



**Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico**

**“Evaluación de Herramienta Tecnológica como  
Apoyo a las Estrategias frente a Derrames de  
Hidrocarburos en el Mar”**

**María Karina Oyarce Lineros**

**Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Naturales, 2009**

## DECLARACIÓN

*Este trabajo o alguna de sus partes no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria o extranjera y organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.*

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

## DEDICATORIA

*A mis padres, Nora y Eduardo.*

*A mi hermano*

*Con todo mi cariño.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero dar las gracias a las personas que me apoyaron en el transcurso de mi carrera universitaria, mis padres Eduardo y Nora, por su preocupación y esfuerzo por entregarme las mejores herramientas para desempeñarme en el mundo laboral y en la vida.

También quiero agradecer a quienes contribuyeron a la realización de este trabajo. Particularmente agradezco a mi profesor guía, Aldo Fedele por su apoyo incondicional. Doy gracias además, a los profesores Patricio Winckler y Mario Cáceres, por hacerse partícipes de este estudio.

También quiero agradecer a OceanGreen S.A., que proporcionaron con fines académicos y en forma gratuita, registros y datos imprescindibles para el desarrollo de este estudio.

## CONTENIDOS

DECLARACIÓN.....	I
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
CONTENIDOS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN.....	VIII
1 ANTECEDENTES GENERALES .....	1-1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1-1
1.2 OBJETIVOS .....	1-1
1.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	1-2
1.4 ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO .....	1-2
1.5 DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN CHILE.....	1-2
1.6 MODELACIÓN DEL DERRAME DE HIDROCARBUROS EN EL MAR .....	1-4
1.7 COMPORTAMIENTO DE LOS HIDROCARBUROS EN EL MAR .....	1-5
2 DESCRIPCIÓN DE MODELOS RMA2 Y RMA4 .....	2-1
2.1 INTRODUCCIÓN .....	2-1
2.2 MODELO HIDRODINÁMICO RMA2.....	2-1
2.3 MODELO DE CALIDAD DE AGUA RMA4 .....	2-8
2.4 PROCESOS DE MODELACIÓN .....	2-12
3 APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO .....	3-1
3.1 INTRODUCCIÓN .....	3-1
3.2 ÁREA DE ESTUDIO .....	3-1
3.3 SECTOR POSIBLE DE DERRAME .....	3-3
3.4 CONDICIONES AMBIENTALES .....	3-4
3.5 GENERACIÓN DE GRILLA COMPUTACIONAL .....	3-10
3.6 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO .....	3-14
4 RESULTADOS.....	4-1
4.1 HIDRODINÁMICA DE BAHÍA QUINTERO .....	4-1
4.2 DERRAME DE HIDROCARBURO EN BAHÍA QUINTERO.....	4-8
5 CONCLUSIONES .....	5-1
5.1 RECOMENDACIONES .....	5-3
6 REFERENCIAS.....	6-1
7 ANEXOS .....	7-1
ANEXO A: TASAS DE TRANSFERENCIAS DE TERMINALES MARÍTIMOS (2000 – 2007).....	7-1
ANEXO B: MEDIO AMBIENTE FÍSICO DE LA BAHÍA DE QUINTERO.....	7-30
ANEXO C: CARTA AUTORIZACIÓN PARA EL USO DE DATOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS .....	7-36

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1: Escala bunker, números de fuel oil (FO) ASTM y número IFO.....	1-7
Tabla 1-2: Comparación de características físicas de algunos productos derivados de petróleo.....	1-8
Tabla 1-3: Procesos de envejecimiento y escalas de tiempo para respuestas de emergencia.....	1-10
Tabla 3-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.....	3-5
Tabla 3-1: Valores no -armónicos obtenidos del análisis de mareas en la Bahía de Quintero.....	3-6
Tabla 3-3: Información de la malla.....	3-14
Tabla A-1: Tasas de transferencia de los terminales, 2000 a 2007.....	7-1
Tabla A-2: Registros históricos de derrames ocurridos en la Bahía de Quintero.....	7-3
Tabla B-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.....	7-30
Tabla B-2: Valores No - Armónicos.....	7-32
Tabla B-3: Estadística básica del viento (Agosto – Noviembre 2006).....	7-33
Tabla B-4: Frecuencia de incidencia del viento Agosto – Noviembre 2006).....	7-33
Tabla B-5: Estadística básica de las celdas de corrientes.....	7-35
Tabla B-6: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 16.....	7-36
Tabla B-7: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 8.....	7-36
Tabla B-8: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 2.....	7-36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Ocurrencias de hidrocarburos derramados en Chile desde 2000 al 2006.....	1-3
Figura 1-3: Esquema del proceso intemperización del hidrocarburo derramado en el mar.....	1-9
Figura 1-4: Influencia de la velocidad del viento con la velocidad de la corriente.....	1-12
Figura 1-5: Diagrama de información necesaria para modelación de derrame de hidrocarburos. ....	1-13
Figura 2-1: Ejemplo de condición inicial dinámico como condición de borde. ....	2-6
Figura 2-2: Diagrama del proceso de modelación hidrodinámico y de calidad de agua.....	2-12
Figura 3-1: Área de estudio Bahía de Quintero, V Región, Chile. ....	3-1
Figura 3-2: Sector portuario de la Bahía de Quintero, V Región, Chile. ....	3-2
Figura 3-3: Porcentajes de hidrocarburos manipulados por terminales marítimos. ....	3-3
Figura 3-4: Porcentajes de tasas de transferencia de hidrocarburos por terminales marítimos. ....	3-4
Figura 3-5: Ubicación de equipos utilizados en estudio. ....	3-4
Figura 3-6: Registro de Nivel Medio del Mar de la bahía de Quintero, V Región, Chile. ....	3-6
Figura 3-7: Circulación de las corrientes – Escobar et al 1971.....	3-7
Figura 3-8: Circulación de las corrientes – Bakovic y Balic, 1984. ....	3-8
Figura 3-9: Circulación de las corrientes – Malet y Andrade, 1991. ....	3-8
Figura 3-10: Región de modelación.....	3-10
Figura 3-11: Batimetría de la región de modelación. ....	3-12
Figura 3-12: Malla de elementos finitos empleada en modelo hidrodinámico. ....	3-13
Figura 3-13: Propagación de onda de marea.....	3-15
Figura 3-14: Resultado del desfase en la región de contorno abierta.....	3-16
Figura 3-15: Señal de marea. ....	3-16
Figura 4-1: Comparación mareas observada versus simulada.....	4-2
Figura 4-2: Correlación componente u – serie observada v/s modelada de corrientes. ....	4-2
Figura 4-3: Correlación componente v – serie observada v/s modelada de corrientes. ....	4-3
Figura 4-4: Simulación dinámica – 3 horas.....	4-3
Figura 4-5: Simulación dinámica – 6 horas.....	4-4
Figura 4-6: Simulación dinámica – 9 horas.....	4-4
Figura 4-7: Simulación dinámica – 12 horas.....	4-5
Figura 4-8: Simulación dinámica – 15 horas.....	4-5
Figura 4-9: Simulación dinámica – 18 horas.....	4-6
Figura 4-10: Simulación dinámica – 21 horas.....	4-6
Figura 4-11: Simulación dinámica – 24 horas.....	4-7
Figura 4-12: Vector progresivo corriente superficial. ....	4-7
Figura 4-13: Comparación magnitud de corrientes observada versus simulada. ....	4-8
Figura 4-14: Correlación marea observada versus simulada. ....	4-8
Figura 4-11: Escenarios analizados por el modelo de calidad de agua RMA4.....	4-9
Figura B-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio. ....	7-30
Figura B-2: Rosa y distribución de frecuencia de vientos. ....	7-34

Figura B-3: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 16.....	7-37
Figura B-4: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 8.....	7-37
Figura B-5: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 2.....	7-38
Figura B-6: Diagrama de vector progresivo - nivel superficial. ....	7-39
Figura B-7: Diagrama de vector progresivo - nivel intermedio. ....	7-39
Figura B-8: Diagrama de vector progresivo - nivel profundo. ....	7-40



## RESUMEN

Debido al interés en evaluar y disminuir el daño ambiental que se produce como consecuencia directa de derrames de hidrocarburos en el ambiente acuático, el presente trabajo propone implementar el modelo hidrodinámico RMA2 y de calidad de agua RMA4 desarrollados por el U.S. Army Corps of Engineers – USACE, los cuales serán aplicados en la Bahía de Quintero caracterizando el proceso físico de dispersión que afecta el transporte o movimiento del petróleo en el mar, permitiendo evaluar sus ventajas y/o inconvenientes. Además, los resultados obtenidos en el presente trabajo permitirán a la Autoridad Marítima saber si estos modelos entregan información válida para realizar sus planes de contingencia.

Para implementar los modelos computacionales RMA2 y RMA4, es necesario conocer el campo de corrientes generados por mareas en la Bahía de Quintero, implementándose el modelo hidrodinámico por medio de una simulación dinámica de 25 horas, a partir de datos de mareas y vientos medidos en la campaña de terreno realizada durante agosto a noviembre del 2006.

Para conocer la evolución de un derrame de hidrocarburo se implementó el modelo hidrodinámico RMA4, realizando una descarga de hidrocarburo accidental en un sector seleccionado a través del análisis de los registros históricos de derrames ocurridos. Obteniendo que el sector de ubicación de la Monoboya, es históricamente el que posee mayor ocurrencia de derrames de hidrocarburos. Por otro lado, el tipo de hidrocarburo a ser derramado fue elegido considerando los tipos de hidrocarburos transportados y/o transferidos en la Bahía de Quintero; en cuanto al tiempo de desplazamiento, los derrames ocurridos en el sector de la Monoboya han impactado la zona costera en lapsos de horas, en general dentro de las 6 primeras horas lo que ha sido dependiente de las características del hidrocarburo y de las condiciones meteo-oceanográficas imperantes durante la emergencia.

Los resultados obtenidos mediante la modelación matemática, contrastados con la ocurrencia de eventos reales en la Bahía de Quintero y en consideración a los antecedentes proporcionados por personal perteneciente a la Autoridad Marítima en cuanto a la ocurrencia de derrames ocurridos en el sector de la Monoboya, señalan/muestran que el mayor número de derrames han ocurrido próximos al período estival, es decir, frente a una clara predominancia de vientos del 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> cuadrante. Estableciendo un escenario general frente a las características observadas en estas emergencias, se señala que éstos han mostrado un desplazamiento de las manchas predominantemente hacia el 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> cuadrante, es decir, hacia el sector de playa Loncura.