



***Facultad
de
Ciencias***

**INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES
MARINAS EN EL OLEAJE
A ESCALA GLOBAL**

**(Effect of oceanic currents over the sea
wave climate worldwide)**

**Trabajo de Fin de Grado
para acceder al**

GRADO EN FÍSICA

Autor: Andrés Renedo Llano

Director: Jesús Fernández Fernández

Co-Director: Melisa Menéndez García

Junio - 2018

INDICE

1 Introducción	6
1.1 Motivación	6
1.2 Objetivos del estudio	7
1.3 Estado del arte	7
1.3.1 Introducción al oleaje	8
1.3.2 Propagación del oleaje	8
1.3.3 Teoría lineal	9
1.3.4 Interacción ola-corriente	11
1.4.-Estructura del documento	12
2 Modelado numérico del Oleaje	13
2.1- Revisión del modelado numérico del oleaje	13
2.2 Generación y propagación del oleaje	15
2.2.1 Generación del oleaje	15
2.2.2 Propagación del oleaje	16
2.3 El modelo WAVEWATCH III	16
2.4.- Incorporación de las corrientes en la física del oleaje	18
3 Bases de datos	19
3.1 Datos de reanálisis	19
3.1.1 - Datos procedentes de la atmosfera (vientos)	20
3.1.2 - Datos procedentes de la criosfera (hielo)	21
3.1.3 - Datos procedentes de los océanos (corrientes)	21
3.2 - Datos simulados del oleaje (GOW2)	23
4 Metodología	24
4.1 Generación de las mallas de cálculo	24
4.2 Preproceso	25
4.3 Proceso (Ejecución)	26
4.4 Postproceso	26
4.5 Estadística de resultados	26
5 Resultados y Análisis	28
5.1 Estudio climático	28
5.2 Análisis de la influencia de las corrientes	33
6 Conclusiones y Discusión	39
7 Bibliografía	41

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer al Instituto de Hidráulica de Cantabria, la oportunidad de unas prácticas, que han permitido la realización de este proyecto. A todo su personal, por facilitar mi estancia, en los últimos cuatro meses.

Agradecer a mi directora, Melisa Menéndez, su tiempo y dedicación durante estos meses, por todo lo aprendido y por el apoyo brindado para sacar el proyecto adelante.

La mención más especial, sin lugar a dudas, para Héctor Lobeto, por todo el tiempo dedicado en los ajustes de mi “oxidada” programación. Gracias en general por la paciencia y el apoyo cuando las cosas no han ido bien.

Finalmente agradecer a mi familia y amigos el apoyo durante todos estos años.

Resumen

El presente estudio surge como la iniciativa de entender mejor el clima marino y en particular una mejor comprensión y caracterización del oleaje. El estudio del oleaje se ha explicado clásicamente a través de la interacción de los vientos sobre la superficie marina de los océanos. Existen numerosos estudios del oleaje a escala global basados en la interacción de los vientos con el medio marino sin embargo, son prácticamente inexistentes los estudios del oleaje que incluyen las corrientes marinas. Por este motivo el presente trabajo presenta un estudio sobre la influencia de las corrientes marinas en el oleaje desde un punto de vista climático. Para ello, y a partir del estado del arte actual, se ha realizado un experimento de simulación numérica durante el periodo 2005-2017 (13 años) con resolución horaria a escala planetaria. Para realizar este experimento se ha utilizado el modelo WAVEWATCH III v4.18, seleccionado y preparado las bases de hielos, vientos y corrientes en la superficie marina y configurado una simulación numérica global (a través de supercomputación) con una resolución espacial de aproximadamente 50 km.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos por dos vías; en primer lugar, un estudio climático de los resultados obtenidos para el periodo simulado y en segundo lugar una comparativa con las simulaciones en ausencia de corrientes. Los resultados indican que el oleaje esta afectado en magnitud (altura del oleaje) y dirección por las corrientes marinas. Esta influencia puede observarse principalmente en las siguientes zonas geográficas: corriente circumpolar antártica (océano sur y zona australiana) corriente del Golfo (costa este USA y océano atlántico), corriente de Agulhas (sur de África) y la corriente ecuatorial (en sus diversas localizaciones a lo largo de los trópicos; Indonesia, golfo de Bengala, norte de Brasil, etc.).

Palabras Clave: Clima, Corrientes, Modelado numérico, Oleaje, WAVEWATCH III

Abstract

This project arises as an initiative to understand and characterize the sea wave climate. Waves have been explained usually by wind interacting over sea surface. There are several studies about global wave climate based on the wind as the main forcing to generated surface waves, however, wave studies that include marine currents are practically non-existent.

This challenge is carried out in this work, where the influence of the oceanic currents over the wave climate is studied. In base of the state of the art, a historical simulation of waves for 13 years (2005-2017) with hourly resolution has been carried out worldwide. The numerical model WAVEWATCH III, version 4.18, has been used, considering the ice-covering, winds and currents as forgings. In order to get this global simulation at a spatial resolution of about 50km, high performing computing resources have been employed.

The results have been analysed in two ways: first, a climate wave study over the simulated period, and second, a statistical study of the influence of the oceanic currents on sea waves. The comparison has been made with global wave hindcasts without currents.

Main result indicates that influence of currents should not be neglected. The changes produced in magnitude (wave heigh) and direction of waves can be very important in different areas. The most relevant areas are: the circumpolar Antarctic current (South Ocean and Australia), the Gulf Stream (USA and Atlantic Ocean), the Agulhas current (South Africa) and tropical regions (e.g. Indonesia, Bengali Gulf, Madagascar and North Brazil).

Keywords: Climate, currents, numerical modelling, waves and WAVEWATH III.

1 Introducción

1.1 Motivación

El 97% del agua de nuestro planeta se encuentra en los océanos, que a su vez juegan un papel fundamental para la vida, tanto de zonas costeras como de interior. La importancia de las dinámicas marinas para la población que vive cerca de la costa (*aproximadamente la mitad de la población mundial*) es directa, no obstante la población de interior depende indirectamente de estas grandes masas de agua. La relevancia de los océanos para la sociedad es muy alta. Por ejemplo el 80% de las mercancías se transportan vía marítima (74% en España); el océano es una fuente de explotación de recursos importante (Ej. Pesca, petróleo, energías renovables). La vida en la costa, y en particular en las zonas costeras más pobladas, es vulnerable a los impactos procedentes del océano (oleaje, nivel del mar, etc.) Además de las ventajas mencionadas previamente los océanos desempeñan una función vital en nuestro planeta; pues producen la mayor fuente de oxígeno de la atmósfera mientras actúan de regulador climático.

El papel de regulador climático favorece las condiciones de la vida en el planeta de diversas formas: absorbiendo CO₂ y generando oxígeno (*de carácter vital para muchos seres vivos*) y haciendo habitables zonas que por sus posiciones geográficas no deberían serlo. Por ejemplo la corriente del Golfo (corriente cálida) que transporta una gran cantidad de energía térmica, permite la presencia de palmeras en Irlanda, antes de bifurcarse a su llegada a Europa. Esta misma corriente regula la temperatura de los fríos vientos que provienen de la zona de Noruega. Al circular una determinada cantidad de aire sobre la corriente cálida se establece un equilibrio termodinámico aumentando la temperatura del viento debido a que $10^3 \rho_{\text{aire}} \approx \rho_{\text{agua}}$, siendo ρ la densidad del aire y del viento respectivamente.

En particular una de las variables más importantes de los océanos es el oleaje. El oleaje es una dinámica superficial marina que determina prácticamente todas las actividades en el medio marino y la costa. Por ejemplo, las obras de defensa costera (diques, paseos marítimos, etc.) están dimensionadas para cubrir unos requerimientos de operatividad (condiciones climáticas medias) y fiabilidad (condiciones climáticas extremas) específicas. Además, los ecosistemas litorales están condicionados por las características climáticas del oleaje, entre otros factores. No obstante, dichas condiciones para una determinada localización, son la consecuencia del oleaje generado en lugares remotos. Por ello, la caracterización del oleaje local requiere de un estudio más amplio desde el punto de vista espacial.

En este contexto se desarrolla este trabajo, un estudio de la influencia de las corrientes marinas en las condiciones climáticas del oleaje a escala global.

1.2 Objetivos del estudio

-El objetivo principal del estudio es caracterizar las regiones donde las corrientes oceánicas juegan un papel relevantes en el clima del oleaje.

Para alcanzar este objetivo se han establecido diferentes objetivos específicos.

1. Conocer y procesar las grandes bases de datos climáticas existentes de hielo, viento y corrientes a escala global. El proceso de investigación comprende la identificación de estas bases, así como el estudio de su contenido (conocer en detalle como se obtiene la información disponible) para un análisis riguroso.
2. Perfeccionar el nivel de programación (Matlab y Linux) de procesos físicos y análisis estadístico multidimensional. Las herramientas informáticas empleadas permiten el tratamiento de cantidades masivas de información y la representación de situaciones a escala global.
3. Conocer y utilizar el modelo numérico WAVEWATCH III de generación y propagación del oleaje. Existen diferentes modelos numéricos en función del régimen y las dimensiones del estudio. En este contexto se elige un modelo adecuado para obtener resultados adecuados en la escala establecida.
4. Realizar un experimento climático, mediante el uso de un cluster de supercomputación, caracterizando el oleaje histórico (2005-2017). La realización de este tipo de experimentos aparece impulsada por los avances tecnológicos; no sería posible ó en cualquier caso poco recomendable (*elevados tiempo de computación*) realizar este tipo de pruebas mediante métodos convencionales.
5. Post-procesado de los principales parámetros del oleaje (H_s , T_m , Dir , etc.). Una vez conocidos los parámetros del estado de mar y sus diferentes implicaciones en las teorías físicas y matemáticas que describen el proceso es necesario realizar una interpretación adecuada de los mismos.
6. Estimación de estadísticos y generación de mapas para cuantificar el efecto de las corrientes sobre el oleaje. Contenido del análisis realizado entre bases de datos, que simulan el oleaje en ausencia de corriente, frente al experimento realizado.
7. Interpretación de los procesos físicos que dan lugar a una interacción oleaje-corriente desde el punto de vista climático. Caracterizando las diferentes zonas del planeta donde la influencia de las corrientes no debe ser despreciada.

1.3 Estado del arte

El estudio del oleaje en la mayoría de los casos se realiza a través de la teoría lineal. Esta descripción de la física del oleaje establece las relaciones existentes entre los diferentes parámetros involucrados. Esto requiere de la definición de ciertas variables fundamentales para caracterizar cualquier estudio realizado en este ámbito.

1.3.1 Introducción al oleaje

La descripción del oleaje es análoga a cualquier descripción que pueda darse para la teoría clásica de ondas. Supóngase una masa de agua situada en una superficie horizontal que por una causa externa sufre un movimiento en el eje vertical.

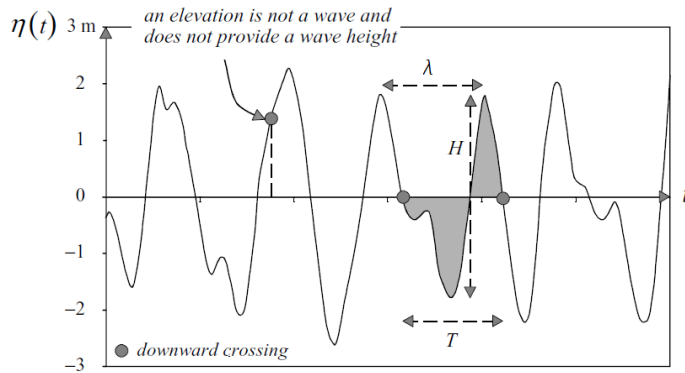


Figura 1. Elevación (η) en función del tiempo para una ola.

Fuente. "Waves in oceanic and coastal Waters" – Leo Holthuijsen

Una ola/onda dominada por este movimiento está descrita por un periodo (T) definido como el intervalo de tiempo entre dos pasos sucesivos (*downward zero-crossings*) y una longitud de onda (λ) definida como la distancia entre máximos sucesivos. La altura de ola (H) se define como la distancia entre dos situaciones extremas consecutivas (mínimo-máximo) lo cual corresponde al doble de la amplitud en el caso clásico de ondas simétricas.

No obstante en lugar de promediar las diferentes alturas de ola registradas en el tiempo, se trabaja con un parámetro estadístico que promedia la altura del tercio de olas más altas. Este parámetro se denomina altura de ola significativa (H_s):

$$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (1)$$

Donde N representa el número de medidas y H_i los valores individuales.

Este valor de H_s directamente relacionado con la energía (teoría lineal), coincide con la percepción visual de la altura del oleaje y será el parámetro fundamental del estudio.

1.3.2 Propagación del oleaje.

El siguiente paso se introduce para estudiar las olas en su conjunto y no como una colección de ondas individuales. Para esto es necesario partir del estudio de una onda individual, la cual puede desarrollarse en serie de Fourier en función de sus armónicos:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (2)$$

Donde a_i representa las amplitudes, f_i la frecuencia (T^{-1}) y α_i la fase que varía $(0, 2\pi)$.

Al aplicar este desarrollo al conjunto de valores se genera un espectro de frecuencias y amplitudes. Para casos generales es más práctico trabajar con espectros en función de la varianza en lugar de la amplitud. Puede obtenerse que la relación es de la forma (Véase *Holthuijsen Anexo A.3*):

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} E\left(\frac{a_M^2}{2}\right) \quad (3)$$

Donde a_M representa el promedio de las amplitudes en el intervalo de frecuencias Δf .

El conjunto de valores discretos toma así forma de continuo al tomar el límite del intervalo. De la misma forma puede demostrarse que siguiendo un razonamiento análogo (considerando el jacobiano) puede obtener para un caso en 2D:

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{\Delta \theta} E\left(\frac{a_M^2}{2}\right) \quad (4)$$

$E(f, \theta)$ el nombre de espectro de densidad de varianza y proporciona una descripción de las elevaciones de la superficie del mar. Gráficamente presenta como se distribuye la varianza en las frecuencias (Δf) y las direcciones ($\Delta \theta$).

Si se consideran las elevaciones como un proceso estacionario y gaussiano todos las variables estadísticas pueden obtenerse del espectro de densidad de varianza y expresarse en función de los momentos del espectro (m_i)

$$m_i = \int f^i E(f) \partial f \quad i \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

El momento de orden cero ($i=0$) está directamente relacionado con la altura de ola significativa (H_s) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H_s \approx 4\sqrt{m_0} \quad (6)$$

1.3.3 Teoría lineal

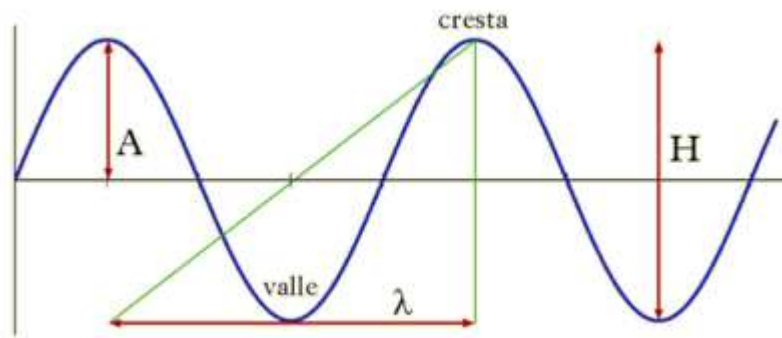


Figura 2. Onda sinusoidal con zonas y parámetros relevantes. A representa la amplitud, H la altura definida como la distancia entre un valle y la cresta y λ la longitud de onda.

La propagación del oleaje es un proceso no lineal complejo de mecánica de fluidos. Para tratar este problema de manera sencilla y simplificar un análisis físico se realizan una serie de aproximaciones. Este tratamiento se conoce como la teoría lineal de Airy.

La primera aproximación consiste en considerar las olas como un conjunto de ondas armónicas (Figura 2). Esto permite aplicar la teoría de ondas al problema y definir el oleaje como la superposición de ondas armónicas.

Se considera el agua como un fluido no viscoso e incompresible de densidad constante. Las fuerzas externas que actúan sobre el agua son la gravedad y las diferencias de presión. Si las diferencias de presión son constantes en todo el fluido el movimiento es irrotacional lo que implica la existencia de un potencial de velocidades:

$$\nabla \times \vec{u} = 0 \rightarrow \nabla \phi = \vec{u} \quad (7)$$

Donde $\vec{u}$ es la velocidad de las partículas de agua en las diferentes direcciones y ϕ la función potencial. La función potencial esta definida de forma que sus derivadas espaciales correspondan a las velocidades de las partículas en las diferentes direcciones.

La teoría lineal se basa únicamente en dos ecuaciones: la ecuación de balance de masas y la ecuación de balance de momentos. Al introducir la función potencial en las ecuaciones fundamentales se obtienen la ecuación de Laplace y Bernoulli para balance de masas y momentos respectivamente:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = 0 \quad (9)$$

Donde ϕ es la función potencial, P la presión atmosférica sobre el fluido, ρ la densidad y g la aceleración de la gravedad.

Al aplicar sobre las ecuaciones (8) y (9) las condiciones de contorno (Figura 3) asociadas a la cinemática del problema se obtiene como resultado de la ecuación de Laplace una onda armónica que se propaga en el espacio. Esta onda armónica (*una de las soluciones del problema*) tiene la siguiente expresión:

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \sin(\omega t - kx) \quad (10)$$

Al aplicar las condiciones dinámicas (Figura 3) se obtiene una relación entre la longitud de onda y el periodo. Esta ecuación se denomina relación de dispersión:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (11)$$

Donde ω representa la frecuencia angular ($\omega = 2\pi/T$), g la aceleración de la gravedad, k el número de onda ($k = 2\pi/\lambda$) y d la profundidad.

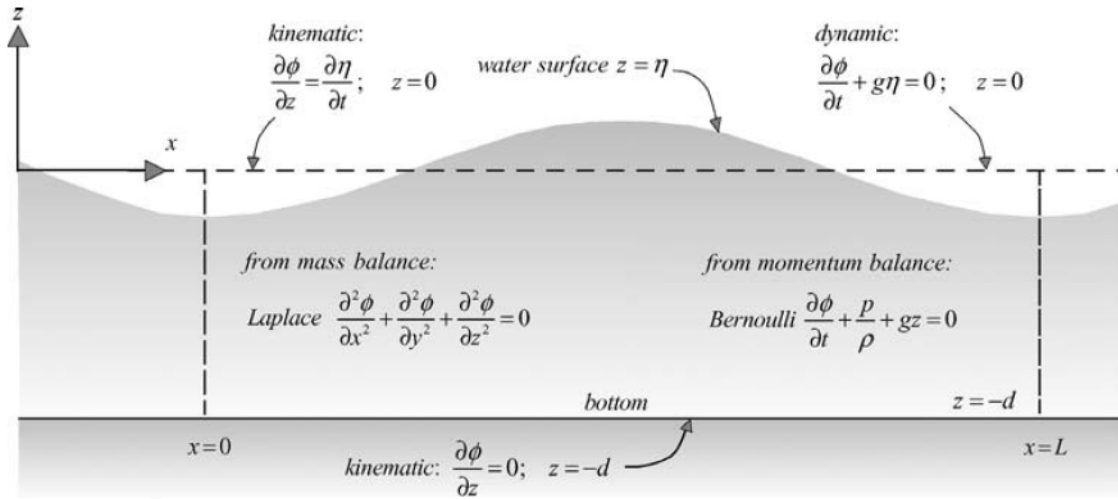


Figura 3. Condiciones de contorno aplicadas a las ecuaciones Laplace y Bernoulli.
Fuente. "Waves in oceanic and coastal Waters" – Leo Holthuijsen

1.3.4 Interacción ola-corriente

Las corrientes marinas interactúan con el oleaje produciendo cambios en la altura de las olas y su dirección. Esta interacción se introduce en la teoría lineal como una modificación de la amplitud, la frecuencia y la dirección de las ondas armónicas (10).

El cambio en la amplitud está directamente relacionado con la transferencia de energía ola-corriente. Las corrientes realizan trabajo (hay transferencia de momento) y por tanto la energía no se conserva en el proceso de interacción. Este problema puede "evitarse" empleando el concepto físico de acción como se explicará en el siguiente capítulo (Modelado Numérico).

Por otra parte la frecuencia se modifica por efecto Doppler. Para introducir este hecho en la física del oleaje es necesario definir dos frecuencias. Una frecuencia relativa cuyo sistema de referencia se mueve con la velocidad de la corriente (γ) y la frecuencia absoluta (ω) observada desde un sistema de referencia fijo.

$$\omega = 2\pi f_A \quad (12)$$

$$\gamma = 2\pi f_R \quad (13)$$

Donde f_A y f_R representan la frecuencia absoluta y relativa respectivamente.

Por último el cambio en la dirección está asociado a la interacción vectorial entre la dirección del oleaje y la corriente. Este fenómeno produce una refracción que provoca que un cambio en la dirección resultante.

La importancia de las corrientes ha quedado demostrada en experimentos a pequeña escala (Ardhuin et al., 2017) asumiendo que su influencia no es despreciable. Estos experimentos a pequeña escala impulsan la necesidad de realizar un estudio sobre la influencia de las corrientes en el oleaje a gran escala (escala global) desde el punto de vista climático (a partir de series históricas de larga duración temporal).

1.4.-Estructura del documento

El documento plantea un esquema similar al seguido durante el proceso de investigación.

- En primer lugar una breve introducción teórica al oleaje con conceptos fundamentales, la estadística del modelo, la teoría lineal, los efectos de propagación y la interacción ola-corriente.
- En segundo lugar una descripción del modelado numérico del oleaje, mencionando los modelos existentes así como su clasificación y una descripción detallada del modelo empleado.
- En tercer lugar se detalla la información sobre las bases de datos empleadas como forzamientos del modelo así como los datos empleados para la verificación de los resultados obtenidos.
- En cuarto lugar se detalla la metodología empleada, con la configuración específica para el experimento realizado y una descripción de los parámetros definidos.
- Finalmente se realiza un análisis de los resultados comparando con simulaciones que no incluyen las corrientes (GOW2).

2 Modelado numérico del Oleaje

2.1- Revisión del modelado numérico del oleaje

En el siglo XVII se establecen las características del método científico a través de las aportaciones de numerosos científicos como Newton, Descartes, Pascal, Galileo, etc. Se establece un vínculo entre las medidas experimentales y los modelos teóricos que permiten explicar estas medidas.

Todo conocimiento científico debe estar avalado por una teoría física o matemática y debe satisfacer o explicar las observaciones experimentales (empíricas).

A mediados del siglo XX los avances tecnológicos dan pie a las primeras simulaciones computacionales quedando directamente vinculadas a los modelos teóricos. Estas simulaciones permiten estudiar casos que por su envergadura no es posible tratar de manera experimental. El objetivo es resolver ecuaciones complejas que rigen la naturaleza en un tiempo razonable imponiendo determinadas limitaciones (forzamientos). No obstante estos modelos también contienen ajustes y aproximaciones que deben tenerse en cuenta a la hora de determinar su rango de validez.

Para el caso concreto de las simulaciones computacionales aplicadas a geofísica existen diversos modelos aplicados al entorno marino (oceánico), denominados hidrodinámicos. Entre los modelos hidrodinámicos existen modelos específicos para la generación y propagación del oleaje por acción del viento sobre la superficie del mar.

El presente estudio, dado su carácter climatológico, requiere de largos periodos de tiempo (long-term statistics). No obstante las estadísticas robustas requieren de un periodo de tiempo homogéneo donde los valores de las series temporales son considerados estadísticamente independientes e idénticamente distribuidos. En definitiva las olas no son tratadas como un conjunto de ondas y sus armónicos sino que se emplean variables estadísticas (altura de ola media, periodo medio, dirección media, etc.)

La necesidad de emplear periodos de tiempo largos (años) restringe aún más los posibles modelos hidrodinámicos. Esta restricción está directamente relacionada con el tiempo de ejecución de los modelos y su precisión; existen modelos hidrodinámicos muy precisos que requieren de un gran tiempo de computación para simular periodos de horas. Los elevados tiempos de computación para obtener resultados hacen inviable el estudio de varios años. El tiempo de computación tiene una relación directa con las dimensiones del experimento, es decir, el área de estudio.

Existen diferentes modelos clasificados en función de su método de trabajo, es decir, en base a la física que simulan. Para modelos que emplean ecuaciones no estacionarias y aplican la conservación del momento y la masa; uno de los factores más importantes es la extensión del estudio. En función del área podemos distinguir dos modelos: los que resuelven la fase (3D) y los de fase promediada (2D).

Los modelos centrados en áreas pequeñas (*varios km*) comúnmente son modelos que resuelven la fase (REF/DIF, MIKE21 (BW), COULWAVE, etc.) Estos modelos destacan por su calidad para simular fenómenos de difracción o refracción y se aplican en el régimen de costas.

Por otra parte para realizar estudios a gran escala o estudios globales (como el presente experimento) es necesario recurrir, a los denominados, modelos de fase promediada; basados en la conservación del espectro de energía de las olas.

Los modelos de fase promediada emplean condiciones de generación del oleaje (forzamientos) y resuelven la propagación teniendo en cuenta factores como la disipación de energía (fuentes y sumideros), las interacciones no lineales entre olas, la fricción o la profundidad. Estos modelos surgen en torno a 1950 y se clasifican a su vez en tres generaciones basadas en los diferentes avances hasta el presente (2018).

- Modelos de primera generación. Estos modelos simulan la evolución temporal de las componentes del espectro de manera aislada, es decir, son tratadas como variables independientes. El modelo usa paquetes de energía discretos que trata de interpolar para obtener unos resultados adecuados; no obstante se ha demostrado que esta técnica suele sobreestimar la acción del viento usado como forzamiento. En estos modelos los paquetes de energía se mueven con velocidades de grupo independientes; debido a esta falta de acoplamiento se generan inconsistencias. Se han detectado problemas también en las interacciones no lineales.
- Modelos de segunda generación. Estos modelos simulan la evolución temporal de las componentes del espectro de manera aislada y luego las acopla a través de una función de transferencia de energía no lineal. Predicen adecuadamente el mar de fondo ya que resulta independiente del viento (solo afecta en el momento de su formación). No obstante son inadecuados cuando se trata de simular cambios bruscos debidos al tratamiento independiente de las variables, especialmente en condiciones de vientos extremas (muy variables).
- Modelos de tercera generación. Los avances tecnológicos han dado pie a los conocidos como modelos de tercera generación, estos modelos resuelven numéricamente las ecuaciones diferenciales completas (ecuación de transporte de energía). Las variables no son tratadas de forma independiente y se implementan las interacciones no lineales a través de distintos términos fuente que igualmente son calculados por completo. Estos modelos simulan de manera más adecuada la transferencia de energía y permiten obtener resultados sobre la evolución espacio-temporal del espectro. Destacar entre estos modelos el WAVEWATCH III empleado en el estudio para simular la influencia de las corrientes en oleaje a escala global.

El modelo empleado es capaz de realizar la generación y propagación del oleaje a escala global para amplios periodos de tiempo.

2.2 Generación y propagación del oleaje

2.2.1 Generación del oleaje

El modelado numérico simula en dos etapas el proceso físico del oleaje. Primero se emplea el viento para la generación y después se utiliza la teoría lineal para la propagación.

La generación del oleaje surge del balance entre la estabilidad de dos fluidos, el aire y el agua. Estos fluidos al tener diferente velocidad interaccionan dando como resultado la generación del oleaje. La generación de las olas surge de una presión inducida por el viento, la cual favorece el movimiento ondulatorio; este proceso se retroalimenta conforme la ola avanza de forma que el resultado final son las conocidas ondulaciones sobre la superficie de mares y océanos.

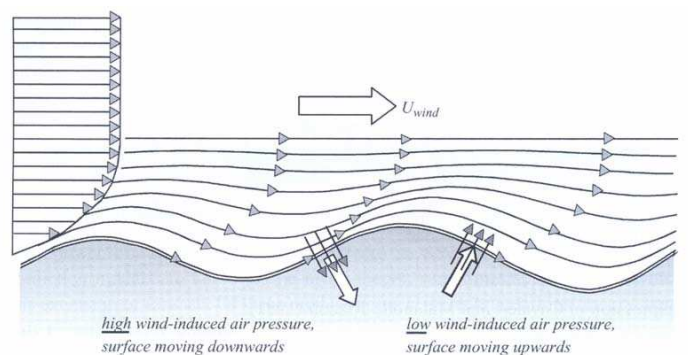


Figura (4). Generación de olas inducidas por el viento.

Fuente: '*Waves in Oceanic and Coastal Waters*' - Leo Holthuijsen.

El modelado de este fenómeno se realiza a través del espectro de densidad de varianza y los parámetros de amplitud y fase [Véase Capítulo 1 Introducción] que son modificados al introducir los forzamientos. Para este experimento se trabaja con el viento como forzamiento principal, la cobertura de hielo dinámica (obstrucción) y las corrientes marinas como forzamiento secundario.

Los procesos físicos asociados al oleaje y las diferentes profundidades que presenta el relieve marino a escala global deben ser contemplados. En general se trabaja con el espectro de energía (espectro densidad varianza) en función del número de onda (k) y la dirección de ola (θ) que son invariantes respecto a la profundidad. Estas variables son más sencillas de cuantificar y a partir de ellas se pueden obtener otras variables del espectro (p.e las frecuencias absoluta y relativa, f_A y f_R respectivamente) a través de transformaciones Jacobianas (Véase Manual WW III Versión 4.18 Pág. 10).

No obstante, como se menciona en el capítulo previo, al introducir las corrientes en la teoría lineal la energía no se conserva. Para evitar este problema se trabaja con el concepto físico denominado acción, el cual se conserva en el proceso de interacción ola-corriente. A pesar de que la acción no es una cantidad directamente mensurable se puede obtener a través de otros parámetros del espectro.

Para en el estudio de la propagación se utilizara un espectro de densidad de acción:

$$N(k, \theta) = \frac{E(k, \theta)}{\gamma} \quad (14)$$

Donde $E(k, \theta)$ es el espectro de energía en función del número de onda (k) y la dirección (θ) mientras que γ representa la frecuencia angular relativa.

2.2.2 Propagación del oleaje

La propagación del oleaje se realiza a través de los diferentes parámetros del espectro. Para estudiar la propagación se resuelve la ecuación de balance de energía que depende del número de onda (k) y la dirección (θ). El modelo numérico empleado (2D), permite resolver la ecuación en una posición x (longitud y latitud) y en el tiempo (t). Algunos procesos como la difracción o la dispersión pueden despreciarse al tratarse de un proceso a gran escala (solo importan en órdenes de magnitud inferior a 1 km); de esta forma la ecuación de balance a resolver numéricamente es:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \vec{c}_{g,abs} N - \frac{\partial}{\partial k} \left(\vec{k} \cdot \frac{\partial U}{\partial p} N \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{k} \vec{k} \cdot \frac{\partial U}{\partial n} N \right) = \frac{S}{\gamma} \quad (15)$$

Donde U representa la velocidad de la corriente, p y n son las coordenadas paralela y normal (al vector k) respectivamente.

Los términos de la expresión (15) representan la evolución de energía de la ola en el tiempo (primer término), la propagación espacial (segundo término) y los efectos de refracción. En S engloban los diferentes términos fuente relacionados con los crecimiento y disminuciones de la energía, así como las interacciones no lineales entre las olas; estos términos se explican en detalle para el modelo WW III más adelante.

La velocidad absoluta ($\vec{c}_{g,abs}$) se define:

$$\vec{c}_{g,abs} = \frac{\partial \gamma}{\partial k} = \vec{c}_{g,rel} + \vec{U} \quad (16)$$

La relación entre la velocidad de grupo y la corriente se detalla en la última sección del capítulo.

2.3 El modelo WAVEWATCH III

WAVEWATCH III versión 4.18 es un modelo espectral de tercera generación, euleriano, no estacionario y de fase promediada desarrollado por NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). El modelo describe la evolución espacial y temporal del espectro de energía del oleaje considerando las condiciones de viento así como diferentes términos fuente, por ejemplo las interacciones no lineales.

Los términos fuente asociados a las matemáticas y la física detrás del modelo están englobados en el término S (15) que puede desarrollarse:

$$S = S_{ln} + S_{nl} + S_{in} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} \quad (17)$$

Donde están representados las interacciones lineales (S_{ln}), las interacciones no lineales (S_{nl}), los términos input (S_{in}) relacionados con los términos de disipación (S_{ds}), los términos de fricción de fondo (S_{bot}), los términos de asociados a olas que rompen en aguas profundas (S_{db}), los términos relacionados con fenómenos de dispersión (S_{sc}), las interacciones con capas de hielo (S_{ice}) y las interacciones con costas e icebergs (S_{ref}) respectivamente. Estos términos representan las diferentes fuentes y sumideros de la energía espectral del oleaje.

El viento es una condición fundamental para el funcionamiento del modelo, no obstante para obtener resultados más precisos es necesario incorporar otros aspectos como la capa de hielo dinámica y las corrientes. Existen experimentos que realizan estudios globales incluyendo la acción del viento y la cobertura de hielo dinámica (Perez, Menendez, & Losada, 2017) no obstante son escasos (Rapizo, Durrant, & Babanin, 2018) o inexistentes los estudios que incluyen viento, hielo y además la acción de las corrientes.

Los datos de entrada del modelo se definen a través de diferentes inputs como pueden ser la batimetría, el viento (dirección y velocidad), el hielo y las corrientes (dirección y velocidad). En función de la zona de estudio el modelo realiza un pre-procesado creado un experimento virtual con las condiciones y forzamientos indicados. Previamente es necesario haber definido una o varias mallas (grids) que serán el objetivo de estudio.

En el pre-proceso también debe indicarse el formato en que se proporcionan los distintos forzamientos así como las variables que desean evaluarse con el modelo (HS, DIR, SPR, T02, TOM1, etc.). Una vez realizado este paso se puede ejecutar el modelo (run model) lo cual genera diferentes archivos binarios legibles únicamente por el programa; estos archivos que serán almacenados en un store serán objeto de un post-proceso a fin de generar resultados legibles y con un significado físico. A continuación se presenta a modo de esquema el funcionamiento del modelo:

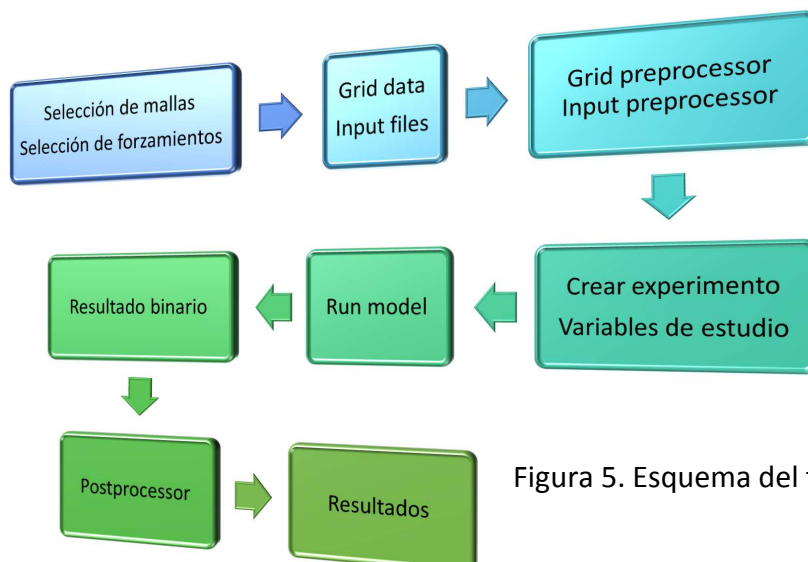


Figura 5. Esquema del funcionamiento WW III

2.4.- Incorporación de las corrientes en la física del oleaje.

En el modelado numérico del oleaje las corrientes son introducidas como una variable vectorial, es decir, se introducen sus componentes. Detallar como afectan estas variables al modelo resulta un aspecto fundamental para un adecuado análisis de resultados.

Al introducir corrientes la interacción ola-corriente altera la frecuencia de las olas generando un corrimiento Doppler:

$$\omega = \gamma + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (18)$$

Donde $\vec{U}$ representa la velocidad de la corriente promediada en el tiempo en la dirección del oleaje $U(x,t)$, ω la frecuencia angular absoluta (12) y γ la frecuencia angular relativa (13).

El vector de onda (k) se relaciona con la frecuencia angular absoluta (γ) a través de la relación de dispersión (11):

$$\gamma^2 = gk \tanh(kd) \quad (19)$$

Los cambios introducidos por las corrientes en el vector de onda (k) son introducidos en la expresión (15) en el término $\frac{\partial U}{\partial p}$ (componente paralela a k) y la refracción de las olas por las corrientes se introduce en el término $\frac{\partial U}{\partial n}$ (componente normal a k).

Finalmente resulta conveniente detallar como se establece la interacción entre los vectores mencionados previamente (16).

La velocidad de propagación de la ola en un sistema de referencia arbitrario (absoluto) se obtiene como una “suma vectorial” de la velocidad de la corriente (U) y la velocidad de propagación en el sistema de referencia relativo a la corriente.

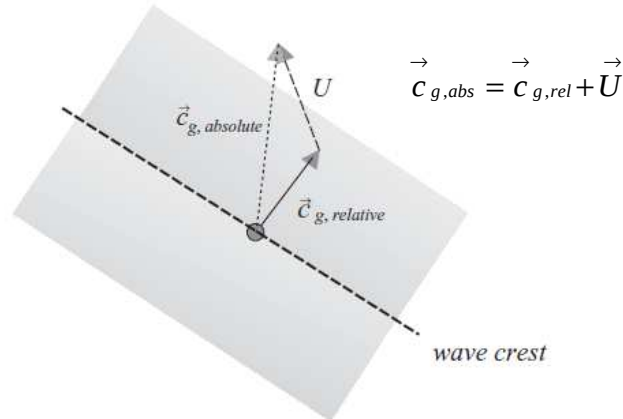


Figura 6. Velocidad de grupo del oleaje en la interacción ola-corriente. Ecuación (16).

3 Bases de datos

3.1 Datos de reanálisis.

Una vez detallado el funcionamiento del modelado numérico es conveniente detallar las bases de datos empleadas en el experimento y usadas como forzamientos del modelo numérico WAVEWATCH III. Con el objetivo de analizar la influencia de las corrientes marinas en el oleaje a escala global se introduce el parámetro de las corrientes asociado al océano; no obstante también es necesario introducir otros parámetros fundamentales como las condiciones atmosféricas, es decir, el viento y la criosfera o capa de hielo terrestre.

En el presente experimento se ha empleado la información disponible en NCEP/NCAR (*the American National Center for Environmental Prediction and for Atmospheric Research*) que contiene información histórica apropiada sobre las diferentes variables. Los datos son producto de dos reanálisis 'CFSR' y 'CFSv2'. CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) se extiende desde 1979 hasta 2010 con una resolución del 0.3° (resolución horizontal 38 km) mientras que CFSv2 comienza en 2010 hasta el presente con una mejora en la resolución a 0.2°. Los reanálisis se van mejorando con el tiempo, corrigiendo diferentes errores y logrando nuevos resultados cada vez más precisos (Saha et al., 2014).

Los reanálisis son simulaciones matemáticas de tiempos pasados sobre las condiciones climatológicas. En estos parámetros se introducen las diversas medidas observadas que se han registrado históricamente en centros de investigación de todo el mundo (proceso de asimilación). Los reanálisis surgen de los avances tecnológicos y la necesidad de implementar registros de diferentes formatos, algunos de los cuales están obsoletos, en los sistemas modernos. Conforme se desarrolla la tecnología se van impulsando reanálisis (de última generación) que implican una mayor cantidad de datos gracias a programas capaces de procesarlos de una manera eficiente. Esto también exige una mayor cantidad de información registrada en las estaciones experimentales.

Las medidas experimentales se obtienen de radiosondas, sensores de aviación, información terrestre o información de satélites geoespaciales de origen militar, académico o gubernamental (Saha et al., 2010). Entre las diversas medidas a escala global destacan la presión sobre el nivel de mar (PAOBS), la velocidad del viento en superficie (*incluyendo vectores de posición*), las temperaturas o la radiación solar.

Destacar que las medidas experimentales no son uniformes en el tiempo; existen vacíos temporales o medidas resultantes de diferentes aparatos con diferente precisión. Para tratar este problema se realiza un proceso de selección solapando lo mejor posible los datos disponibles más precisos. Por ejemplo la radiancia solar empleada para CFSR como se muestra en la Figura (7).

Las bases de datos procedentes de reanálisis o hindcast no son medidas experimentales como tal, es decir, no son observaciones experimentales. Por ello es fundamental realizar una calibración empírica adecuada con los registros experimentales mediante diferentes procesos. Para más información véase la tesis doctoral (Tomas, 2009).

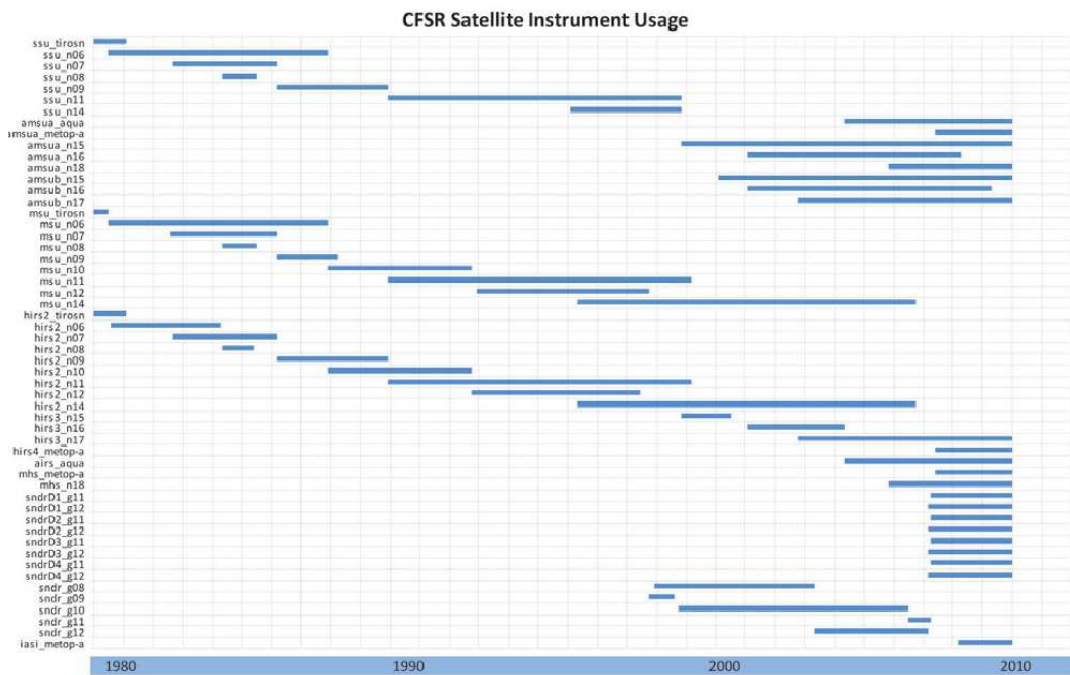


Figura 7. Medidas de la radiancia de diferentes instrumentos y periodos empleados.
Fuente: (Saha et al., 2010)

En el presente experimento se ha empleado la información relacionada con viento, hielo y corrientes de (2005-2017) procedente de los reanálisis. Pues aunque las olas están formadas por la acción del viento sobre la superficie del agua (fricción) hay que incluir determinadas interacciones para entender por completo el comportamiento del oleaje. Fundamentalmente las interacciones con la cobertura de hielo dinámica y las interacciones con las corrientes.

La información relacionada con estas variables se obtiene en los reanálisis a través de diferentes estudios y medidas a escala global como se detalla a continuación.

3.1.1 - Datos procedentes de la atmosfera (vientos).

En el estudio de la atmosfera se estudian las medidas de la radiancia de satélites (medidas en bruto), temperatura y presión con un modelo híbrido denominado sistema sigma-presión (Saha et al., 2010). Se implementan también las concentraciones de CO₂ (relación con el cambio climático). Para la generación de resultados se emplean las condiciones de los gases (introduciendo trazadores de gas para diferentes gases de la atmosfera), sus calores específicos o propiedades del aire en particular además de determinar la entalpía con las leyes de la termodinámica. Los resultados obtenidos han sido testados realizando numerosos pronósticos sobre tormentas tropicales obteniendo resultados satisfactorios.

Con un tratamiento adecuado se pueden obtener las condiciones históricas del viento (flujo de gases a gran escala). Aplicando los resultados al presente experimento es necesario tener una predicción adecuadas para estimar correctamente el oleaje. Las olas generadas por viento en un determinado lugar del océano pueden verse afectadas por la placa de hielo o por una determinada corriente, lo cual puede resolverse como una interacción vectorial.

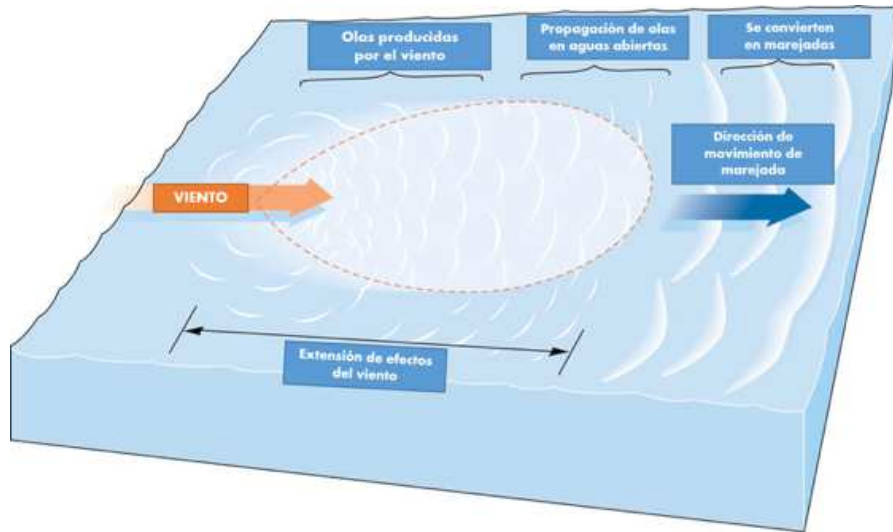


Figura (8). Olas generadas por la fricción del viento sobre la superficie del agua.

Fuente: science.kennesaw.edu

3.1.2 - Datos procedentes de la criosfera (hielo)

La interacción con la cobertura de hielo dinámica afecta al oleaje del mismo modo que lo hacen las costas. Para simplificar el tratamiento en el modelo empleado se consideran que las condiciones de contorno impuestas por estas masas de hielo son idénticas a las terrestres; considerando en sus localizaciones la energía de las olas nula. El hielo marino o criosfera es muy importante en una reanálisis a escala global; especialmente en las zonas polares ya que la capa de hielo modifica significativamente las condiciones climáticas. Para tratar la dinámica se utilizan técnicas elástico-viscosas y para otras condiciones se recurre a la termodinámica (evaporación, fusión o congelación).

3.1.3 - Datos procedentes de los océanos (corrientes)

En los océanos se analiza la temperatura y la salinidad en la superficie con información de satélites y boyas respectivamente. El objetivo es implementar los datos de temperatura y salinidad (interpolando donde no exista información) para minimizar la siguiente función:

$$J = \frac{1}{2} (x - x_b)^T \frac{1}{B} (x - x_b) + \frac{1}{2} [y - H(x)]^T \frac{1}{R} [y - H(x)] \quad (20)$$

El primer sumando representa la diferencia entre el resultado (x) y el pronóstico (x_b) con un factor de ponderación que representa la incertidumbre del pronóstico; B representa la matriz asociada a la covarianza. El segundo sumando representa la diferencia entre las observaciones (y) y el análisis interpolado $H(x)$; H representa el operador interpolador lineal y R es la correspondiente covarianza.

En los presentes reanálisis se ejecuta en paralelo el modelo atmosférico, el modelo de hielo dinámico y el modelo oceánico. Los datos están acoplados en esta ejecución en paralelo y durante el proceso de interpolación generando resultados consistentes.

No obstante las corrientes empleadas son superficiales (5 m) y no deben confundirse con otras de diferentes orígenes que deben identificarse de manera adecuada.

Las corrientes marinas tienen distintos orígenes como son el viento, la diferencia de densidades, las variaciones de temperatura, el relieve marino o las conocidas corrientes de marea asociadas a la Luna. En general las medidas superponen la información de todas las fuentes aunque en función de la posición geográfica algunas componentes pueden resultar despreciables.

El viento al interactuar con la superficie del océano, además de generar oleaje, transmite una pequeña cantidad de momento a las capas inferiores originando las corrientes. No obstante la dirección de la corriente no coincide con la del viento debido al rozamiento y los efectos de rotación terrestre (efecto Coriolis).

En la figura 9 se muestra la desviación en la dirección de corriente respecto a la dirección del viento por el efecto Coriolis; esto fue descrito en 1905 por Walfrid Ekman con un modelo teórico denominado actualmente como la espiral de Ekman.

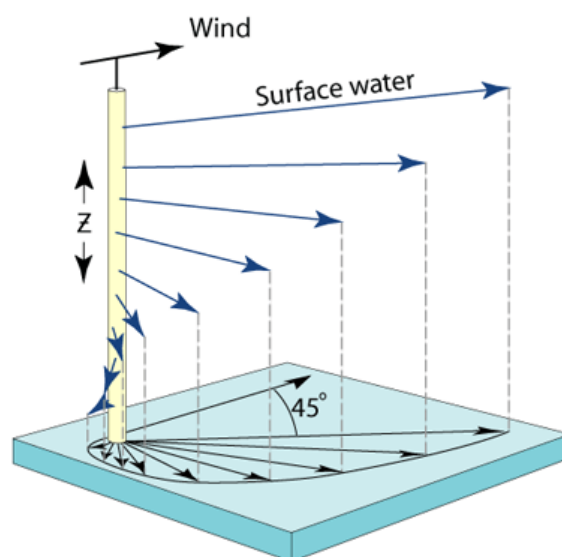


Figura 9. Espiral de Ekman

Fuente: oceanografiafisicaymas.blogspot.com

El resto de corrientes asociadas a temperatura (corrientes frías y cálidas) o al relieve marino (turbidez) surgen del concepto de estabilidad/equilibrio entre sistemas. El fundamento físico en el primer caso es un equilibrio termodinámico que transporta las corrientes cálidas en dirección a los polos (zonas frías) mientras que en el segundo es un equilibrio mecánico que surge de un aporte de sedimentos de un río u otras condiciones geológicas (p.e terremotos). Por último las corrientes que se originan por densidad (density current) tienen como origen uno o varios de los casos anteriores; cuando dos masas de agua coexisten en vertical pueden darse los diferentes casos, es decir, que existan una diferencia de temperaturas, una diferencia de salinidad o un flujo/deposición de sedimentos.

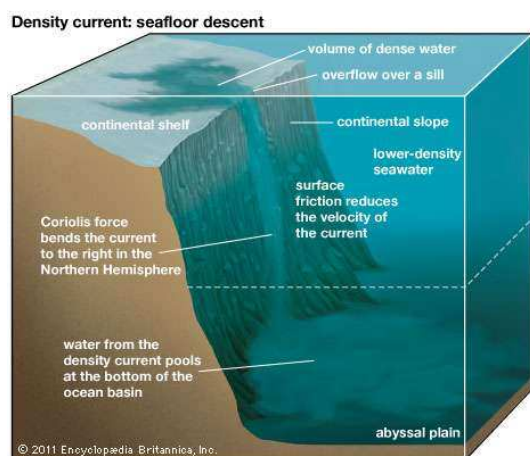


Figura 10. Esquema de corriente de densidad y factores que influyen en su formación.

3.2 - Datos simulados del oleaje (GOW2)

Para estudiar la influencia de las corrientes en el oleaje a escala global es necesario disponer de información histórica sobre el oleaje en ausencia de corrientes. Para ello se utiliza la base de datos GOW2 (Global Ocean Waves) una base de datos con información histórica durante el periodo 1979-2017 desarrollada por el grupo Clima Marino y Cambio Climático, del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH). Esta base resulta de un pronóstico a escala global con alta resolución en costas y zonas polares, dispone de información sobre parámetros del oleaje y espectros, con una resolución de hasta 0.25° en zonas costeras.

La comparación puede ser complicada si se emplean diferentes bases de datos o procesos de modelado numérico. En este sentido GOW2 se desarrolla en WAVEWATCH III usando las mismas mallas (globales y polares) facilitando así el análisis y la posible comparación. GOW2 presenta resultados más precisos que otros análisis globales debido a la alta resolución de los forzamientos y ha demostrado tener un pronóstico eficiente de los ciclones tropicales (Perez, Menendez, & Losada, 2017).

4 Metodología

Para el desarrollo del estudio se ha empleado el modelo numérico WWIII 4.18. El software compilado en Fortran tiene una configuración compuesta por 4 módulos encargados de diferentes procesos que permiten la generación y propagación del oleaje. Toda la configuración relativa a este modelo se realiza a través de una serie de scripts generados en Matlab. La configuración empleada en el modelo se especifica mediante un esquema de cuatro etapas principales [Véase Capítulo 2 Modelado Numérico].

4.1 Generación de las mallas de cálculo

Se ha dividido el geoide en tres mallas: una malla global centrada en la zona ecuatorial de resolución 0.5° Lat x 0.5° Lon, y dos mallas para las zonas polares del Ártico y Antártico de resolución 0.25° Lat x 0.5° Lon.

La forma de geoide implica que la resolución espacial en las zonas norte (malla Ártico) y sur (malla Antártico) deban ser diferentes a la malla global (no es equivalente un grado en la zona ecuatorial que en el extremo norte).

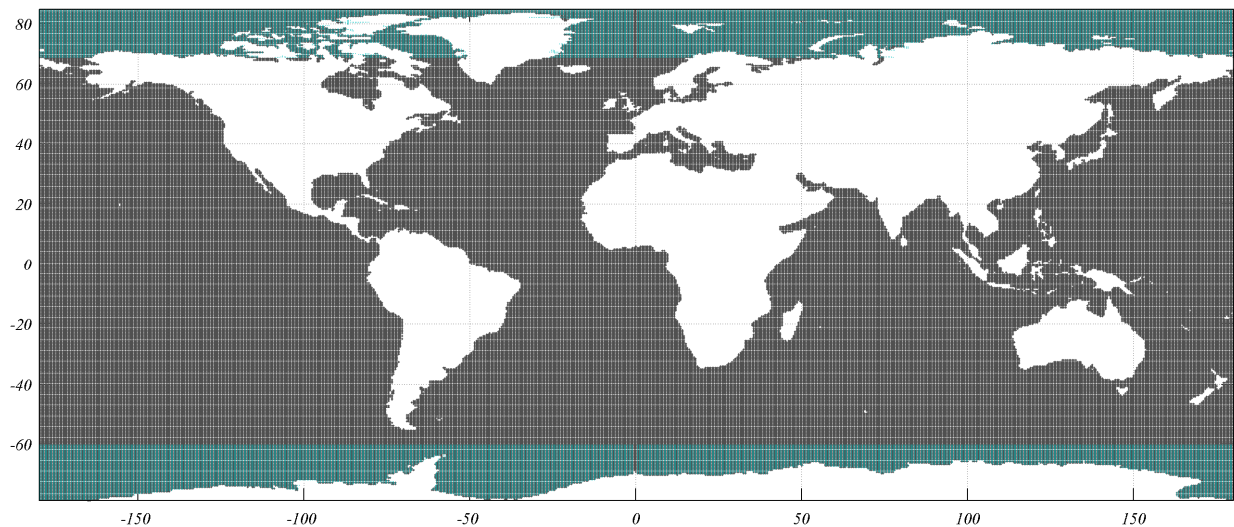


Figura 11. Mapa global con las diferentes mallas (dominios) empleados y su resolución.

La resolución de las mallas esta relacionada con la resolución temporal en que resuelve el modelo ó los denominados “time steps”. En función del tamaño de celda es posible determinar los time steps siguiendo las relaciones descritas en el manual. Los “time steps” o pasos de tiempo cuantifican la resolución temporal en que resuelve el modelo los diferentes procesos físicos que se desean simular. El adecuado balance entre estos pasos de tiempo determinará la eficiencia del modelo; un modelado muy rápido puede generar inestabilidades entre celdas mientras que un modelado demasiado preciso conlleva un largo tiempo de procesado.

Es posible modificar estos intervalos temporales para reducir el tiempo de computación manteniendo siempre proporción adecuada calidad-tiempo. En este caso se emplean los mismos pasos de tiempo usados en GOW2.

	Resolución Espacial				Resolución temporal (s)			
<i>Malla</i>	ΔLat	ΔLon	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Global</i>	<i>CFL</i> (<i>x-y</i>)	<i>CFL</i> (<i>k-θ</i>)	<i>Minimum</i>
Global	0.5°	0.5°	[-80°,85°]	[0°,359.5°]	1200	600	600	20
Ártico	0.25°	0.5°	[68.5°,85°]	[0°,359.5°]	600	300	300	20
Antártico	0.25°	0.5°	[-80°,-60°]	[0°,359.5°]	600	300	300	20

Tabla 1. Características de las diferentes mallas durante la ejecución del modelo.

Los “time steps” son introducidos en la ecuación (15) la cual se resuelve en pasos fraccionales. Se distinguen cuatro intervalos básicos:

- **Paso de tiempo global** relacionado con el intervalo de tiempo en que son integrados las componentes de las corrientes y el viento. En el input correspondiente: *Maximum Global*
- **Paso de tiempo para la propagación espacial** asociado al tiempo de propagación máximo (de las componentes especiales) que se establece en función de la frecuencia de referencia (la más baja del modelo). En el input correspondiente: *CFL de x-y*
- **Paso de tiempo para la propagación espectral** análogo al anterior para componentes espectrales. En el input correspondiente: *CFL de k-theta*.
- **Paso de tiempo de integración** relacionado con los intervalos de resolución del modelo y la integración de los diferentes términos fuente a nivel interno; no tiene por qué coincidir con los intervalos temporales mostrados en los resultados. En el input correspondiente: *Minimum source term*.

Se define finalmente el periodo de tiempo simulado en este caso 13 años: 2005-2017.

4.2 Preproceso

Para el periodo de tiempo simulado se emplean 3 forzamientos, todo ellos obtenidos a partir del reanálisis CFSR [Véase Capítulo 3 Bases de Datos]:

1. Viento. Resolución 0.3° (2005-2010) y 0.2° (2010-2017).
2. Cobertura de hielo dinámica. Resolución 0.3° (2005-2010) y 0.2° (2010-2017).
3. Corrientes (superficiales) 5 metros bajo nivel del mar. Resolución 0.5°.

La versión 4.18 permite introducir los forzamientos en formato de texto (*nombre.txt*) o NetCDF (*nombre.nc*); en este caso se han introducido en formato NetCDF.

Una vez definidos los forzamientos a emplear en las diferentes mallas se interpolan y preparan de acuerdo a la resolución de las mismas. En este proyecto se genera un archivo de input de corrientes en formato NetCDF proporcionando como entrada los datos obtenidos de CFSR para poder introducir la variable vectorial de las corrientes. El programa requiere de un input análogo al de viento para las corrientes (únicas variables vectoriales que emplea el sistema). Referente a las mallas se indican los diferentes parámetros del estado de mar que desean obtenerse y su resolución temporal (*cada cuando deben obtenerse en tiempo del modelo, no en tiempo real*).

4.3 Proceso (Ejecución)

Se ejecuta el modelo en un tiempo aproximado de 8 – 10 Días. Se emplea el módulo “Multigrid Shell” que permite ejecutar varias mallas en paralelo ‘anidadas’ (compartiendo las condiciones de contorno).

Se ejecuta en bloques de meses de forma que el primer elemento del bloque se ejecuta “en frío” (partiendo de condiciones de calma) y los siguientes “en caliente”. Para este estudio se ha empleado un periodo en frío de los 15 días previos a cada bloque. A modo de ejemplo, para ejecutar Enero y Febrero 2005 es necesario ejecutar los 15 días finales de Diciembre de 2004. Los 15 días simulados a partir de una situación de calma en el modelo se eliminan durante el postproceso.

Este proceso requiere del uso de un cluster de supercomputación para poder ejecutar varios bloques de meses de manera simultánea, optimizando el tiempo de computación.

4.4 Postproceso

Se emplea el módulo: “Gridded NetCDF output post-processor”. Los archivos generados por el programa aún son binarios y deben convertirse a un formato adecuado para su posible interpretación. En este caso el postproceso se realiza al formato NetCDF. Para las mallas es necesario indicar la escala temporal de los resultados (3600 s) así como los diferentes parámetros del estado de mar que desean obtenerse.

Para más información sobre cualquiera de los módulos [Véase Manual de WW III 4.18].

4.5 Estadística de resultados

El análisis está dividido en 2 secciones. El estudio climático que comprende los valores medios de las variables estudiadas y el análisis de la influencia de las corrientes marinas en el oleaje. Para el estudio climático es suficiente con realizar los promedios en los intervalos de tiempo oportunos; sin embargo para el análisis de la influencia se sigue un procedimiento estadístico con fines poco convencionales.

Generalmente cuando se calculan se compara un conjunto de medidas con un modelo se tiene la esperanza de que los errores sean mínimos e idealmente nulos.

En este sentido el este estudio pretende buscar las diferencias entre dos modelos incluyendo diferentes variables; por lo tanto interesa que los errores e indicadores estadísticos muestres cambios lo más altos posible.

El estudio climático se basa en realizar las medias durante los periodos:

$$\prec Hs \succ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Hs_i \quad (21)$$

Mientras que el análisis de la influencia emplea los siguientes medidores estadísticos:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SC - CC)^2} \quad (22)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SC - CC) \quad (23)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SC - CC)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SC} = \frac{RMSE}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SC} \quad (24)$$

Donde SC y CC representan las simulaciones sin corrientes y con corrientes respectivamente.

El análisis realizado en base a estos indicadores proporciona información sobre: los errores relativos producidos en las diferentes zonas del planeta (SI); la exactitud de los resultados con las diferencias absolutas (RMSE); finalmente el sesgo que proporciona en mayor detalle como se han producido los cambios (BIAS).

Se aplica el procedimiento para la altura de ola significativa (Hs) y su dirección (Dir) obteniendo los resultados presentes en el siguiente capítulo.

5 Resultados y Análisis

Los resultados obtenidos para el periodo de 13 años (2005-2017) son analizados en diferentes aspectos. En primer lugar se realiza un estudio climático medio y estacional. En segundo lugar se analizan las diferencias encontradas respecto a la simulación en ausencia de corrientes usando la base de datos GOW2.

5.1 Estudio climático

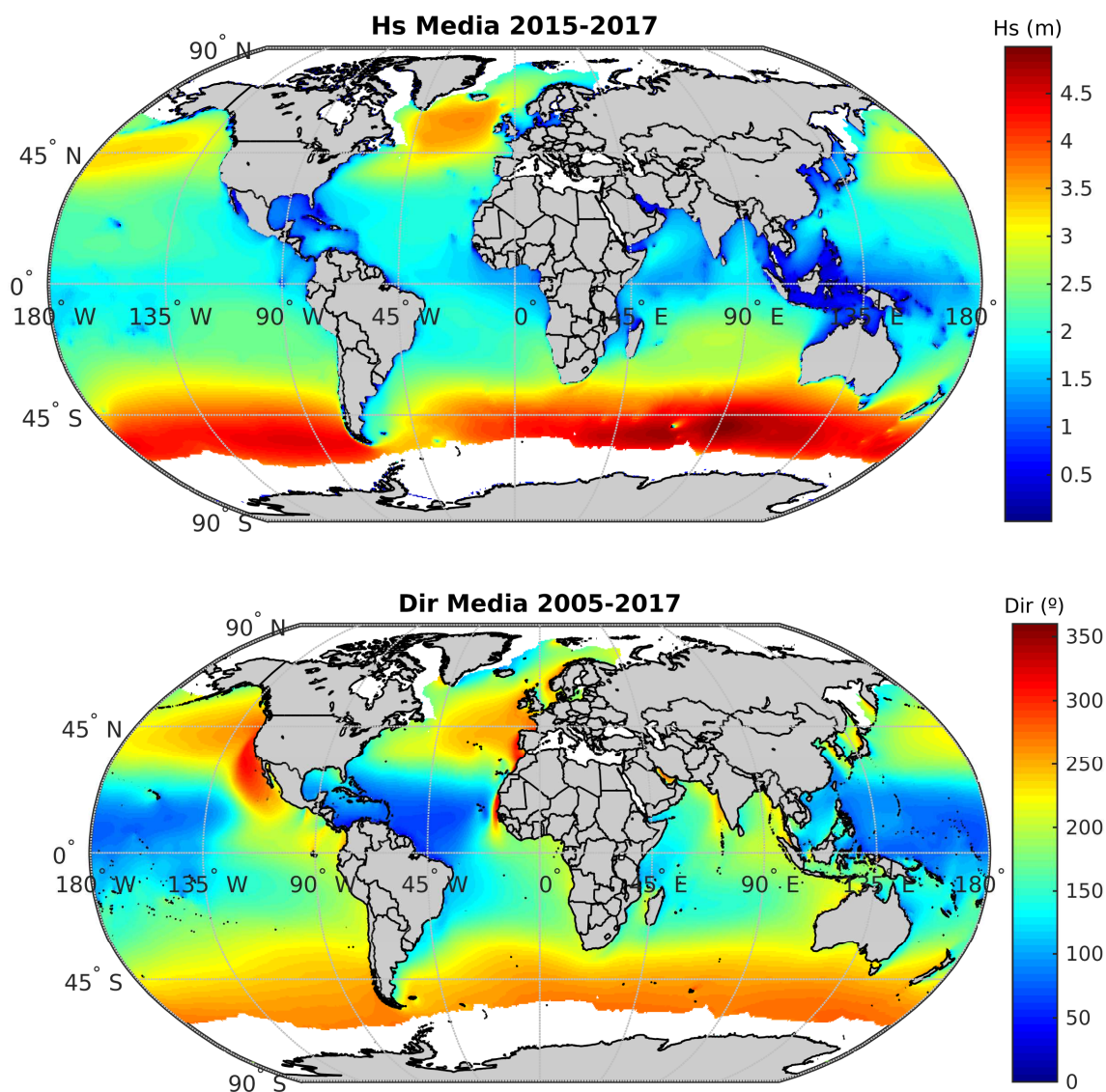


Figura 12. Valor medio de la altura de ola significativa (Hs) y su dirección para el periodo simulado.

En la zona del Antártico se observa que la dirección del oleaje está dirigida en dirección oeste-este con alturas de ola significativas Hs del orden de 4 - 5 metros. Esta zona geográficamente destaca por la presencia de fuertes vientos que recorren los océanos australes.

Históricamente estos vientos han sido caracterizados en función de su latitud como los 40 Rugientes, los 50 Aulladores (Furious Fifties) y los 60 Bramadores (Screaming Sixties) para 40°S, 50°S y 60°S respectivamente. Los 40 Rugientes (Roaring Forties) deben su importancia histórica al hecho de que permitieron a Hendrick Brouwer conectar Sudáfrica e Indonesia por ruta marítima en el siglo XVII (barcos de vela). No obstante esta zona destaca por temporales de mares “embravecidos” que dificultan mucho la navegación hasta llegar a los 60 Bramadores donde son escasos los registros experimentales dadas sus condiciones extremas. El origen de estos vientos de valor 7 en escala de Beaufort (50-61 km/h) y sus consecuencias sobre el oleaje están relacionados con una tendencia al equilibrio termodinámico del planeta. Desde el ecuador hacia los polos, se produce un gradiente térmico, debido a la diferencia de temperaturas que existen por la posición del planeta respecto al Sol. El aire cálido desviado hacia los polos, por la rotación del planeta, genera diferencias de temperatura en la atmósfera que dan lugar a dicho fenómeno.

En la zona del Ártico no se producen estos fuertes vientos debido a que la cantidad de obstrucciones es mucho mayor (América del Norte, Europa y Asia); realmente hay poca superficie ocupada por agua para una latitud dada. La altura de ola significativa H_s es del orden de 3 – 4 metros en el océano Atlántico. En la región del Pacífico Norte (Costa USA - Costa Japón) se observan alturas de ola media de 3 metros.

En general la zona ecuatorial se observa la menor altura de ola significativa con un intervalo de 0.5 metros a 3 metros; siendo la zona de mayor calma con respecto a los parámetros del oleaje estudiados.

Los mapas representados en la Figuras 12 corresponden a climatologías medias por lo que no pueden verse valores de temporales extremos. En las zonas tropicales [30°S – 30°N] se producen los denominados ciclones tropicales que son sistemas tormentosos alrededor de un centro de baja presión. Estos ciclones generan fuertes vientos que producen olas de gran altura. No obstante en las figuras al tratarse de un promedio, en un periodo largo de tiempo, esos valores no son apreciables.

Respecto a las direcciones de la Figura 12 (*Inferior*) destacan las cuencas occidentales de los continentes americano, europeo y africano. En estas zonas se producen grandes cambios en la dirección del oleaje que están directamente relacionados con los patrones de circulación atmosféricos (vientos). El cambio de dirección de los vientos alisios respecto a los vientos del oeste queda reflejado en estas regiones. Respecto al resto de mundo existen cambios de dirección en los límites de las plataformas continentales pero no tan destacados.

En la Figura 13 se representan los valores asociados a las estaciones de verano e invierno. Las diferentes climatologías presentan un océano atlántico calmado en la estación de verano con alturas de ola del orden de 2 metros y direcciones siguiendo la tendencia general descrita previamente (sin mucho cambio respecto al invierno).

Esta tendencia se sigue en general en todo el hemisferio norte; únicamente cabe mencionar la intensificación producida en invierno del mar de fondo (propagación lejos de zona donde se ha generado el oleaje). Véase Figura 8.

Simultáneamente en el hemisferio sur destaca el invierno austral donde se pueden observar fuertes oleajes dirigidos de oeste-este correspondientes a los fuertes temporales que tienen lugar en esta zona. Esta zona sufre una intensificación de 1 metro de media en invierno respecto al verano austral.

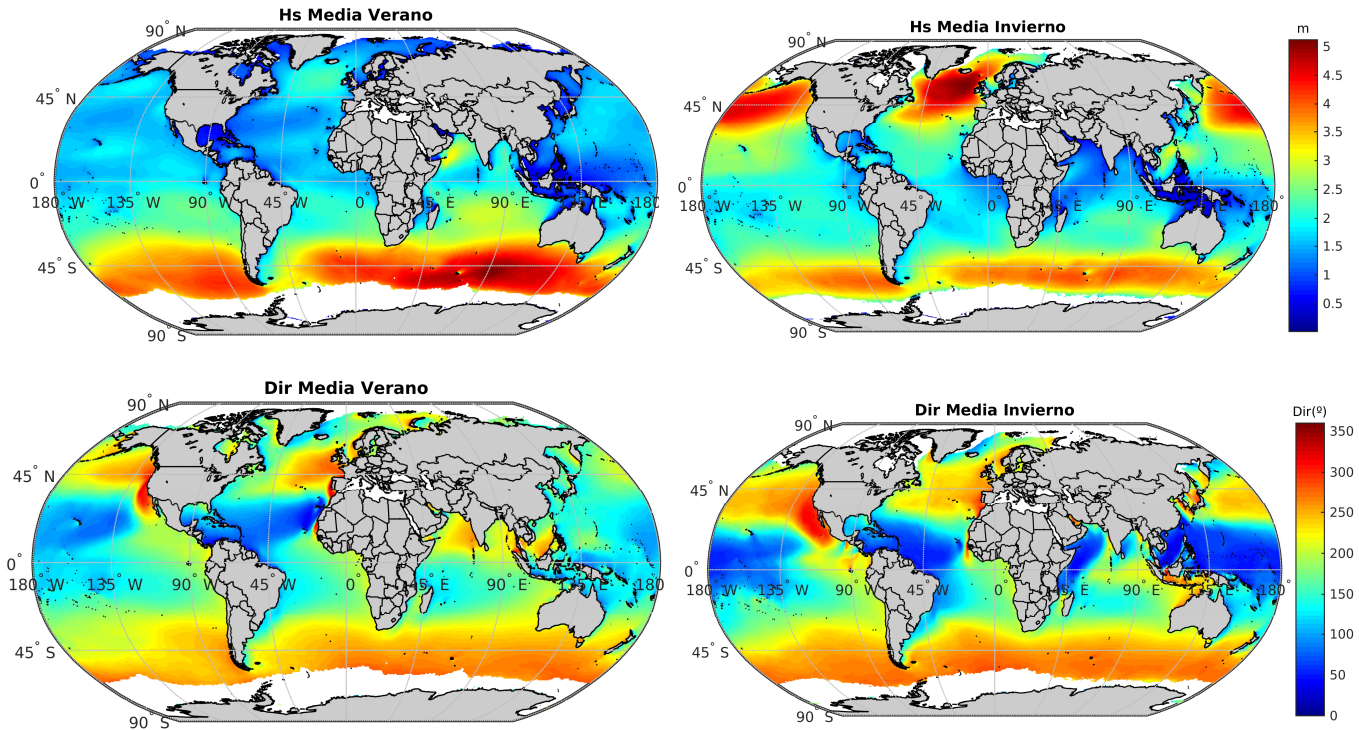


Figura 13. Valor medio de Hs y su dirección para diferentes estaciones (Invierno y Verano).

En la zona del océano Índico aparece una intensificación durante el verano que está directamente relacionada con los ciclones que tienen lugar durante esta estación. En esta misma estación aparecen fuertes cambios en la dirección relacionado con la época de monzones. El monzón es un evento estacional y las direcciones del viento generadas son opuestas en verano (sur-norte) y en invierno (norte-sur). El origen del fenómeno está relacionado con el hecho de que la tierra se calienta con una tasa superior a los océanos. Esta diferencia de temperaturas provoca una dinámica de vientos, debido a las borrascas generadas (áreas de baja presión) que tienden a igualarse con los anticiclones (áreas de alta presión).

Destacar la importancia de la corriente de Leeuwin en la costa oeste de Australia que muestra su influencia en el presente estudio global; produciendo cambios en la dirección del oleaje durante el invierno. Estos resultados coinciden con el estudio realizado por la “Western Australia University” reflejados en la tesis doctoral que estudia la influencia de dicha corriente (Wandres, 2017).

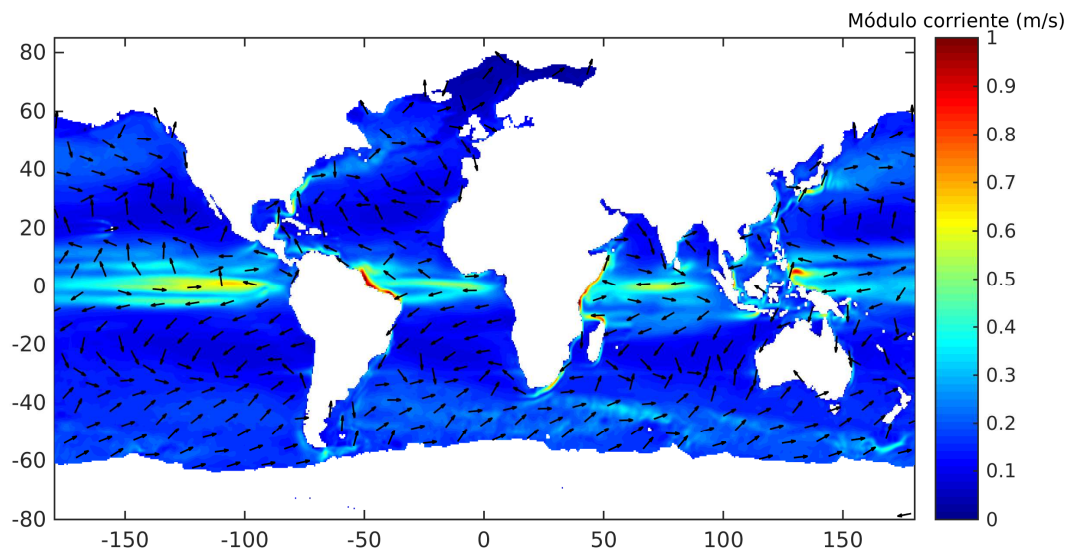


Figura 14. Valor medio (módulo) y direcciones de las corrientes empleadas de CFSR.

Para la climatología de las corrientes se observa que la tendencia sigue el esquema de circulación general aunque realmente la física a escala global es complicada de cuantificar. Destaca la influencia de la corriente Somalí, la corriente de Agulhas y especialmente la corriente ecuatorial en diversas zonas (Pacífico, Atlántico e Indico)

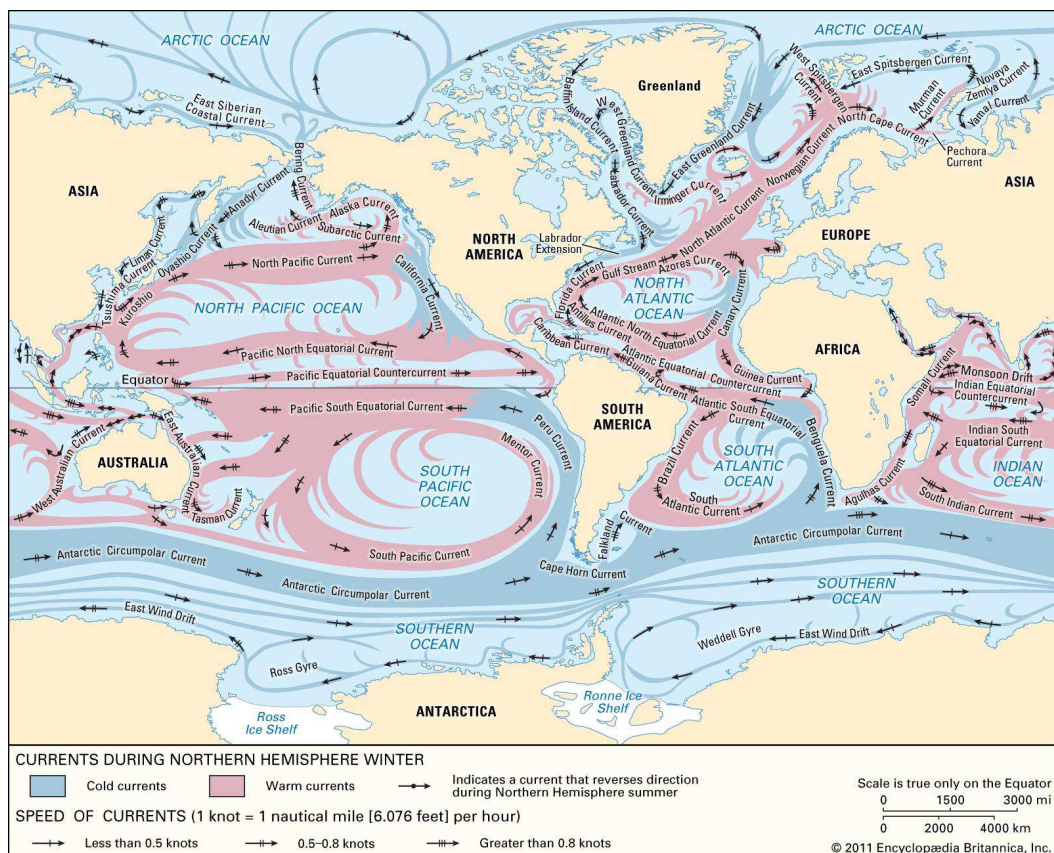


Figura 15. Mapa global con el esquema de circulación general de las diferentes corrientes superficiales y su extensión.

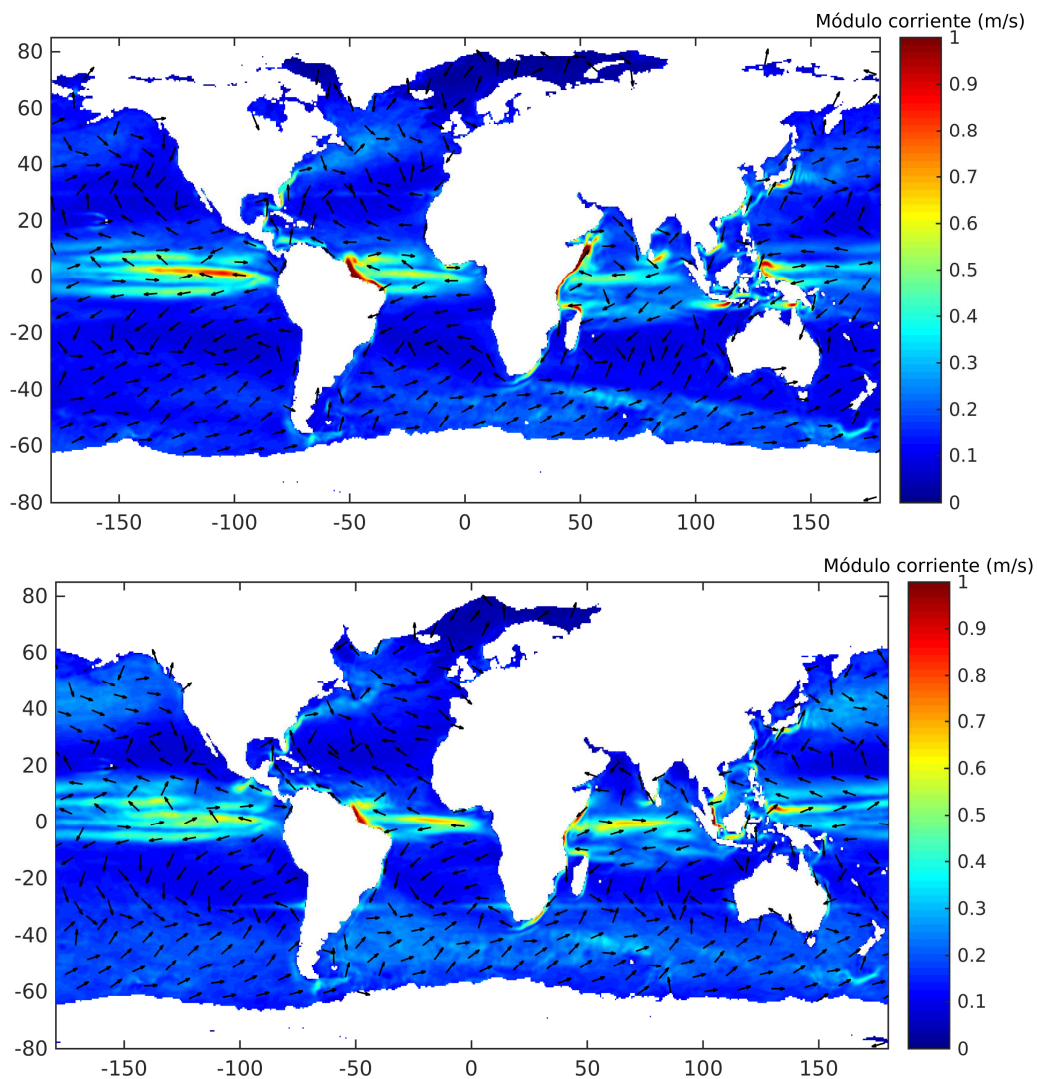


Figura 16. Valores medios (módulos) y direcciones de las corrientes en superficie para las estaciones de verano e invierno respectivamente.

La climatología de las corrientes presenta una intensificación de la corriente ecuatorial en el verano en diversas zonas: el océano pacífico (oeste USA), norte de Brasil y golfo de Bengala. Por otra parte la corriente somalí (Costa este África y norte de Madagascar) presenta también una intensificación durante el mismo periodo estacional. Destacar la zona de Sri Lanka y el sur de Yakarta (Indonesia) donde los cambios estacionales son más significativos.

La corriente del golfo (*Gulf Stream*), representa un factor climático importante Europa occidental. En el análisis estacional se observa una ligera intensificación, en la zona del océano atlántico, durante el invierno (Figura 16 Inferior). De la misma manera la corriente de Agulhas (sur África) y la corriente de Kuroshio (Japón) presentan la misma intensificación durante la estación fría (hemisferio norte).

5.2 Análisis de la influencia de las corrientes

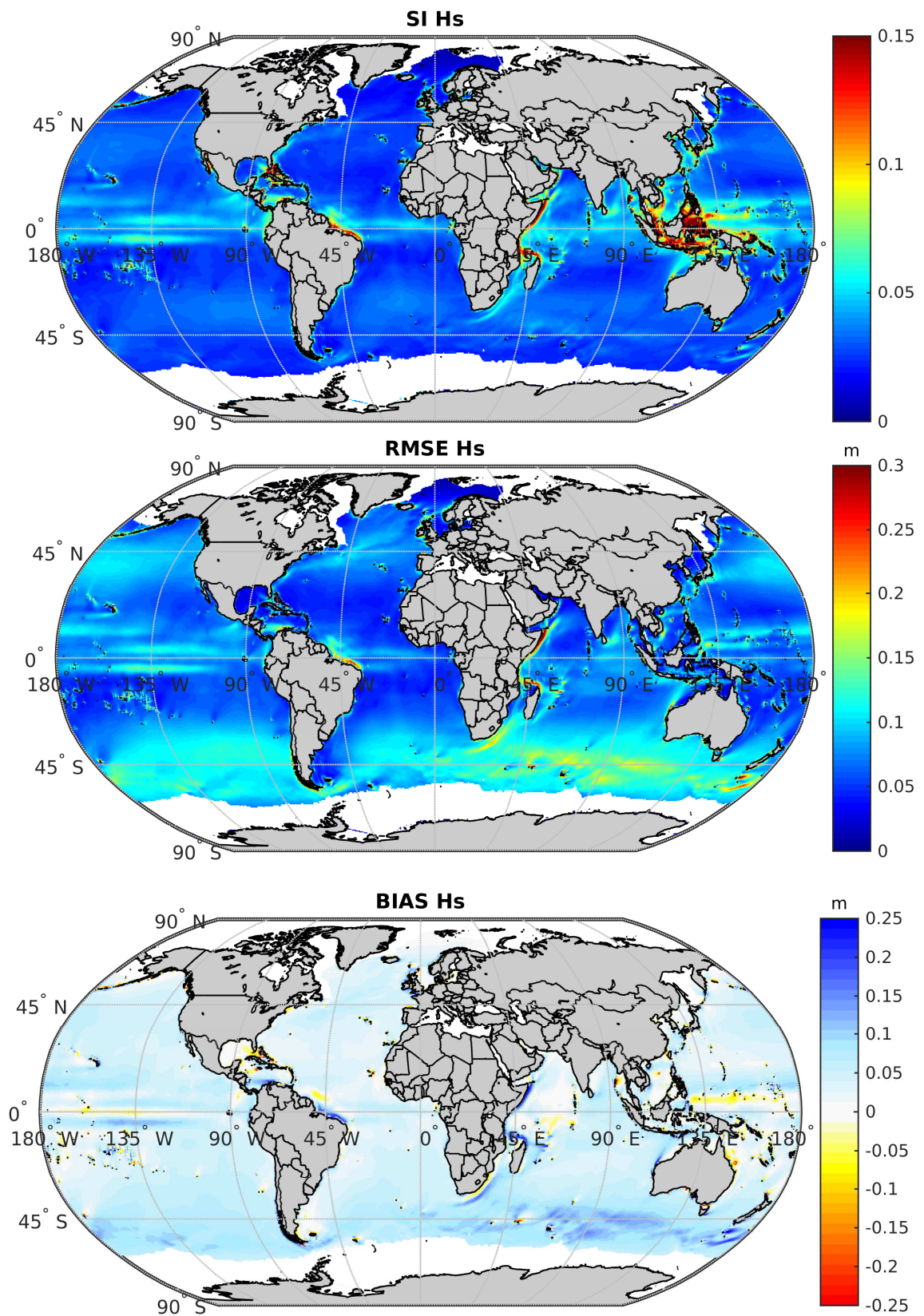


Figura 17. Representación de Hs del scatter index (SI), el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (BIAS). Se compara la simulación con corrientes con el producto GOW2.

En la Figura 17 (SI) puede observarse que los mayores cambios relativos se producen en la zona de Indonesia altamente influenciada por la corriente ecuatorial. Las zonas localizadas en el golfo de Bengala y norte de Madagascar destacan también por sus cambios relativos donde existe la influencia de la corriente Somalí (Sur-Norte) y el eddy ó corriente circular (remolino) producido por la corriente ecuatorial. En la zona del norte de Brasil de nuevo tiene gran influencia la corriente ecuatorial. La última diferencia significativa aparece en la zona de Cuba asociada a la corriente del Golfo.

Aparecen menores diferencias en el recorrido general de corriente ecuatorial y en el sur de África debido a la corriente de Agulhas (Norte-Sur).

Los mayores cambios relativos se producen en las zonas donde existen obstrucciones (islas) indicando la importancia de las corrientes en estas zonas.

En la Figura 17 (RMSE) se puede observar un cambio absoluto de 0.15-0.20 metros en la zona asociada a la corriente circumpolar antártica. Se intensifican los efectos de la corriente de Agulhas denotando su verdadera importancia con cambios absolutos del orden de 0.2 metros. Aparecen también influencias en la zona occidental de Europa debido con una doble vertiente; por una lado la corriente del Golfo con cambios hasta los 0.15 metros y por otro lado la influencia de las corrientes de marea que tienen unos efectos importantes en la zona de Reino Unido. Con intensidad similar (0.1 - 0.15 metros) se observa en la zona de Japón los cambios debidos a la corriente Kuroshio.

No obstante desaparece la influencia en las zonas de obstrucciones debido a que los cambios se producen en una zona donde las olas son más pequeñas Figura (12).

En la Figura 17 (BIAS) se detalla como se producen los cambios. La zona positiva (azul) indica que Hs disminuye al introducir las corrientes en la simulación mientras que la zona negativa (rojo) indica un aumento en Hs. Los decrementos más importantes se producen en la zona circumpolar antártica, la corriente de Leeuwin en Australia (previamente mencionada), el golfo de Bengala y norte de Madagascar debido a la corriente Somalí y norte de Brasil por la corriente ecuatorial.

Las zonas donde Hs aumenta son principalmente las zonas ecuatoriales y la zona de Cuba. En las zonas ecuatoriales del océano pacífico suele estar asociado a obstrucciones y zonas con numerosas islas. En estas zonas las condiciones climáticas del oleaje se ven muy afectadas por el efecto de las corrientes.

En el sur de África y la zona ecuatorial del océano pacífico se observan diferencias de ambos tipos; es decir existe por un lado un aumento y por otro lado un decremento en Hs. Este hecho esta relacionado con la existencia de dos corrientes que circulan en direcciones opuestas. Realmente los fenómenos son más difíciles de cuantificar en estas zonas debidas las diferencias en las corrientes producidas en el límite de placa continental (Figura 10).

En la zona norte de Brasil también se observan ambos efectos donde intervienen la corriente ecuatorial y lo vientos alisios.

Las zonas que presenta un incremento está relacionadas con oleaje moviéndose en la misma dirección que la corriente; esto implica una superposición de efectos y el correspondiente aumento en H_s . Por otro lado si la situación es opuesta y la dirección del oleaje se enfrenta con la dirección de la corriente se produce un decremento en la altura de la ola. Este efecto se explica a través de la expresión (18) del modelo: si la corriente ($\mathbf{U}$) y la ola ($\mathbf{k}$) se desplazan en el mismo sentido $\mathbf{U} \cdot \mathbf{k} > 0$ para conservar la frecuencia absoluta conforme $\mathbf{U}$ aumenta y $\mathbf{k}$ debe disminuir aumentando el oleaje. En la situación contraria la corriente ($\mathbf{U}$) y la ola ($\mathbf{k}$) se desplazan en sentido opuesto $\mathbf{U} \cdot \mathbf{k} < 0$ para conservar la frecuencia absoluta conforme $\mathbf{U}$ aumenta y $\mathbf{k}$ deben aumentar disminuyendo el oleaje.

En general se puede observar un sesgo de decremento. Esto implica que generalmente al no tener en cuenta las corrientes se está sobre estimando el oleaje. Los resultados presentes en la Figura 17 son compatibles con el estudio realizado recientemente sobre el océano austral. El estudio (Rapizo, Durrant, & Babanin, 2018) llega a las mismas conclusiones aunque la región y el periodo simulados son mucho menores.

El estudio mencionado realiza una comparativa de los resultados con medidas de satélite y boyas (validación); las principales conclusiones obtenidas por el estudio indican que la inclusión de las corrientes marinas en el modelado numérico mejoran los resultados. Comparando en ausencia de corrientes frente al experimento con corrientes, se observan decrementos en el BIAS y el RMSE respecto a la validación en el caso que incluye las corrientes marinas.

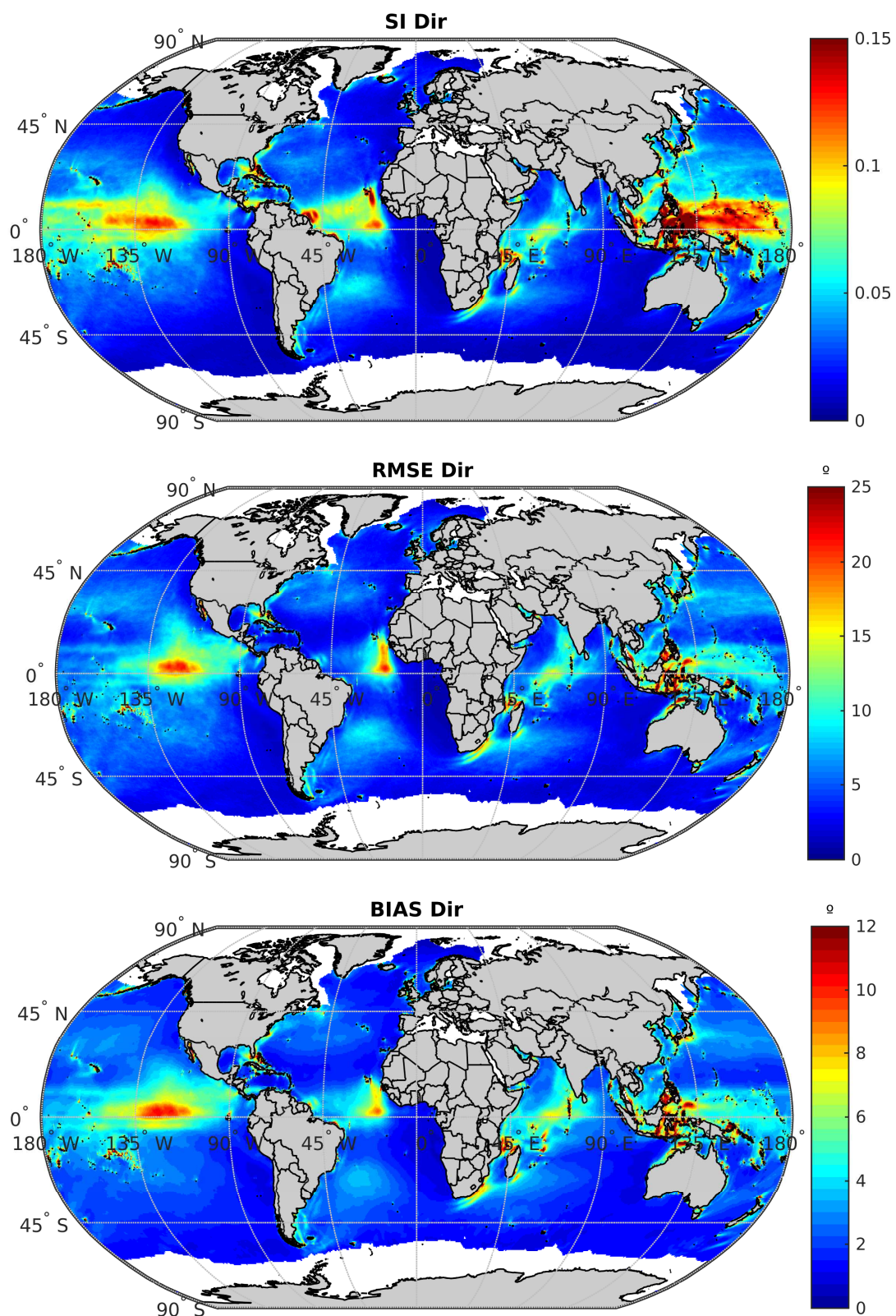


Figura 18. Representación de la dirección del oleaje. Los mapas corresponden al scatter index (SI), el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (BIAS). Se compara la simulación con corrientes con el producto GOW2.

En la Figura 18 (SI) se observan los mayores cambios relativos en la zona de Indonesia donde influye la corriente ecuatorial. Las zonas del golfo de Bengala y norte de Madagascar influenciadas por la corriente ecuatorial. La zona sur de África y sur de Madagascar donde aparece influencia de la corriente de Agulhas. La zona de Cuba y el golfo de México muestran influencia de la corriente del Golfo. Destacar la influencia en la zona de las islas de Cabo Verde que esta directamente influenciada por las corrientes empleadas (CFSR) que muestran un modulo de 0.5 m/s Figura 14 en dicha región. Esta influencia puede venir de la corriente de Canarias, la corriente de Guinea y la corriente de Benguela que interaccionan formando un Eddy en el océano atlántico. La zona norte de Brasil y el océano pacífico muestran una influencia importante debido a la interacción de los alisios y a la corriente ecuatorial.

En la Figura 18 (RMSE) permanecen los cambios absolutos en el océano pacífico con valores de hasta 25°, el sur de las Islas de Cabo Verde con cambios entre 20° y 25°, el sur de África y Madagascar (Corriente Agulhas) con cambios de 12-18°. Al norte de Madagascar y en Golfo de Bengala (corrientes ecuatorial y somalí) con 12° de media. Finalmente las Islas de Indonesia mantienen su importancia con cambios hasta los 25°.

En la Figura 18 (BIAS) se observan los mayores cambios en la zona del pacífico del orden de 10° – 12°. Los cambios aparecen donde la corriente ecuatorial interacciona con los vientos alisios. Estas condiciones están directamente relacionadas con los fenómenos del Niño y la Niña. Estos eventos climáticos están relacionados con las temperaturas de los vientos alisios y su interacción con el entorno. Cuando los vientos alisios del oeste son fuertes provocan un descenso en las temperaturas dando lugar al fenómeno de la niña. Por el contrario cuando cesan estos vientos, el océano recupera su temperatura (aumento) lo que da lugar al fenómeno del niño.

En general los cambios relativos tienden a ser mayores en las zonas costeras de islas y continentes. La tendencia general dichas zonas presenta un cambio muy significativo de hasta 25°.

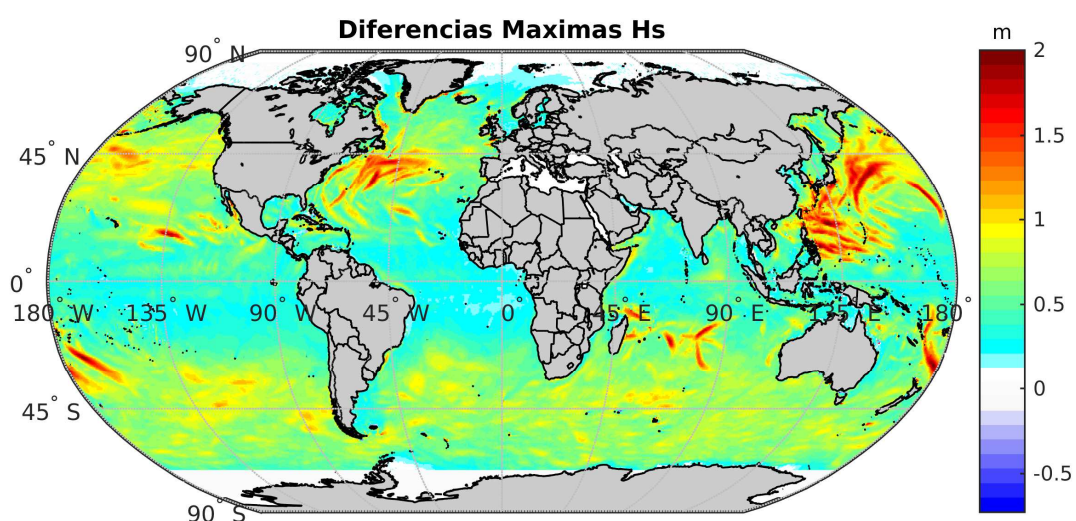


Figura 19. Representación de las diferencias máximas puntuales en el periodo 2005-2017.

El mapa de la Figura 19 representa una situación de eventos extremos del oleaje.

Al introducir las corrientes se observa en rojo, amarillo y verde los lugares donde es más importante la sobrestimación del oleaje. Las zonas más importantes se sitúan en la trayectoria de la corriente del Golfo, donde existe una sobreestimación de hasta 2 metros. Estos resultados implican que la influencia de esta corriente sobre el oleaje puede tener efectos muy significativos.

La corriente de Kuroshio presenta también una sobreestimación de 1 a 2 metros en toda su extensión. La corriente somalí al límite de la plataforma continental muestra diferencias de 1 metro. En la zona de Madagascar los efectos producidos por la corriente ecuatorial alcanzan valores similares entre 1 – 1.5 metros. Finalmente en menor medida los cambios producidos por la corriente ecuatorial pueden observarse a escala global (océano pacífico e índico). Cabe mencionar la influencia de la corriente Humboldt o corriente del Perú en la zona de Chile que provoca cambio de 1 metro.

La zona afectada por la corriente circumpolar antártica (hemisferio sur) muestra una sobreestimación general de 1 metro a escala global. A pesar de no tener las mayores diferencias el efecto neto en toda su extensión es superior al resto de corrientes estudiadas. No obstante existe una dificultad añadida en esta zona de cara a una posible validación posterior con medidas experimentales (boyas). Dadas las condiciones climáticas del oleaje son escasas las boyas que proporcionan un registro fiable de oleaje y corrientes en estas zonas. En todo caso existe la posibilidad de realizar una comparativa con datos de satélite (Rapizo, Durrant, & Babanin, 2018).

Por último destacar la existencia de una región, situada al sur de Ecuador en el meridiano Greenwich, donde no existen diferencias apreciables en todo el periodo simulado. En este sentido la simulación y propagación del oleaje, en zonas costeras o límites de la plataforma continental del oeste de África (Gabón y Angola), pueden realizarse en ausencia de corrientes. Existe una corriente denominada la corriente de Angola que recorre la costa en cuestión del continente africano; por lo tanto esta asunción es válida para el caso de las corrientes de CFSR empleadas; no obstante pueden existir otras bases de datos con información regional más precisa que modifiquen este resultado.

6 Conclusiones y Discusión

Se ha estudiado la influencia de las corrientes marinas sobre el oleaje a escala global. La generación del oleaje se debe principalmente al viento, no obstante las corrientes juegan un papel importante que suele subestimarse. Al final la interacción física real no deja de ser un complejo proceso entre viento-corriente-oleaje que no resulta fácil de simular o predecir con exactitud. Ha sido posible llevar a cabo un análisis de esta influencia sobre el clima del oleaje a escala global entre 2005 y 2017. El estudio e incorporación de los datos de corrientes, vientos y hielos obtenidos del reanálisis CFSR y su ejecución en un periodo de 13 años con resolución horaria, ha permitido obtener una base de datos del oleaje a partir de la cual se pueden obtener diferentes parámetros. Mediante el estudio de los parámetros de Hs y Dir se ha analizado el efecto de las corrientes.

Existen regiones afectadas por la influencia de las corrientes que demuestran la importancia de incluir esta variable. Estos efectos se pueden observar tanto en la magnitud (Figura 17) como la dirección (Figura 18). Además un análisis estacional, realizado en verano e invierno, ha permitido identificar ciertas regiones que destacan por la influencia de las corrientes (con velocidad de hasta 1 m/s).

De las diferentes regiones del planeta destacan:

- La región del océano sur influenciada por la corriente circumpolar antártica. Los efectos de esta corriente pueden producir cambios de hasta 1 metros en la altura de ola significativa.
- La región del Caribe y el océano Atlántico norte afectada por la corriente del Golfo (Figura 19) demuestra que existen una serie de eventos extremos donde los cambios producidos pueden llegar a los 2 metros. Los efectos de esta corriente quedan también reflejados en magnitud (Figura 17) y dirección (Figura 18).
- Los bordes continentales concretamente en las zonas de Chile (corriente de Humboldt) o Somalia (corriente somalí) donde la influencia de las corrientes tiene influencias importantes. Además destaca en la zona de Somalia la intensidad de las corrientes empleadas de CFSR (Figura 14).
- La zona sur de África afectada por la corriente de Agulhas que además de su importancia en eventos extremos (Figura 19) destaca por sus cambios en la dirección del oleaje (Figura 18) y en menor medida su magnitud (Figura 17).
- La zona de Japón afectada por la corriente de Kuroshio que tiene una importancia muy significativa en el mapa de eventos extremos (Figura 19).
- La zona de Indonesia, una zona repleta de islas y obstrucciones. Los resultados implican que las corrientes de estas zonas deben ser consideradas.
- La región norte de Brasil influenciada por la corriente ecuatorial (Figura 17).

Una extensión que daría mayor rigurosidad al presente trabajo sería la validación mediante una comparativa con datos locales procedentes de registros de boyas. Se ha realizado un primer estudio de las diferentes boyas existentes con información de oleaje y corrientes. Desgraciadamente hoy en día no hay numerosas boyas que dispongan de correntómetros incorporados. Además, existen zonas donde es complicado llevar a cabo la colocación y mantenimiento de estos dispositivos, debido a sus extremas condiciones climáticas (p.e el océano sur).

Una primera selección de boyas para este proceso, permite encontrar algunos registros históricos, todos ellos posteriores al año 2010. Este hecho dificulta comparativas para largos periodos de tiempo que darían lugar a estadísticas más robustas. Como se menciona en el Capítulo 2 la importancia de la validación de los modelos numéricos es un aspecto fundamental. No obstante, parte de los datos empleados, concretamente la base de datos GOW2 tiene una validación realizada con boyas y satélite.

La importancia de las corrientes en las zonas de islas y obstrucciones es relativa. Esto se debe al hecho de que las corrientes empleadas tienen una resolución superior a los 50 km. Existe una dificultad añadida de obtener corrientes de baja resolución para esas zonas.

Por último la cantidad de información que contienen los mapas obtenidos da lugar a numerosas aplicaciones. La base de datos obtenida permite realizar estudios anuales o estudios en años donde se produce un determinado fenómeno climático (p.e el Niño o la Niña). Permite analizar la influencia de las corrientes en diferentes periodos del año y detectar los momentos de máxima intensidad (con sus correspondientes cambios en el oleaje). Permite realizar estudios locales en función de la dirección de las corrientes y el oleaje. En definitiva permite realizar todo tipo de análisis para diferentes condiciones climáticas acordes al periodo simulado.

7 Bibliografía

- [1] A. Tomás Sampedro Metodologías de calibración de bases de datos de reanálisis de clima marítimo. Mayo 2009. Universidad de Cantabria (UC) <http://hdl.handle.net/10902/1311>
- [2] Ardhuin, F., S. T. Gille, D. Menemenlis, C. B. Rocha, N. Rascle, B. Chapron, J. Gula, and J. Molemaker (2017), Small-scale open ocean currents have large effects on wind wave heights, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 4500–4517, <https://doi.org/10.1002/2016JC012413>.
- [3] Basile Gallet and William R. Young, Refraction of swell by surface currents (2014) Scripps Institution of Oceanography University of California at San Diego La Jolla, CA 92093-0213
- [3] B.G. Reguero, M. Menéndez, F.J. Méndez, R. Mínguez, I.J. Losada, A global ocean wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards, *Coast. Eng.* 65 (2012) 38–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003>.
- [4] Holthuijsen, L.H., 2007; Waves in Oceanic and Coastal Waters. *Cambridge University Press*. 387 pp. ISBN: 0521860288.
- [5] H. Tolman, and the WAVEWATCH III® Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III® version 4.18. Technical Note 316, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 282 pp. + Appendices, 2014.
- [6] J.E. Stopa, F. Ardhuin, A. Babanin, S. Zieger, Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models, *Ocean Model.* 103 (2016) 2–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.003>.
- [7] J. Pérez, M. Menéndez, I.J. Losada, GOW2: A global wave hindcast for coastal applications, *Coast. Eng.* 124 (2017) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.03.005>
- [8] Lizano, O., F. Ocampo, L. Alvarado, R. Vega y J. Puig, 2001. Evaluación de modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. *Top. Meteor. Oceanogr*, **8**(1), 40-49.
- [9] Tolman HL (1991) A Third-Generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *J Phys Oceanogr* 21(6):782–797. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2)
- [10] Pedro Veras Guimaraes. Sea surface and energy dissipation. Fluids mechanics . Université Bretagne Loire; École Centrale de Nantes, 2018. <tel:01803477>
- [11] Rapizo, H., Durrant, T.H. & Babanin, A.V. *Ocean Dynamics* (2018). <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1171-7>
- [12] S. Saha, et al., The NCEP climate forecast system reanalysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 91 (8) (2010) 1015–1057. <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
- [13] S. Saha, et al., The NCEP climate forecast system version 2, *J. Clim.* 27 (2014) 2185–2208. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>.
- [14] The Australian Antarctic Magazine Issue 4: Spring 2002
- [15] Wandres, Moritz, E.M.S. Wijeratne, Simone Cosoli¹, Charitha Pattiaratchi (2017): The effect of the Leeuwin Current on offshore surface gravity waves in southwest Western Australia. *J. Geophys. Res.* ,in press, <https://doi.org/10.1002/2017JC013006>