



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

MODELADO NUMÉRICO ACOPLADO DE OLEAJE E HIDRODINÁMICA DURANTE LA TORMENTA DE AGOSTO DE 2015 EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO

Francisco Pinto López

Marzo 2022

MODELADO NUMÉRICO ACOPLADO DE OLEAJE E HIDRODINÁMICA
DURANTE LA TORMENTA DE AGOSTO DE 2015 EN LA BAHÍA DE
VALPARAÍSO

Francisco Rodolfo Pinto López

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
BENJAMÍN HERNÁNDEZ ALFARO Profesor guía	_____	_____
CATALINA AGUIRRE GALAZ Revisora	_____	_____
MATÍAS QUEZADA LABRA Revisor	_____	_____

DECLARACIÓN

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

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

Memorista
Francisco Pinto López

Profesor Guía
**Benjamín Hernández
Alfaro**

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis profundos agradecimientos a toda mi familia por su apoyo incondicional durante el largo proceso universitario. A mi madre, Isabel y a Mailhyn por su amor, presencia y tiempo sacrificado durante los años de investigación para esta memoria, siendo un pilar fundamental en el desarrollo exitoso de la misma. A mis hermanos Alejandro e Isabel.

A los profesores que participaron de la comisión revisora, Catalina Aguirre y Matías Quezada, quienes colaboraron desde el inicio de la investigación de manera gentil y cuya dedicación y tiempo agradezco enormemente.

A mi profesor guía, Benjamín Hernández, por su inconmensurable aporte tanto al desarrollo de esta memoria como al crecimiento personal y técnico de quien escribe. Gracias por aceptar ser el guía en esta importante etapa que ahora se cierra, y por todo el tiempo invertido en esas largas y entrañables conversaciones.

A Moffatt & Nichol Chile SpA por toda la ayuda proporcionada durante el desarrollo de esta Memoria.

Quisiera agradecer al Sr. Eduardo Chacón de Empresa Portuaria Valparaíso quien gentilmente autorizó la utilización de las mediciones de campo que permitieron la calibración de los modelos numéricos.

A Juan Crespo, por su gentileza en proveer antecedentes del sistema frontal cuando recién comenzaba la investigación.

A Claudio Meza por su apoyo y guía tanto en el inicio de la investigación como en el desarrollo de esta.

A la comunidad UV, especialmente los miembros del Campus Santiago y compañeros de carrera.

A las familias Pinto-Doveris, Pinto-Hagin, López, Vera, Cerda-Vásquez.

Y amigos de siempre.

A Rolo y Chabe

*“Lo cierto es que yo iba de un lado a otro,
A veces chocaba con los árboles,
Chocaba con los mendigos,
Me abría paso a través de un bosque de sillas y mesas, (...)”.* Nicanor Parra.

En la memoria de Eduardo Pérez Donoso

CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS.....	13
RESUMEN.....	14
1 INTRODUCCIÓN	16
1.1 ASPECTOS GENERALES	16
1.2 MOTIVACIÓN	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 MARCO TEÓRICO	21
3.1 CICLONES EN LATITUDES MEDIAS	21
3.1.1 ZONAS DE GENERACIÓN.....	21
3.1.2 FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN.....	22
3.1.3 ESTRUCTURA Y DINÁMICA.....	24
3.1.4 CLIMATOLOGÍA DE CICLONES EXTRATROPICALES EN EL PACÍFICO SUR	27
3.2 OLEAJE	29
3.2.1 CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL	29
3.2.2 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN	31
3.2.3 EVENTOS EXTREMOS EN CHILE CENTRAL.....	35
3.3 HIDRODINÁMICA EN LA COSTA.....	37
3.3.1 NIVEL DEL MAR	37
3.3.2 CORRIENTES	39
4 CASO DE ESTUDIO: 8 DE AGOSTO DE 2015.....	41
4.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS	41
4.2 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS	44
5 METODOLOGÍA.....	49
5.1 MATERIALES	49
5.1.1 DATOS ATMOSFÉRICOS DE REANÁLISIS	49
5.1.2 REGISTROS INSTRUMENTALES	50
5.1.3 HERRAMIENTAS DE MODELADO NUMÉRICO	52

5.1.4	VIENTO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA	59
5.1.5	HERRAMIENTAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS	59
5.2	MÉTODOS	59
5.2.1	ANÁLISIS ATMOSFÉRICO DEL CICLÓN.....	59
5.2.2	MODELADO NUMÉRICO	61
6	RESULTADOS	65
6.1	OBSERVACIÓN DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA.....	65
6.1.1	TRAYECTORIA DEL CICLÓN.....	65
6.1.2	ANÁLISIS DE MAPAS EQUIPOTENCIALES	66
6.2	CALIBRACIÓN MIKE 21.....	74
6.2.1	FORZANTES.....	74
6.2.2	OLAS EN AGUAS PROFUNDAS	75
6.2.3	OLAS EN LA COSTA.....	76
6.2.4	HIDRODINÁMICA EN LA COSTA	79
6.3	DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES MARÍTIMAS.....	82
6.3.1	OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	82
6.3.2	CONDICIONES EN LA COSTA.....	85
6.3.3	ENVOLVENTES DE MÁXIMOS.....	89
6.3.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MODELO ACOPLADO VERSUS DESACOPLADO.....	95
7	DISCUSIÓN Y POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	97
7.1	SOBRE EL MODELADO NUMÉRICO	97
7.1.1	ALCANCES Y LIMITACIONES OBSERVADOS	97
7.1.2	EFFECTOS AL CONSIDERAR LOS MODELOS ACOPLADOS	98
7.1.3	PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN.....	98
7.1.4	COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS	99
7.2	ASPECTOS ATMOSFÉRICOS	100
7.3	POTENCIALES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	101
8	CONCLUSIONES.....	102
9	REFERENCIAS.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Resultados de un modelo numérico empleado para simular el oleaje máximo generado por el paso de un ciclón en el Océano Atlántico.	17
Figura 1-2 Ubicación de los empleados para calibrar los modelos numéricos.....	17
Figura 1-3 Efectos del evento de estudio en diferentes puntos a lo largo de Valparaíso y Viña del Mar.....	19
Figura 3-1 Zonas frontales subtropical y polar.	21
Figura 3-2 Sección vertical de la zona frontal.....	22
Figura 3-3 Imágenes satelitales del sistema frontal: días 5 (a),7(b), 8(c) y 9(d) de agosto. En las Figuras de abajo se esquematiza la simbología del frente..	23
Figura 3-4 Estructura típica de un ciclón en pleno desarrollo, el cual está frente a la zona centro-sur de Chile..	25
Figura 3-5 Estructura tridimensional de la onda en desarrollo.....	26
Figura 3-6 Densidad de ciclones (10^{-3} ciclones/grad ²) en el Hemisferio Sur durante verano (izquierda) e invierno (derecha).	27
Figura 3-7 Promedio mensual de agosto en el período 1958-2002 de los <i>jets</i> subtropical y polar en el Hemisferio Sur.....	28
Figura 3-8 Correlación entre el índice Multivariado ENOS (MEI) y presión al nivel del mar (a) y velocidad de viento a 300hPa (b).	29
Figura 3-9 Representación gráfica típica del espectro de oleaje en 2D (a) y polar (b) y los espectros de frecuencia y dirección.....	30
Figura 3-10 Esquema de los procesos de transformación del oleaje en aguas profundas(a) y someras (b).....	32
Figura 3-11 Evolución de la energía y parámetros espectrales bajo condiciones ideales de generación.....	33
Figura 3-12 Efectos de los procesos de transformación sobre el espectro de períodos....	34
Figura 3-13 Zonas de generación del oleaje más recurrente frente a las costas de Chile.	35
Figura 3-14 Esquema de la incidencia de oleaje SW y NW en la costa de Valparaíso.	36

Figura 3-15 Variaciones de cantidad de eventos por año (a), altura significativa H_{m0} (b) y período medio (T_m) en el período 1980-2015.	36
Figura 3-16 Esquema de las componentes del nivel del mar.	37
Figura 3-17 Serie de tiempo de <i>storm surge</i> diario máximo en el mareógrafo SHOA ubicado en Valparaíso.....	38
Figura 3-18 Esquema de patrones de corrientes y sus componentes longitudinales (u) y transversales (v).	39
Figura 4-1 Imagen satelital (goes-13) durante el día 8.....	42
Figura 4-2 Cartas Sinópticas de los días 7 y 8 de agosto de 2015.....	43
Figura 4-3 Mapas de temperatura del aire y presión atmosférica en superficie.....	44
Figura 4-4 Serie de tiempo de altura espectral de oleaje (H_m0) en un punto frente a las costas de Chile Central.	44
Figura 4-5 Propagación de oleaje del estado de mar peak registrado por la boya SHOA hacia la bahía de Valparaíso.....	45
Figura 4-6 Mapas de altura significativa a las 12 y 14 UTC y espectro de oleaje durante el peak(14UTC).	46
Figura 4-7 Resultados de valores de oleaje en la costa de Valparaíso, a 20m de profundidad.	47
Figura 4-8 Oleaje en el sector norte de Caleta Portales durante el 08 de agosto.....	48
Figura 4-9 Oleaje en el sector cercano a la Estación Francia durante el 08 de agosto.	48
Figura 5-1 Área de extracción de datos de ERA5.	50
Figura 5-2 Ubicación aproximada de los equipos ADCP.	51
Figura 5-3 Batimetría y malla computacional de elementos no estructurados para un modelo global. MIKE 21 HD y SW pueden ser ejecutados para aplicaciones de escala global.	52
Figura 5-4 Paso de tiempo global relacionado al paso de tiempo interno de cada modelo.	54
Figura 5-5 Batimetría empleada en la modelación(a) y detalle de la carta SHOA N° 5111 (b).	58

Figura 5-6 Ejemplo de la determinación de las coordenadas del ciclón en un instante t arbitrario.....	60
Figura 5-7 Domino numérico empleado para las simulaciones con MIKE 21	62
Figura 5-8 Ejemplo de los campos de vientos zonales (a) y meridionales (b) empleados en la simulación en MIKE 21.....	63
Figura 6-1 Velocidad máxima del campo de viento (a) y presión mínima del ciclón (b) a lo largo de su desplazamiento en el Pacífico Sur.....	65
Figura 6-2 Presión en el centro del ciclón y velocidad de viento máxima observadas a lo largo de su trayectoria.....	66
Figura 6-3 Mapas (colores) y contornos (líneas) de T y contornos de presión (panel superior), VP y T (panel central), jet y P_{atm} (panel inferior) entre los saltos de tiempo $t = 1$ y 3.	68
Figura 6-4 Mapas (colores) y contornos (líneas) de w y jet (panel superior), Vo y $U10$ (panel central), $U10$ y Hs (panel inferior) entre los saltos de tiempo $t = 1$ y 3.	69
Figura 6-5 Mapas (colores) y contornos (líneas) de w y jet (panel superior), Vo y $U10$ (panel central), $U10$ y Hs (panel inferior) entre los saltos de tiempo $t = 4$ y 6.	70
Figura 6-6 Mapas (colores) y contornos (líneas) de w y jet (panel superior), Vo y $U10$ (panel central), $U10$ y Hs (panel inferior) entre los saltos de tiempo $t = 4$ y 6.	71
Figura 6-7 Mapas (colores) y contornos (líneas) de w y jet (panel superior), Vo y $U10$ (panel central), $U10$ y Hs (panel inferior) entre los saltos de tiempo $t = 7$ y 9.	72
Figura 6-8 Mapas (colores) y contornos (líneas) de w y jet (panel superior), Vo y $U10$ (panel central), $U10$ y Hs (panel inferior) entre los saltos de tiempo $t = 7$ y 9.	73
Figura 6-9 Series de tiempo de presión atmosférica (a) y velocidad de viento (b) en el nodo SCIR.	74
Figura 6-10 Series de tiempo de velocidad del viento en el nodo SCVM.....	75
Figura 6-11 Series de tiempo de altura de oleaje en el nodo Boya SHOA.....	75
Figura 6-12 Series de tiempo de altura $Hm0$ (a), período Tp (b) y dirección Dpk (c) en el nodo Yolanda.....	77
Figura 6-13 Series de tiempo de altura $Hm0$ (a), período Tp (b) y dirección Dpk (c) en el nodo Barón.	78

Figura 6-14 Series de tiempo de Nivel del Mar (a) y velocidad de corrientes (b) en el nodo Yolanda.....	80
Figura 6-15 Series de tiempo de Nivel del Mar (a) y velocidad de corrientes (b) en el nodo Barón.	81
Figura 6-16 Campos de Viento y Altura de Oleaje en (a) 07 de agosto a las 18hs, (b) 08 de agosto a las 06hs y (c) 08 de agosto a las 18 h.	84
Figura 6-17 Campos de altura H_{m0} , velocidad de viento U_{10} y período peak T_p el día 8 a las 18 UTC.....	85
Figura 6-18 Series de tiempo simuladas de las variables oceanográficas en el nodo Yolanda.....	87
Figura 6-19 Mapas de H_{m0} (a), Nivel del Mar (b), índice de rotura (c) y velocidad de corrientes (d) simulados durante el peak de oleaje.....	88
Figura 6-20 Envolventes de altura H_{m0} , velocidad de viento U_{10} y Período T_p	90
Figura 6-21 Mapas de máximos valores de altura de oleaje H_{m0} en la Bahía de Valparaíso (a), sector Viña (b) y sector Puerto y Costanera (c).	92
Figura 6-22 Mapas de máximos valores de nivel del mar en la Bahía de Valparaíso (a), sector Viña (b) y sector Puerto y Costanera (c).....	93
Figura 6-23 Mapas de máximos valores de velocidad de corrientes en la Bahía de Valparaíso (a), sector Viña (b) y sector Puerto y Costanera (c).....	94
Figura 6-24 Mapas de máxima diferencia de Nivel del Mar entre simulaciones acopladas y desacopladas.....	96
Figura 6-25 Mapas de máxima diferencia de altura H_{m0} entre simulaciones acopladas y desacopladas.....	96
Figura 6-26 Mapas de máxima diferencia de Gamma entre simulaciones acopladas y desacopladas.....	96
Figura 7-1 Análisis de Sensibilidad de la Altura de Oleaje H_{m0} al término disipativo Cds. Nodo Yolanda.	99
Figura 7-2 Análisis de sensibilidad al número de Manning en las corrientes del nodo Yolanda.....	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1 Importancia relativa de los procesos que afectan la evolución del oleaje en aguas oceánicas y costeras.....	31
Tabla 5-1 Variables extraídas del reanálisis ERA5	49
Tabla 5-2 Ubicación de los registros instrumentales disponibles	51
Tabla 5-3 Conjuntos de las variables empleadas en la observación del ciclón.....	60
Tabla 6-1 Métricas de comparación parámetros de oleaje	79
Tabla 6-2 Estadísticos de comparación parámetros de oleaje	79
Tabla 6-3 Métricas de comparación de nivel del mar y corrientes.....	82
Tabla 6-4 Estadísticos de comparación de nivel del mar y corrientes	82
Tabla 6-5 Parámetros de resumen del estado de mar peak eel día 8 a las 18 UTC en aguas profundas a lo largo de la costa.	85
Tabla 6-6 Magnitudes de los parámetros oceanográficos a lo largo de la costa en torno entorno al veril -20m NRS el 8 de agosto a las 18 UTC.....	89
Tabla 6-7 Magnitudes máximas de viento U_{10} y altura H_{m0} en los nodos de aguas profundas.	90
Tabla 6-8 Magnitudes máximas de altura H_{m0} , nivel del mar, y corrientes en los nodos en la costa de Valparaíso ubicados en el veril -20m NRS a largo de toda la simulación.....	91
Tabla 6-9 Diferencias de Nivel del Mar, H_{m0} y Gamma en simulaciones acopladas	95
Tabla 7-1 Valores Máximos de Altura de Oleaje H_{m0} (m)de los casos analizados variando C_{ds} . Se muestra además el valor máximo registrado por el equipo ADCP	99

RESUMEN

En esta tesis se profundiza en el estudio del ciclón extratropical ocurrido entre los días 5 y 10 de agosto del año 2015 en el Pacífico Sur. Según diferentes fuentes, este evento es considerado el evento más extremo en la zona central de Chile en términos de oleaje, precipitación, viento y presión atmosférica. La observación y posterior análisis de este evento se desarrolló con dos enfoques principales: su análisis desde un punto de vista atmosférico y el modelado numérico de oleaje, nivel del mar y corrientes inducidas por el ciclón.

Se examinaron de forma exhaustiva los antecedentes meteorológicos y oceanográficos. Para ello se consultaron fuentes oficiales tales como la Dirección Meteorológica de Chile, archivos de prensa y trabajos de investigación desarrollados a la fecha.

Fueron revisadas en la literatura las principales características de la dinámica atmosférica en ciclones extratropicales. Posteriormente se empleó la base de datos ERA5 para observar la evolución en el tiempo de los campos de presión atmosférica, temperatura del aire y viento. Con este análisis se observa que el ciclón se ubicó en latitudes subtropicales y su evolución en el tiempo obedeció a fuertes gradientes de temperatura del aire y un marcado *jet* en altura, intensificados por la ocurrencia conjunta de un episodio Niño Fuerte y una fase positiva de la oscilación antártica.

Utilizando los campos de viento y presión atmosférica de ERA5, se forzaron modelos 2D de oleaje e hidrodinámica en un dominio de escala regional construido para analizar en detalle la bahía de Valparaíso. Los modelos fueron calibrados mediante una comparación directa con mediciones *in situ* de oleaje, marea y corrientes; registradas por dos equipos ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) ubicados en la bahía de Valparaíso aproximadamente a 600 m de la costa. El modelo de oleaje fue comparado mediante la altura significativa, período peak y dirección peak del oleaje, mientras que la hidrodinámica por medio de las variaciones del nivel del mar y las velocidades de corrientes. Los datos de viento y presión de ERA5 fueron comparados con datos provenientes de los aeródromos, mostrando un buen ajuste verificando así confiabilidad de las forzantes de los modelos.

El proceso de calibración de los modelos se realizó de modo de representar de la mejor forma las mediciones durante el peak del evento. Los resultados obtenidos fueron capaces de reproducir los *peaks* observados en los registros instrumentales y las métricas estadísticas presentan sesgos y errores pequeños para la mayoría de los parámetros analizados, hallándose las mayores limitaciones en la reproducción de las direcciones de oleaje y corrientes en la zona sur de la bahía de Valparaíso. Los esfuerzos de calibración se enfocaron en ajustar los parámetros asociados a los fenómenos de disipación por *whitecapping* de oleaje y fricción de fondo en la hidrodinámica.

Los modelos calibrados permitieron analizar la variabilidad espacial del clima marítimo tanto en aguas profundas como cerca de la costa. Se observó que un campo de viento con

velocidades sobre 20 m/s generó estados de mar con altura significativa mayor a 11 m. En la costa central se presentaron alturas significativas mayores a 8 m desde Tongoy hasta Constitución. En la bahía de Valparaíso las condiciones de oleaje presentaron altura significativa sobre 6 m durante el *peak* del evento. Las forzantes atmosféricas en conjunto con el oleaje generaron importantes aumentos del nivel del mar en la costa e indujeron velocidades sobre 1 m/s en algunos puntos de la costa. las condiciones más críticas se presentaron en la zona central de la bahía, entre Yolanda y Av. Perú

Se evaluó la sensibilidad de los modelos simulaciones numéricas desacopladas, en las cuales el modelo de oleaje fue ejecutado sin incluir las variaciones del nivel del mar, y la hidrodinámica, por otro lado, sin incluir los efectos del viento, presión y oleaje. Se observó una importante interacción entre los modelos de oleaje e hidrodinámica especialmente en profundidades bajas, con subestimaciones importantes de alturas de oleaje y nivel del mar con los modelos desacoplados.

Los resultados obtenidos muestran la metodología empleada en la modelación numérica es una alternativa viable para reproducir las condiciones forzadas por ciclones extratropicales tales como el evento de agosto 2015.