



Facultad de Ingeniería

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**Determinar si la norma de emisión para la regulación de
contaminantes asociados a las descargas de residuos
líquidos a aguas marinas y continentales superficiales,
cumple el objetivo al definir la Zona de Protección Litoral.**

Sebastián Omar Correa Araya

Marzo 2017

APROBACIÓN

DETERMINAR SI LA NORMA DE EMISIÓN PARA LA REGULACIÓN DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS DESCARGAS DE RESIDUOS LÍQUIDOS A AGUAS MARINAS Y CONTINENTALES SUPERFICIALES, CUMPLE EL OBJETIVO AL DEFINIR LA ZONA DE PROTECCIÓN LITORAL.

Sebastián Omar Correa Araya

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Mario Herrera Araya.
Profesor guía.

Cristian Flores Pérez
Integrante comisión

Matías Quezada Labra
Integrante comisión

DECLARACIÓN

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

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

Sebastián Correa Araya

Alumno

Mario Herrera Araya

Profesor Guía

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a:

Mis padres que me formaron como una persona llena de valores y amor incondicional. Mamá por todas las veces que has dejado de sonreír por verme sonreír.

Claudia y Joaquín por sacarme una sonrisa día a día, aunque este fuese el peor. Por demostrarme que se puede formar una familia en cualquier momento de la vida y por levantarme el ánimo cada vez que caí.

Mis hermanos, tíos, primos y sobre todo a mis abuelos, por hacerme sentir que lo más importante de una persona es la familia.

A cada uno profesores que me formaron en esta hermosa etapa universitaria. De manera especial al Sr. Mario Herrera que ha sido de gran apoyo en la etapa final de mi carrera y al Sr. Matías Quezada por todo el conocimiento y paciencia entregada.

Mis amigos Miguel, Ro, Eduardo y Jazmín, que a su modo permitieron que esta etapa sea realmente divertida.

Padres y hermanos de Claudia que me han permitido ser parte de su hermosa familia, abriéndome las puertas de su hogar a medida que crecía como estudiante y padre.

CONTENIDO

1	Resumen	1
2	Introducción.....	2
3	Objetivo general y Objetivos específicos	3
3.1	Objetivo general	3
3.2	Objetivos específicos.....	3
4	Alcances.....	4
5	Fundamento Teórico	5
5.1	Hidráulica Marítima.....	5
5.1.1	<i>Oleaje.....</i>	5
5.1.2	<i>Teorías de Olas.....</i>	7
5.1.3	<i>Oleaje irregular.....</i>	9
5.1.4	<i>Transformación del Oleaje.....</i>	14
5.2	Corrientes cercanas a la costa.....	18
5.2.1	<i>Corrientes longitudinales</i>	20
5.2.2	<i>Corrientes de Retorno</i>	20
5.2.3	<i>Corrientes Transversales (Cross-shore).....</i>	21
5.2.4	<i>corrientes de resaca (Undertow).....</i>	22
5.3	Modelo de Hindcast.....	23
5.3.1	<i>Modelos de tercera generación</i>	23
5.3.2	<i>Modelo de Hindcast WAVEWATCH III.....</i>	24
5.3.3	<i>Modelo de Hindcast ERA-Interim.....</i>	25
5.4	Modelo Numérico CMS.....	26
5.4.1	<i>CMS-Wave</i>	26
5.4.2	<i>CMS-Flow.....</i>	29
5.4.3	<i>Particle Tracking Model (PTM)</i>	30
5.5	Aspectos Normativos.....	32
5.5.1	<i>Decreto Supremo N°90 del 2000</i>	32
5.5.2	<i>Circular A-53/004.....</i>	35
6	Metodología	37
6.1	Definición de Variables	39
6.1.1	<i>Fuente estadística del oleaje</i>	39
6.1.2	<i>Determinación de pendientes</i>	40
6.2	Zona de Protección Litoral y su relación con la zona de Rotura.....	41
6.3	Influencia del Coeficiente P	43
6.3.1	<i>Interpolación.....</i>	43

6.3.2	<i>Análisis Estadístico</i>	43
6.4	Modelación con CMS-Wave, CMS-Flow y PTM.....	45
7	Resultados	51
7.1	Relación entre ZPL y AZR.....	51
7.2	Influencia del Coeficiente P.....	53
7.2.1	<i>Interpolación</i>	53
7.2.2	<i>Interpolación Lineal y Aplicación de Splines Cubicos</i>	55
7.2.3	<i>Análisis Estadístico</i>	56
7.3	Modelación con CMS-Wave, Cms-Flow y PTM.	57
7.3.1	<i>Análisis de la posición final de las partículas para la Pendiente 0,07</i>	58
7.3.2	<i>Análisis de la posición final de las partículas para la Pendiente 0,1</i>	62
7.3.3	<i>Análisis de la posición final de las partículas para la Pendiente 0,44</i>	66
8	Análisis de resultados y discusiones	70
8.1	Relación entre la ZPL y el AZR.....	70
8.2	Influencia del Coeficiente P.....	72
8.2.1	<i>Interpolación Lineal y aplicación de Spline Cúbico</i>	72
8.2.2	<i>Análisis Estadístico al Coeficiente P</i>	72
8.3	Modelación con CMS-Wave, CMS-Flow y PTM.....	73
9	Conclusiones	74
10	Referencias bibliográficas y otras fuentes de información	76
11	Anexos	80
11.1	Análisis Estadístico del Coeficiente P.....	80
11.2	Graficos del porcentaje de excedencia por nodo.....	86
11.3	Resultados de las modelaciones con SMS.....	97
11.3.1	<i>Para la pendiente 0,07</i>	97
11.3.2	<i>Para la pendiente 0,1</i>	99
11.3.3	<i>Para la pendiente 0,44</i>	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 5-1: Onda Sinusoidal Elementa (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991).....	5
Figura 5-2: Clasificación de ola por frecuencia (Fuente: Kinsman, 1965).....	5
Figura 5-3: A) Oleaje tipo Swell; B) Oleaje tipo Sea. (Fuente: Silva, 2005)	7
Figura 5-4: Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje. (Fuente:Méhauté, 1976).	8
Figura 5-5: A) Serie de desnivelación medida. B) Olas calculadas cruce ascendente por cero. (Fuente: McCormick, 2010)	9
Figura 5-6: El oleaje como suma de ondas sinusoidales. (Fuente: Holthuijsen, 2007)	10
Figura 5-7: A) Banda ancha, función irregular. B) Banda estrecha, función suave. (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991)	11
Figura 5-8: Transformación de un espectro de aguas profundas JONSWAP a uno de aguas someras TMA. (Fuente: Holthuijsen, 2007)	13
Figura 5-9: Esquema de ola refractada (Fuente: Kamphuis, 2000).	14
Figura 5-10: Esquema de Ola Difractada (Fuente: Dean & Dalrymple, 1991).	15
Figura 5-11: Patrones de circulación cercanos a la costa en función del ángulo de incidencia del oleaje (Fuente: U.S. Army Corps of Engineers, 2002).....	19
Figura 5-12: Corrientes longitudinales (Fuente: http://oceanservice.noaa.gov)	20
Figura 5-13: Corrientes de retorno (Fuente: http://oceanservice.noaa.gov).....	21
Figura 5-14: Corrientes transversales (Fuente: http://oceanservice.noaa.gov).....	21
Figura 5-15: Corrientes de resaca (Fuente: Svensen, 1984).....	22
Figura 6-1: Es quema de la metodología (Fuente: Elaboración propia).....	38
Figura 6-2: Ubicación de nodos de extracción de datos ERA y NOAA (Fuente: Elaboración propia).....	39
Figura 6-3: Esquema Ancho de Zona de Rotura (Fuente: Elaboración propia).	41
Figura 6-4: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia).....	44
Figura 6-5: Ejemplo dominio computacional y batimetría de CMS-Wave con pendiente 0,07. (Fuente: Elaboración propia).	45
Figura 6-6: Mapa de la superficie oceánica indicando la amplitud de la componente armónica de marea M2 extraída del modelo TPXO7.1 (Fuente: Elaboración propia).....	47
Figura 6-7: Diagrama de flujo para seleccionar Hs en CMS-Wave (Fuente: Elaboración propia).....	48
Figura 6-8: Velocidad de la corriente transversal de 48 horas de simulación en CMS-Flow. (Fuente: Elaboración Propia).....	50
Figura 7-1: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 19S (Fuente: Elaboración propia)	52
Figura 7-2: Porcentaje de excedencia por nodo, datos ERA-Interim. (Fuente: Elaboración propia).....	52
Figura 7-3: Diferencia de ZPL s/coef P vs ZPL c/coef P para una pendiente igual a 0,1. (Fuente: Elaboración propia)	53
Figura 7-4: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia).....	56
Figura 7-5: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 20S (Fuente: Elaboración propia).....	56

Figura 7-6: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)	59
Figura 7-7: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 7-8: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)	61
Figura 7-9: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia)	63
Figura 7-10: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia)	64
Figura 7-11: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1 (Fuente: Elaboración propia)	65
Figura 7-12: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia)	67
Figura 7-13: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia)	68
Figura 7-14: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44 (Fuente: Elaboración propia)	69
Figura 8-1: Comparación % de excedencia datos ERA v/s NOAA. (Fuente: Elaboración propia).....	70
Figura 8-2: Comparación de distribución de alturas significativas ERA vs NOAA. (Fuente: Elaboración propia)	71
Figura 11-1:Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 24S (Fuente: Elaboración propia).....	80
Figura 11-2 Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 27S (Fuente: Elaboración propia).....	80
Figura 11-3: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 30S (Fuente: Elaboración propia).....	81
Figura 11-4: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 33S (Fuente: Elaboración propia).....	81
Figura 11-5: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 35S (Fuente: Elaboración propia).....	82
Figura 11-6: Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 37S (Fuente: Elaboración propia).....	82
Figura 11-7: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 24S (Fuente: Elaboración propia).....	83
Figura 11-8: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 27S (Fuente: Elaboración propia).....	83
Figura 11-9: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 30S (Fuente: Elaboración propia).....	84
Figura 11-10: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 33S (Fuente: Elaboración propia).....	84
Figura 11-11: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 35S (Fuente: Elaboración propia).....	85
Figura 11-12: Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 37S (Fuente: Elaboración propia).....	85
Figura 11-13: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 20S (Fuente: Elaboración propia)	86

Figura 11-14: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 21S (Fuente: Elaboración propia)	86
Figura 11-15: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 22S (Fuente: Elaboración propia)	87
Figura 11-16: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 23S (Fuente: Elaboración propia)	87
Figura 11-17: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 24S (Fuente: Elaboración propia)	88
Figura 11-18: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 25S (Fuente: Elaboración propia)	88
Figura 11-19: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 26S (Fuente: Elaboración propia)	89
Figura 11-20: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 27S (Fuente: Elaboración propia)	89
Figura 11-21: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 28S (Fuente: Elaboración propia)	90
Figura 11-22: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 29S (Fuente: Elaboración propia)	90
Figura 11-23: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 30S (Fuente: Elaboración propia)	91
Figura 11-24: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 31S (Fuente: Elaboración propia)	91
Figura 11-25: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 32S (Fuente: Elaboración propia)	92
Figura 11-26: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 33S (Fuente: Elaboración propia)	92
Figura 11-27: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 34S (Fuente: Elaboración propia)	93
Figura 11-28: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 35S (Fuente: Elaboración propia)	93
Figura 11-29: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 36S (Fuente: Elaboración propia)	94
Figura 11-30: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 37S (Fuente: Elaboración propia)	94
Figura 11-31: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 38S (Fuente: Elaboración propia)	95
Figura 11-32: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 39S (Fuente: Elaboración propia)	95
Figura 11-33: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 40S (Fuente: Elaboración propia)	96
Figura 11-34: Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 41S (Fuente: Elaboración propia)	96
Figura 11-35: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)	97
Figura 11-36: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,07. (Fuente: Elaboración propia)	98
Figura 11-37: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1. (Fuente: Elaboración propia)	99

Figura 11-38: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,1. (Fuente: Elaboración propia)	100
Figura 11-39: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44. (Fuente: Elaboración propia)	101
Figura 11-40: Resultados de la posición final de las partículas para una pendiente de 0,44. (Fuente: Elaboración propia)	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1: Características de las olas	6
Tabla 5-2: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral.....	32
Tabla 5-3: Límites máximos de concentración permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral. .	34
Tabla 5-4: Tabulación del Coeficiente P.....	36
Tabla 6-1: Estadísticas del Promedio calculado y medido del <i>runup</i> del oleaje.....	40
Tabla 6-2: Dimensiones de la batimetría según pendiente.....	45
Tabla 6-3: Parámetros previamente seleccionados para las modelaciones.	46
Tabla 6-4: Parámetros finales utilizados en las modelaciones según pendiente.	49
Tabla 7-1: Diferencias porcentuales al calcular la ZPL con el coeficiente P.	54
Tabla 7-2: Diferencias entre interpolación lineal y <i>spline</i> cubico para una pendiente de 0,1.	55
Tabla 7-3: ZPL y punto de descarga por pendiente.	57
Tabla 8-1: Tabla resumen de diferencias ERA.....	72
Tabla 8-2: Tabla resumen de diferencias NOAA.....	73

1 RESUMEN

La importancia de analizar la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, ya que, esta define una zona sensible a la contaminación generada por el ser humano.

El análisis de la fórmula de la Zona de Protección Litoral (ZPL), permitió determinar que la ZPL es igual al Ancho de la Zona de Rotura (AZR) definida como la distancia transversal a la costa que se genera desde el punto de rotura del oleaje hasta la línea de costa, multiplicada por un factor de seguridad igual a 1,6, que permite que la ZPL sea mayor al AZR, en bahías de fondo plano y pendiente suave.

Se determinó que la ZPL representa un porcentaje de excedencia de los AZR para una data de oleaje. Tal porcentaje de excedencia a su vez dependiente de la forma en que se distribuyan los datos de oleaje del modelo de *hindcast* utilizado (ERA-Interim, WaveWatch III u otra).

Al momento de corroborar la forma de calcular el coeficiente P, en cualquier latitud a lo largo de Chile, no presento una diferencia significativa en la utilización de otros métodos de interpolación con respecto al recomendado por la norma.

Las 90 modelaciones numéricas, permitieron verificar que las partículas descargadas en una zona cercana a la ZPL, ingresan a esta bajo ciertas condiciones hidrodinámicas. Los casos donde más partículas ingresan a la ZPL son cuando el oleaje incide perpendicular a la línea de costa. Además, cuando la dirección de oleaje es de $\pm 30^\circ$ y la pendiente 0,44, las partículas quedan depositadas en el borde costero, confinadas en la zona de transporte longitudinal, sin posibilidad de retornar a aguas más profundas.

Finalmente, se recomienda utilizar el parámetro P al momento de calcular la ZPL, al no tener información precisa de la zona de estudio; sobre todo de corrientes. Al utilizar el coeficiente P se obtienen resultados más conservadores, lo que conlleva a cumplir el objetivo de la norma.