40	8.13	7.2	9.95
D2	14.6	34.38	8.11	7.2	9.86
D3	14.6	34.36	8.15	7.2	9.86
D4	14.4	34.36	8.12	7.2	9.86
D5 superficie	14.7	34.40	8.12	7.2	9.70
D5 fondo	12.7	34.56	8.03	-	10.45
ZPL1 superficie	14.1	34.50	8.18	9.1	8.60
ZPL1 fondo	13.2	34.50	8.10	-	9.98
ZPL2 superficie	14.7	34.50	7.98	9.1	8.87
ZPL2 fondo	12.9	34.55	8.05	-	10.10
ZPL3 superficie	14.5	34.42	8.13	9.1	8.03
ZPL3 fondo	13.0	34.54	8.13	-	10.23
ZPL4	14.2	34.40	8.18	-	-
ZPL5	14.7	34.41	8.22	-	-
ZPL6	14.5	34.43	8.15	-	-

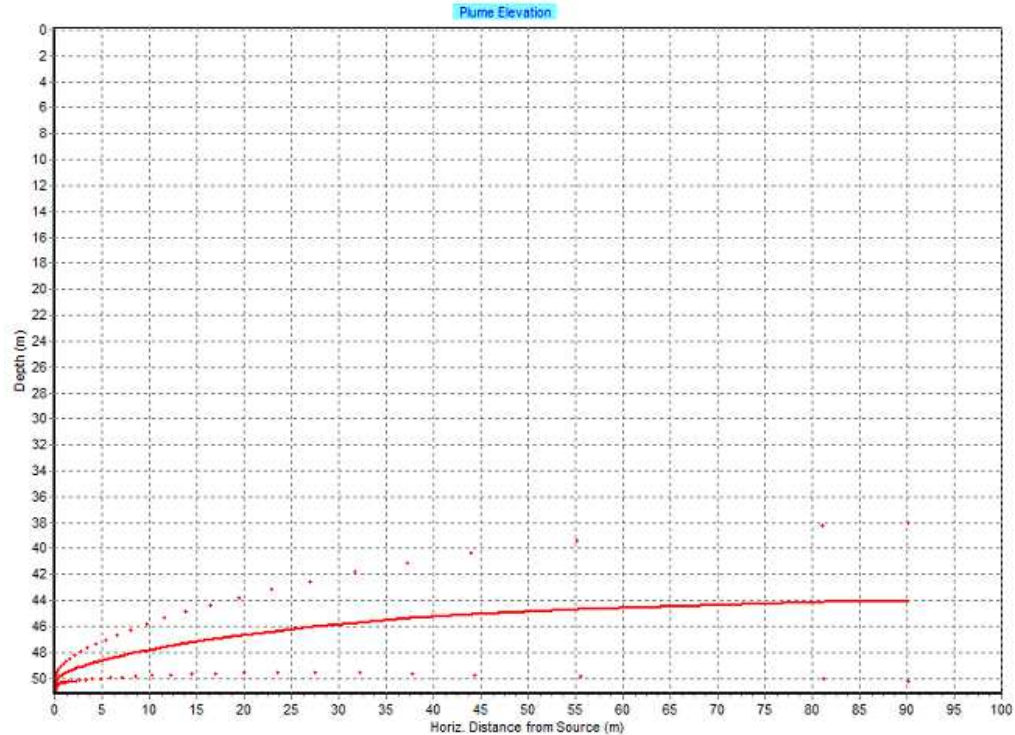
Fuente: [http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id\\_expediente=6250](http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=6250)

## 6 MODELACIÓN

### 6.1 DETERMINACIÓN DE LA DILUCIÓN INICIAL

El resultado de la elevación de la pluma, dada por la modelación Visual Plume, se puede observar en la Figura 6-1: Comportamiento vertical de la pluma. La mínima concentración detectable se alcanza aproximadamente a los 90 m del punto de descarga. Bajo este escenario, la pluma no alcanza la superficie, puesto que el modelo predice que se diluye antes de los 38 m de profundidad. Por lo tanto, la pluma al llegar a la superficie lo hará en forma completamente diluida. La línea central de la proyección de la pluma es la concentración promedio máxima de dilución, y la línea punteada es la proyección de la concentración mínima detectable. A los 90 m del punto de descarga, la concentración de la carga de coliformes fecales se hace indetectable igualándose a la concentración natural. Además, la pluma no está en contacto con el fondo marino en forma ligera o débil (observar la línea punteada inferior), esto debido a las velocidades de las corrientes que son homogéneas y arrastran la pluma en el sentido de las corrientes.

**Figura 6-1: Comportamiento vertical de la pluma**



Fuente: Elaboración propia

## 6.2 MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN

### 6.2.1 SIMULACIÓN CON MODELO HIDRODINÁMICO RMA2

El análisis de corrientes elaborado para este proyecto, evidenció que los valores superficiales presentaron un predominio de las direcciones asociadas al 1° y 2° cuadrante.

La calibración se efectuó con los datos de correntometría disponibles para este estudio, y se utilizaron datos de marea en sicigia y en cuadratura, además de datos de vientos.

### 6.2.1.1 SICIGIA

La calibración se efectuó considerando el registro de marea obtenido de la Tabla de Marea 2008 (Tabla 6-1) y el registro de viento (Capítulo 4.4.4). Cada uno de los escenarios de la tabla 6-1 consideraba, además, forzamiento por viento de 6,75 m/s desde la dirección W (Capítulo 5.3).

Esta información fue utilizada para establecer de manera cualitativa la dirección del flujo para condiciones de marea vaciante y llenante.

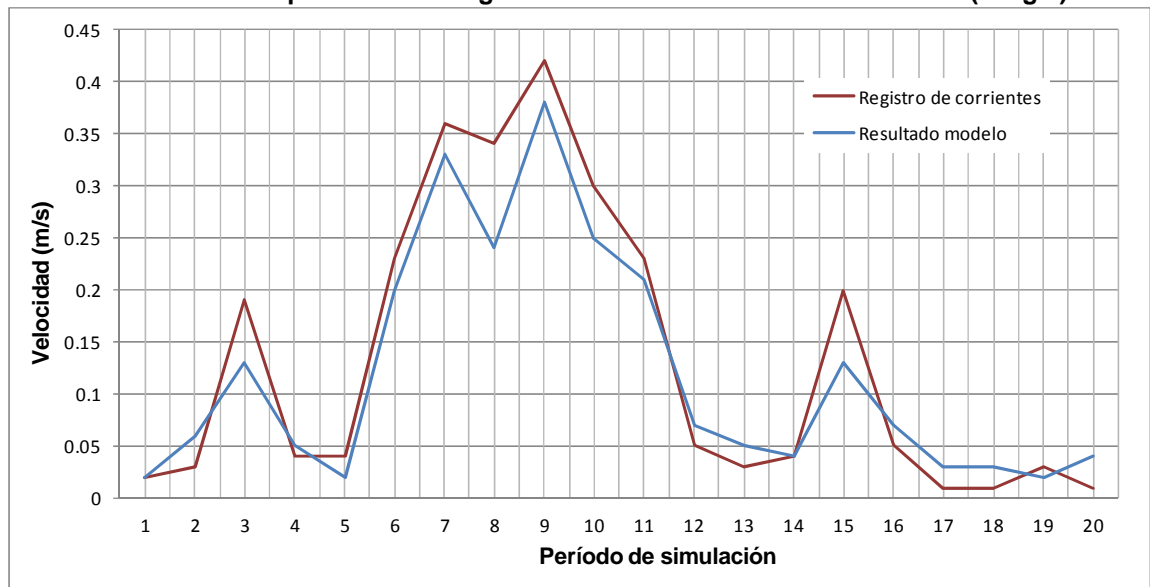
**Tabla 6-1: Escenario de modelación en sicigia**

ESCENARIO	DIA	ALTURA DE MAREA (m)
1	08/08/2008	0.48
2		1.71
3		0.28
4		1.21
5	09/08/2008	0.37
6		1.82
7		0.19
8		1.32
9	10/08/2008	0.26
10		1.89
11		0.12
12		1.42
13	11/08/2008	0.19
14		1.91
15		0.09
16		1.49
17	12/08/2008	0.17
18		1.85
19		0.11
20		1.54

Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico 6-1 se aprecia que el modelo hidrodinámico reproduce de manera adecuada las magnitudes de las corrientes en las cercanías de la ubicación del emisario.

**Gráfico 6-1: Comparación de magnitudes de corrientes SHOA v/s RMA2 (sicigia).**



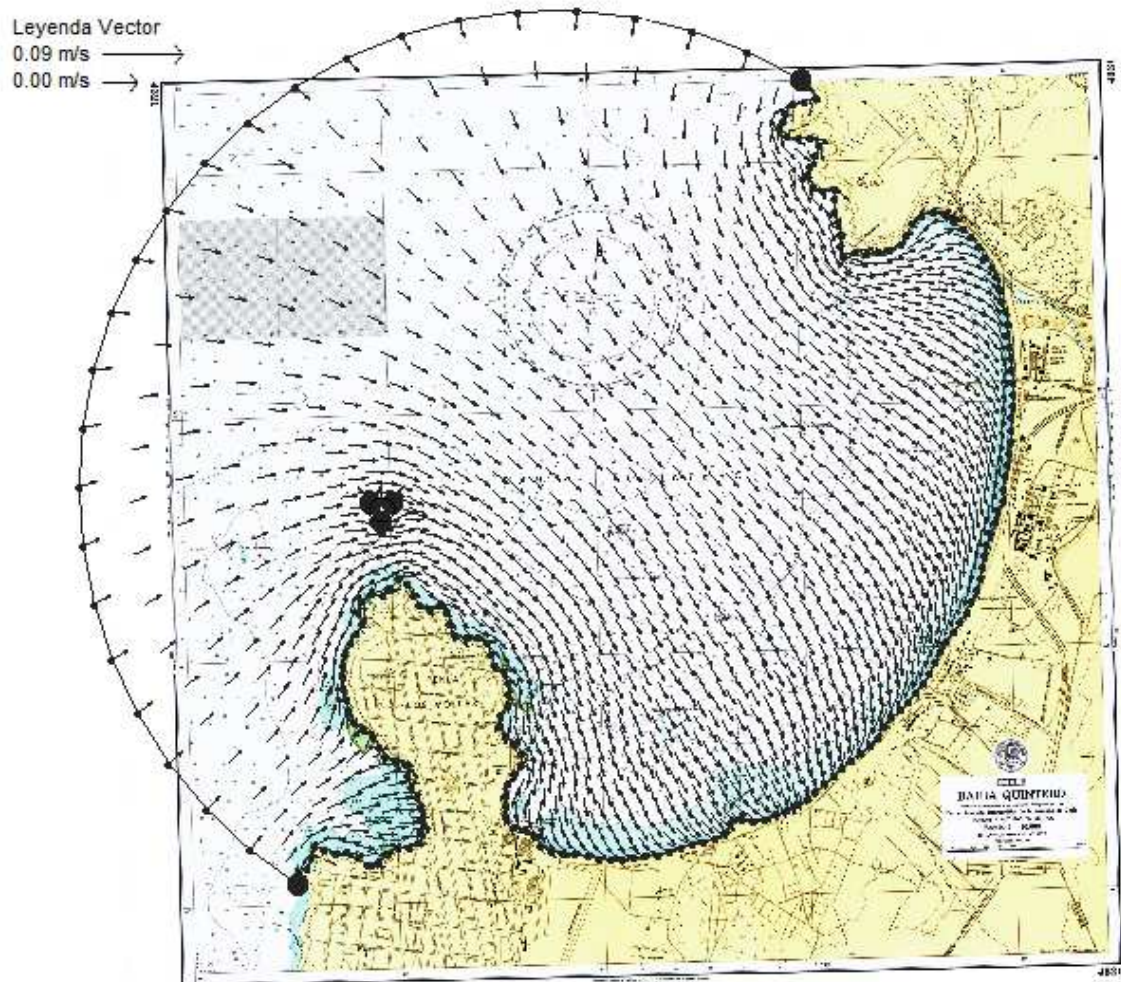
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos a partir del ajuste de regresión lineal para obtener el coeficiente de correlación entre las componentes ortogonales de la serie observada y modelada de corrientes, muestran un grado de asociación entre las componentes u de 0.95 (Gráfico 6-2), mientras que la componente v mostró un coeficiente de correlación de 0.80 (Gráfico 6-3).



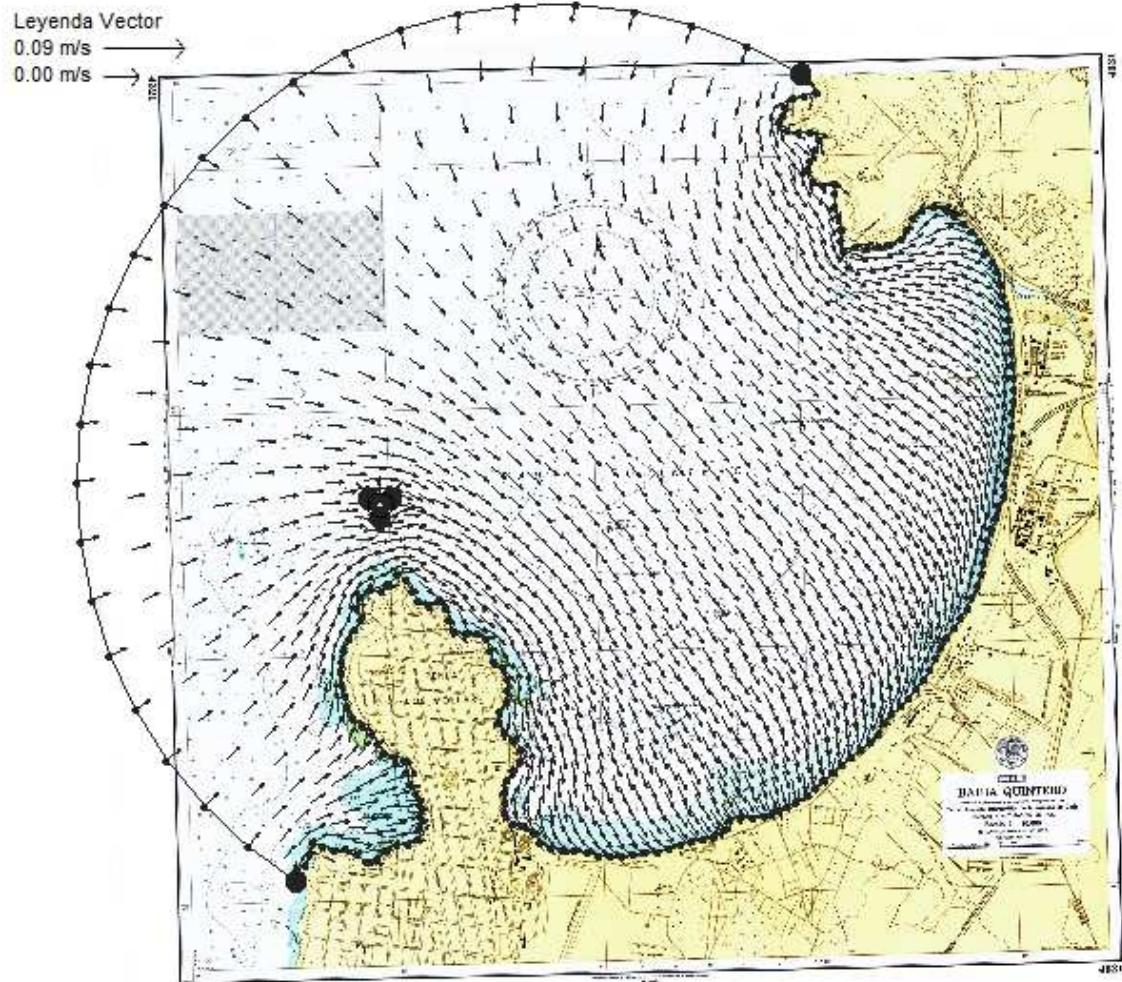
La circulación y velocidad de las aguas en la bahía, están influenciadas por las corrientes de marea, observando en una condición llenante las corrientes dirigidas hacia el interior de la bahía, situación opuesta a la observada en marea vaciante, en la cual las corrientes tienden a orientarse fuera de la bahía (Figura 6-2, Figura 6-3 y Figura 6-4).

**Figura 6-2: Simulación dinámica Escenario 4 (marea promedio en sicigia)**



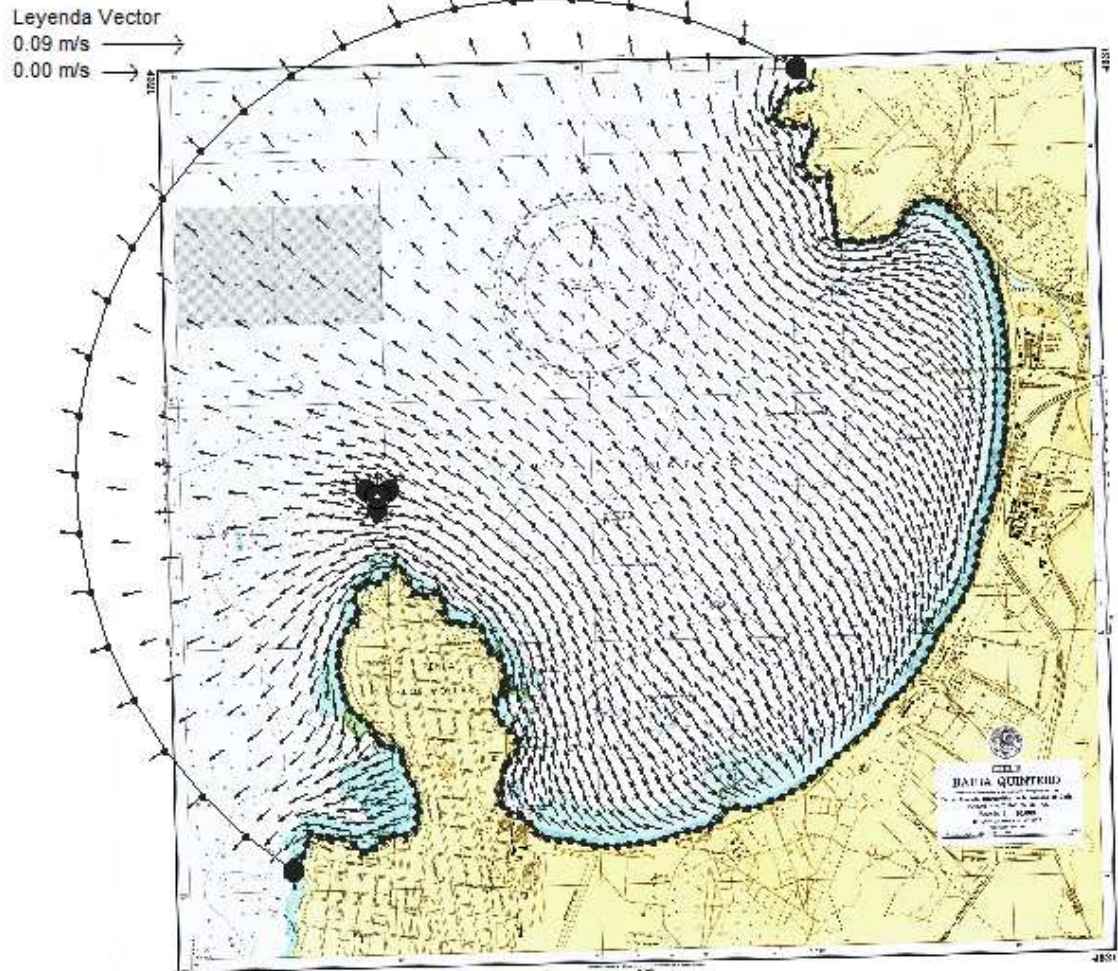
Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-3: Simulación dinámica Escenario 14 (pleamar en sicigia).**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-4: Simulación dinámica Escenario 15 (bajamar en sicigia).**



Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.2 CUADRATURA

La calibración se efectuó considerando el registro de marea obtenido de la Tabla de Marea 2008 (Tabla 6-1) y el registro de vientos (Capítulo 5.3). Cada uno de los escenarios de la tabla 6-2 consideraba, además, forzamiento por viento de 6,75 m/s desde la dirección W (Capítulo 5.3).

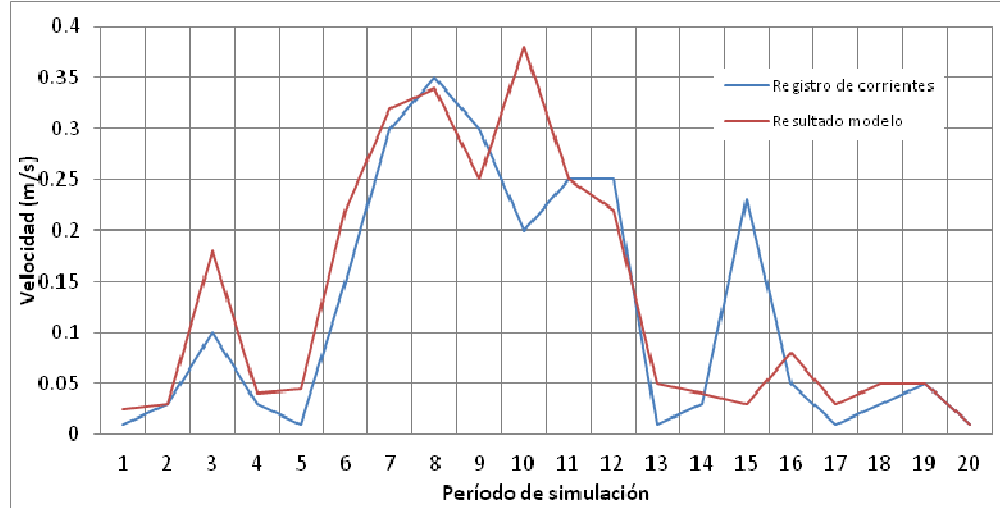
Esta información fue utilizada para establecer de manera cualitativa la dirección del flujo para condiciones de marea vaciante y llenante.

**Tabla 6-2: Escenario de modelación en cuadratura**

ESCENARIO	DIA	ALTURA DE MAREA (m)
1	15/08/2008	1.53
2		0.42
3		1.36
4		0.37
5	16/08/2008	1.49
6		0.55
7		1.17
8		0.48
9	17/08/2008	1.45
10		0.62
11		1.03
12		0.58
13	18/08/2008	1.42
14		0.61
15		0.98
16		0.63
17	19/08/2008	1.45
18		0.54
19		1.01
20		0.61

Fuente: Elaboración propia.

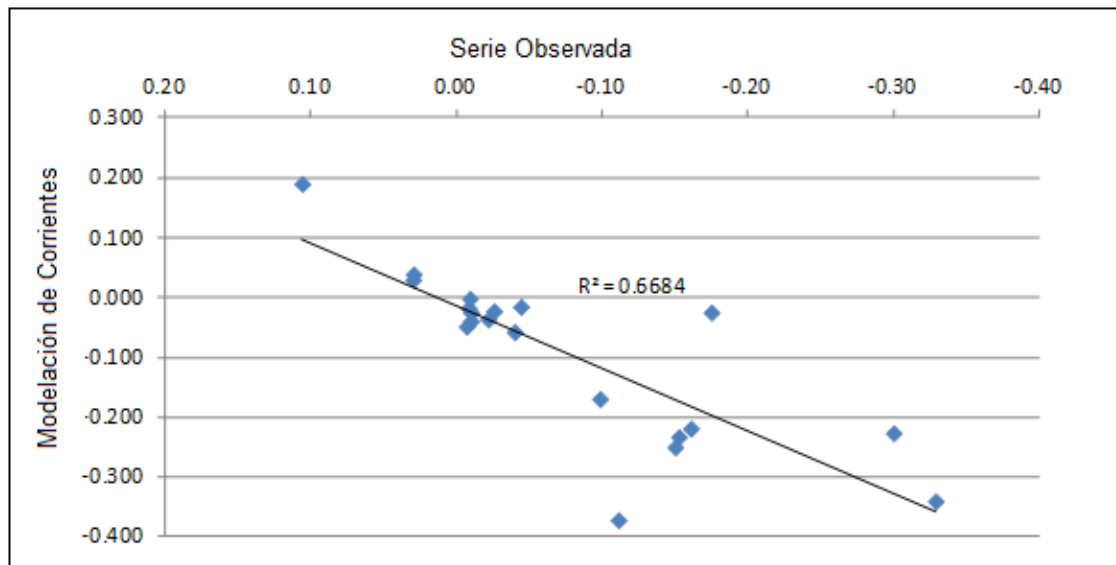
**Gráfico 6-4: Comparación de magnitudes de corrientes SHOA v/s RMA2 (cuadratura).**



Fuente: Elaboración propia.

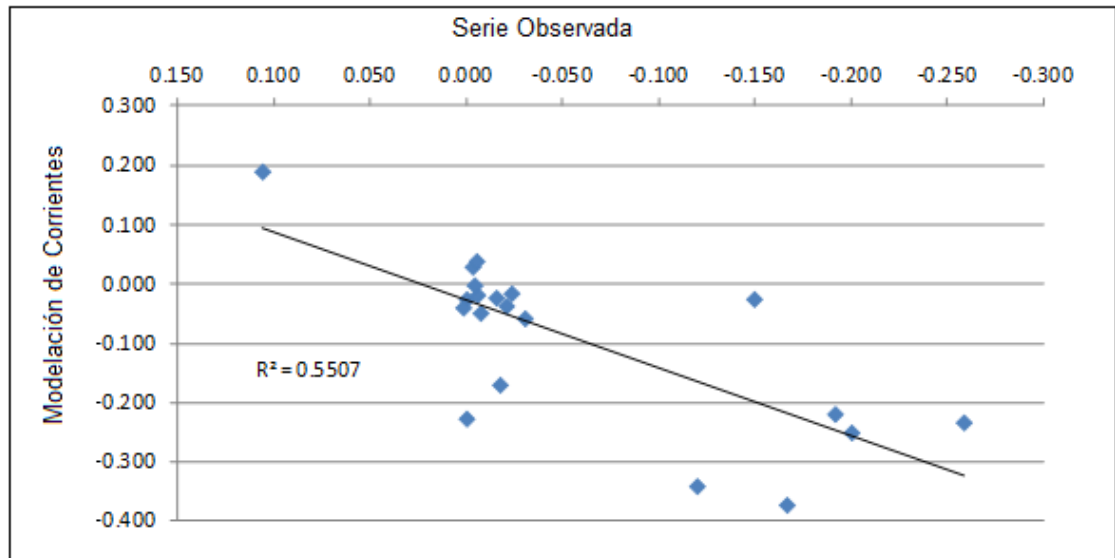
En el Gráfico 6-4 se aprecia que el modelo hidrodinámico reproduce de manera adecuada la magnitud de las corrientes en las cercanías de la ubicación del emisario.

**Gráfico 6-5: Correlación componente u – serie observada v/s modelación de corrientes en cuadratura**



Fuente: Elaboración propia

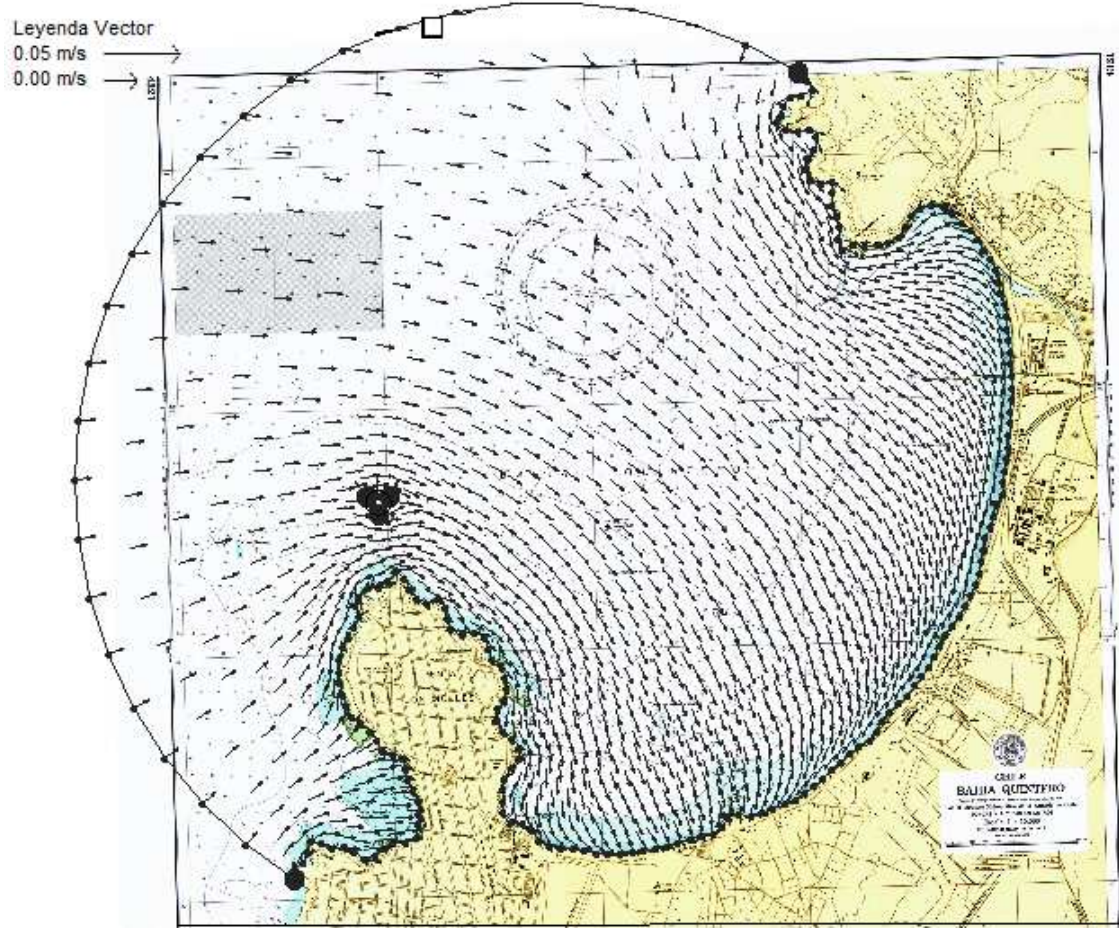
**Gráfico 6-6: Correlación componente v – serie observada v/s modelación de corrientes en cuadratura**



Fuente: Elaboración propia

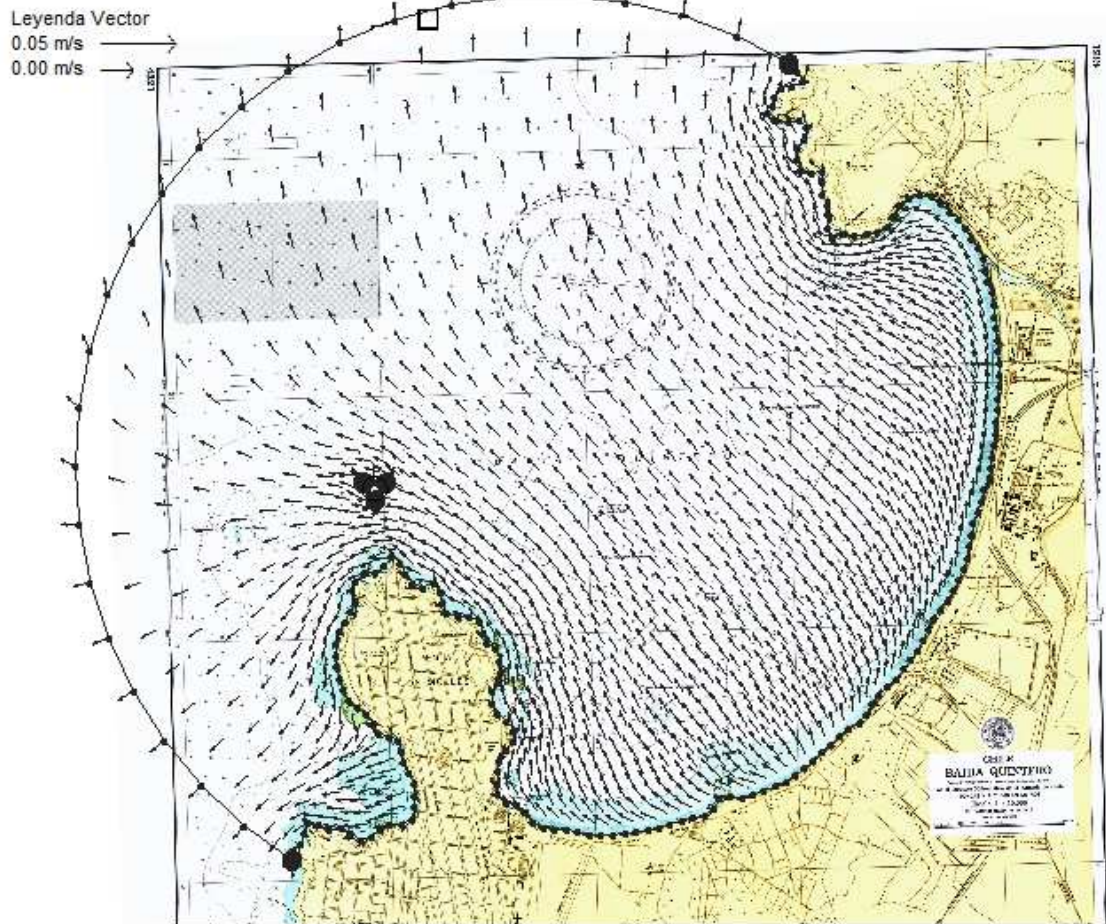
Los resultados obtenidos a partir del ajuste de regresión lineal para obtener el coeficiente de correlación entre las componentes ortogonales de la serie observada y modelada de corrientes, mostró un grado de asociación entre la componente u de 0,66 (Gráfico 6-5), mientras que al contrastar las componentes v se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,55 (Gráfico 6-6).

**Figura 6-5: Simulación dinámica Escenario 1 (pleamar en cuadratura)**



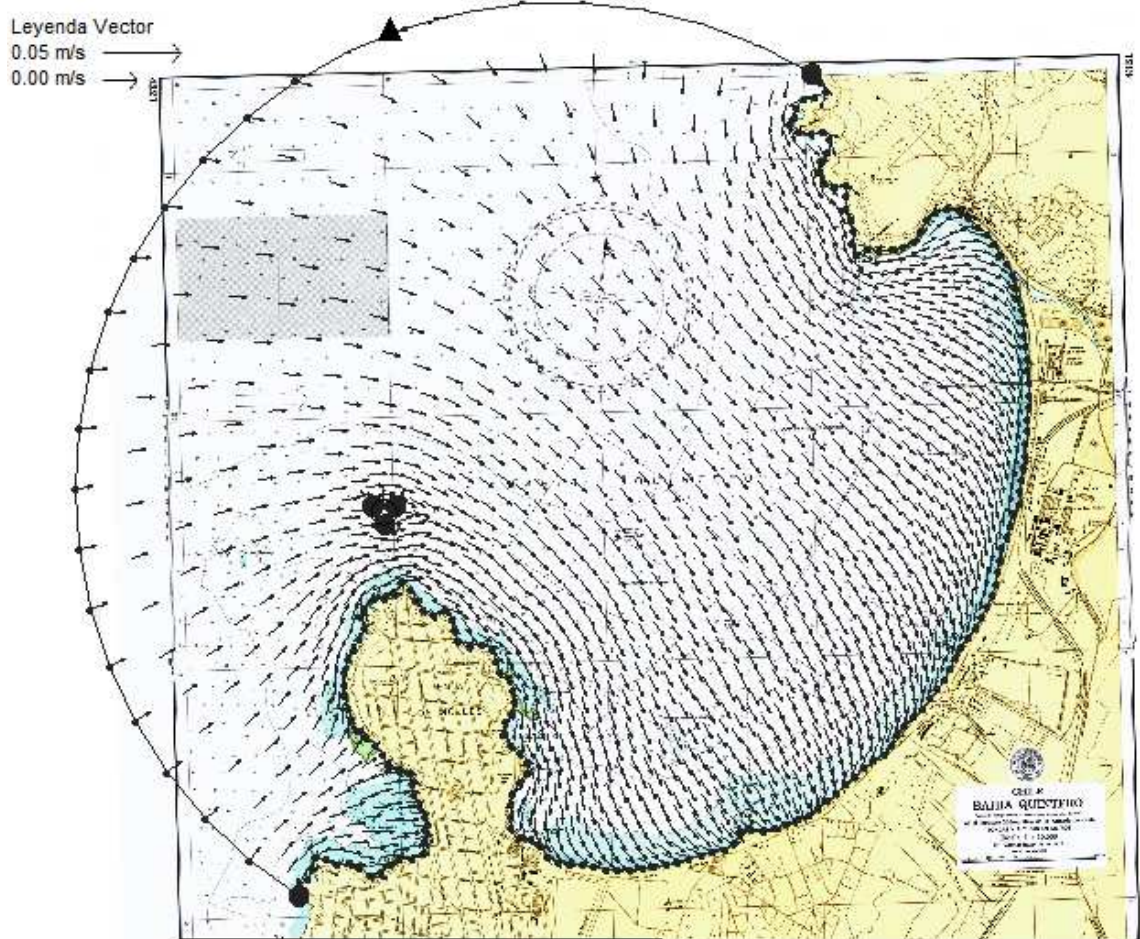
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6-6: Simulación dinámica Escenario 4 (bajamar en cuadratura)**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6-7: Simulación dinámica Escenario 15 (marea promedio en cuadratura)**



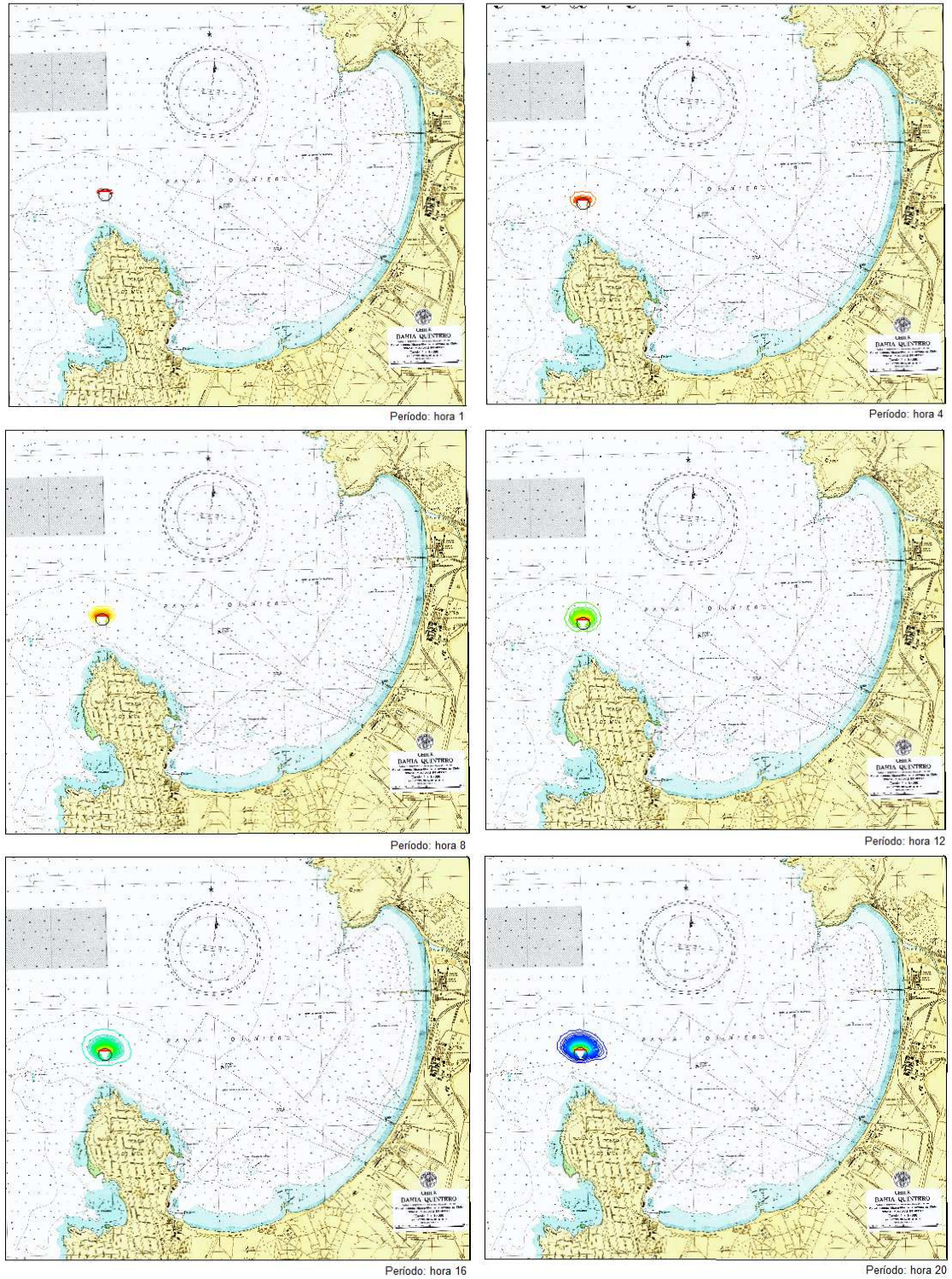
Fuente: Elaboración propia.

### **6.2.2 SIMULACIÓN CON MODELO DE DISPERSIÓN RMA4**

La modelación se prolongó hasta que la pluma logró estabilizarse; es decir, alcanzó el equilibrio entre el caudal de salida y el decaimiento, a objeto de definir el comportamiento de esta. Considerando que el decaimiento bacteriano de la pluma de descarga es de un T90 de 1,5 hrs, se estima que el tiempo mínimo de modelación es de 12 hrs. No obstante, se han adoptado 48 hrs. de simulación para abarcar dos ciclos completos de marea.

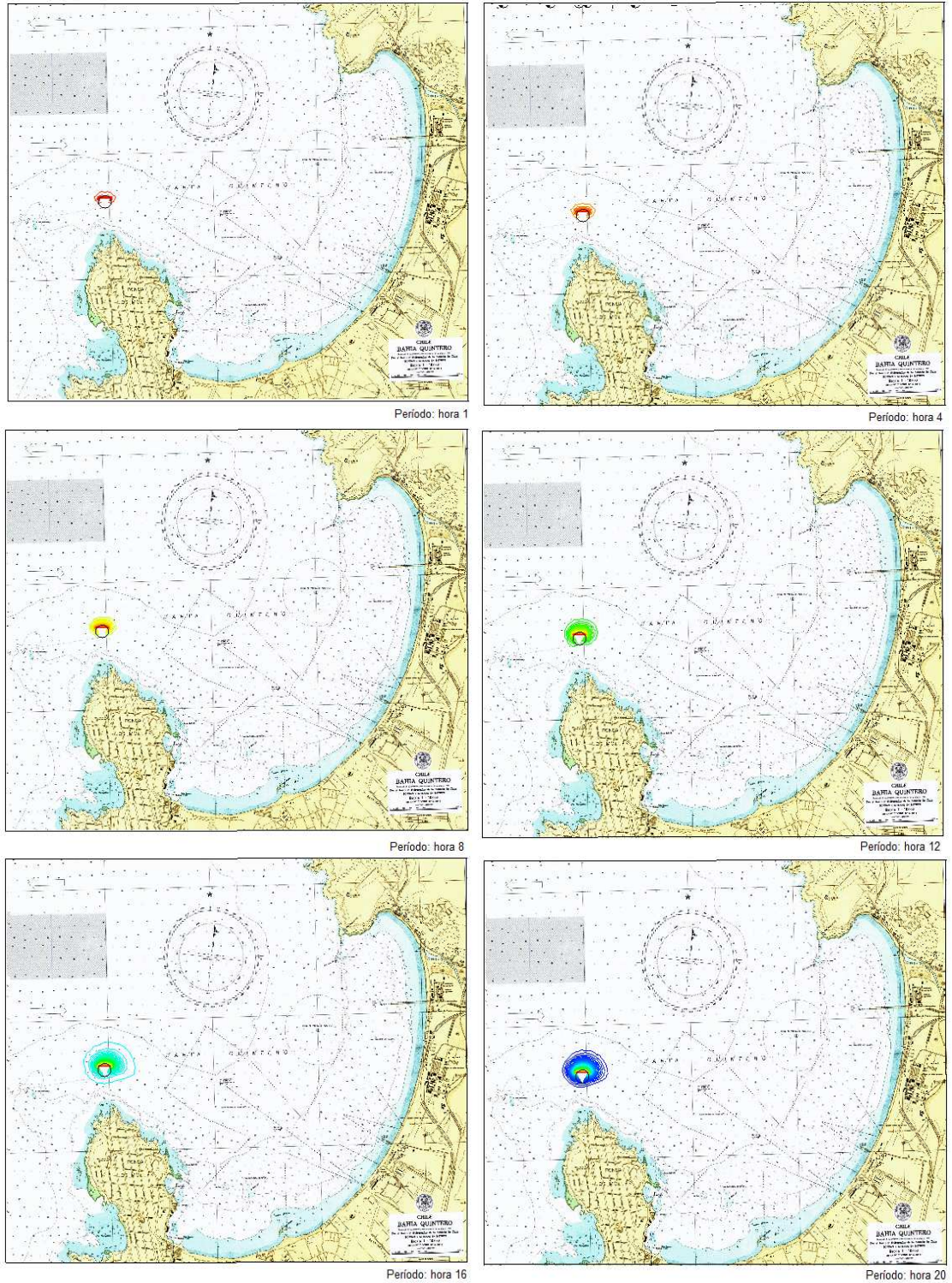
Para este caso se pudo observar que la pluma logra una dilución adecuada, no obstante alcanza el área de manejo con una concentración de 10 NMPCOL/100ml respetando la descarga máxima permitida (70 NMPCOL/100ml).

**Figura 6-8: Escenarios analizados por el modelo de calidad de agua RMA4 en sicigia.**



Fuente: elaboración propia

**Figura 6-9: Escenarios analizados por el modelo de calidad de agua RMA4 en cuadratura**



Fuente: Elaboración propia.

## **7 CONCLUSIÓN**

En este capítulo se analizan los resultados expuestos en el trabajo, se presentan las principales conclusiones y se señalan algunas recomendaciones para la realización de estudios posteriores.

### **7.1 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL TRABAJO**

Luego de simular la corriente generada por marea en su condición llenante y tomando en cuenta las restricciones ambientales de descarga máxima de 1000 coliformes NMP/100ml dentro de ZPL; y 70 coliformes NMP/100ml en áreas de manejo, así como ausencia de concentraciones para contacto directo en costa, se determinó que el emisario cumple con la legislación chilena vigente, sin embargo, la simulación deberá ser corroborada con los datos de una campaña de verano, aunque se estima que los resultados no deben variar en gran medida pues las condiciones de invierno son más extremas y representan el peor escenario para la dispersión de contaminantes.

#### **7.1.1 VISUAL PLUMES**

Los modelos de campo cercano describen con buena resolución los detalles de los procesos de mezcla (advección y difusión) pero son limitados en la cinética del contaminante, ya que asumen que las sustancias son conservativas o tienen decaimiento lineal. Esto sólo es posible para el campo cercano ya que el tiempo de residencia o permanencia es corto. En estos modelos son importantes los detalles del diseño del emisario, tales como profundidad de descarga, número y diámetro de boquillas, dirección de las boquillas respecto a las corrientes, etc. Todos parámetros controlables en el diseño y construcción de la obra.

Según los resultados obtenidos de la modelación de la pluma de dispersión, con valores de dilución de 1000 veces a distancias entre 40 y 90 m de la fuente emisora, se puede establecer que el emisario submarino se encuentra en un lugar adecuado según las señaladas características de dilución en la columna de agua; bajo este escenario, la

pluma no alcanza la superficie, puesto que el modelo predice que se diluye bajo los 38 m de profundidad. Por lo tanto, la pluma al llegar a la superficie lo hará en forma completamente diluida.

### **7.1.2 RMA2**

Se aplicó el modelo RMA2 para caracterizar las corrientes originadas por mareas y vientos en la región definida para sicigia y cuadratura. Este procedimiento constituye una práctica apropiada para estimar la dispersión sobre cualquier contaminante, ya que incluye las variables más importantes asociadas a este fenómeno.

Por otra parte, el período de modelación adoptado permite incorporar las causas principales de la variabilidad temporal del recurso, por lo que obtiene una estimación representativa de las corrientes del lugar.

Con los resultados de la modelación hidrodinámica fue posible distinguir:

- El campo de corrientes obtenido indica que en condiciones de pleamar las corrientes ingresan a la bahía y en bajamar las corrientes salen de la bahía.
- A mayor amplitud de marea (diferencia entre pleamar y bajamar) corresponden mayores corrientes por el volumen de agua a trasladarse en el mismo tiempo.
- Los resultados obtenidos a partir del ajuste de regresión lineal para obtener el coeficiente de correlación entre las componentes ortogonales de la serie observada y modelada de corrientes, en sicigia se reconoce un grado de asociación significativa de las componentes  $u$  y  $v$  ( $R > 0,8$ ), mientras que en cuadratura ambas componentes mostraron coeficientes de correlación menos significativos ( $R < 0,65$ ). Esto puede deberse a las características propias del modelo que no considera los gradientes de presión generados por la estratificación y que puede jugar un papel importante en su patrón de circulación.

### **7.1.3 RMA4**

La dispersión horizontal depende fuertemente de las corrientes locales, oleaje y viento del ambiente, por lo que se deben aprovechar los factores de diseño de la mejor forma para así maximizar el funcionamiento del emisario.

Se aplicó el modelo RMA4 para la simulación de la dispersión de coliformes fecales descargadas por el emisario submarino de Quintero, el cual arrojó como resultado que la pluma de dispersión entra en contacto con un área de manejo establecida (10 NMPCOL/100ml), pero cumpliendo con la normativa ambiental vigente en nuestro país.

Los resultados de los datos de corrientes revelan que en promedio, el flujo se dirige hacia el interior de la bahía, una condición que podría eventualmente llevar partículas no diluidas hacia dicho sector. Este aspecto requiere de futura vigilancia mediante controles en terreno de las concentraciones de contaminante que ingresan a la bahía.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

A continuación se presentan algunas recomendaciones orientadas principalmente a los estudios que deben incorporarse en una segunda etapa de investigación y a otros que, en general, contribuyan a un mayor conocimiento de este tipo de tecnologías.

- Estudios de impactos sobre especies y fauna de la zona.
- Incluir procesos como la turbulencia generada por el oleaje en la capa superficial del océano par poder cuantificar de forma correcta la pluma de descarga.
- Estudios de interacción y acumulación de contaminantes en el fondo marino para completar las 3 zonas que se ven impactadas en una descarga submarina de agua: zona ascendente, zona de campo de mezcla horizontal y zona terciaria o de decaimiento.
- Contar con un monitoreo de variables oceanográficas constantes (ojala que cubra las cuatro estaciones del año).

## **8 REFERENCIAS**

**CEPIS. 1988.** Ubicación y diseño de emisarios submarinos. Informe N° 43 de MARC, pp 62.

**DIRECTEMAR. 2006.** Guía Metodológica sobre procedimientos y consideraciones ambientales básicas para la descarga de aguas residuales mediante emisarios submarinos, pp 16.

**EPA. 1994.** Dilution Models for Effluent Discharges, pp 187.

**ESVAL. 2003.** Planta de tratamiento de aguas servidas y emisario submarino de Quintero. Estudio de Impacto Ambiental (EIA), pp 179.

**Frick, W.E; Roberts, P.J.W; Davis, L.R; Keyes, J; Baumgartners, D.J; George, G.P., 2001.** Visual Plumes Manual: “Dilution Models for Effluent Discharges, 4th Edition (Visual Plumes)”. Environmental Research Division, NERL, ORD. U.S. Environmental Protection Agency , pp 148.

**Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental. Departamento. De Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. 1995.** Metodología de estudio de los saneamientos litorales Universidad de Cantabria, España, pp 202.

**Jirka & Bleninger. 2004.** Diseño de emisarios submarinos con difusores para la protección de la calidad del agua costera. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, Octubre, pp 37.

**Kiely. 1999.** Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Editorial McGraw-Hill, pp 1330.

**Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 2000.** Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, D.S. N° 90, pp 15.

**NCH 1333. 1978.** Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Norma Chilena Oficial, pp 12.

**OXIQUIM. 2007.** Declaración de Impacto Ambiental Ampliación de Capacidad de Almacenamiento Terminal Marítimo Quintero, pp 55.

**Oyarce. 2009.** Evaluación de herramienta tecnológica como apoyo a las estrategias frente a derrames de hidrocarburos en el mar. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso, Facultad Ciencias del Mar y Recursos Naturales, pp 82.

**SHOA. 2008.** Tablas de Marea de la costa de Chile y puertos de la costa Sudamericana. S.H.O.A. Armada de Chile, pp 214.

**SHOA. 2008.** Campaña de medición de dirección y magnitud de corrientes Agosto/Septiembre 2008

**SHOA. 2009.** Carta náutica Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada N° 4321 de la zona de Quintero.

**Sojachenski. 2005.** Algoritmos de acoplamiento para modelos de campo cercano y campo lejano para la predicción de descargas de efluentes de aguas residuales tratadas en la costa oceánica. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, pp 163.

**WES-HL. 2000.** Users Guide To RMA4 WES Version 4.5, US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA, pp 185.

**WES-HL. 2000.** Users Guide To RMA2 WES Version 4.5, US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA, pp 296.