



Facultad de Ingeniería

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**“METODOLOGÍA HÍBRIDA PARA REDUCIR EL CLIMA DE
OLEAJE A AGUAS SOMERAS, CONSIDERANDO
PARÁMETROS ESPECTRALES QUE REPRESENTAN LOS
EVENTOS BIMODALES EN CHILE.”**

GOODEVE PIERRE GUICHARROUSSE MOLINA

2021

“METODOLOGÍA HÍBRIDA PARA REDUCIR EL CLIMA DE OLEAJE A AGUAS SOMERAS, CONSIDERANDO PARÁMETROS ESPECTRALES QUE REPRESENTAN LOS EVENTOS BIMODALES EN CHILE.”

GOODEVE PIERRE GUICHARROUSSE MOLINA

COMISIÓN EVALUADORA

CALIFICACIONES

NOTA

FIRMA

PROFESOR GUÍA
SR. LUÍS ZAMORANO

PROFESOR REVISOR 2
SR. EDUARDO GONZÁLEZ

PROFESOR REVISOR 3
SR. RODRIGO CAMPOS

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.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios verdadero, mi Señor Jesucristo, por haberme dado la oportunidad no solo de estudiar, sino que también a enfrentar las dificultades para llegar a esta primera cúspide de mi carrera profesional. A mis padres, pilares fundamentales, fueron la nube de día y columna de fuego de noche que Dios me entregó para poder llegar hasta aquí. A mi hermana Jeanmarie y cuñado Sebastian que me abrieron las puertas de su casa y brindaron siempre el espacio y tiempo que necesitaba para poder estudiar. A mi hermana mayor Geanevive por apoyarme en los últimos años de estudio, y a mi hermano menor Eldrick; mi motivación a seguir estudiando. Al Centro Cristiano de Evangelización, mi iglesia querida, donde corría a oír palabra de Dios al salir de la universidad los días martes y jueves. A Juan Zavala y Lidia Gutierrez quienes me han brindado su amistad y apoyo el último año.

También a Daniela Mendez con Pirita, por enseñarme que hay tiempos en que es preciso dejar de lado el reloj, su compañía hizo sentirme a gusto mientras obtenía resultados de la modelación; de hecho, sus iniciales están como variables en los script de programación mas importantes de este estudio. A todos mis compañeros ICO de la cede Santiago, por el compañerismo y complicidad que tuvimos tantos años, con ellos he compartido momentos inolvidables en la sala del centro de alumnos al salir de una evaluación. Extrañaré siempre las risas y los asados de fin de semestre. A Cristina Fuentes, a pesar que nuestros caminos divergieron, también me acompañó y apoyó gran parte de los años universitarios. A mis amigos Mariana Saavedra y Pablo Días, que durante estos años fueron como hermanos en tiempos difíciles, cuando el desanimo invadía los días de estudio ellos siempre estuvieron con palabras alentadoras, regalándome momentos únicos que me instaban a seguir adelante.

Quiero agradecer al Instituto Nacional de Hidráulica, por darme la oportunidad de realizar mi práctica profesional. A todo el departamento de innovación y desarrollo, específicamente a don Luis Zamorano quien no solo fue mi jefe durante 6 meses, sino que también un profesor de ingeniería y programación, me convenció de que Python es el lenguaje del presente.

Todos los profesores tienen mi respeto y agradecimiento. Sin embargo, debo destacar a Álvaro Valdivia que yendo mas allá de sus labores como profesor de cálculo me enseñó disciplina, orden y método de estudio. Así también, a Alejandro Perez, profesor de ramos estructurales, por su apoyo y hacerme creer en mis capacidades.

Finalmente, gracias a todos los que de una u otra forma contribuyeron en esta misión que termina aquí, en estas últimas líneas de agradecimiento. Muchas gracias a todos.

Goodeve Pierre Guicharrousse Molina

*“ Yo le puse un límite al mar y cerré con llave sus compuertas.
Y le dije: «Llegarás hasta aquí, y de aquí no pasarás;
aquí se romperán tus olas arrogantes.»”
Job 38:10-11*

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN	VII
2. INTRODUCCIÓN	13
3. OBJETIVOS	14
3.1. OBJETIVO GENERAL	14
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	15
5. FUNDAMENTO TEÓRICO	16
5.1. EL OLEAJE	16
5.1.1. DESCRIPCIÓN ESPECTRAL DEL OLEAJE	18
5.1.2. MULTIMODALIDAD	22
5.2. MODELO DE PROPAGACIÓN ESPECTRAL SWAN	23
5.2.1. ACCIÓN DEL VIENTO (S_{inp})	25
5.2.2. DISIPACIÓN POR WHITECAPPING (S_{wcp})	26
5.2.3. DISIPACIÓN POR FRICCIÓN DE FONDO (S_{frc})	26
5.2.4. DISIPACIÓN POR ROMPIENTE (S_{brk})	27
5.2.5. INTERACCIONES NO LINEALES OLA-OLA (S_{nl})	27
5.3. ALGORITMOS	28
5.3.1. ALGORITMO DE MÁXIMA DISIMILITUD (MDA)	28
5.3.2. ALGORITMO DE BASE RADIAL (RBF)	29
6. REGIÓN DE ESTUDIO	31
7. METODOLOGÍA	32
7.1. PROPAGACIÓN ESPECTRAL EN SWAN	33
7.1.1. BATIMETRÍA	33
7.1.2. MALLA COMPUTACIONAL	34
7.1.3. VIENTO	36
7.2. METODOLOGÍA HÍBRIDA DE REDUCCIÓN DE ESCALA	37
7.2.1. NORMALIZACIÓN DE PARÁMETROS DE ESTADOS DE MAR	37
7.2.2. SELECCIÓN DE ESTADOS DE MAR CON ALGORITMO MDA	39
7.3. IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS BIMODALES	42
7.4. ORDEN DE LOS RESULTADOS A ENTREGAR	46
7.4.1. SEÑAL COMPLETA OBTENIDA CON SWAN	46
7.4.2. COMPARACIÓN ENTRE INTERPOLACIONES RBF	46
7.4.3. COMPARACIÓN ENTRE SERIES TEMPORALES	47
7.4.4. COMPARACIÓN ENTRE TORMENTAS BIMODALES	47
7.4.5. TIEMPO DE ESFUERZO COMPUTACIONAL	47
8. RESULTADOS	48
8.1. SEÑAL COMPLETA OBTENIDA CON SWAN	48

8.2. COMPARACIÓN ENTRE SEÑALES	49
8.2.1. ANÁLISIS ENTRE SEÑALES RECONSTRUIDAS CON RBF LINEAL	50
8.3. REPRESENTACIÓN DE LOS EVENTOS BIMODALES	57
8.3.1. COMPARACIÓN EN LA REGIÓN O_3	57
8.3.2. COMPARACIÓN EN LA REGIÓN O_4	65
8.3.3. COINCIDENCIA EN LA SELECCIÓN DE ESTADOS DE MAR CON LOS EVENTOS BIMODALES	72
8.4. TIEMPO DE CÓMPUTO	72
9. CONCLUSIONES	76
10. REFERENCIAS	77

LISTA DE FIGURAS

5.1.1. Distribución energética de las ondas de superficie.	16
5.1.2. Clasificación del oleaje según su génesis.	17
5.1.3. Estructura de un oleaje aleatorio.	18
5.1.4. Transformación de diagrama de varianza a densidad espectral	19
5.1.5. Ejemplo de espectro bidimensional del oleaje.	20
5.1.6. Ejemplo de espectro bimodal.	23
5.3.1. Selección de máxima disimilitud.	29
6.1. Región de estudio. Los puntos rojos representan cada uno de los nodos que componen la malla computacional con la que se realiza la propagación.	31
7.1. Esquema metodológico.	32
7.1.1. Batimetrías ponderadas.	34
7.1.2. Regiones perturbadas en la malla.	35
7.1.3. Malla computacional.	36
7.1.4. Grilla de viento sobre la malla.	37
7.2.1. Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados, y la selección de casos por MDA	41
7.2.2. Distribución de las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados, el color representa la densidad de la distribución. Selección MDA : 0,8 % (puntos rojos). Conjunto: 7D	42
7.3.1. Dispersión de ancho espectral vs coef. de potencia direccional. La densidad de dispersión representada por colores.	44
7.3.2. Eventos extremos bimodales de región O_3	45
7.3.3. Eventos extremos bimodales de región O_4	46
8.1.1. Señal obtenida por SWAN	48
8.2.1. Ejemplo de barras indicadoras de rango.	49
8.2.2. Rangos de R^2 que obtiene la señal H_{m0} reconstruida con cada RBF	50
8.2.3. Rangos de $RMSE$ que obtiene la señal H_{m0} reconstruida con cada RBF	50
8.2.4. Gráfico de dispersión de H_{m0} para cada conjunto (7D , 9D y 10D) junto a un año de serie temporal (1997 – 1998) reconstruida con un 5 % de casos seleccionados.	52
8.2.5. Gráfico de dispersión de T_m para cada conjunto (7D , 9D y 10D) junto a un año de serie temporal (1997 – 1998) reconstruida con un 5 % de casos seleccionados.	54
8.2.6. Gráfico de dispersión de D_m para cada conjunto (7D , 9D y 10D) junto a un año de serie temporal (1997 – 1998) reconstruida con un 5 % de casos seleccionados.	56
8.3.1. Rangos de R^2 que obtienen los eventos bimodales de la señal H_{m0} reconstruida con cada RBF . Región O_3	57
8.3.2. Rangos de $RMSE$ que obtienen los eventos bimodales de la señal H_{m0} reconstruida con cada RBF . Región O_3	58
8.3.3. Gráfico de dispersión de H_{m0} para cada conjunto (7D , 9D y 10D) y la superposición de las alturas de tormentas obtenidas por ambas metodologías. Región O_3	60
8.3.4. Gráfico de dispersión de T_m para cada conjunto (7D , 9D y 10D) y la superposición de los periodos de tormentas obtenidas por ambas metodologías. Región O_3	62

8.3.5. Gráfico de dispersión de D_m para cada conjunto (7D,9D y 10D) y la superposición de las direcciones de tormentas obtenidas por ambas metodologías. Región O_3 .	64
8.3.6. Comparación del rango R^2 de las alturas H_{m0} en los eventos bimodales. Región O_4 .	65
8.3.7. Comparación del rango $RMSE$ de las alturas H_{m0} en los eventos bimodales. Región O_4 .	65
8.3.8. Gráfico de dispersión de los eventos H_{m0} para cada conjunto (7D,9D y 10D) y la superposición de las alturas de tormentas obtenidas por ambas metodologías. Región O_4 .	67
8.3.9. Gráfico de dispersión de T_m para cada conjunto (7D,9D y 10D) y la superposición de los periodos de tormentas obtenidos por ambas metodologías. Región O_4 .	69
8.3.10 Gráfico de dispersión de D_m para cada conjunto (7D,9D y 10D) y la superposición de las direcciones de tormentas obtenidas por ambas metodologías. Región O_4	71
8.3.11. Coincidencia en la selección de estados de mar con eventos bimodales de la región O_4	72
8.4.1. Relación del tiempo de cómputo con los índices de comparación de la serie H_{m0} — (8 Núcleos).	74
8.4.2. Relación del tiempo de cómputo con los índices de comparación de los eventos bimodales. Región O_3 — (8 Núcleos).	74
8.4.3. Relación del tiempo de cómputo con los índices de comparación de los eventos bimodales. Región O_4 — (8 Núcleos).	75
10.1. Estructura general	81
10.2. Lectura de información	83
10.3. Parámetros espectrales	84
10.4. Parámetros normalizados	85
10.5. Selección - MDA	86
10.6. Salidas	87
10.7. Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 0,5 % - 7D	89
10.8. Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 3 % - 7D	90
10.9. Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 10 % - 7D	91
10.10 Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 0,5 % - 9D	92
10.11 Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 3 % - 9D	93
10.12 Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 10 % - 9D	94
10.13 Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 0,5 % - 10D	95
10.14 Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 3 % - 10D	96

10.15	Distribución de puntos para las diferentes combinaciones bidimensionales de los parámetros analizados. Selección: 10 % - 10D	97
10.16	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 0,5 % - 7D	98
10.17	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 3 % - 7D	99
10.18	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 10 % - 7D	100
10.19	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 0,5 % - 9D	101
10.20	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 3 % - 9D	102
10.21	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 10 % - 9D	103
10.22	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados Selección MDA: 0,5 % - 10D	104
10.23	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 3 % - 10D	105
10.24	Serie de tiempo de dos años (1996 a 1998) de los parámetros utilizados. Selección MDA: 10 % - 10D	106
10.25	Residuo de las señales 7D,9D y 10D reconstruidas con la función de base radial Lineal.	107

LISTA DE TABLAS

7.2.1. Resumen de parámetros espectrales utilizados.	38
7.2.2. Grupos de selección de estados de mar	40
8.2.1. Índices de comparación entre la señal H_{m0} de SWAN y la señal reconstruida con RBF Lineal.	51
8.2.2. Índices de comparación entre la señal T_m de SWAN y la señal reconstruida con RBF Lineal.	53
8.2.3. Índices de comparación entre la señal D_m de SWAN y la señal reconstruida con RBF Lineal	55
8.3.1. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal H_{m0} obtenida con SWAN v/s Señal H_{m0} reconstruida con RBF Lineal. Región O_3	59
8.3.2. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal T_m obtenida con SWAN v/s Señal T_m reconstruida con RBF Lineal. Región O_3	61
8.3.3. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal D_m obtenida con SWAN v/s Señal D_m reconstruida con RBF Lineal. Región O_3	63
8.3.4. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal H_{m0} obtenida con SWAN v/s Señal H_{m0} reconstruida con RBF Lineal. Región O_4	66
8.3.5. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal T_m obtenida con SWAN v/s Señal T_m reconstruida con RBF Lineal. Región O_4	68
8.3.6. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal D_m obtenida con SWAN v/s Señal D_m reconstruida con RBF Lineal. Región O_4	70
8.4.1. Tiempo que tarda metodología downscaling para cada grupo de selección según número de núcleos	73
10.1. Índices de comparación entre la señal H_{m0} de SWAN y la señal reconstruida con las diferentes funciones.	112
10.2. Índices de comparación entre la señal T_m de SWAN y la señal reconstruida con las diferentes funciones.	113
10.3. Índices de comparación entre la señal D_m de SWAN y la señal reconstruida con las diferentes funciones.	114
10.4. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal H_{m0} obtenida con SWAN v/s Señal H_{m0} reconstruida con las diferentes funciones	115
10.5. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal T_m obtenida con SWAN v/s Señal T_m reconstruida con las diferentes funciones	116
10.6. Índices de comparación de eventos bimodales: Señal D_m obtenida con SWAN v/s Señal D_m reconstruida con las diferentes funciones	117

1. RESUMEN

En lugares donde los datos instrumentales del clima de oleaje no están disponibles, la técnica de hindcasting puede proporcionar datos estadísticos del oleaje durante periodos de tiempo significativos (~ 40 años) con una resolución espacial de gran escala (aproximadamente $\sim 0.5-1$ grados). Sin embargo, los estudios costeros necesitan una resolución mas detallada (aproximadamente $\sim 50-500$ metros) que incluya los procesos de transformación física de las olas. Este problema específico, llamado reducción de escala, generalmente se resuelve aplicando un enfoque dinámico por medio de modelos numéricos de propagación de olas que requieren un alto esfuerzo de tiempo computacional. Por otra parte, priorizando el recurso del tiempo, existen otras metodologías que hacen uso de herramientas matemáticas, como también métodos híbridos que relacionan estas herramientas con el enfoque dinámico.

El trabajo presentado en esta memoria reproduce el método propuesto por Camus et al. (2012), el cual reduce drásticamente el esfuerzo de tiempo de la CPU utilizando una metodología híbrida que combina el modelo numérico (reducción de escala dinámica) y las herramientas matemáticas (reducción de escala estadística). El procedimiento consiste en seleccionar un set de datos representativos del conjunto de parámetros espectrales $M = \{H_{m0}, T_m, D_m, W, \beta_w\}$ (altura de momento de orden cero, periodo pico, dirección media, magnitud y dirección del viento respectivamente) en aguas profundas. Para ello se utiliza el algoritmo de máxima disimilitud (**MDA** por sus siglas en ingles). Luego, propagar los casos seleccionados utilizando el modelo Simulating Waves Nearshore (**SWAN**, por sus siglas en ingles) y reconstruir las series de tiempo de las olas en aguas poco profundas mediante el algoritmo de interpolación basado en las funciones de base radial (**RBF** por sus siglas en ingles). Esta metodología es utilizada con el objetivo de obtener mejores resultados reemplazando el conjunto M por un conjunto $M^+ = \{H_{m0}, T_m, D_m, W, \beta_w, \nu, D_{sprd}|d_\theta\}$ donde, además de los parámetros utilizado por Camus et al. (2012), se considera el ancho espectral ν y los parámetros spreading direccional o coeficiente de potencia direccional $\{D_{sprd}|d_\theta\}$, evaluando así, cual de estos dos últimos contribuye a una mejor descripción de los eventos bimodales y realizar una comparación de resultados obtenidos con la señal de una modelación full espectral.

Finalmente, los resultados son favorables. La señal que se consigue con un subconjunto de M^+ , tiene una mejor representación de la señal obtenida de la modelación full espectral que con un subconjunto de M . Así también, se obtiene una mayor descripción de los eventos bimodales swell.wind definido según el criterio de Ossandon and Catalán (2014). No obstante, los resultados dependen del tamaño del set de datos seleccionados, de modo que existe una componente que dependerá de la metodología y de los recursos que se dispone.