

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE

TESIS DOCTORAL

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL RECURSO
SURF: METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Presentada por: ANTONIO ESPEJO HERMOSA

Dirigida por: IÑIGO J. LOSADA RODRIGUEZ
FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA

Junio 2011

CAPITULO 4

BASES DE DATOS

4.1. Introducción

Los estudios presentados en esta tesis han requerido el uso de una serie de variables de tipo oceanográfico y atmosférico procedentes de bases de datos muy diversas. En este capítulo se presenta un esquema general de las bases de datos utilizadas, así como una descripción de cada una de ellas.

En este trabajo se han utilizado datos históricos, es decir aquellos que se han registrado en un período de tiempo pasado, ya sea mediante medidas instrumentales o mediante modelos numéricos. En cuanto a la naturaleza de la variable, en esta tesis se ha hecho uso de variables oceanográficas (oleaje fundamentalmente), variables atmosféricas (viento, presión o temperatura) e índices climáticos englobados dentro de las variables océano-atmosféricas. En la tabla 4.1 se muestra una clasificación de las variables estudiadas, así como la procedencia de los datos.

Naturaleza	Variable	Origen
Océano	Oleaje	Boyas
		Satélite
	Nivel del mar	M. Numérico
		Mareógrafos Satélite
Atmósfera	Viento	M. Numérico
	Presión	M. Numérico
	Temperatura del aire	Instrumental-M. Numérico
Océano-atmósfera	Índices climáticos	-

Tabla 4.1. Esquema de las bases de datos utilizadas y apartado en el que se describen

4.2. Variables oceanográficas

4.2.1. Datos históricos de oleaje. Boyas

Las boyas son el instrumento de medida de oleaje *in-situ* más extendido, pues proporcionan la información más completa y fiable en una posición fija. Las boyas siguen el movimiento de la superficie libre del mar, midiendo la evolución de la

superficie libre en un punto. Los sensores suelen ser tipo acelerómetro vertical situado en su interior (boyas escalares). Algunas boyas llevan incorporados otros dispositivos sobre dos ejes ortogonales, como inclinómetros o acelerómetros horizontales, y otro para referenciar el norte magnético (usualmente un compás electrónico) que permiten estimar las aceleraciones horizontales, o el ángulo y orientación de la inclinación de la boya (boyas direccionales). Por tanto, con los datos registrados por las boyas, se pueden calcular tanto los distintos parámetros espectrales (escalares o direcciones) como los diferentes parámetros estadísticos del oleaje.

En la actualidad existen diferentes entidades que ofrecen datos de oleaje medidos por boyas, ya sean escalares o direccionales. A nivel nacional, el Organismo Público Puertos del Estado (OPPE) dispone de redes fijas de medida en aguas profundas (REDEXT) y aguas costeras (REDCOS) a lo largo del litoral español. La distribución espacial de las mismas se limita aquellos puntos donde las actividades portuarias son de cierta envergadura, es decir existen boyas en las proximidades de los principales puertos comerciales. Las boyas de la red exterior almacenan espectros direccionales $S(\omega, \theta)$ y parámetros estadísticos y espectrales de los estados de mar como: la altura de ola significativa (H_s), el periodo medio (T_m), el periodo de pico (T_p), la dirección media del oleaje (θ_m), o la dirección de pico (θ_p). La gran mayoría de las boyas también disponen de anemómetros, por lo que también almacenan las variables: velocidad del viento (W), y dirección media del viento (θ_w).

A nivel oceánico o global, la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) dispone de una serie de boyas repartidas en diversas localizaciones. En la figura 4.1 se muestran algunas de las boyas utilizadas en este estudio.

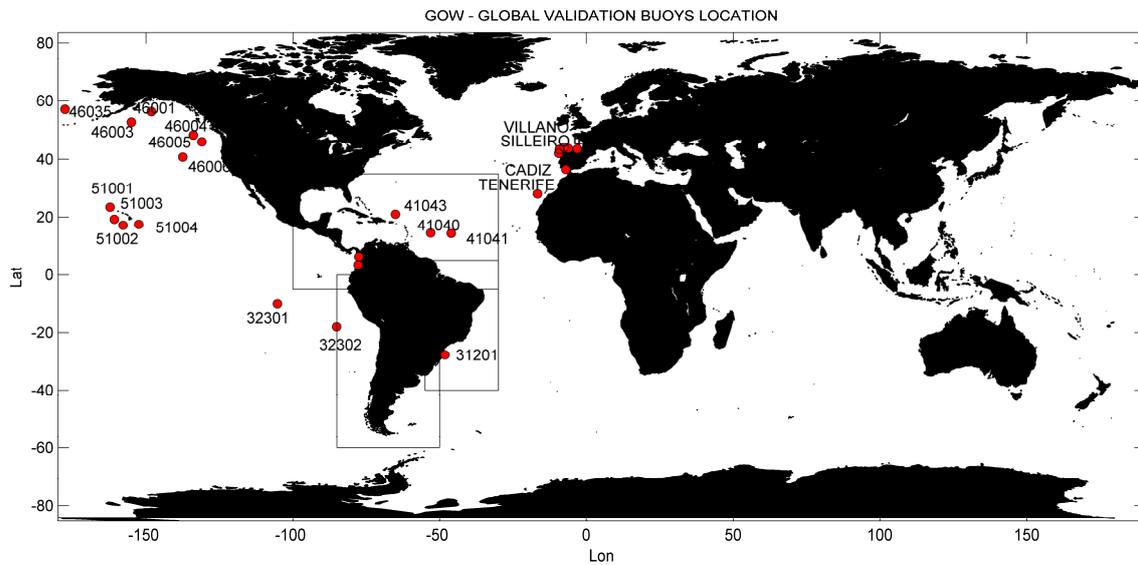


Figura 4.1. Localización de algunas de las boyas utilizadas en la validación de los datos de oleaje del reanálisis global GOW.1.0.

4.2.2. Datos remotos de oleaje, satélites

La única fuente de información instrumental que permite obtener información global de oleaje, es la procedente de los satélites, que de forma remota (con órbitas del orden de los 1000 km por encima de la superficie terrestre) consiguen determinar parámetros del oleaje como H_s , con errores similares a los de las boyas (Caires y Sterl, 2003). Los satélites pueden llevar distintos instrumentos, pero son los altímetros de radar (*Radar Altimeter*, RA) los que mejor funcionan y más tiempo llevan usándose en las mediciones de oleaje. En la actualidad, se dispone de datos fiables de distintas misiones satelitales que se han ido lanzando y sustituyendo a lo largo de los años. En la tabla 4.2 se pueden ver los distintos satélites y períodos de medida de cada uno, disponibles en la página <http://www.aviso.oceanobs.com>.

Los altímetros satelitales son radares que transmiten pulsos de onda hacia la superficie terrestre. El tiempo de retorno de la señal, así como su modificación frecuencial después de la reflexión del pulso en la superficie del mar, son valores que se pueden relacionar fácilmente con el nivel del mar o la rugosidad de la superficie. De esta manera, es posible determinar variables oceanográficas de vital importancia como la altura de ola, o la velocidad del viento.

Satélite	Frecuencia(días)	Periodo de registro
Jason-2	10	Julio/2008-actualidad
Jason-1	10	Enero/2002-actualidad
Envisat	35	Octubre/2002-actualidad
ERS-2	35	Mayo/1995-Julio/2003
TOPEX/Poseidon	10	Octubre/1992-Octubre/2005
Geosat Follow On	17	Enero/2000-Octubre/2008

Tabla 4.2. Información sobre las distintas misiones satelitales disponibles.

En contraposición a la multitud de ventajas y novedades que ofrece la altimetría satelital. Esta, presenta como inconveniente la resolución espaciotemporal de los datos medidos. El satélite orbita alrededor de la tierra con una trayectoria fija, tardando entre 10 y 15 días en pasar dos veces por un mismo punto.

Uno de los usos que se suele dar a estos datos es el de complemento de los datos medidos por boyas, visuales o procedentes del modelado numérico, siendo en este último caso de vital importancia, pues permite un calibrado espacial de los campos de oleaje obtenidos por los modelos de generación de oleaje.

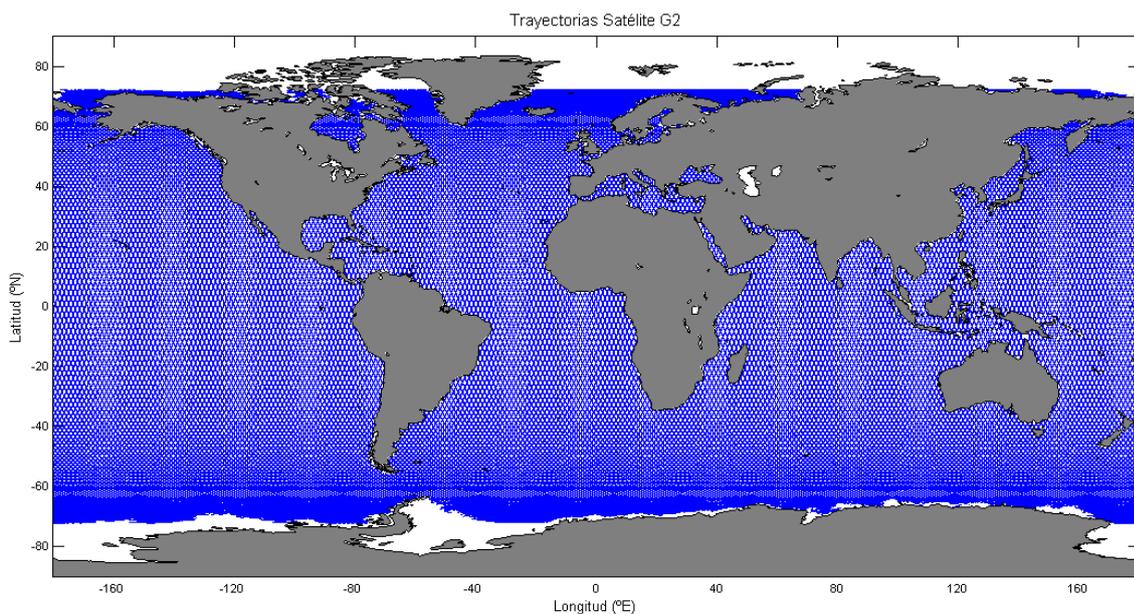


Figura 4.2. Cobertura espacial del satélite Geosat Follow-On (GFO)

En la figura 4.2, a modo de ejemplo, se muestran las trayectorias del satélite Geosat Follow-On (GFO) a lo largo de todo el globo.

4.2.3. Datos de oleaje de reanálisis, modelo numérico

Los datos de oleaje procedentes de reanálisis son el resultado de la ejecución de modelos numéricos forzados mediante condiciones atmosféricas en un período de tiempo. El reanálisis de oleaje utilizado en este trabajo es el GOW 1.0 (*Global Ocean Waves 1.0*) de IH Cantabria. Éste es un reanálisis horario en el periodo 1948-2008 con cobertura global de $1^\circ \times 1.5^\circ$ y de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ a lo largo del litoral de España. El forzamiento proviene del reanálisis atmosférico de NCEP/NCAR. El modelo numérico utilizado para la generación de estos reanálisis de oleaje ha sido el modelo WW III (*Wave Watch III*, Tolman 1997, 1999), un modelo de tercera generación desarrollado por la NOAA/NCEP, similar al modelo WAM (WAMDIG 1988, Komen *et al* 1994). El WW III es el último desarrollo del modelo inicial WW I, elaborado por la Universidad de Delft (Tolman 1989), posteriormente refinado por la NASA en el WW II.

La versión WW III difiere de sus antecesores en muchos e importantes puntos de especial relevancia, que incluyen aspectos relacionados con: la estructura, método numérico de resolución y parametrizaciones físicas. El WW III resuelve la ecuación de balance de densidad espectral. La hipótesis fundamental asumida en la resolución es que las propiedades del medio (corrientes y batimetría) así como las del campo de oleaje, varían, en el espacio y en el tiempo, en escalas mucho mayores que una longitud de onda.

El alcance temporal del reanálisis GOW comienza en 1948 para la mayor parte de dominio y alcanza hasta la actualidad, ya que es una base de datos actualizable periódicamente. El reanálisis GOW se estructura en distintas escalas espaciales. En primer lugar, se ha determinado el oleaje en una malla global (figura 4.3) que proporciona el oleaje a escala mundial con nodos de resolución espacial 1.5° en longitud y 1° en latitud.

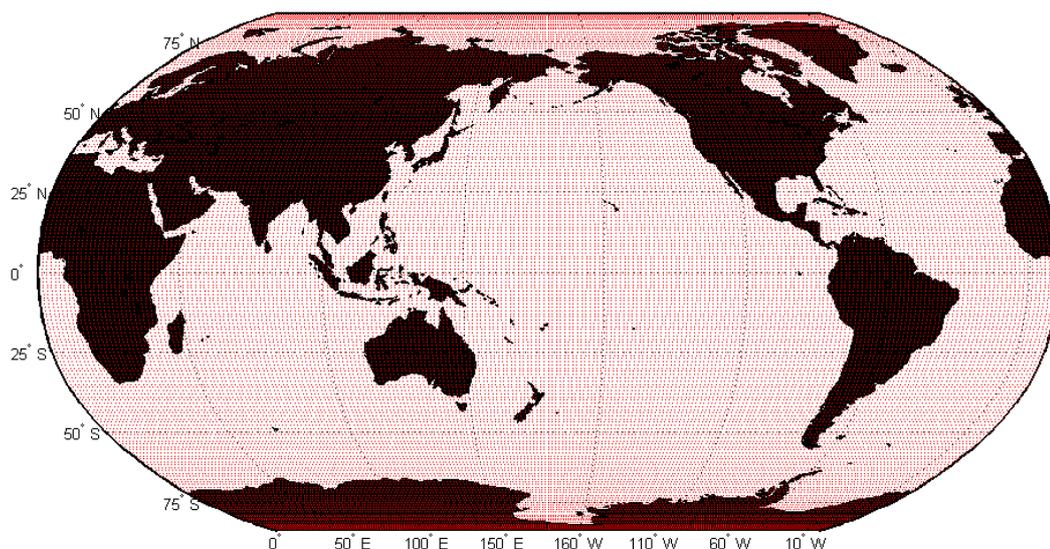


Figura 4.3. Malla global del reanálisis GOW 1.0 (representación de la figura en proyección Mercator).

En esta malla global, se han anidado una serie de mallas para el estudio de zonas de detalle con mayor grado de definición. Así, en el litoral español, se ha planteado una malla para el litoral de la Península Ibérica con resolución $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. A su vez, la Península Ibérica se ha subdividido en tres mallas de alta definición, resolviéndose con detalle toda su costa a $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (ver figura 4.4).

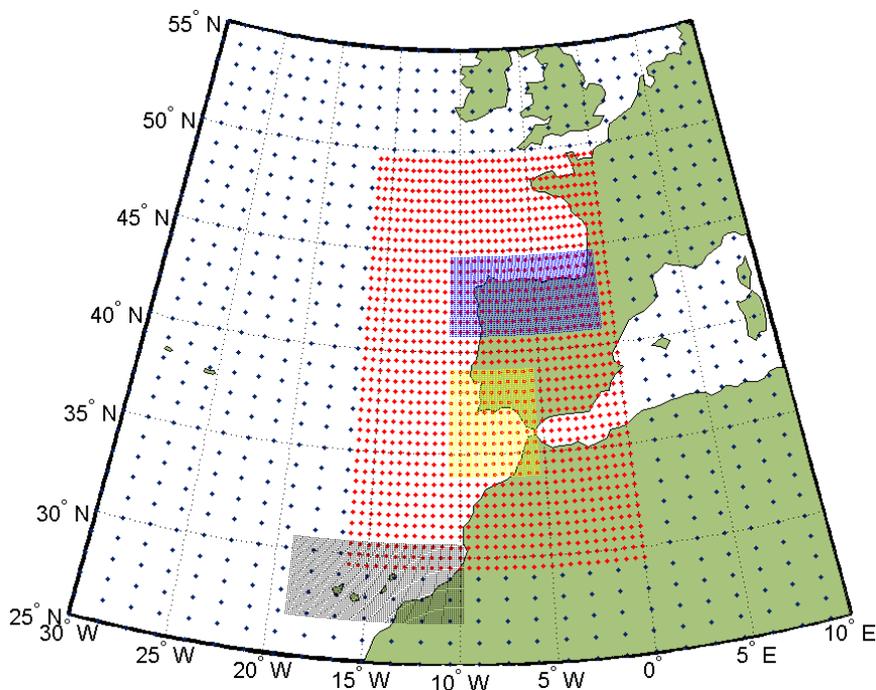


Figura 4.4. Rejillas del litoral español del reanálisis GOW 1.0 Malla. Malla Global $1.5^\circ \times 1.0^\circ$, Malla Iberia 0.5° y Mallas Cantábrico, Cádiz y Canarias 0.1° (representación de la figura en proyección Mercator)

Los datos numéricos obtenidos son parámetros de oleaje en todos los nodos de cálculo con resolución de una hora. Además, con el fin de definir más correctamente el oleaje cerca de la costa, se han obtenido espectros direccionales de oleaje con resolución horaria en 500 puntos a lo largo de todo el litoral español. Estos puntos están separados entre sí aproximadamente 10Km, con el objetivo de anidar modelos de propagación de menor escala.

Los resultados han sido validados en el litoral español con boyas de la red exterior del OPPE y los resultados en el resto del mundo con boyas de la NOAA, así como con datos de satélite, en ambas regiones, demostrando la alta fiabilidad de los datos de oleaje obtenidos mediante esta vía. En la figura 4.5 se muestra el gráfico de dispersión y serie temporal de $H_{s\text{boya}}$ frente a $H_{s\text{GOW}}$ en la posición de la boya 46003, en el Pacífico Norte, obsérvese como el modelo se ajusta muy bien a la realidad. En la figura 4.6 se muestran los gráficos de dispersión de las comparaciones de H_s en dos boyas localizadas en el Caribe. En estas gráficas es posible observar como el modelo funciona bien en la mayoría de los casos exceptuando los eventos de huracanes, este error es más evidente en la boya 41040.

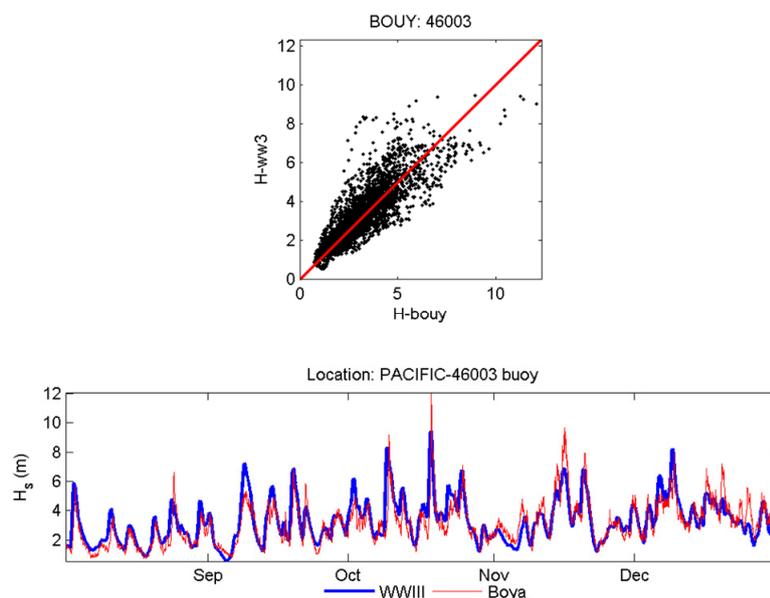


Figura 4.5. Validación en la boya NOAA 46003. Región: Pacífico Norte. Malla Global

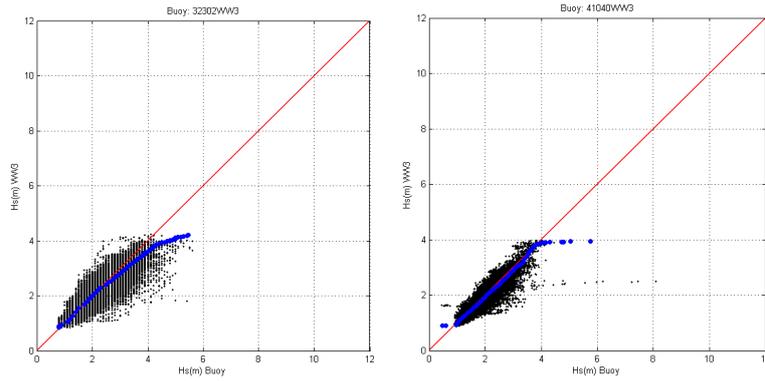


Figura 4.6. Gráficos de dispersión y cuantiles para las boyas 32302 y 41040, localizadas en el Caribe. Obsérvese la presencia de un huracán en el registro de la boya 41040 (derecha).

Los datos de las diferentes misiones satelitales permiten además comparar espacialmente los resultados del modelo de generación de oleaje con datos medidos sobre toda la superficie de los océanos. En la figura 4.7 se muestra el error cuadrático medio (RMS). En la figura 4.8, el índice BIAS indica donde el modelo infravalora o sobrevalora la H_s . Por último, en la figura 4.9 se muestra el índice de dispersión (SI).

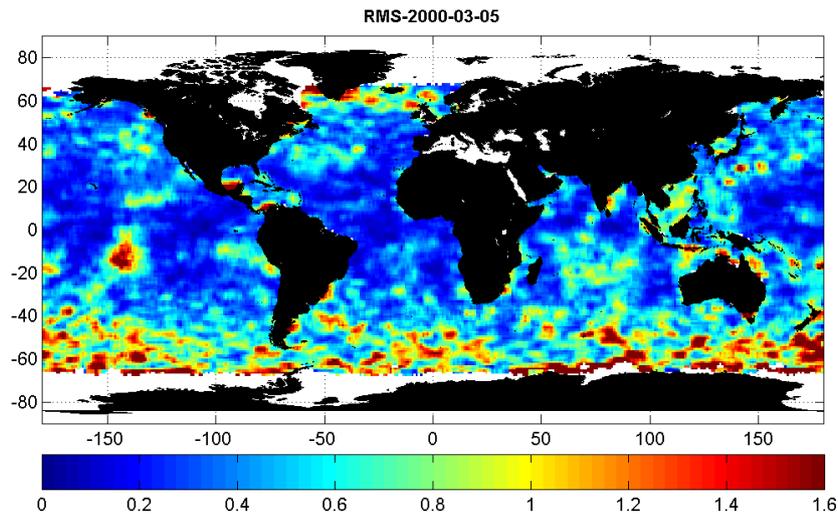


Figura 4.7. RMS entre el reanálisis GOW y datos de satélite. Periodo: Marzo a Mayo 2000

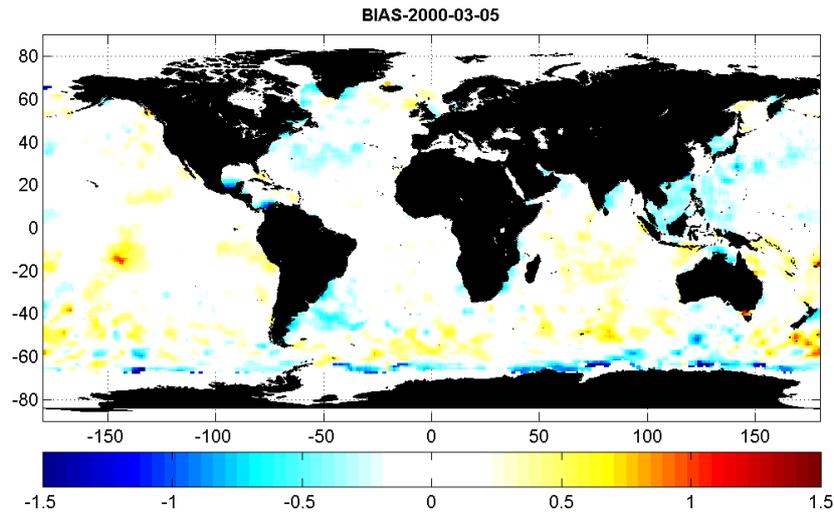


Figura 4.8. BIAS entre el reanálisis GOW y datos de satélite. Periodo: Marzo a Mayo 2000

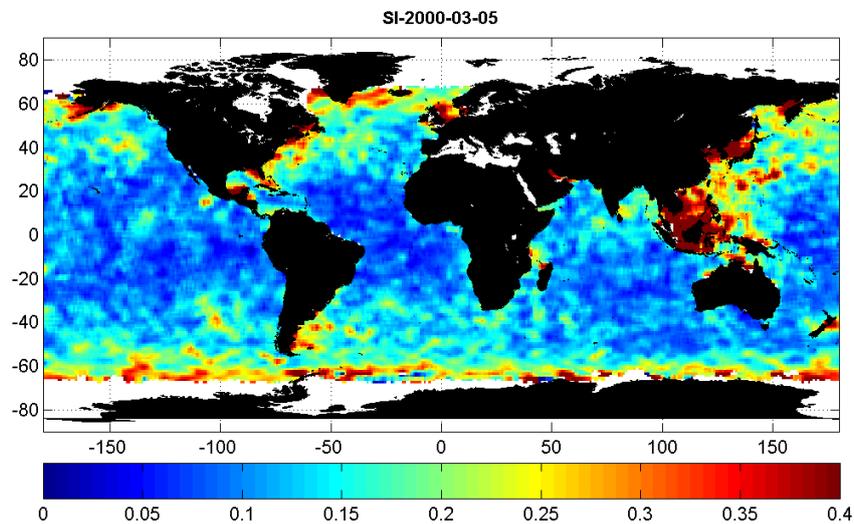


Figura 4.9. SI entre el reanálisis GOW y datos de satélite. Periodo: Marzo a Mayo 2000

4.2.4. Datos de nivel del mar, mareógrafos

Los mareógrafos son los instrumentos utilizados para la medida del nivel del mar. En los estudios realizados a lo largo de esta tesis se ha hecho uso de la red de mareógrafos REDMAR del OPPE. La Red de Mareógrafos REDMAR está en funcionamiento desde 1992. El objetivo es la monitorización del nivel del mar en tiempo real y la generación de series históricas para su posterior explotación. En la actualidad está constituida por 6 mareógrafos acústicos SONAR, 3 mareógrafos de presión Aanderaa y 33 sensores radar MIROS.

4.2.5. Datos de nivel del mar, TPOX7

Los altímetros satelitales también miden la elevación de la superficie del mar, con la ventaja añadida de que lo hacen en toda la superficie oceánica. En este sentido, a través de análisis de las series temporales, es posible estimar las principales componentes armónicas de la marea astronómica en cualquier lugar del planeta. Pudiendo tratar el nivel del mar como una variable determinista en lugar de probabilista. Conocidas las componentes armónicas de la marea, es posible calcular el nivel del mar en cualquier posición del eje del tiempo.

El TPOX7 es un modelo global de resolución $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ desarrollado en la *Oregon State University*. El modelo incluye las masas de aguas cubiertas por las plataformas de hielo de la Antártida y Groenlandia. EL TPXO7 asimila datos de los altímetros TOPEX/Poseidon y TOPEX Tandem (disponibles en mar abierto entre las latitudes $\pm 66^\circ$), y de datos de mareógrafos localizados en el Ártico (*ESR's Antarctic Tide Gauge Database*) y la Antártida (*the Arctic inverse model AOTIM-5*). EL TPXO7 es uno de los modelos globales de marea más precisos, especialmente en latitudes altas, debido a la mayor asimilación de datos en esta zona.

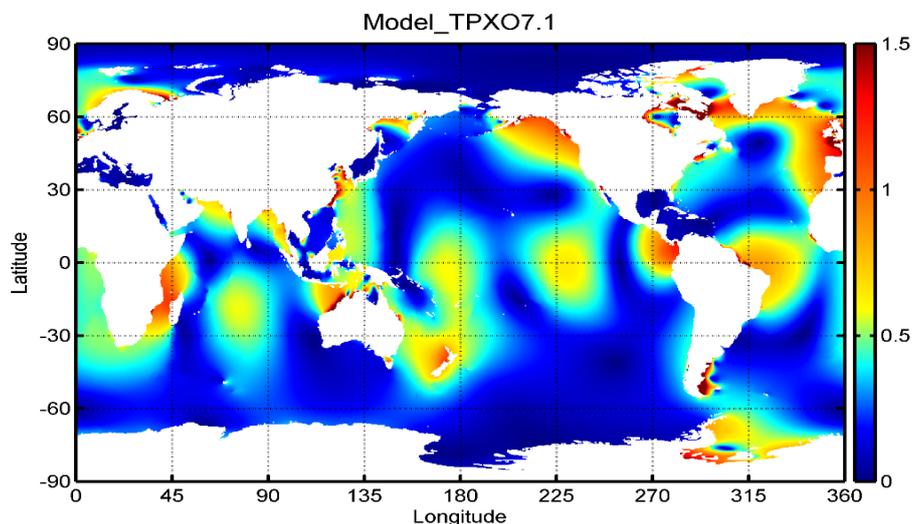


Figura 4.10. Amplitud de la componente M2 (m) en el modelo TPXO7. Fuente:

http://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO71.html.

4.3. Variables atmosféricas

4.3.1. Datos de viento, modelo numérico

Los datos de reanálisis de viento son necesarios para el estudio multidimensional del clima marítimo o la propagación del oleaje, pero también para estimar la calidad de las condiciones de surf. Es importante señalar que el reanálisis de oleaje está condicionado por la disponibilidad de reanálisis atmosféricos, más concretamente de vientos en superficie (a 10 m de altura, U_{10} o W). El modelado de la circulación atmosférica a nivel global presentan una resolución espacial y temporal relativamente grosera (entre 1.125° y 2.5°, con resoluciones temporales de entre 3 y 6 horas, cubriendo periodos de tiempo de entre 20 y 60 años). Estas simulaciones numéricas se han llevado a cabo teniendo en cuenta la información disponible de datos instrumentales atmosféricos. De esta manera, las bases de datos procedentes de reanálisis numérico atmosférico, constituyen una fuente de información valiosa, ya que permiten el estudio de la evolución en el tiempo de diferentes variables, de las cuales no se dispone de registros suficientemente largos.

Actualmente, los reanálisis globales más populares son: el ERA-40, desde 1957 hasta el 2002 y el ERA-Interim, desde 1989 hasta la actualidad. Ambos realizados por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF); el JRA-25, desde 1979 hasta la actualidad, de la *Japan Meteorological Agency* (JMA); y el NCEP/NCAR *Reanalysis Project* (Kalnay et al., 1996), desde 1948 hasta la actualidad, realizado por el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Este último es uno de los reanálisis globales que cubren un mayor periodo de tiempo. Por otro lado, el ERA-Interim y el JRA-25 constituyen las series de datos con mejor asimilación de datos instrumentales a partir de información satelital.

El principal inconveniente que presentan los reanálisis globales se desprende de su resolución espacio-temporal, la cual, hace que no se resuelvan bien fenómenos de dimensiones reducidas (ej. ciclones tropicales o brisas térmicas). Para solventar este problema se suelen emplear técnicas de *downscaling* (incremento de resolución). En concreto, el *downscaling* dinámico consiste en incrementar la resolución de la rejilla del

modelo atmosférico global anidando a éste un modelo atmosférico regional o mesoescalar, limitando la zona de interés. De esta forma, se puede mejorar la orografía y por tanto el modelado de algunos procesos físicos locales de importancia en el área de interés (radiación, capa límite, nubes). Usualmente estos reanálisis regionales tienen una resolución espacial de entre 5 y 25 Km, y utilizan un acoplamiento de los resultados atmosféricos del reanálisis global como condiciones de inicio y contorno.

Como se ha comentado anteriormente, en esta tesis se han utilizado los campos de vientos del reanálisis regional obtenido a través de un *downscaling* dinámico denominado SeaWind y realizado por el Instituto de Hidráulica Ambiental en colaboración con el Grupo de Meteorología de Santander de la Universidad de Cantabria-IFCA/CSIC. La base de datos SeaWind utiliza una malla de proyección cónica tipo Lambert, con una resolución espacial de 30 km y temporal horaria. Este es alimentado a partir de los datos 6-horarios de viento del reanálisis NCEP/NCAR. Esta base de datos de viento ha sido empleada en la escala regional. En la figura 4.11 se muestran los resultados obtenidos al comparar la velocidad del viento de SeaWind con datos instrumentales de distintas misiones satelitales. El análisis de los errores se ha llevado a cabo calculado RMS, BIAS y SI en celdas de 30x30km. Como muestran los resultados de la comparación, el error medio cuadrático en la zona ronda los 2 m/s, el índice BIAS indica que los vientos son ligeramente sobrevalorados, con un índice de dispersión inferior a 0.4 m/s. Estos errores son totalmente asumibles en la evaluación de la idoneidad de las condiciones de viento.

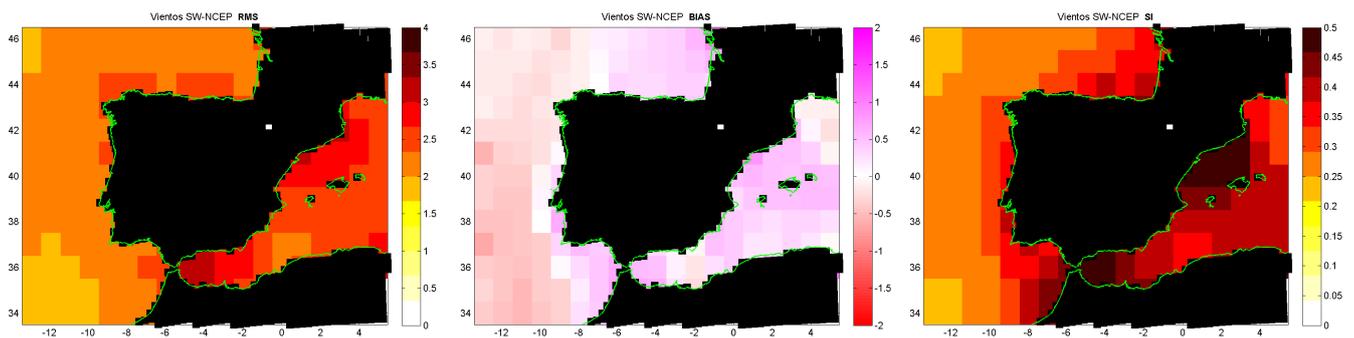


Figura 4.11. RMS, BIAS y SI de $W_{SeaWind}$ frente a $W_{satélite}$

4.3.2. Datos de temperatura del aire, instrumental

La temperatura del aire, necesaria para el análisis global de las condiciones de surf, ha sido obtenida de la base de datos HadCRUT3. Esta, es una base de datos global de resolución mensual (más que suficiente para el posterior análisis) que agrupa diferentes registros de temperatura de la capa superficial de la atmósfera sobre tierra (*Climatic Research Unit (CRU), University of East Anglia*), y temperatura del océano (*Hadley Centre of the Met Office*).

La varianza de los datos ha sido corregida, al igual que los huecos, los cuales han sido solventados por medio de una interpolación optimizada en el espacio reducido, generando de esta forma una serie continua y suave de datos que inicialmente cubrían desde 1871–1998, en un *grid* regular entre las latitudes 65°N y 35°S. Así, los datos actuales se denominan HadCRUT3 (tercera revisión), con una resolución espacial de 5°x5°. Estos pueden ser descargados en la dirección web: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/#datter>.

Sobre las regiones de tierra, son analizados los datos de temperatura de más de 3000 estaciones de medida. La mayoría de ellos concentrados sobre las zonas más pobladas, Estados Unidos, Canadá, Europa y Japón. Para las áreas oceánicas se analiza la SST registrada por barcos en ruta y observaciones voluntarias, así la densidad de estos datos esta sujeta a las principales rutas mercantes. La corrección y procesado de estos datos, puede ser consultada en los trabajos de Jones y Moberg (2003), y Rayner *et al.* (2003).

La razón de porqué los datos se alimentan con la variable SST en lugar de la MAT (*marine air temperature*), radica en la gran cantidad de problemas derivados de la inhomogeneidad de estas medidas. Los trabajos de Rayner *et al.* (2003) muestran una clara relación entre las anomalías mensuales de NMAT (*night only marine air temperature*) y de SST. Sin embargo, se han encontrado algunas discrepancias en el análisis de tendencias en los trópicos (Christy *et al.*, 2001). Éstas, por tratarse siempre de temperaturas altas, no influyen en la evaluación realizada.

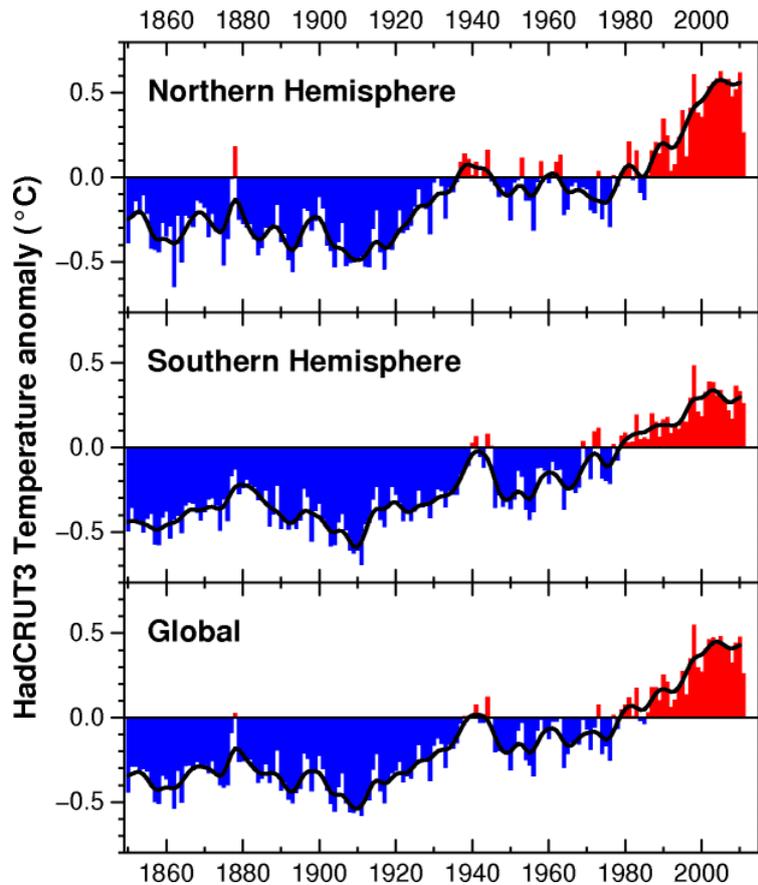


Figura 4.12. Variación de la anomalía mensual de la temperatura de la atmósfera. Fuente: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature>.

4.3.3. Datos de temperatura de la superficie del océano, instrumental

Para mejorar la información aportada por la base de datos HadCRUT3, y evitar errores derivados de la interpolación a los puntos donde será realizado el análisis, ha sido empleada la base de datos ERSST v3b de la NOAA, la cual presenta un resolución de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$. Esta es la versión más reciente de la llamada *Extended Reconstruction Sea Surface Temperature*, basada en la base de datos *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (ICOADS).

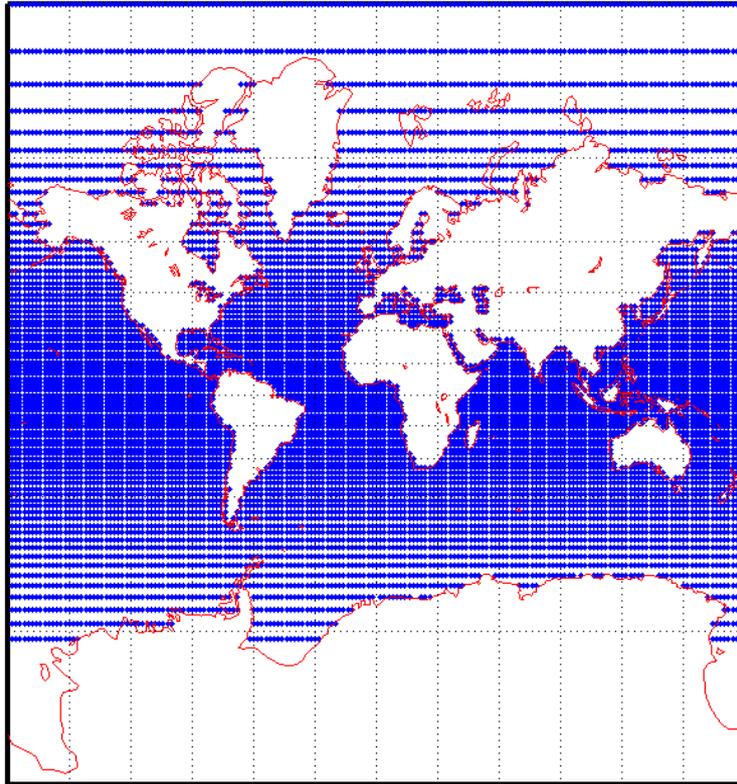


Figura 4.13. Resolución espacial de la base de datos ERSST.v3b.

La ERSST.v3b ha sido generada con datos medidos de SST, mejoradas a través del empleo de técnicas estadísticas que consideran la dispersión espacial de las medidas. Los datos mensuales se extienden desde 1854 hasta el presente, aunque debido a inhomogeneidades no se recomienda su uso antes de 1880. Después de esta fecha la señal parece ser más consistente, por lo que pueden ser empleados en el análisis de tendencias en el largo plazo. Una descripción detallada de estos datos puede ser encontrada en los trabajos de Smith *et al.* (2008).

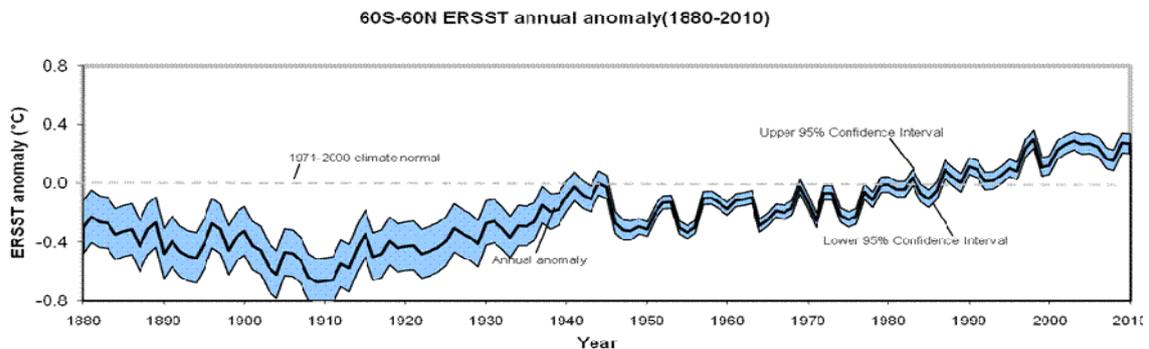


Figura 4.14. Evolución de SST mensual en el periodo 1880-1005.

4.3.4. Datos históricos de presión a nivel del mar, modelo numérico

Los datos históricos de campos de presión en superficie utilizados en esta tesis proceden del reanálisis global NCEP/NCAR, descrito en el apartado anterior. Estos campos de presión se han utilizado como predictores en diversas partes de la tesis.

La resolución espacial de este reanálisis es de 2.5° , y la resolución temporal es 6-horaria. Como se dijo en el apartado anterior este reanálisis cubre el período desde 1948 hasta la actualidad.

4.3.5. Series temporales de índices climáticos, instrumentales

Las series temporales de los diferentes índices climáticos empleados en el análisis de la variabilidad interanual de las condiciones de surf están disponibles en las bases de datos públicas de distintos institutos y organismos de investigación. Así, el índice SAM fue descargado del *British Antarctic Survey* (<http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma>); el DMI del *Japan Marine Science and Technology Center* (<http://www.jamstec.go.jp>); la NAO del *Climate Research Unit (CRU)*, (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru>); el resto de índices fueron obtenidos de la NOAA- *National Weather Service* (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

