TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL OLEAJE EN EL LITORAL PACÍFICO DE COSTA RICA: METODOLOGÍAS DE REGIONALIZACIÓN Y AVANCES EN SERVICIOS RELATIVOS AL CLIMA MARÍTIMO

DOCTORADO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE LA COSTA

Presentada por:

HENRY ALFARO CHAVARRÍA

Dirigida por:

Dr. Gabriel Díaz Hernández

Dra. Melisa Menéndez García



Abril 2017

A mi madre

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis ha sido desarrollada gracias a la Universidad de Costa Rica e IMARES, organizaciones que han contribuido a través del financiamiento para la realización de este trabajo.

Quiero continuar agradeciendo a dos personas que han sido fundamentales en mi carrera profesional y académica. Gilberto Rodríguez Pacheco, quien me introdujo y abrió los ojos a una disciplina de la ingeniería que para mí no existía y Gerorges Govaere Vicarioli, por empujarme a realizar esta tesis, por el privilegio de trabajar con él y creer en mí para ir creando poco a poco, desde las trincheras, el grupo de trabajo en el que actualmente nos desarrollamos y que año con año crece.

Deseo también expresar mi gratitud a mis directores, Gabriel Díaz Hernández y Melisa Menéndez García, por su dedicación, esfuerzo, colaboración y apoyo en la realización de este trabajo, sin duda alguna sin la entrega, supervisión y guía que han brindado en todo este tiempo, esta tesis no hubiera sido posible. Nuevamente muchas gracias por todo.

Quiero continuar expresando mi agradecimiento a mis compañeros de IMARES, Ronald, Coco, Pater, Felipe, Alex y Diego. Gracias por la colaboración, apoyo brindado y por contribuir a consolidar un grupo competitivo, esforzado, solidario y con buen ambiente para trabajar.

Además, quiero agradecer a Raúl Medina, Cesar Vidal e Iñigo Losada, quienes allá por el año 2005, en las clases del Máster de Puertos y Costas del CEDEX, incentivaron en mí, con sus apasionantes clases, la ilusión de venir a la Universidad de Cantabria a continuar aprendiendo sobre este mundo de la ingeniería de costas.

En un plano más personal quiero agradecer a mi madre y mi hermano, quienes siempre están ahí sin ninguna condición. Mi agradecimiento y respeto para Gre, por acompañarme en mi camino de vida, su incondicionalidad e integridad, en verdad sin vos no hubiese sido posible ni siquiera empezar esta aventura. También quiero a gradecer a Naty, que aunque ahora no se entera mucho, si ha tenido que soportar frases como: *"ahora no, pero te prometo que cuando termine jugamos"*, sé que cuando crezca lo comprenderá mejor...

Gracias a todos quienes de una o de otra forma me ayudaron a culminar esta etapa de la vida.

Henry Alfaro Chavarría. Abril 2017

RESUMEN

Costa Rica, a pesar de sus escasas dimensiones en proporción con otros países de Latinoamérica, es una de las economías emergentes de la región. Sus actividades económicas principales como la industria de manufactura para la exportación y el turismo están relacionadas con el recurso marítimo y costero. Por ello, el adecuado conocimiento de las variables meteo-oceanográficas se traduce en el directo aprovechamiento de los recursos y de las diferentes actividades como turismo, pesca y comercio internacional.

Este país, al igual que muchos otros de la región, no cuenta con suficiente información acerca de variables meteo-oceanográficas, ni tampoco con técnicas avanzadas de análisis para definir el clima marítimo. Estos dos aspectos podrían contribuir a una mejor gestión de los recursos nacionales e impulsar el crecimiento económico de una manera más eficiente y sostenible.

Es por este motivo que este trabajo de investigación tiene como objetivo fundamental entender la generación, propagación e interacción en costa del oleaje en la zona litoral del Océano Pacífico de América, tomando como modelo la costa del Pacífico de Costa Rica, y en particular el Golfo de Nicoya. Además, se incluye como parte del estudio las ondas infragravitatorias que se originan producto del agrupamiento del oleaje, proceso muy característico que sucede en el largo viaje que realiza el oleaje desde su zona de generación hasta las costas de América. El fin de esta investigación es aportar un valor añadido en productos derivados de las condiciones del clima marítimo en Costa Rica, que sirvan a la ingeniería para precisar los cálculos de diseño así como de prototipo para servicios climáticos costeros. En esta tesis se ha definido la variable del oleaje en conjunto con las ondas infragravitatorias que inciden en la costa del Pacífico de Costa Rica. Para ello se han analizado y generado diferentes bases de datos. Por un lado, se ha implementado una campaña de campo durante los años 2014 y 2015 que ha dado lugar a una base de datos instrumental, con resolución 3 horaria, cuasi continua y que se constituye hoy en día en la serie más extensa medida en Costa Rica.

Se ha utilizado, además la reciente serie de reanálisis de oleaje en aguas profundas GOW2 desarrollada por IH Cantabria, a la cual se le ha integrado la onda infragravitatoria para crear una nueva fuente de información. La nueva base de datos constituye un producto novedoso con 38 años de información para esta zona del mundo, al complementar el espectro del oleaje con información de las bajas frecuencias.

Esta nueva base de datos se ha trasladado y ampliado su resolución hasta aguas poco profundas y se ha generado el producto ROOL, una base de datos histórica (1979-2016) con resolución horaria del oleaje y la onda infragravitatoria asociada en el Golfo de Nicoya. La nueva base de datos constituye un producto novedoso para esta zona del mundo, al complementar el espectro del oleaje con información de la energía relacionada a las ondas infragravitatorias. Para desarrollar esta base de datos se ha configurado una metodología de *downscaling* híbrido, que combina técnicas matemático-estadísticas con modelado numérico, adaptada a las singularidades geográficas de la zona y a la realidad local en cuanto a la disponibilidad de información.

Esta base de datos se ha explotado de dos maneras; la primera ha sido incorporando el contenido de energía asociado a la onda infragravitatoria en cálculos de diseño ingenieril que, tradicionalmente se realizan considerando únicamente la energía asociada al oleaje y la segunda ha sido implementando un sistema operacional de oleaje y onda infragravitatoria de alta resolución en el Golfo de Nicoya, validado con información instrumental.

Lo anterior ha permitido estimar, en promedio un 30% más de eventos de rebases, cuando se incluye el contenido de energía asociado a la onda infragravitatoria, en comparación a cuando únicamente se considera la energía del oleaje cómo tradicionalmente se realiza.

Asimismo se ha desarrollado un prototipo de sistema operacional de oleaje y onda infragravitatoria (sistema SO3), de alta resolución espacial dentro del Golfo de Nicoya. Para desarrollar este prototipo se han realizado diferentes test de sensibilidad de la pericia de las predicciones. Se han obtenido resultados aceptables principalmente durante los primeros 3 días del pronóstico para los parámetros estándar del estado de mar y de la onda infragravitatoria.

En resumen, a lo largo del presente documento se ha revisado el estado del arte y desarrollado las siguientes actividades y estudios:

- a. Implementación de una red de medición.
- b. Análisis de las series de reanálisis de variables meteo-oceanográficas actuales.
- c. Análisis de las diferentes técnicas de *downscaling*, desarrollo de un método específico para el oleaje costero que alcanza las costas pacíficas de Costa Rica y generación de la base de datos costera *ROOL* durante el periodo 1979-2016.
- d. Explotación ingenieril de la base de datos de oleaje y onda infragravitatoria *ROOL* para un mejor conocimiento de evento de rebase en costa.
- e. Desarrollo de un sistema prototipo operacional de oleaje a corto plazo (SO3), que permite obtener predicciones del oleaje en costa con resolución horaria.

Los resultados de los estudios b, c, d y e han sido validados mediante los registros realizados por medio de la red de medición instrumental (a).

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS	IV
LISTA DE ACRÓNIMOS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV

CAPÍTULO 1

INT	ROD	DUCCIÓN	1
1.1	Mar	rco de la tesis	2
1.	1.1	El clima marítimo en ingeniería de costas	5
1.	.1.2	Estrategias de regionalización	6
1.	.1.3	Onda larga (infragravitatoria)	7
1	.1.4	Zona de estudio, Golfo de Nicoya	9
1.2	Opo	ortunidad de la tesis	. 14
	1.2.	.1 En cuanto a la necesidad de redes de medida	. 14
	1.2.	.2 En cuanto al <i>downscaling</i> de oleaje	. 14
	1.2.	.3 En cuanto a la reconstrucción climática de la onda infragravitatoria	. 15
	1.2.	.4 En cuanto al desarrollo de sistemas operacionales	. 15
1.3	Obje	jetivos	. 16
1.4	Org	ganización de la tesis	. 17

CAPÍTULO 2

CAN	MPAÑAS DE CAMPO Y BASES DE DATOS	19
2.1	Introducción	20

DINÁMICA DEL OLEAJE EN EL LITORAL PACÍFICO DE COSTA RICA

2.2 M	arco Climático	
2.3 Ca	ampaña de campo	
2.3.1	Teoría sobre las técnicas de medición de oleaje y ondas infragravitatorias	
2.3.2	2 Descripción de la campaña de medición	
2.3.3	Estimación de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria de alturas y pe	ríodos
		39
2.3.4	Análisis de datos de oleaje para la campaña de campo durante el año 2014	
2.3.5	Análisis de datos de oleaje para la campaña de campo durante el año 2015	50
2.3.6	5 Análisis de las ondas infragravitatorias	53
2.4 Ba	ases de datos	
2.5 Co	onclusiones.	64

CAPÍTULO 3

DO	WNSCALING DINÁMICO DEL OLEAJE	66
3.1	Introducción	67
3.2	Estado del arte en modelos de generación y propagación del oleaje	69
3.3	Modelos de propagación de oleaje	71
3.4	Configuración del modelo SWAN de propagación de oleaje	74
3.5	Calibración de la base de datos de reanálisis de la serie GOW2	84
3.6	Propagación y validación de los datos de reanálisis de la serie GOW2 calibrada	95
3 0	.6.1 Estimación de las ondas infragravitatorias como complemento de la información de leaje de la serie de reanálisis GOW2	96
3	.6.2 Validación de los datos de la serie de reanálisis GOW2 calibrada con mediciones	
ir	nstrumentales	99
3.7	Conclusiones	.03

CAPÍTULO 4

RO	OL: REGIONALIZACIÓN DE OLEAJE Y ONDA LARGA 10)6
4.1	Introducción10)7
4.2	Estado del arte	10
4.3 agua	Transferencia del reanálisis de oleaje de la serie GOW2 y la onda infragravitatoria des as profundas a aguas someras mediante la técnica del <i>downscaling</i> híbrido11	de 12
4.4	Reconstrucción y revalidación de las series temporales11	19
4.5	Resultados y diagnóstico del ROOL	32
4.6	Conclusiones	37

DINÁMICA DEL OLEAJE EN EL LITORAL PACÍFICO DE COSTA RICA

CAPÍTULO 5

EXI	PLOTACIÓN DE LA BASE DE DATOS ROOL	139
5.1	Introducción	140
5.2	Estado del arte sobre generación y propagación de ondas largas y su solución numérica	141
5.3	Configuración del modelo de inundación XBeach	147
5.4	Descripción del sitio y observaciones de campo	152
5.5	Resultados de la simulación numérica	156
5.6	Conclusiones	162

CAPÍTULO 6

SO3: SISTEMA OPERACIONAL DE OLEAJE Y ONDA LARGA	. 163
6.1 Introducción	. 164
6.2 Estado del arte	. 165
6.3 Metodología	. 167
6.3.1. Sistema operacional NWW3 de la NOAA/NWS/NCEP	. 168
6.3.2. Calibración más marea astronómica	. 169
6.3.3. ROOL	. 170
6.3.4. El sistema operacional de oleaje y onda larga (SO3)	. 171
6.4 Análisis de sensibilidad de las inicializaciones	. 171
6.5 Evaluación de la destreza del sistema SO3 en los pronósticos a corto plazo	. 181
6.6 Conclusiones	. 193

CAPÍTULO 7

CON	NCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	195
7.1	CONCLUSIONES	196
7.2	Futuras líneas de investigación	201

REFERENCIAS

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1. Distribución energética, fuerzas generadoras (en cursiva y color azul) y clasificación
de las ondas de superficie en función de la frecuencia o período
Figura 1.2. Zona de estudio. Golfo de Nicoya. fuente: trabajo propio con Natural Earth Data
Este, gráfico vectorial fue creado con Inkscape, CC BY-SA 3.0.
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2024027411
Figura 1.3. Eventos de rebase causado por una tormenta sucedida entre el 4 y 5 de julio del
2014, que produjo la inundación de la ruta principal de acceso a Puerto Caldera. Fuente: MIO-
CIMAR

Figura 2.1. Flujo medio de energía en la costa del Pacífico de Costa Rica desde 1993 hasta el
2012. Las isolíneas de color negro representan los tiempo de viaje del oleaje en alcanzar la
costa
Figura 2.2. Energía media del flujo del oleaje que alcanza el Golfo de Nicoya24
Figura 2.3. Mapas del parámetro H _s medio distribuida durante los meses del año
Figura 2.4. a) Variación temporal anual y espacial de H_s medio entre los años desde 1979 hasta el 2015 frente al litoral Pacífico de Costa Rica y b) serie temporal anual de variaciones H_s entre 1979 y 2015
Figura 2.5. a) gráfico de cajas de las variables H_s y T_p . Rosas de oleaje b) del parámetro H_s y c) del parámetro T_p , d) histograma de H_s ajustado a la función de densidad log-normal y e) función de distribución acumulada de H_s ajustada a la función log-normal

Figura 2.6. Estadística del corto y largo plazo del parámetro H_s frente a la costa del Pacífico de Costa Rica. a) régimen medio de H_s ajustado a la log-normal y b) régimen extremal de H_s ajustado a la función GEV
Figura 2.7. Equipo de medición de oleaje, Aquadopp
Figura 2.8. AWAC y base de fijación para el fondo marino
Figura 2.9. Boya Bares escalar colocada en puerto Caldera
Figura 2.10. sensor de presión
Figura 2.11. Cámara de video instalada sobre un poste de alumbrado público frente a un tramo de playa Caldera
Figura 2.12. Ubicación de los equipos de medición de oleaje en el Golfo de Nicoya. a) localización del AWAC y b) localizan Aquadopp, boya, sensores de presión y cámara de vídeo frente a playa Caldera
Figura 2.13. Registro de presión medido por el Aquadopp y magnitud de la marea
Figura 2.14. Serie temporal de la superficie libre medida durante 17 minutos 40
Figura 2.15. Análisis del oleaje en el dominio del tiempo a partir de diversos métodos
Figura 2.16. Espectro frecuencial del desplazamiento vertical de la superficie libre
Figura 2.17. Registro de presión medido por el Aquadopp sin la magnitud de la marea
Figura 2.18. Desplazamiento de la superficie libre del oleaje (línea color negro) y la onda infragravitatoria (línea color rojo)
Figura 2.19. Series temporales de a) H_{mo} , b) T_p , c) T_{m02} y d) dir para la posición de Cabo Blanco y Caldera durante el año 2014
Figura 2.20. Series temporales de a) H_{mo} , b) T_p , c) T_{m02LW} y d) dir para la posición de Cabo Blanco y Caldera durante el año 2015
Figura 2.21. Serie temporal de a) H_{mo} , b) H_{LW} , y c) T_{pLW} durante el año 2014
Figura 2.22. Serie temporal de a) H_{mo} , b) H_{LW} y c) T_{pLW} durante el año 2015
Figura 2.23. Mallas del reanálisis GOW2. a) mallas utilizadas en la base de datos global GOW2. El dominio con mayor resolución espacial (0.25°) se muestra en amarillo.b) detalle de la malla costera (puntos rojos) en ambos litorales de Costa Rica. Fuente: (Pérez et al., 2017)
Figura 2.24. Mapas de pronóstico de los parámetros de oleaje generados por el modelo operacional de olaje de la NOAA NWW3. a) H_s y b) T_p ,. Fuente: http://polar.ncep.noaa.gov/waves/viewer.shtml?-multi_1-latest-pacific-tp
Figura 2.25. Localización de los mareógrafos en Costa Rica. En color verde los que están en funcionamiento actualmente, en color amarillo el que está instalado pero presenta problemas de funcionamiento, color naranja los que se compraron para recambio pero no se han instalado y color rojo se tienen previstos a ser instalados en un futuro
Figura 2.26. Localización de los nodos de reanálisis de viento en la zona de estudio, fuentes CFSR (en color azul) y CFSRv2 (en color rosa)

Figura 3.1. a) Batimetría general de la zona de estudio y mallas de cálculo. (b) malla general con tamaño de celda $\Delta x = \Delta y = 180$ m y (c) malla de detalle con tamaño de celda $\Delta x = \Delta y = 15$ m.74
Figura 3.2. (a) Ubicación de los nodos de reanálisis del GOW2, ubicación del equipo de medición AWAC y contorno de la malla general de cálculo. (b) nodos de reanálisis de campos de viento de la fuente CFSR (puntos de color azul) y CFSRv2 (puntos de color magenta) 76
Figura 3.3. Contorno de malla general de cálculo, puntos de la serie GOW2 y puntos adicionales (color rojo)
Figura 3.4. Nodos de reanálisis de campos de viento de las fuentes CFSRv2 y CFSRv2bis 82
Figura 3.5. Serie temporal de <i>H_s</i> del reanálisis de la serie GOW2 a) punto 3, b) punto 4, c) punto 5 y d) punto 6
Figura 3.6. Serie temporal de T_{m02} del reanálisis de la serie GOW2 a) punto 3, b) punto 4, c) punto 5 y d) punto 6
Figura 3.7. Serie temporal de <i>dir</i> del reanálisis de la serie GOW2 a) punto 3, b) punto 4, c) punto 5 y d) punto 6
Figura 3.8. Serie temporal de a) H_s , b) T_{m02} y c) <i>dir</i> , del reanálisis de la serie GOW2 para los puntos 3, 4, 5 y 6 localizados en el contorno como forzamientos del modelo SWAN, durante el año 2014.
Figura 3.9. Series temporales de a) <i>Hs</i> , b) <i>Tp</i> y c) <i>dir</i> , del reanálisis de la serie GOW2 y datos medidos en Cabo Blanco y Caldera
Figura 3.10. Series temporales de Hs del reanálisis del punto 4 de la serie GOW2 y serie "Cabo Blanco deep"
Figura 3.11. Gráficos de dispersión cuantil-cuantil. a) $Hs_{Cabo Blanco deep} vs Hs_{pto4 sin calibrar}$, b) Hs_{Cabo} $Blanco deep vs Hs_{pto4 calibrado}$, c) función de distribución acumulada y d) coeficiente de valoración entre los datos corregidos/sin corregir en escala polar
Figura 3.12. Series temporales de <i>Hs</i> de la serie GOW2 y datos de Cabo Blanco trasladados hasta profundidades indefinidas92
Figura 3.13. Gráficos de dispersión cuantil-cuantil a) punto3, b) punto 4 y c) punto 5
Figura 3.14. Resultados de corrección de datos de reanálisis con datos de satélite95
Figura 3.15. Espectro de amplitudes GOW2 modificado, correspondiente al estado de mar medido el 4 de julio del 2014. Fracción de energía a la onda infragravitatoria encerrada en la elipse de color rojo
Figura 3.16. Validación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Cabo Blanco 100
Figura 3.17. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW} para la posición de Cabo Blanco durante la semana del 01 al 08 de julio del 2014 101
Figura 3.18. Validación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Caldera 102
Figura 3.19. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW} para la posición de Caldera durante la semana del 01 al 08 de julio del 2014

Figura 4.1. Diagrama de flujo que muestra la secuencia de pasos para la determinación del ROOL en el Golfo de Nicoya
Figura 4.2. Contorno de malla general de cálculo del modelo SWAN, puntos de la serie GOW2 y puntos adicionales (color rojo)
Figura 4.3. Series temporales de los parámetros de oleaje a) H_s , b) T_p y c) <i>dir</i> de la serie GOW2 calibrada, junto con los casos seleccionados por la técnica MaxDiss
Figura 4.4. Relación de los casos seleccionados correspondientes al punto de color verde de la serie de reanálisis GOW2
Figura 4.5. Ejemplo de propagación de un caso correspondiente a la familia tipo <i>Swell</i> . a) malla general y b) malla de detalle
Figura 4.6. Ejemplo de propagación de un caso correspondiente a la familia tipo sea. a) malla general y b) malla de detalle
Figura 4.7. Revalidación de la reconstrucción de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Cabo Blanco. a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} y e) T_{pLW}
Figura 4.8. Revalidación de la reconstrucción de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Caldera. a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} y e) T_{pLW}
Figura 4.9. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Cabo Blanco durante el 2014. a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW}
Figura 4.10. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Caldera durante el 2014. a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW}
Figura 4.11. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p y c) H_{LW} a) H_s , b) T_p y c) H_{LW} para la posición en Cabo Blanco durante el 2014
Figura 4.12. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p y c) H_{LW} para la posición de Caldera durante el 2014
Figura 4.13. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Cabo Blanco durante el 2015. a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW}
Figura 4.14. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Caldera durante el 2015. a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW}
Figura 4.15. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW} para la posición en Cabo Blanco durante el 2015
Figura 4.16. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW} para la posición de Caldera durante el 2015
Las tablas 4.1 y 4.2 muestran un resumen de las magnitudes de los descriptores de calidad de ajuste para los parámetros H_s y H_{LW} respectivamente, estimados en Cabo Blanco y Caldera para los años 2014 y 2015
Figura 4.17. Distribución espacial de los 126 puntos dentro del Golfo de Nicoya que componen el ROOL. Fuente: fotografía de fondo tomada de google earth

Figura 4.18.	Serie temporal de a) H_s , b) T_p , c) dir d) H_{LW} , e) T_{m02LW} para la posición de Cabo
Blanco.	
Figura 4.19.	Serie temporal de a) H_s , b) T_p , c) dir d) H_{LW} , e) T_{m02LW} para la posición de Caldera
Figura 4.20.	ROOL en el Golfo de Nicoya. a) promedio de H_s desde 1979 al 2016, b) promedio
de H_{LW} des de	e 1979 al 2016

Figura 5.1.a) Nodos de la serie ROOL que se utilizan como forzamiento del XBeach. b) Ubicación de las tres secciones transversales frente a playa Caldera simuladas con el modelo XBeach, también se muestra la localización del Aquadopp y cámara de vídeo
Figura 5.2. Espectro direccional con el contenido de energía asociado al oleaje y a la onda infragravitatoria, obtenido en un punto de la malla de cálculo del modelo SWAN, el cual coincide con el contorno del modelo XBeach para el perfil central
Figura 5.3. Imágenes que evidencian los efectos de los eventos de inundación en las infraestructuras adyacentes a playa Caldera. a), b) y c) viviendas afectadas por eventos de inundación, d), e) y f) carretera de acceso al puerto afectada por eventos de inundación 153
Figura 5.4. Sección transversal del tramo de playa de los perfiles. a) perfil norte, b) perfil central y c) perfil sur
Figura 5.5. Esquema 1D del modelo XBeach correspondiente al perfil norte y distribución de los 4 puntos de control (G1, G2, G3 y G4) a lo largo del mismo, donde se obtuvieron como respuesta los espectros frecuenciales de energía
Figura 5.6. Espectros frecuenciales de energía en los puntos de control (filas G1, G2, G3 y G4) a lo largo del perfil norte. Casos spcP1 SW y spcP1 SW+LW
Figura 5.7. Esquema 1D del modelo XBeach correspondiente al perfil central y distribución de los 4 puntos de control (G1, G2, G3 y G4) a lo largo del mismo, donde se obtuvieron como respuesta los espectros frecuenciales de energía
Figura 5.8. Espectros frecuenciales de energía en los puntos de control (filas G1, G2, G3 y G4) a lo largo del perfil central. Caso spcP2 SW y caso spcP2 SW+LW
Figura 5.9. Esquema 1D del modelo XBeach correspondiente al perfil sur y distribución de los 4 puntos de control (G1, G2, G3 y G4) a lo largo del mismo, donde se obtuvieron como respuesta los espectros frecuenciales de energía
Figura 5.10. Espectros frecuenciales de energía en los puntos de control (filas G1, G2, G3 y G4) a lo largo del perfil sur. Caso spcP3 SW y caso spcP3 SW+LW
Figura 5.11. a) Rebases correspondientes al casos spcP2 SW y b) Rebases correspondientes al casos spcP2 SW+LW

Figura 6.1. Diagrama de metodología para la obtención del SO3	167
Figura 6.2. Localización del nodo con información del sistema operacional NWW3 (punto corojo) y puntos del ROOL (círculos de color negro). Fuente: fotografía tomada de google earth	olor h 168
Figura 6.3. Relación T_{mo2} - T_p con su frecuencia de presentación por diferencias de color (más frecuente y azul menor presentación de ocurrencia), función polinomial de ajuste (línea color rojo) y relación media (línea de color verde)	rojo a de 170
Figura 6.4. RMSE a) H_s , b) T_p y c) <i>dir</i> en aguas profundas entre el sistema operacional NWW la serie de reanálisis GOW2.	/3 y 173
Figura 6.5. RMSE a) H_s , b) T_p y c) <i>dir</i> en Caldera entre el sistema operacional SO3 y la serie reanálisis GOW2.	e de 174
Figura 6.6. RMSE a) H_{LW} y b) T_{mo2LW} en Caldera entre el sistema operacional SO3 y la serie reanálisis GOW2.	e de 175
Figura 6.7. Diagrama de Taylor que muestra la comparación de los criterios estadísticos pronóstico de H_s de 168 horas agrupadas cada 3 horas y cada día, correspondiente a inicialización a) 00z y b) 06z del sistema operacional SO3 y el ROOL como referencia, par período de 2014 -2016.	del a la a el 177
Figura 6.8. Diagrama de Taylor que muestra la comparación de los criterios estadísticos pronóstico de H_s de 168 horas agrupadas cada 3 horas y cada día, correspondiente a inicialización a) 12z y b) 18z del sistema operacional SO3 y el ROOL como referencia, par período de 2014 -2016	del a la a el 179
Figura 6.9. Diagramas de cajas de RMSE asociado a H_s en Caldera para cada inicialización una ventana de tiempo de 72 horas realizado con un período de datos de pronósticos del 201 2016.	, en 4 al 180
Figura 6.10. Diagramas de cajas de RMSE de H_{LW} en Caldera para cada inicialización, en ventana de tiempo de 72 horas realizado con un período de datos de pronósticos del 201-2016.	una 4 al 181
Figura 6.11. Localización del nodo donde evalúa la destreza temporal del SO3 en el corto pla Fuente: fotografía tomada de google earth	azo. 182
Figura 6.12. Series temporales de los pronósticos de SO3 y nodo ROOL en un evento suceo en julio del 2014. a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} y e) T_{m02LW} .	lido 184
Figura 6.13. Series temporales de los pronósticos de SO3 y nodo ROOL en un evento suceo en julio del 2015. a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} y e) T_{m02LW} .	lido 185
Figura 6.14. Series temporales de los pronósticos de SO3 y nodo ROOL en un evento suceo en julio del 2016. a) H_s , b) T_p , c) dir , d) H_{LW} y e) T_{m02LW} .	lido 186
Figura 6.15. Variación espacial y evolución en el tiempo del NRMSE de <i>H</i> _s en el Golfo Nicoya, estimado a partir del SO3.) de 187
Figura 6.16. Variación espacial y evolución en el tiempo del coeficiente de correlación de <i>H</i> el Golfo de Nicoya, estimado a partir del SO3	ls en 188

Figura 6.17. Variación espacial y evolución en el tiempo del NRMSE de H_{LW} en el Golfo de Nicoya, estimado a partir del SO3
Figura 6.18. Variación espacial y evolución en el tiempo del coeficiente de correlación de H_{LW} en el Golfo de Nicoya, estimado a partir del SO3
Figura 6.19. Variación en el Golfo de Nicoya de los criterios estadísticos de calidad de ajuste NRMSE, BIAS y la correlación (filas a, b y c respectivamente), correspondiente a los diferentes parámetros de oleaje y onda infragravitatoria H_s , T_p , dir , H_{LW} y T_{m02LW} (columna 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente), agrupados a 6 días
Figura 6.20. Variación a lo largo del año del RMSE asociado al parámetro H_s para un horizonte de tiempo de 7 días de pronóstico estimado con el registro histórico del SO3 para el período
2014 - 2016

TABLAS

Tabla No. 2.1.	Modelos operacionales de la NOAA
Tabla No. 3.1. obtenidos al comp por el AWAC en	Tiempos de cálculo numérico y errores medios (<i>E</i>) relativo porcentual parar las propagación de oleaje de los 32 estados de mar con los datos medidos Cabo Blanco
Tabla No. 3.2. de las simulacion y AQUADOPP es	Error medio relativo porcentual (E) obtenido al comparar los resultados de H_s es de propagación de oleaje V1, V2 y V3, con los datos medidos por el AWAC n Cabo Blanco y Caldera respectivamente
Tabla No. 4.1. para los sitios de	Resumen de resultados de los diferentes descriptores de calidad de ajuste Cabo Blanco y Caldera durante los años 2014 y 2015 para el parámetro H_s . 131
Tabla No. 4.2. para los sitios de	Resumen de resultados de los diferentes descriptores de calidad de ajuste Cabo Blanco y Caldera durante los años 2014 y 2015 para el parámetro H_{LW} 131
Tabla No. 5.1. perfiles (norte, ce	Experimentos numéricos realizados con el modelo 1D XBeach en los tres entral y sur)
Tabla No. 5.2. (spcP2).	Parámetros de entrada del modelo XBeach. Caso de ejemplo: perfil central

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADCP	Acustic Doppler Current Profilers
AKW	Modelo Alaska
AST	Acoustic Surface Tracking
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CFSRv2	Climate Forecast System Reanalysis Version 2.0
ENSO	El Niño o la Oscilación del Sur
ESTELA	Evaluating the Source and Travel-time of the wave Energy
	reaching a Local Area
FFT	Fast Fourier Transform
GEV	Función Generalizada de Valores Extremos
GDAS	Global Data Assimilation Scheme
GFS	Global Forecast System
GOW2	Base de datos de reanálisis del oleaje a escala global
	realizada
	por IH Cantabria (Global Ocean Waves 2.0)
HIRLAM	Modelo de área limitada de alta resolución para la predicción
	de clima a escala del corto plazo (High Resolution Limited
	Area Model) hirlam.knmi.nl
ICT	Instituto Costarricense de Turismo
IH Cantabria	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria

IMARES	Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios
IMN	Instituto Meteorología Nacional de Costa Rica.
JONSWAP	Forma espectral del oleaje obtenida a partir de una extensa
	campaña de medidas en el mar del Norte entre 1968 y 1969
	(JOint North Sea WAve Project)
LIMF	Laboratorio de Ingeniería Marítima y Fluvial
MaxDiss	Algoritmo de selección basado en la máxima disimilitud
	(maximum dissimilarity)
ММО	Organización Meteorológica Mundial.
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
NAH	Atlántico Norte Huracán
NCEP/NCAR	National Center for Enviromental Prediction-National Center
	for Atmospheric Research
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPH	Pacífico Norte Huracán
NRMSE	Nomalized Root Mean Square
NWS	National Weather Services
NWW3	National Oceanic and Atmospheric Administration
	WaveWatchIII
QQ	Quantile-Quantile.
RANS	Reynolds Average Navier Stokes
RBF	Funciones de base radial (radial basis functions)
RMSE	Root Mean Square Error.
RMSD	Root Mean Square centered
RONMAC	Red de observación del nivel del mar e investigación de
	amenazas costeras
ROOL	Regionalización de Oleaje y Onda Larga

SAPO	Sistema de Predicción de oleaje en las Autoridades Portuarias
SAYOM	Sistema innovador de Ayuda a la planificación, construcción y
	explotación de Obras Marítimas
SI	Scatter Index.
SIWEH	Smoothed Instantaneous Wave Energy History
SLP	Campos de presiones a nivel del mar (Sea Leve/ Pressure)
SO3	Sistema Operacional de Oleaje y Onda larga
SWAN	Modelo de propagación del oleaje desarrollado por Delft
	University (Simulating WAves Nearshore)
UNA	Universidad Nacional
UCR	Universidad de Costa Rica
WAM	Modelo de generación del oleaje desarrollado por un amplio
	grupo de investigadores (grupo WAMDI)
WW3	Modelo de generación de oleaje desarrollado por
	Tolman (1999), WaveWatchIII

LISTA DE SÍMBOLOS

bias	Sesgo
dir	dirección media del estado de mar
Ε	Error relativo porcentual [%]
f	Frecuencia [Hz]
g	Aceleración de la gravedad [m/s2]
h	Profundidad [m]
Н	Altura de ola [m]
H_s	Altura de ola significante
H_{m0}	Altura de ola de momento de orden cero [m]
H_{max}	Altura de ola máxima
$H_{1/N}$	Altura media de las 1/ N mayores olas [m]
$H_{1/10}$	Altura de ola media de las 10 olas mayores
H_{LW}	Altura de momento de orden cero asociado a la banda infragravitatoria
H _{rms}	Altura de ola media cuadrática [m]
K_p	Coeficiente de atenuación
Kr	Coeficiente de refracción
K_s	Coeficiente de asomeramiento
<i>k</i> _m	componente espectral
<i>k</i> _n	componente espectral
m_n	momento de orden n

Q_p	Apuntamiento espectral
S	Espectro de energía [m ² /s]
Т	Período de ola [s]
T_p	Periodo de pico de un estado de mar [s]
T_{m01}	Periodo de la frecuencia media [s]
T_{m02}	Periodo medio [s]
T_z	Periodo medio de pasos ascendentes por cero [s]
<i>T</i> _{<i>H</i>1/3}	Periodo medio condicionado a la altura de ola significante [s]
T_{ij}	Periodo del oleaje asociado a los momentos de orden i y j [s]
<i>T</i> _{1/3}	Periodo significante [s]
T_{m02LW}	Periodo medio asociado a la onda infragravitatoria [s]
T_{pLW}	Período pico asociado a la onda infragravitatoria [s]
γ	Factor de apuntamiento espectral de JONSWAP
σ	Dispersión direccional [°]
η	Superficie libre [m]
ρ	Coeficiente de correlación de la regresión
ν	Anchura espectral de Longuet-Higgins
З	Anchura espectral de Cartwright y Longuet - Higgins
δ	Altura relativa de la onda
μ	Profundidad relativa

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Marco de la tesis

El oleaje es una de las variables geofísicas que definen al clima marítimo. En conjunto con variables meteo-oceánicas como el viento, las corrientes y el nivel del mar, el oleaje presenta un papel fundamental en distintos procesos naturales evidentes en la zona costera, como los procesos de erosión y acumulación litoral, el transporte de nutrientes necesarios para la producción pesquera y cultivo de especies comestibles, la regeneración de sistemas coralinos y el diseño de estructuras artificiales de protección costera y portuaria entre otros. Estos procesos, a su vez, están condicionados por la variación espacio-temporal de las variables meteo-oceánicas.

Por ello, el adecuado conocimiento de las variables que caracterizan el clima marítimo se traduce en el directo aprovechamiento de usos del medio natural costero, tales como: playas de interés turístico, estructuras de protección costera y construcción de zonas de explotación portuaria.

Para comprender el comportamiento dinámico de las variables meteo-oceanográficas, entendiéndose al oleaje como una variable fundamental debido a los efectos directos que induce a lo largo de la costa, es habitual abordar su estudio desde un análisis estadístico que responda a su carácter aleatorio en el espacio y tiempo. De esta forma, para definir adecuadamente el oleaje, se requiere información homogénea en el espacio, continua en el tiempo y cuantitativamente fiable.

Una de las fuentes de datos relacionadas con el oleaje que presenta características continuas e indudablemente fiables, son las series instrumentales de oleaje (medidas in-situ o remotas). No obstante, estas bases de datos no suelen contar con una extensión espacial suficiente, ya que generalmente se conceptualizan en una sola localización representativa de una gran extensión espacial (provenientes de boyas oceánicas), o bien de un carácter discontinuo en el espacio en el caso de las observaciones satelitales.

En consecuencia a lo anteriormente mencionado, las bases de datos de oleaje, obtenidas mediante técnicas de aproximación numérica y/o estadística, han cobrado especial protagonismo a lo largo de las dos últimas décadas.

En la actualidad, dichas bases de datos se pueden encontrar diseminadas en una gran cantidad de puntos espaciales repartidos a lo largo del globo, generadas y distribuidas por distintos agentes públicos, privados y académicos, y abriendo un nuevo abanico de posibilidades para su aprovechamiento en la ingeniería de costas y puertos. Algunas de las organizaciones que tienen disponibles bases de datos de oleaje son la NOAA (National Oceanic and Atmospheric

Administration) y el IH Cantabria. Estas bases de datos consisten en series continuas, homogéneas y de alta fiabilidad que, bajo estrictos protocolos de validación y calibración con datos instrumentales, pueden llegar a aportar datos históricos y horarios que pueden llegar a extenderse varias décadas.

Sin embargo, estas novedosas bases de datos no suelen abarcar las zonas costeras o litorales, en áreas donde el oleaje comienza a experimentar importantes procesos de transformación por efecto de la geometría espacial de fondos marinos, topográficos y batimétricos. Esto suele deberse a las propias limitantes matemáticas de las herramientas numéricas empleadas, generalmente confeccionadas para ser fiables hasta el límite de aguas indefinidas y sin resolver los clásicos procesos de refracción, asomeramiento, difracción y rotura del oleaje en zonas más someras y en la costa. Esta importante limitación espacial suele subsanarse con la transferencia numérica de la información de aguas profundas a la zona costera mediante distintos métodos, inicialmente matemáticos y posteriormente numéricos, que resultan en una base de oleaje análoga a la anteriormente comentada en aguas profundas, pero que integra los procesos de transformación que ha experimentado el oleaje hasta el punto objetivo.

Lamentablemente, esta información histórica asociada al oleaje no suele existir de forma generalizada en el mercado mundial, ya que se obtiene a demanda por diferentes instituciones y empresas, en función de los distintos estudios de ingeniería que la requieran, en zonas espacialmente limitadas y pre-seleccionadas, y/o llegando a ser propiedad de aquellas empresas que las han confeccionado.

El estado del arte presenta estrategias matemáticas y estadísticas, y metodologías numéricas de regionalización que permiten realizar la transferencia de datos de aguas profundas a la costa, también denominado *downscaling* en su término anglosajón (traducido como regionalización), que permiten de forma rápida y precisa la obtención de tan codiciado dato final.

En los últimos años, estas técnicas se han planteado, confeccionado, depurado y difundido predominantemente a través de instituciones académicas en Europa y Estados Unidos, logrando extender las bases de datos a zonas costeras en amplias áreas litorales.

No obstante, muchos países de Latinoamérica no han implementado todavía estas técnicas modernas de *downscaling*. Además suelen recibir este conocimiento con un desfase temporal de algunos años, o no cuentan con datos instrumentales masivos, o su información batimétrica no cuenta con suficiente detalle o actualización, o bien, el conocimiento técnico de estos países es insuficiente para descifrar las estrategias, algoritmos y pormenores de los métodos anteriormente mencionados.

3

CAPÍTULO 1

Sin embargo y en contraste con lo anteriormente mencionado, dichas regiones latinoamericanas se consideran de especial interés a nivel mundial en temas relacionados con la ingeniería de costas y puertos. Sus economías emergentes requieren dar servicio a mercado global para poder establecer estrategias de crecimiento, a través de creación de nuevas infraestructuras de comunicación e intercambio de mercancías por vía marítima, o bien, asegurar la continuidad estructural de las obras ya existentes, mejorar las infraestructuras antiguas y obsoletas, y garantizar los valores turísticos y medio ambientales en costa.

Es necesario, con base en lo anterior, que cada región comience a contar con suficiente libertad técnica y soberanía metodológica, basado en un conocimiento propio y con la capacidad de poder generar sus propios productos meteo-oceanográficos, a la medida de sus necesidades y estrategias ingenieriles.

Es por este motivo que la presente Tesis Doctoral se centra en subsanar esta carencia histórica y proveer este servicio a la costa del Océano Pacífico Latinoamericano, a través de la identificación de innovadoras técnicas matemáticas, estrategias estadísticas, herramientas numéricas y procesos analíticos disponibles en el estado del arte más actual, y adaptando todo ello a la realidad local, bajo las condiciones geográficas, sociales, capacidades técnicas y de información de la zona. Este estudio, por lo tanto, permite entender la generación, propagación e interacción en costa del oleaje aplicado a la zona costera del Océano Pacífico de Costa Rica.

La selección de la zona de estudio responde principalmente a que se trata de una zona compleja que recibe oleajes generados en las proximidades de Nueva Zelanda, lo que supone atravesar más de 9000 km. Durante este viaje, el oleaje se genera, propaga y sobre todo, se agrupa, formando oscilaciones de largo periodo vinculadas a los grupos del oleaje, también conocidas como ondas infragravitatorias asociadas a los grupos de olas.

El oleaje y las ondas infragravitatorias que se aproximan a costa experimentan diferentes procesos de propagación y disipación que, en ocasiones, pueden comprometer conjuntamente la integridad estructural de protecciones artificiales o naturales o intervenir en el carácter funcional de la obra litoral.

El oleaje al aproximarse a la costa se asomera, llegando hasta el límite de la rotura donde se disipa parcial o totalmente, liberando la onda infragravitatoria asociada y generando en consecuencia oscilaciones y sobre-elevaciones cíclicas del mar, también denominadas *surf-beat*.

Este complejo proceso puede llegar a inducir importantes modificaciones en las playas, estructuras y en cualquier elemento adyacente a la costa, bajo la acción de eventos extremos o de temporal, llegando a mover grandes cantidades de sedimento, destruir o dañar estructuras y

4

sobrepasar o inundar zonas protegidas en tierra. Adicionalmente en los puertos, las ondas infragravitatorias están asociadas con episodios de resonancia que derivan en serios problemas de operatividad como la rotura de amarras de los barcos, y movimientos excesivos en las embarcaciones atracadas en los muelles interiores.

La costa del Océano Pacífico de Costa Rica ha experimentado tradicionalmente este tipo de procesos físicos que se traducen en eventos dañinos para la economía nacional, tales como el rebase de oleaje en zonas de especial interés turístico y de comunicaciones, procesos de erosión costera y daños materiales en infraestructuras costeras y portuarias. A modo de ejemplo, el Gobierno de Costa Rica ha destinado en los últimos 5 años, sólo para la reparación del dique principal del puerto comercial más importante del Pacífico, del orden de \$15 millones de dólares y para prevenir la erosión de la ruta de acceso a dicho puerto, la cual discurre paralela a una playa que se ve afectada por eventos de rebase que inundan la ruta y la sacan de operación, del orden de otros \$2 millones dólares (DMP-MOPT, 2016).

En resumen, el presente trabajo se dedica a aglutinar, interpretar y poner en valor las técnicas y metodologías de vanguardia que se encargan de definir las variables meteo-oceanográficas en costa y caracterizar el clima marítimo, a través de una estrategia de *downscaling* híbrido de oleaje y ondas infragravitatorias en la zona costera del Pacífico de Costa Rica, todo ello adaptado a la realidad local. La información que se ha obtenido ha sido explotada en dos productos generales: a) un estudio de rebase en la costa de Caldera, y b) el diseño de un servicio climático operacional. Ejemplos que recoge el presente estudio y que ponen en valor el conocimiento meteo-oceanográfico regional y la importancia de incluir la información infragravitatoria en los procesos de interacción del oleaje con las estructuras costeras.

A continuación y previo a plantear los objetivos de la tesis, se presentan definiciones generales relacionadas con la meteo-oceanografía.

1.1.1 El clima marítimo en ingeniería de costas

El clima marítimo dentro de la ingeniería de costas, se refiere al estudio del conjunto de variables meteo-oceanográficas comprendidas principalmente por el oleaje, corrientes, viento y nivel del mar, para caracterizar una región en particular.

Conocer adecuadamente estas variables aleatorias y entender su estadística general en diferentes escalas temporales y espaciales, es fundamental para abordar los proyectos y así generar obras que sean soluciones fiables, funcionales y operativas.

Las bases de datos de variables meteo-oceanográficas deben ser preferiblemente extensas, espacialmente homogéneas y con una resolución temporal que permita detallar el comportamiento de dichas variables en el corto, medio y largo plazo para su utilización en la ingeniería de costas y puertos. Las bases de datos disponibles que reúnen estas características comentadas son por ejemplo las series de reanálisis (*hindcast*) complementadas con información instrumental de medidas directas o indirectas. Las series de reanálisis se tratan de datos históricos y se circunscriben tradicionalmente a las variables del oleaje, viento y nivel del mar en sus componentes de marea astronómica y meteorológica. Específicamente las series de reanálisis de oleaje, están generalmente representadas por tres parámetros básicos del estado de mar: altura de ola, período y dirección (H, T y dir) y sus derivados estadísticos.

Sin embargo, tanto las series de reanálisis de oleaje como de las otras variables meteooceanográficas, suelen generalmente estar disponibles en aguas profundas y en una escala global o regional. Por lo tanto, la ingeniería de costas y puertos debe recurrir a metodologías matemáticas, estadísticas y numéricas para aumentar la resolución espacial de dicha información y así disponerla en una configuración que responda a sus requerimientos.

1.1.2 Estrategias de regionalización

Las técnicas de regionalización o *downscaling*, son usadas hoy en día de manera común para aumentar la resolución espacial de las variables meteo-oceanográficas.

La ingeniería de costas y puertos tiene, principalmente, su ámbito de acción espacial en la zona que se denomina aguas intermedias o poco profundas, por lo que requiere trasladar las series de reanálisis de las variables meteo-oceanográficas desde escalas globales a escalas de detalle. Por ejemplo, en el caso del oleaje se requiere trasladarlo desde aguas profundas hasta aguas someras, considerando los diferentes procesos de transformación y a su vez aumentando la resolución espacial de la variable, a una escala que permita evaluar la interacción entre ésta y el medio natural y/o artificial adyacente.

La técnica del *downscaling* se puede realizar siguiendo tres metodologías distintas (Camus et al., 2012):

 Downscaling dinámico: Consiste en acoplar modelos numéricos de diferente resolución, por ejemplo uno de escala global con otro de escala regional o detalle, forzados por series consecutivas de datos para dar continuidad al proceso de simulación de la variable. El modelo global genera las condiciones de contorno del modelo regional o de detalle. Este último por contar con una mayor resolución espacial, es capaz de representar de manera más precisa los diferentes procesos físicos que el modelo de escala global no es capaz de simular con una adecuada precisión (Rusu et al., 2008).

El *downscaling* dinámico es un método preciso que puede generar series largas y con una alta resolución espacial y temporal. No obstante, por ejemplo en el caso de la variable del oleaje, presenta ciertos inconvenientes, como que requiere de información batimétrica fiable y de detalle, o que la reconstrucción histórica durante un periodo de al menos 30 años, conlleva un elevado costo de tiempo y computación.

- Downscaling estadístico: consiste en relacionar mediante funciones de transferencia o modelos de regresión, los resultados de las condiciones de la variable meteooceanográfica en una escala global, obtenida a partir de simulaciones numéricas o mediciones instrumentales, con datos medidos con instrumentación localizadas en zonas cercanas a la costa. Estos modelos de regresión estadístico son muy fiables pero limitados espacialmente, debido a que representan solo la localización cubierta por el instrumento (Browne et al., 2007 y Kalra et al., 2005).
- *Downscaling* híbrido: combina las técnicas del *downscaling* dinámico con el estadístico. Consiste en seleccionar ciertos casos representativos de la climatología de toda la serie de reanálisis de la variable meteo-oceanográfica, mediante técnicas matemáticas adecuadas, para trasladarlos desde escalas globales hasta escalas de mayor resolución mediante técnicas de *downscaling* dinámico. Los resultados obtenidos son utilizados para definir una función de transferencia aplicando la técnica del *downscaling* estadístico, que permite trasladar hasta puntos objetivos localizados en la zona comprendida por el modelo de mayor resolución, el resto de la totalidad de los casos de la serie de reanálisis que no fueron seleccionados previamente (Galioskova y Weisse, 2006; Groeneweg et al., 2007; Stansby et al., 2007; Herman et. al., 2009; Camus et al., 2011b).

1.1.3 Onda larga (infragravitatoria)

La superficie del mar, atendiendo al criterio clásico de clasificación en función de su frecuencia o período, se puede definir en diferentes tipos de ondas. La figura 1.1 muestra los diferentes tipos de ondas y los agentes ambientales que las generan.



Figura 1.1. Distribución energética, fuerzas generadoras (en cursiva y color azul) y clasificación de las ondas de superficie en función de la frecuencia o período.

Las ondas de menor período son las capilares con valores menores a 0.1 s. Entre 0.1 a 1 s se agrupan las ondas denominadas de ultra gravedad.

Las ondas de gravedad u oleaje, normalmente están comprendidas en la banda de frecuencias entre 0.5 y 0.04 Hz (períodos entre los 2 y 25 s), presentan longitudes de onda entre 1 a 10^3 m, las fuerza que las genera es el viento y están reguladas por las fuerzas de gravedad y fricción. Estas ondas son las que presentan el mayor contenido de energía, tal y como se muestra en la figura 1.1. Por lo tanto, son las que tienen mayor relevancia en el ámbito de la ingeniería de costas y puertos.

Las ondas con períodos entre los 30 s a 5 min, con longitudes de onda entre 10^3 a 10^5 m, se denominan ondas infragravitatorias, son generadas por el viento y también por el agrupamiento del oleaje que sucede durante el proceso de propagación, son reguladas por la fuerza de gravedad, Coriolis y la fricción. Estas ondas, también presentan un contenido energético importante y están relacionadas con procesos de inundación y transporte de sedimentos en playas, así como eventos de resonancia en puertos.

Entre las ondas de largo período están las que se presentan con períodos superiores a los 5 min, siendo un ejemplo los tsunamis. Otras ondas de largo período son las mareas astronómicas, con períodos entre 12 a 24 hr. Por último, también entre las ondas largas están las transmareales que presentan períodos mayores a 24 hr, siendo un ejemplo la marea meteorológica.

El contenido energético de las ondas es proporcional al cuadrado de la altura de ola (*H*). Con lo cual según la figura 1.1, el oleaje y las ondas infragravitatorias, son variables de relevancia para el ámbito de la ingeniería de costas y puertos. No obstante, tradicionalmente es el oleaje el que ha sido sometido a mayor estudio tanto en su definición, comportamiento y causas en los procesos que interviene. Mientras que las ondas infragravitatorias se han comenzado a estudiar de manera más rigurosa en las últimas cuatro décadas (Bertin y Olabarrieta, 2016; Guza et al., 1984; Masselink, 1995; Baldock y Huntley, 2002; Baldock et al., 2004; Pomeroy et al., 2012), debido a su relación con los cambios morfodinámicos en playas, eventos de inundación y afectaciones en las operaciones de los puertos, entre otros.

Sin embargo, a pesar del conocimiento en cuanto a la forma de generación, comportamiento y las implicaciones que se conocen hoy en día producto de la energía asociada a las ondas infragravitatorias, esta variable no se incluye aún de manera generalizada en los reanálisis tradicionales de variables meteo-oceanográficas. Lo anterior, es debido a los requerimientos computacionales y de tiempo que demandan los modelos numéricos capaces de generarla y que hoy en día lo hace inabordable.

Los trabajos encontrados en la literatura están orientados a la generación de la onda infragravitatoria en la escala global y regional, a partir de la combinación del modelado numérico y formulaciones empíricas (Ardhuin et al., 2014), no así en escalas de detalle y llevadas hasta la costa, a partir de técnicas de regionalización, que es donde su efecto tiene mayores implicaciones para el ámbito de la ingeniería de costas y puertos.

1.1.4 Zona de estudio, Golfo de Nicoya

Costa Rica cuenta con 51000 km² de territorio terrestre, lo que representa apenas un 12% del territorio marítimo de la costa del Pacífico, por lo que definir la dinámica de las variables meteo-oceanográficas es imprescindible para la gestión adecuada de este patrimonio.

Existe un tramo de costa en el litoral del Pacífico de Costa Rica, denominado Golfo de Nicoya que revierte especial importancia para el país debido a las diversas actividades económicas que se realizan a lo largo y ancho del mismo y a la riqueza medio ambiental con la que cuenta. Ver figura 1.2.

El Golfo de Nicoya presenta una entrada de 55 km de ancho, delimitada entre Cabo Blanco y punta Judas. Luego se va estrechando hacia el interior con una dimensión de aproximadamente 15 km. El sector de mayor profundidad presenta magnitudes que no superan los 30 m y corresponden a la entrada del golfo, mientras que las zonas más someras presentan profundidades entre los 5 y 15 m y están vinculadas a los sectores más interiores del golfo.

CAPÍTULO 1

Asimismo, dentro del Golfo de Nicoya existen nueve islas, donde en algunas de ellas se realizan actividades turísticas y en otras como isla Chira, la de mayor extensión, cuenta con 2000 habitantes.

El tramo del litoral del Pacífico de Costa Rica correspondiente al Golfo de Nicoya ha sido seleccionado como zona de estudio modelo, para evaluar la dinámica del oleaje y la onda infragravitatoria, principalmente por las siguientes singularidades:

- Localización con respecto a la hidrodinámica incidente: la entrada al Golfo de Nicoya presenta una orientación noroeste sureste que lo hace estar expuesto de manera directa ante los oleajes reinantes y dominantes que provienen desde el hemisferio sur.
- La información batimétrica y topográfica con la que se cuenta es de las más completas, en comparación con otros sectores de la costa del Pacífico de Costa Rica.
- El Golfo de Nicoya revierte una gran importancia económica para Costa Rica, debido a las diversas actividades que se dan dentro del mismo como son el turismo, pesca artesanal y el comercio internacional que se realiza a través de Puerto Caldera, el cual es el principalmente puerto de la fachada del litoral Pacífico del país.
- Importancia medioambiental: dentro del Golfo de Nicoya existen áreas de manglar que cumplen una función muy importante para la conservación de los recursos naturales y conectividad de la biodiversidad entre zonas terrestres y marinas.
- A través del Golfo de Nicoya y alrededor de éste existen vías de comunicación marítimas y terrestres, que facilitan el acceso a diversos sitios dentro del golfo para la instalación y mantenimiento de los equipos de medición.


Figura 1.2. Zona de estudio. Golfo de Nicoya. Fuente: trabajo propio con Natural Earth Data Este, gráfico vectorial fue creado con Inkscape, CC BY-SA 3.0. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20240274.

En relación con la hidrodinámica, en el pasado, se realizaron mediciones de oleaje por especialistas japoneses, como parte de la información recolectada para el diseño de Puerto Caldera a principios de los años ochenta. Los resultados de las mediciones evidenciaron la presencia de ondas infragravitatorias vinculadas a los grupos de oleaje, estos últimos generados en zonas lejanas que al propagarse hasta incidir en el litoral, les permite desarrollarse y agruparse para generar ondas infragravitatorias que revierten importancia por las magnitudes que pueden presentar (Goda, 1984).

En épocas más recientes se han documentado por medio de vídeo grabado por una cámara instalada en playa Caldera, eventos que rebasan la escollera de protección perimetral en un tramo de la citada playa, afectando las infraestructuras adyacentes. La figura 1.3 muestra una secuencia de imágenes captadas por la cámara de vídeo durante una tormenta sucedida entre el 4 y 5 de julio del 2014, en donde se evidencia el momento cuando se produce el rebase y la inundación que afectó la ruta principal de acceso a Puerto Caldera.

INTRODUCCIÓN



Figura 1.3. Eventos de rebase causado por una tormenta sucedida entre el 4 y 5 de julio del 2014, que produjo la inundación de la ruta principal de acceso a Puerto Caldera. Fuente: MIO-CIMAR.

CAPÍTULO 1

Eventos como los mostrados en la figura 1.3 en combinación con daños reiterados en el dique principal de Puerto Caldera suceden de manera frecuente, causando daños y por ende impactos en la economía del país. Sumado a lo anterior, Costa Rica es un país cuya economía depende de actividades relacionadas con el mar, como son el turismo de sol y playa, la actividad pesquera artesanal y comercial, la protección medio ambiental de los mares y el comercio internacional a través de sus puertos. Estas actividades representan en conjunto el 20% del Producto Interno Bruto del país, situación que refleja la gran dependencia que tiene Costa Rica con el recurso del mar (Banco Central, 2016).

Lo anterior pone en evidencia la necesidad que cuenta el país en definir las variables meteooceanográficas de manera fiable, para que a través de una buena gestión contribuyan aún más al crecimiento económico del país.

1.2 Oportunidad de la tesis

Se han constatado una serie de trabajos que son novedosos para esta región y a su vez se convierte en una oportunidad para ampliar el conocimiento, en una zona de estudio que carece de información relevante para su desarrollo. Las oportunidades encontradas se han organizado en los siguientes sub apartados.

1.2.1 En cuanto a la necesidad de redes de medida

Para la definición adecuada del clima marítimo de las variables meteo-oceanográficas, en el caso de esta Tesis Doctoral, el oleaje y la onda infragravitatoria, se requieren fuentes de datos fiables tanto medidos in situ por instrumentación, así como también de series histórica de larga duración que se complementen con las mediciones instrumentales.

Costa Rica al no contar con ninguna de las fuentes antes mencionadas, tiene la necesidad de crear información mediante la implementación de una red de medición que se integre con fuentes de datos de reanálisis regionalizadas, para disponerla al servicio de la comunidad técnico científica y de esta manera se contribuya al desarrollo del país y la región.

1.2.2 En cuanto al downscaling de oleaje

Los trabajos de *downscaling* revisados cercanos a estas latitudes se refieren principalmente a la aplicación del *downscaling* estadístico del oleaje. Sin embargo, esta metodología tiene limitaciones que se comentaron previamente en el apartado 1.1.2.

Se considera necesario aplicar los métodos de vanguardia del estado del arte más actual del *downscaling* híbrido e incorporarlos en una única metodología que integre todo el proceso que se debe de seguir y adaptado a las particularidades de la zona de estudio, para definir la regionalización del oleaje. Esta información se valida con los datos medidos in situ por la red de instrumentación.

Asimismo, se cree oportuno implementar una técnica de bajo coste computacional para generar la onda infragravitatoria, a partir de la información del oleaje contenido en las series de reanálisis. De esta manera no sólo se obtiene una regionalización del oleaje, sino que de manera inherente se cuenta con una regionalización de la onda infragravitatoria (producto ROOL).

1.2.3 En cuanto a la reconstrucción climática de la onda infragravitatoria

El contar con una serie de reanálisis de oleaje y onda infragravitatoria con 38 años de información, con resolución temporal horaria y a su vez con un *downscaling* híbrido de dichas variables y de alta resolución dentro del Golfo de Nicoya, permite la reconstrucción de las series de ambas variables en diferentes puntos estratégicamente colocados dentro de la zona de estudio.

Lo anterior, también genera la oportunidad de determinar la climatología en diferentes resoluciones temporales del oleaje y la onda infragravitatoria dentro del Golfo de Nicoya, lo que a su vez permite la explotación de la información para fines ingenieriles.

Por ejemplo las formulaciones actuales para la determinación del rebase consideran para su cálculo como única variable hidrodinámica el oleaje. No obstante, se cree oportuno aprovechar la información de la onda infragravitatoria que se estime por el proceso de regionalización e incorporarla en un modelo de generación y propagación de oleaje y onda larga. De esta manera es posible estimar las diferencias que se derivan al cuantificar el rebase tomando en cuenta la onda infragravitatoria, frente a considerar únicamente el oleaje como tradicionalmente se realiza.

1.2.4 En cuanto al desarrollo de sistemas operacionales

El Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) divulga pronósticos de oleaje a 7 días horizonte, los cuales son generados por la National Weather Services (NWS, por sus siglas en inglés) del gobierno de los Estados Unidos de América. Esta información es representativa de las condiciones del oleaje en aguas profundas y el IMN la distribuye sin indicar la incertidumbre del valor pronosticado.

El contar con un *downscaling* de oleaje y onda infragravitatoria validado, genera la posibilidad de aumentar la resolución espacial de la información de la NWS y de esta manera se puede brindar un pronóstico de las condiciones del oleaje y también de la onda infragravitatoria, en cualquier sitio dentro de la zona de estudio. Esta información permitiría conocer de manera anticipada situaciones de riesgo, contribuyendo a prevenir y/o mitigar efectos como inundaciones, erosiones en playas, delimitar zonas no aptas para el baño en las playas, definir la ruta de navegación más segura, si el puerto podrá operar dentro de los siguientes días y también para operaciones de salvamento marítimo, entre otras aplicaciones.

1.3 Objetivos

Esta tesis tiene como objetivo general definir las variables del oleaje junto con las ondas infragravitatorias que inciden en la costa del Pacífico de Costa Rica, utilizando una campaña de campo inédita, series de reanálisis de oleaje novedosas, técnicas matemáticas y herramientas numéricas recientes, integradas en una sola metodología adaptada a la realidad local. Asimismo, demostrar la importancia de dichas variables en el diseño funcional, a partir de la determinación del rebase e inundación y servicios climáticos asociados al oleaje y las ondas infragravitatorias.

Los objetivos específicos a desarrollar como parte del proceso ejecución de esta tesis son los siguientes:

- Medir el oleaje que incide en el litoral Pacífico de Costa Rica, mediante la implementación de una campaña de campo para la instalación de una red de medición por medio de instrumentación.
- Complementar la serie de reanálisis de oleaje en aguas profundas con información relativa a la onda infragravitatoria, para generar una nueva base de datos con contenido de energía completo, es decir, con la energía del oleaje y de la banda de la baja frecuencia.
- Crear, mediante técnicas de *downscaling*, una base de datos costera con información de oleaje y onda infragravitatoria de alta resolución dentro del Golfo de Nicoya.
- Demostrar la importancia de incorporar el contenido de energía asociado a la baja frecuencia, en cálculos de diseño ingenieril que tradicionalmente se realizan únicamente considerando la energía asociada al oleaje.
- Implementar, dentro del Golfo de Nicoya, un sistema operacional de oleaje y onda infragravitatoria validado, mediante la explotación de la nueva base de datos de alta resolución en el Golfo de Nicoya.

1.4 Organización de la tesis

La presente tesis se ha estructurado en un total de 7 capítulos. En los capítulos 2, 3, 4, 5, y 6 se presentan las aportaciones de esta tesis, a través de los cuales se resuelven las distintas etapas que son esenciales para el cumplimiento del objetivo general de esta investigación.

En el capítulo 1 se establece el marco de la tesis en el que se pone de manifiesto la importancia y necesidad de estudiar la dinámica del oleaje en esta zona de mundo y a una escala de resolución adecuada para conocer sus peculiaridades. Se exponen de manera introductoria conceptos relevantes que se desarrollarán a lo largo de este trabajo de investigación. Finalmente, se plantea el objetivo general de la tesis y los principales objetivos específicos.

En el capítulo 2 se detalla de manera exhaustiva la campaña de campo implementada durante los años 2014 y 2015, la cual es información fundamental para determinar la climatología del oleaje y ondas infragravitatorias que inciden en las costas del litoral Pacífico Costa Rica.

En el capítulo 3 se describe la generación de la base datos de onda infragravitatoria complementaria a la serie de reanálisis de oleaje utilizada, y el proceso de simulación de propagación de ambas variables desde aguas profundas hasta la costa. Se muestra los resultados obtenidos y su validación con los datos instrumentales medidos en campo.

En el capítulo 4 se describe la metodología del *downscaling* híbrido implementada para crear el producto ROOL (Regionalización de Oleaje y Onda Larga) en el Golfo de Nicoya, el cual es una base de datos de alta resolución espacial con información de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria, con una resolución temporal horaria y validada con los datos instrumentales medidos en campo.

En el capítulo 5 se hace un uso aplicado de la base de datos del ROOL, al incorporarla a un modelo de generación y propagación de oleaje y ondas larga, para continuar la propagación hasta la zona de swash de la playa, y así comprobar la importancia de incorporar la energía infragravitatoria en el cálculo de variables de diseño ingenieril.

En el capítulo 6 se describe el prototipo del sistema operacional SO3 (Sistema Operacional de Oleaje y Onda larga) de corto plazo y de alta resolución en el Golfo de Nicoya. Para ello, se ha partido de la metodología desarrollada de *downscaling*, del sistema operacional en aguas abiertas disponible de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés), y se ha calibrado la pericia de las predicciones en función de la inicialización de partida y fecha horizonte de predicción hasta los 7 días.

CAPÍTULO 1

Finalmente, en el capítulo 7 se resumen las contribuciones de esta tesis y se indican las futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2

CAMPAÑAS DE CAMPO Y BASES DE DATOS

2.1 Introducción

En cualquier proyecto o estudio de ingeniería costera o portuaria, es imprescindible contar con datos instrumentales. Estas series de datos tienen la función esencial de reflejar la realidad de los procesos físicos a estudiar y por lo tanto, dan servicio como elemento de contraste o control de cualquier asimilación sintética, matemática o numérica recreada. Los datos procedentes de observaciones pueden clasificarse según su fuente como datos primarios (medición original y de manera directa) o secundarios (información generada por otra fuente indirecta), no obstante en ambos casos siempre aportan rigor y fiabilidad a cualquier investigación.

En muchas regiones oceánicas, como a lo largo de la costa latinoamericana, los datos instrumentales suelen ser escasos, especialmente aquellos que se encargan de medir variables meteo-oceanográficas asociadas al clima marítimo. Costa Rica no es la excepción, con una pobre cobertura instrumental en sus zonas litorales que comprenden los flancos del Caribe y Pacífico.

Pocos son los catálogos instrumentales que se encuentran disponibles en Costa Rica, muchas veces limitados en su alcance temporal y débilmente localizados en puntos espaciales, respondiendo únicamente a necesidades específicas y proyectos concretos.

En razón de lo anterior y como parte fundamental para la realización de esta tesis, uno de los principales puntos de partida fue la planificación de una detallada campaña de campo concebida a la medida de las necesidades de los objetivos planteados. Se trata de una campaña de campo creada para medir el oleaje y las ondas infragravitatorias que inciden en las costas del Pacífico de Costa Rica, en distintos puntos de control y durante un lapso de tiempo suficientemente largo para prever los efectos estacionales de la climatología oceánica.

El trabajo instrumental inicial consistió en la colocación de dos equipos, uno en Cabo Blanco y el otro en la bahía de Caldera (ver figura 1.2). La campaña de medición inició en enero del 2014 y aún al 2016 inclusive se continuaba midiendo. Para esta Tesis se utilizaron datos medidos en los años 2014 y 2015.

Los datos registrados son esenciales para este trabajo de investigación y a su vez es una fuente inédita y de gran valor para el país, que se espera sirva para ser utilizada por otros usuarios en el desarrollo de sus proyectos o investigaciones futuras, debido a su carácter público. La campaña de medición ha sido financiada por la Universidad de Costa Rica y el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

La información instrumental recolectada en estas localizaciones puntuales se complementa con información de fuentes de datos secundarias, pero de reconocida calidad, como son datos de reanálisis (*hindcast*) numérico de diferentes variable geofísicas de clima marítimo (ej. oleaje, viento y marea astronómica).

El presente capítulo describe de manera integrada las bases de datos analizadas durante el desarrollo de esta tesis. En particular, se detalla de manera exhaustiva la campaña de campo realizada en el Golfo de Nicoya, describiendo los registros instrumentales medidos, así como el uso de los datos simulados históricos y su comparación con las medidas observadas. Este proceso es fundamental para determinar y validar la climatología del oleaje y ondas infragravitatorias que inciden en las costas del litoral Pacífico Costa Rica.

Adicionalmente, se ha creído conveniente incluir una descripción general del clima de Costa Rica (ver apartado 2.2) con la finalidad de poner en antecedentes al lector de las particularidades regionales climáticas de la zona de estudio. En el apartado 2.3 se describen las diferentes técnicas de medición y análisis del oleaje; se puntualiza acerca de la ejecución de las campañas de campo implementadas en esta investigación, detallándose los diferentes equipos utilizados, las configuraciones establecidas, los sitios seleccionados para la localización de los dispositivos, y los resultados de cada una de las variables medidas. El apartado 2.4 se dedica a la descripción de las bases de datos históricas utilizadas de manera complementaria para el desarrollo de la investigación y, finalmente, en el apartado 2.5 se incluyen las conclusiones más relevantes a las que se han llegado en este capítulo y que son empleadas como forzamiento de los estudios presentados en los capítulos siguientes.

2.2 Marco Climático.

La franja planetaria entre los paralelos Trópico de Cáncer y Trópico de Capricornio se define como Zona Tropical. La ubicación de Costa Rica en esta región le otorga características tropicales a su entorno ecológico y climático. Este último aspecto, a su vez, es modificado por diferentes factores como la orografía, la influencia oceánica y la circulación general de la atmósfera. Por ello, y principalmente debido a la orientación noroeste-sureste del sistema montañoso y a sus dos tramos costeros orientados al este hacia Caribe y al oeste con el océano Pacífico, Costa Rica se puede regionalizar climáticamente en dos vertientes o regiones: Pacífico y Caribe, cada una de ellas con su propio régimen de precipitación y temperaturas con características particulares de distribución espacial y temporal (Manso et al, 2005).

CAPÍTULO 2

La vertiente del Pacífico se caracteriza por presentar una época seca y una lluviosa bien definidas. La época seca se extiende de diciembre hasta marzo, abril es un mes de transición y el mes más seco y cálido es marzo.

El inicio de la época seca depende de la ubicación latitudinal, comenzando primero en el noroeste de la vertiente y de último en el sureste. La época lluviosa va de mayo hasta octubre, siendo noviembre un mes de transición. Se presenta una disminución relativa de la cantidad de lluvia durante los meses de julio y agosto (veranillo o canícula), cuando se intensifica la fuerza del viento Alisios.

La época de lluvia se inicia geográficamente de manera inversa que la época seca. El sureste es el primer sector en recibir las primeras lluvias del año y el noroeste el último. Los meses más lluviosos son septiembre y octubre debido principalmente a la influencia de los sistemas ciclónicos, los vientos Monzones provenientes del océano Pacífico ecuatorial y las brisas marinas, que son responsables de las lluvias intensas cuando unen su efecto a las barreras orográficas (Muñoz et al, 2002).

El régimen de precipitación de la vertiente del Pacífico, la altura y orientación de las montañas, junto con los vientos predominantes y la influencia del océano, permiten diferenciar tres grandes regiones climáticas frente a la costa del Pacífico de Costa Rica: Pacífico Norte, Central y Sur (IMN, 2008).

Es precisamente en la región del Pacífico Central donde se circunscribe el Golfo de Nicoya, que corresponde con la zona de estudio de este trabajo de investigación y que se muestra su ubicación en la figura 1.2.

En el litoral Pacífico las variaciones del nivel del mar obedecen principalmente a la componente de la marea astronómica, la cual es semidiurna y presenta una carrera de marea del orden de los 3 m. La otra componente relativa a las variaciones del nivel del mar es la marea meteorológica o residuo, sin embargo, por la ubicación geográfica de Costa Rica, específicamente el litoral Pacífico, no presenta variaciones significativas debidos a esta componente (Murillo, 2001).

El oleaje es la variable meteo-oceanográfica que mayor influencia tiene en la costa del Pacífico, debido a su alto nivel de energía y predominancia temporal a lo largo del año. Por lo tanto, su entendimiento para una adecuada gestión del litoral es imprescindible.

El oleaje que incide en las costas del Pacífico presenta ciertas características singulares, entre ellas la más destacada es que se trata de un oleaje tipo *Swell*, cuyas crestas y valles de las ondas están claramente definidos, mostrando una regularidad característica de este tipo de oleaje.

Además, presenta una dirección predominante, períodos del orden de los 15 s o mayores y poca dispersión de energía en diferentes frecuencias. Todas estas características son evidencia de que se trata de un oleaje desarrollado, cuya zona de generación se encuentra a miles de kilómetros, en la cuenca oceánica del Pacífico suroeste próximo a Nueva Zelanda (Goda, 1984).

La figura 2.1 muestra el área de influencia del oleaje que alcanza el Golfo de Nicoya, mediante la representación de la energía y el tiempo de viaje del oleaje con respecto a la ubicación de estudio. Para ello se ha aplicado la metodología ESTELA (Pérez et al., 2014).

En la figura 2.1, también se muestra entre las coordenadas latitud -50° y longitud -170° aproximadamente, la zona de generación del oleaje que incide en las costas del Pacifico de Costa Rica. En ese sector del globo, hemisferio austral, los vientos persistentes del oeste, al no contar con barreras orográficas significativas que causen fricción y su disipación, pueden transferir energía a la superficie libre del océano formando ondas que acumulan energía suficiente sin experimentar pérdidas por efecto de la rotura. Una vez generado el oleaje, se propaga y se agrupa en función de las distintas frecuencias y direcciones de procedencia. Las ondas de menor frecuencia (mayores periodos) avanzan más rápido que las frecuencias más altas (ondas más cortas), lo cual produce un agrupamiento y una repartición de la energía pro bandas de frecuencia hasta llegar a las costas de América, lo cual les puede tomar entre 9 y 12 días (ver figura 2.1).



Figura 2.1. Flujo medio de energía en la costa del Pacífico de Costa Rica desde 1993 hasta el 2012. Las isolíneas de color negro representan los tiempo de viaje del oleaje en alcanzar la costa.

CAPÍTULO 2

Otro aspecto relevante a tener en cuenta es la influencia del archipiélago Galápagos durante la propagación de los *Swells*. Las islas generan una zona de bloqueo y sombra, que da lugar a una variación espacial en las condiciones del oleaje a lo largo del litoral del Pacífico de Costa Rica. El mapa ESTELA de la figura 2.2 muestra que la principal zona de sombra que generan las islas Galápagos se encuentra frente al tramo de costa donde se localiza el Golfo de Nicoya, mientras que al norte y sur este efecto no es tan relevante.



Figura 2.2. Energía media del flujo del oleaje que alcanza el Golfo de Nicoya.

El oleaje que alcanza las costas del Pacífico presenta un comportamiento anual compuesto por dos estaciones bien definidas. La figura 2.3 muestra la variación anual del parámetro de altura de ola significante (H_s) distribuida durante los meses del año. Una estación que se cataloga como de baja energía, con magnitudes de H_s bajas que va desde octubre a marzo y otra de alta energía, con valores de H_s mayores que se da en los meses entre abril y septiembre.

Los meses de baja energía están correlacionados temporalmente con las estaciones de primavera y verano del hemisferio austral, y los meses de alta energía con las estaciones de otoño e invierno del mismo hemisferio. Es claro que los meses cuando se presentan las condiciones más energéticas de oleaje coinciden temporalmente con la estación de invierno en el hemisferio austral. Asimismo, la época de baja energía del oleaje concuerda en el tiempo con los meses de la estación seca y la alta energía del oleaje con los meses de la estación lluviosa.

CAMPAÑA DE CAMPO Y BASES DE DATOS



Figura 2.3. Mapas del parámetro H_s medio distribuida durante los meses del año.

En la figura 2.3, también se observa que el sector más al norte de país presenta, durante los meses de diciembre a marzo, condiciones de oleaje más energéticas que el resto del litoral, esto puede deberse a la presencia de los vientos alisios y a que los oleajes procedentes de la cuenca norte del Pacífico podrían alcanzar el tramo litoral más al norte de Costa Rica. Durante los siguientes meses del año las variaciones espaciales no son significativas.

Los mapas de la H_s media mensual de la figura 2.3 se complementan con el mostrado en la fig. 2.4 (a), correspondiente al mapa de H_s medio estimado a partir de información histórica de los último s 36 años. Se puede observar que el oleaje es bastante homogéneo a lo largo de todo el litoral pacífico, con valores en torno a 1.3 m en aguas abiertas y una reducción en las zonas costeras más protegidas como dentro del Golfo de Nicoya, con valores aproximadamente de 1.1 m. A partir de estos resultados se ha seleccionado una localización central representativa de la región, cuyas coordenadas son 8.5° latitud y -85° longitud. Para esta localización se ha analizado la variabilidad climática entre los años desde 1979 hasta el 2015, ver figura 2.4 (b). Las variaciones son de pequeña magnitud, con valores entre años que no suelen superar el 10% del valor de H_s medio según la figura 2.4 (a).



Figura 2.4. a) Variación temporal anual y espacial de H_s medio entre los años desde 1979 hasta el 2015 frente al litoral Pacífico de Costa Rica y b) serie temporal anual de variaciones H_s entre 1979 y 2015.

En la figura 2.5 se continúa con la descripción del oleaje. Se muestra mediante gráficos de estadística descriptiva la información general de los parámetros de oleaje en un nodo GOW2 (serie de reanálisis de oleaje descrita en el apartado 2.4 de este capítulo), frente a la entrada del Golfo de Nicoya (ver figura 2.23 (b)).

En la figura 2.5 (a) se muestra la variación a lo largo del año de los parámetros de H_s y T_p por medio del gráfico de cajas. Esta distribución coincide con lo mostrado en la figura 2.3, donde se ha descrito que el oleaje está compuesto por dos estaciones bien definidas. Asimismo, se observa que las magnitudes de T_p son del orden de los 15 s pero que puede llegar a presentarse valores superiores a los 20 s.

Las figura 2.5 (b y c) corresponden a las rosas de los parámetros H_s y T_p . Se demuestra que el oleaje que incide en las costas del Pacífico es unimodal, procedente del tercer cuadrante, donde cerca del 90% de la dirección reinante y dominante corresponde al *SSW* y se confirma la poca variabilidad direccional, características del oleaje tipo *Swell*.

La figura 2.5 (d y e) corresponde a los gráficos de densidad de probabilidad y distribución acumulada del parámetro H_s . En ambas gráficas se ha incluido la función log-normal, la cual ajusta el comportamiento de los valores de dicha variable.



Figura 2.5. a) gráfico de cajas de las variables H_s y T_p . Rosas de oleaje b) del parámetro H_s y c) del parámetro T_p , d) histograma de H_s ajustado a la función de densidad lognormal y e) función de distribución acumulada de H_s ajustada a la función log-normal.

Se ha estimado, adicionalmente de manera introductoria el régimen medio y extremal del oleaje en aguas profundas frente a la costa del Pacífico de Costa Rica. El régimen medio y extremal del parámetro H_s se ha ajustado a las funciones log-normal y GEV (Generalizada de Valores Extremos), respectivamente. La figura 2.6 (a) muestra que la magnitud de H_s asociada al 50% y 95% del tiempo es del orden de 1.2 m y la 1.75 m respectivamente. El valor de H_s correspondiente a un período de retorno de 50 años tiene un valor aproximado de 3.9 m, tal y como se muestra en la figura 2.6 (b).



Figura 2.6. Estadística del corto y largo plazo del parámetro H_s frente a la costa del Pacífico de Costa Rica. a) régimen medio de H_s ajustado a la log-normal y b) régimen extremal de H_s ajustado a la función GEV.

2.3 Campaña de campo.

Los datos instrumentales son una valiosa y útil fuente de información para validar la calidad y fiabilidad de las bases de datos simuladas numéricamente. Es por ello que son necesarias para llevar a cabo una adecuada estrategia de regionalización que pretenda trasladar el oleaje desde aguas profundas hasta la zona costera.

La calibración, corrección y validación de las bases de datos de reanálisis de oleaje, es una tarea fundamental e imperativa para poder explotar las bases de datos hacia estudios de análisis de estabilidad de playas, diseño de estructuras costeras y portuarias, estimación de los aspectos funcionales y operativos de las infraestructuras marinas, alimentar los sistemas operativos de pronóstico y, en general, proveer del forzamiento necesario que derivará en productos ingenieriles tangibles en costa.

En razón de lo anterior, se ha llevado a cabo una campaña de campo para implementar una red de medición instrumental para registrar las variables del oleaje y onda infragravitatoria, la cual se describe de manera detallada en el presente capítulo.

Para la medición del oleaje y las ondas infragravitatorias existen diferentes tipos de sistema de medida, a continuación se describen de manera general los utilizados en la campaña de campo realizada para esta investigación.

2.3.1 Teoría sobre las técnicas de medición de oleaje y ondas infragravitatorias

Sensores de presión

Estos sistemas se emplean en instalaciones fijas, sumergidos, puntales y escalares; sin embargo, si se combinan varios sistemas es posible obtener la información direccional del oleaje (Kamphuis, 2002).

La presión ejercida por la columna de agua sobre el sensor es la señal de excitación. El sensor de presión se encuentra dentro de un cuerpo hermético, con conectores que aseguran la entrada/salida de datos y alimentación y está compuesto de las siguientes partes:

- Membrana elástica
- Célula de presión
- Sistema conversor de entrada (puente eléctrico o frecuencímetro, según salida de la célula).
- Acondicionador de señal
- Conversor de señal de salida
- Alimentación y unidad de control
- Circuito de salida

Los sensores registran las variaciones de presión a la cota en que se encuentran instalados, esto implica que existe una función de transferencia entre la oscilación registrada en superficie y la registrada por el equipo. Estos sensores son usualmente empleados en tareas de medición de oleaje y ondas infragravitatorias.

Si la onda en superficie, una vez descompuesta en sus componentes de Fourier, es de la forma:

$$\eta = \sum \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \tag{2.1}$$

Suponiendo válida la aproximación lineal de ondas de pequeña amplitud, en ausencia de corriente, se deduce que la presión viene dada por:

$$p = -\rho gz + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(\kappa x - \sigma t)$$
(2.2)

o lo que es lo mismo,

$$p = -\rho g z + \rho g \eta K_p(z) \tag{2.3}$$

El primer término de la derecha de la ecuación es la presión hidrostática y el segundo la presión dinámica. El K_p el factor de atenuación hidrodinámica, el cual siempre es menor que 1. Con lo cual un método para medir las olas es a partir del registro de las fluctuaciones de presión y luego calcular los desplazamientos de la superficie libre a partir de la ecuación 2.3. Si se conoce la profundidad a la cual es colocado el sensor de presión se puede suprimir del registro la presión hidrostática, por lo que a partir de la presión dinámica se puede estimar el valor de η (superficie libre).

$$\eta = \frac{p_D}{\rho g K_p(-h)} \qquad y \qquad K_p(-h) = \frac{1}{\cosh kh}$$
(2.4)

El factor de atenuación hidrodinámico depende de la frecuencia de las ondas, pudiendo llegar a ser prácticamente cero para valores de período muy pequeños y valores de K_p de 1 para ondas de largo período.

La posibilidad de obtener la direccionalidad del oleaje mediante este tipo de sensores queda contemplada si se emplean un arreglo espacial de ellos, típicamente un pentágono centrado, orientado con una arista aproximadamente perpendicular a la dirección de incidencia prioritaria del oleaje, (Kamphuis, 2002).

Otra posibilidad es integrando en un mismo equipo todo el sistema medidor, el cual se compone por un sensor de presión conjuntamente con un correntímetro de respuesta rápida. En general este sistema que se simboliza y conoce como PUV, debido a que utiliza las tres variables medidas, presión (P) y las dos componentes horizontales de la velocidad orbital generada por el paso de las ondas (U y V). Esta configuración permite estimar la direccionalidad del oleaje mediante un análisis en post- proceso que tiene en cuenta los desfases inherentes a la pareja de datos analizados.

Las variables del flujo oscilatorio que se pueden deducir a partir de los sensores de presión están en función de la configuración de frecuencia del registro del dato. Por ejemplo, sí lo que se requiere es medir el oleaje, el sensor debe ser configurado al menos con un registro de cada 1 Hz durante 17 min, sí lo que se requiere es medir son ondas de largo período tipo la onda infragravitatoria, la frecuencia del registro puede realizarse con una menor resolución, por ejemplo al menos cada 2 s durante 17 min, sí lo que se requiere es medir la onda de marea el equipo se puede configurar para que registre datos al menos cada 5 min durante 12 hr, en caso de ser una marea semidiurna y para que se registre un siclo completo de marea.

Perfiladores Acústicos de Corriente

El sensor es un emisor-receptor de ondas ultrasónicas de haz estrecho colocado en el fondo. La metodología consiste en registrar la diferencia de tiempos entre el impacto lanzado y el recibido reflejado por la superficie. Conocida la temperatura del agua y la salinidad se estima la velocidad del sonido, con lo que se obtiene el registro de la posición instantánea del agua. La intrusión de burbujas o partículas puede producir alteraciones en la medición, por lo que su empleo se limita a oleajes en zonas donde el oleaje no experimenta la rotura por fondo.

La ventaja fundamental de estos sistemas radica en que puede medir simultáneamente la velocidad de la corriente, e incluso el perfil de velocidades en resoluciones entre 0.25 m a 4 m. Para ello, se recogen las señales reflejadas por la propia lámina de agua, estudiando (por el retraso en tiempo entre la emisión y la recepción) la capa de agua que ha reflejado la onda, y por el correntímetro Doppler de la frecuencia, la velocidad media de esa capa. El empleo de 3 ó 4 celdas del emisor-receptor permite obtener la ola en superficie y el perfil de velocidades de la corriente en toda la capa de agua para intervalos prefijados.

Estos equipos se denominan, de manera habitual, como ADCP (Acustic Doppler Current Profilers) o Perfiladores Acústicos de la Corriente.

Boyas inerciales

Las boyas utilizadas para medición de oleaje son elementos flotantes, superficiales, puntuales, dotados de un sistema de sensores que registran los movimientos en los 3 ejes. Según la tecnología empleada los sensores pueden medir:

- Aceleraciones verticales más laterales.
- Aceleración vertical más inclinómetros laterales.
- Desplazamiento en los tres ejes.

La señal proporcionada por el conjunto de sensores es transformada en un vector referido a los ejes geográficos locales (Vertical, N-S y W-E), mediante un compás magnético o un fluxómetro para determinar la dirección magnético terrestre en el punto. El tipo de sensor determina si los datos son escalares o direccionales.

En el cuerpo de la boya se localizan los restantes elementos como podrían ser un acondicionador de seña, unidad de control de la adquisición de datos, unidad de registro, unidad de transmisión de datos, unidad de alimentación (pilas o baterías con placas solares externas), unidad de posicionamiento y unidad de balizamiento (luz y señal radar-activo).

En la actualidad coexisten varios sistemas de medición basados en los diferentes tipos de sensores desarrollados, los cuales están patentados por las propias marcas comerciales que los han diseñado.

2.3.2 Descripción de la campaña de medición.

A continuación se describen los equipos empleados en la campaña de campo, su configuración de medida y la ubicación de cada uno de ellos durante cada una de las campañas de medición. Asimismo, se muestran los resultados de los registros que se obtuvieron durante los años del 2014 y 2015 en un tramo de costa del Pacífico de Costa Rica, por medio de series temporales de parámetros de oleaje como la altura de ola significante, período pico, período medio y dirección media de propagación (H_s , T_p , T_{m02} y *dir* respectivamente).

Adicionalmente, se han incorporando en los gráficos de evolución temporal de las variables mete-oceanográficas medidas por los instrumentos, las fechas asociadas a los eventos de inundación que causaron daños en las costas de la región de estudio.

2.3.2.1 Equipos utilizados en las campañas de campo.

Aquadopp.

El Aquadopp es un correntímetro mono punto de la marca Nortek, se configura para medir olas al mismo tiempo que cuando mide corrientes. El Aquadopp pesa 3.5 kg, su forma es cilíndrica con un diámetro de 7.5 cm y 55 cm de largo; utiliza baterías alcalinas de 100 Wh y 13.5 V, donde la duración depende de configuración de medición elegida y la cantidad de datos registrados. La capacidad de almacenamiento de información del equipo es de 178 MB. Ver figura 2.7.

El Aquadopp calcula el oleaje direccional basándose en la teoría lineal, infiere la altura de ola por medio de la medición de la presión (P) y la dirección del oleaje mediante las velocidades orbitales (U y V). Por esta razón se dice que las olas medidas por el Aquadopp se realizan mediante el método denomino PUV, (NORTEK AS, s.f).



Figura 2.7. Equipo de medición de oleaje, Aquadopp.

El sensor de presión del Aquadopp se ha configurado para tomar datos cada 1 Hz durante aproximadamente 17 minutos, lo que equivale a 1024 datos. Esta medición es representativa de cada 6 horas. No obstante, para las campañas de campo se ha utilizado durante cierto períodos 2 Aquadopps que se configuraron para que midieran de manera desfasada, con lo cual se obtuvieron resultados de estados de mar cada 3 horas.

AWAC.

El AWAC es un perfilador acústico de corrientes y medidor de oleaje direccional mediante el método de seguimiento acústico de la superficie AST (Acoustic Surface Tracking), de la marca NORTEK.

El AWAC es un equipo sólido de 6.1 kg, que cuenta con cuatro haces acústicos, uno vertical y los otros tres en un ángulo de 45°. Tiene forma cilíndrica, el diámetro y la longitud son de aproximadamente 21 cm y 17.5 cm respectivamente; utiliza baterías alcalinas o de litios de 9-18 V, donde la duración depende de configuración de medición elegida y la cantidad de datos registrados. La capacidad de almacenamiento de información del equipo es de 4 GB (NORTEK AS, s.f).

El AWAC mide el oleaje por medio de una detección acústica de la superficie mediante un transductor vertical. Por medio de la función AST se determina el estado de mar y se estiman los parámetros de oleaje basados en el análisis de series temporales, lo que significa que el AWAC puede medir directamente diferentes parámetros como altura de ola máxima del registro, altura de ola media de las 10 olas mayores del registro y período medio de pasos ascendentes por cero (H_{max} , $H_{1/10}$, T_z respectivamente). Por medio de la combinación de la función AST y las medidas de las velocidades orbitales se puede calcular la dirección del oleaje.

La figura 2.8 muestra el AWAC y la base construida para su fijación al fondo marino.



Figura 2.8. AWAC y base de fijación para el fondo marino.

El AWAC se ha configurado para tomar datos cada 2 Hz durante aproximadamente 17 minutos, lo que equivale a 2048 datos. Esta medición es representativa de cada 3 horas, por lo que los estados de mar que se tienen han sido cada 3 horas, con información de los parámetros de oleaje de H_s , T_p , dir entre otros.

Boya inercial.

La boya para medición de oleaje denominada Bares de la marca HCTech, realiza las medidas inerciales mediante un giroscopio de tres ejes, un acelerómetro de tres ejes y un compás también de tres ejes, todos controlados por un microcontrolador de bajo consumo. El equipo posee una memoria interna y a su vez una tarjeta micro SD de 8 Gb, GPS y reloj interno. Los sensores se encuentran dentro de una boya de polietileno rotomoldeado y rellena de espuma de poliuretano de celda cerrada con cúpula de policarbonato. La boya es autónoma, tiene paneles solares de silicio, batería AMG 12 V de alta capacidad. Además posee una linterna autónoma de luces leds de 2 millas náuticas. La comunicación se realiza por medio de señal GPRS vía SMS, por lo que la información se tiene en tiempo real (HCTech, S.f). La figura 2.9 muestra la boya de medición.



Figura 2.9. Boya Bares escalar colocada en puerto Caldera.

La boya se ha configurado para tomar datos durante aproximadamente 17 minutos. Los estados de mar son horarios, con información de los parámetros de oleaje de H_s y T_p entre otros.

Sensores de presión.

El sensor de presión marca Global Water se componen del sensor unido por un cable a la carcasa donde se colocan las baterías y la memoria. El sensor debe estar permanentemente sumergido, utiliza dos baterías alcalinas de 9 V y pesa 0.7 kg, cuenta con una memoria no expandible con una capacidad de registro de 81000 registros, lo que equivale a aproximadamente 1 MB, por lo que la duración de la medición está en función de la configuración que se programe (Global Water, s.f). Ver figura 2.10.



Figura 2.10. sensor de presión.

Los sensores de presión que están dentro Puerto Caldera se han configurado para medir ondas infragravitatorias, tomando datos cada 2 s de manera continua hasta que se complete la memoria, esto equivale a un tiempo de duración de 46 horas aproximadamente.

Cámara de video.

La cámara de vídeo que está colocada en frente de playa Caldera se instaló en el 2013, es análoga, de 700 TVL (líneas de televisión), con función PTZ (*Pan Till Zoom*, por sus siglas en inglés), zoom óptico de 30X, cuenta con IR (infrarrojo) para 50 m, está conectada con fibra óptica y transmite en tiempo real. La cámara graba de manera continúa durante las 24 horas del día y en la dirección que se le asigne. Las grabaciones se almacenan por un período de 30 días. La figura 2.11 muestra el sitio específico en frente de playa Caldera donde está instalada la cámara de vídeo.



Figura 2.11. Cámara de video instalada sobre un poste de alumbrado público frente a un tramo de playa Caldera.

2.3.2.2 Ubicación de los equipos.

La figura 2.12 muestra la ubicación y el nombre de cada uno de los equipos de medición de oleaje que se utilizaron durante las campañas de campo en el 2014 y el 2015, frente a la costa del Pacífico de Costa Rica.



Figura 2.12. Ubicación de los equipos de medición de oleaje en el Golfo de Nicoya. a) localización del AWAC y b) localizan Aquadopp, boya, sensores de presión y cámara de vídeo frente a playa Caldera.

El AWAC se colocó en un sitio llamado Cabo Blanco donde el oleaje incide de manera directa y sin obstrucciones físicas significativas (ver figura 2.12 (a)). El Aquadopp se colocó en bahía Caldera dentro del Golfo de Nicoya y alejado del puerto cuyo nombre es igual al de la bahía, con el propósito de medir las olas antes de que ingresen al puerto y así minimizar la influencia de los contornos y su efecto en las mediciones. Ambos equipos se fondearon a una profundidad de 18 m aproximadamente (ver figura 2.12 (b)).

La boya inercial se colocó en sustitución del Aquadopp y aproximadamente en la misma ubicación que este último. El sensor de presión se colocó dentro de las instalaciones de Puerto Caldera, adosado a los pilotes de un duque de amarre, a un profundidad de aproximadamente 3 m. La cámara de video está colocada en un poste de alumbrado público, frente a la ruta de acceso al puerto. La cámara está situada frente a un tramo de playa que es donde se han registrado eventos de inundación. (ver figura 2.12 (b)).

2.3.3 Estimación de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria de alturas y períodos.

A partir de los datos de presión registrados por los equipos y aplicando el fundamento teórico descrito en el apartado 2.3.1, se puede reconstruir la serie temporal de la superficie libre.

El primer paso consiste en eliminar del registro de presión la variación del nivel de la marea, para ello se estiman polinomios de interpolación de diferentes grados para ajustar la curva de marea en el intervalo de tiempo del registro. En este caso se utilizó un ajuste de quinto grado para la longitud del burst medido. En la figura 2.13 se muestra un registro de presión medido por el Aquadopp junto con el polinomio interpolante que ajusta la marea, la cual presenta una tendencia ascendente de la curva.



Figura 2.13. Registro de presión medido por el Aquadopp y magnitud de la marea.

CAPÍTULO 2

La figura 2.14 muestra a manera de ejemplo, luego de haber filtrado las oscilaciones de la onda larga en el rango de las mareas, la serie temporal de superficie libre de un registro de aproximadamente 17 minutos.



Figura 2.14. Serie temporal de la superficie libre medida durante 17 minutos.

La serie temporal de superficie libre mostrada y que se asume representativa a un estado de mar, se puede analizar en el dominio del tiempo y/o de la frecuencia para calcular los parámetros del oleaje que caracterizan el estado de mar.

2.3.3.1. Análisis en el dominio del tiempo

El análisis de un registro de oleaje a partir de la serie temporal de desplazamientos de la superficie libre, se basa en el análisis de las olas individuales. Para separar las olas de un registro se utilizan diversos métodos, entre los cuales están:

- Pasos ascendentes por cero.
- Pasos descendentes por cero.
- Análisis de crestas.

La figura 2.15 muestra gráficamente la aplicación del análisis en el dominio del tiempo de cada método para determinar los parámetros de oleaje altura y período (H y T) que conforman el estado de mar.



Figura 2.15. Análisis del oleaje en el dominio del tiempo a partir de diversos métodos.

En este trabajo se ha utilizado para separar las olas de un registro y luego determinar los parámetros de oleaje de cada estado de mar, el método de pasos ascendentes por cero (*zero upcrossing*). En este método el período de la ola T es la distancia en el tiempo entre dos pasos consecutivos ascendentes por la línea de cero, y la altura de la ola H es la distancia vertical entre el valor más alto y el más bajo entre ambos pasos ascendentes por cero. Tal y como lo ilustra la figura 2.15 (a).

La distribución de las alturas de ola estimadas por el método de pasos ascendentes por cero, cuando el oleaje es tipo *Swell* y se encuentra en aguas profundas, se pueden representar por la distribución de Rayleigh, lo que permite ciertas relaciones entre parámetros.

Una vez separadas las olas individuales de cada estado de mar y obtenidos los valores de altura y período, se procede al cálculo de los parámetros del estado de mar, siendo los más comunes:

Altura de ola máxima, H_{max} : es la altura de ola correspondiente a la mayor ola que se encuentra en un registro de N olas.

Altura de ola media,
$$H_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$$
(2.5)

Altura de ola significante,
$$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i$$
 (2.6)

Altura de ola media cuadrática,
$$H_{rms} = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}H_i^2\right]^{1/2}$$
 (2.7)

Período máximo, T_{max} : es el período de ola mayor que se encuentra en un registro de N olas.

Período medio de pasos ascendentes por cero,
$$T_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} T_i$$
 (2.8)

Período significante
$$T_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} T_i$$
 (2.9)

donde N es el número de olas del registro.

2.3.3.2. Análisis en el dominio de la frecuencia

La serie temporal de desplazamientos de la superficie libre mostrada en la figura 2.14, se puede considerar como una suma de ondas sinusoidales de distintas frecuencias, amplitudes y fases, a partir de la siguiente expresión que se obtiene de la transformada de Fourier.

$$\eta(t) = \sum_{i}^{n} a_{i} \sin(i2\pi f_{i}t + \sigma_{i})$$
(2.10)

Siendo: $\eta(t)$ el desplazamiento de la superficie libre a lo largo del tiempo, a_i las amplitudes de las ondas, f_i las frecuencias de las ondas, i el número de onda y σ_i las fases de ondas.

Este tipo de análisis, basado en las frecuencias de las olas, se le denomina análisis espectral del oleaje. La función de densidad espectral o espectro del desplazamiento vertical de la superficie libre, se puede estimar mediante diferentes métodos, el más usado es la transformada rápida de Fourier FFT (Fast Fourier Transform), desarrollado por Cooley y Tukey, 1965. El espectro de energía del oleaje muestra cómo se distribuye la energía del oleaje o la variación de la superficie libre en las diferentes frecuencias.

Los métodos de medición basados en la presión no generan información acerca de la dirección de cada componente del oleaje, por lo cual la energía del oleaje se estima sólo a partir de las frecuencias. En caso de contar con información direccional es posible determinar la función de densidad espectral direccional o espectro direccional del oleaje, el cual representa la energía total promediada en el tiempo en cada intervalo de frecuencia y en cada intervalo de dirección. La figura 2.16 muestra el gráfico de la densidad espectral correspondiente a la serie temporal de desplazamientos de la superficie libre previamente mostrada en la figura 2.14.



Figura 2.16. Espectro frecuencial del desplazamiento vertical de la superficie libre

La función de densidad espectral se puede tratar como una distribución estadística, con lo cual es posible derivar una serie de parámetros del oleaje. Alguno de ellos se determinan a partir de los momentos espectrales, m. Se denomina momento de orden n, a la siguiente expresión:

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \tag{2.11}$$

El momento de orden cero, m_0 , representa el área bajo la curva de la densidad espectral.

$$m_0 = \int_0^\infty S(f) df \tag{2.12}$$

Los parámetros más comúnmente utilizados son los siguientes:

Altura de ola de momento de orden cero:
$$H_{m0} = 4.004 \sqrt{m_0}$$
 (2.13)

Período de la frecuencia media:
$$\bar{T} = T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}$$
 (2.14)

Período medio:
$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$
 (2.15)

Frecuencia de pico, f_p : Existen diversas formas de estimar este parámetro. En principio, se define como la frecuencia en la que la densidad espectral es máxima.

Periodo de pico:
$$T_p = \frac{1}{f_p}$$
 (2.16)

dirección media (respecto al norte):
$$dir = \arctan\left[\frac{\iint \sin\theta S_P(f,\theta)dfd\theta}{\iint \cos\theta S_P(f,\theta)dfd\theta}\right]$$
(2.17)

Anchura espectral de (Longuet - Higgins, 1957):
$$\nu^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1$$
 (2.18)

Anchura espectral de (Cartwright y Longuet - Higgins, 1956): $\varepsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}$ (2.19)

Apuntamiento espectral de (Goda, 1974):
$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f S^2(f) df$$
 (2.20)

Algunos de estos parámetros están directamente relacionados con los equivalentes parámetros estadísticos. A continuación se enumeran las relaciones más comunes (OMM, 1998):

$$H_{m0} = 1.05H_s \tag{2.21}$$

$$T_{m02} = T_m \tag{2.22}$$

Si el espectro es de banda estrecha el Hmo coincide con el Hs, Hmo=Hs

2.3.3.3. Teoría sobre medición de ondas infragravitatorias

La instrumentación adecuada para el registro de las ondas infragravitatorias son los sensores de presión, los cuales son capaces de medir todas aquellas variaciones de nivel del mar de largo periodo.

Los diferentes parámetros altura y período de las ondas infragravitatorias, fueron determinados en el dominio de la frecuencia según el planteamiento teórico descrito en el apartado 2.3.3.2, el cual utiliza los registros de presión medidos por el AWAC, el Aquadopp y los sensores de presión.

Las mediciones realizadas por la boya colocada en Caldera no permite estimar el oleaje infragravitatorio, debido a que los acelerómetros utilizados no son capaces de captar las oscilaciones de largo período (HCTech, S.f). No obstante, el registro de la boya tiene redundancia temporal con los datos medidos por el Aquadopp.

La estimación de la onda infragravitatoria se realiza luego de haber aplicado la metodología descrita en el apartado 2.3.1 para determinar la superficie libre. La figura 2.17 muestra el desplazamiento de la superficie libre una vez filtrada la marea y aplicada la función de transformación (ecuación 2.23):

$$\eta = \frac{p_D}{\rho g K_p(-h)} \qquad y \qquad K_p(-h) = \frac{1}{\cosh kh}$$
(2.23)



Figura 2.17. Registro de presión medido por el Aquadopp sin la magnitud de la marea.

Al registro de desplazamiento de la superficie libre se le aplica un filtro ventana con períodos entre los 30 a 600 s, que es la banda de periodos que caracteriza las ondas infragravitatorias, para obtener el desplazamiento de la superficie libre asociada a la onda infragravitatoria. La figura 2.18 muestra ambos desplazamientos correspondientes al mismo estado mar. A la serie temporal de la onda infragravitatoria, posteriormente se analiza en el dominio de la frecuencia, a partir de aplicar la expresión de la transformada de Fourier (ecuación 2.10).



Figura 2.18. Desplazamiento de la superficie libre del oleaje (línea color negro) y la onda infragravitatoria (línea color rojo).

La función de densidad espectral obtenido con el desplazamiento de la superficie libre se estima a partir de la FFT. Por último, los parámetros espectrales para la banda de energía asociada a las ondas infragravitatorias, se obtienen por medio de las siguientes expresiones:

Momento de orden 0,1,2 de la banda del espectro asociado a las ondas infragravitatorias.

$$m_{0LW} = \int_0^{360} \int_{1/25}^{1/200} S(f,\theta) df d\theta$$
 (2.24)

$$m_{1LW} = \int_0^{360} \int_{1/25}^{1/200} f * S(f,\theta) df d\theta$$
(2.25)

$$m_{2LW} = \int_0^{360} \int_{1/25}^{1/200} f^2 * S(f,\theta) df d\theta$$
 (2.26)

Altura de ola de momento de orden cero para la banda de energía asociada a las ondas infragravitatorias:

$$H_{LW} = 4.004 \sqrt{m_{0LW}} \tag{2.27}$$

Período asociado a la frecuencia media de la banda de energía asociada a las ondas infragravitatorias:

$$T_{m01LW} = \frac{m_{1LW}}{m_{0LW}}$$
(2.28)

Período media de la banda de energía asociada a las ondas infragravitatorias:

$$T_{m02LW} = \sqrt{\frac{m_{0LW}}{m_{2LW}}} \tag{2.29}$$

Frecuencia de pico, f_{pLW} : frecuencia en la que la densidad espectral para la banda de energía infragravitatorias es máxima.

Por lo tanto, el periodo de pico para la banda de energía asociada a las ondas infragravitatorias:

$$T_{pLW} = \frac{1}{f_{pLW}} \tag{2.30}$$

2.3.4 Análisis de datos de oleaje para la campaña de campo durante el año 2014.

Los equipos que estuvieron recolectando información durante el año 2014 fueron el AWAC, el Aquadopp y la cámara de vídeo. Se cuenta además con información de prensa que reportó eventos de oleajes, que causaron daños en las costas del litoral Pacífico de Centroamérica, en la semana del 1 al 8 de julio.
El equipo AWAC estuvo colocado primero en Cabo Blanco por un período de aproximadamente 9 meses, tomando la primera medición el 23 de enero del 2014 y finalizando el 28 de octubre del 2014, lo que equivale a 2223 estados de mar 3 horarios. Posteriormente se trasladó a la bahía de Caldera en los meses de noviembre y diciembre, cercano al sitio donde estuvieron colocados los Aquadopps. El traslado se debió a que los Aquadopps presentaron problemas con las baterías, por lo que se tuvo que suspender su operación por un tiempo.

El AWAC durante el tiempo que estuvo colocado en Cabo Blanco midió los parámetros de oleaje, H_{mo} , T_p , T_{m02} y dir.

Los dos Aquadopps estuvieron colocados por un período de aproximadamente 4 meses, tomando la primera medición el 16 de mayo del 2014 y finalizando el 12 de agosto del 2014, lo que equivale a un total de 704 estados de mar 3 horarios. Los Aquadopps durante el tiempo que estuvieron colocados en Caldera midieron los parámetros de oleaje, H_{mo} , T_p , T_{m02} . La dirección del oleaje tenía valores incorrectos debido a que los equipos se volcaron y quedaron en una posición horizontal, por lo que la dirección registrada presentaron valores incorrectos que se tuvieron que desestimar para su explotación en la presente investigación.

Se cuenta, a su vez, con un vídeo grabado por la cámara instalada en un tramo de la playa (ver figura 2.11), que registró un evento de inundación sucedido entre los días 4 y 5 de julio del 2014, que afectó playa Caldera y cierta infraestructura adyacente a la misma

La figura 2.19 muestra la serie temporal de los parámetros de oleaje, H_{mo} , T_p , T_{m02} y dir, medidas por el AWAC y Aquadopp. También se indica el momento correspondiente al vídeo grabado por la cámara durante el año 2014.

La figura 2.19a. muestra la serie temporal de H_{mo} medida en Cabo Blanco y Caldera por los diferentes equipos. La serie de H_{mo} medida en Cabo Blanco es la de mayor duración, los valores de altura medidos durante los primeros tres meses del año fueron los de menor magnitud, con valores alrededor de 1.5 m. A partir del mes de abril los valores de H_{mo} experimentaron un aumento, con magnitudes del orden de los 2 m y se mantuvieron de manera sostenida hasta el mes de octubre, registrándose algunos picos que evidenciaron interesantes eventos de alta energía.

Las alturas de ola medidas en la localización de Caldera coinciden temporalmente con las de Cabo Blanco durante los meses desde mayo - agosto, además ambas muestran la misma evolución temporal, llegando a medir simultáneamente la mayor tormenta del año 2014. Sin embargo, las magnitudes registradas de altura de ola en Caldera son menores a las medidas en Cabo Blanco, en aproximadamente un 50%.

En los meses de noviembre y diciembre se tienen registros de altura de ola en Caldera medidas por el equipo AWAC, los valores medidos en ambos meses son los de menor magnitud durante el año.

El gráfico de T_p para Cabo Blanco y Caldera muestra resultados análogos a lo anteriormente comentado, asemejando sus tendencias de comportamiento y magnitud. Los valores de T_p y T_{m02} registrados en el momento de mayor energía durante el año 2014 fueron aproximadamente de 20 y 15 s respectivamente. Ver figura 2.19 (b y c).

La serie temporal de dirección registrada en la localización de Cabo Blanco, demuestra que el oleaje que incide proviene principalmente del tercer cuadrante, específicamente del *SSW* y *SW*. Ver figura 2.19 (d).

Adicionalmente, en la figura 2.19 se indica la fecha de grabación del vídeo, el cual corresponde con el evento de mayor energía registrado tanto en Cabo Blanco y Caldera.

CAMPAÑA DE CAMPO Y BASES DE DATOS



Figura 2.19. Series temporales de a) H_{mo} , b) T_{p} , c) $T_{m02} y d$) dir para la posición de Cabo Blanco y Caldera durante el año 2014.

2.3.5 Análisis de datos de oleaje para la campaña de campo durante el año 2015.

Los equipos que estuvieron recolectando información durante el año 2015 fueron nuevamente el AWAC y el Aquadopp. Para ese año, adicionalmente, se incorporaron una boya inercial y dos sensores de presión. Estos nuevos equipos fueron colocados dentro y fuera del puerto de Caldera respectivamente.

Los primeros datos del año fueron medidos en la posición en Caldera por el Aquadopp y la boya, ambos comenzaron a medir el 26 de marzo del 2015. El Aquadopp midió por un período de aproximadamente 15 días, para un total de 143 estados de mar; la boya midió, en este período del año por aproximadamente 2 meses, para un total 1488 estados de mar. Posteriormente la boya tuvo problemas técnicos y se tuvo que suspender la campaña de medición, la cual se reanudó hasta octubre del 2015.

El AWAC midió en Cabo Blanco aproximadamente durante 5 meses, tomando la primera medición el 18 de junio del 2015 y finalizando el 19 de noviembre del 2015, lo que equivale a 1232 estados de mar. Se tiene una coincidencia temporal de aproximadamente un mes durante octubre y noviembre del 2015, entre los datos medidos por el AWAC en Cabo Blanco y la boya en Caldera.

Los sensores de presión midieron durante el 2015 de manera intermitente debido a las limitaciones que tienen de memoria, las mediciones se realizaron en febrero, marzo, abril, julio y octubre por un período máximo de 46 horas cada vez que midieron. Por lo tanto, dichas mediciones tienen coincidencia temporal con datos medidos por la Aquadopp, boya y AWAC, en dichos meses.

La figura 2.20 muestra la serie temporal de los parámetros de oleaje, H_{m0} , T_p , T_{m02} y dir, medidas por el Aquadopp, boya, AWAC y el sensor de presión colocado en el dique. Se han omitido para los efectos de la figura los datos del sensor de presión instalado en el puente, debido a que por la correlación temporal con los datos del sensor de presión y la escala del gráfico, no se lograrían apreciar.

La figura 2.20 (a) muestra la serie temporal de H_{m0} medida en Caldera y Cabo Blanco por los diferentes equipos. Los valores de altura medidos tanto por el Aquadopp y la boya son coincidentes en magnitud y presentan un valor promedio de aproximadamente 1 m.

Los valores de H_{m0} medidos en Cabo Blanco presentaron magnitudes alrededor a 1.5 m. Sin embargo, se lograron registrar eventos con H_{m0} particularmente energéticos en los meses de julio, agosto y septiembre. Las alturas de ola medidas por el AWAC en Cabo Blanco y la boya en Caldera en los meses de octubre y noviembre presentan la misma evolución temporal. Las magnitudes de H_{m0} en Caldera son del orden de 1 m mientras que en Cabo Blanco de 1.5 m aproximadamente.

La figura 2.20 (b) muestra el gráfico de T_p en la localización de Caldera generado a partir de las mediciones del Aquadopp y la boya. Ambas mediciones instrumentales son similares en comportamiento y magnitud. Sin embargo, la boya midió períodos picos superiores a los 20 s entre el 29 de abril y el 3 de mayo. Los gráficos de T_p y el T_{m02} que tienen coincidencia temporal entre los datos medidos en Cabo Blanco y Caldera, muestran el mismo comportamiento pero con ciertas diferencias en cuanto a las magnitudes. Ver figuras 2.20 (b y c).

La serie temporal de dirección registrada únicamente en Cabo Blanco muestra resultados similares al 2014, siendo los valores de dirección más frecuentes los provenientes del tercer cuadrante, específicamente la dirección *SSW*. Ver figuras 2.20 (d).

CAPÍTULO 2



Figura 2.20. Series temporales de a) H_{mo} , b) T_{p} , c) $T_{m02LW} y d$ dir para la posición de Cabo Blanco y Caldera durante el año 2015.

2.3.6 Análisis de las ondas infragravitatorias

En este apartado se muestra mediante las figuras 2.21 y 2.22 los resultados de las ondas infragravitatorias estimadas, a partir de las mediciones de oleaje realizadas durante las campañas de campo de los años 2014 y 2015 respectivamente. Se ha incluido de nuevo y a manera de complemento en cada figura, la serie temporal de oleaje para visualizar la correlación entre estos dos tipos de ondas.

Las series temporales de oleaje y onda infragravitatoria de la figura 2.21 muestran la misma tendencia de comportamiento a lo largo del tiempo. Los registros de las ondas infragravitatorias en ambos sitios presentaron magnitudes que variaron entre los 5 y los 50 cm, con un valor promedio durante el año de aproximadamente 8 cm.

Las series temporales de la onda infragravitatorias medidas por el AWAC y los Aquadopp muestran que, para el momento cuando ambos equipos tienen correlación temporal, las magnitudes de H_{LW} siguen el mismo patrón. Cuando el AWAC midió magnitudes de H_{LW} cercanas al promedio, los registros correspondientes de los Aquadopps fueron menores del orden del 10%. Sin embargo, cuando se registró la mayor tormenta en julio del 2014, los valores de H_{LW} medidos por los Aquadopp fueron, en ciertos momentos, mayores que los del AWAC. Ver figura 2.21 (b).

La serie temporal de períodos de pico infragravitatorio T_{LW} medidos tanto por el AWAC como por el Aquadopp muestran una variabilidad que oscila principalmente entre los 30 a 200 s, en algunos casos superando los 200 s y siendo el promedio del orden de 80 s (ver figura 2.21 (c)

Para el año 2015, las serie temporales de ondas infragravitatorias medidas por el Aquadopp, el AWAC y los sensores de presión, siguen el mismo patrón de las series de oleaje registradas por estos mismos equipos, tal y como lo muestra la figura 2.22 (b). Los registros de las ondas infragravitatorias en ambos sitios presentaron magnitudes que variaron entre los 5 y los 30 cm, siendo el valor promedio durante el año de aproximadamente 7.5 cm.

Las mayores magnitudes de H_{LW} fueron medidas por los sensores de presión, los cuales registraron valores cercanos a los 30 cm. Esta magnitud está asociada temporalmente a la mayor tormenta registrada en Caldera durante el 2015 (ver figura 2.22(b)). La serie temporal de períodos picos infragravitatorios medidos tanto por el AWAC como por el Aquadopp muestran una variabilidad similar a la registrada el año anterior. Sin embargo, las magnitudes reportadas por los sensores de presión se distribuyen de una manera más dispersa. Ver figura 2.22 (c).



Figura 2.21. Serie temporal de a) H_{mo} , b) H_{LW} , y c) T_{pLW} durante el año 2014.

CAMPAÑA DE CAMPO Y BASES DE DATOS



Figura 2.22. Serie temporal de a) H_{mo} , b) H_{LW} y c) T_{pLW} durante el año 2015.

2.4 Bases de datos.

Además de los datos medidos durante las campañas de campo, en esta tesis se han utilizado otros datos de variables oceánicas y meteorológicas que proceden de diversas fuentes y que complementan los datos instrumentales. En este apartado se realiza una descripción de cada una de las bases de datos utilizadas.

Las variables principales asociadas al clima marítimo utilizadas en la investigación son los parámetros de oleaje, nivel del mar y viento.

2.4.1 Reanálisis de oleaje GOW2.

Los datos de reanálisis de oleaje oceánico se originan de forzar modelos numéricos mediante campos atmosféricos durante un período de tiempo. La generación de este tipo de información ha mejorado en los últimos años (Susuki et al., 2012, Stopa et al., 2016, Zieguer et al., 2015), al contar con registros de oleaje de varias décadas, que cubren grandes extensiones geográficas y cuya información es homogénea en el tiempo y espacio.

La base de datos de reanálisis de oleaje utilizada en esta tesis se denomina GOW2 (Global Ocean Waves 2.0, Pérez et al, 2017). GOW2 es el último producto de retro-análisis de oleaje desarrollado por IH Cantabria que mejora las versiones preliminares (Reguero et al., 2012), tanto por la actualización en el estado del arte como por la mejora en su resolución espacial. GOW2 es un reanálisis de oleaje generado usando el modelo WW3 (Wavewatch III, Tolman, 2002b) en su versión 4.18. Los campos de viento y de hielo sobre el mar utilizados proceden del reanálisis global CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), iniciativa desarrollada conjuntamente por NCEP-NCAR (National Centers for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research).

El WW3 es un modelo de tercera generación que resuelve la ecuación del balance de la energía y densidad espectral, siendo capaz de simular la generación y propagación del oleaje, usando múltiples dominios anidados que reciben información bilateral entre mallas. El producto GOW2 está compuesto por cuatro mallas regulares, ver figura 2.23 (a). Una malla global de 0.5° latitud x 0.5° longitud; dos malla regionales, una en el Ártico y la otra en la Antártica de 0.25° x 0.5° y una última malla global que cubre las áreas costeras y las islas de 0.25° x 0.25° (ver figura 2.23 (b)).

El reanálisis GOW2 se compone de 38 años de información, iniciando en 1979 y en continua actualización. Cuenta con los parámetros de oleaje con resolución horaria para un total de 323592 estados de mar, lo que genera mucho potencial para la aplicación de estudios en

ingeniería de costas y puertos. La información del GOW2 está validada con 164 boyas a los largo del globo terrestre y 24 años de información provenientes de altímetros de satélites sobre toda la superficie oceánica (Pérez et al., 2017). Los resultados de esta validación indican que la base de datos mejora en calidad con respecto reanálisis anteriores, especialmente en regiones tropicales y para eventos extremos.



Figura 2.23. Mallas del reanálisis GOW2. a) mallas utilizadas en la base de datos global GOW2. El dominio con mayor resolución espacial (0.25°) se muestra en amarillo.b) detalle de la malla costera (puntos rojos) en ambos litorales de Costa Rica. Fuente: (Pérez et al., 2017)

2.4.2 Sistema operacional global de oleaje de la NWW3 de la NOAA

La NOAA cuenta con un sistema operacional de oleaje que está compuesto por un modelo global y cinco regionales. Todos los modelos se basan en la versión 2.22 del WW3 (Tolman, 2002g). La tabla 2.1 resume las principales características de cada uno de ellos.

Nombre	Modelo	tipo	Cobertura y resolución	Resolución
				temporal
Modelo global	NWW3	Global	77°S - 77°N	3600
			1.25°x1°	
Modelo Alaska	AKW	Regional	45°-75°N 160°E-123°W	1800
			0.5°x0.25°	
Noroeste Atlántico	WNA	Regional	0°-50°N 98°-30°W	3600
			0.25°	
Atlántico Norte Huracán	NAH	Regional	0°-50°N 98°-30°W	3600
			0.25°	
Pacífico Noroeste	ENP	Regional	5°-60.25°N 170°-77.5°W	3600
			0.25°	
Pacífico Norte Huracán	NPH	Regional	5°-60.25°N 170°-77.5°W	3600
			0.25°	

Tabla No. 2.1. Modelos operacionales de la NOAA

Los modelos regionales obtienen, de manera horaria y como forzamiento, datos del modelo global. Todos los modelos se inicializan cuatro veces al día (00z, 06z, 12z y 18z). El modelo global cuenta con 180 horas de pronóstico.

Los modelos son forzados con información de viento, diferencias de temperatura de la superficie del océano y concentración de hielo sobre la superficie del mar. En relación con la información de viento, ésta proviene del sistema GDAS (Global Data Assimilation Scheme) y se usa para forzar el sistema de pronóstico GFS (Global Forecast System). Los campos de viento son transformados a una elevación de 10 m sobre la superficie y están disponibles en intervalos de cada 3 horas.

Esta tesis se desarrolla en una región del mundo que sólo está cubierta por la malla del modelo global. Los datos de salida del modelo para cada inialización y cuyo desfase es de 6 horas entre cada una, son los parámetros de oleaje y viento con una ventana temporal de 180 horas de pronóstico y con resolución 3 horaria. La figura 2.24 muestra un mapa del océano Pacífico con el pronóstico H_s y T_p generado por el modelo global durante la inialización 12z del 14 de febrero del 2017, que corresponde al día 16 de febrero del 2017, a las 51 horas luego de haberse inicializado el modelo.

Para esta investigación, específicamente lo que se mostrará en el capítulo 6, se cuenta con la información de los datos operacionales de la NOAA para cada inialización a partir del 2014 y hasta el 2016 inclusive.



Figura 2.24. Mapas de pronóstico de los parámetros de oleaje generados por el modelo operacional de olaje de la NOAA NWW3. a) H_s y b) T_p , Fuente: http://polar.ncep.noaa.gov/waves/viewer.shtml?-multi_1-latest-pacific-tp-

2.4.3 Base de datos del nivel del mar

En Costa Rica la red de mareógrafos es coordinada actualmente por el programa RONMAC (Red de observación del nivel del mar e investigación de amenazas costeras) de la UNA (Universidad Nacional). En la actualidad la red cuenta con tres mareógrafos en funcionamiento. Otra unidad está instalada pero presenta problemas operativos, dos más se compraron pero aún no se han instalado y se tiene programada una compra de tres más a futuro. La figura 2.25 muestra la localización de los mareógrafos antes comentados.

Los equipos de la red actual que están en correcto funcionamiento, el más antiguo es el de Quepos y su instalación data desde 1998. Los otros dos, Limón y Papagayo, son de más reciente instalación, el primero en el año 2000 y el otro en el 2014. Los mareógrafos que se compraron para recambio tienen como fin colocarse en dos sitios, Puntarenas y Golfito, debido a que fue en estos lugares donde se colocaron los primero equipos para medir el nivel del mar en el Pacífico de Costa Rica.

Es precisamente en Puntarenas, ciudad que se localiza aproximadamente 13 km al oeste de Puerto Caldera, donde se colocó por MOPT (Ministerio de Obras Públicas y transportes) y las autoridades del gobierno de los EE.UU, el primer mareógrafo en los años cuarenta.

A partir de las mediciones realizadas a un registro de aproximadamente 40 años, se estimaron mediante un análisis armónico las constantes de marea para dicho sitio. Dichas constantes son las que se utilizan hoy en día para calcular la marea astronómica tanto en el pasado como su pronóstico a futuro, a través del programa TOGA (McPhaden M. J. et al., 1998).



Figura 2.25. Localización de los mareógrafos en Costa Rica. En color verde los que están en funcionamiento actualmente, en color amarillo el que está instalado pero presenta problemas de funcionamiento, color naranja los que se compraron para recambio pero no se han instalado y color rojo se tienen previstos a ser instalados en un futuro.

En el litoral Pacífico las variaciones del nivel del mar obedece principalmente a la componente de la marea astronómica. La otra componente relativa a las variaciones del nivel del mar es la marea meteorológica o residuo. Sin embargo, por la ubicación geográfica de Costa Rica y como las tormentas que suceden en el Pacífico de América y que repercuten en la variación del nivel del mar se dan en latitudes más al norte, el litoral del Pacífico de Costa Rica no presenta variaciones significativas debidos a esta componente, mostrando valores en promedio de 10 cm (Murillo, 2001).

2.4.4 Bases de datos de variables atmosféricas

Las fuentes de datos atmosféricos utilizadas son provenientes del reanálisis global y de alta resolución CFSR (Climate Forecast System Reanalysis, Saha et al., 2010) y la CFSv2 (Climate Forecast System Version 2, Saha et al., 2014), ambas generadas por el NCEP. El reanálisis CFSR abarcó el período desde 1979 hasta marzo del 2011, fue diseñado para proporcionar la mejor estimación del sistema acoplado atmósfera - océano - superficie terrestre - hielo sobre la superficie del mar, a escala global y con un esquema de asimilación avanzado mediante datos de satélite. Los productos atmosféricos, oceanográficos y de la superficie terrestres tienen resolución horaria y espacial 0.3°.

El NCEP, a partir marzo del 2011 pone en operación el reanálisis CFSRv2, el cual se acopló con el reanálisis CFSR (Saha et al., 2010). Uno de los propósitos del CFSRv2 es extender el reanálisis CFSR y aumentar la resolución espacial horizontal, pasando de 0.3° a 0.2° aproximadamente (conservando la resolución temporal horaria).

Esta investigación trabajó con información atmosférica, específicamente datos de viento en superficie horarios procedentes de CFSR y CFSv2, desde enero de 1979 hasta mayo del 2016. La distribución de los puntos de malla sobre agua se muestra en la figura 2.26. La fuente de datos CFSR tiene una menor resolución y sólo presenta dos nodos sobre la superficie marina frente a la entrada al Golfo de Nicoya, mientras que la fuente CFSRv2 al aumentar la resolución espacial contiene información en ese mismo sector y también dentro de la zona de estudio.



Figura 2.26. Localización de los nodos de reanálisis de viento en la zona de estudio, fuentes CFSR (en color azul) y CFSRv2 (en color rosa).

2.5 Conclusiones.

A continuación se resumen las principales conclusiones a las que se ha llegado en este segundo capítulo y que forman parte de las condiciones de partida para el desarrollo técnico de esta investigación.

Se han recolectado las bases de datos necesarias para llevar a cabo los análisis que permiten alcanzar los objetivos planteados en esta tesis. En resumen las bases de datos incluyen: (i) datos instrumentales del oleaje en la zona de estudio, (ii) reconstrucciones históricas de más de 30 años del oleaje y viento generados mediante modelado numérico a escala global, (iii) información de la marea astronómica a partir de constantes armónicas y (iv) datos de oleaje de predicción a corto plazo procedentes de sistemas operacionales dinámicos.

Se constata la singularidad del oleaje que alcanza la zona de estudio objetivo. El oleaje en aguas abiertas está principalmente constituido por oleaje tipo *Swell* y especialmente afectado por una disipación energética debida a las Islas Galápagos.

Se realizaron dos campañas de campo a la medida de los objetivos de esta tesis, una en el año 2014 y otra en el 2015, para instalar un total de cuatro diferentes equipos para medición de oleaje y ondas infragravitatorias, en frente de dos sitios distintos en la costa del Pacífico de Costa Rica denominados Cabo Blanco y Caldera. Durante ambas campañas de campo y en ciertos momentos se lograron medir de manera simultánea, en ambos sitios los parámetros tanto de oleaje como de las ondas infragravitatorias que caracterizan el estado del mar.

Se determinaron, con base en la información medida en campo y a partir del análisis temporal y frecuencial del oleaje, las series temporales de los parámetros de oleaje H_{mo} , T_p , T_{m02} , dir y onda infragravitatoria H_{LW} y T_{pLW} . Se complementaron las mediciones instrumentales con información de vídeo, grabado por una cámara en el momento cuando se produjo un evento de inundación, en cierto sector del litoral del Pacífico de Costa Rica y que a su vez fue documentado con información de la prensa escrita.

Se filtró la señal de onda infragravitatoria medida por cada uno de los equipos que tienen sensor de presión y se determinó que estas siguen el mismo patrón que el oleaje. Esto implica que los valores del oleaje y ondas infragravitatorias muestran una correlación directa y proporcional.

Las magnitudes de H_{LW} medidas, a lo largo de los dos años que duró la campaña de campo, presentó valores generales entre los 5 y 50 cm; registrándose las menores magnitudes entre noviembre y abril, momento del año que corresponden a la época cuando el oleaje es menos energético. Las mayores alturas de H_{LW} se registraron durante los meses entre mayo octubre que es cuando el oleaje es más energético, lo que coincide con el comienzo del invierno en el hemisferio Sur.

Se comprobó al comparar las mediciones de las ondas infragravitatorias registradas en Cabo Blanco y Caldera, que la energía experimenta una disminución entre la entrada al Golfo de Nicoya y en el interior del golfo es del orden del 28% para las ondas infragravitatorias y el 50% aproximadamente para el oleaje. Esto evidencia que los procesos de bloqueo, difracción y disipación de la energía son distintos entre el oleaje y las ondas infragravitatorias.

Con base en los resultados de las mediciones de campo se demuestra que existe una correlación directa entre el oleaje y las ondas infragravitatorias, lo que explica que las segundas sean un sub-producto de las primeras, tal y como lo sugiere la teoría clásica de formación de las ondas largas vinculadas a grupos de oleaje (Longuet - Higgins et al., 1962).

Las ondas infragravitatorias que inciden a las costas del Pacífico Costa Rica se generan, con base en los registros obtenidos en las campañas de medición, a lo largo del viaje que recorre el oleaje desde el hemisferio sur, cercano a Nueva Zelanda, hasta Centroamérica, el cual se va agrupando por la interacción de las componentes individuales, cuyos períodos corresponden a la banda infragravitatoria, comprendida entre los 30 s y 200 s principalmente.

Los datos instrumentales medidos durante los años que duró la campaña de campo son una información inédita y de mucho valor, debido a la extensión y calidad del registro. Esta información ha sido fundamental para validar distintas fases de análisis dentro de esta tesis, como por ejemplo, la calibración de series de datos de reanálisis y validación de procesos de propagación de oleaje.

Se describieron las características más relevantes de las bases de datos climáticas procedentes de modelado numérico, como por ejemplo GOW2, el sistema operacional de pronóstico de oleaje de la NOAA, y los vientos del reanálisis CFSR y CFSRv2, que se utilizan como forzamientos fundamentales para la realización de los siguientes capítulos que conforman esta investigación. En cuanto a los datos del nivel del mar en sus componentes de la marea astronómica y meteorológica, la primera se ha incorporado como parte de los forzamientos del modelado numérico que se detalla en los siguientes capítulos y la segunda se ha desestimado debido a que no presenta variaciones significativas en la zona de estudio (Murillo, 2001; LIMF, 2012).

CAPÍTULO 3

DOWNSCALING DINÁMICO DEL OLEAJE

3.1 Introducción

Las mediciones de campo de variables como el oleaje y las ondas infragravitatorias son comúnmente empleadas como parte de la caracterización del clima marítimo en una localización concreta, sin embargo, su carácter puntual y generalmente de corta duración, hace que su aplicación se vea limitada para contar con un carácter estadístico del clima marítimo adecuado y suficiente para su posterior explotación en cualquier estrategia de obra costera o portuaria.

Como se pudo ver en el capítulo 2, la campaña de campo realizada en el Golfo de Nicoya, se implementó en dos lugares a profundidades no mayores a 20 m, y los registros se circunscribieron a ciertos períodos durante los años 2014 y 2015. Por ello y para poder caracterizar de forma integral toda la zona de estudio, es imperativo complementar esta información con datos de mayor duración y una total extensión espacial provenientes de reanálisis.

EL objetivo de este capítulo es, a partir de la base de datos de oleaje en aguas profundas GOW2, generar una base de datos homogénea y robusta climáticamente y con alta resolución espacial en la costa del Pacífico de Costa Rica. Para llegar a este producto, se requiere seguir un delicado protocolo de tareas técnicas que pasan por una calibración inicial de la base de datos GOW2 con datos instrumentales, su posterior propagación y su ulterior puesta en valor para ser explotada por cualquier proyecto de ingeniería en la zona litoral.

El traslado de la información desde aguas profundas hasta la costa y/o hacia los sitios donde se tiene mediciones de campo, se denomina regionalización o *downscaling*. El método mayoritariamente empleado en relación con esta tarea es el denominado *downscaling* dinámico, el cual consiste en el uso de modelos numéricos que simulan los procesos clásicos de propagación del oleaje, forzados por series consecutivas de oleaje y viento que cubren una determinada ventana de tiempo.

Los modelos numéricos de propagación de oleaje y ondas infragravitatorias tienen la ventaja, si son debidamente calibrados y validados, de aportar información veraz sobre el comportamiento de dichas variables en toda un área geográfica. Estas herramientas, por lo tanto, pueden ser de gran ayuda para lograr una reconstrucción histórica de las variables del oleaje y las ondas infragravitatorias en la costa, mejorando la resolución espacial y proporcionando una resolución temporal continua. Esta información es fundamental para realizar estudios de ingeniería marítima, como estabilidad de playas, o el diseño de estructuras costeras y portuarias, entre otras. La reconstrucción histórica de las variables del oleaje y las ondas infragravitatorias se desarrollará en detalle en el capítulo 4.

Existen diferentes familias de modelos numéricos para simular la propagación del oleaje y las ondas infragravitatorias, cada cual resuelve diferentes procesos físicos mediante la resolución de sus respectivas ecuaciones de gobierno, todo ello condicionado por las características propias de la zona de estudio y los procesos de transformación del oleaje que se requieran representar. Por lo tanto, una selección adecuada del modelo numérico a emplear pasa por el conocimiento en profundad del entorno marino y costero de la zona de estudio.

Adicionalmente, en este capítulo se describe en detalle la generación de la base datos de onda infragravitatoria y el proceso de simulación de propagación de esta variable conjuntamente al oleaje desde la zona exterior del Golfo de Nicoya hasta la costa, para lo cual se parte de la metodología para inferir las componentes infragravitatorias a partir de la información espectral del oleaje (Díaz-Hernández et al., 2015).

Los resultados numéricos que se obtienen en este capítulo, se someten a un exhaustivo proceso de validación con los datos instrumentales registrados, durante la semana del 01 al 08 de julio del 2014, por los equipos instalados en Cabo Blanco y Caldera. Se ha utilizado dicha semana debido a su especial relevancia en relación con el registro, por tratarse de la mayor tormenta anual sucedida en la región.

Este capítulo se estructura de la siguiente manera: el aparatado 3.2 recoge el estado del arte acerca de los modelos espectrales de tercera generación para la propagación del oleaje. El apartado 3.3 se centra en la descripción del modelo numérico de propagación de olaje SWAN (Booij et al., 1999), sus ecuaciones de gobierno y los procesos físicos que resuelve. Posteriormente en el apartado 3.4 se detalla la configuración aplicada al modelo para las simulaciones numéricas. En el apartado 3.5 se procede con el proceso de calibración de los datos de reanálisis de la serie GOW2 utilizados como forzamientos y condiciones de contorno del modelo SWAN. En el aparado 3.6 se presenta el proceso de generación analítica de los paquetes de energía de ondas infragravitatorias, a partir de la información del espectro de oleaje, mediante la técnica expuesta por (Díaz-Hernández et al., 2015; Hasselmann et al., 1962; Okihiro et al., 1992), y para cada estado de mar seleccionado de la serie de reanálisis GOW2. Posteriormente, se continúa con la validación de las propagaciones del espectro completo (energía asociada al oleaje y a las componentes infragravitatorias), a partir de los datos instrumentales medidos en campo (mostrados en el capítulo 2). Finalmente, en el apartado 3.7, se recogen las conclusiones más relevantes derivadas de este capítulo y que establecen el punto de partida de los trabajos desarrollados en los capítulos siguientes.

3.2 Estado del arte en modelos de generación y propagación del oleaje

La evolución del estudio de las ondas de gravedad con períodos entre los 2 y 30 s aproximadamente, comenzó en el siglo XIX (Airy, 1845; Stokes, 1847 y Korteweg y the Vries, 1895). Estos primeros estudios se centraron en las propiedades del flujo oscilatorio basándose en la teoría clásica de ondas.

En la segunda mitad de ese siglo XIX se abordó la propagación de ondas asociadas al oleaje (originalmente conceptualizadas como ondas senoidales del fenómeno oscilatorio), su generación por viento, propiedades no lineales, procesos de disipación y su descripción estadística.

La descripción estadística del oleaje junto con la descripción paramétrica de la superficie del mar (Sverdrup y Munk, 1947) y la descripción espectral-energética a través de la introducción del concepto de espectro de oleaje (Pierson, 1955), fue un avance clave en el proceso de la formulación de modelos espectrales.

La necesidad imperiosa de estimar el oleaje para las operaciones militares de desembarco en Normandía en la II guerra Mundial, hizo necesario formular los primeros modelos empíricos de generación de oleaje, los cuales se basaron en la descripción paramétrica de la superficie del mar con leyes empíricas para caracterizar el mar de viento (*Sea*) y el mar de fondo (*Swell*).

La aparición de los ordenadores en los años 50 y la introducción del concepto del espectro de oleaje (Pierson, 1955), permitió la descripción energética de las ondas de diferentes períodos y direcciones a través de una función bidimensional de densidad de energía del oleaje $E(f,\theta)$. Esto hizo posible crear la ecuación del balance de energía o transporte de energía que representa la evolución en el tiempo y en el espacio del espectro del oleaje.

$$\frac{\partial E(f,\theta)}{\partial t} = S \tag{3.1}$$

donde:

 $\frac{\partial E}{\partial t}$: Evolución local del espectro en el tiempo y espacio.

S: Suma de todas las fuentes o sumideros de energía.

Este es un tipo de modelo espectral de oleaje donde la variable a predecir en la ecuación 3.1 es el espectro de energía. Estos modelos no proporcionan información sobre la elevación de la superficie libre temporal y espacial, con lo cual se pierde la información de la fase del oleaje.

La primera ecuación del balance de energía se construye utilizando una relación empírica para los términos fuente (Gelci et al., 1956 y 1957). Luego se elabora una teoría para la generación del oleaje (Phillips y Miles, 1957) y se corrige a partir de mediciones en mar abierto (Snyder y Cox, 1966).

Estas primeras aproximaciones se enmarcan dentro de los denominados modelos espectrales de primera generación, los cuales correspondían de manera práctica a la resolución a través de medios computacionales de ecuaciones empíricas, susceptibles de ser evaluadas manualmente, solo que con mayor rapidez y fiabilidad. No obstante, el proceso de interacción entre componentes del oleaje no se tenían en cuenta, esto significa que en los modelos de primera generación, cada componente espectral crece y evoluciona de forma esencialmente independiente de las otras componentes. Entre los modelos de primera generación se destacan el VENICE (Cavaleri y Rizzoli, 1981) y el MRI (SWAMP Group, 1985).

Los modelos espectrales de segunda generación tratan de remediar la deficiencia del intercambio no lineal de energía entre las componentes del espectro, mediante parametrizaciones (Young, 1988) o el desarrollo de métodos numéricos (Hasselmann, 1962, 1973, 1981). Los modelos de segunda generación se pueden clasificar en modelos espectrales discretos, paramétricos e híbridos; sin embargo, todos al compararlos sufren de limitaciones en la parametrización de la transferencia no lineal de energía (SWAMP, 1985). Entre los modelos de segunda generación se destaca el HYPA (Günther et al., 1979).

Los modelos espectrales de tercera generación toman en cuenta la evolución del espectro y los procesos más relevantes como son la generación, interacción entre componentes del espectro de oleaje (Hasselmann et al., 1985) y la disipación (Komen et al., 1984). Sin embargo, existen otros procesos durante la propagación del oleaje como la difracción, el cual necesita para su representación la información de la fase del oleaje, lo cual dificulta su resolución a través los modelos espectrales de generación y propagación del oleaje. Por lo tanto, los modelos espectrales de generación del oleaje presentan grandes ventajas y un amplio abanico de aplicación con ciertas limitaciones conocidas.

En general se puede decir que los modelos espectrales de generación y propagación de oleaje se aplican en zonas oceánicas, en la plataforma continental y zonas locales como playas, estuarios, desembocaduras, canales, lagos, no así en el interior de zonas portuarias donde los procesos de difracción y reflexión del oleaje se imponen al resto de efectos.

Entre los modelos espectrales de tercera generación para generar y propagar oleaje están: el WAM (WANDI group, 1988), el WW3 (Tolman, 1991), PHIDIAS (Van Vledder et al., 1994), el TOMOWAC (Benoit et al., 1996) y el SWAN (Booij et al., 1999).

El modelo SWAN (Simulation Waves Nearshore) es el modelo espectral de generación y propagación de oleaje que se ha especializado en la propagación de oleaje hacia zonas costeras, por lo que es el modelo que se ha empleado en el presente capítulo. En el siguiente sub apartado se realiza una descripción pormenorizada de dicho modelo.

3.3 Modelos de propagación de oleaje

Los diferentes tipos de modelos numéricos existentes dependen de las ecuaciones de gobierno que se utilicen para resolver el problema y del esquema numérico empleado. A su vez, cada modelo presenta limitaciones en los procesos que son capaces de simular.

Los modelos de propagación del oleaje pueden dividirse en dos grandes grupos, modelos que resuelven la fase y los modelos que promedian la fase. Los modelos que resuelven la fase se basan en las ecuaciones de conservación de masa y la cantidad de movimiento, son dependientes del tiempo e integrados en vertical. Los modelos de fase promediada, como los modelos espectrales de generación y propagación del oleaje, se basan en la ecuación de balance de energía espectral o de transporte de energía, se pueden emplear en áreas extensas porque no necesitan una resolución espacial exhaustiva.

Los modelos de propagación que resuelven la fase pueden diferenciarse en dos grandes grupos: modelos basados en la simulación de flujos en superficie, y los modelos basados en la teoría de propagación de ondas. Los primeros resuelven mediante ciertas simplificaciones las ecuaciones de Navier-Stokes o las ecuaciones de Boussinesq, las cuales resuelven procesos físicos de manera adecuada como la interacción oleaje estructura, el modelado de la rotura, la agitación en puertos y la hidrodinámica en la zona de rompientes, entre otros, pero su complejidad y coste computacional es demandante. Los modelos basados en la teoría de propagación de ondas, como el que resuelve la ecuación de la pendiente suave (*mild-slope*), imponen hipótesis más restrictivas pero se reduce su coste computacional, con lo cual continúan prevaleciendo en la actualidad para propagar ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas en zonas extensas (Liu y Losada, 2002).

Los modelos basados en la ecuación de la pendiente suave en su aproximación parabólica son modelos débilmente no lineales de refracción - difracción, consideran la disipación por rotura y por fricción con el fondo. La restricción más importante, debido a su carácter parabólico, es que supone una dirección principal de propagación, con unos límites en el ángulo de propagación de

 \pm 60°, por tanto no tiene en cuenta la reflexión. Este tipo de modelos tampoco considera la generación del oleaje por viento en el dominio de cálculo.

Por otro lado modelos que trabajan con la ecuación del balance de energía, como el modelo SWAN, no imponen ninguna restricción en la dirección de propagación del oleaje, son capaces de generar oleaje local por viento, permiten definir condiciones de contorno del oleaje variables en el espacio, e incorporan interacciones no lineales entre componentes del oleaje (triadas y cuádruples). La limitación más importante de este tipo de modelos es que no son capaces de modelar adecuadamente la difracción, por lo que tratan de simular mediante difusión numérica o mediante la incorporación de la tasa de giro direccional inducida por la difracción, además de ser incapaces de resolver la reflexión del oleaje en forma adecuada.

Modelo de generación y propagación de oleaje, SWAN

El modelo de propagación SWAN (Booij et al., 1999) desarrollado por Delft University of Technology, es denominado un modelo espectral de tercera generación; fue programado para simular el oleaje generado por viento y propagado a una escala regional, para propagarlo desde aguas intermedias hasta la costa.

El modelo SWAN utiliza la acción del oleaje para describir el espectro, (Holthuijsen, 2007). La relación entre la acción del oleaje y la energía se describe de la siguiente manera:

$$A(f,\theta) = \frac{E(f,\theta)}{f}$$
(3.2)

donde $A(f, \theta)$ y $E(f, \theta)$ son la densidad de acción y energía del oleaje respectivamente en función de la frecuencia relativa y la dirección del oleaje. El modelo SWAN describe la evolución espacial y temporal del espectro mediante la ecuación del balance de energía del oleaje. La expresión matemática de la ecuación en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_f A}{\partial f} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = \frac{S}{f}$$
(3.3)

donde c_x y c_y son las velocidades de propagación en el espacio geográfico, c_f y c_{θ} en el espacio espectral. El primer término del lado izquierdo de la ecuación (3.3) representa el cambio de la densidad de la acción del oleaje con respecto al tiempo; el segundo y tercer término siguiente representan la propagación de la densidad de acción del oleaje en el espacio geográfico, y el cuarto y quinto término del lado izquierdo de la ecuación corresponden a la propagación de la densidad de acción del oleaje en el espacio espectral. El término del lado derecho de la ecuación (3.3) es la suma de los términos fuente, representados por los forzamientos del viento, la

CAPÍTULO 3

disipación por *white-capping*, la fricción del fondo, la rotura del oleaje y la transferencia de energía entre componentes del oleaje.

La interacción no lineal entre componentes del oleaje puede tener efectos significativos en la evolución del espectro. En profundidades indefinidas, los cuádruples tienen relevancia debido a que transfieren, débilmente, la energía entre la componente del oleaje con la frecuencia pico hacia las bajas frecuencias, este proceso también se realiza de la frecuencia pico hacia las altas frecuencias siguiendo la aproximación de Hasselmann et al., 1985. Sin embargo, la energía en las altas frecuencias suele ser disipada por medio del *white-capping*.

En aguas poco profundas, las triadas tienen efecto en el espectro del oleaje al transferir energía desde las bajas frecuencia hacia las altas frecuencias, lo que puede causar la aparición superarmónicos. Este proceso se realiza mediante la aproximación de Eldeberk et al., 1995 y Eldeberk, 1996.

El modelo SWAN genera el oleaje a partir de la transferencia de energía del viento hacia la superficie libre siguiendo los mecanismos descritos y acoplados en (Phillips, 1957 y Miles, 1957), lo cual realiza mediante la siguiente ecuación:

$$S_m(f,\theta) = A + BE(f,\theta) \tag{3.4}$$

La expresión para *B* es estimada según Janssen (1991):

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{w_*}{c_{ph}}\right)^2 max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2$$
(3.5)

Las variables β es una constante, ρ_a y ρ w son la densidad del aire y el agua respectivamente; c_{ph} es la fase del oleaje, θ es la dirección del viento; el término A es descrito por (Cavaleri et al., 1981) y se utiliza únicamente cuando se genera el oleaje.

El modelo SWAN resuelve los procesos de disipación de energía en aguas profundas siguiendo la teoría de (Hasselman, 1974) y en aguas poco profundas, cuando la fricción con el fondo es importante, mediante cualquiera de los métodos de (Hasselmann, 1973), (Collins, 1972) o (Madsen et al., 1988), los cuales se diferencian en la forma de estimar el coeficiente de fricción. Asimismo, cuando el oleaje se propaga hacia la costa y la altura de la ola se incrementa por efecto del asomeramiento, el modelo SWAN trata este proceso de disipación de energía por medio de la rotura del oleaje siguiendo la teoría de (Battjes, 1978 y Eldeberky, 1996).

3.4 Configuración del modelo SWAN de propagación de oleaje

El modelo SWAN en su versión 41.01 resuelve la ecuación de gobierno mediante un esquema de diferencias finitas. En este trabajo se crea un modelo 2D utilizando dos mallas de cálculo numérico anidadas. Se parte de una primera malla general de menor resolución pero mayor extensión y otra de detalle con mayor resolución pero con un área de trabajo menor, con tamaños de celda Δx y Δy constantes para ambos dominios en las direcciones x y y respectivamente. La figura 3.1 (a) muestra la batimétrica del Golfo de Nicoya y las figuras 3.1 (b) y (c) el dominio computacional de cada una de las dos mallas sobre dicho contorno. El total de nodos para la malla de general y de detalle en las direcciones x y y son de 435 x 436 y de 431 x 407 respectivamente.



Figura 3.1. a) Batimetría general de la zona de estudio y mallas de cálculo. (b) general con tamaño de celda $\Delta x = \Delta y = 180$ m y (c) detalle con tamaño de celda $\Delta x = \Delta y = 15$ m.

El modelo se ha configurado a partir de múltiples pruebas preliminares de simulaciones numéricas cuyos resultados se han corroborado para definir la configuración más eficiente. El modelo se ha forzado, como parte de las pruebas realizadas, con los espectros direccionales medidos por el AWAC en Cabo Blanco y trasladados hasta aguas profundas en el contorno de la malla de cálculo y también con los parámetros de oleaje de la serie de reanálisis GOW2, cuyos nodos o puntos son los que se muestran en la figura 3.2 (a), cuya información se ha descrito en el capítulo 2. Se incluye en la misma figura la ubicación del AWAC, el cual está muy cercano a la ubicación de los nodos del GOW2, y el contorno de la malla general de cálculo como referencia.

La figura 3.2 (b) muestra los nodos de reanálisis de campos de viento de las dos fuentes CFSR y CFSRv2 descritas en el capítulo 2. Ambas fuentes contienen datos horarios de viento a 10 m de altura, con la componente zonal y meridional: U_GRD_L103 y V_GRD_L103. Los datos de reanálisis CFSR están disponibles solo hasta el año 2010, con una resolución espacial de 0.3°. A partir del 2010 los datos se continuaron mediante la serie CFSRv2 cuya resolución espacial horizontal es de 0.2°. Se muestra también, en la misma figura 3.3 el contorno de la malla general de cálculo utilizada en la propagación del oleaje, el cual en su contorno sur coincide con los nodos con información de oleaje y los campos de viento.



Figura 3.2. (a) Ubicación de los nodos de reanálisis del GOW2, ubicación del equipo de medición AWAC y contorno de la malla general de cálculo. (b) nodos de reanálisis de campos de viento de la fuente CFSR (puntos de color azul) y CFSRv2 (puntos de color magenta).

CAPÍTULO 3

Otra variable empleada como forzamiento del modelo SWAN es el nivel del mar, asimilado únicamente como la variable marea astronómica, debido a que la marea meteorológica se ha desestimado, en razón de lo indicado en el apartado 2.4.3 del Capítulo 2. La serie de marea astronómica tiene una resolución temporal horaria.

Debido a que el SWAN tiene la capacidad de ser forzado con condiciones variables de oleaje a lo largo de los contornos, se generaron dos puntos adicionales a los mostrado en la figura 3.2(a), con la misma información del punto de reanálisis 3 (punto color negro). Dicho punto es el más cercano al contorno oeste del dominio y además tiene como fin el estabilizar las simulaciones numéricas y mejorar la calidad de los resultados de propagación de oleaje. Esta práctica de añadir puntos es habitual en el uso de la herramienta SWAN, cuando no existe información espacial suficiente para cubrir adecuadamente todos los contornos de entrada de oleaje. Se trata de una estrategia de gran ayuda para la estabilidad y convergencia del modelo. La figura 3.3 muestra el área de estudio junto con el contorno de la malla general de cálculo, los puntos de la serie GOW2 y los dos puntos adicionales.



Figura 3.3. Contorno de malla general de cálculo, puntos de la serie GOW2 y puntos adicionales (color rojo).

Una vez delimitada el área de estudio con sus contornos, establecidos los diferentes forzamientos del modelo y su distribución espacial, se procedió a realizar un catálogo extenso y controlado de ensayos de propagación en modo estacionario y no estacionario, cuyos resultados se compararon con las mediciones instrumentales, con el fin de evaluar la respuesta de la

herramienta numérica, analizar la sensibilidad de los parámetros de entrada y estimar el tipo de forzamiento y propagación más eficiente desde el ámbito computacional.

A continuación se muestra una descripción de dicho proceso de pre-ejecución y pre-validación de la estrategia numérica, que ejemplifica los pasos preparatorios ordenados que se recomiendan seguir para cualquier trabajo de regionalización integral.

Pre - validación de las simulaciones de propagación de oleaje con el modelo SWAN

Una de las pruebas iniciales consistió en forzar el modelo SWAN con los espectros direccionales medidos por el AWAC y trasladados hasta aguas profundas en el contorno de la malla de cálculo. A continuación se describe el procedimiento seguido para trasladar desde Cabo Blanco hasta aguas profundas los espectros medidos por el AWAC:

- a. Se inicia con la selección de ocho estados de mar registrados por el AWAC de manera continua, equivalentes a un día de medición, en época de alta energía.
- b. A estos estados de mar se les relaciona con información de períodos y direcciones, a los cuales se les asigna una altura de ola significante unitaria, la marea correspondiente del día, un parámetro de apuntamiento $\gamma=7$ del espectro JONSWAP (López, 2016) y para el parámetro de dispersión direccional σ se utiliza la información directamente medida por el AWAC. Se utilizaron valores de altura de ola unitarias con el objetivo que los resultados en la localización del AWAC (ver figura 3.2 (a)), correspondan de manera directa a los coeficientes de propagación asociados a los procesos de refracción y asomeramiento principalmente.
- c. Estos estados de mar se repiten y se asignan a cada uno de los 6 nodos que aparecen en la figura 3.3 como forzamientos del modelo numérico SWAN.
- d. Se obtienen los resultados de la propagación en el sitio donde estuvo colocado el AWAC, los cuales corresponden a los coeficientes de propagación desde el contorno de la malla del modelo SWAN hasta el punto en Cabo Blanco.
- e. Los coeficientes de propagación se utilizan para trasladar desde Cabo Blanco hasta el contorno de la malla del modelo SWAN en profundidades indefinidas, las alturas de ola y los espectros direccionales medidos por el AWAC, mediante la ecuación 3.5.

$$H_{0} = \frac{H_{sCB}}{K_{s}K_{r}} = \frac{S(f,\theta)_{CB}}{K_{s}K_{r}} = S(f,\theta)_{0}$$
(3.5)

donde:

 H_0 : altura de ola significante en profundidades indefinidas.

 H_{sCB} : altura de ola significante medida por el AWAC en Cabo Blanco.

 $S(f, \theta)_{CB}$: espectro direccional medido en Cabo Blanco.

 $S(f, \theta)_0$: espectro direccional en profundidades indefinidas.

K_s: coeficiente de propagación relativo al asomeramiento.

 K_r = coeficiente de propagación de oleaje relativo a la refracción.

Una vez que se obtienen los valores de altura de ola significante y sus espectros direccionales en profundidades indefinidas, (H_0) y $S(f, \theta)_0$ respectivamente, se procede a realizar nuevamente la propagación de los estados de mar desde el contorno de la malla del modelo SWAN hasta Cabo Blanco, para comparar los resultados de las simulaciones con los registros instrumentales. Esta vez se ejecutan un total de 32 pruebas de simulación de propagación de oleaje distribuidas de la siguiente forma:

- 8 propagaciones de oleaje forzando el modelo SWAN con parámetros de oleaje y ejecutando el modelo en modo estacionario. Estos casos se denominan PO1.
- 8 propagaciones de oleaje forzando el modelo SWAN con parámetros de oleaje y ejecutando el modelo en modo no estacionario. Estos casos se denominan PO2.
- 8 propagaciones de oleaje forzando el modelo SWAN con los espectros de oleaje medidos por el AWAC, trasladados a aguas profundas y ejecutando el modelo en modo estacionario. Estos casos se denominan SPC1.
- 8 propagaciones de oleaje forzando el modelo SWAN con los espectros de oleaje medidos por el AWAC, trasladados a aguas profundas y ejecutando el modelo en modo no estacionario. Estos casos se denominan SPC2.

La tabla 3.1 resume los resultados en términos de tiempo de cálculo y el error medio relativo porcentual, que se obtiene al comparar los resultados de H_s de las pruebas de simulación de propagación de oleaje realizadas, PO1, PO2, SPC1 y SPC2, con los datos instrumentales.

Tipo de propagación en el	Tiempo de cálculo (hrs)	E (%)
modelo SWAN		
PO1	1.0	0.005
PO2	7.0	0.220
SPC1	2.0	6.5
SPC2	7.0	6.0

Tabla No. 3.1. Tiempos de cálculo numérico y errores medios (E) relativo porcentual obtenidos al comparar las propagación de oleaje de los 32 estados de mar con los datos medidos por el AWAC en Cabo Blanco.

Los resultados de la tabla 3.1 reflejan que las 32 simulaciones que se realizaron, tienen errores promedios menores al 10%, siendo menores al 1% las simulaciones realizadas a partir de forzar el modelo SWAN con los parámetros espectrales de oleaje (casos PO1 y PO2). Los tiempos computacionales mayores ocurren cuando se simulan las propagaciones de oleaje en modo no estacionario (casos PO2 y SPC2), en estos casos una simulación de un estado de mar tiene una duración aproximada de 45 minutos, mientras que la duración de una simulación de propagación de un estado de mar en modo estacionario es de aproximadamente 8 minutos. Los tiempos de cálculo asociados a propagar los casos SPC1, disminuyen en relación con los casos PO2 y SPC2, pero son siempre mayores que los casos PO1.

La combinación de forzar el modelo SWAN con parámetros de oleaje y simular la propagación en modo estacionario es la más eficiente, presentando resultados con errores prácticamente despreciables y tiempos de cálculo computacional de aproximadamente la mitad del tiempo si se compara con los casos SPC1 y 7 veces menos si se compara con los casos PO2 y SPC2.

Estos resultados se considera que serían similares si se utilizan otros estados de mar como forzamientos para realizar las pruebas anteriores, debido a que tal y como se ha demostrado en el capítulo 2, los registros de los estados de mar presentan a lo largo del tiempo poca variabilidad en sus parámetros de alturas, períodos y direcciones. Lo anterior obedece a que las olas que inciden en el litoral Pacífico de Costa Rica, se tratan principalmente de oleajes desarrollados debidos al largo viaje que realizan desde su zona de generación.

Los experimentos numéricos realizados hasta este punto han considerado al oleaje como único forzamiento para el modelo SWAN. No obstante, se cuenta con información del reanálisis de campos de viento global CFSR y CFSRv2. Estas fuentes de datos se han utilizado para ampliar las pruebas de simulación.

CAPÍTULO 3

Se seleccionan nuevamente estados de mar medidos por el AWAC, esta vez distribuidos entre los meses de enero, mayo y julio del 2014, con 64 estados de mar que corresponden a 8 días por cada mes, con lo cual se tiene un total de 192 estados de mar para realizar pruebas de simulación. Se han seleccionado dichos meses para evaluar diferencias entre las épocas de baja energía, transición y alta energía, correspondientes a enero, mayo y julio respectivamente.

La información seleccionada corresponde a los parámetros espectrales de oleaje de los 192 estados de mar, los cuales se complementan con la información de los campos de viento de la fuente CFSRv2 correlacionada en el tiempo. Esta base de datos tiene información distribuida en la zona de estudio, presenta 4 nodos dentro de la malla general de cálculo y 4 nodos en el contorno de ésta, que coinciden aproximadamente con los nodos que tienen información de los parámetros de oleaje (ver figura 3.2 (b)).

La fuente de viento CFSR se truncó en el año 2010 y no tiene coincidencia temporal con los datos medidos durante la campaña de campo. Sin embargo, y en coherencia con uno de los objetivos de esta Tesis de generar una base de datos de oleaje y ondas infragravitatorias de 38 años, se ha estudiado la posibilidad de aprovechar la información de campos de vientos de la fuente CFSR. Para ello se propuso, inicialmente realizar una interpolación del viento en los nodos de la fuente CFSRv2, que colindan en la malla general de cálculo, hacia las localizaciones coincidentes con la fuente CFSR, cuya base de datos se denomina en adelante como CFSRv2bis. La figura 3.4 muestra las dos fuentes de datos de viento utilizadas como complemento de los parámetros espectrales de oleaje para las simulaciones de propagación de oleaje y viento local.



Figura 3.4. Nodos de reanálisis de campos de viento de las fuentes CFSRv2 y CFSRv2bis.

Al contar con dos fuentes de campos de viento, CFSRv2 y CFSRv2bis, se realizaron las simulaciones de propagación de olaje de los 192 estados de mar siguiendo tres diferentes estrategias de aproximación al problema:

- 192 propagaciones de oleaje en modo estacionario distribuidos entre los meses de enero, mayo y julio, con 64 estados de mar cada mes, cuyos forzamientos son sólo los parámetros espectrales de oleaje sin considerar el viento. Estos casos se denominan V1.
- 192 propagaciones de oleaje en modo estacionario distribuidos entre los meses de enero, mayo y julio, con 64 estados de mar cada mes, cuyos forzamientos son los parámetros espectrales de oleaje y los datos de viento de la fuente de datos CFSRv2. Estos casos se denominan V2.
- 192 propagaciones de oleaje en modo estacionario distribuidos entre los meses de enero, mayo y julio, con 64 estados de mar cada mes, cuyos forzamientos son los parámetros espectrales de oleaje y los datos de viento de la fuente de datos CFSRv2bis. Estos casos se denominan V3.

Para cada simulación o experimento se siguió el mismo procedimiento de las pruebas iniciales antes mencionadas, para lo cual se estimó mediante la ecuación 3.5 el cociente del valor medido
entre el resultado de cada propagación en el sitio donde estuvo colocado el AWAC. De esta manera se obtuvo el valor de la altura de ola significante en profundidades indefinidas. Posteriormente se volvieron a realizar las propagaciones de cada estado mar, esta vez con los nuevos valores de H_s calculados por la ecuación 3.5. Los resultados se compararon nuevamente con las mediciones del AWAC y adicionalmente con el AQUADOPP en Cabo Blanco y Caldera respectivamente.

La tabla 3.2 resume los resultados del error medio relativo porcentual, que se obtiene de comparar los resultados de H_s de las propagaciones con los datos instrumentales, de las tres casos simulados V1, V2 y V3.

Tabla No. 3.2.Error medio relativo porcentual (*E*) obtenido al comparar los resultados de H_s de las simulaciones de propagación de oleaje V1, V2 y V3, con los datos medidos por el AWAC y AQUADOPP en Cabo Blanco y Caldera respectivamente.

	Casos V1		Casos V2		Casos V3	
Meses	E (%)		E (%)		<i>E</i> (%)	
	Cabo Blanco	Caldera	Cabo Blanco	Caldera	Cabo Blanco	Caldera
Enero	0.010		1.3		1.4	
Mayo	0.008	25	9.0	48	1.7	31
Julio	0.005	20	0.9	22	0.7	20

Los resultados de la tabla 3.2 muestran que los mayores errores se obtuvieron cuando se realizaron las simulaciones denominadas V2. En los casos simulados denominados V3 y que sólo tiene información de viento en el contorno de la malla general de cálculo, los errores disminuyeron tanto para Cabo Blanco como en Caldera. Sin embargo, los errores menores se obtuvieron para los casos V1, los cuales no incluyen ninguna fuente de información de datos de viento, esto tanto para Cabo Blanco y Caldera.

Los resultados obtenidos demuestran que al incluir la información de viento en las simulaciones de propagación de oleaje los errores aumentan, principalmente cuando se incluyen los nodos que se localizan dentro del dominio de cálculo (casos V2). Cuando se incluye información en el contorno de la malla general (casos V3), los resultados de los errores promedio disminuyen y son similares a los resultados cuando no se incluye del todo la información de viento (casos V1). Esto puede ser causa de la falta de datos de viento de media-alta resolución del reanálisis de los campos de viento de las fuentes utilizadas, los que no se ajusta de manera precisa a lo que sucede en la realidad.

En virtud de lo anterior y con base en los resultados mostrados en la tabla 3.2, se concluye que para las siguientes simulaciones de propagación de oleaje que se han realizado, únicamente se han tomado en cuenta como forzamientos del modelo SWAN los parámetros espectrales del oleaje, los cuales se propagaron siempre en modo estacionario.

3.5 Calibración de la base de datos de reanálisis de la serie GOW2

La serie de reanálisis GOW2 utilizada tiene disponible los parámetros espectrales del oleaje desde febrero de 1979 hasta el mes de diciembre de 2016. Sin embargo, en esta tesis se utilizaron datos hasta diciembre del 2015. Los puntos de reanálisis de la serie GOW2 en este trabajo son los mostrados en la figura 3.2(a).

Las figura 3.5, 3.6 y 3.7 muestran las series temporales de los parámetros espectrales de oleaje H_s , T_{m02} y d*ir* respectivamente, en los cuatro puntos del reanálisis de la serie GOW2 que colindan con el contorno de la malla del modelo SWAN y para el período completo del reanálisis. El comportamiento de cada parámetro en dichos puntos de control a lo largo de tiempo es similar en energía, periodos, direcciones y presentan pocas variaciones espaciales.

La figura 3.5 muestra la serie temporal de H_s en los cuatro puntos del reanálisis de la serie GOW2, donde se puede observar el mismo comportamiento a lo largo del tiempo y magnitudes similares. Los puntos con magnitudes de H_s similares son los puntos 3, 4 y 5, mientras que el 6 presenta magnitudes ligeramente menores.



Figura 3.5. Serie temporal de H_s del reanálisis de la serie GOW2 a) punto 3, b) punto 4, c) punto 5 y d) punto 6.

Las magnitudes y comportamiento de la variable T_{m02} es similar en los cuatro puntos del reanálisis y no se detectan diferencias significativas. El T_{m02} presenta un valor promedio de 8 s aproximadamente a lo largo del tiempo.



Figura 3.6. Serie temporal de T_{m02} del reanálisis de la serie GOW2 a) punto 3, b) punto 4, c) punto 5 y d) punto 6.

En cuanto a las direcciones, éstas también presentan en término medio un mismo patrón y a lo largo del tiempo las olas vienen principalmente desde el tercer cuadrante (*SSW* y *SW*), con magnitudes entre los 180° y 240° . Sin embargo, se destaca cómo los puntos que se encuentran más al oeste, como por ejemplo el punto 3 y 4, presentan una mayor variabilidad en comparación con el punto 6. Lo anterior podría deberse a que el punto 6 por estar más al este, se localiza más en la zona de sombra que generan las Islas Galápagos, razón por la cual tiene menor variabilidad en cuanto a las direcciones y magnitudes menores de H_s .



Figura 3.7. Serie temporal de *dir* del reanálisis de la serie GOW2 a) punto 3, b) punto 4, c) punto 5 y d) punto 6.

La figura 3.8 muestra las series temporales de los mismos parámetros de oleaje pero esta vez sólo los correspondientes al año 2014. La variable H_s presenta prácticamente el mismo comportamiento en cada uno de los cuatro puntos, a excepción de los valores de H_s en el punto 6 que son menores. En relación con las magnitudes de la variable T_{m02} , se demuestra que el punto 6 tiene una mayor variabilidad entre los meses de entre enero y mayo en comparación con los demás puntos. Sin embargo, a partir de ese mes la variabilidad disminuye y las magnitudes de los períodos en los cuatro puntos son similares. En cuanto a la dirección, nuevamente el punto 6 presenta magnitudes de dirección menos variables que en los otros puntos; en el punto 3 las magnitudes de la dirección varían entre los meses de diciembre y febrero, luego de ese período las magnitudes en los nodos 3, 4 y 5 son similares.



Figura 3.8. Serie temporal de a) H_s , b) T_{m02} y c) *dir*, del reanálisis de la serie GOW2 para los puntos 3, 4, 5 y 6 localizados en el contorno como forzamientos del modelo SWAN, durante el año 2014.

Una vez visto el comportamiento de los parámetros de oleaje en los cuatro puntos de reanálisis de la serie GOW2, se procede a comparar estas magnitudes con las mediciones realizadas en Cabo Blanco. Para ello se muestra, a manera de ejemplo, únicamente la comparación con el punto de reanálisis 4 que está frente a la entrada del Golfo de Nicoya y más cercano al sitio donde estuvo localizado el AWAC en Cabo Blanco (ver figura 3.2 (a)). El resto de los puntos, tal y como se ha demostrado anteriormente tienen magnitudes similares al punto 4, por lo que los resultados de las comparaciones son similares y extrapolables al resto de puntos.

La figura 3.9 muestra las series temporales de los parámetros H_s , T_p y *dir* de los datos de reanálisis correspondiente al punto 4 y los datos medidos durante el año 2014 en distintos sitios y por diferentes equipos, específicamente el AWAC y AQUADOPP en Cabo Blanco y Caldera respectivamente. En general, se observa la buena correlación temporal entre ambas bases de datos independiente.

La serie temporal de H_s muestra claramente cómo los valores simulados del reanálisis presentan magnitudes menores a las medidas por el AWAC, pero mayores en algunas ocasiones a las medidas por AQUADOPP. En cuanto a la distribución de los períodos de pico, la figura 3.9 muestra un comportamiento adecuado entre los datos del reanálisis y las mediciones de campo.

Las direcciones simuladas siguen el mismo comportamiento que los datos medidos por el AWAC, las magnitudes de las direcciones entre los meses de mayo a julio presentan valores similares. Sin embargo, durante el resto de los meses, los datos registrados por el AWAC tienen una mayor componente del norte, pero siempre con la misma tendencia de los datos del reanálisis.



Figura 3.9. Series temporales de a) Hs, b) Tp y c) dir, del reanálisis de la serie GOW2 y datos medidos en Cabo Blanco y Caldera.

Los datos medidos por el AWAC y los del reanálisis del punto 4 no coinciden espacialmente, por esta razón se trasladan los datos medidos por el AWAC hasta el punto 4, para lo cual se afectan los datos medidos por el AWAC con un valor constante de *KsKr* de 0.94 que se obtiene a partir del promedio de las propagaciones realizadas en el apartado 3.4, de esta forma se consigue la nueva serie denominada "Cabo Blanco Deep".

La figura 3.10 muestra la comparación en el punto 4 de la serie GOW2 y "Caco Blanco Deep" de H_s en aguas profundas. Se evidencia que ambas series siguen la misma evolución temporal pero las magnitudes de las H_s de la serie "Cabo Blanco Deep" son mayores a las del reanálisis del punto 4 del GOW2, con lo cual las diferencias en magnitud entre ambas fuentes se incrementa.



Figura 3.10. Series temporales de Hs del reanálisis del punto 4 de la serie GOW2 y serie "Cabo Blanco deep".

Al coincidir espacial y temporalmente ambas fuentes de información pero diferir en cuanto a las magnitudes de H_s , se hace evidente que los datos del reanálisis de la serie GOW2 requieren ser calibrados. Por lo tanto, se realiza un trabajo de calibración de los datos de reanálisis a partir de la serie "Cabo Blanco Deep" medida durante el año 2014. Se eligió utilizar para la calibración de la serie de reanálisis GOW2 sólo el período con la información registrada por el AWAC durante el 2014.

Con el fin validar el proceso de corrección resultante de adaptar los datos GOW2 frente a las medidas registradas por el AWAC para todo el periodo histórico disponible (1979-2016), se compararon estos resultados con el mismo proceso de calibración pero partiendo de datos de satélite multi-misión durante 22 años. En ambos casos, para la calibración de los datos del reanálisis de la serie GOW2 se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Una vez procesados los datos procedentes de observaciones (el registro de "Cabo Blanco Deep" o los datos de satélite), se establecen los pares de datos con la base de datos GOW2 (datos que coinciden tanto temporal como espacialmente). Posteriormente se calibran los datos de H_s del reanálisis con los datos observados, mediante la metodología de calibración paramétrica dependiente de la dirección del oleaje (más detalles en Mínguez et al., 2011). El algoritmo matemático utilizado es el siguiente:

$$H_S^C = a^R(\theta) [H_S^R]^{b^R(\theta)}$$
(3.6)

donde:

 H_s^R : es la altura de ola significante del reanálisis de la serie GOW2.

 H_s^C : es la altura de ola significante calibrada.

 $a^{R}(\theta)$ y $b^{R}(\theta)$: son los parámetros que dependen de la dirección media del oleaje de la serie del reanálisis GOW2.

- 2. El algoritmo matemático de calibración se aplica a la totalidad de los datos de la variable H_s de los 4 puntos de la serie de reanálisis GOW2, que se localizan en el contorno de la malla SWAN (Ver figura 3.2 (a)).
- 3. Por último se comprueba la calidad de la calibración mediante gráficos cuantil-cualtil, scatter plots, en conjunto con la recta bisectriz y los descriptores de calidad de ajuste como son el sesgo o BIAS, el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), el coeficiente de correlación (ρ) y el índice de dispersión (SI). Estos descriptores se utilizarán a lo largo de la tesis por lo que se procede a definirlos a continuación. Se incluye también por una cuestión de orden, a pesar de que no se utiliza en la siguiente evaluación, el error cuadrático medio normalizado (NRMSE, por sus siglas en inglés) y la desviación centrada del error cuadrático medio (RMSD, por sus siglas en inglés):
 - BIAS o sesgo: es la definición sistemática entre dos variable, mide la diferencia entre ambas variables y se define como:

$$BIAS = \bar{x} - \bar{y} \tag{3.7}$$

• RMSE: el error cuadrático medio mide la exactitud con la que se parecen dos variables, se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)}$$
(3.8)

ρ: el coeficiente de correlación de Pearson. Mide la intensidad de la relación de igualdad entre dos variables. Está definido entre -1 y 1, cuando existe correlación lineal perfecta entre las dos variables (los datos de X e Y son iguales) ρ=1 si la correlación es lineal y positiva o ρ=-1 si la correlación es lineal y negativa, si ρ=0 no hay correlación lineal entre las variable.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$
(3.9)

 SI o RSI: el índice mide la dispersión de los puntos respecto a la recta bisectriz; si todos los puntos se fijan sobre la recta bisectriz, el parámetro adimensional SI toma el valor de cero:

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}}$$
(3.10)

 NRMSE: el error cuadrático medio normalizado es el error cuadrático medio adimensionalizado:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2}}$$
(3.11)

• RMSD: desviación centrada del error cuadrático medio:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [(x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})]^2}$$
(3.12)

donde *X* son los datos de referencia (x_1 , x_2 ,..., x_i ,..., x_n) y *Y* (y_1 , y_2 ,..., y_i ,..., y_n) los datos a evaluar o aproximaciones.

Las figura 3.11 muestra los resultados de la calibración donde se observa que el método ha corregido las discrepancias entre el reanálisis GOW2 y la serie "Cabo Blanco Deep". Se incluyen los descriptores estadísticos de ajuste (BIAS, RMSE, ρ y SI), tanto para la serie sin calibrar así como también posterior a la calibración. Los valores de dichos parámetros verifican los buenos resultados luego de realizar el procedimiento de calibración.

Los parámetros BIAS, RMSE y SI disminuyen sus valores hacia cero luego de la calibración, lo cual comprueba la mejoría del ajuste y el valor de ρ se mantiene, confirmando la correlación lineal que existe entre ambas bases de datos. La figura 3.11 (c) muestra la función de distribución acumulada de la serie del reanálisis sin calibrar, los datos instrumentales, la serie de reanálisis calibrada y las bandas de confianza del 95%. Se comprueba cómo la calibración es bastante precisa para valores de H_s hasta una probabilidad de no excedencia de aproximadamente el 95%, entre esta probabilidad y el 99.7% aproximadamente, la calibración sobreestima los valores. Para probabilidades de no excedencia del orden del 99.95%, asociada a eventos extremos, la calibración subestima los valores de H_s del reanálisis menores a 1.0 m lo que se debe de aplicar es una corrección que aminora los magnitudes de H_s y para valores de H_s del reanálisis mayores a 1.0 m la corrección consiste en un aumento de la magnitud en función del coeficiente a utilizar.



Figura 3.11. Gráficos de dispersión cuantil-cuantil. a) $Hs_{Cabo Blanco deep} vs Hs_{pto4 sin calibrar}$, b) $Hs_{Cabo Blanco deep} vs Hs_{pto4 calibrado}$, c) función de distribución acumulada y d) coeficiente de valoración entre los datos corregidos/sin corregir en escala polar.

Finalmente, se muestran en la figura 3.12 las series temporales de los datos de H_s de "Cabo Blanco Deep" junto con los datos de reanálisis del punto 4 calibrado. Se puede observar cómo las magnitudes de ambas series de datos coinciden una vez corregida la serie de reanálisis.



Figura 3.12. Series temporales de H_s de la serie GOW2 y datos de Cabo Blanco trasladados hasta profundidades indefinidas.

El procedimiento anterior se aplica a los otros tres puntos del reanálisis de la serie GOW2 (puntos 3, 5 y 6). La figura 3.13 muestra el gráfico de dispersión y cuantil-cuantil resultante para cada punto del contorno calibrado. Asimismo se incluyen los resultados de los parámetros de bondad de ajuste, cuyas magnitudes presentan valores similares a los obtenidos para el punto 4, confirmando el ajuste logrado para cada punto del reanálisis de la serie GOW2.



Figura 3.13. Gráficos de dispersión cuantil-cuantil a) punto3, b) punto 5 y c) punto 6.

Los resultados obtenidos de la calibración se han contrastado con la corrección de la serie de reanálisis con datos de satélite con el fin de verificar la corrección aplicada durante todo el registro histórico.

La figura 3.14 muestra un resumen a través de diferentes figuras que ilustran antes y después de la corrección de la serie GOW2 con datos de satélite. Los gráficos de cuantiles en coordenadas polares se muestran en la parte superior. El color verde representa los datos brutos GOW2 (H_s^R) , el color azul representa los datos de altimetría (H_s^l) y el color rojo representa los datos después del procedimiento de corrección (H_s^C) .

En la parte central de la figura 3.14 se muestran los gráficos de dispersión y las funciones de distribución. En los diagramas de dispersión se incluye información de los cuantiles y varios índices estadísticos de las observaciones disponibles (eje x) frente a los datos GOW2 (eje y). Los rombos rellenos representan los valores de los cuantiles equiespaciados en la escala de Gumbel (rombos vacíos indican percentiles por encima del 99,5%). Los puntos coloreados son los pares de datos de altura de ola significante (m) y la intensidad del color representa la densidad de datos. En el panel central derecho se muestra la función de distribución acumulada de la serie del reanálisis sin calibrar, los datos instrumentales, la serie de reanálisis calibrada y las bandas de confianza del 95%, así como también una tabla con los valores de los coeficientes para la calibración.

En la parte inferior de la figura 3.14 se muestran la rosa clásica, las funciones de densidad polares de H_s^R y H_s^C y los cambios debido a la calibración paramétrica. Los parámetros estimados de la calibración también se proporcionan en la figura. El panel derecho en la parte inferior se muestra el aumento (rojo) -disminución (azul) de GOW2 después de la corrección. Como se puede observar, el procedimiento de corrección resulta en un aumento de las olas más energéticas y una disminución de las olas de baja energía.

Como se puede comparar en los gráficos polares que muestran el coeficiente de variación entre los datos corregidos/sin corregir direccionalmente y para distintas magnitudes, las correcciones que resultan al aplicar el método de calibración, a partir de los datos medidos in-situ por el AWAC durante el año 2014 y de los datos remotos satelitales disponibles desde 1991 hasta 2013, los incrementos generalizados para el oleaje procedente de la dirección *SSW* y la pequeña disminución para los oleaje de menor magnitud son similares. Este hecho verifica que el proceso de calibración con el AWAC se puede aplicar a todo el registro histórico disponible.

CAPÍTULO 3



Figura 3.14. Resultados de corrección de datos de reanálisis con datos de satélite.

Una vez calibrados los puntos de la serie de reanálisis GOW2 de los contornos de la malla de cálculo, se ha procedido a realizar las simulaciones de propagación de oleaje y onda infragravitatoria desde aguas profundas hasta aguas someras con el modelo SWAN.

3.6 Propagación y validación de los datos de reanálisis de la serie GOW2 calibrada

Para trasladar los datos de la serie GOW2 calibrada desde aguas profundas hasta el interior del Golfo de Nicoya, se ha utilizado nuevamente el modelo de propagación de oleaje SWAN con la mejor configuración obtenida y descrita en el apartado 3.4. Asimismo los resultados se han validado con las mediciones instrumentales registradas en Cabo Blanco y Caldera.

Los estados de mar propagados han sido 64, tienen una resolución horaria de 3 horas para que coincidan temporalmente con los datos instrumentales y corresponden a la semana del 1 al 8 de julio del 2014. Se cree interesante enfocar esta parte del estudio numérico a esta semana específicamente, debido a que contiene los eventos documentados a nivel de prensa escrita, sobre oleajes de alta energía que rebasaron sobre el talud de playa Caldera, y que produjeron la inundación sobre la ruta que pasa en frente de esta playa, la cual se trata de una vía de importancia comercial porque es por medio de ésta que se accede a puerto Caldera.

El modelo SWAN se ha forzado con los espectros de energía generados a partir de los parámetros espectrales. Estos espectros, posteriormente, se han modificado para incluirles la energía asociada a las bajas frecuencias. La modificación del espectro se ha realizado para cada estado de mar propagado y en cada uno de los seis diferentes puntos del reanálisis a lo largo del contorno de la malla de cálculo (ver figura 3.2 (a)).

La modificación del espectro se realiza mediante la técnica de (Hasselmann, 1962 y Okihiro et al., 1992), tal y como se describe en el siguiente apartado. Una vez modificados los espectros se propagan desde aguas profundas hasta la costa siguiendo la metodología para inferir el espectro de onda infragravitatoria descrita en (Díaz-Hernández et al., 2015).

3.6.1 Estimación de las ondas infragravitatorias como complemento de la información de oleaje de la serie de reanálisis GOW2

Las oscilaciones de segundo orden correspondientes a la onda infragravitatoria ligada al espectro de oleaje (Hasselmann, 1962 y Okihiro et al., 1992), se estima a partir de la siguiente formulación analítica:

$$\eta(\omega_j) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{n\theta} \sum_{r=1}^{n\theta} C_e A_{n,q}$$
(3.13)

donde:

n, m: componentes frecuenciales.

q, r: componentes direccionales.

Ce: coeficiente de acoplamiento para ligar la energía de las bajas frecuencias al espectro de oleaje, dado por:

$$C_{e} = -\frac{gk_{n}k_{m}\cos\Delta\theta}{2\omega_{n}\omega_{m}} - \frac{\omega_{n}\omega_{m}}{2g} + \frac{\omega_{n}^{2} + \omega_{m}^{2}}{2g} - \frac{q\omega_{j}}{\left(g\Delta k\tanh(\Delta kh) - \omega_{j}^{2}\right)\omega_{n}\omega_{m}} \dots$$

$$\left(\omega_{j}\left[\left(\frac{\omega_{n}\omega_{m}}{g}\right)^{2} + k_{n}k_{m}\cos\Delta\theta\right] - \frac{1}{2}\left[\frac{\omega_{n}k_{m}^{2}}{\cosh^{2}(k_{m}h)} - \frac{\omega_{m}k_{n}^{2}}{\cosh^{2}(k_{n}h)}\right]\right) \tag{3.14}$$

y para aguas poco profundas:

$$C_e = -\frac{3}{2h^3} \frac{1}{k_n k_m}$$
(3.15)

donde *g* es la aceleración de la gravedad, k_n es el número de ola para la componente espectral *n*, en 1/m. k_m es el número de ola para la componente *m*; $\Delta \theta = \theta_{n,r} - \theta_{m,q}$ es la diferencia angular entre cada componente de energía individual; $\Delta k = |k_{n,r} - k_{m,q}|$ es el vector de número de onda asociado con onda larga ligada, en 1/m; $\overline{\omega}_j = \overline{\omega}_n - \overline{\omega}_m$ es la diferencia de frecuencia angular para cada componente de energía y *h* es la profundidad batimétrica de cada espectro de oleaje, en metros.

La figura 3.15 muestra un ejemplo de la aplicación de las ecuaciones 3.14 y 3.15, combinando las componentes de energía del oleaje para un espectro seleccionado de la serie GOW2 en el punto 3 (ver figura 3.2 (a)), ocurrido en la semana del 1 al 8 de julio del 2014. Los parámetros de oleaje iniciales son H_s =4.5 m, el T_p =19.2 s, el T_z =16.3 s y la dirección media de propagación es de 195.3°. Luego de aplicar las ecuaciones 3.14 y 3.15 se obtienen la H_{LW} =0.46 m y T_{m02LW} =150 s asociados a la energía de las ondas infragravitatoria.



Figura 3.15. Espectro de amplitudes GOW2 modificado, correspondiente al estado de mar medido el 4 de julio del 2014. Fracción de energía a la onda infragravitatoria encerrada en la elipse de color rojo.

El procedimiento anterior se ha aplicado a cada uno de los 64 estados de mar seleccionados de la serie GOW2, para luego propagarlos con el contenido de energía tanto del oleaje como de la onda infragravitatoria, desde aguas profundas hasta la costa por medio del modelo SWAN. Para ello se ha ampliado la configuración de las frecuencias del modelo SWAN en un rango entre 0.0022 - 0.333 Hz.

Los resultados obtenidos de las simulaciones son los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria H_s , T_p , dir, H_{LW} , T_{m01LW} , T_{m02LW} y T_{pLW} respectivamente, los que se validan con las mediciones de campo en los sitios en Cabo Blanco y Caldera.

Los parámetros de onda infragravitatoria que se han estimado son la altura del momento de orden cero, el período medio, el período medio y el período de pico (H_{LW} , T_{m01LW} , T_{m02LW} y T_{pLW}),

los cuales se ha calculado a partir de las formulaciones incluidas en el apartado 2.3.3.3 del capítulo 2.

3.6.2 Validación de los datos de la serie de reanálisis GOW2 calibrada con mediciones instrumentales

Para validar el procedimiento de *downscaling* desarrollado para los parámetros del estado de mar del oleaje y onda infragravitatoria en la costa, se han utilizado nuevamente las mediciones de campo realizadas en Cabo Blanco y Caldera durante el año 2014, específicamente la semana del 1 al 8 de julio del 2014.

En la figura 3.16 se muestran las series temporales de los parámetros de oleaje (a) H_s , (b) T_p y (c) *dir*, de los datos de reanálisis del GOW2 calibrada y trasladada hasta Cabo Blanco, mediante el modelo SWAN, y los resultados de los datos instrumentales. Se observa cómo ambas series para estos tres parámetro son similares, siguen una secuencia adecuada y reflejan de forma acertada las tendencias energética, frecuenciales y direccionales de la ventana de tiempo en estudio.

En cuanto a los parámetros asociados a las ondas infragravitatorias (d) H_{LW} y (c) T_{pLW} , T_{m01LW} y T_{m02LW} , específicamente la altura de onda infragravitatoria, se observa una adecuada reproducción de los eventos de menor magnitud, y una tendencia de crecimiento realista. Sin embargo, el resultado de la propagación de las ondas infragravitatorias muestra que, tras el pico del temporal, tienden a descender de manera más modesta que las mediciones. El T_{pLW} presentan poca variabilidad en comparación con los datos medidos; el T_{m01LW} y T_{m02LW} obtenidos son superiores a los datos medidos en campo.

Las variaciones encontradas con respecto a los períodos de las ondas infragravitatorias se pueden deber a que los períodos medidos, pueden estar influenciados por efectos de reflexión producidos por los contornos, así como también a que dichos períodos son estimados a partir de registros de oleaje cuya duración es del orden de los 17 minutos, con lo cual la cantidad de ondas infragravitatorias son aproximadamente 20, lo que influye al momento de estimar estos estadísticos.

DOWNSCALING DINÁMICO DEL OLEAJE



Figura 3.16. Validación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Cabo Blanco.

Al realizar un análisis cuantitativo de los resultados, mediante descriptores de calidad de ajuste, se observa en la figura 3.17 (a, b y c) que el criterio de ajuste SI presenta para los parámetros de oleaje valores máximos de 0.13, lo que demuestra la poca dispersión con respecto a la recta bisectriz. Las magnitudes de RMSE estimados para los parámetros de oleaje H_s , T_p y *dir* son menores del 30% de los valores mínimos registrados para cada uno de ellos durante el período de la semana de validación, lo que demuestra la calidad del ajuste obtenido. La misma situación se confirma al comparar los valores de ρ , el cual para H_s y T_p presenta magnitudes del 90% y 65% respectivamente.

Los valores de los descriptores de calidad de ajuste aplicados a los parámetros de las ondas infragravitatorias (ver figuras 3.17 (d, e y f)), muestran que el parámetro que mejor se aproxima a los datos medidos es la H_{LW} , con valores de RMSE de 0.10 m y un ρ de 80%. Sin embargo, los parámetros de períodos, T_{pLW} y T_{m02LW} presentan criterios de calidad de ajuste bajos, principalmente el T_{pLW} , lo que confirma lo visto en las series temporales de la figura 3.16 (e).



Figura 3.17. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW} para la posición de Cabo Blanco durante la semana del 01 al 08 de julio del 2014.

En la figura 3.18 se muestra para la semana de validación, la misma secuencia de gráficos pero esta vez para la posición en Caldera; se demuestra en las series de los parámetros de oleaje (a) H_s y (b) T_p y de esta figura, cómo los resultados de trasladar los datos del reanálisis GOW2, mediante el modelo SWAN, hasta dicha posición son adecuados. No es posible validar las direcciones debido a que en Caldera no se cuenta con ese parámetro.

Tal y como se comentó anteriormente, en relación con el resultado del parámetro de altura de onda infragravitatoria H_{LW} , se observa un desfase en el tiempo de las alturas aproximadas, posiblemente debido a efectos de reflexión de la onda infragravitatoria que el modelo numérico es incapaz de reproducir, además de las incertidumbres inherentes de las mediciones en campo que integran la energía infragravitatoria agitada dentro de la bahía y no solamente la energía incidente. No obstante, se consideran resultados adecuados para comprobar la validez de la compleja transferencia del oleaje y onda infragravitatoria desde aguas profundas hasta aguas

someras, especialmente si se considera la sencillez del método aplicado y las subsecuentes propagaciones numéricas con costes computacionales bajos. En cuanto a los períodos T_{pLW} , T_{m01LW} y T_{m02LW} , al igual que en Cabo Blanco, los T_{m01LW} y T_{m02LW} obtenidos son superiores a los datos medidos en campo y el T_{pLW} es un resultado que promedia los datos medidos.



Figura 3.18. Validación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Caldera.

Al realizar un análisis a partir de los descriptores de bondad de ajuste, se observa en la figura 3.19 (a y b), correspondiente a los parámetros de oleaje H_s y T_p , resultados similares a los obtenidos en Cabo Blanco, con valores bajos de RMSE, SI y BIAS, y valores de ρ superiores al 90% y 84% respectivamente.

Los valores de calidad de ajuste aplicados a los parámetros de las ondas infragravitatorias (ver figuras 3.19 (c, d y e)), muestran al igual que en Cabo Blanco, que el parámetro que mejor se aproxima a los datos medidos es la H_{LW} , con valores de RMSE de 0.07 m y un ρ de 85%. Sin embargo, los parámetros de períodos, T_{pLW} y T_{m02LW} presentan criterios de calidad de ajuste bajos, debido a que los datos trasladados por el modelo SWAN, suaviza los resultados mientras que los datos medidos presentan una gran variabilidad, principalmente los correspondientes al T_{pLW} .



Figura 3.19. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW} para la posición de Caldera durante la semana del 01 al 08 de julio del 2014.

3.7 Conclusiones.

Se ha determinado a partir de múltiples experimentos y montajes numéricos la configuración más eficiente del modelo SWAN, para simular la propagación del oleaje y las ondas infragravitatorias hacia la zona interior de la Bahía del Golfo de Nicoya. Ésta consiste en mallas de cálculo numérico que resuelven las ecuaciones de gobierno en un esquema de diferencias finitas en modo estacionario.

Se comprobó que incluir como forzamiento del modelo los campos de viento de las fuentes CFSR, CFSRv2 y CFSRv2bis, aumenta los errores debido a que dichas fuentes no reflejan la realidad de lo que sucede físicamente en la zona de estudio, lo que podría corresponder a la falta de datos de media-alta resolución del reanálisis de los campos de viento de las fuentes utilizadas.

Se ha comprobado que los parámetros de oleaje de la serie de reanálisis del GOW2, a lo largo del contorno de la malla de cálculo del modelo de propagación, presentan escasa variabilidad espacial. Además, al comparar dicha información con los datos instrumentales medidos en Cabo Blanco y trasladados hasta aguas profundas, se ha comprobado que los datos del reanálisis de la serie GOW2 requieren ser previamente calibrados. Por esta razón se aplicó la metodología de calibración paramétrica dependiente de la dirección y cuantiles desarrollado por Mínguez et al., 2011, usando datos instrumentales. Se calibró cada estado de mar horario desde 1979 hasta 2015 de la base de datos de reanálisis GOW2 en cada uno de los nodos que colindan con la malla de cálculo del modelo SWAN.

Se ha creado una nueva base de datos horaria con información de la onda infragravitatoria representada por los parámetros H_{LW} y diferentes T_{LW} . Esta nueva base de datos se ha determinado a partir de los parámetros de oleaje de la serie GOW2 calibrada (Hasselmann, 1962 y Okihiro et al., 1992). Dicha información al tratarse de la fracción de energía de las bajas frecuencias, complementa cada uno de los estado de mar de la serie de reanálisis del GOW2 colindante con la malla de cálculo del modelo SWAN. La nueva base de datos constituye un producto novedoso para esta zona del mundo, al complementar el espectro del oleaje con información de las bajas frecuencias y obtenido a partir de una metodología de bajo coste computacional.

Para validar la nueva base de datos se propagó desde aguas profundas hasta la costa, mediante la configuración más eficiente del modelo SWAN, la semana del 1 al 8 de julio del 2014, obteniéndose resultados adecuados, principalmente para los parámetros H_s , T_p , dir y H_{LW} , lo que demuestran la validez de la calibración de la serie GOW2 y la nueva base de datos con información de la onda infragravitatoria.

En relación con las diferencias entre los períodos de las ondas infragravitatorias medidas y los resultados de la propagación, pueden deberse a que estos últimos estén influenciados por efectos de reflexión producidos por los contornos, así como también a que dichos períodos son estimados a partir de registros de oleaje cuya duración es del orden de los 17 minutos, con lo cual la cantidad de ondas infragravitatorias son aproximadamente 20, lo que influye en la estimación de los estadísticos.

El contar con una serie de reanálisis validada con datos instrumentales, con información de oleaje y onda infragravitatoria, hace posible extender esta información a otras localizaciones mediante la técnica de regionalización (*downscaling*). Esta técnica se desarrolla detalladamente en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3

Adicionalmente el contar con información tanto del oleaje como de la onda infragravitatoria, se mejora en el conocimiento de estas variables que son de suma importancia en múltiple áreas de la ingeniería de costas y puertos, como son los estudios de agitación y resonancia portuaria, la gestión de operaciones en puertos, sistemas operacionales de pronóstico de olaje, procesos de inundación en playas y el transporte de sedimentos en la zona de rompientes, entre otros.

CAPÍTULO 4

ROOL: REGIONALIZACIÓN DE OLEAJE Y ONDA LARGA

4.1 Introducción

La base de datos de reanálisis de oleaje GOW2 calibrada, junto con el registro complementario de onda larga, específicamente la onda infragravitatoria determinada en el capítulo 3 de esta investigación, constituyen una fuente de información muy valiosa debido a su extensión (38 años) y su resolución temporal horaria. Lo anterior permite caracterizar el clima de estas variables en los puntos del reanálisis del GOW2 frente al Golfo de Nicoya y zonas adyacentes; sin embargo, estos datos proporcionan información en aguas profundas. Por ello, para poder obtener información en la costa se requiere de un *downscaling* (regionalización).

El método más común para trasladar la información desde aguas profundas hasta la costa a mayor resolución, es mediante un modelo de propagación de oleaje o *downscaling* dinámico. Esta aproximación resuelve las ecuaciones de gobierno en cada uno de los nodos de la malla de cálculo numérico, pudiendo proporcionar información en todos los puntos de malla durante la simulación. No obstante, el trasladar mediante un modelo de propagación de oleaje cada estado de mar contenido en la serie horaria del reanálisis GOW2 con un total de 38 años de información, es inabordable debido a la cantidad del recurso computacional requerido. La alternativa a este inconveniente es el método de *downscaling* estadístico, que consiste en relacionar mediante funciones de transferencia, los resultados de las condiciones del oleaje en aguas profundas, con datos en aguas someras medidos con instrumentación. Como se describe a continuación, en esta tesis se ha desarrollado un método de *downscaling* híbrido, que combina el *downscaling* dinámico con el *downscaling* estadístico (Camus et al., 2011b y Camus et al., 2013).

La metodología se implementa para determinar la Regionalización de Oleaje y Onda Larga (ROOL) dentro del Golfo de Nicoya. Versiones previas de esta aproximación han sido efectuadas para otras regiones y latitudes. En particular, un método muy similar ha sido desarrollado a lo largo del litoral español (Camus et al., 2013), por lo que su ejecución a otra región climática, donde la física del oleaje es diferente, permite no solo validar su aplicación en otro lugar, sino que también crea información de alta resolución espacio temporal, en una zona del continente de América que carece de la misma, y genera además la base del conocimiento para que futuros ingenieros de la región la repliquen.

El diagrama de flujo que se presenta en la figura 4.1 muestra el procedimiento desarrollado para determinar el ROOL. En este capítulo el procedimiento inicia a partir del paso 3, debido a que los pasos 1 y 2, Bases de datos y Calibración se realizaron en los capítulos 1 y 2 respectivamente.

El paso 3 describe el procedimiento utilizado para seleccionar los casos representativos, de la totalidad de estado de mar que conforman la serie de reanálisis GOW2. En el paso 4 se describe el proceso de trasladar desde aguas profundas hasta aguas someras, mediante la técnica del *downscaling* dinámico, los casos seleccionados en el paso 3. En el paso 5 se detalla la técnica del *downscaling* estadístico con la cual se propagan a distintos puntos de la zona de estudio, el resto de los estados de mar de la serie de reanálisis GOW2, que no se propagaron por medio del *downscaling* dinámico. En el paso 6 se validan los resultados del paso 5 con los datos instrumentales medidos en las campañas de campo y finalmente en el paso 7 se presenta el ROOL.



Figura 4.1. Diagrama de flujo que muestra la secuencia de pasos para la determinación del ROOL en el Golfo de Nicoya.

Previo a mostrar el desarrollo de manera detallada para obtener el ROOL según el diagrama de flujo de la figura 4.1, en el apartado 4.2 se incluye el estado del arte acerca de las diferentes técnicas de *downscaling*. El apartado 4.3 contiene la técnica de *downscaling* híbrido, que para los efectos de organización en este trabajo, se ha agrupado la selección de los estados de mar representativos y el proceso de propagación de éstos junto con la onda infragravitatoria, realizado por medio del *downscaling* dinámico. El apartado 4.4 contiene el *downscaling* estadístico, donde se transfieren el resto de los estados de mar de la serie de reanálisis GOW2 y ondas infragravitatorias. A su vez se validan los resultados obtenidos con los datos instrumentales registrados en Cabo Blanco y Caldera. En el apartado 4.5 se presenta el producto ROOL y por último en el apartado 4.6 se incluyen las conclusiones más relevantes de este capítulo.

4.2 Estado del arte

Las técnicas de *downscaling* son usadas hoy en día de manera común para la transferencia del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras, consisten en el aumento de la resolución espacial para lograr mayor y mejor información en los sitios donde se producen los mayores cambios de la variable debido a los contornos. Generalmente las técnicas de downscaling se clasifican en tres clases (Camus et al., 2013):

Downscaling dinámico: se fundamenta en anidar o unir modelos numéricos de diferente resolución, por ejemplo uno de escala global con otro de escala regional (WW3 - SWAN), con el propósito de que el primero genere las condiciones de contorno para el segundo y que este último, por contar con una mayor resolución espacial, sea capaz de modelar de manera más precisa los diferentes procesos de propagación del oleaje como la refracción, difracción, asomeramiento, disipación por el fondo y rotura del oleaje, desde aguas profundas hasta aguas someras (Rusu et al., 2008). El *downscaling* dinámico es un método preciso que puede generar series largas y con una alta resolución espacial y temporal, lo cual permite una mejor caracterización estadística del clima del oleaje. No obstante, presenta ciertos inconvenientes, como que requiere de información batimétrica fiable y de detalle o que la reconstrucción histórica durante un periodo de al menos 30 años, conlleva un elevado costo de tiempo y computación.

Downscaling estadístico: consiste en relacionar mediante funciones de transferencia, como por ejemplo modelos de regresión, los resultados de las condiciones del oleaje en aguas profundas, obtenidos a partir de simulaciones numéricas o mediciones instrumentales, con datos en aguas someras (por ejemplo, medidos con instrumentación en costa). Los modelos de regresión emularían el modelo de propagación del *downscaling* dinámico, al trasladar las condiciones del

oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras. El *downscaling* estadístico resulta un método efectivo, de fácil implementación y de bajo coste computacional; no obstante, requiere de datos en el sitio de interés para definir la función de transferencia (Browne et al., 2007 y Kalra et al., 2005).

Un ejemplo aplicado a la región de estudio fue realizado por (IMARES, 2014), quienes determinaron una función de transferencia para estimar el parámetro de oleaje H_s frente a un sitio en la costa del Pacífico central de Costa Rica, a partir de relacionar los datos de oleaje medidos por dos ADCP, uno colocado en Cabo Blanco y el otro en el sitio de interés. No obstante, esta función es válida para un único sitio, lo cual la hace muy limitada espacialmente y que no se pueda extender a otras localizaciones diferentes.

Otra aplicación, también sobre la región de análisis, pero relacionada con la onda infragravitatoria, fue efectuada por (Corrales, 2016). A partir de los parámetros de H_s y T_p medidos, se calcularon las ondas infragravitatorias correspondientes. Se estimó, posteriormente mediante técnicas de regresión una función de transferencia que correlaciona dichos parámetros con la altura de la onda infragravitatoria. Este trabajo, también se limita a un sitio en particular por lo que no se puede extender dicha función a otras localizaciones en el Pacífico de Costa Rica.

Downscaling híbrido: combina las técnicas del *downscaling* dinámico con el *downscaling* estadístico para reducir el esfuerzo computacional. Consisten en desarrollar una función de transferencia a partir de propagar desde aguas profundas hasta la costa, ciertos casos previamente seleccionados que representan la climatología del oleaje (Groeneweg et al., 2007 y Stansby et al., 2007). Para que la función de transferencia sea representativa, se requiere simular cierta cantidad de estados de mar que estarán en función de la variabilidad de los diferentes parámetros de oleaje (Chini et al., 2010). Algunos modelos se enfocan en el tipo de función de transferencia a utilizar para aumentar la resolución en costa, como por ejemplo modelos estadísticos de regresión lineal, correlaciones canónicas y análogos (Galioskova y Weisse, 2006). Otros métodos se basan en combinar modelos numéricos con análisis de componentes principales y métodos de redes neuronales (Herman et. al., 2009). Estos métodos tienen en común que requieren de gran cantidad de propagaciones en dinámico para luego poder generar la función de transferencia y validar los resultados.

El *downscaling* híbrido propuesto por (Camus et al., 2011b) tiene como característica principal que aplica para la selección de los casos, el método matemático o algoritmo denominado máxima disimilitud (MaxDiss), (Kennard y Stone, 1969 y Camus et al., 2011a), con lo cual el número de casos se selecciona de manera eficiente y multivariante. Los casos seleccionados,

luego se propagan desde aguas profundas hasta aguas someras con la técnica del *downscaling* dinámico y por último se reconstruye la serie de oleaje, y en este caso también la onda infragravitatoria en los sitios de interés, mediante el algoritmo basado en funciones de base radial (RBF, por sus siglas en inglés).

4.3 Transferencia del reanálisis de oleaje de la serie GOW2 y la onda infragravitatoria desde aguas profundas a aguas someras mediante la técnica del *downscaling* híbrido

La técnica del *downscaling* híbrido consiste en simular la propagación de oleaje de casos que sean representativos de la climatología de la variable, desde aguas profundas hasta aguas someras por medio de un modelo numérico (*downscaling* dinámico). Con base en los resultados obtenidos se define una función de transferencia, que permita trasladar el resto de la totalidad de los casos que no se seleccionaron (*downscaling* estadístico) hasta el punto objetivo.

A continuación se presenta parte del procedimiento mostrado en la figura 4.1, para aplicar el *downscaling* híbrido, organizado en este trabajo como la selección de los estados de mar a propagar y la transferencia de dicha información desde aguas profundas hasta la costa mediante el modelo numérico SWAN.

Selección de los estados de mar de la serie de reanálisis GOW2 para trasladarla desde aguas profundas a aguas someras

La selección de los estados de mar representativos de la serie de reanálisis GOW2 junto con la información de la onda infragravitatoria, se realiza mediante una técnica basada en el algoritmo de MaxDiss, descrito por Kennard y Stone, 1969, y que se ha aplicado, anteriormente, con éxito para los parámetros estándar del estado de mar (Camus et al., 2011a, 2011b y 2013). La técnica MaxDiss permite la identificación de un subconjunto de datos con la mayor diversidad posible del conjunto total datos, incluyendo casos con baja probabilidad de ocurrencia como son los eventos extremos.

La técnica inicia con la selección de un dato del conjunto total de datos, el cual va a formar parte del subconjunto, posteriormente el siguiente dato seleccionado de los restantes del conjunto total inicial, debe tener la particularidad de presentar la mayor disimilitud o distancia con respecto al dato existente del subconjunto seleccionado previamente. Luego para cada dato que todavía pertenece al conjunto de partida, se calcula la disimilitud con todos los datos del subconjunto. Una vez que se cuenta con la distancia entre cada dato del conjunto de partida y el subconjunto, se elige el dato con el máximo valor de la distancia. El proceso se continúan de

CAPÍTULO 4

manera iterativa, seleccionando datos hasta acumular un número de datos en el subconjunto, que son representativos de la diversidad del conjunto total inicial.

Para delimitar el número total de datos del subconjunto se ha partido de la recomendación de Camus et al, 2011b., donde, a partir de analizar la influencia del número de casos seleccionados se concluye que con un subconjunto de más de 100 estados de mar, se obtienen resultados adecuados. En esta tesis se delimitó el subconjunto de casos a 200 estados de mar, debido al tiempo computacional de cálculo, pero fundamentalmente siguiendo la recomendación de la teoría de Camus et al, 2011b para oleajes cuasi unidireccionales.

La zona de estudio presenta una variación de marea del orden de los 3 m, con lo cual es necesario tomar en cuenta el nivel del mar asociado a cada estado de mar. Los 200 estados de mar seleccionados se propagaron en bajamar (z=0.0 m), en el nivel medio (z=1.5 m) y en pleamar (z=3.0 m) resultando un total de 600 casos de estados de mar seleccionados. La estrategia de propagación en tres niveles de marea se ha tomado también de las recomendaciones realizadas por Camus et al, 2011b.

La información de viento se ha desestimado para efectos de la simulaciones de propagación de oleaje. Lo anterior debido a que tal y como se demostró en capítulo 3, las fuentes de datos de viento CFSR, y CFSRv2 no mejoran los resultados de las propagaciones.

En relación con la variabilidad espacial del clima de oleaje en frente del Golfo de Nicoya, la figura 4.2 muestra la localización de los cuatro puntos del reanálisis a lo largo del contorno de la malla de cálculo, los dos puntos de contorno adicionales (color rojo), que se introdujeron para mejorar los resultados de las propagaciones en ese sector del dominio de cálculo, tal y como se menciona en el capítulo 3.



Figura 4.2. Contorno de malla general de cálculo del modelo SWAN, puntos de la serie GOW2 y puntos adicionales (color rojo).

Los 200 casos seleccionados inicialmente corresponden al punto de reanálisis GOW2 (en color verde) que se muestra en la figura 4.2, cuyas coordenadas según el sistema de referencia local, CRTM son 105000 m norte y 3900000 m este, debido a que se trata del punto más cercano a los datos medidos en Cabo Blanco.

La figura 4.3 muestra las series temporales de los parámetros de oleaje H_s , T_p y *dir*, junto con los casos seleccionados (puntos en color rojo), luego de aplicar la técnica MaxDiss al punto de reanálisis en color verde.

Los casos seleccionados se distribuyen a lo largo de las series temporales y cubren la diversidad de las combinaciones de las variables H_s , T_p y *dir*.



Figura 4.3. Series temporales de los parámetros de oleaje a) H_s , b) T_p y c) *dir* de la serie GOW2 calibrada, junto con los casos seleccionados por la técnica MaxDiss.

Debido a que la técnica MaxDiss selecciona los parámetros de oleaje junto con su respectivas fechas, es posible localizar los 200 casos pertenecientes a los otros tres puntos de la serie de reanálisis GOW2 del contorno de la malla de cálculo (puntos en color negro, cian y magenta) (ver figura 4.2), de esta manera se seleccionan los 200 casos en los cuatro puntos del reanálisis de la serie GOW2 y onda infragravitatoria, que colindan con la malla de cálculo del modelo SWAN.

Las figuras 4.4, muestran a manera de ejemplo, los casos seleccionados mediante la técnica MaxDiss (en color rojo), sobre los datos de reanálisis para los parámetros H_s , T_p y *dir*, en el punto de reanálisis de la serie GOW2 colindante con la malla de cálculo (punto color verde). Se observa cómo la técnica MaxDiss selecciona los casos de tal manera que queda cubierta la diversidad de la totalidad de los datos. Se resalta, asimismo la existencia de dos familias de datos en el conjunto total de la serie de reanálisis del GOW2; una familia cuyos períodos, en este caso sería los mayores a 10 s, característicos de oleajes tipo *Swell* y la otra familia con períodos de oleajes menores a los 10 s que corresponderían a los oleajes tipo *Sea*. Sin embargo, ambas familias cubren todas las magnitudes de altura de ola del registro. En cuanto a las direcciones se observa nuevamente cómo las olas que inciden en la costa del Pacífico de Costa Rica, se concentran principalmente en el tercer cuadrante, con direcciones que se mueven entre el *SSW* y *SW*.



Figura 4.4. Relación de los casos seleccionados correspondientes al punto de color verde de la serie de reanálisis GOW2.

Propagación.

Para la propagación de los 200 casos con su información de oleaje y onda infragravitatoria para los tres diferentes niveles de marea (*downscaling* dinámico), se utiliza nuevamente el modelo de simulación de propagación de oleaje SWAN, con la misma configuración de mallas que se utilizó en el capítulo 3, dado que se ha demostrado, con base en los resultados presentados en dicho capítulo, su efectividad y realismo.

El objetivo es propagar cada uno de los casos del subconjunto seleccionados mediante la técnica MaxDiss y obtener los resultados de altura de ola significante, período pico, dirección media, altura y período de la onda infragravitatoria (H_s , T_p , dir, H_{LW} y T_{LW}) en los sitios de Caldera y Cabo Blanco, que es donde estuvieron colocados los equipos de medición de oleaje.

En las figuras 4.5 y 4.6 se muestra, a manera de ejemplo y en ambas mallas de cálculo, la propagación de oleaje de dos casos de estados de mar energéticos seleccionados con MaxDiss. La figura 4.5 representa un oleaje cuyos forzamiento son los parámetros H_s =5.2 m, T_p =19 s y dir=220° que representan un oleaje tipo *Swell*. La figura 4.6 muestra otro caso seleccionado correspondiente a un oleaje con parámetros de H_s =5.7 m, T_p =10 s y dir=235° que representan un oleaje tipo *Swell* al contar con mayor período puede refractar en el extremo sur de la península de Nicoya y penetrar dentro del golfo, mientras que el tipo *Sea* al tener un menor período no puede girar lo suficiente por lo que el oleaje no penetra con tanta energía dentro del golfo. Por ende, tal y como lo muestra las figuras 4.5 (b) y 4.6 (b), el tipo *Swell* incide con mayor energía en playa Caldera y más al norte de la misma, en comparación con el estado de mar tipo *Sea*.



Figura 4.5. Ejemplo de propagación de un caso correspondiente a la familia tipo *Swell*. a) malla general y b) malla de detalle.



Figura 4.6. Ejemplo de propagación de un caso correspondiente a la familia tipo sea. a) malla general y b) malla de detalle.

Esta particularidad, tal y como se mostrará en mayor detalle en el siguiente capítulo, reafirma la importancia de propagar desde aguas profundas hasta aguas someras, espectros completos del estado de mar con el contenido de energía del oleaje y también el de baja frecuencia.

Por ejemplo, la propagación de oleaje tipo *Sea* representada en la figura 4.6 (b), si se tuviera que acoplar a un modelo en costa para simular la inundación, el forzar el modelo con el espectro de energía completo, es decir, con la energía del oleaje y la baja frecuencia, sería una simulación más realista, que hacerlo sólo con el contenido de energía del espectro correspondiente al oleaje. Si se realiza considerando únicamente la energía del oleaje, tal y como tradicionalmente se hace, es evidente que se estaría subestimando parte de la energía infragravitatoria que contiene el estado de mar.
Una vez propagados los 600 casos de estados de mar con el contenido de energía del oleaje y el de la baja frecuencia, se procede a reconstruir el reanálisis de la serie GOW2 junto con la onda infragravitatoria, mediante la técnica del *downscaling* estadístico, primero en los sitios de Cabo Blanco y Caldera, y luego en diferentes puntos dentro del Golfo de Nicoya para la generación del ROOL.

4.4 Reconstrucción y revalidación de las series temporales

Para reconstruir las series temporales de los estados de mar, se aplica la interpolación basada en funciones de base radial (RBF, por sus siglas en inglés) descrita en Camus et al., 2011b y 2013. Esta tesis, en relación con este tema, se centra en la aplicación de la técnica y principalmente en la evaluación de los resultados, que consisten en la reconstrucción del reanálisis de la series de datos GOW2, compuestos por los parámetros de oleaje (H_s , T_p y dir) y los parámetros onda infragravitatoria H_{LW} y T_{LW} asociados a cada estado de mar.

La reconstrucción de la series de reanálisis de oleaje y onda infragravitatoria se han revalidado nuevamente mediante los datos medidos en las posiciones de Cabo Blanco y Caldera. Para ello, primero se ha utilizado de nuevo la ventana de tiempo correspondiente a la semana del 1 al 8 de julio del 2014. Posteriormente se amplía la ventana de tiempo para realizar la validación con la totalidad de los registros del AWAC y Aquadopp.

En la figura 4.7 se muestran las series temporales de los parámetros H_s , T_p y *dir*, en la posición donde estuvo colocado el AWAC en Cabo Blanco, los resultados obtenidos mediante la técnica del *downscaling* híbrido, las mediciones instrumentales y la simulación de propagación en modo dinámico obtenida en el capítulo 3. Se observa cómo la técnica del *downscaling* híbrido, logra reconstruir los parámetros de oleaje H_s y *dir* de manera adecuada (ver figuras 4.7 (a y c)). El parámetro T_p lo estima también de buena manera, pero existen momentos cuando el *downscaling* híbrido amplifica los valores.

En cuanto a los parámetros de onda infragravitatoria H_{LW} , T_{pLW} y T_{m02LW} , la metodología del *downscaling* híbrido reconstruye de mejor manera los eventos de menor magnitud, especialmente para la altura de ola. Sin embargo, al igual que el *downscaling* dinámico, el híbrido extiende la energía en el tiempo sin aumentar la magnitud de manera significativa. El T_{pLW} y T_{m02LW} presentan poca variabilidad en comparación con los datos medidos. El T_{m02LW} obtenido en modo híbrido es similar al obtenido en dinámico y superior a los datos medidos en campo. El T_{pLW} en modo híbrido es un resultado que promedia el obtenido en modo dinámico y a los datos medidos.

En la figura 4.8 se muestran la misma secuencia de gráficas pero esta vez para la posición en Caldera. Se observa en las series 4.8 (a y b) de esta figura cómo el resultado de reconstruir los parámetros de oleaje H_s y T_p también es adecuada. Al comparar la técnica del *downscaling* híbrido con el dinámico, se muestran resultados similares La dirección no es posible validarla debido a que el equipo colocado en Caldera no registra este parámetro.

En relación con el resultado del parámetro de altura de onda infragravitatoria H_{LW} , obtenido de la reconstrucción producto del *downscaling* híbrido, es similar al determinado mediante el *downscaling* dinámico. Se observa un desfase en el tiempo de las alturas aproximadas por ambas técnicas del *downscaling* en comparación con los datos medidos. No obstante, se consideran resultados adecuados para comprobar la validez de la transferencia del clima de oleaje y onda infragravitatoria desde aguas profundas hasta aguas someras. En cuanto a los períodos T_{pLW} y T_{m02LW} , al igual que en Cabo Blanco, el T_{m02LW} obtenido en modo híbrido es similar al alcanzado en dinámico y superior a los datos medidos en campo, el T_{pLW} en modo híbrido es un resultado que promedia el obtenido en modo dinámico y a los datos medidos. Al igual que en Cabo Blanco, T_{pLW} y T_{m02LW} no se ajustan de manera adecuada a los datos medidos en campo,



Figura 4.7. Revalidación de la reconstrucción de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Cabo Blanco. a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} y e) T_{pLW} .

ROOL: REGIONALIZACIÓN DE OLEAJE Y ONDA LARGA



Figura 4.8. Revalidación de la reconstrucción de la serie de oleaje y onda infragravitatoria en Caldera. a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} y e) T_{pLW} .

En las figuras 4.9 y 4.10 se muestra la revalidación de las series temporales de oleaje y onda infragravitatoria reconstruidas, nuevamente en los sitios en Cabo Blanco y Caldera durante 2014, pero esta vez para una ventana de tiempo más amplia.

Las series temporales correspondientes a Cabo Blanco que se incluyen dentro de la figura 4.9 muestran cómo el *downscaling* híbrido ajusta mayoritariamente la evolución en el tiempo de los parámetros H_s , T_p , *dir* y H_{LW} . Sin embargo, las series de T_p y H_{LW} reconstruidas presentan algunis valores picos que no se reflejan de manera significativa en los datos medidos. Los períodos de onda infragravitatorias no presentan un ajuste tan adecuado cómo en el caso de las variables anteriores, los resultados de reconstruir los períodos infragravitatorios presentan una menor variabilidad que los datos medidos. El T_{pLW} está dentro de la dispersión de magnitudes medidas y T_{m02LW} presenta valores mayor a los datos medidos, comportándose como un tipo de envolvente. No obstante, la ventaja que presentan las series de períodos reconstruidas, es que se tratan de un registro extenso que da una referencia de los valores de los períodos de onda infragravitatoria que pueden presentarse.

Las series temporales incluidas dentro de la figura 4.10 correspondientes a Caldera, muestran cómo la técnica del *downscaling* híbrido ajusta la evolución temporal de los datos medidos en campo; no obstante, las magnitudes de las variables de H_s , T_p y H_{LW} reconstruidas son mayores, a excepción del mayor evento registrado por lo equipos. Esto es probable que se deba a una estimación inadecuada de alguno de los parámetros de disipación, incluidos en el modelo numérico de propagación que están inherentes en la función de transferencia del *downscaling* estadístico. En el caso de los períodos reconstruidos de T_{pLW} y T_{m02LW} de la onda infragravitatoria, presentan el mismo comportamiento que en Cabo Blanco.

En la figura 4.10 (c) se ha incluido, adicionalmente la serie H_{LW} obtenida a partir de la formulación de (Corrales, 2016), la cual es una variación de la metodología de (Bowers, 1992), que estima el H_{LW} con base en los parámetros de oleaje H_s y T_p , medidos por instrumentación en la posición de Caldera entre mayo y agosto del 2014. Se demuestra que dicha fórmula ajusta de manera adecuada los valores de H_{LW} para esta posición. Sin embargo, los resultados que genera dicha formulación están limitados a las magnitudes medidas durante ese período de tiempo y únicamente es válida para ese sitio en particular.



Figura 4.9. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Cabo Blanco durante el 2014. a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW} .



Figura 4.10. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Caldera durante el 2014. a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW} .

Se incluyen como parte de la validación los diagramas de dispersión de las variables H_s , T_p , dir, H_{LW} , T_{pLW} y T_{m02LW} , junto con los respectivos parámetros de bondad de ajuste como son el BIAS, RMS, ρ y SI, los cuales miden la calidad de los resultados entre las variables reconstruidas por la técnica del *downscaling* híbrido y los datos medidos en campo, para las posiciones de Cabo Blanco y Caldera respectivamente. Ver figuras 4.11 y 4.12.

La figura 4.11 relativa a la revalidación de la técnica del *downscaling* híbrido para la ventana de tiempo del 2014 en Cabo Blanco, muestra que H_s y H_{LW} , son los parámetros cuyos resultados se ajustan más a la realidad. Las magnitudes de los parámetros de bondad de ajuste para H_s son un RMSE de 33 cm , BIAS de -3 cm, ρ de 84% y SI de 0.18; para H_{LW} el RMSE de 5 cm, el BIAS de 0.8 cm, ρ de 80% y SI de 0.48. El resto de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria presentan valores de ajuste como los errores y la correlación, con magnitudes altas y bajas respectivamente, lo cual refleja que el *downscaling* híbrido aproxima estos parámetros pero con una menor fiabilidad, en comparación con la H_s y H_{LW} .



Figura 4.11. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p y c) H_{LW} a) H_s , b) T_p y c) H_{LW} para la posición en Cabo Blanco durante el 2014.

La figura 4.12 muestra la revalidación de la técnica del *downscaling* híbrido para la ventana de tiempo del 2014 en Caldera. Los parámetros H_s y H_{LW} son los que presentan resultados que se ajustan más a la realidad. Las magnitudes de los parámetros de calidad de ajuste para H_s son un RMSE de 37 cm, el BIAS de 29 cm, ρ de 82% y SI de 0.24; para H_{LW} el RMSE de 4 cm, el BIAS de 2.0 cm, ρ de 83% y SI de 0.38. El resto de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria presentan, al igual que en Cabo Blanco, valores de ajuste como los errores y la correlación, con magnitudes altas y bajas respectivamente.



Figura 4.12. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p y c) H_{LW} para la posición de Caldera durante el 2014.

En las figuras 4.13 y 4.14 se muestra la revalidación de las series temporales de oleaje y onda infragravitatoria para las posiciones en Cabo Blanco y Caldera respectivamente, pero esta vez para una ventana de tiempo durante el 2015.

Las series temporales correspondientes a la posición en Cabo Blanco que se incluyen dentro de la figura 4.13, muestran nuevamente cómo el *downscaling* híbrido ajusta la evolución en el tiempo de los parámetros H_s , T_p , *dir* y H_{LW} . Sin embargo, a excepción de la dirección, estas mismas tres series reconstruidas presentan valores picos mayores que los datos instrumentales. En la figura 4.13 (b), además se observan magnitudes de T_p menores a 10 s, los cuales el *downscaling* híbrido no logra aproximar. El T_{pLW} presentan una menor variabilidad que los datos medidos y sus valores están dentro de la dispersión de magnitudes medidas, esto es similar a lo presentado en la revalidación de los datos del 2014.



Figura 4.13. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Cabo Blanco durante el 2015. a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW} .

Las series temporales incluidas dentro de la figura 4.14 correspondientes a Caldera, muestran cómo la técnica del *downscaling* híbrido ajusta la evolución temporal de los datos medidos en campo. No obstante, de nuevo las magnitudes de las variables de H_s , T_p y H_{LW} reconstruidas son mayores, lo cual eventualmente, tal y como se mencionó antes, se debe a una estimación inadecuada de alguno de los parámetros de disipación incluidos en el modelo numérico de propagación. La serie de T_{pLW} y T_{m02LW} de la onda infragravitatoria, reconstruidas mediante la metodología de trasferencia, presentan el mismo comportamiento que en Cabo Blanco.



Figura 4.14. Revalidación de la serie de oleaje y onda infragravitatoria reconstruida en Caldera durante el 2015. a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW} .

Las figuras 4.15 y 4.16 muestran nuevamente los diagramas de dispersión de los parámetros H_s , T_p , dir, H_{LW} , T_{pLW} y T_{m02LW} , junto con los respectivos parámetros de calidad de ajuste, para las posiciones en Cabo Blanco y Caldera respectivamente, para una ventana de tiempo durante el 2015.

La figura 4.15 muestra que las H_s , H_{LW} y *dir* obtenidas por el *downscaling* híbrido, son los parámetros cuyos resultados se ajustan más a la realidad. Las magnitudes de los parámetros de bondad de ajuste para H_s son un RMSE de 26 cm, BIAS de 9 cm, ρ de 77% y SI de 0.18; para H_{LW} el RMSE de 4 cm, el BIAS de 0.9 cm, ρ de 67% y SI de 0.44 y para la *dir* el RMSE es de 6°, el BIAS de -2.95°, ρ de 72% y SI de 0.03. El resto de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria presentan el mismo comportamiento que durante el año 2014.



Figura 4.15. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} , e) T_{pLW} y f) T_{m02LW} para la posición en Cabo Blanco durante el 2015.

La figura 4.16 relativa a la revalidación de la técnica del *downscaling* híbrido para la ventana de tiempo del 2015 en Caldera, muestra la misma situación que en Cabo Blanco, los parámetros H_s y H_{LW} son los que presentan resultados que se ajustan más a la realidad. Las magnitudes de los parámetros de calidad de ajuste para H_s son un RMSE de 31 cm, el BIAS de 19 cm, ρ de 55% y SI de 0.29; para H_{LW} el RMSE de 4 cm, el BIAS de 9 cm, ρ de 67% y SI de 0.55. El resto de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria presentan, al igual que en Cabo Blanco, valores que reflejan que el *downscaling* híbrido aproxima estos parámetros pero con una menor fiabilidad, en comparación con la H_s y H_{LW} .



Figura 4.16. Gráficos de dispersión de las variables a) H_s , b) T_p , c) H_{LW} , d) T_{pLW} y e) T_{m02LW} para la posición de Caldera durante el 2015.

Las tablas 4.1 y 4.2 muestran un resumen de las magnitudes de los descriptores de calidad de ajuste para los parámetros H_s y H_{LW} respectivamente, estimados en Cabo Blanco y Caldera para los años 2014 y 2015.

Tabla No. 4.1.Resumen de resultados de los diferentes descriptores de calidad de ajuste para los sitios de Cabo Blanco y Caldera durante los años 2014 y 2015 para el parámetro H_s .

Descriptores	Cabo Blanco		Caldera	
calidad ajuste	2014	2015	2014	2015
RMSE (m)	0.33	0.26	0.37	0.31
BIAS (m)	-0.03	0.09	0.29	0.19
ρ(%)	84	77	82	55
SI	0.18	0.18	0.24	0.29

Tabla No. 4.2. Resumen de resultados de los diferentes descriptores de calidad de ajuste para los sitios de Cabo Blanco y Caldera durante los años 2014 y 2015 para el parámetro H_{LW} .

Descriptores	Cabo Blanco		Caldera	
calidad ajuste	2014	2015	2014	2015
RMSE (m)	0.05	0.04	0.04	0.04
BIAS (m)	0.8	0.09	0.02	0.09
ρ(%)	80	67	83	67
SI	0.48	0.44	0.38	0.55

4.5 Resultados y diagnóstico del ROOL

Una vez reconstruido el reanálisis de la serie GOW2 junto con la onda infragravitatoria en Cabo Blanco y Caldera, y revalidados los resultados mediante las mediciones instrumentales realizadas en dichos sitios, es posible extrapolar lo realizado a diferentes puntos dentro del Golfo de Nicoya y de esta manera generar el ROOL (Regionalización de Oleaje y Onda Larga), el cual consiste en una base de datos horaria de 38 años de información de oleaje y onda larga distribuida en 126 puntos dentro del Golfo de Nicoya.

Los 126 puntos se han seleccionado de manera tal que la información cubra espacialmente el dominio, y a su vez se ha tomado en cuenta zonas potenciales para el desarrollo de proyectos, o que existan comunidades de pescadores, turísticas y ambientalmente importantes. La figura 4.17 muestra la distribución de los 126 puntos dentro del dominio de cálculo.



Figura 4.17. Distribución espacial de los 126 puntos dentro del Golfo de Nicoya que componen el ROOL. Fuente: fotografía de fondo tomada de google earth.

A manera de ejemplo, las figuras 4.18 y 4.19 muestra en dos puntos, Cabo Blanco y Caldera respectivamente, las series temporales horarias reconstruidas desde febrero de 1979 hasta diciembre del 2015, de los parámetros de oleaje H_s , T_p , dir y onda infragravitatorias H_{LW} , T_{m02LW} .

En las series temporales mostradas en las figuras 4.18 (a y d) y 4.19 (a y d) correspondientes a H_s y H_{LW} respectivamente, es posible visualizar las oscilaciones anuales de cada variable, con los eventos de mayor y menor energía a la mitad y final de año respectivamente. Los valores de H_s y H_{LW} , como era de esperar, son mayores en Cabo Blanco que en Caldera y las direcciones en este último sitio presentan menos oscilaciones y se concentran en una menor cantidad de direcciones. Lo anterior, es debido principalmente al proceso de refracción que sufre el oleaje cuando entra al Golfo de Nicoya.

Los valores promedios de H_s son de aproximadamente 2.0 y 1.5 m, con valores máximos que superan los 5.0 y 3.5 m en Cabo Blanco y Caldera respectivamente. Estas magnitudes se consideran coherentes según las mediciones de campo hasta ahora realizadas.

La magnitud de H_{LW} promedio para ambos sitios es del orden los 0.15 m. Sin embargo, también se estimaron valores superiores a 1.5 m en Cabo Blanco y en algunas ocasiones superiores a 1.0 m en Caldera. Dichas magnitudes son altas en relación con las que normalmente suceden y reafirman la importancia que se le debe prestar a este tipo de ondas principalmente en costa.



Figura 4.18. Serie temporal de a) H_s , b) T_p , c) dir d) H_{LW} , e) T_{m02LW} para la posición de Cabo Blanco.



Figura 4.19. Serie temporal de a) H_s , b) T_p , c) dir d) H_{LW} , e) T_{m02LW} para la posición de Caldera.

Los resultados que hasta ahora se han mostrados corresponden a la reconstrucción puntual de 38 años de información horaria de oleaje y onda infragravitatoria en los sitios en Cabo Blanco y Caldera. Sin embargo, el mismo procedimiento aplicado a estos sitios se puede reproducir en los 126 puntos distribuidos en el dominio de cálculo y representar los resultados de las diferentes parámetros por medio de mapas. La figura 4.20 muestra los mapas de H_s y H_{LW} promediados en cada punto desde 1979 al 2016 en todo el Golfo de Nicoya.



Figura 4.20. ROOL en el Golfo de Nicoya. a) promedio de H_s desde 1979 al 2016, b) promedio de H_{LW} desde 1979 al 2016.

En la figura 4.20 (a) se muestra cómo varía espacialmente H_s dentro del Golfo de Nicoya. Las magnitudes mayores presentan valores de 2.0 m y se dan en la entrada al Golfo. Conforme el oleaje entra al Golfo de Nicoya las magnitudes disminuyen, presentando valores en el centro de 1.5 m y en las zonas cercanas a costa de 1.2 m aproximadamente. En la parte más interna del golfo los valores normales de H_s van disminuyendo desde 1.0 m hasta los 0.2 m. Para la zona de puerto Caldera las magnitudes promedio de H_s son del orden de 1.0 m.

En la figura 4.20 (b) se muestra la variación espacial de H_{LW} dentro del Golfo de Nicoya. Las magnitudes de H_{LW} en la entrada al golfo y en las zonas más profundas son en promedio de 10 cm. En las zonas cercanas a costa las magnitudes son del orden de los 7 cm, pero existen sitios puntuales como por ejemplo al sur de la bahía de Caldera, donde se estiman magnitudes de H_{LW} aproximadamente de 15 cm en promedio. En las zonas más internas del golfo se han estimado valores de H_{LW} menores a los 5 cm. Para la zona en puerto Caldera las magnitudes de H_{LW} se estiman del orden de los 8 cm.

4.6 Conclusiones

A partir de la metodología de *downscaling* híbrido desarrollada por Camus et al., 2011b, se ha configurado una nueva versión del método para determinar la base de datos de oleaje histórica horaria ROOL (Regionalización de Oleaje y Onda Largo) en el Golfo de Nicoya.

El producto ROOL ha sido validado con 2 años de mediciones instrumentales y en dos sitios distintos. La validación de los diferentes parámetros que componen las variables de oleaje y onda infragravitatoria, generaron los mejores resultados para los parámetros de H_s y H_{LW} . El resto de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria presentan magnitudes de las medidas de calidad de ajuste, como los errores y la correlación, con valores altos y bajos respectivamente, en comparación con los obtenidos para los parámetros de H_s y H_{LW} .

Las diferencias entre los resultados obtenidos al reconstruir las series de oleaje y la onda infragravitatoria, por el método de *downscaling* híbrido frente a las mediciones de campo, responden a diversos factores como son:

• Los datos instrumentales representan mediciones totalmente locales y puntuales, mientras que los datos de ROOL representan los valores del oleaje promedio para cada celda de la malla utilizada.

- Las series de reanálisis del oleaje son valores aproximados a la realidad generados por un modelo numérico, el cual tiene por definición errores asociados.
- Los datos de las series de reanálisis se calibran con datos de campo y mediante métodos estadísticos, con lo cual también son aproximaciones que contienen errores.
- Los procesos de propagación de oleaje que se simulan mediante modelos numéricos, están incluidos dentro de éstos a través de formulaciones de casos generales que aproximan la física, no obstante para mejorar los resultados se tendría que calibrar las formulaciones para cada caso en particular.
- La cantidad de casos seleccionados para representar la diversidad de la base de datos y el método de interpolación utilizado también contribuyen en las diferencias obtenidas.
- La definición de la batimetría y el tratamiento de los contornos también influye en los resultados del proceso de propagación.
- Pueden existir también errores (calibración, precisión) en los datos instrumentales tomados por los sensores. Además, la resolución temporal y espacial de las medidas da lugar a ciertas in-homogeneidades a la hora comparar los datos ROOL frente a las medidas.

En razón de lo anterior, la validación realizada permite comprobar que la metodología de transferencia del clima de oleaje propuesta por Camus et al., 2011b. y Camus et al., 2013, cuyos parámetros H_s , T_p , dir, y los parámetros de onda infragravitatoria H_{LW} , T_{LW} , desde aguas profundas hasta aguas someras, es válida a pesar de las diferencias detectadas con la realidad y de gran utilidad debido a la extensión de las series calculadas.

El procedimiento acá desarrollado podrá ser replicado por otros profesionales de la región en otros sitios que se requieran, y los resultados obtenidos podrán ser utilizados para la planificación de futuras obras o para la gestión de los niveles de servicio de obras actuales que se encuentren dentro de la zona de estudio, la que se circunscribe en el litoral del Pacífico central de Costa Rica.

EXPLOTACION DE LA BASE DATOS ROOL

CAPÍTULO 5

EXPLOTACIÓN DE LA BASE DE DATOS ROOL

5.1 Introducción.

El presente capítulo consiste en aprovechar, explotar y dar continuidad a la base de datos ROOL obtenida en el capítulo anterior, extendiendo su ámbito de aplicación hasta la zona costera en playa Caldera.

La zona en cuestión ha experimentado históricamente eventos de rebase importantes, a lo largo de la estructura perimetral del talud de materiales sueltos, que protege un tramo de playa Caldera.

Dentro de los procesos de run-up (ascenso y descenso de las fluctuaciones del flujo oscilatorio sobre el talud de la estructura o playa) y rebase (caudal que supera el francobordo de la estructura de forma instantánea en relación directa con flujo oscilatorio que la alcanza) del oleaje sobre estructuras de protección costera, es bien sabido que las fluctuaciones infragravitatorias son particularmente importantes cuando el oleaje adopta altas energías asociadas a temporales y por lo tanto, la consecuente onda infragravitatoria vinculada a éstos cuenta también con oscilaciones por encima de decenas de centímetros. Considerando que, para la zona de estudio en Costa Rica, el oleaje se aproxima a la costa con un agrupamiento evidente derivado de su largo viaje desde el hemisferio sur del planeta.

El run-up se genera principalmente por la combinación de efectos del oleaje que recibe, las oscilaciones infragravitatorias que experimenta y el nivel del mar instantáneo asociado a cada estado de mar. Los valores de run-up, a su vez, se ven modificados por las características propias del elemento-estructura, tales como su talud, material de los mantos, porosidades, fricción aparente, profundidad a pie de estructura, etc. De la misma forma, el rebase sobre la estructura es un proceso heredado del run-up y en relación directa con los procesos energéticos y físicos comentados anteriormente.

Tradicionalmente, la evaluación del run-up y rebase sobre estructuras costeras se realiza con base en la conjunción de información meteo-oceanográfica y la evaluación analítica de dichas variables, con base en formulaciones semi-empíricas confeccionadas, a partir de experimentos en laboratorio y bajo hipótesis de montaje geométrico restringido (EurOtop, 2016).

Las variables meteo-oceanográficas que condicionan el cálculo analítico del run-up y rebase son, en general, asociadas únicamente al oleaje y al nivel del mar, sin considerar los efectos del viento y sin incluir las fluctuaciones infragravitatorias.

Ambas variables, viento y ondas infragravitatorias, pueden llegar a modificar dramáticamente los valores de run-up y rebase, especialmente en situaciones de temporal. El flujo de rebase tanto en caudal como en geometría pueden cambiar y comportarse radicalmente distinto a lo previsto por las herramientas semi-empíricas.

Es por ello que la nueva base de datos ROOL abre una importante puerta para mejorar el entendimiento de estos procesos derivados de interacción del oleaje con las estructuras costeras y portuarias. El poder contar con las variables de reanálisis conjunto del oleaje y las ondas infragravitatorias puede ofrecer una mejor aproximación al análisis funcional de las estructuras en costa, llegando a mejorar sustancialmente los caudales de rebase e inundación, para poder plantear estudios más realistas de diseño de estructuras de protección.

En este capítulo no se aborda el efecto del viento en las variables de run-up y rebase, sin embargo, se presenta una vía técnica para el aprovechamiento de la serie de reanálisis de las ondas infragravitatorias, a través de su explotación y empleo de la herramienta numérica de generación y propagación de oleaje y ondas largas XBeach (Roelvink et al., 2009) en su modo no hidrostático.

Para demostrar el posible impacto positivo o mejora en los resultados de run-up y rebase, se plantean distintos experimentos numéricos con la herramienta XBeach, que permiten entender el papel de las ondas infragravitatorias en los procesos de interacción del oleaje con estructuras de protección costera y portuaria.

Una vez más, los experimentos numéricos planteados se basan en los eventos sucedidos durante la semana del 1 al 8 de julio del 2014 y que también cuentan con una documentación gráfica en forma de video, frente a playa Caldera.

El capítulo se ha estructura de la siguiente manera: el apartado 5.2 recoge el estado del arte acerca de los modelos de generación y propagación de ondas largas. En el apartado 5.3 se detalla la configuración aplicada al modelo XBeach para las simulaciones numéricas. En el apartado 5.4 se muestra la descripción del sitio y las mediciones de campo; en el apartado 5.5 se muestran los resultados y finalmente en el apartado 5.6 se incluyen las conclusiones principales del presente capítulo.

5.2 Estado del arte sobre generación y propagación de ondas largas y su solución numérica

La importancia de las ondas infragravitatorias en la costa es bien conocido y han habido múltiples estudios en las últimas cuatro décadas acerca de esta variable y sus implicaciones en la morfodinámica costera (Bertin y Olabarrieta, 2016; Guza et al., 1984; Masselink, 1995; Baldock y Huntley, 2002; Baldock et al., 2004; Pomeroy et al., 2012).

CAPÍTULO 5

Los mecanismos de generación de las ondas infragravitatorias se fundamentan en dos teorías principalmente. La primera y más popular relaciona la onda infragravitatoria unida o ligada al grupo de olas (Longuet- Higgins y Stewart, 1964). Para explicar su origen se introduce el concepto del tensor de radiación, el cual en términos simples es una presión ejercida en el agua producto del oleaje, a mayores alturas de olas mayor tensor de radiación. Entre los grupos de olas donde el oleaje es más pequeño, el tensor de radiación también lo es, pero en el medio del grupo donde las olas son mayores el tensor de radiación también es mayor. Lo anterior causa un gradiente de presión entre la mitad y final del grupo de olas, que hace que se forme la onda infragravitatoria. Esta onda al llegar a la playa y disiparse el grupo de olas que la porta debido a la rotura del oleaje, se libera y se manifiesta en lo que se conoce como surf beat.

La otra teoría de generación considera la variación temporal del punto rotura como un set-up dinámico en la zona de surf (Symonds et al., 1982 y Schäffer, 1993). Las olas mayores del grupo rompen en mayor profundidad, más alejadas de la costa; esto provoca una translación del máximo set-down hacia el mar. Al mismo tiempo, al propagarse las olas mayores por la zona de rompientes, el set-up aumenta, trasladando hacia tierra la zona de swash. Estos movimientos de traslación y cambio del nivel medio constituyen en realidad una onda larga libre, que toma parte de la cantidad de movimiento de la oscilación de onda corta, que queda liberada como una onda larga. El primer mecanismo se ha demostrado en playas disipativas (Herbers et al., 1995) y el segundo mecanismo sucede cuando el oleaje rompe sobre un fondo con pendiente (Baldock, 2012).

Los modelos de propagación de oleaje que tienen en cuenta la dispersividad del oleaje, las interacciones no lineales entre componentes espectrales, y que permiten transferir la energía incidente hacia los super y sub armónicos, son los que pueden gestionar adecuadamente los procesos de surf-beat en costa debido al oleaje y a las oscilaciones infragravitatorias generadas. Estos tipo de modelos resuelven las ecuaciones hidrodinámicas del movimiento del flujo, integrado en profundidad, con evolución temporal apoyado en la teoría de las ondas largas. Entre ellos se pueden citar:

- Los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq.
- Los modelos que resuelven mediante hipótesis que simplifican las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds.
- Los modelos que resuelven las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas (NLSW, por sus siglas en inglés).

Los modelos basados en las ecuaciones de clásicas de Boussinesq (Peregrine, 1967; Mei y Le Méhauté, 1966; Madsen y Mei, 1969), cuya no linealidad en aguas poco profundas depende de los términos no lineales (δ =H/h) y en aguas intermedias depende de los términos dispersivos (μ =kh), se empleaban para resolver un oleaje similar en forma a las ondas cnoidales. Diferentes trabajos que se han desarrollado posteriormente, con la aplicación de modelos basados en las ecuaciones modificadas de Boussinesq (Nwogu, 1993), por medio del cual se simularon adecuadamente la propagación desde aguas intermedias hasta aguas someras. Luego las ecuaciones fueron nuevamente modificadas y se obtuvieron las ecuaciones extendidas de Boussinesq (Wei et al., 1995; Gobbi y Kirby, 1999), con éstas se implementaron modificaciones que mejoraron el comportamiento no lineal.

Es posible agrupar las aplicaciones de las ecuaciones de Boussinesq con base en las técnicas de resolución de las ecuaciones de gobierno, en esquemas de diferencias finitas y elementos finitos (Díaz-Hernández, 2006). Dentro del primer esquema hay aplicaciones que resuelven la zona de rompiente en una dimensión, con la inclusión de rotura para olas que rompen en descrestamiento (Madsen et al., 1997a), Asimismo otros trabajos se han enfocado en el proceso de asomeramiento y modelación del surf-beat (Madsen et al., 1997b), otros en la generación de corrientes de retorno en playas y circulaciones en la zona protegida de un dique exento paralelo a la playa (Sorensen et al., 1998). Existen también estudios detallados en los temas de ascenso descenso de la playa, run-up y rotura del oleaje (Kennedy et al., 2000; Chen et al., 2000). Dentro del esquema de elemento finito se pueden citar las aplicaciones que resuelve fenómenos altamente no lineales, en la zona de rompientes con mallas adaptativas (Sorensen y Sorensen, 2000; Sorensen, 2004) y un caso enfocado al estudio del fenómeno de resonancia portuaria (Woo y Liu, 2004a).

Dentro de los modelos que resuelven la fase desde un planteamiento de evolución en el tiempo, se encuentra los modelos CFD (Computational Fluid Dynamics), que resuelven mediante hipótesis que simplifican, las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés). Una rama de los modelos CFD es el modelo tridimensional IHFOAM y los restringidos a flujos bidimensionales en vertical 2DV RANS, como por ejemplo el modelo IH2VOF. Ambos modelan la superficie libre utilizando la técnica del volumen de fluido (VOF) para capturar la superficie. Entre las aplicaciones del IH-2VOF se encuentran los trabajos de investigación acerca de las interacciones no lineales, la generación y liberación de ondas largas en las zonas de asomeramiento y rotura (Ruju, 2013), los trabajos de simulación de propagación del oleaje y ondas largas en playas con pendiente medianamente pronunciada (Torres- Freyermuth et al., 2010), los de interacción oleaje estructura (Losada et al., 2005; Lara

et al., 2008; Guanche et al., 2008), los de hidrodinámica en la zona de surf (Lara et al., 2009) e interacción con medios porosos (Lara et al., 2011).

Los modelos basados en las ecuaciones no lineales de aguas someras (*Non Linear Shallow Water* NLSW, por sus siglas en inglés), también son modelos que resuelven la fase. Pueden simular los procesos físicos de propagación del oleaje como refracción, difracción, asomeramiento y rotura. Sin embargo, su característica principal es simular la propagación del oleaje en zonas de rotura, rompientes y zona de swash (ascenso y descenso del oleaje), donde imperan los procesos no lineales. Entre estos modelos se destaca el trabajo realizado por (Zijlema et al., 2011) quien muestra la capacidad del modelo SWASH basado en las ecuaciones NLSW en modo no hidrostático, para simular procesos en costa como la rotura, interacción no lineal entre componentes, interacción ola corriente, el run-up y sistemas circulatorios producto del oleaje. Asimismo, dentro de esta última clasificación de modelos que resuelven las NLSW promediadas en profundidad, se encuentra también el modelo XBeach (Roelvink et al., 2009) en su modo no hidrostático. No obstante, el modelo XBeach en modo hidrostático acopla un modelo espectral que promedia la fase para resolver el oleaje, con otro modelo que resuelve las NLSW para modelar la onda infragravitatoria.

El módulo hidrodinámico del modelo XBeach en su modo no hidrostático es el que se ha utilizado en esta tesis, para dar continuidad a la propagación del oleaje y la onda infragravitatoria hasta la zona de la estructura de protección costera.

El modelo XBeach en modo no hidrostático fue inicialmente desarrollado como un prototipo del modelo SWASH. Por lo tanto, el XBeach incorpora las características del modelo SWASH que se requieren para las simulaciones a realizar. Asimismo, se ha decidido utilizar el modelo XBeach en comparación con los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq y RANS, debido principalmente a que tiene menor demanda computacional (De Roo et al., 2015). Además por tratarse de un modelo de código abierto y que tiene acoplado formulaciones para resolver los cambios en la morfodinámica y el transporte de sedimentos, lo que permite evaluar de manera inmediata el impacto que puede tener en la costa

Modelo de generación y propagación del oleaje ondas largas, XBeach

El modelo XBeach (Roelvink et al., 2009) desarrollado por TU Delft es un modelo numérico que simula los efectos erosivos, producto de los procesos de inundación que suceden en la costa durante las tormentas, con lo cual es un modelo que resuelve los procesos hidrodinámicos y sus efectos en la morfología, en una escala temporal del orden de la duración de las tormentas.

El modelo XBeach simula los procesos clásicos de transformación del oleaje: refracción, difracción, asomeramiento y rotura del oleaje, además de la generación, propagación y transformación de la onda infragravitatoria originada por el agrupamiento del oleaje. El flujo oscilatorio propagado en la zona de rompientes, antes, durante y después de la rotura, produce cambios en la morfología de la costa, los cuales son simulados por el XBeach mediante la resolución de ecuaciones de transporte de sedimentos.

El modelo de simulación y propagación XBeach se puede implementar en un esquema unidimensional (1D) o bidimensional (2DH), en ambos casos puede simular los procesos hidrodinámicos de dos maneras: en modo hidrostático y en modo no hidrostático. El primero acopla las ecuaciones del balance de energía junto con las ecuaciones de St. Venant o también conocidas como las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE, por sus siglas en inglés). Para simular la generación y propagación de la onda infragravitatoria, el modelo XBeach es forzado con la información del espectro direccional del oleaje en el contorno, en su formato de parámetros o espectro de energía. Luego crea una serie sintética de superficie libre que asume fases aleatorias, energéticamente conservativa al espectro teórico de generación y estadísticamente representativa para un estado de mar.

La estrategia del modelo XBeach para generar la onda infragravitatoria vinculada a los grupos, parte del concepto de la transformada de Hilbert para crear la envolvente agrupada de la serie temporal de energía del oleaje, que se usa cómo condición de contorno para la ecuación del balance de energía, cuya representación matemática es:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma}$$
(5.1)

donde A es la acción del oleaje, cx, cy y c θ son las velocidades de propagación en el espacio geográfico y en el espacio direccional. Dw es la disipación de la energía debido a la rotura del oleaje y se calcula según la parametrización propuesta por (Daly y Roelvink et al., 2010) y σ es la frecuencia relativa del oleaje.

Cuando la ecuación del balance de energía se resuelve tomando en cuenta la variación espacial y temporal de la energía del oleaje, se produce el agrupamiento de éste y por ende las fuerzas del oleaje originadas del tensor de radiación, las cuales se incorporan en las SWE para que generen y propaguen hacia la costa la onda infragravitatoria. La expresión matemática de las SWE es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv - v_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h}$$
(5.2)
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu - v_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0$$

donde *h* es la profundidad del agua, *u*, *v* son las componentes de la velocidad Lagrangiana en *x* y *y* direcciones, τ_{bx} y τ_{by} son los esfuerzos cortantes en el fondo, τ_{sx} y τ_{sy} son los esfuerzos cortantes del viento, η es el nivel del agua, F_x y F_y son las fuerzas del oleaje originadas por el tensor de radiación, v_h es la viscosidad horizontal y *f* es el coeficiente de Coriolis.

En zonas profundas, fuera de la zona de rompientes, el tensor de radiación producido por el agrupamiento del oleaje genera la onda larga ligada al grupo según (Herbers et al., 1994), mientras que en la zona de rotura la modulación de la energía del oleaje produce la liberación de la onda infragravitatoria.

La ventaja que tiene el modo hidrostático es que, al no tener que simular las fases del oleaje, el coste computacional es menor. Su aplicación ha sido validada en áreas poco profundas como zonas de swash y en playas disipativas, donde los procesos de asomeramiento, refracción, disipación por fondo y rotura imperan (Deltares, 2015).

El modelo XBeach en modo no hidrostático permite resolver todos los procesos anteriormente mencionados e incluye los movimientos temporales de las ondas, con la consiguiente complejidad numérica añadida y el aumento en el esfuerzo computacional.

En el modo no hidrostático se aplica una combinación entre las NLSW y la corrección al término de presión, permitiendo agregar el comportamiento dispersivo a las ecuaciones de ondas largas en el proceso de propagación, por lo que el modelo es usado como un modelo de propagación de oleaje. Este modo de simulación ha sido validado en playas de pendientes fuertes como por ejemplo playas de grava (McCall et al., 2014).

Playa Caldera presenta en un tramo de su parte central un perfil reflejante con pendiente aproximada de 1/10. Es en ese sector donde se han reportado eventos de rebase que ascienden sobre la coronación de la estructura perimetral de protección y que provocan la inundación de la carretera adosada a la playa. Por lo tanto, en el presente capítulo se ha configurado el modelo XBeach para utilizarlo en modo no hidrostático, bajo el forzamiento de estados de mar de 3 horas provenientes de la serie ROOL.

5.3 Configuración del modelo de inundación XBeach.

Se ha representado mediante un esquema unidimensional (1D) en el modelo XBeach, tres diferentes secciones transversales frente a playa Caldera, como parte de las pruebas preliminares de simulación numérica para evaluar la evolución de los procesos hidrodinámicos y también para probar la configuración más eficiente del modelo. La figura 5.1 muestra la distribución espacial de las secciones transversales o perfiles frente a playa Caldera. La decisión de utilizar un esquema 1D y no 2D se basa principalmente en los siguientes aspectos:

- El menor requerimiento computacional del esquema 1D.
- Para calcular y comparar la cantidad de eventos de rebase que ascienden sobre la estructura perimetral de protección es suficiente con un esquema 1D.
- Los forzamientos de cada perfil simulado colindan con el contorno del modelo.
- No se requiere calcular patrones de corrientes bidimensionales.
- No se cuenta con una topo-batimetría de alta resolución que permita el montaje detallado de un modelo 2D.

Por todo lo anteriormente expuesto, se considera suficiente llevar a cabo una aproximación 1D y ser consecuente con el objetivo principal del presente capítulo, que es la directa comparación entre distintos escenarios numéricos, que pongan de manifiesto la importancia de incluir las oscilaciones infragravitatorias en el sistema.

El origen de cada perfil en el agua inicia en la cota batimétrica de -15 m aproximadamente y se extienden hasta cota topográfica cercana a los 7 m. Cada uno de los tres perfiles se han discretizado con un tamaño de celda Δx variable, donde en la parte más profunda inicia con un Δx de 50 m, luego pasa a 10 m, posteriormente a 4 m y se finaliza en la zona de playa correspondiente a los últimos 50 m con una resolución de Δx igual a 1 m. Para lograr dicha configuración se realizaron diversas pruebas procurando una adecuada resolución de la onda y que el paso del tiempo fuese el adecuado, para evitar tanto lo errores numéricos como tiempos de cálculo elevados.



Figura 5.1.a) Nodos de la serie ROOL que se utilizan como forzamiento del XBeach. b) Ubicación de las tres secciones transversales frente a playa Caldera simuladas con el modelo XBeach, también se muestra la localización del Aquadopp y cámara de vídeo.

Se utilizó, como parte de las pruebas preliminares, para forzar el modelo XBeach el estado de mar del 4 de julio del 2014, el cual fue uno de los más energéticos registrados durante la tormenta sucedida la semana del 1 al 8 de julio de ese año. Dicho estado de mar a su vez fue uno de los utilizados en el anterior proceso de propagación mediante la técnica del *downscaling* dinámico (ver capítulo 3), realizado con el modelo SWAN. Por lo tanto, se cuenta con la información espectral en cada uno de los nodos de color rojo que se muestran en la figura 5.1 (a), que son parte de la serie ROOL y que coinciden con el origen de los perfiles simulados con el modelo XBeach (ver figura 5.1 (b)). En cada nodo se tiene la información espectral correspondiente al estado de mar antes mencionado y con los que se ha forzado cada uno de los tres modelos XBeach.

La figura 5.2 muestra un ejemplo del espectro direccional utilizado como contorno del modelo XBeach del perfil central. El espectro contiene la energía tanto del oleaje como la asociada a la frecuencia infragravitatoria.



Figura 5.2. Espectro direccional con el contenido de energía asociado al oleaje y a la onda infragravitatoria, obtenido en un punto de la malla de cálculo del modelo SWAN, el cual coincide con el contorno del modelo XBeach para el perfil central.

Los primeros experimentos consistieron en forzar cada modelo 1D del XBeach con el espectro direccional de energía completo, para evaluar la destreza hidrodinámica del modelo en la transferencia de energía, entre las bandas de energía del oleaje (SW) y baja frecuencia (LW). Asimismo, para comparar los resultados se forzó también cada modelo XBeach, con los espectros pero sólo con el contenido de energía relativo al oleaje (SW). En ambos casos los espectros simulados correspondieron a un estado de mar de 3 horas. La tabla 5.1 muestra los experimentos numéricos realizados:

Tabla No. 5.1. Experimentos numéricos realizados con el modelo 1D XBeach en los tres perfiles (norte, central y sur).

Contenido de energía de los	Perfil norte	Perfil central	Perfil sur
espectros			
SW (energía del oleaje)	spcP1 SW	spcP2 SW	spcP3 SW
SW+LW (energía del oleaje y	spcP1 SW+LW	spcP2 SW+LW	spcP3 SW+LW
onda infragravitatoria)			

Luego de evaluar la habilidad del modelo para generar y propagar el oleaje y la onda infragravitatoria a lo largo de cada perfil, se han realizado otra serie de experimentos que consistieron en valorar, la diferencia de cantidad de rebases que suceden cuando el modelo es forzado con los experimentos SW+LW, frente a forzar el modelo XBeach con los experimentos SW. Estos experimentos se realizaron sólo para el perfil central, que es donde se tiene evidencia, con base en el vídeo grabado por la cámara instalada en frente de playa Caldera, de que sucedieron eventos de rebase sobre la coronación de la estructura perimetral de protección. Dichos experimentos son los denominados spcP2 SW y spcP2 SW+LW.

Ambos experimentos se forzaron con espectros cuya duración del estado de mar fue de 3 horas, tiempo que es a priori considerado lo suficientemente largo, para contar con la adecuada aleatoriedad de las fases del oleaje generado, un adecuado peso estadístico y una buena integración energética del oleaje, para dar cumplimiento al concepto de estado de mar. De igual manera, para evaluar el efecto de la aleatoriedad de las fases que realiza el modelo, se repitieron los experimentos spcP2 SW y spcP2 SW+LW un total de 50 veces cada uno.

Todos los experimentos numéricos realizados consideraron el nivel de la marea astronómica correspondiente al estado de mar utilizado para la simulación.

La tabla 5.2 muestra, a manera de ejemplo, los principales parámetros de entrada con los que se ha forzado el modelo XBeach, correspondiente al experimento spcP2 SW y spcP2 SW+LW. El resto de parámetros utilizados son los valores que por defecto tiene el modelo configurados. Para los experimentos spcP1 SW y spcP1 SW+LW y spcP3 SW y spcP3 SW+LW lo que se cambia son el contorno de la batimetría y los forzamientos relativos a los espectros direccionales, los demás parámetros se mantienen iguales.

Tabla No. 5.2. Parámetros de entrada del modelo XBeach. Caso de ejemplo: perfil central (spcP2).

Parámetros de entrada.	Definición.	Valor	Unidad
Procesos físicos.			
nonh	XBeach en modo no hidrostático, resuelve las	variable	-
	NLSW.		
Malla de cálculo y			
batimetría.			
nx	Número de celdas computacionales en el eje x.	552	-
ny	Número de celdas computacionales en el eje y.	0	-
alfa	Ángulo computacional relativo al Este.	30	grados
thetamin	Límite direccional inferior.	-60	grados
thetamax	Límite direccional superior.	120	grados
dtheta	Resolución direccional.	20	grados
Tiempo de cálculo.			
CFL	Número de Courant	0.9	-
tsop	Tiempo total de la simulación	10800	seg
Constantes físicas.			
rho	Densidad del agua	1025	kg/m ³
g	Aceleración de la gravedad	9.81	m/s ²
Condiciones de oleaje.			
instat	Fichero que contiene el espectro direccional de	Swan	-
	oleaje generado por el SWAN.	(variable)	
bcfile	Fichero que contiene el espectro direccional de	filelist	-
	oleaje generado por el SWAN		
Condiciones de marea.			
zs0file	Nombre del fichero que contiene la serie de	variable	-
	marea.		

CAPÍTULO 5

Parámetros de las condiciones de contorno del fluio.			
front	Tipo de condición de contorno	nonh_1d	-
left	Tipo de condición de contorno	neuman	-
right	Tipo de condición de contorno	neuman	-
back	Tipo de condición de contorno	abs_1d	-
ARC	Tipo de condición de contorno	1	
Parámetros del flujo.			
bedfriction	Fórmula de fricción con el fondo.	white-	
		colebrook	
Parámetros corrección no			
hidrostática			
solver	Solución usada para resolver problemas lineales	tridiag	
dispc	Coeficiente gradiente de la presión vertical	-1	
nhbreaker	Modelo de rotura no hidrostático	2	
Topt	Período absoluto	21	S

para comparar los resultados de los experimentos se utilizaron los espectros de energía a lo largo de cada perfil y la cantidad de eventos de rebase sobre la coronación de la estructura perimetral de protección, localizada en un tramo del perfil central.

5.4 Descripción del sitio y observaciones de campo.

En el tramo de la playa correspondiente al perfil central, discurre de forma perimetral una carretera que da acceso a puerto Caldera, que es el principal puerto comercial del Pacífico de Costa Rica, lo cual hace que esta vía de comunicación de tráfico rodado sea un elemento estratégico de especial relevancia para el país. La figura 5.3 recoge diferentes instantes que ponen en evidencia los efectos provocados, por eventos de rebase e inundación que han sucedido en diferentes fechas y que han afectado las infraestructuras que se localizan en playa Caldera y adyacente a ésta.

EXPLOTACION DE LA BASE DATOS ROOL



Figura 5.3. Imágenes que evidencian los efectos de los eventos de inundación en las infraestructuras adyacentes a playa Caldera. a), b) y c) viviendas afectadas por eventos de inundación, d), e) y f) carretera de acceso al puerto afectada por eventos de inundación.

CAPÍTULO 5

Históricamente la carretera de acceso al puerto a la altura del perfil central, ha experimentado eventos de rebase e inundación. De la misma forma los tramos de costa representados por los perfiles norte y sur, también se han visto expuestos a estos eventos, incluso registrando daños en la escollera de protección perimetral que allí se encuentra, lo cual supone una causa cíclica y anual que provoca importantes pérdidas económicas.

Los perfiles que se muestran en la figura 5.1 (b) se han generado a partir de la integración de la información batimétrica y topográfica disponible, siendo esta del año 2013 y 2015 respectivamente. La figura 5.4 muestra el tramo correspondiente a la playa en cada uno de los 3 perfiles simulados en el modelo XBeach. El tipo de sedimento del cual está formada la playa es arena con un D_{50} de aproximadamente 0.3 mm.

Se destaca cómo la pendiente de los perfiles sur y central en el tramo de la playa intermareal aumenta en las cercanías del puerto, esto se debe a que existe una influencia por la zona de difracción que genera el rompeolas del puerto. El perfil norte, al estar en un tramo de playa más expuesto a la dinámica del oleaje, presenta una pendiente menor.

La playa en los tramos representados por los perfiles central y sur, presentan una cota de coronación del orden de los 7 m, mientras que el tramo por donde pasa el perfil norte es de 6 m aproximadamente.


Figura 5.4. Sección transversal del tramo de playa de los perfiles. a) perfil norte, b) perfil central y c) perfil sur.

Entre los días 4 y 5 de julio se midió el pico máximo de la tormenta que causó eventos de inundación y generó que la carretera saliera de operación durante cierto tiempo. La figura 1.3 incluida en el capítulo 1 muestra una secuencia de imágenes del vídeo que se tiene como parte de la documentación, correspondiente a 8 s, que ilustran uno de los momentos cuando el nivel del agua rebasa la coronación de la estructura perimetral de protección e inunda la carretera.

5.5 Resultados de la simulación numérica

Los resultados relacionados con las primeras pruebas realizadas se basan en analizar la variación de las formas espectrales en distintos puntos a lo largo de cada uno de los perfiles, con el fin de valorar la destreza del modelo para generar la onda infragravitatoria en las diferentes localizaciones a lo largo del perfil. Para ello se colocaron un total de 4 puntos de control donde se determinaron los espectros frecuenciales de energía. Se colocó un punto de control cerca del inicio de cada perfil, donde el contenido de energía es principalmente debido al oleaje, los restantes puntos se colocaron a lo largo del perfil, procurando que al menos uno se encuentre en la zona de rompientes que es donde debe predominar el contenido de energía asociado a la baja frecuencia.

La figura 5.5 muestra el perfil norte y la ubicación de los 4 puntos de control (G1, G2, G3 y G4) a lo largo del perfil, donde se obtuvieron como respuesta del modelo XBeach los espectros frecuenciales de energía relativos a los casos spcP1 SW y spcP1 SW+LW.



Figura 5.5. Esquema 1D del modelo XBeach correspondiente al perfil norte y distribución de los 4 puntos de control (G1, G2, G3 y G4) a lo largo del mismo, donde se obtuvieron como respuesta los espectros frecuenciales de energía.

La figura 5.6 (columna SW) muestra la variación de los espectros frecuencias en los puntos G1, G2, G3 y G4 a lo largo del perfil norte para el caso spcP1 SW. El espectro en la ubicación G1 SW tiene únicamente energía correspondiente al oleaje, lo cual coincide con el espectro de

forzamiento de dicho caso, siendo que únicamente incluye energía de la banda frecuencial por encima de 1/30 Hz; en la ubicación de G2 SW, se observa que se ha transferido energía a las bajas frecuencias y también a la alta frecuencia; en la ubicación del G3 SW se constata que la energía en las bajas frecuencias sigue en aumento y la asociada al oleaje tiende a disminuir y finalmente en la ubicación del G4 SW, el pico de energía del espectro está en la banda de la baja frecuencia.

La figura 5.6 (columna SW+LW) muestran la variación de los espectros de energía, pero esta vez para el caso spcP2 SW+LW; en la ubicación del G1 SW+LW el espectro tiene la mayor cantidad de energía de oleaje pero también se observa la pre-existencia de energía en la baja frecuencia, lo cual es congruente con el espectro de forzamiento para este caso de la simulación; en la ubicación del G2 SW+LW se muestra una forma espectral similar al G2 SW, pero con la diferencia que el contenido de energía en baja frecuencia es mayor y la del oleaje levemente menor; en la ubicación del G3 SW+LW el contenido de energía en la banda de la baja frecuencia aumentó y la energía del oleaje disminuyó y por último en la ubicación del G4 SW+LW la energía del espectro está asociado principalmente a las bajas frecuencias.

Es evidente que al comparar los puntos G1, G2, G3 y G4 en ambas columnas (SW y SW+LW), la máxima magnitud de la energía asociada a la baja frecuencia, siempre es mayor en los espectros SW+LW frente a los espectros SW.



Figura 5.6. Espectros frecuenciales de energía en los puntos de control (filas G1, G2, G3 y G4) a lo largo del perfil norte. Casos spcP1 SW y spcP1 SW+LW.

Los resultados de los experimentos spcP2 SW y spcP2 SW+LW y spcP3 SW y spcP3 SW+LW muestran el mismo patrón que el experimento spcP1 SW y spcP1 SW+LW descrito previamente. Las variaciones que se han detectado es en cuanto a las magnitudes de las energías, las cuales son menores para los experimentos spcP3 SW y spcP3 SW+LW debido a que el perfil se localiza en una zona más abrigada, mientras que las magnitudes de las energías estimadas en el perfil central, principalmente para el experimento spcP2 SW+LW son las mayores.

Por medio de estos experimentos queda comprobada la capacidad del modelo XBeach en modo no hidrostático, para transferir la energía del oleaje hacia las bajas frecuencias a lo largo de la zona de surf y swash. Además, forzar el modelo con la pre-existencia del contenido de energía relativo a la onda infragravitatoria, genera resultados del orden de un 10% más de energía en comparación con no incluir previamente el contenido de la onda infragravitatoria. Las figuras 5.7 y 5.8 muestran los resultados correspondientes al perfil y espectros de los experimentos spcP2 SW y spcP2 SW+LW y las figuras 5.9 y 5.10 los correspondientes al perfil y espectros de los experimentos de los experimentos spcP3 SW y spcP3 SW+LW.



Figura 5.7. Esquema 1D del modelo XBeach correspondiente al perfil central y distribución de los 4 puntos de control (G1, G2, G3 y G4) a lo largo del mismo, donde se obtuvieron como respuesta los espectros frecuenciales de energía.



Figura 5.8. Espectros frecuenciales de energía en los puntos de control (filas G1, G2, G3 y G4) a lo largo del perfil central. Caso spcP2 SW y caso spcP2 SW+LW.



Figura 5.9. Esquema 1D del modelo XBeach correspondiente al perfil sur y distribución de los 4 puntos de control (G1, G2, G3 y G4) a lo largo del mismo, donde se obtuvieron como respuesta los espectros frecuenciales de energía.



Figura 5.10. Espectros frecuenciales de energía en los puntos de control (filas G1, G2, G3 y G4) a lo largo del perfil sur. Caso spcP3 SW y caso spcP3 SW+LW.

Por último, los resultados de los experimentos spcP2 SW y spcP2 SW+LW relativos a cuantificar el número de rebases sobre la coronación de la estructura perimetral de protección, se muestran en la figura 5.11 (a y b) respectivamente. Estos resultados demuestran que el estado de mar simulado genera el rebase y por ende produce la inundación en ambos experimentos. Dichos resultados se validan de manera cualitativa con la información del vídeo. Sin embargo, lo más destacable es que el número de rebases que resultan del experimento spcP2 SW+LW, es un 30% más que los obtenidos del experimento spcP2 SW. El porcentaje obtenido corresponde al promedio que resultan de comparar las 50 simulaciones que se realizaron para cada experimento, cuya desviación estándar es de un 5%. De esta manera se valida que el efecto de la aleatoriedad de las fases que realiza el modelo no es significativo. Por otra parte, se confirma que 3 horas de simulación es suficiente para dar cumplimiento al concepto de estado de mar



Figura 5.11. a) Rebases correspondientes al casos spcP2 SW y b) Rebases correspondientes al casos spcP2 SW+LW.

La diferencia porcentual calculada tiene relevancia en diferentes aplicaciones en la ingeniería de costas, como el cálculo del transporte de sedimentos, cambios en la morfología de la playa y en la gestión operativa de las obras. En relación con esta última aplicación, si se utiliza por ejemplo como referencia el caudal de rebase máximo (Franco L. et al., 1994) o el recomendado por el manual (EurOtop, 2016), para que permanezcan vehículos sobre la cresta de un dique adosado a una ruta, puede darse el caso que al calcular el rebase mediante la manera tradicional, ya sea aproximándolo por formulaciones analíticas o numéricas, forzando el modelo únicamente con el contenido de energía del oleaje, puede que el resultado esté por debajo del umbral recomendado por ambas (EurOtop, 2016).

Sin embargo, al tomar en cuenta el espectro completo cuyo número de rebases se ha calculado en un 30% más, la cantidad de eventos de rebases aumentaría y podría superar el nivel máximo recomendado por el manual (EurOtop, 2016), y por ende repercutir en el nivel de funcionalidad de la obra.

Este ejemplo concreto expone la importancia de considerar la energía que aporta la onda infragravitatoria al espectro y trabajar con el contenido de energía tanto del oleaje como el de la baja frecuencia, tal y como lo contiene el ROOL.

5.6 Conclusiones

Este capítulo demuestra uno de los posibles usos prácticos de la nueva base de datos ROOL para el ámbito de la ingeniería costera. Dicha base de datos se ha utilizado como forzamiento del modelo numérico de generación y propagación de oleaje y ondas largas XBeach, con el fin de continuar la propagación del oleaje y la onda infragravitatoria hasta la playa y poder analizar la interacción de estos forzamientos con las estructuras costeras naturales y artificiales.

Se ha constatado la destreza del modelo XBeach en modo no hidrostático, para generar y propagar la onda infragravitatoria desde nodos del ROOL hasta la playa. Los resultados de la generación y propagación de la onda infragravitatoria, se han representado mediante los espectros frecuenciales de energía a lo largo de 3 perfiles, por medio de los que se ha comprobado la habilidad del modelo para transferir la energía de la banda del oleaje a la baja frecuencia en la zona de rotura y swash.

El forzar el modelo XBeach con los espectros de salida del modelo SWAN, permite acoplar ambos modelos y continuar la propagación del oleaje y la onda infragravitatoria desde aguas profundas hasta la playa, mediante una técnica que ha demostrado ser adecuada y de bajo costo computacional.

Los resultados de los experimentos spcP2 SW y spcP2 SW+LW han sido validados de manera cualitativa con la información grabada por la cámara de vídeo colocada en playa Caldera.

Se ha estimado en promedio un 30% más de eventos de rebases cuando el modelo XBeach es forzado con el contenido de energía completo, es decir incluyendo la energía tanto del oleaje y de las oscilaciones infragravitatorias, frente a forzar el modelo únicamente con el contenido de energía asociado al oleaje cómo tradicionalmente se realiza.

Se ha demostrado la importancia, mediante un ejemplo teórico, de incorporar en el cálculo del rebase el contenido de energía asociado a la baja frecuencia, debido a que si se omite, tal y cómo lo realizan las formulaciones analíticas y numéricas, que son forzados sólo con el contenido de energía del oleaje, se puede estar cometiendo errores que tienen una relación directa con el nivel de servicio operativo de las obras. Por lo tanto, el trabajar con el contenido de energía tanto del oleaje como el de las ondas infragravitatorias, tal y como lo contiene el ROOL, es una condición más realista en sitios donde el oleaje que incide la zona ha adoptado formas *Swell* muy evidentes, resultando en un contenido de energía asociado a las oscilaciones infragravitatorias altamente condicionante de los efectos de la interacción del flujo total con las estructuras costeras y portuarias.

SO3: SISTEMA OPERACIONAL DE OLEAJE Y ONDA LARGA

6.1 Introducción

La sociedad se puede ver afectada o beneficiada de las variaciones del clima en dependencia de su habilidad para adaptarse a esos cambios. Entre más precisa y con más tiempo de anticipación se cuente con la información acerca de las situaciones futuras que se vayan a presentar y sus posibles efectos, seremos capaces de gestionar mejor, los recursos necesarios para adaptarse a las nuevas condiciones.

Para determinar estas situaciones, se recurre a la ciencia del modelado de los sistemas climáticos. De esta forma, y complementado con el creciente recurso tecnológico, se han implementado sistemas operacionales de pronósticos meteo-oceánicos, que tienen como objetivo principal proveer información futura en diferentes escalas espacio temporales. Las escalas de trabajo están en función, principalmente, de la aplicación que se le quiera dar a la información, siendo la escala temporal del corto y mediano plazo las más populares y comerciales.

Los sistemas operacionales de pronóstico del clima son herramientas que sirven de apoyo en la gestión de emergencias, mitigación de impactos, prevención de pérdidas económicas y humanas. Por otra parte, además de servir en la prevención, contribuyen en la generación de riqueza, al crear información de utilidad a diferentes sectores como el de energía, agricultura y transporte. Por ello se requiere que los sistemas operacionales de pronóstico sean fiables. Esto se constata al ser evaluados a posteriori con observaciones de campo que demuestren su relación con el mundo real.

En este mismo contexto pero específico a la ingeniería de costas y puertos, los sistemas operacionales de clima marítimo, permiten conocer de manera anticipada situaciones de riesgo, contribuyendo a prevenir y/o mitigar efectos como inundaciones, erosiones en playas, delimitar zonas no aptas para el baño en las playas, definir la ruta de navegación más segura, predecir si un accidente de vertido de hidrocarburos llegará a zonas ambientalmente frágiles, si el puerto podrá operar dentro de los siguientes días, si es posible acceder y dar mantenimiento a estructuras off-shore y también para operaciones de salvamento marítimo, entre otras aplicaciones.

Las aplicaciones antes mencionadas, requieren que los sistemas de predicción de corto plazo (predicciones generalmente hasta 14 días) del clima marítimo deban contar con una alta resolución espacial y temporal y que la precisión del pronóstico esté acotada (evaluación de la incertidumbre). Esta información es fundamental para que los tomadores de decisiones la utilicen como apoyo para su gestión. No obstante, los sistemas operacionales de clima marítimo

que realizan ciertas agencias meteorológicas a nivel mundial, como por ejemplo la NOAA, tienen sus sistemas abiertos al público con configuraciones que no permiten detallar situaciones que son de interés al ámbito de la ingeniería de costas, debido a su baja resolución espacial.

Para que los sistemas operacionales de clima marítimo, específicamente los de oleaje, generen información de mayor utilidad, se recurre a técnicas de *downscaling* para aumentar la resolución a una escala adecuada y confrontar sus resultados de manera frecuente con mediciones de campo.

En Costa Rica no existe una agencia que desarrolle y gestione un sistema operacional del oleaje a lo largo de la costa. En este capítulo, se apoya en el trabajo realizado en la determinación del ROOL en el capítulo 4 y en el sistema operacional NWW3 de la NOAA, para mostrar la implementación del sistema operacional en el corto plazo de oleaje y onda larga (SO3) de alta resolución en el Golfo de Nicoya, lugar donde existe una actividad comercial de importancia para el país, debido a que se localización el principal puerto comercial del litoral Pacífico, se da la actividad de pesca y también turística.

Previamente a puntualizar el desarrollo del SO3, en el apartado 6.2 se recoge el estado del arte acerca de los sistemas operacionales de oleaje en el corto plazo. El apartado 6.3 muestra la metodología seguida para implementación del SO3; en el apartado 6.4 se analizan los resultados del SO3 debido a las ligeras perturbaciones en las condiciones iniciales de las diferentes predicciones. En el apartado 6.5 se evalúa la destreza del SO3 espacial y temporalmente en los pronósticos a corto plazo, y el apartado 6.6 incluye las conclusiones más importantes de este capítulo.

6.2 Estado del arte

En el pasado, y con suficiente entrenamiento y experiencia, se efectuaban predicciones de oleaje a partir de cartas náuticas del viento previsto en superficie; sin embargo, este método resultaba subjetivo y poco fiable. Con la aparición de los ordenadores con suficiente potencia fue posible resolver en un área y período de tiempo determinado, las ecuaciones diferenciales que representan los mecanismos de generación, propagación y disipación del oleaje mediante modelos de generación de oleaje, siempre y cuando se disponga de la predicción de los patrones sinópticos de circulación atmosférica sobre el área de generación del oleaje.

Una predicción basada en un modelo de generación y propagación de oleaje, constituye un potencial sistema operacional de oleaje. Existen dentro de los sistemas operacionales de oleaje diferentes escalas espaciales y temporales. Entre las escalas espaciales está la oceánica que es de interés común para diferentes sectores relacionados con el mar y la escala local que es de interés

para autoridades portuarias y gestores de gobiernos locales costeros, entre otros. En la escala temporal para sistemas operaciones de corto plazo (nunca superior al mes) se puede considerar el muy corto plazo (menos de 24 horas), el corto plazo (entre 24 y 72 horas), el medio plazo (hasta 15 días) y la escala mensual (Carretero, 2005).

Los sistemas operacionales de oleaje de escala oceánica son aplicaciones basadas en el *downscaling* dinámico, que consiste en el uso de modelos de generación y propagación de oleaje que son forzados con predicciones atmosféricas a escala global. Entre estos modelos se encuentra el ECMWF (Gunter et al, 1992) y el NWW3 de la NOAA/NWS/NCEP (Tolman, 2002g).

La baja resolución espacial de estos modelos hace que no se puedan utilizar directamente en estudios de destalle, por lo que es necesario recurrir a técnicas de *downscaling* que permitan llevar la información a una escala local útil. En la escala local y del corto plazo, los sistemas operacionales de oleaje se basan en las tres aplicaciones de *downscaling*: dinámico, estadístico e híbrido. Todos ellos parten de las predicciones atmosféricas a corto plazo (De Girolamo et al., 2017).

Los sistemas operacionales en la escala local y del corto plazo basados en el *downscaling* dinámico son los más populares. Estos utilizan modelos regionales anidados a las salidas de baja resolución de los modelos globales, simulan numéricamente el clima a una resolución más alta sobre un área limitada. Entre ellos se pueden citar SAPO (Gómez y Carretero, 2000), MetoGalicia (Carrecedo García et al., 2005), también están los trabajos realizados por Alves et al., 2012; Sandhya et al., 2014; Lira et al, 2014; Bento et al., 2015 y Soares et al., 2016. Otros trabajos han incluido en sus sistemas operacionales además del oleaje otras variables como corrientes (por ejemplo, costero Lim et al., 2013 y Sembiring et al, 2015).

Los sistemas operacionales basados en la técnica del *downscaling* estadístico utilizan modelos estadísticos/algoritmos que relacionan las salidas de baja resolución de los modelos globales (predictores), con las observaciones locales (predictandos) sobre la zona de interés. Las aplicaciones más comunes están relacionadas con variables meteorológicas (Cofiño et al., 2004; Manzanas, 2016; Kalra et al, 2005; Zanuttigh et al., 2013). Entre los sistemas operacionales de oleaje basados en la técnica de *downscaling* estadístico existen trabajos basados en modelos de regresión múltiple entre altura de ola significante y el periodo medio en un determinado punto y los campos de presiones y/o viento en varios puntos (Kobune et al, 1988). Otros modelos se basan en la regresión lineal pero utilizando previamente un filtro de Kalman, para la separación de la componente en el largo plazo y en el corto plazo de las presiones atmosféricas, y en la posterior aplicación de la técnica de componentes principales para eliminar la correlación entre

los datos de presión. El modelo de regresión se establece entre las componentes principales de las presiones y la altura de ola en una determinada localización en aguas someras (Hashimito et al., 2003).

Los sistemas operacionales basados en técnicas de *downscaling* híbridos consisten en trasladar el oleaje desde aguas profundas hasta la costa, mediante el acoplamiento de modelos de generación de oleaje de escala oceánica, forzados con datos atmosféricos a escala global y luego transferir los resultados hasta la costa, mediante diferentes métodos estadísticos. Entre los métodos estadísticos existen trabajos con análisis de componentes principales, para obtener los patrones ortogonales y sus intensidades, también por medio de coeficientes de transferencia calculados a partir del filtro de Kalman, para transferencia de los patrones más significativos de los espectros del oleaje en indefinidas y la altura de ola en una localización específica en profundidades someras (Kobayashi et al., 2004). Trabajos más recientes relacionados a los sistemas operaciones de oleaje, pero a una escala de medio a largo plazo es el realizado por Ruiz et al., 2016, el cual se apoya en la metodología de transferencia del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras presentada por Camus et al., 2013; Fan y Chen, 2006.

6.3 Metodología

EL desarrollo del sistema SO3 está basado en la realización de los pasos que se detallan en este apartado y que se resumen de manera gráfica por medio del diagrama de flujo de la figura 6.1.



Figura 6.1. Diagrama de metodología para la obtención del SO3.

A continuación se describen cada uno de los pasos mostrados en el diagrama 1) sistema operacional de oleaje NWW3, 2) calibración más marea, 3) ROOL y 4) SO3.

6.3.1. Sistema operacional NWW3 de la NOAA/NWS/NCEP

La National Oceanic and Atmospheric Administration en conjunto con National Weather Service y National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NWS/NCEP, por sus siglas en inglés), cuenta con un sistema operacional de pronóstico de oleaje denominado NWW3, que está compuesto por un modelo global y cinco regionales. El modelo global está forzado con información de campos de viento, diferencias de temperatura de la superficie del océano y concentración de hielo sobre la superficie del mar; el modelo global cuenta con 180 horas de pronóstico. En relación con la información de viento, ésta proviene del sistema GDAS (Global Data Assimilation Scheme) y se usa para forzar el sistema de pronóstico GFS (Global Forecast System), más detalles de esta base de datos se han proporcionado en el capítulo 2. El modelo que cubre la zona de estudio es el global denominado NWW3, que tiene una malla de cálculo de 1.25° x 1.0° , se inicializa cuatro veces al día (00z, 06z, 12z y 18z), los datos de salida son los parámetros de oleaje H_s , T_m , *dir* y viento con resolución de 3 horas.

Para esta investigación se cuenta con una base de datos histórica de 3 años (a partir del 2014 y hasta el 2016 inclusive) del sistema operacional NWW3 del modelo global, para cada una de las cuatro inicializaciones diarias. En la figura 6.2 se muestra el punto de malla más próximo al Golfo de Nicoya del sistema NWW3 global.



Figura 6.2. Localización del nodo con información del sistema operacional NWW3 (punto color rojo) y puntos del ROOL (círculos de color negro). Fuente: fotografía tomada de google earth.

6.3.2. Calibración más marea astronómica

Los datos del sistema operacional NWW3 se encuentran en aguas abiertas y han sido generados mediante modelado numérico. Debido a que se dispone de 3 años históricos de datos se pueden validar frente a observaciones y corregirse (calibrarse) si es necesario. Para calibrar los datos disponibles en los contornos del sistema operacional, se ha utilizado el algoritmo matemático descrito en el capítulo 3 de esta tesis, que consiste en corregir los valores de H_s del sistema operacional NWW3 por direcciones para obtener una H_s^C calibrada (Mínguez et al., 2011).

Posteriormente, debido a que el sistema operacional NWW3 suministra el parámetro de oleaje T_m y como el ROOL se generó usando el parámetro T_p , se debe de calcular este último para incluirlo dentro de los parámetros del sistema operacional NWW3. El NWW3 no indica de manera clara el tipo de período medio que genera, con lo cual asumiendo que es el T_{mo2} se obtiene una función polinomial de tercer grado, que relaciona el T_{mo2} del NWW3 con el T_p del ROOL en el período entre el 2014 y 2016, que es cuando se tiene coincidencia temporal de la información.

La figura 6.3 muestra la gráfica T_{mo2} - T_p junto con la función polinomial de tercer grado de ajuste, que gráficamente se representa mediante la línea de color rojo. La línea de color verde es la relación media y los colores del gráfico lo que representan es la frecuencia de presentación de los períodos, siendo entre más rojo mayor presentación y más azul menor presentación de ocurrencia.



Figura 6.3. Relación T_{mo2} - T_p con su frecuencia de presentación por diferencias de color (rojo más frecuente y azul menor presentación de ocurrencia), función polinomial de ajuste (línea de color rojo) y relación media (línea de color verde).

Se incluye, adicionalmente a los datos del sistema operacional, el nivel de marea correspondiente al período del pronóstico histórico del NWW3 entre los años 2014 y 2016, para lo cual se utiliza nuevamente el programa TOGA, descrito en el capítulo 2, para calcular las mareas cada 3 horas y de esta forma coincidan temporalmente con los datos del sistema operacional NWW3.

6.3.3. ROOL

Una vez calibrado el parámetro de oleaje H_s , incorporado el parámetro T_p y la marea a los datos del sistema operacional NWW3, específicamente al nodo que se localiza en el contorno de la zona de estudio, se traslada esta información a cada uno de los 126 puntos que componen el ROOL (ver figura 6.2).

Para trasladar la información del sistema operacional NWW3 desde aguas profundas a cada punto dentro del Golfo de Nicoya, se utiliza nuevamente la técnica del *downscaling* estadístico, específicamente la interpolación basada en funciones de base radial (RBF, por sus siglas en inglés), la cual fue utilizada también en el capítulo 4 para reconstruir las series de oleaje y onda infragravitatoria en cada uno de los 126 puntos y así conformar el ROOL.

La técnica de interpolación RBF consiste en reconstruir el clima marítimo a partir de calcular la función de interpolación de la altura de ola propagada, del periodo medio propagado, de la componente x de dirección media propagada y una función de interpolación de la componente y de dirección media propagada. Estas funciones RBF permiten inferir los valores de los parámetros propagados en cualquier otra situación de clima marítimo en aguas profundas.

6.3.4. El sistema operacional de oleaje y onda larga (SO3)

El sistema operacional de oleaje y onda larga (SO3) consiste en realizar los pasos mostrados en la figura 6.1. Se inicia realizando los ajustes al sistema operacional NWW3, aplicando la técnica del *downscaling* estadístico, específicamente la interpolación basada en funciones de base radial, para trasladar desde aguas profundas al interior del Golfo de Nicoya el sistema operacional NWW3. El resultado de aplicar este procedimiento a la base datos del NWW3 desde el 2014 al 2016, son las predicciones pasadas del oleaje de alta resolución en el Golfo de Nicoya.

El contar con el registro histórico mediante el sistema SO3 es importante debido a que, al cubrir un período de tiempo en el cual se cuenta con información histórica (base de datos ROOL a partir de reanálisis), se puede analizar la pericia, incertidumbre, mejor configuración, etc., del sistema de predicción de oleaje a corto plazo propuesto.

Por otro lado, el sistema operacional NWW3 es un sistema de pronóstico que funciona de manera regular, por ello y a partir de esta información en aguas abiertas, el prototipo SO3 constituye un sistema de pronóstico de alta resolución espacial en el Golfo de Nicoya que se puede implementar directamente.

6.4 Análisis de sensibilidad de las inicializaciones

Varios son los aspectos que afectan la calidad de los resultados de los sistemas operacionales. Uno es la calidad del modelo usado para el pronóstico, su resolución y las parametrizaciones que utiliza, otro es la calidad de los datos atmosféricos globales usados como forzamientos del modelo, el tipo y número de observaciones empleados en la asimilación de datos para inicializar el modelo. Todos estos aspectos tiene un impacto en la reducción de la fiabilidad y precisión final del pronóstico (Martin, 2011).

La inicialización se puede definir como el proceso e instante de entrada de datos observados, asimilados e ingresados en el modelo para determinar las condiciones iniciales. La asimilación de datos es el proceso de recopilación, control de calidad y normalización de todos los datos de observación que describen el estado inicial de la atmósfera.

Este apartado se centra en analizar los diferentes resultados del SO3, en función de las cuatro distintas inicializaciones que realiza el modelo NWW3 durante el día (00z, 06z, 12z y 18z), producto de las ligeras perturbaciones en las condiciones iniciales obtenidas de las observaciones.

Para determinar la inicialización que brinde los mejores resultados del SO3, se realizan diferentes pruebas que se detallan a continuación. El primer análisis consiste en comparar las series temporales de los parámetros del estado de mar H_s , T_p y *dir* del sistema operacional NWW3 con la serie de reanálisis de GOW2 en aguas profundas, específicamente en la localización 9.75° latitud y -85° longitud, que representa el oleaje en los contornos del sistema operacional SO3. Cada una de las inicializaciones durante el período entre 2014 y 2016 se componen de 180 horas que equivalen a 7.5 días de pronóstico de los parámetros de oleaje. Se comparó cada inicialización y su pronóstico con la serie de reanálisis GOW2, y se calculó para cada parámetro del estados de mar y cada una de las 180 horas pronosticadas el RMSE.

La figura 6.4 muestra los resultados del RMSE para cada parámetro del estado de mar en una ventana del pronóstico equivalente a las primeras 96 horas. La figura 6.4 (a) muestra que las magnitudes del RMSE para la variable H_s entre cada una de las inicializaciones es del orden de los 3 cm. Asimismo, cada inicialización mantiene un comportamiento similar durante las primeras 48 horas, el error medio es del orden de los 16 cm y las cuatro inicializaciones oscilan en torno a ese valor. A partir de las primeras 48 horas comienzan a aumentar levemente los errores. Sin embargo, no se define de manera clara cual inicialización es la más adecuada.

La figura 6.4 (b) muestra la evolución del RMSE del T_p , que presenta un valor medio del orden de los 4 s alrededor del cual oscilan las inicializaciones. El comportamiento de las inicializaciones se mantiene similar y no varía significativamente a lo largo de las primeras 72 horas.

La figura 6.4 (c) presenta un RMSE para la dirección media del oleaje del orden de los 16 grados durante las primeras 48 horas, alrededor del cual oscilan todas las inicializaciones. Posterior a ese momento el RMSE empieza a disminuir, siendo las inicializaciones 12z y 18z las que presentan menos magnitud de error.

SISTEMA OPERACIONAL DE OLEAJE Y ONDA LARGA



Figura 6.4. RMSE a) H_s , b) T_p y c) *dir* en aguas profundas entre el sistema operacional NWW3 y la serie de reanálisis GOW2.

La segunda prueba consistió en realizar el mismo ejercicio pero esta vez tomando como datos a comparar la reconstrucción histórica ROOL y el resultado del sistema SO3 en la localización en Caldera. Por ello, el análisis se efectuó para los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria.

La figura 6.5 (a) muestra que el RMSE de H_s tiene como valor medio 19 cm durante las primeras 48 horas y las cuatro inicializaciones oscilan alrededor de ese valor, posteriormente el error se incrementa levemente y después de las 72 horas la inicialización con mayor error es la 00z.

La figura 6.5 (b) muestra la evolución del RMSE de T_p , que presenta un valor medio del orden de los 4 s alrededor del cual oscilan las inicializaciones y que se mantiene durante las 96 horas; este comportamiento como era de esperar coincide con lo evaluado en la figura 6.4 (b) en aguas profundas debido a que el período no cambia.

La figura 6.5 (c) presenta el RMSE del parámetro de la dirección cuyo valor medio es del orden del 1.7°, alrededor del cual oscilan las cuatro inicializaciones. Este valor tiene una magnitud pequeña, lo que demuestra el proceso de refracción que sufren las olas al llegar a Caldera y que provoca que la dirección del oleaje presente prácticamente nada de variabilidad. Este comportamiento se observa a lo largo de las 96 horas.



Figura 6.5. RMSE a) H_s , b) T_p y c) *dir* en Caldera entre el sistema operacional SO3 y la serie de reanálisis GOW2.

En relación con los parámetros de la onda infragravitatoria, la figura 6.6 (a) muestra que el RMSE de H_{LW} tiene comportamiento estable y valores menores a 4 cm prácticamente durante las primeras 48 horas de predicción a partir de las cuatro inicializaciones. Posterior a los dos primeros días los errores que genera cada inicialización empiezan a aumentar de manera sostenida y después de las 72 horas se hace evidente que la inicialización que presenta mayor error es la 00z, y las que presentan menores errores son las inicializaciones 06z y 12z.

La figura 6.6 (b) muestra que el RMSE de T_{mo2LW} para las primeras 24 horas tiene un valor promedio de 12 s, donde las cuatro inicializaciones oscilan en torno a ese valor; posteriormente a ese tiempo se observa una leve disminución del error por parte de las cuatro inicializaciones. No obstante, no es evidente cuál inicialización genera mayor o menor error debido al comportamiento oscilatorio.

SISTEMA OPERACIONAL DE OLEAJE Y ONDA LARGA



Figura 6.6. RMSE a) H_{LW} y b) T_{mo2LW} en Caldera entre el sistema operacional SO3 y la serie de reanálisis GOW2.

Para complementar el análisis anterior y considerar otros descriptores estadísticos de calidad de ajuste como la desviación estándar, la desviación centrada del error cuadrático medio y el coeficiente de correlación, se recurre al diagrama de (Taylor, 2001), que es una representación gráfica que resume la información y compara los criterios estadísticos de cada uno de los datos del pronóstico.

El diagrama de Taylor, incluido en la figura 6.7, permite mostrar para un punto del ROOL en Caldera, si el modelo reproduce la observación, es decir si la inicialización y sus pronósticos (puntos de color azul) del sistema operacional SO3 se acercan al ROOL (punto de color negro), entre más cercanos estén los puntos del sistema operacional SO3 al ROOL, quiere decir que los datos del pronóstico se ajusta a la observación. Si sucede lo contrario significa que los datos pronosticados no están representando bien lo observado, con lo cual la correlación disminuye, la desviación por ende aumenta y el RMSD también.

La figura 6.7 (a) muestra el diagrama de Taylor para la inicialización 00z y las primeras 168 horas del pronóstico, distribuidas cada 3 horas y representadas mediante los puntos de color azul. A su vez, se han incluido los promedios del pronóstico de cada día desde el día 1 hasta el día 7 representados por los puntos cruz de color magenta. Tal y como se muestra en la figura 6.7 (a), las primeras 72 horas, equivalentes a los primeros 3 días, es cuando mejores resultados se obtienen para la inicialización 00z, presentando valores de RMSD del orden del 0.5 y la correlación próxima a 0.9. A partir del tercer día los estadísticos empeoran, el RMSD aumenta, la correlación disminuye y la desviación se mantiene similar. Para el día 7 del pronóstico los valores de la correlación disminuyeron hasta 0.8, el RMSD aumento hasta 0.7 y la desviación estándar muestra que las magnitudes del pronóstico son del orden de un 20% mayores que lo indicado por el ROOL.

La figura 6.7 (b) muestra el diagrama de Taylor para la inicialización 06z con la misma cantidad y distribución de datos pronosticados anteriormente. En este diagrama se observa, a diferencia del anterior, que los datos pronosticados se han clasificado en tres grupos. Un primer grupo de datos del pronóstico que abarcan los primeros 4 días presentan un RMSD del orden de 0.5 y una correlación de 0.9 aproximadamente, luego un segundo grupo de datos que corresponden al día 5 del pronóstico tienen valores de RMSD alrededor de 0.6 y 0.85 de correlación, el tercer grupo se compone de los días 6 y 7 y son los que están más alejados del punto ROOL, presenta valores de RMSD en torno a 0.7 y la correlación de aproxima a 0.8. Se observa, también como las últimas horas del pronóstico correspondiente al día 7 están más alejados del punto ROOL que los pronosticados para ese momento por la inicialización 00z. La desviación se mantiene similar a la estimada para la inicialización 00z.



Figura 6.7. Diagrama de Taylor que muestra la comparación de los criterios estadísticos del pronóstico de H_s de 168 horas agrupadas cada 3 horas y cada día, correspondiente a la inicialización a) 00z y b) 06z del sistema operacional SO3 y el ROOL como referencia, para el período de 2014 -2016.

La figura 6.8 (a) muestra el diagrama de Taylor para la inicialización 12z con la misma cantidad y distribución de datos pronosticados para las inicializaciones anteriores. En este diagrama se muestra claramente que los datos pronosticados se han organizado de tal manera que se tienen dos grupos. El primer grupo de datos corresponde a los primeros 4 días, cuyos RMSD presentan valores entre 0.5 - 0.6 y el coeficiente de correlación entre 0.85 - 0.9. El segundo conjunto de datos compuesto por los días 5, 6 y 7, presentan valores de RMSD entre 0.6 - 0.7 y la correlación entre 0.8 - 0.85. Otra diferencia entre la inicialización 06z y 12z es que los pronósticos promedio 3 horarios correspondientes a los días 6 y 7 tienen menor error los pronosticados por la inicialización 12z, no así los respectivos al día 5 que la inicialización 06z los pronostica con un menor error y más cercanos a la referencia ROOL.

La figura 6.8 (b) muestra el diagrama de Taylor para la inicialización 18z con la misma cantidad y distribución de datos pronosticados anteriormente. En este diagrama se muestra que los datos pronosticados no se agrupan en conjuntos como en el caso de las inicializaciones 06z y 12z. Los primeros 4 días de pronóstico de la inicialización 18z presentan ligeramente mayores errores en comparación con la inicialización 12z, dichos pronósticos se encuentra más alejados del punto de referencia ROOL. Para los días 5 y 6 los pronóstico de la inicialización 18z presentan aproximadamente los mismos valores de los criterios estadísticos de la inicialización 12z. Es el día 7 que los pronósticos de la inicialización 18z presenta un RMSD de 0.7 y la inicialización 12z levemente mayor; sin embargo, la correlación y la desviación es prácticamente similar.



Figura 6.8. Diagrama de Taylor que muestra la comparación de los criterios estadísticos del pronóstico de H_s de 168 horas agrupadas cada 3 horas y cada día, correspondiente a la inicialización a) 12z y b) 18z del sistema operacional SO3 y el ROOL como referencia, para el período de 2014 -2016.

En resumen, según los diagramas de Taylor para un punto en Caldera, la inicialización que en promedio mejor proporciona los pronósticos durante un horizonte de tiempo no superior a 7 días es la inicialización 12z.

Se ha utilizado, adicionalmente el diagrama de cajas para evaluar que inicialización genera en sus pronósticos de H_s y H_{LW} menores errores durante una ventana de tiempo equivalente al corto plazo (72 horas).

La figura 6.9 muestra los diagramas de cajas de RMSE asociado a H_s para las cuatro inicializaciones. Con base en las magnitudes calculadas de los errores y las diferencias entre éstos según cada inicialización, las conclusiones que se determinan son de características generales, como por ejemplo que se confirma que existen diferencias en la destreza del sistema operacional SO3, en función de la inicialización. La inicialización que genera mayores errores en promedio es sus pronósticos durante las primeras 72 horas es la 00z. Para la ventana de tiempo de 72 horas las inicializaciones que en promedio generan menores errores son la 06z, 12z y 18z. Sin embargo, no está claramente definido debido a la variación en el tiempo de las inicializaciones, cuál de ellas genera menores errores.



Figura 6.9. Diagramas de cajas de RMSE asociado a H_s en Caldera para cada inicialización, en una ventana de tiempo de 72 horas realizado con un período de datos de pronósticos del 2014 al 2016.

Al realizar el mismo ejercicio pero sustituyendo el parámetro de H_s por H_{LW} , se confirma que la inicialización que genera mayores errores es la 00z. Las inicializaciones que proporcionan los mejores diagnósticos son la 12z y 18z, asimismo se observa que conforme a mayores horizontes temporales de predicción las diferencias son más notables.



Figura 6.10. Diagramas de cajas de RMSE de H_{LW} en Caldera para cada inicialización, en una ventana de tiempo de 72 horas realizado con un período de datos de pronósticos del 2014 al 2016.

6.5 Evaluación de la destreza del sistema SO3 en los pronósticos a corto plazo

Evaluar los sistemas operacionales de manera frecuente es fundamental para estimar su grado de destreza y fiabilidad de los pronósticos, así como también ayuda a identificar las áreas donde es posible mejorar los sistemas.

En este apartado se evalúa la destreza del SO3 para pronosticar los parámetros de oleaje H_s , T_p , *dir* y onda infragravitatoria H_{LW} y T_{LW} , en el corto plazo y dentro del Golfo de Nicoya. Para realizar la evaluación se utiliza la inicialización 12z, la cual y con base en los resultados del apartado anterior, es en promedio la que proporciona mejores diagnósticos en el corto plazo.

La evaluación de la destreza del SO3 se inicia primero seleccionando un nodo dentro del Golfo de Nicoya, en una zona que no esté significativamente afectada por los procesos de propagación, debido a que lo que se pretende primero es evaluar la destreza del SO3 en el tiempo. Se selecciona, por lo tanto el nodo que se muestra resaltado en color amarillo en la figura 6.11.



Figura 6.11. Localización del nodo donde evalúa la destreza temporal del SO3 en el corto plazo. Fuente: fotografía tomada de google earth.

En el nodo seleccionado se extrae la información de los parámetros de oleaje H_s , T_p , dir y onda infragravitatoria H_{LW} y T_{LW} calculados mediante el ROOL para un período del mes de julio durante los años 2014, 2015 y 2016. Asimismo, se estima mediante el SO3 los respectivos parámetros de oleaje y onda infragravitatoria para el mismo nodo y ventana de tiempo.

La figura 6.12 (a) muestra la variación de las series temporales de los pronósticos que proporciona la inicialización 12z de manera diaria y cómo se va ajustando conforme avanzan los días al valor de referencia. En la misma figura el ROOL indica que aproximadamente el 27 de julio del 2014 sucedió un oleaje con una magnitud de H_s del orden de los 2.5 m, 7 días antes de ese evento el sistema SO3 pronostica para dicho momento un oleaje con magnitud de H_s de 2 m. Sin embargo, conforme pasan los días la inicialización 12z ajusta el pronóstico y aumenta la magnitud de H_s . El sistema SO3, un día antes del evento, pronostica valores de H_s prácticamente iguales a lo reportado por ROOL.

La figura 6.12 (b) corresponden a las series temporales del parámetro T_p . El sistema SO3, a diferencia de la variable H_s , no proporciona variaciones significativas entre los pronósticos a lo largo del tiempo. No obstante, los valores pronosticados son mayores a los reportados por el

ROOL, esto es debido a la función polinomial que se utiliza para estimar los valores de T_p del sistema operacional NWW3.

La figura 6.12 (c) corresponde a las series temporales del parámetro de oleaje de la dirección; las series temporales de *dir*, al igual que con las series de T_p , no presentan variaciones substanciales entre los pronósticos a lo largo del tiempo, y en relación con el ROOL, los pronósticos se ajustan considerablemente a éste.

La figura 6.12 (d) muestra las series temporales del parámetro de onda infragravitatoria H_{LW} . Se observa el mismo comportamiento que para parámetro de oleaje H_s , la inicialización 12z conforme se acerca al momento del evento, el pronóstico se ajusta más al valor de referencia.

La figura 6.12 (e) muestra la variación de las series temporales a lo largo del tiempo del parámetro de onda infragravitatoria T_{m02LW} , se observa que prácticamente entre los pronósticos no hay variaciones, pero entre ellos y el ROOL se da una diferencia que a lo largo del tiempo en momentos disminuye pero en otros aumenta. Sin embargo, debido a la variabilidad y magnitud de este parámetro, los valores estimados por el sistema SO3 son razonables.



Figura 6.12. Series temporales de los pronósticos de SO3 y nodo ROOL en un evento sucedido en julio del 2014. a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} y e) T_{m02LW} .

La figura 6.13 muestra para el mismo nodo de la figura 6.11 los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria generados por el ROOL para una ventana de tiempo durante el mes de julio del 2015. Se han incorporado, igualmente las series temporales de los pronósticos de cada parámetro generados por el SO3.

La figura 6.13 (a) muestra resultados similares a lo expuesto en la figura 6.12 (a), en cuanto al comportamiento de las series temporales del parámetro H_s a lo largo del tiempo. Sin embargo, se da la particularidad que el pronóstico generado 7 días antes del pico del evento, logra predecir de buena manera el valor de referencia, posterior a éste, es el pronóstico con 2 días de anticipación que proporciona los mejores resultados durante el pico del evento.

Las figuras 6.13 (b) referente al T_p pronosticado, muestra el mismo comportamiento entre ellos y con respecto al ROOL se constata la sobre estimación que produce la función polinomial, al

igual que sucedió cuando se analizó los pronósticos de T_p durante la ventana la ventana de tiempo del 2014.

Las figuras 6.15 (c) muestran que los pronósticos del parámetro *dir* no varían entre ellos y en relación con el ROOL, prácticamente no hay diferencia. La figura 6.13 (d) correspondiente a la H_{LW} muestra un comportamiento similar al para parámetro de oleaje H_s ; conforme se acerca el momento del pico del evento, el pronóstico se ajusta más al valor de referencia.

La figura 6.15 (e) correspondiente a T_{m02LW} del pronóstico, muestra el mismo comportamiento entre ellos y con respecto al ROOL se da, al igual que lo visto con los datos del 2014, una diferencia que a lo largo del tiempo en momentos disminuye pero en otros aumenta. No obstante, los pronósticos conservan el orden de magnitud de la referencia.



Figura 6.13. Series temporales de los pronósticos de SO3 y nodo ROOL en un evento sucedido en julio del 2015. a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} y e) T_{m02LW} .

La figura 6.14 muestra los resultado de la misma evaluación pero esta vez efectuado a los pronósticos del sistema SO3 en una ventana de tiempo del año 2016.

Para el mismo nodo de la figura 6.11 se han extraído del ROOL los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria, junto con las series temporales de los pronósticos de cada parámetro generados por el SO3. La figura 6.14 (a, b, c, d y e) muestra un patrón de resultados similares con lo vistos en las figuras 6.12 y 6.13, con lo cual se constata la destreza del sistema SO3 para proporcionar pronósticos cuya fiabilidad aumenta conforme pasa el tiempo. Por ejemplo los parámetros H_s y H_{LW} mostrados en la figura 6.16 (a y d) evidencian cómo 2 días antes del pico del evento el pronóstico tiende a subir para ajustarse al valor de referencia. Se verifica, por medio de la figura 6.16 (b) que los pronósticos de T_p están sobre estimados, pero siguen la misma evolución en el tiempo de los valores de referencia del ROOL.



Figura 6.14. Series temporales de los pronósticos de SO3 y nodo ROOL en un evento sucedido en julio del 2016. a) H_s , b) T_p , c) dir, d) H_{LW} y e) T_{m02LW} .

Los análisis anteriores demostraron en un nodo dentro del Golfo de Nicoya la destreza del sistema SO3 a lo largo del tiempo y la fiabilidad de los pronósticos de los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria. El siguiente paso consiste entonces en comprobar la pericia en todo el Golfo de Nicoya y considerando, las condiciones climáticas a lo largo del tiempo. Para ello, se han preparado una serie de mapas que muestran, a un horizonte de 6 días, la habilidad del sistema SO3 para pronosticar dichos parámetros..

En los mapas se muestran los descriptores estadísticos de calidad de ajuste NRMSE y el coeficiente de correlación de los parámetros H_s y H_{LW} . La correlación y el NRMSE se calculan mediante las ecuaciones (3.9) y (3.11) respectivamente, incluidas dentro del capítulo 3. Se utilizan dichos criterios por ser adimensionales, lo que permite comparaciones espaciales que cubran zonas con diferentes condiciones del clima marítimo.

La figura 6.15 muestra los valores diarios de NRMSE de H_s en el Golfo de Nicoya para las predicciones hasta 6 días futuras. Para los primeros 3 días los errores son similares espacialmente, con valores de NRMSE del orden de 0.15 en la entrada y centro del golfo. En Caldera no alcanza los 0.2 y en las partes más abrigadas del golfo existen zonas donde SO3 genera el pronóstico con un error cercano a 0.4. A partir del día 4 se verifica una peor destreza en el pronóstico al aumentar las magnitudes de los errores, conforme pasan los días éstos incrementan y para los días 5 y 6, se generan pronósticos con un error prácticamente generalizado en el Golfo de Nicoya entre 0.2 - 0.25. Además se comprueba que las zonas más interiores del Golfo de Nicoya es donde el pronóstico genera mayor error



Figura 6.15. Variación espacial y evolución en el tiempo del NRMSE de H_s en el Golfo de Nicoya, estimado a partir del SO3.

Complementando el estadístico NRMSE, en la figura 6.16 se muestra el coeficiente de correlación del parámetro H_s . Los primeros 3 días la magnitud de la correlación es cercana a 0.9 en prácticamente todo el golfo, excepto las zonas más interiores y donde el NRMSE es mayor. Conforme pasan los días la correlación disminuye pero el patrón es el mismo en todo el Golfo de Nicoya y concordante con los resultados del descriptor de ajuste NRMSE. Cabe destacar que las predicciones a partir de 5 y 6 días presentan una correlación notablemente inferior, en torno a 0.8.



Figura 6.16. Variación espacial y evolución en el tiempo del coeficiente de correlación de H_s en el Golfo de Nicoya, estimado a partir del SO3.

La figura 6.19 muestra los diferentes valores de NRMSE de H_{LW} dentro del Golfo de Nicoya y cómo van variando a lo largo del tiempo. Para los primeros 3 días el NRMSE espacialmente es similar dentro del golfo y presentan valores entre 0.35 - 0.45, con sectores puntuales en donde el NRMSE alcanza valores cercanos a los 0.5. Para el día 4 los errores aumenta ligeramente pero siempre menores a 0.5; para los días 5 y 6 los errores alcanzan una magnitud prácticamente generalizada en todo el Golfo de Nicoya de 0.55 de H_s .

SISTEMA OPERACIONAL DE OLEAJE Y ONDA LARGA



Figura 6.17. Variación espacial y evolución en el tiempo del NRMSE de H_{LW} en el Golfo de Nicoya, estimado a partir del SO3.

La figura 6.18 muestra la variación espacial del coeficiente de correlación de H_{LW} dentro del Golfo de Nicoya y para un horizonte de predicción de hasta 6 días. Para los primeros 3 días la magnitud de la correlación es prácticamente constante dentro de todo el golfo y con un valor cercano a 0.85. Se aprecia, para el día 4 que la correlación disminuye de manera generalizada dentro del golfo a un valor de 0.7. Para 5 y 6 días, los resultados indican una fuerte disminución en la pericia de la predicción, con una disminución de la correlación de alrededor de 0.1 y un valor de correlación promedio en todo el golfo de aproximadamente 0.65. El comportamiento del coeficiente de correlación relativo al parámetro H_{LW} es concordante espacial y temporalmente con el criterio estadístico de ajuste del NRMSE mostrado previamente.

Las magnitudes estimadas para ambos criterios de calidad de ajuste confirman la destreza del SO3 dentro del Golfo de Nicoya y a lo largo del tiempo, para proporcionar pronósticos de los parámetros de H_s y H_{LW} con resultados aceptables, principalmente durante los primeros 3 días del pronóstico. Cabe destacar que el parámetro H_{LW} , y por tanto la predicción de onda infragravitatoria ha resultado más sensible en este análisis sobre la destreza de las predicciones a días horizonte.



Figura 6.18. Variación espacial y evolución en el tiempo del coeficiente de correlación de H_{LW} en el Golfo de Nicoya, estimado a partir del SO3.

Con este análisis se demuestra la destreza del sistema SO3 para proporcionar pronósticos aceptables espacial y temporalmente del parámetro de oleaje H_s y onda infragravitatoria H_{LW} .

La tabla 6.1 se muestra el promedio del descriptor de calidad de ajuste NRMSE de cada parámetro de oleaje y onda infragravitatoria, dentro de todo el Golfo de Nicoya para 7 días de pronóstico, el cual se ha estimado cercano a 0.25. Los errores para el parámetro de T_p son menores a 0.3. Los errores estimados para el parámetro de la dirección son menores a 0.5 de *dir*. Se verifica que el NRMSE asociado al parámetro de H_{LW} alcanza valores cercanos de 0.55 de H_{LW} y el NRMSE asociados a T_{m02LW} en promedio son menores a 0.35

Tabla 6.1. NRMSE promedio de los 7 días calculado para los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria (H_s , T_p , *dir*, H_{LW} , T_{pLW} , respectivamente).

H_s	T_p	dir	H_{sLW}	T_{pLW}
0.25	0.29	0.5	0.55	0.35

La figura 6.19 muestra la variación espacial dentro del Golfo de Nicoya de los descriptores estadísticos de calidad de ajuste NRMSE (fila a), BIAS (fila b) y correlación (fila c), correspondiente a los diferentes parámetros de oleaje y onda infragravitatoria. H_s (columna 1), T_p (columna 2), *dir* (columna 3), H_{LW} (columna 4) y T_{m02LW} (columna 5), promediando los resultados para los 6 primeros días de predicción.
Las magnitudes del criterio estadístico NRMSE para cada parámetro demuestra que los resultados del pronóstico son aceptables en prácticamente todo el Golfo de Nicoya y confirma que para los parámetros de oleaje H_s , T_p y *dir*, existe una zona dentro del golfo en donde los resultados presentan mayor error. El BIAS evidencia que el pronóstico del parámetro H_s en frente de la península de Nicoya subestima las magnitudes y en Caldera las sobrestima. El pronóstico del parámetro T_p es sobreestimado en prácticamente todo el golfo. La dirección es subestimada por el pronóstico en frente de la península y en la zona más interior del golfo pero por las magnitudes del BIAS son variaciones no mayores a los 4°. El parámetro H_{LW} no presenta sesgo y el pronóstico de T_{m02LW} presenta valores sobrestimados al igual que el T_p .

La correlación de H_s según el pronóstico está entre 0.85 - 0.9, lo que demuestra una muy buena correlación. El T_p la correlación se pronostica en 0.65 casi de manera generalizada para todo el golfo. La correlación del parámetro del *dir* se calcula en la entrada al golfo en 0.6. Para el parámetro H_{LW} la correlación es también generalizada para el golfo y presenta un valor del orden 0.75 y finalmente el parámetro T_{m02LW} presenta una correlación variable y con valores máximos entre 0.25 - 0.4, lo que denota una baja correlación.



Figura 6.19. Variación en el Golfo de Nicoya de los criterios estadísticos de calidad de ajuste NRMSE, BIAS y la correlación (filas a, b y c respectivamente), correspondiente a los diferentes parámetros de oleaje y onda infragravitatoria H_s , T_p , dir, H_{LW} y T_{m02LW} (columna 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente), agrupados a 6 días.

Hasta ahora se ha analizado, mediante diferentes descriptores de bondad de ajuste, la destreza de SO3 espacialmente para proporcionar pronósticos diarios en un horizonte de tiempo de 7 días.

Se estima importante evaluar si esta habilidad de este sistema operacional, para generar pronósticos en dicha ventana de tiempo y en el Golfo de Nicoya es similar durante todo el año, debido a que existe una variabilidad climática interanual que podría condicionar la capacidad predictiva. Para ello se ha estimado el RMSE asociado a H_s para las diferentes salidas del operacional a 7 días vista en la localización de Caldera, a partir de los 3 años de datos disponibles (2014-2016).

En la figura 6.22 se muestra este resultado con una resolución mensual dentro del año. En la figura se confirma la mayor destreza del operacional durante los 3-4 primeros días de predicción a lo largo de todo el año. No obstante, para estos primeros días horizonte la pericia del operacional es menor durante el mes de octubre, alcanzando valores de RMSE superiores a 0.18. Además, este empeoramiento en la pericia del operacional se extiende de octubre a noviembre a medida que el horizonte de la predicción es mayor, alcanzándose valores de RMSE de alrededor de 0.25 para estos dos meses a partir de predicciones superiores a 5.5 días. Por otro lado, a partir del cuarto día horizonte de predicción, se detecta una peor calidad predictiva también durante los meses de mayo y junio, con errores de H_s cercanos a 0.25 m.



Figura 6.20. Variación a lo largo del año del RMSE asociado al parámetro H_s para un horizonte de tiempo de 7 días de pronóstico estimado con el registro histórico del SO3 para el período 2014 - 2016.

Con el fin de evaluar si los resultados obtenidos están condicionados por los tres años disponibles de datos operacionales y si las variaciones interanual juegan un papel relevante en la incertidumbre de la evaluación estacional, se ha evaluado el análisis mostrado en la figura 6.20 para los años 2014, 2015 y 2016 independientemente. En todos los años se ha comprobado el mismo patrón de comportamiento del RMSE asociado al H_s a lo largo del año, aunque se detectan ciertas variaciones con respecto al aumento del error para los días de predicción y con respecto al periodo dentro del año (por ejemplo, en algunos casos la disminución de la pericia del operacional durante el periodo octubre-noviembre se extiende a Septiembre). Los meses en los que los pronósticos presentan un mayor error coinciden con los momentos de transición de la estación climática (inicio del invierno y verano en el hemisferio austral). Las variaciones que se dan en los diferentes año evaluados son con respecto a la magnitud del error, pero los periodos dentro del año cuando suceden estas peculiaridades están claramente definidos.

A pesar de la necesidad de series temporales mayores para evaluar la destreza del operacional antes variaciones intera-anuales y patrones teleconectivos, se ha realizado una exploración preliminar de los pronósticos de SO3 asociado son las variaciones del fenómeno del Niño-Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). Este análisis preliminar indica que, durante el año de Niño fuerte las predicciones muestran resultados menos fiables. Sin embargo, para poder corroborar esta hipótesis se requiere más información y períodos coincidentes de años Niño con pronósticos, debido a que actualmente se cuenta con sólo un año compatible, siendo necesaria más información para determinar conclusiones más contundentes.

6.6 Conclusiones

En este apartado se ha desarrollado la metodología de manera detallada para implementar el sistema operacional de oleaje y onda larga (SO3) de alta resolución en el Golfo de Nicoya.

El SO3 ha sido validado mediante comparación con la base de datos histórica ROOL, comprobándose la destreza del mismo para pronosticar los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria costeros en el Golfo de Nicoya.

Se ha acotado la fiabilidad de los pronósticos mediante la aplicación de diversos descriptores estadísticos de calidad de ajustes, por medio de los cuales se ha evaluado la habilidad del SO3 espacial y temporalmente, para proporcionar pronósticos de oleaje y ondas infragravitatorias dentro del Golfo de Nicoya.

Respecto al análisis espacial en el Golfo de Nicoya se ha constatado que el sistema presenta para el parámetro H_s , una estimación con un NRMSE generalizado en prácticamente todo el

Golfo de Nicoya. En las zonas más internas del golfo la magnitud se incrementa de en sitios puntuales. Esta situación es inherente al ROOL y puede deberse a diferentes factores como por ejemplo que la información batimétrica en esos sitios cuente con buena resolución.

En relación con el parámetro H_{LW} , el comportamiento espacial es más homogéneo y no presenta dentro de la zona de estudio sitios puntuales donde se desmejore el pronóstico. El resto parámetros presentan variaciones en cuanto a las magnitudes frente a la Península de Nicoya y en los sectores del golfo más protegidos. En resumen el comportamiento espacial de los parámetros H_s y H_{LW} .se puede catalogar como homogéneo en prácticamente la totalidad del Golfo de Nicoya.

El sistema operacional SO3 proporciona pronósticos de los parámetros de H_s y H_{LW} con resultados aceptables, principalmente durante los primeros 3 días del pronóstico. El NRMSE asociado al parámetro de H_s para los 3 primero días es menor a 0.2, a partir del día 4 aumenta de manera progresiva y para el día 7 el NRMSE es cercano a 0.25. El parámetro de H_{LW} para los 3 primeros días es menor a 0.45, a partir del día 6 los errores aumentan en 0.1 alcanzado valores cercanos de 0.55 de H_{LW} . La recomendación que resulta de este análisis es por tanto utilizar predicciones no superiores a 4 días.

Se ha realizado un análisis acerca de las diferentes inicializaciones y sus efectos en los resultados del pronóstico. La inicialización que en promedio mejor proporciona los pronósticos durante un horizonte de tiempo de 7 días, es la inicialización a las 12z. Se confirma que la inicialización que genera mayores errores es la 00z. Asimismo, se logró determinar que conforme a mayores horizontes temporales de predicción las diferencias entre los resultados de las inicializaciones son más notables.

Se detectó un patrón de comportamiento del RMSE asociado al H_s a lo largo del año. Los meses cuando los pronósticos presentan un mayor error coinciden con los momentos de transición de la estación climática (inicio del invierno y verano en el hemisferio austral). Este patrón se repite durante los años analizados, cambiando sólo la magnitud de los errores.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes y que demuestran la manera cómo se ha logrado el cumplimiento de los objetivos planteados en esta tesis, se mencionan a continuación siguiendo el hilo conductor del desarrollo de la investigación.

Acerca de la red de medición de datos de oleaje

Se ha ejecutado, durante los años 2014 y 2015, la campaña de campo para la instalación de la red de medición de oleaje y onda infragravitatoria más extensa con datos cuasi continuos en el litoral Pacífico de Costa Rica. Para ello se ha enfrentado todas las etapas operativas que esto conlleva, desde la selección y compra de los equipos, selección de los sitios para la colocación, la instalación, mantenimiento y posproceso de la información.

El resultado obtenido es una base de datos inédita, de mucho valor por su extensión, calidad del registro y que contribuye no sólo a lograr el cumplimiento de los objetivos de esta Tesis Doctoral, sino que, al tratarse de una fuente de información de carácter público, se apoya al país en la generación de información necesaria para la gestión de los recursos marítimos y del litoral y por ende a las actividades que interactúan con dichos recursos.

La red de medición de datos instrumentales se conformó con un total de cuatro diferentes equipos localizados en Cabo Blanco y Caldera, sitios estratégicamente seleccionados. El primer sitio tuvo la finalidad de registrar de manera directa los oleajes que inciden en el litoral del Pacífico de Costa Rica, el segundo sitio, localizado en el interior del Golfo de Nicoya, específicamente en bahía Caldera, tuvo como fin medir el oleaje en una zona de importancia económica para el país y donde se han constatado efectos destructivos de las variables de estudio y que conllevan pérdidas económicas para el país.

Los datos registrados por la red de medición corresponden a los principales parámetros de oleaje H_{mo} , T_p , T_{m02} , *dir* y onda infragravitatoria H_{LW} , T_{pLW} y T_{m02LW} con una resolución temporal 3 horaria. Se complementaron las mediciones instrumentales con información de vídeo, grabado por una cámara instalada en playa Caldera.

Durante la campaña de campo se lograron registrar eventos de alta energía que causaron problemas de inundación tanto en la zona de estudio como también en los otros países de Centroamérica.

Con base en los resultados de las mediciones de campo se demuestra que existe una correlación directa entre el oleaje y las ondas infragravitatorias, lo que explica que las segundas sean un sub-producto de las primeras.

Las magnitudes registradas de H_{LW} presentaron valores entre los 5 y 50 cm. Las menores magnitudes se midieron entre los meses de noviembre y abril, momento del año que corresponden a la época cuando el oleaje es menos energético. Las mayores alturas se registraron durante los meses entre mayo y octubre que es cuando el oleaje es más energético, lo que coincide con el comienzo del invierno en el hemisferio Sur.

Los datos registrados por la red de medición son una información fundamental para validar las distintas fases de análisis dentro de esta tesis, como han sido la calibración de series de datos de reanálisis, el proceso de propagación de oleaje y onda infragravitatoria, el producto ROOL y el sistema operacional SO3.

Acerca de la serie de reanálisis de oleaje y onda infragravitatoria

Como parte de la definición de la dinámica del oleaje, se ha complementado la información medida por la red instrumental con datos de mayor duración y una total extensión espacial. Para ello, se utilizaron nodos de la serie de reanálisis GOW2 del IH Cantabria localizados frente a la zona de estudio y cuyo registro se compone de 38 años de información, iniciando en 1979 y en continua actualización. Esta información permitió, como una primera aproximación, realizar una caracterización en aguas profundas del oleaje que incide en las costas del Pacífico de Costa Rica. Asimismo y en comparación con los datos de campo se detectó la necesidad de corregir la serie GOW2. Por lo tanto, se sometió a dicha serie a un proceso de calibración a partir de la información instrumental.

Se ha comprobado, como parte de la configuración del modelo SWAN, que incluir como forzamiento del modelo los campos de viento de las fuentes CFSR, CFSRv2 y CFSRv2bis, aumenta los errores de los resultados. Se ha relacionado que los errores podrían deberse a la falta de datos de media-alta resolución del reanálisis de los campos de viento para esta región, por lo cual se desestimaron como parte del forzamiento del modelo SWAN.

Una vez calibrados los nodos de la serie de reanálisis GOW2 frente de la zona de estudio se integró, adicionalmente, a la serie de reanálisis GOW2 la onda infragravitatoria representada por sus parámetros principales de H_{LW} , T_{pLW} y T_{m02LW} , mediante una técnica de bajo coste computacional que combina los paquetes de energía del espectro del oleaje.

La nueva base de datos de oleaje y onda infragravitatoria obtenida ha sido validada con las mediciones instrumentales, luego del proceso de propagación de ambas variables desde aguas profundas hasta la costa, realizado mediante el modelo numérico SWAN.

La nueva base de datos constituye un producto novedoso para esta zona del mundo, al complementar el espectro del oleaje con información de la energía asociada a las bajas frecuencias.

Acerca de la técnicas de downscaling y el producto ROOL

Se integraron técnicas de vanguardia del *downscaling* híbrido, en una única metodología, adaptada a la realidad local para crear un *downscaling* de oleaje y onda infragravitatoria. La metodología se estructuró en un total de siete pasos: 1) análisis de las bases de datos, 2) proceso de calibración de las bases de datos en aguas profundas, 3) selección de casos representativos a propagar, 4) propagación de los casos seleccionados, 5) reconstrucción de las series de reanálisis, 6) validación de la serie con mediciones instrumentales y 7) presentación de la base de datos histórica horaria denominado Regionalización de Oleaje y Onda Larga (ROOL) dentro del Golfo de Nicoya.

El producto ROOL se compone de una base de datos de 38 años de los parámetros del estado de mar H_s , T_p , dir y los parámetros asociados a la onda infragravitatoria debida al oleaje H_{LW} , T_{pLW} y T_{m02LW} . Esta base de datos costera tiene resolución horaria y está distribuida espacialmente en 126 puntos dentro del Golfo de Nicoya.

Los parámetros del producto ROOL que generaron mejores resultados, con base en la validación, fueron H_s y H_{LW} . Los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria T_p , dir y T_{pLW} , T_{m02LW} respectivamente, presentaron valores menos precisos que las alturas. A pesar de las diferencias estimadas, se considera que el producto ROOL presenta resultados adecuados, por lo que se constituyen en una referencia para la planificación de futuras obras y/o para la gestión de los niveles de servicio de obras actuales que se localizan en el Golfo de Nicoya, debido a la extensión de las series de los parámetros calculados.

Acerca de la explotación del producto ROOL para fines ingenieriles

La nueva base de datos ROOL brinda una importante posibilidad para mejorar el entendimiento de los procesos derivados de la interacción del oleaje, con las estructuras costeras y portuarias. El poder contar con las variables de reanálisis conjunto del oleaje y las ondas infragravitatorias ofrece una mejor aproximación al análisis funcional de las estructuras en costa.

Es por ello, que se ha recurrido al modelo de generación y propagación de oleaje y onda larga XBeach, para continuar la propagación de las variables objeto de esta tesis hasta la zona de rotura y swash de la playa, con el fin de analizar la interacción de los forzamientos con las estructuras naturales y artificiales desde un ámbito de funcionalidad.

Entre los resultados obtenidos se destaca la destreza del modelo XBeach para transferir la energía de la banda del oleaje a la baja frecuencia en la zona de rompientes y swash. A su vez, se ha demostrado mediante la explotación de la información del producto ROOL, la importancia de incorporar en los cálculos de rebase la información de manera conjunta del oleaje y la onda infragravitatoria.

Sin embargo, lo más relevante es que a partir de las simulaciones con el XBeach, se ha estimado en promedio un 30% más de eventos de rebases cuando el modelo XBeach es forzado con el contenido de energía completo, es decir incluyendo la energía asociada del oleaje y las oscilaciones infragravitatorias, frente a forzar el modelo únicamente con el contenido de energía asociado al oleaje.

Se ha demostrado, con base en lo anterior la importancia de incorporar en el cálculo de variables ingenieriles, como por ejemplo el rebase, el contenido de energía completo. El trabajar con el contenido de energía tanto del oleaje como el de las ondas infragravitatorias, tal y como lo contiene el ROOL, es una condición más realista en sitios como el de la zona de estudio, donde se ha confirmado que el contenido de energía asociado a las oscilaciones infragravitatorias, es importante dentro de las variables hidrodinámicas que inciden en la costa del Pacífico de Costa Rica

Acerca de la explotación del producto ROOL para sistemas operacionales

A partir de la metodología configurada en el producto ROOL, se ha podido extender el método para configurar un Sistema Operacional de Oleaje y Onda larga de alta resolución en el Golfo de Nicoya denominado SO3.

La metodología seguida para la implementación del SO3 se estructuró en cuatro pasos: 1) análisis de la base de datos histórica del sistema operacional de oleaje de la NWW3 de la NOAA en aguas profundas, 2) calibración de los datos del registro de la NWW3, mediante el algoritmo utilizado en el capítulo 3 e incorporación del dato de nivel del mar correspondiente, 3) transferencia de los datos en aguas abiertas de predicción a corto plazo a los 126 puntos costeros que componen el ROOL utilizando la técnica del *downscaling* estadístico y el 4) resultado de las predicciones pasadas del oleaje de alta resolución en el Golfo de Nicoya.

El registro histórico estimado con el sistema SO3 ha sido validado por medio de la base de datos histórica. Además se ha realizado un análisis acerca de la pericia, incertidumbre y mejor configuración del sistema SO3 propuesto.

Se ha realizado un análisis de las diferentes inicializaciones y sus efectos en los resultados del pronóstico. La inicialización que en promedio mejor proporciona los pronósticos, durante un horizonte de tiempo de 7 días en la zona de estudio es la inicialización 12z. Se confirma que la inicialización que genera mayores errores es la 00z.

Por otra parte, en virtud de que el sistema operacional NWW3 es un sistema de pronóstico con información en aguas abiertas y que funciona de manera regular, ha permitido que el prototipo SO3 se constituya en un sistema de pronóstico de alta resolución espacial en el Golfo de Nicoya.

El sistema operacional SO3 proporciona pronósticos de los parámetros de H_s y H_{LW} con resultados aceptables, principalmente durante los primeros 3-4 días del pronóstico. También se detectó un patrón de comportamiento del RMSE asociado al H_s a lo largo del año. Los meses cuando los pronósticos presentan un mayor error coinciden con los momentos de transición de la estación climática (inicio del invierno y verano en el hemisferio austral). Este patrón se repite durante los años analizados, cambiando únicamente la magnitud de los errores.

7.2 Futuras líneas de investigación

Con esta tesis se ha contribuido a conocer la dinámica del oleaje que incide a las costas del litoral Pacífico de Costa Rica, por medio de datos instrumentales, series de reanálisis, simulación numérica, técnicas de *downscaling* y servicios operacionales de corto plazo. Sin embargo, aún se podría investigar en varias líneas de trabajo que se plantean a continuación:

- Analizar la propagación de la onda infragravitatoria a lo largo de la cuenca del Pacífico mediante la instalación de equipos de medición en la isla del Coco, sitio que se localiza entre las Isla Galápagos y Costa Rica. Esta información, a su vez, serviría para la validación de los modelos numéricos de generación y propagación de oleaje de escala global y regional para mejorar sus pronósticos.
- Validar de manera cuantitativa los pronósticos de número de rebases estimados con modelos de generación y propagación de la onda larga, bajo esquemas 2D, mediante la instalación de cámaras digitales (Llana et al., 2012). Con esta información se podría estimar la cantidad de rebases, persistencia y la cota de inundación.
- Evaluar los efectos de la onda infragravitatoria en la zona rompientes y swash en cuanto al transporte de sedimentos y cambios morfológicos, en diferentes escalas temporales. Esto serviría para procurar formulaciones de transporte de sedimento que consideren la onda infragravitatoria.
- Integrar dentro del SO3 pronósticos en el interior de Puerto Caldera mediante la implementación de un modelo numérico tipo Boussineq. Con esta información se aportaría a la gestión operativa de los puertos.
- Colocar más equipos y de preferencia que trasmitan en tiempo real, en otros sitios dentro del Golfo de Nicoya para mejorar los resultados del ROOL y del SO3. Así se ampliaría la validación y serviría para comparar resultados.
- Ampliar el estudio de variabilidad climática a la escala interanual y decadal, de forma que se puedan evaluar los efectos de la oscilación del Niño.

- Modificar el sistema operacional SO3 en aguas someras a una escala temporal predictiva de medio plazo (mensual/estacional).
- Extender las metodologías desarrolladas en esta tesis y replicarlas a todo el litoral Pacífico de Costa Rica u otros tramos costeros específicos de interés, lo que permitiría comparar los resultados.

REFERENCIAS

- Airy, G. B. (1845). Tides and Waves. Encyclopedia Metropolitan. 192, 241-396.
- Ardhuin, F., Rawat, A., & Aucan, J. (2014). A numerical model for free infragravity waves: Definition and validation at regional and global scales. *Ocean Modelling*, 77, 20–32. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.02.006
- Alves, J.H.G.M., Chawla, A., Tolman, H.L., Schwab, D., Lang, G. & Mann, G. (2012). The Operational Implementation of a Great Lakes Wave Forecasting System at NOAA/NCEP. *Journals Online, American Meteorological Society*, NCEP NOTES, 1473-1497.
- Banco Central de Costa Rica. (2017). Indicadores Económicos. San José.
- Baldock, T. E. (2012). Dissipation of incident forced long waves in the surf zone-Implications for the concept of "bound" wave release at short wave breaking. *Coastal Engineering*, 60(1), 276–285. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.11.002
- Baldock, T. E., Huntley, D. A., Bird, P. A. D., O'Hare, T., & Bullock, G. N. (2000). Breakpoint generated surf beat induced by bichromatic wave groups. *Coastal Engineering*, 39(2–4), 213–242. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00061-7
- Baldock, T. E., Ohare, T. J., & Huntley, D. a. (2004). Long wave forcing on a barred beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 503, 321–343. https://doi.org/10.1017/S002211200400792X
- Battjes, J. A. & Janssen, J.P.F.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering*, ASCE, Hamburg, Germany, 569-587.
- Benoit, M., Marcos, F., & Becq, F. (1996). Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, 465–478. <u>https://doi.org/10.9753/icce.v25</u>
- Bento, A. R., Salvação, N., Martinho, P., & Soares, C. G. (2015). An operational wave forecast system for the Galway Bay. *Renewable Energies Offshore – Guedes Soares (Ed.)*, 57-62.
- Bertin, X. & Olabarrieta, M. (2016). Relevance of infragravity waves in a wave-dominated inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, (121). http://dx.doi.org/10.1002/2015JC011444.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. https://doi.org/10.1029/98JC02622
- Browne, M., Castelle, B., Strauss, D., Tomlinson, R., Blumenstein, M., & Lane, C. (2007). Near-shore swell estimation from a global wind-wave model: Spectral process, linear, and artificial neural network models. *Coastal Engineering*, 54(5), 445-460.

- Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), 851–862. <u>https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007</u>
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S. (2011a). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58, 453-462. doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003
- Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., Tomas, A., & Izaguirre, C. (2013). High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, 72, 56– 68. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.09.002
- Carretero, J.C.A. (2005). Modelos de predicción de oleaje. Sección IV. Estudios de ingeniería de puertos y costas. (Técnicas avanzadas) Madrid: *CEDEX, Centro de Estudios de Puertos y Costas.*
- Carretero, J.C.E., Alvarez, M., Gómez, B., Pérez & Rodríguez, I. (2000). Ocean forecasting in narrow shelf seas: Application to the Spanish coast. *Coastal Engineering*, 41(1-3), 269-293. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00035-1
- Cartwright, D.E. & M.S. Longuet-Higgins (1956). The Statistical Distribution of the Maxima of Random Function. Proceedings of the Royal Society of London, Mathematical and Physical Sciences, 237, 212-232, doi:10.1098/rspa.1956.0173
- Cavaleri, L., & Rizzoli, P. M. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, 86(C11), 10961–10973. https://doi.org/10.1029/JC086iC11p10961
- Chen, Q., Kirby, J. T., Dalrymple, R. A., Kennedy, A. B., & Chawla, A. (2000). Boussinesq modelling of wave transformation breaking, and run up. II: 2D. *Journal of Waterway*, *Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 126(1), pp 48-56.
- Chini, N., Stansby, P., Leake, J., Wolf, J., Roberts-Jones, J., & Lowe, J. (2010). The impact of sea level rise and climate change on inshore wave climate: A case study for East Anglia (UK). *Coastal Engineering*, 57(11–12), 973–984. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.05.009
- Cofiño, A.S., Sordo, C., Gutiérrez, J.M., Cano, R. & Primo C. (2004). Prometeo: Aplicación operativa de downscaling estadístico para la predicción de fenómenos locales. El clima entre el mar y la montaña. Asociación española de climatología y Universidad de Cantabria, (Serie A, N° 4), 745-754.

- Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of computation*, *19*(90), 297-301.
- De Girolamo, P., Di Risio, M., Beltrami, G. M., Bellotti, G., & Pasquali, D. (2017). The use of wave forecasts for maritime activities safety assessment. *Applied Ocean Research*, 62, 18-26.
- De Roo, S., Suzuki, T., Kolokythos, G., Zhao, G., & Verwaest, T. (2015). Numerical modelling of 2D wave transformation processes from nearshore to a shallow foreshore: comparison between the Mike21, swash and XBeach models. *36th IAHR World Congress, Proceedings*, 1–6.
- Deltares (2015). XBeach Manual. Recuperado de http://oss.deltares.nl/web/xbeach.
- Díaz-Hernández, G., Mendez, F. J., Losada, I. J., Camus, P., & Medina, R. (2015). A nearshore long-term infragravity wave analysis for open harbours. *Coastal Engineering*, 97, 78–90. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.12.009
- Díaz, H.G. (2006). Análisis de resonancia portuaria: generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico (Tesis Doctoral). Universidad de Cantabria. Santander, España.
- División Marítimo Portuaria, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2016). *Presupuestos de gastos anuales*. San José, Costa Rica.
- Dongeren, A.V., Lowe, R., Pomeroy, A., Trang, D.M., Roelvink D., Symonds, G. & Ranasinghe.R. (2012). Modelling infragravity waves and currents across a fringing coral reef. *Coastal Engineering Proceedings*, (33).
- Eldeberky, Y., & Battjes, J. a. (1996). Spectral modeling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. *Journal of Geophysical Research*, 101(C1), 1253. https://doi.org/10.1029/95JC03219
- Eldeberky, Y. & Battjes, J.A. (1995). Parameterization of triad interaction in wave energy models. *Coastal Dynamics* '95. Gdansk, Poland, 140–148.
- EurOtop Team (2016). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*. Recuperado de <u>http://www.overtopping-manual.com</u>.
- Fan, S., & Chen, L. (2006). Short-term load forecasting based on an adaptive hybrid method. *IEEE Transactions on Power Systems*,21(1), 392-401.
- Franco, L., Gerloni, M. De, Meer, J. W. Van Der, Hydraulics, D., Box, P. O., & Emmeloord, aD. (1994). Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters. *Coastal*

Engineering, 1030-1045. https://doi.org/10.9753/icce.v24.

- Funke, E.R. & Mansard, E.P.D. (1979). On the synthesis of natural wave trains in deep water. Proc. 17th Int. Conf. on Coast. Eng., Sydney, 2974-2991.
- Gaslikova, L., & Weisse, R. (2006). Estimating near-shore wave statistics from regional hindcasts using downscaling techniques. *Ocean Dynamics*, 56(1), 26–35. https://doi.org/10.1007/s10236-005-0041-2
- Gelci, R., Cazalé, H., & Vassal, J. (1957). Prévision de la houle .Le méthode des densités spectroangulaires. Bulletin d'information du Comité d'Océanographie et d'Etude des Côtes, 9, 416-435.
- Global Water a xylem brand, (s.f.). Water Level Sensor Specifications. Recuperado de http://www.globalw.com/products/levelsensor.html
- Goda, Y. (1984). Analysis of wave grouping and spectral of long-travelled swell. *Report of the Port and Harbour Research Institute*, 22 (1), 1-41.
- Goda, Y., & Nagai, K.(1974). Investigation of the Statistical Properties of Sea Waves with Field and simulation data. *Rept. Port and Harbour Res.* Inst. 13(1), 3-37.
- Gómez, M. & Carretero. J.C. (2005). Wave forecasting at Spanish coasts. *Journal of Atmospheric and Ocean Science*, 10 (4), 389-405.
- Govaere, G. (2012). Determinación de las constantes armónicas de la marea para Golfito. (Informe final). San Pedro.
- Groeneweg, J., van Ledden, M. & Zijlema, M. (2007). Wave transformation in front of the Dutch Coast. *Coastal Engineering 2006*, 5, 552–564.
- Guanche, R., Losada, I. J., & Lara, J. L. (2009). Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability. *Coastal Engineering*, 56(5–6), 543–558. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.11.003
- Guedes Soares, C., Salvação, N., Gonçalves, M. & Rusu, L. (2016). Validation of an operational wave forecasting system for the North Atlantic Area. *Maritime Technology and Engineering III Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering*, 1037-1043.
- Günther, H., Lionello, P., Janssen, P.A.E.M., Bertotti, L., Bruning, L., Carreterro, J. C., Cavaleri,L., Guillaume, A., Hansen, B., Hasselman, S., Hasselman, K., de las Heras M.,Hollingworth A., Holt M., Lefevre, J. M. & Ports, R.(1992) . *Implementation of a third*

generations ocean wave model at the European Center for Medium - Range Weather Forecast. Technical Report; no. 68. England.

- Günther, H., Rosenthal, W., Weare, T.J., Worthing-ton, B.A., Hasselmann, K. & Ewing, J.A. (1979). A hybrid parametric wave prediction model. *J. Geophys. Research* 84, 5727-5738.
- Guza, R. T., Thornton, E. B., & Holman, R. A. (1984). Swash on steep and shallow beaches. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(19), 708–723. <u>https://doi.org/10.9753/icce.v19.%p</u>
- Hallermeier, R. J. (1980). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4 (C), 253–277. https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90022-8
- Hashimoto, N. & Kawaguchi, K. (2003). Statistical forecasting of long period waves based on weather data for the purpose of judgment of executing cargo loading. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 697-704.
- Hasselmann, K. (1962). On the non liner transfer in a gravity wave spectrum. Part I. General Theory J. Fluid Mech. 12. Part 2. Conservation Theorem; wave particle Analogy; Irreversibility. J. Fluid Mech. 15. Part 3. Evolution of the energy flux and swell -sea interaction for a Neumann spectrum. J. Fluid. Mech, 15, 273-281, doi: https://doi.org/10.1017/S0022112063000239
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwringht, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselman, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olberts, D.J., Richter, K., Sell, W., & Walden, H. (1973). Measurements of wind waves grouth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutshe Hydrographische Zeitschift*.
- Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1981). A symetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity wave spectrum. *Hamburger Geophysikalische Einzelschriften*.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H., & Barnett, T. P. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11), 1378–1391. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<1378:CAPOTN>2.0.CO;2
- HCTech, (s.f.). *Boya de oleaje direccional Bares*. Recuperado de http://www.herculescontrol.com/images/stories/catalogosespanol/boya_oleaje_es.pdf
- Herbers, T. H. C., Elgar, S., & Guza, R. T. (1995). Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 100872(15), 863–24. https://doi.org/10.1029/95JC02680

- Herman, A., Kaiser, R., & Niemeyer, H. D. (2009). Wind-wave variability in a shallow tidal sea-Spectral modelling combined with neural network methods. *Coastal Engineering*, 56(7), 759–772. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.02.007
- Holthuijsen, L. H. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK.
- Instituto Meteorológico Nacional, Comité Regional de Recursos Hidráulicos (2008). *Clima, variedad y cambio climático en Costa Rica*. San José.
- Janssen, P.A.E.M. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal Physical Oceanography* 21(11), 1631–1642.
- Kalra, R., Deo, M.C., Kumar, R., & Agarwal, V.K. (2005). Artificial neural network to translate offshore satellite wave to data to coastal locations. *Ocean Engineering*, 32, 1917-1932. doi: 10.1016/j.oceaneng.2005.10.010.
- Kamphuis, J. W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management. Advanced Series on Ocean Engineering (Vol. 16).
- Kennedy, A., Chen, Q., Kirby, J., & Dalrymple, R. (2000). Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup.I: 1D, J. Waterway, Port, *Coastal, Ocean Eng.*, 126(1), 39–47
- Kennard, R. W., & Stone, L. A. (1969). Computer Aided Design of Experiments. *Technometrics*, 11(1), 137–148. https://doi.org/10.2307/1266770
- Kobayashi, T., & Yasuda, T. (2004). Nearshore wave prediction by coupling a wave model and statistical methods. *Coastal Engineering*, 51(4), 297–308. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.03.002
- Kobune, K., & Hashimoto, N. (1988). On the reliability of the wave forecasting by the multiple regression model. *Coastal Engineering in Japan*, 31 (2), 199-205.
- Komen, G. J., Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journaly of Physical Oceanography*, 14, 1271-1285.
- Korteweg, D. J., & De Vries, G. (1895). XLI. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 39*(240), 422-443.
- Lara J. L., Ruju A., Losada I. J. (2011). RANS modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society*, A 467, 1215–1242
- Lara, J. L., Losada, I. J., Maza, M., & Guanche, R. (2011). Breaking solitary wave evolution

over a porous underwater step. *Coastal Engineering*, 58(9), 837–850. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.008

- Lim, H. S., Chun, I., Kim, C. S., Park, K. S., Shim, J. S., & Yoon, J. J. (2013). High-resolution operational coastal modeling system for the prediction of hydrodynamics in Korea using a wave-current coupled model. *Journal of Coastal Research*, 65(sp1), 314-319.
- Lira-Pantoja, M.A., Appendini, C.M. & Padilla, R. (2014). Evaluation and implementation of the Nearshore Wave Prediction System (NWPS) for the Mexican coasts. 34th International Conference on Coastal Engineering.
- Liu, P. L., & Losada, I. J. (2002). Wave propagation modeling in coastal engineering. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 229–240.
- Llana, A., Molina, R., Camarero, A., Campos, A., Alises, A. F., & López, J. D. (2012). Overtopping flow properties characterization in laboratory and prototype through the combination of non intrusive instrumental techniques. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 46.
- Longuet-Higgins, M. S. (1975). On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves. *Journal of Geophysical Research*, 80(18), 2688–2694. https://doi.org/10.1029/JC080i018p02688
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1964). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 11(4), 529–562. https://doi.org/10.1016/0011-7471(64)90001-4
- Longuet-Higgins, M.S. & Stewart R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in surface gravity waves with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanic*, 13(4), 481-504.
- López, L. F. (2016). Estimación del factor pico del espectro frecuencial JOWNSAP para la costa Pacífico, con base en mediciones de oleaje en Puerto Caldera y Cabo Blanco (Trabajo Final de Graduación). Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica.
- Losada, I. J., Lara, J. L., Christensen, E. D., & Garcia, N. (2005). Modelling of velocity and turbulence fields around and within low-crested rubble-mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 52(10), 887-913.
- Losada, I. J., Lara, J. L., Guanche, R., & Gonzalez-Ondina, J. M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal engineering*, *55*(1), 47-62.
- Madsen, O., Poon, Y., & Graber, H. (1988). Spectral Wave Attenuation by Bottom Friction:

Theory. Coastal Engineering, 492–504. https://doi.org/10.9753/icce.v21.

- Madsen, P. A., Sørensen, O. R., & Schäffer, H. A. (1997). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II: surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves. *Coastal Engineering*, 32, 289–319. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(97)00029-X
- Madsen, P. A., Sørensen, O. R., & Schäffer, H. A. (1997). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves. *Coastal Engineering*, 32(4), 255–287. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(97)00028-8
- Madsen, O. S., & Mei, C. C. (1969). The transformation of a solitary wave over an uneven bottom. *Journal of Fluid Mechanics*, *39*(04), 781-791.
- Manso, P., Stolz, W., & Fallas, J. (2005). El régimen de la precipitación en Costa Rica. *Rev. Ambientico*, 144, 7-8.
- Manzanas, R.G. (2016). Statistical downscaling of precipitation in seasonal forescasting: advances and limitation of different approches. (Tesis de doctorado), Universidad de Cantabria, España.
- Martin, M.(2011). Ocean Forecasting Systems: Product Evaluation and Skill. *Operational Oceanography in the 21st Century*, 611-631.
- Masselink, G. (1995). Group bound long waves as a source of infragravity energy in the surf zone. *Continental Shelf Research*, *15*(13), 1525-1547.
- McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T. G., Roelvink, J. A., Almeida, L. P., Davidson, M., & Russell, P. E. (2014). Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering*, 91, 231–250. <u>https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.007</u>
- McPhaden, M. J., Busalacchi, A. J., Cheney, R., Donguy, J.-R., Gage, K. S., Halpern, D., Takeuchi, K. (1998). The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress. *Journal of Geophysical Research*, 103(C7), 14169. https://doi.org/10.1029/97JC02906
- Mei, C. C., & Le Méhauté, B. (1966). Note on the equations of long waves over an uneven bottom. *Journal of Geophysical Research*, *71*(2), 393-400.
- Mínguez, R., Espejo, A., Tomás, A., Méndez, F. J., & Losada, I. J. (2011). Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data. *Journal of Atmospheric* and Oceanic Technology, 28(11), 1466–1485. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-

00008.1

- Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Agencia de Cooperación Internacional del Japón (2010). *Informe final: Plan de Rehabilitación de Puerto Caldera*. Proyecto de cooperación técnica japonesa. San José.
- Murillo, L.M. (2001). Las Mareas en Costa Rica. Inter Sedes, 2 (2-3), 93-108.
- Nortek (s.f.). AWAC Acoustic Wave And Current Profiler. Recuperado de http://www.nortekas.com/lib/brochures/datasheet-awac
- Okihiro, M., Guza, R. T. & Seymour, R. J. (1992). Bound infragravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 97, 11453-11469. doi: 10.1029/92JC00270
- Peregrine, D. H. (1967). Long waves on a beach. Journal of Fluid Mechanics, 27, 815-827.
- Pérez, J., Méndez, F. J., Menéndez, M., & Losada, I. J. (2014). ESTELA: a method for evaluating the source and travel time of the wave energy reaching a local area. Ocean Dynamics. <u>https://doi.org/10.1007/s10236-014-0740-7</u>
- Pérez, J., Menéndez, M. & Losada, I.J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 124. Recuperado de http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.03.005
- Pierson, W. J. (1955). Wind generated gravity waves. Advances in geophysics 2.
- Poincaré, H. (1914). Science and method, London: T. Nelson and Sons.
- Pomeroy, A., Lowe, R., Symonds, G., Van Dongeren, A., & Moore, C. (2012). The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef. *Journal of Geophysical Research*: Oceans, 117(11). https://doi.org/10.1029/2012JC008310
- Quataert, E., Storlazzi, C., Rooijen, A., Cheriton, O., & Dongeren, A. (2015). The influence of coral reefs and climate change on wave-driven flooding of tropical coastlines. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6407-6415. doi:10.1002/2015GL064861.
- Reguero, B. G., Menéndez, M., Méndez, F. J., Mínguez, R., & Losada, I. J. (2012). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65, 38–55. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003
- Ruju, A. (2013). Transformación de ondas infragravitatorias en playas. (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria. Santander, España.
- Rusu, L., Pilar, P., & Soares, C. G. (2008). Hindcast of the wave conditions along the west Iberian coast. *Coastal Engineering*, 55 (11), 906-919.

- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Liu, H. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015–1057. <u>https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1</u>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., ... Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1
- Sampedro, A. T. (2009). Metodologías de calibración de bases de datos de reanálisis de clima marítimo. (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria. Santander, España.
- Sandhya, K. G., Balakrishnan Nair, T. M., Bhaskaran, P. K., Sabique, L., Arun, N., & Jeykumar, K. (2014). Wave forecasting system for operational use and its validation at coastal puducherry, east coast of India. *Ocean Engineering*, 80, 64–72. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.01.009
- Santás, J.C. (1999). Análisis de Grupos de Olas. Madrid: CEDEX, Centro de Estudios de Puertos y Costas, grupos 1; JCS, 24.
- Schäffer, H. A. (1993). Infragravity waves induced by short-wave groups. Journal of Fluid Mechanics, 247(1), 551. https://doi.org/10.1017/S0022112093000564
- Sembiring, L., Van Ormondt, M., Van Dongeren, A., & Roelvink, D. (2015). A validation of an operational wave and surge prediction system for the Dutch coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1231–1242. https://doi.org/10.5194/nhess-15-1231-2015
- Snyder, R. L., & Cox, C. S. (1966). A field study of the wind generation of ocean waves. *J. mar. Res.*, *24*, 141-178.
- Sørensen, O. R., Schäffer, H. A., & Madsen, P. A. (1998). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations. *Coastal Engineering*, 33(2–3), 155–176. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(98)00007-6
- Sørensen, O. R., Schäffer, H. A., & Sørensen, L. S. (2004). Boussinesq-type modelling using an unstructured finite element technique. *Coastal Engineering*, 50(4), 181–198. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.10.005
- Stansby, P., Zhou, J., Kuang, C., Walkden, M., Hall, J., & Dickson, M. (2007). Long-term prediction of nearshore wave climate with an application to cliff erosion. *Coastal Engineering 2006: (In 5 Volumes)*, 616-627.
- Stokes, G.G. (1847). On the Theory of Oscillatory waves, Mathematical and Physical Papers. *Cambridge U. Press, London*, 1, 314-326.

- Stopa, J. E., Ardhuin, F., Babanin, A., & Zieger, S. (2016). Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models. *Ocean Modelling*, 103, 2-17. <u>http://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.003</u>
- Suzuki, T., Zijlema, M., Burger, B., Meijer, M. C., & Narayan, S. (2012). Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN. *Coastal Engineering*, 59(1), 64–71. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.07.006
- Sverdrup, H. U., & Munk, W. H. (1947). Wind, Sea, and Swell. Theory of Relations For Forecasting. *Office*, (601), 44.
- Symonds, G., Huntley, D. A., & Bowen, A. J. (1982). Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint. *Journal of Geophysical Research*, 87(C1), 492. https://doi.org/10.1029/JC087iC01p00492
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram.JournalofGeophysicalResearch,106(D7),7183–7192.https://doi.org/10.1029/2000JD900719
- The SWAM group (1985). Sea Wave Modeling Project. Ocean Wave modeling. *Plenum*, 256, doi: 10.1007/978-1-4757-6055-2
- The WAMDI Group (1988). The WAM model A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2
- Tolman, H.L. (1991). A third generation model for wind wave on slowly varying, unsteady inhomogeneous depth and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 782-797.
- Tolman, H. L. (2002b). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. *Technical Note*.
- Tolman, H. L. (2002g). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. *Technical Note*.
- Tolman, H. L. (2003). Treatment of unresolved islands and ice in wind wave models. *Ocean Modelling*, 5(3), 219–231. <u>https://doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00040-9</u>
- Torres-Freyermuth, A., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2010). Numerical modelling of short-and long-wave transformation on a barred beach. *Coastal Engineering*, *57*(3), 317-330.
- Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y de Estuarios (2014). Consultoría para la medición del oleaje en Bahía Caldera con la Fundación da la Universidad de Costa Rica para la Investigación. San Pedro.

- Van Vledder, G. P., de Ronde, J. G. & Stive, M. J.F. (1994). Performance of spectral wind wave model in shallow water. *Proceedings of 24th International Conferences on Coastal Engineering*. ASCE, New York, 761-774.
- Vidal, C. (2007). Hidrodinámica en la zona de rompientes. *Apuntes del Master en Ingeniería de Costas y Puertos*. Universidad de Cantabria.
- Woo, S.-B., & Liu, P. L. F. (2004). Finite-element model for modified Boussinesq Equations. I: Model development. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(1), 1–16. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2004)130:1(1).
- World Meteorological Organization WMO (1998). *Guide to wave analysis and forecasting* (2nd Edition). Geneva, Suiza.
- Young, I. R. (1988). A shallow water spectral wave model. *Journal of Geophysical Research*, 93(1), 5113–5129. <u>https://doi.org/10.1029/JC093iC05p05113</u>
- Zanuttigh, B., Formentin, S. M., & Briganti, R. (2013). A neural network for the prediction of wave reflection from coastal and harbor structures. *Coastal Engineering*, 80, 49-67.
- Zieger, S., Babanin, A. V., Erick Rogers, W., & Young, I. R. (2015). Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Modelling*, 96, 2–25. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.07.014.
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992–1012. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015