



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**“CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO  
WAVEWATCH III V. 4.18, PARA  
SU APLICACIÓN EN LA GENERACIÓN DE UN  
REANÁLISIS DE OLEAJE EN LAS COSTAS DE CHILE”**

**Héctor Renato Hidalgo Luarte**

**Julio 2017**

# **APROBACIÓN**

**Calibración y Validación del Modelo WAVEWATCH III v.4.18, para su Aplicación en la  
Generación de un Reanálisis de Olaje en las Costas de Chile.**

Héctor Renato Hidalgo Luarte

## **COMISIÓN REVISORA**

## **NOTA**

## **FIRMA**

José Beyá Marshall  
Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Catalina Aguirre Galaz  
Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ariel Gallardo Yáñez  
Ingeniero de proyectos

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **DECLARACIÓN**

*Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados 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.*

---

Héctor Hidalgo Luarte  
Alumno

---

José Beyá Marshall  
Profesor guía

## **AGRADECIMIENTOS**

*Finalmente y después de tantos años, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me apoyaron a lo largo de esta etapa. En particular:*

*A mi familia, en especial a mis padres. Héctor, quien con su amor, ejemplo y paciencia, supo inculcar en mí el rigor y la perseverancia para alcanzar mis metas y perseguir mis sueños. A mi madre, compañera y consejera, Claudia, quien siempre estuvo ahí, velando por mis sueños, escuchando mis dudas y aconsejándome de la mejor forma, por haberme dado la vida y enseñarme a vivirla, jamás encontraré palabras que me ayuden a agradecer todo lo que me has entregado. A mi hermana, Mariana, quien ha hecho de mi vida un infierno, pero sin duda el infierno más divertido. A todos, les agradezco por el apoyo incondicional y el cariño que me han entregado a lo largo estos años. Este logro se los dedico a ustedes.*

*A mis compañeros de carrera, en especial a: Jaime Roberto Herrera, por el apoyo, las gratas conversaciones y no tan gratas discusiones, por las innumerables noches de estudio y café a la vena. Ariel Gallardo, por los consejos brindados, por las chelas compartidas, por la confianza entregada y por las eternas conversaciones con el pucho en mano. Cesar Esparza, por los consejos entregados y por darme el puntapié inicial para embarcarme en esta travesía. Y a todos los que no están nombrados aquí y que contribuyeron con su tiempo, dedicación y palabras de aliento.*

*A mi profesor guía José Beyá, por la confianza y paciencia entregada y por el apoyo en el desarrollo de este estudio.*

*A mis colegas del equipo “Un Atlas de Oleaje para Chile”, Marco Álvarez y Javier Valdivia, por todos los momentos vivimos en aquel reducido espacio que llamamos laboratorio.*

*A todos los profesores que fueron parte fundamental en mi formación, Marta Ulloa, Adriano Jimenez, Cristian Valderas, Mauricio Molina, Catalina Aguirre, Mario Beale y Álvaro Valdivia.*

*Se agradece el financiamiento entregado por el programa Fondef-IDeA de CONICYT y al equipo del proyecto compuesto por la Dirección de Obras Portuarias, APuerto Ingeniería y la Universidad de Valparaíso a través de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica y el Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios – Valparaíso, al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada y al Proyecto Corfo-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”.*

*Héctor Hidalgo Luarte*

*La frase, “la persona se hizo sola” no existe, carece de veracidad. Todos estamos hechos por otras miles de personas. Cada ser que hizo algo bueno por nosotros, o nos dijo algunas palabras de aliento o aprobación, influyó en nuestra personalidad y nuestros hechos. Es por eso que se vuelven parte de cualquier éxito nuestro.*

*George Matthew Adams, Escritor.*

# **CONTENIDO**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1	General.....	15
2.2	Específicos.....	15
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
3.1	Definición de Oleaje .....	16
3.2	Descripción Estadística de Oleaje.....	17
3.2.1	Espectro y Parámetros Descriptores .....	19
3.3	Modelos de Generación y Propagación de Oleaje.....	20
3.3.1	Modelos Empíricos.....	20
3.3.2	Modelos de Base Física.....	22
3.3.3	Modelos Heurísticos.....	25
3.4	Ecuación de Balance de Acción de Densidad Espectral de Oleaje .....	26
3.4.1	Términos Fuente de la EBAO .....	28
3.5	Modelo WAVEWATCH III v. 4.18.....	33
3.5.1	Esquemas Numéricos y Parametrizaciones de Procesos Físicos .....	34
3.5.2	Resolución Numérica .....	34
3.5.3	Parametrizaciones Físicas .....	37
<b>4</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
4.1	Cluster de Servidores y Compilación del Modelo WAVEWATCH III v. 4.18 .....	48
4.2	Fuentes de Datos.....	50
4.2.1	Conjunto de Datos Batimétricos y Línea de Costa.....	50
4.2.2	Datos de Reanálisis Atmosférico .....	52
4.2.3	Mediciones de Boyas y Altimetros Satelitales .....	54
4.3	Metodología de Calibración y Validación .....	57
4.3.1	Selección de la Resolución y Extensión del Dominio Computacional y Batimétrico.....	59
4.3.2	Selección de Esquemas Físicos .....	61
4.3.3	Selección de Forzantes y Calibración de Esquemas Físicos .....	63

4.3.4	Cuantificación del Desempeño de los Escenarios de Calibración .....	66
4.3.5	Validación del Modelo .....	72
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
5.1	Selección de la Resolución y Extensión del Dominio Computacional y Batimétrico .....	74
5.2	Selección de Esquemas Físicos .....	77
5.2.1	Desempeño de Escenarios de Simulación .....	77
5.2.2	Resumen de Resultados.....	84
5.3	Selección de Forzantes y Calibración de Esquemas Físicos.....	85
5.3.1	Desempeño de Escenarios de Simulación .....	85
5.3.2	Resumen de Resultados.....	92
5.4	Validación.....	95
5.4.1	Comparación de Resultados con Registros de Oleaje Obtenidos Mediante Boyas .....	95
5.4.2	Comparación de Resultados con Registros Satelitales .....	98
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO A:</b>	<b>Clúster de datos utilizados durante la calibración del modelo WWIII ..</b> .....	<b>107</b>
<b>ANEXO B:</b>	<b>Indicadores Estadísticos Selección de Esquemas y Parametrizaciones Físicas.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO C:</b>	<b>Indicadores Estadísticos Calibración y Selección de Forzantes ....</b>	<b>116</b>

## **INDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 3-1.</b> Clasificación de las desnivelaciones en la superficie libre del océano en función del periodo característico y fuerzas generadoras (Holthuijsen, 2007).....	16
<b>Figura 3-2.</b> Esquema representativo de un estado de mar. A). Descomposición del oleaje en ondas regulares (Pierson et al., 1955) B). Registro de desnivelaciones de 10 minutos, representativos de un estado de mar (Elaboración propia) C). Espectro direccional o bidimensional (Elaboración propia). .....	18
<b>Figura 3-3.</b> Cambio de energía a través de una celda de malla cartesiana definida en el espacio geográfico. Enfoque Euleriano para la derivación de la ecuación de balance de energía espectral de oleaje (Holthuijsen, 2007). .....	23
<b>Figura 3-4.</b> Esquema del funcionamiento de un modelo neuronal basado en GRNN, aplicado al pronóstico de oleaje (Montoya & Osorio, 2007) .....	25
<b>Figura 3-5.</b> Esquematación de la interacción ola-corriente (Holthuijsen, 2007).....	27
<b>Figura 3-6.</b> Esquematación de la mecánica de la generación de oleaje según Phillips (1957) (Holthuijsen, 2007). .....	29
Figura 3-7. Esquematación de la mecánica de la generación de oleaje según Miles (1957) (Holthuijsen, 2007).....	29
<b>Figura 3-8.</b> Esquematación de del proceso de rotura de las olas en aguas profundas (whitecapping) (Holthuijsen, 2007). .....	30
<b>Figura 3-9.</b> Esquema ilustrativo de la interacción entre cuádrupletas en aguas profundas. (Holthuijsen, 2007).....	32
<b>Figura 3-10.</b> Esquema cualitativo de la transformación de energía dentro de un espectro JOSWAP, debido a los distintos procesos que afectan el desarrollo del oleaje en aguas profundas (Holthuijsen, 2007).....	32
<b>Figura 4-1.</b> Fuentes de información del conjunto de datos batimétricos ETOPO2v2 (NGDC, 2006).....	51
<b>Figura 4-2.</b> Esquema del funcionamiento de un altímetro de radar (AVISO, 2015) .....	55
<b>Figura 4-3.</b> Esquema de extracción de datos satelitales en un radio cercano a 50 km respecto a una boya de referencia (Elaboración propia).....	56
<b>Figura 4-4.</b> Esquema simplificado de la metodología de calibración empleada .....	58
<b>Figura 4-5.</b> Batimetrías utilizadas para la simulación de los escenarios planteados en la Tabla 4-10, generadas a partir de la base de datos ETOPO2v2 mediante al algoritmo <i>GridGen</i> . A). Test_01. B). Test_02. C). Test_03. D). Test_04 (Elaboración propia).....	60
<b>Figura 4-6.</b> Desfase temporal de la altura máxima simulada y registrada por la boya. Los círculos rojos indican las alturas máximas. El círculo amarillo muestra la altura simulada coincidente en el tiempo con la máxima altura registrada por la boya. ....	68
<b>Figura 4-7.</b> Esquema simplificado de la metodología utilizada para la cuantificación del desempeño de los escenarios de calibración planteados. ....	71
<b>Figura 4-8.</b> Ubicación de las coordenadas de extracción de datos satelitales utilizadas en la validación del modelo WWIII.....	73
<b>Figura 5-1.</b> Gráficos de dispersión, izquierda $Hm0$ , derecha $Tm$ , A) Boya B1 v/s Test-03, B) Boya B5 v/s Test-03, C) Boya B8 v/s Test-03. ....	76
<b>Figura 5-2.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B1 y S1. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Tm$ . .....	77

<b>Figura 5-3.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B2 y S2. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	78
<b>Figura 5-4.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B3 y S3. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	79
<b>Figura 5-5.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B5 y S5. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	80
<b>Figura 5-6.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B7 y S7. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	81
<b>Figura 5-7.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 y la información de B8 y S8. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño de $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	82
<b>Figura 5-8.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B1 y S1. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Tm$ .....	85
<b>Figura 5-9.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B2 y S2. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	86
<b>Figura 5-10.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B3 y S3. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	87
<b>Figura 5-11.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B5 y S5. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	88
<b>Figura 5-12.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B7 y S7. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	89
<b>Figura 5-13.</b> Índices de desempeño para distintos tipos de análisis entre los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 y la información de B8 y S8. Arriba, desempeño de $Hm0$ . Centro, desempeño $Tm$ . Abajo, desempeño de $Dm$ .....	90
<b>Figura 5-14.</b> Comparación de forma de espectros registrados por la boya B5 (Izquierda) con espectros obtenidos a partir del Test-11 (Derecha). Arriba, espectros integrados en el dominio de la frecuencia. Abajo, espectros integrados en el dominio de la dirección.....	96
<b>Figura 5-15.</b> Gráficos de desempeño del Test-11, en la representación del espectro de oleaje, comparación con espectros registrados por la boya B5. Arriba, gráficos en el dominio de la frecuencia y la dirección de $RMSE$ promediado en el tiempo gráfico 2DH (Izquierda) y gráfico 3D (Derecha). Abajo, gráficos de sesgo de los espectros en el tiempo, espectros integrados en el dominio de la frecuencia (Izquierda) y espectros integrados en el dominio de la dirección (Derecha).....	97
<b>Figura 5-16.</b> Resumen de indicadores estadísticos obtenidos a partir de la comparación de alturas $Hm0$ de altímetros satélites en las coordenadas expuestas en la Tabla 4-21 con alturas obtenidas del escenario Test-11. A). Indicador estadístico $R2$ , B). Indicador estadístico $BIAS$ , C). Indicador estadístico $MAE$ y D). Indicador estadístico $RMSE$ .....	99



## **INDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 3-1.</b> Parámetros espectrales utilizados para caracterizar un estado de mar (adaptado de UNICAN, 2000).....	19
<b>Tabla 3-2.</b> Parámetros adimensionales de las expresiones propuestas por Breugem y Holthuijsen (2007) para oleaje en desarrollo a profundidades arbitrarias. ....	21
<b>Tabla 3-3.</b> Características y ejemplos entre distintas clasificaciones de modelos de generación y propagación de oleaje de base física, basados en la ecuación de balance de energía espectral de oleaje (adaptado de Lizano et. al, 2001).....	24
<b>Tabla 3-4.</b> Importancia relativa de los procesos que afectan la evolución del oleaje, adaptado de Battjes (1994) (Holthuijsen, 2007). ....	27
<b>Tabla 3-5.</b> Esquemas numéricos disponibles en el modelo WWIII (Tolman H., 2014) .....	35
<b>Tabla 3-6.</b> Técnicas de alivio del Efecto Garden Sprinkler (GSE). Incorporadas en el modelo WWIII (Tolman H., 2014). ....	36
<b>Tabla 3-7.</b> Parametrizaciones de procesos físicos disponibles en WWIII. ....	37
<b>Tabla 3-8.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sin</i> del paquete ST3 (Tolman H., 2014). ....	40
<b>Tabla 3-9.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sds</i> del paquete ST3 (Tolman H., 2014). ....	40
<b>Tabla 3-10.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sin</i> del paquete ST4 (Tolman H., 2014). ....	42
<b>Tabla 3-11.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sds</i> del paquete ST4 (Tolman H., 2014). ....	43
<b>Tabla 3-12.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Sds</i> del paquete ST6, T representa la activación del umbral de normalización del espectro (Tolman H., 2014). ....	44
<b>Tabla 3-13.</b> Valores de los parámetros empíricos adimensionales del término <i>Snl</i> del Switch DIA (Tolman H., 2014). ....	45
<b>Tabla 4-1.</b> Características del clúster de servidores del CIMFAV y la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica – UV. ....	48
<b>Tabla 4-2.</b> Resumen de parametrizaciones contenidos en el Switch_lfremmer1. ....	49
<b>Tabla 4-3.</b> Detalle de fuentes de información del conjunto de datos batimétricos ETOPO2v2 (NGDC, 2006).....	51
<b>Tabla 4-4.</b> Niveles de resolución de la base de datos GSHHG .....	51
<b>Tabla 4-5.</b> Resumen comparativo de bases de datos de reanálisis disponibles.....	53
<b>Tabla 4-6.</b> Boyas disponibles utilizadas en la calibración y validación de la base de datos generada con modelo WWIII .....	54
<b>Tabla 4-7.</b> Detalle de información registrada por las boyas utilizadas en la calibración y validación de la base de datos generada con modelo WWIII .....	54
<b>Tabla 4-8.</b> Detalle de los datos históricos de alturas de ola obtenidas a partir de altimetría satelital, distribuidos por el proyecto ESA-Globwave. ....	56
<b>Tabla 4-9.</b> Periodos de simulación utilizados para calibrar el modelo WWIII v.4.18 .....	57
<b>Tabla 4-10.</b> Escenarios planteados para la selección de la resolución y extensión del dominio computacional que será utilizado durante el trabajo.....	59
<b>Tabla 4-11.</b> Pasos de tiempo del modelo WWIII v.4.18, empleados en los escenarios planteados en la Tabla 4-10 .....	61
<b>Tabla 4-12.</b> Configuración y forzantes base utilizadas en el modelo WWIII v.4.18 para los escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	61

<b>Tabla 4-13.</b> Escenarios de simulación planteados para la selección de paquetes y parametrizaciones físicas en la calibración del modelo WWIII v.4.18 .....	62
<b>Tabla 4-14.</b> Factores de importancia relativa utilizados en la metodología de cuantificación de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13 .....	62
<b>Tabla 4-15.</b> Información utilizada para contrastar los resultados de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13. ....	63
<b>Tabla 4-16.</b> Escenarios de simulación planteados para la selección de forzantes y calibración parametrizaciones físicas y coeficientes adimensionales del modelo WWIII v.4.18 .....	64
<b>Tabla 4-17.</b> Factores de importancia relativa utilizados en la metodología de cuantificación de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16. ....	65
<b>Tabla 4-18.</b> Información utilizada para contrastar los resultados de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16 .....	66
<b>Tabla 4-19.</b> Indicadores estadísticos utilizados. $P_i$ y $O_i$ corresponden a los datos modelados y observados en el instante $i$ respectivamente, mientras que $N$ es la cantidad de datos coincidentes y comparables en ambas series .....	67
<b>Tabla 4-20.</b> Indicadores de estadística circular para la evaluación del desempeño en la selección de esquemas físicos y calibración del modelo (Zar, 1998). $P_i$ y $O_i$ corresponden a los datos modelados y observados en el instante $i$ respectivamente, mientras que $N$ es la cantidad de datos de ambas series. ....	67
<b>Tabla 4-21.</b> Coordenadas de extracción de datos satelitales utilizadas para la validación del modelo WWIII. ....	72
<b>Tabla 5-1.</b> Indicadores estadísticos boyas B1, B5 y B8 v/s escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	74
<b>Tabla 5-2.</b> Promedio de indicadores estadísticos de los escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	74
<b>Tabla 5-3.</b> Tiempos de cálculo por año de simulación, escenarios planteados en la Tabla 4-10.....	75
<b>Tabla 5-4.</b> Resumen de índices de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-13.....	84
<b>Tabla 5-5.</b> Resumen de índices de desempeño de los escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16.....	93
<b>Tabla 5-6.</b> Ranking de desempeño de escenarios de calibración planteados en la Tabla 4-16.....	94
<b>Tabla 5-7.</b> Resumen de indicadores estadísticos resultantes de la comparación de los datos registrados por la boyas expuestas en la Tabla 4-6, con los datos generados a partir del Test-11.....	96
<b>Tabla A-1.</b> Clúster de datos obtenidos de la boya B1 .....	107
<b>Tabla A-2.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B2 .....	107
<b>Tabla A-3.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B3 .....	108
<b>Tabla A-4.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B5 .....	108
<b>Tabla A-5.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B7 .....	109
<b>Tabla A-6.</b> Datos representativos de los clúster de datos obtenidos de la boya B8 .....	109
<b>Tabla B-1.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B1 y S1.....	110
<b>Tabla B-2.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B2 y S2.....	111
<b>Tabla B-3.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B3 y S3.....	112

<b>Tabla B-4.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B5 y S5.....	113
<b>Tabla B-5.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B7 y S7.....	114
<b>Tabla B-6.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-13 con los registros de B8 y S8.....	115
<b>Tabla C-1.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B1 y S1.....	116
<b>Tabla C-2.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B2 y S2.....	117
<b>Tabla C-3.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B3 y S3.....	118
<b>Tabla C-4.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B5 y S5.....	119
<b>Tabla C-5.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B7 y S7.....	120
<b>Tabla C-6.</b> Indicadores estadísticos obtenidos al comparar los resultados de las simulaciones planteadas en la Tabla 4-16 con los registros de B8 y S8.....	121

## **RESUMEN**

El presente documento, expone el proceso de calibración y validación del modelo WAVEWATCH III V. 4.18, para su aplicación en la generación de un reanálisis de oleaje de a lo menos 20 años para las costas de Chile. Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto Fondef-IDeA IT3I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”, llevado a cabo por la escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso en colaboración con la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas, Apuerto ingeniería y el Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios - Valparaíso.

La calibración del modelo fue abordada en tres etapas. La primera consistió en la determinación de la configuración de la malla computacional y batimétrica, cuyos resultados fueran consistentes con las observaciones de instrumentos de medición in-situ y los tiempos de cálculo asociados ella fuesen relativamente bajos. La segunda, en la selección de las parametrizaciones de los procesos físicos contenidos en la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje, que permitan representar de mejor manera las condiciones de generación y propagación de oleaje hacia las costas de Chile. Finalmente la tercera etapa abordó la modificación de algunos de los parámetros adimensionales de los procesos físicos más relevantes en aguas profundas y que controlan el crecimiento y disipación de la energía debido a la interacción con el viento.

Para comparar los resultados de los escenarios de simulación planteados, se utilizaron 8 boyas distribuidas a lo largo de la costa chilena e información satelital proveniente de 6 misiones. Se planteó una metodología de evaluación del desempeño de los escenarios de simulación cuyo objetivo es la determinación de un único valor, el cual permite estimar la calidad de los datos simulados. Este valor fue denominado “Índice de Desempeño Unitario”, y consiste en una combinación lineal de indicadores estadísticos normalizados sobre la base de un análisis multicriterio, que tiene como objetivo establecer factores de importancia relativa a cada estadígrafo, tipo de análisis y parámetros de oleaje.

Los resultados de la primera etapa de calibración, indican que la configuración óptima de la malla batimétrica se encuentra acotada entre las latitudes 65° sur y 65° norte y por las latitudes 110° Este y 60° Oeste y con una resolución de 1° en ambos sentidos. De esta forma, es posible contar con resultados consistentes con las observaciones en tiempos de cálculo cercanos a las 2.2 horas por año de simulación.

Los resultados de la segunda dejan en evidencia que la combinación de parametrizaciones físicas que permiten obtener resultados con mejores ajustes a los datos instrumentales, corresponde a los contenidos en el Switch de compilación “Switch\_lfremmer1” (Test-11). Éste se encuentra contenido en el paquete de instalación del modelo WAVEWATCH III v.4.18 y considera el método DIA para la cálculo de las interacciones no lineales en aguas profundas, junto con el esquema de crecimiento y disipación de energía del oleaje ST4. Este último fue empleado por el lfremmer en la generación de la base de datos de reanálisis de oleaje global del proyecto IOWAGA.

De la última etapa de calibración se concluyó que el modelo forzando con información de la base de datos de reanálisis atmosférico ERA-Interim, genera resultados que representan de mejor desempeño en la descripción del clima medio de oleaje en Chile. De esta misma

etapa, y tras el ajuste de coeficientes en algunas de las parametrizaciones físicas contenidas en el `Switch_lfremer1`, se concluyó que la configuración de coeficientes por defecto de cada parametrización física, genera resultados que presentan un mejor ajuste y errores más bajos respecto a la información instrumental.

Finalmente, la base de datos generada con la configuración del modelo, obtenida luego del proceso de calibración presentó coeficientes de determinación  $R^2$  de 0.86 con errores medios cuadráticos de 0.27 metros en relación a la altura  $H_{m0}$  para una boya ubicada al norte de Chile. El desempeño más bajo observado, se presenta en una boya ubicada frente a Valparaíso, donde se observaron errores  $RMSE$  de 0.43 metros y  $R^2$  de 0.73. Respecto a los periodos  $T_m$ , se obtuvieron errores  $RMSE$  inferiores a los 3 segundos. Mientras que para las direcciones medias, se observaron coeficientes  $R^2$  superiores a 0.5, alcanzando un máximo de 0.79.