

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS  
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE

---

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE VALORES  
EXTREMOS DE OLEAJE

---

Presentada por: CRISTINA IZAGUIRRE LASA

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

Octubre 2010

## CAPITULO 2

### DATOS DE PARTIDA

#### 2.1 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.

El origen temporal de los datos, en cuanto a que sean históricos o proyectados establecerá la primera clasificación de los datos utilizados de cualquier variable. Los datos históricos son aquellos que se han registrado en un período de tiempo pasado, ya sea mediante medidas instrumentales o mediante modelos numéricos y los datos de proyecciones son aquellos predichos para un período futuro en función de la emisión de gases de efecto invernadero. Los datos de proyecciones se basan en una serie de condiciones futuras denominadas escenarios propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

En cuanto a la naturaleza de la variable, en esta tesis se ha hecho uso de variables oceanográficas principalmente (altura, período y dirección del oleaje o nivel del mar), variables atmosféricas (viento y presión) e índices climáticos englobados dentro de las variables océano-atmosféricas.

En la Tabla 2.1 se muestra una clasificación de las variables estudiadas y las bases de datos así como el apartado de este capítulo en el que se puede encontrar su descripción.

<i>Naturaleza de la variable</i>	<i>Variable</i>	<i>Origen del dato</i>	<i>Datos históricos</i>	<i>Datos de proyecciones</i>
Océano	Oleaje (altura de ola, período...)	Boyas	2.2.1	-
		Satélite	2.2.2	-
		M. Numérico	2.2.3	-
	Nivel del mar	Mareógrafos	2.2.4	-
Atmósfera	Viento	M. Numérico	2.3.1	-
	Presión	M. Numérico	2.3.2	2.3.3
Océano-atmósfera	Índices climáticos	-	2.4.1	-

Tabla 2.1 Esquema de las bases de datos utilizadas y apartado en el que se describen

## 2.2 Variables oceanográficas

### 2.2.1 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 del oleaje en una posición fija. Las boyas siguen el movimiento de la superficie del mar, determinando la evolución de la superficie libre en un punto gracias a un 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 lo 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.

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, con la distribución que se indica en la Figura 2.1, y almacena espectros frecuenciales  $S(\omega)$  y 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 ( $\theta_m$ ), la velocidad del viento ( $W$ ), y la dirección media del viento ( $\theta_w$ ). Además también se ha hecho uso del conjunto de datos de la red XIOM (Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics), propiedad de la Generalitat de Catalunya y compuesta por un conjunto de boyas situadas a lo largo de la costa catalana.

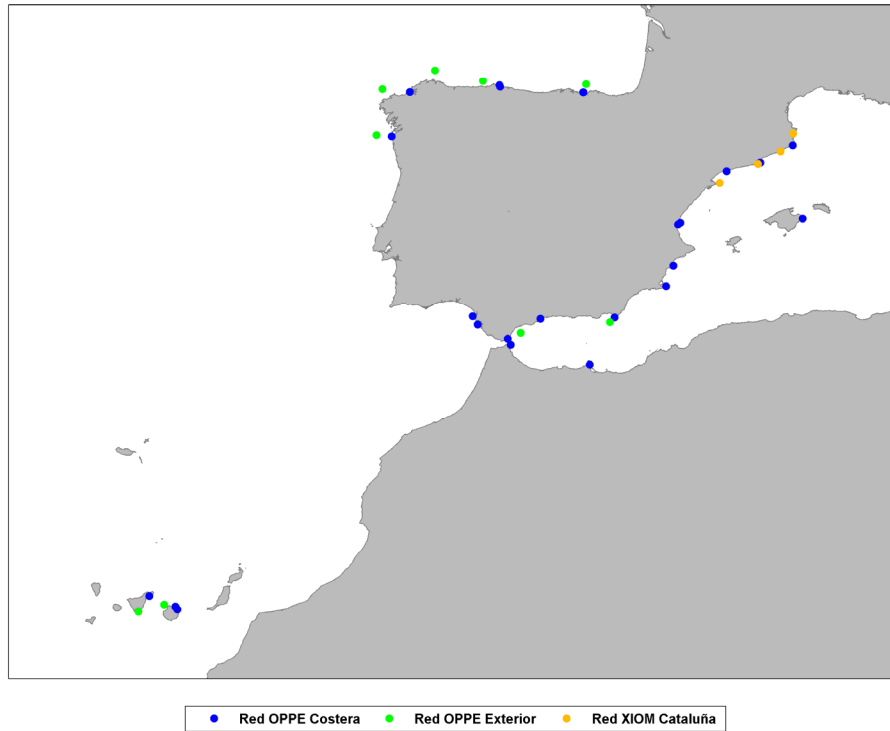


Figura 2.1 Localización de las boyas de las redes de Puertos del Estado y la red Xiom utilizadas en esta tesis

## 2.2.2 Datos históricos de oleaje. Satélite

La única fuente de información instrumental que permite dar 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  $H_{m0}$  con errores similares a los de las boyas (Caires y Sterl, 2003). Los satélites pueden llevar distintos instrumentos, pero son los satélites con altímetros de radar (*Radar Altimeter*, RA) los que mejor determinan y más tiempo llevan usándose. 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 Figura 2.2 se pueden ver los distintos satélites y períodos de medida de cada uno, disponibles en la página <http://www.aviso.oceanobs.com/>.

Satellite	Distribution media	Frequency	Delivery delay	Data period	Data used	File weight
Jason-2	<a href="#">FTP</a>		3 months	July 2008 (cycle 001) - ongoing	10 days (one cycle) per file	25 MB per file (zipped)
Jason-1	<a href="#">FTP</a> (from GDR-c)* <a href="#">FTP</a> (from GDR-b)**		3 months	January 2002 (cycle 001) - ongoing	10 days (one cycle) per file	25 MB per file (zipped)
Envisat	<a href="#">FTP</a>		3 months	October 2002 (cycle 010) - ongoing	35 days (one cycle) per file	58 MB per file (zipped)
ERS-2	<a href="#">FTP</a>		3 months	May 1995 (cycle 001) - July 2003 (cycle 085)	35 days (one cycle) per file	65 MB per file (zipped)
T/P	<a href="#">FTP</a>		3 months	October 1992 (cycle 001) - October 2005	10 days (one cycle) per file	16 MB per file (zipped)
GFO	<a href="#">FTP</a>		3 months	January 2000 (cycle 037) - October 2008	17 days (one cycle) per file	40 MB per file (zipped)

\* The Jason-1 CorSSH are currently reprocessed from the new version of Jason-1 GDR-c. Users are advised that the new (incomplete) version can be downloaded from this ftp link (from cycle 233 and beyond). All cycles will be available by the beginning of 2010.

\*\*The old version (cycles 1 to 232) , generated from the Jason-1 GDR-b can be downloaded from this second ftp link.

Figura 2.2 Información sobre las distintas misiones satelitales disponibles. Fuente: <http://www.aviso.oceanobs.com/>

Los altímetros de los satélites son radares que transmiten cortos pulsos 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 superficial. De esta manera es posible determinar variables oceanográficas de vital importancia como la marea meteorológica, la altura de ola o la velocidad del viento.

En contraposición a la multitud de ventajas y novedades que ofrece la altimetría de los satélites, presenta como inconveniente la resolución de los datos medidos, tanto espacial como temporal. 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 de reanálisis, siendo en este último caso de vital importancia pues permite un calibrado espacial de los campos de oleaje obtenidos por los modelos numéricos.

En la Figura 2.3, a modo de ejemplo, se muestran las trayectorias del satélite Geosat Follow-On (GFO) a lo largo de todo el globo.

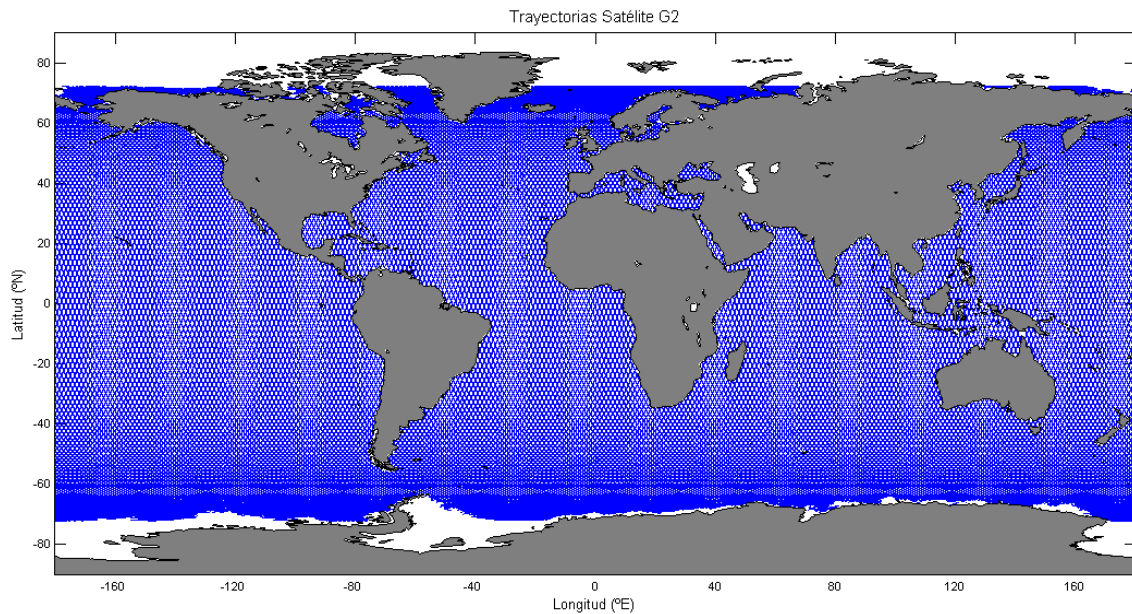


Figura 2.3 Trayectorias del satélite Geosat Follow-On (GFO)

### 2.2.3 Datos históricos de oleaje. 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. Los reanálisis de oleaje utilizados en este trabajo son los siguientes:

- GOW 1.0 (*Global Ocean Waves 1.0*) de IH Cantabria. 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.
- GOW 2.1 (*Global Ocean Waves 2.1*) de IH Cantabria. Reanálisis horario en el periodo 1989-2008 con resolución de  $0.125^\circ$  a lo largo del Mediterráneo y el Golfo de Cádiz. El forzamiento proviene del *downscaling* dinámico *SeaWind* (IH Cantabria, 2009) de 15 km, anidado en el reanálisis atmosférico ERA-INTERIM. En el contorno Oeste se introduce los espectros direccionales horarios del reanálisis GOW 1.0.

El modelo numérico utilizado para la generación de estos reanálisis de oleaje ha sido el modelo *Wave Watch III* (WW III, Tolman 1997, 1999), un modelo de tercera generación

desarrollado por la NOAA/NCEP similar al modelo WAM (WAMDIG 1988, Komen et al 1994). 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. 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. En el caso del Mar Mediterráneo, el reanálisis comienza en el 1989 ya que los campos de vientos utilizados para su forzamiento proceden de un *downscaling* con mayor calidad espacial y temporal para simular las condiciones regionales de las cuencas mediterráneas (*SeaWind*).

El reanálisis GOW se estructura en distintas escalas espaciales. En primer lugar, se ha determinado el oleaje en una malla global (Figura 2.4) que proporciona el oleaje a escala mundial con nodos de resolución espacial 1.5° en longitud y 1° en latitud.



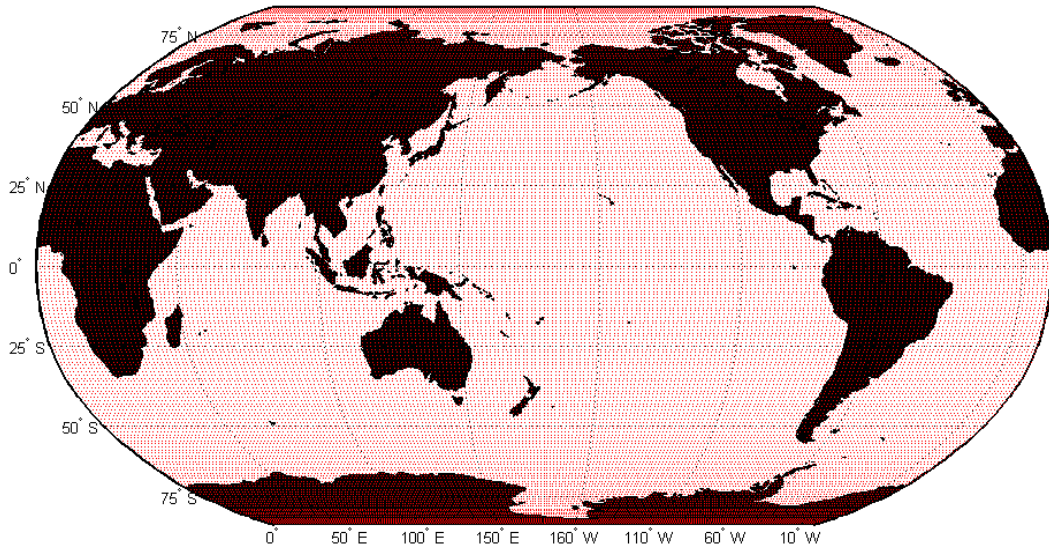


Figura 2.4 Malla global del reanálisis GOW 1.0 (representación de la figura en proyección Mercator)

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 las Islas Canarias con resolución  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , una malla para todo el Mar Mediterráneo con resolución de  $1/8^\circ$  (Figura 2.5), y otra 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  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , para alcanzar el mismo grado de detalle que en las Islas Canarias (Figura 2.6).

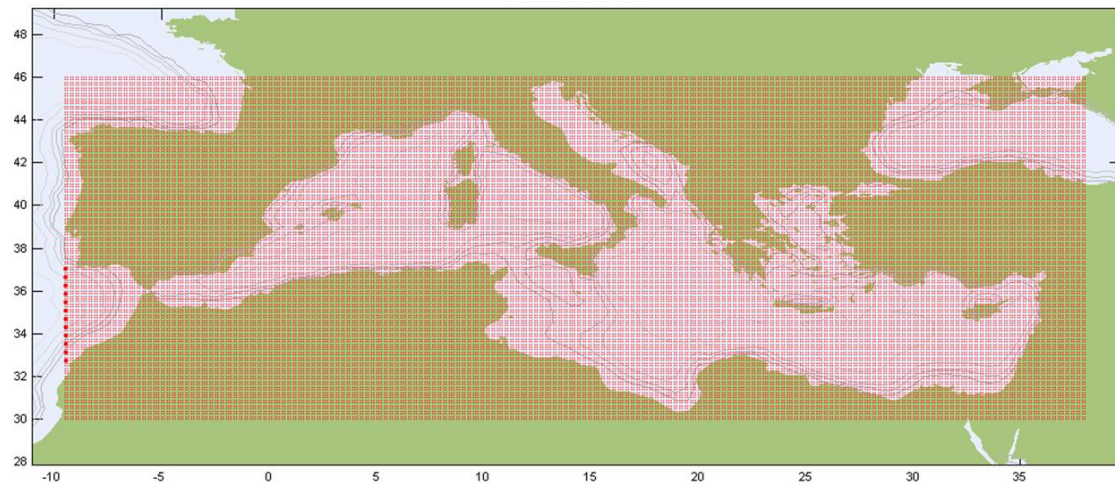


Figura 2.5 Rejilla de la Región Mediterránea del reanálisis GOW 2.1. Resolución de  $0.125^\circ$  (representación de la figura en proyección Mercator)

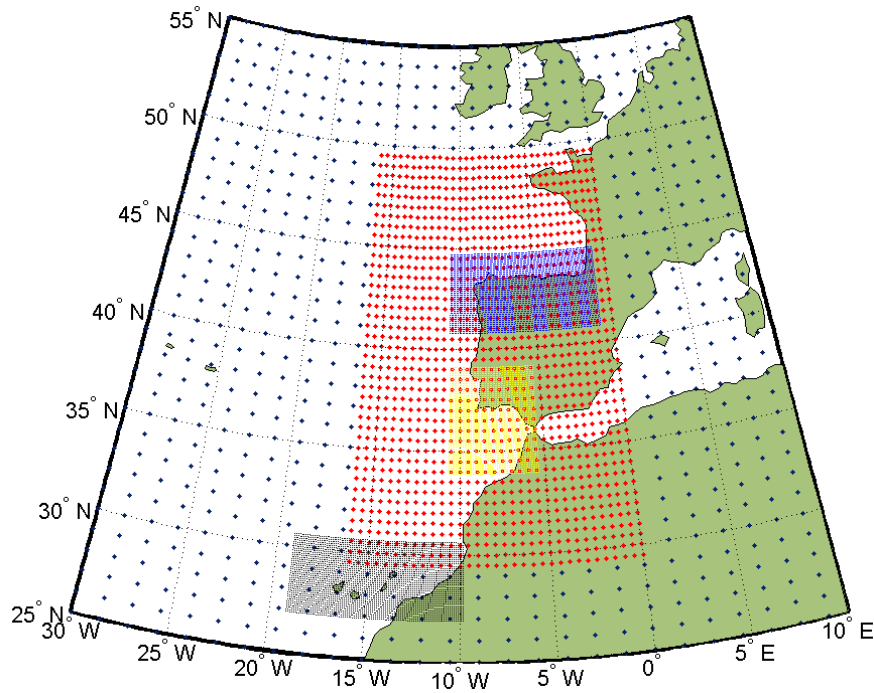


Figura 2.6 Rejillas del litoral español del reanálisis GOW 1.0 Malla. Malla Global  $1.5^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ , Malla Iberia  $0.5^{\circ}$  y Mallas Cantábrico, Cádiz y Canarias  $0.1^{\circ}$  (representación de la figura en proyección Mercator)

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 de oleaje con resolución horaria en 500 puntos a lo largo del litoral español, separados entre sí aproximadamente 10Km, con los cuales anidar modelos de propagación de escala local.

Los resultados han sido validados en el litoral español con boyas de la red exterior del Organismo Público de Puertos del Estado (OPPE) y los resultados en el resto del mundo con boyas de la NOAA, así como con datos de satélite, en ambas regiones, obteniéndose resultados muy satisfactorios.

## 2.2.4 Datos históricos 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. Estos últimos además proporcionan datos de agitación. También se dispone para este estudio de los datos de la red de mareógrafos XIOM (Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics), propiedad de la Generalitat de Catalunya.

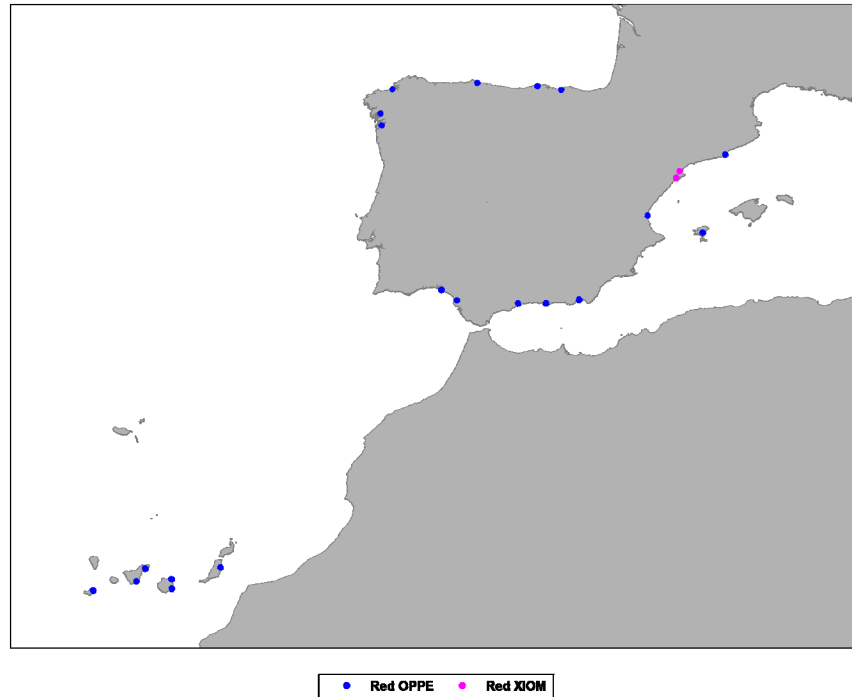


Figura 2.7 Localización de los mareógrafos utilizados en este trabajo.

## 2.3 Variables atmosféricas

### 2.3.1 Datos históricos 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 es importante señalar que el reanálisis de oleaje está condicionado por la disponibilidad de reanálisis atmosféricos, en concreto vientos en superficie (a 10 m de altura). Las simulaciones de la circulación atmosférica a nivel global presentan una resolución espacial y temporal relativamente grosera (entre  $1.125^\circ$  y  $2.5^\circ$ , con resoluciones horarias 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 en el campo de los estudios climáticos. 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, mientras que el ERA-Interim y el JRA-25 constituyen las series de datos con mejor incorporación de datos instrumentales mediante asimilación, a partir de información satelital.

El principal inconveniente que presentan los reanálisis globales aparece cuando la resolución espacial es insuficiente para caracterizar determinadas situaciones locales. 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 la parametrización de algunos procesos físicos locales de importancia en el área de interés (radiación, capa límite, cúmulos). 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. De esta manera se consigue que los campos atmosféricos de mayor resolución sean consistentes con las ecuaciones atmosféricas y se puedan considerar apropiadas representaciones de las condiciones atmosféricas.

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 (para el Mediterráneo y el Golfo de Cádiz).

### 2.3.2 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 2.3.1. Estos campos de presión se han utilizado como predictores en diferentes estudios.

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.

### 2.3.3 Datos de proyecciones de presión a nivel del mar. Modelo numérico

Los datos de proyecciones utilizados en esta tesis se enmarcan dentro del Cuarto Informe de Evaluación (*Fourth Assessment Report, AR4*) realizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

El IPCC fue creado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con la finalidad de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica pertinente para la comprensión del riesgo de cambio climático inducido por los seres humanos. El IPCC representa el mayor grupo de científicos independientes que trabaja para asesorar a los políticos e informar a los ciudadanos sobre la evolución del cambio climático. Desde su creación el IPCC ha producido una serie de Informes de Evaluación sobre el estado del conocimiento acerca de las causas del cambio climático, sus efectos potenciales y las opciones en cuanto a estrategias de respuesta. El último de ellos es el Cuarto Informe de Evaluación (AR4), publicado en 2007 y en la actualidad se trabaja en el quinto informe para su publicación en 2013.

En 1992, el IPCC publicó unos escenarios de emisiones que servían de base para los modelos de la circulación mundial, con el fin de desarrollar unos escenarios sobre el cambio climático (escenarios IS92). Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de muy complejos sistemas dinámicos, determinado por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el

cambio tecnológico. Su evolución futura es muy incierta, por lo que se crearon los llamados escenarios, que son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro. Estos escenarios constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota.

Los denominados escenarios IS92 constituyeron un gran paso adelante. Eran los primeros escenarios mundiales que proporcionaban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero. Desde entonces, el conocimiento sobre las emisiones futuras de gases de efecto invernadero y sobre el cambio climático ha cambiado considerablemente. Por ello, el IPCC decidió en 1996 desarrollar un nuevo conjunto de escenarios de emisiones que servirían de base para su Tercer Informe de Evaluación, pero que tendrían una mayor utilidad que los escenarios IS92. Esos nuevos escenarios, publicados en el Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE) sirven también de base para evaluar las consecuencias climáticas y medioambientales de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero, y para evaluar las estrategias de mitigación y adaptación alternativas. Contienen unos valores de referencia mejorados con respecto a las emisiones, así como información de última hora sobre la reestructuración económica en todo el mundo, examinan diferentes tasas y tendencias del cambio tecnológico, y amplían el repertorio de trayectorias diferentes de desarrollo económico, y en particular las tendentes a reducir las desigualdades de ingresos entre países desarrollados y en desarrollo.

Los escenarios del IE-EE abarcan una gran diversidad de las principales fuerzas determinantes de las emisiones futuras, desde la demografía hasta la evolución tecnológica y económica. Ninguno de los escenarios del conjunto contiene políticas futuras que aborden explícitamente el cambio climático, aunque todos los escenarios abarcan necesariamente diversas políticas de otros tipos. Los escenarios del IE-EE abarcan el intervalo de valores de emisiones de todas las especies pertinentes de gases de efecto invernadero y de azufre, más las fuerzas determinantes de éstos. A fin de

describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes.

Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una “familia” de escenarios. En la Figura 2.8 se puede ver un esquema de las líneas evolutivas planteadas, familias de escenarios y escenarios propiamente dichos.

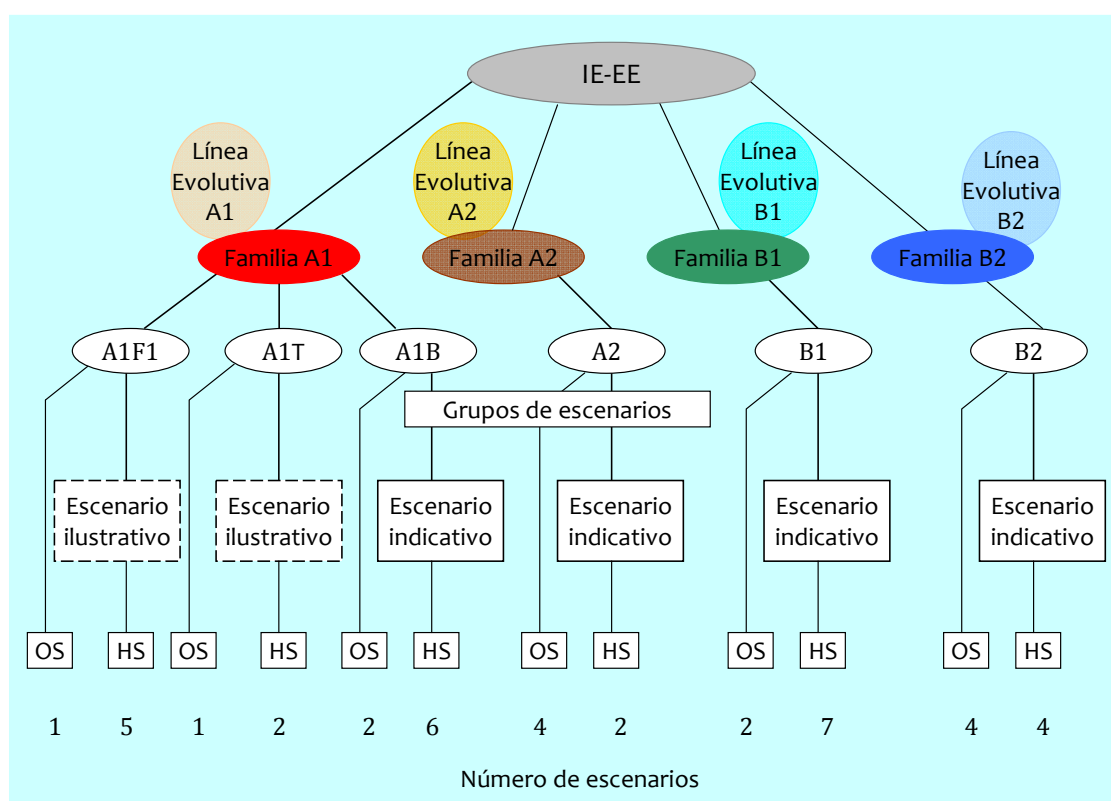


Figura 2.8 Esquema de los escenarios IE-EE. Fuente: Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones

Aparte de las cuatro familias de escenarios propuestas, se planteó un escenario hipotético e imposible denominado “Compromiso de Composición Constante” (CCC) ó 20C3M en el que se congelan de inmediato todas las emisiones de gases de invernadero y la atmósfera permanece con su composición actual. Este escenario se utiliza como muestra científica y no como una posibilidad y suele utilizarse como escenario de diagnóstico para las proyecciones de los modelos globales en el siglo XX. Bajo estas condiciones la temperatura media global y el nivel del mar continuarían aumentando

debido a la inercia termal del océano. El calentamiento global podría exceder 1°C, siendo el pronóstico para el año 2400 de 2° a 6° C. Para el nivel del mar, el CCC produce un aumento de 10 centímetros por siglo (con rangos de 1 a 30 centímetros por siglo).

La Familia A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica:

- AIFI: Utilización intensiva de combustibles de origen fósil.
- AIT: Utilización de fuentes de energía de origen no fósil.
- AIB: Utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (entendiéndose por “equilibrada” la situación en la que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares).

La Familia A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

La Familia B1 plantea un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las



soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

Por último, la Familia B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en el A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

En la Figura 2.9 se muestran las emisiones anuales totales de CO<sub>2</sub> provenientes de todas las fuentes (energía, industria y cambio en los usos del suelo) entre 1990 y 2100 (en gigatoneladas de carbono al año, GtC/año) para las familias y los seis grupos de escenarios. Cada franja de emisiones coloreada indica el repertorio de escenarios armonizados y no armonizados dentro de cada grupo, con un escenario ilustrativo para cada uno de los seis grupos, incluidos los cuatro de referencia (A1, A2, B1 y B2 en línea continua) y dos escenarios ilustrativos para A1FI y A1T (línea discontinua).

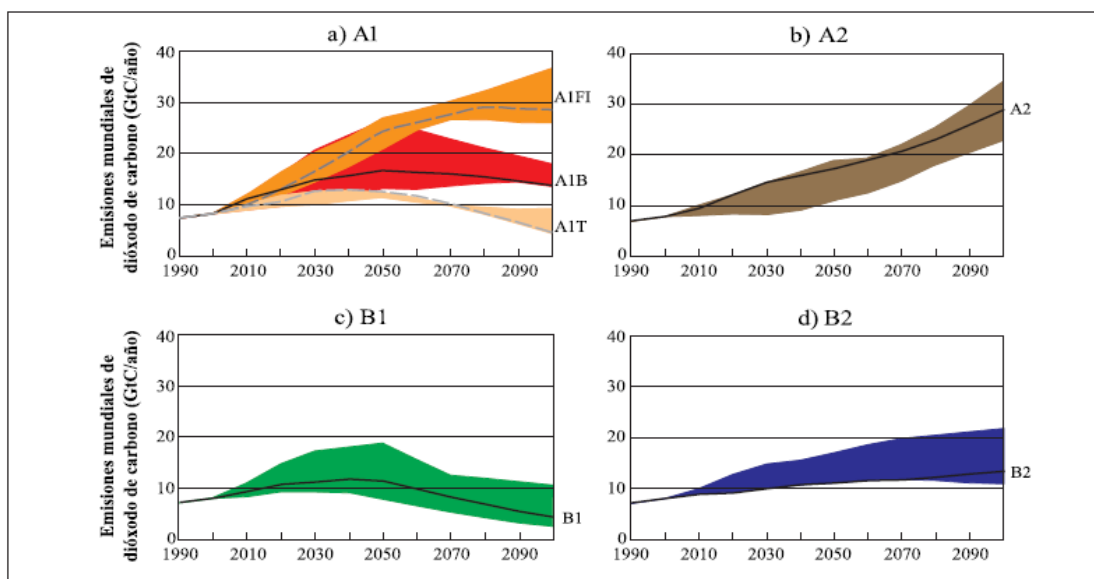


Figura 2.9 Emisiones anuales totales de CO<sub>2</sub> para cada familia y grupos de escenarios. Fuente: Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones

Los escenarios del IE-EE no incluyen otras iniciativas relacionadas con el clima, lo que significa que ninguno de ellos se basa explícitamente en la hipótesis de cumplimiento de la Convención Marco sobre el Cambio Climático o de los objetivos de emisiones del Protocolo de Kioto. Sin embargo, las políticas no vinculadas al cambio climático que apuntan a muchos otros fines, por ejemplo la calidad del aire, influyen directamente en las emisiones de GEI. Por otra parte, las políticas de los gobiernos pueden repercutir, en distinta medida, en los factores determinantes de las emisiones, como el cambio demográfico, el desarrollo social y económico, el cambio tecnológico, el uso de los recursos o la gestión de la contaminación. Esta influencia se refleja ampliamente en las líneas evolutivas y escenarios resultantes.

Las condiciones futuras de emisiones proporcionadas por cada familia de escenarios son utilizadas para alimentar los modelos climáticos globales que generan los resultados de variables geofísicas tales como temperatura o nivel del mar. El IPCC cuenta con una serie de modelos climáticos desarrollados por distintos centros de investigación de todo el mundo, entre los que están, el Max Planck Institute für Meteorologie (MPIM, Alemania), Hadley Centre for Climate Prediction and Research (Reino Unido), Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO, Australia) o el National Centre for Atmospheric Research (NCAR, USA).

Los componentes principales de los modelos climáticos globales son los modelos generales de circulación (GCMs), los cuales pueden ser atmosféricos (AGCM) u oceánicos (OGCM). La combinación de estos dos modelos junto con la adición de otros componentes como el modelado del hielo de los océanos o la evapotranspiración en tierra da lugar a la base de los modelos climáticos globales.

Los centros asociados al IPCC cuentan con distintas versiones de modelos globales, cuya ejecución para los distintos escenarios proporciona las proyecciones de cambio climático. La proyección final para cada escenario será la obtenida a partir de una combinación de los resultados proporcionados por los distintos modelos, denominada *ensemble*. Las diferencias principales entre los modelos recaen en la resolución espacial y temporal utilizada. En la tabla de la Figura 2.10 se muestra una lista de los modelos globales, los centros que los desarrollan y su resolución temporal y espacial.

Modelo	Centro	Resolución atmósfera	Resolución océano
BCC-CM1 2005	BCC, China	1.9°x 1.9°, L16	1.9°x 1.9°, L30
BCCR-BCM2 2005	Bjerknes Centre, Norway	1.9°x 1.9°, L31	1.5°x 1.5°, L35
CCSM3 2005	NCAR, USA	1.4°x 1.4°, L26	1°x 1°, L40
CGCM3.1 2005	CCCMA, Canada	1.9°x 1.9°, L31	0.9°x 1.4°, L29
CNRM-CM3 2004	CNRM, France	1.9°x 1.9°, L45	2°x 2°, L31
CSIRO-MK3.0 2001	CSIRO, Australia	1.9°x 1.9°, L18	0.8°x 1.9°, L31
ECHAM5 2005	MPIM, Germany	1.9°x 1.9°, L31	1.5°x 1.5°, L40
ECHO-G 1999	MIUB/KMA, Germany/Korea	3.9°x 3.9°, L19	2.8°x 2.8°, L20
FGOALS-g1.0 2004	LASG/IAP, China	2.8°x 2.8°, L26	1.0°x 1.0°, L16
GFDL-CM2.1 2005	NOAA/GFDL, USA	2.0°x 2.5°, L24	1.0°x 1.0°
GISS-AOM 2004	NASA/GISS, USA	3°x 4°, L12	3°x 4°, L16
GISS-EH 2004	NASA/GISS, USA	4°x 5°, L20	2°x 2°, L16
GISS-ER 2004	NASA/GISS, USA	4°x 5°, L20	4°x 5°, L13
INM-CM3.0 2004	INM, Rusia	4°x 5°, L16	2°x 2.25°, L33
IPSL-CM4 2005	IPSL, France	2.5°x 3.75°, L19	2°x 2°, L31
MIROC3.2 2004	CCSR, Japan	2.8°x 2.8°, L20	1.4°x 1.4°, L43
MRI-CGCM3.2 2003	MRI, Japan	2.8°x 2.8°, L30	2.0°x 2.5°, L23
PCM 1998	NCAR, USA	2.8°x 2.8°, L26	0.7°x 1.1°, L40
UK-HadCM3 1997	Hadley Centre, UK	2.5°x 3.75°, L19	1.25°x 1.25°, L20
UK-HadGEM1 2004	Hadley Centre, UK	1.3°x 1.9°, L38	1.0°x 1.0°, L40

Figura 2.10 Características de los modelos climáticos globales. Fuente: [http://www.meteo.unican.es/courses/2007\\_cursoRegionalizacion\\_files/2\\_1\\_Castro.pdf](http://www.meteo.unican.es/courses/2007_cursoRegionalizacion_files/2_1_Castro.pdf)

En el Capítulo 6 de esta tesis se explica cuales son los escenarios elegidos para proyectar el clima marítimo extremal y los modelos globales utilizados.

## 2.4 Variables atmósfera-océano

### 2.4.1 Índices climáticos

El análisis de la variabilidad de la atmósfera y el océano ha revelado la existencia de patrones atmosféricos y oceánicos dominantes en distintas regiones del globo. Estos patrones están caracterizados por los índices climáticos y existen diferentes criterios y procedimientos para su definición. En algunos casos se considera la diferencia de presiones entre dos puntos muy alejados, o la anomalía de la temperatura superficial del mar promediada espacialmente. Normalmente se suelen representar a través de series temporales.

A continuación se describen los principales índices climáticos alrededor del globo con variabilidad interanual.

#### 2.4.1.1 Oscilación del Ártico (*Arctic Oscillation, AO*)

La oscilación del Ártico (*Arctic Oscillation, AO*) y la Oscilación anular del sur u oscilación del Antártico (*Southern Annular Mode, SAM*) son los dos patrones climáticos con mayor influencia en el hemisferio norte y sur, respectivamente. El índice AO representa el estado de la circulación atmosférica sobre el Ártico. Es el patrón dominante de las variaciones no estacionales de presión a nivel del mar en latitudes más al norte de los 20°N y se caracteriza por anomalías de presión de un signo en el Ártico y anomalías de signo opuesto centradas sobre los 37°-45°N (Thompson y Wallace, 1998). La fase positiva produce presiones más bajas de lo normal en la región polar, lo que se traduce en un desvío hacia el norte de las borrascas y por lo tanto, condiciones más húmedas sobre Escocia y Escandinavia y más secas en áreas como la Península Ibérica o los países del Este (Figura 2.11).

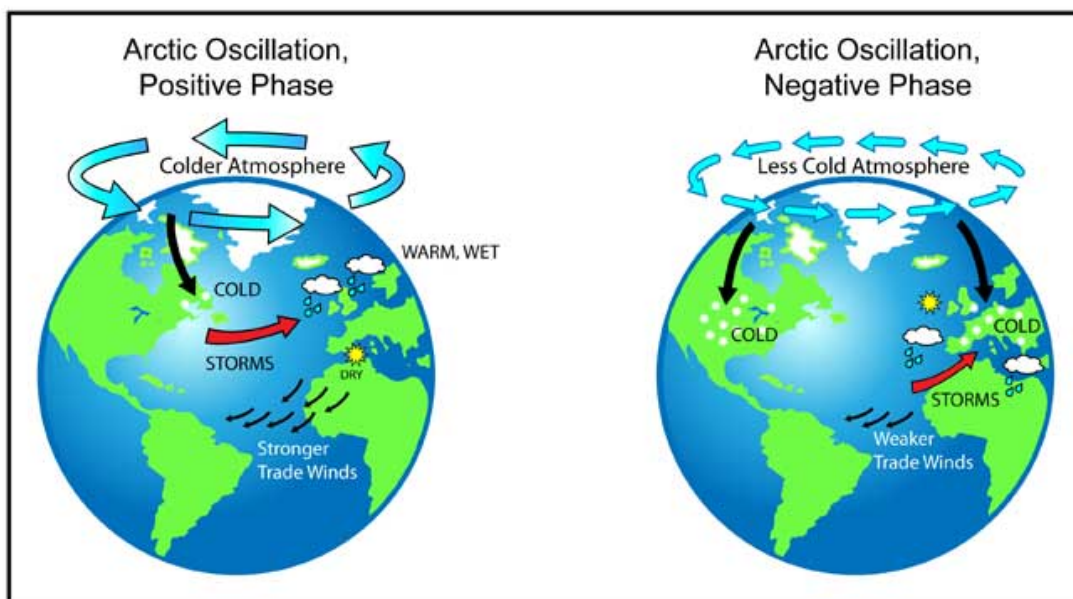


Figura 2.11 Efecto de las fases positiva (imagen izquierda) y negativa (imagen derecha) del AO. Fuente: NASA

#### 2.4.1.2 Oscilación del Antártico (*Southern Annular Mode, SAM*)

En el Hemisferio Sur el SAM representa el homólogo del AO en latitudes por encima de los 20°S. Se caracteriza por las anomalías de presión de un signo centradas sobre la

Antártida y las anomalías de signo contrario sobre las latitudes 40°-50°S (Thompson y Wallace, 2000). El SAM se puede calcular como la primera componente principal de las anomalías presión o del geopotencial de 850 hPa al sur de los 20°S (Figura 2.12). Se puede ver un centro de bajas presiones localizado en el polo y rodeado de un cinturón de altas presiones. La comparación de esta oscilación con la oscilación del Ártico evidencia la alta correlación entre ambas.

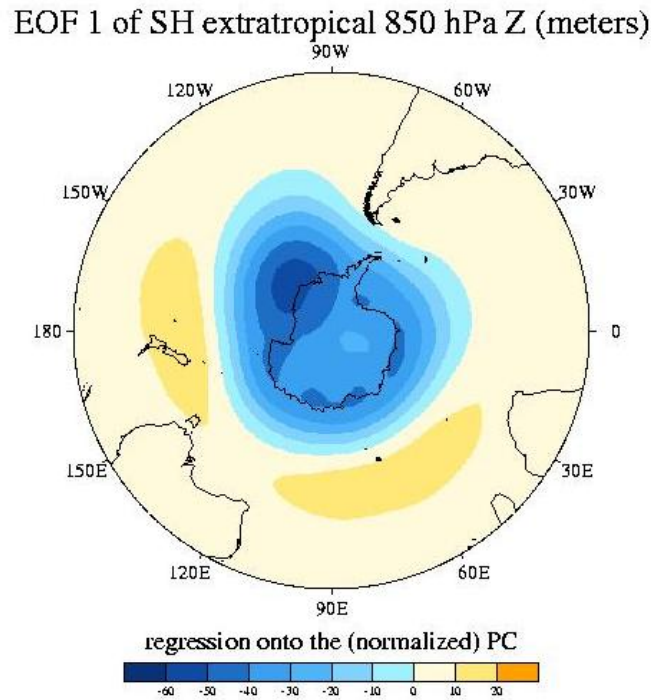


Figura 2.12 EOF 1 del neopotencial de 850 hPa entre el polo sur y los 20°S. Fuente: <http://jisao.washington.edu/data/aao/>

### 2.4.1.3 El Niño-Oscilación del Sur (*El Niño Southern Oscillation, ENSO*)

El fenómeno conocido por Oscilación del Sur El Niño (*El Niño Southern Oscillation, ENSO*) es aparentemente el más fuerte y predecible de los principales sistema que influyen la variabilidad climática. Este fenómeno de acción combinada entre la atmósfera y el océano es conocido por su relación con inundaciones, sequías y otros cambios en el clima en distintas regiones del mundo, más pronunciadas en Sudamérica, Indonesia y Australia (Rasmusson y Carpenter, 1983) y tiene una manifestación cuasi-regular, apareciendo con una frecuencia variable de 2 a 6-7 años. El ENSO está formado por una componente oceánica denominada “El Niño” (o “La Niña” dependiendo de la fase) que se caracteriza por el calentamiento (o enfriamiento) de las aguas superficiales de la zona

tropical oriental del océano Pacífico y por una componente atmosférica, Oscilación del Sur, que se caracteriza por cambios en la presión superficial en la zona tropical del Pacífico oeste (Figura 2.13). Ambas componentes van ligadas, cuando se produce fase Niño se produce el aumento de presión en el oeste del Pacífico, mientras que en fase Niña el enfriamiento de las aguas produce la situación del centro de bajas presiones en el Pacífico oeste.

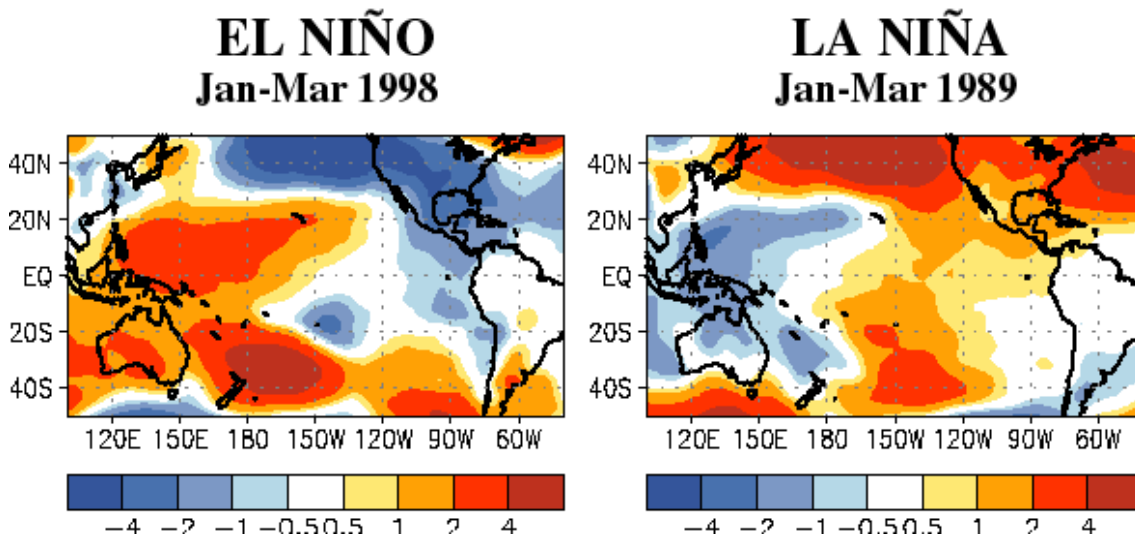


Figura 2.13 Anomalías de presión en el Pacífico bajo situaciones de Niño y Niña. Fuente: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensocycle/soilink.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/soilink.shtml)

En condiciones normales, los vientos alisios desplazan la capa superficial de agua caliente del océano Pacífico hacia el oeste, por lo que el nivel del mar es aproximadamente medio metro más alto en las costas de Indonesia que frente a Perú y Ecuador y la diferencia de temperatura superficial del agua entre estas dos zonas es de unos 8° C. En estas condiciones, cuando los vientos son fuertes la zona centro oriental del Pacífico tiende a ser más fría en la zona ecuatorial que en zonas adyacentes del norte y del sur. Como consecuencia la termoclina se inclina hacia arriba en las costas de Sudamérica y hacia abajo en las costas del sudeste de Asia, lo que produce el ascenso del fondo del océano de agua fría rica en nutrientes en el este, creando una zona rica en pesquerías a lo largo de la zona de Sudamérica (Figura 2.14). El afloramiento de agua forma una “lengua fría” en el Pacífico este que comienza cerca de la costa de Sudamérica y se extiende de cientos a miles de kilómetros hacia el oeste a lo largo del ecuador.

### December - February Normal Conditions

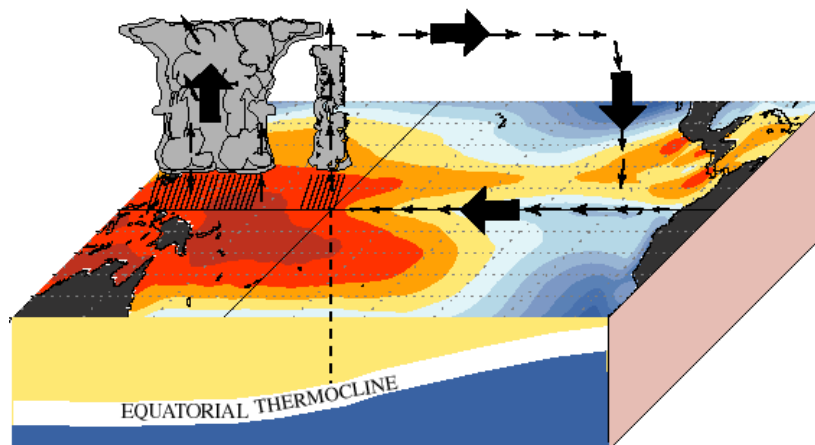


Figura 2.14 Esquema de la situación de vientos y estructura oceánica en condiciones normales del fenómeno ENSO en los meses de Diciembre a Febrero. Fuente:

[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensocycle/meanrain.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/meanrain.shtml)

Durante la fase positiva del fenómeno los vientos alisios se debilitan y la lengua de agua fría disminuye reemplazándose por agua caliente de la parte occidental del Pacífico. En esta situación la termoclina baja en la parte oriental del Pacífico y deja de producirse el afloramiento de agua fría y rica en nutrientes, lo que produce una disminución de la producción de las pesquerías de la costa pacífica de Sudamérica. Los eventos fuertes de esta anomalía reciben el nombre de “El Niño” y ocurren entre Diciembre y Febrero y suelen perdurar durante varios meses.

La fase negativa del ENSO recibe el nombre de “La Niña” y representa el caso opuesto a la situación Niño. Esta fase conlleva una intensificación de los vientos alisios que desplazan hacia el oeste la capa superficial de agua del Pacífico dando lugar a condiciones cálidas y húmedas en esta zona y la ascensión y desplazamiento de la lengua de agua fría en el Pacífico Este. Las consecuencias climáticas durante los eventos de Niña tienden a ser opuestos a los de Niño pero menos intensas (Figura 2.15).



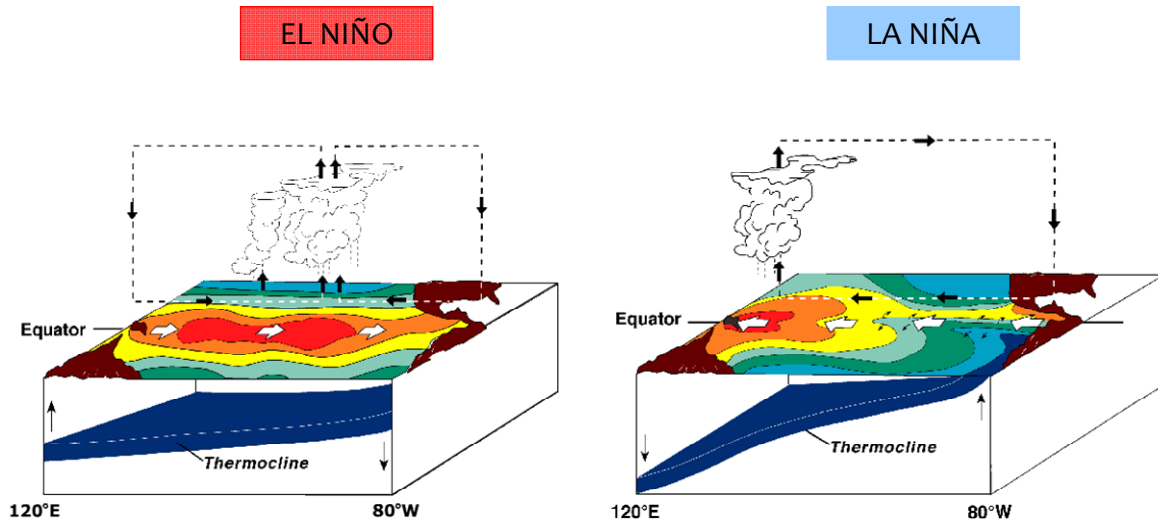


Figura 2.15 Esquema de la situación de vientos y estructura oceánica en fase Niño y fase Niña. Fuente: [http://en.wikipedia.org/wiki/El\\_Niño-Southern\\_Oscillation](http://en.wikipedia.org/wiki/El_Niño-Southern_Oscillation)

El fenómeno ENSO está monitorizado por índices de temperatura superficial del agua (*sea surface temperature*, SST), índices Niño, y de presión, índice de la oscilación del sur (SOI). Los índices de SST están definidos en cuatro regiones a lo largo del ecuador y miden las diferencias de temperatura en estas zonas. Las regiones están denominadas NIÑO 1 (80°-90° W, 5°-10° S), NIÑO 2 (80°-90° W, 0°-5° S), NIÑO 3 (90°-150° W, 5° N-5° S) y NIÑO 4 (150°-160° W, 5° N-5° S). Estas regiones fueron creadas a principios de los 80, pero se han ido modificando y combinando, de forma que lo que antes eran las regiones NIÑO 1 y NIÑO 2 ahora son la región NIÑO 1+2, además una nueva región llamada NIÑO 3.4 (120°-150° W, 5° N-5°S) fue creada y es de las más utilizadas al correlacionarse muy bien con el índice SOI (Figura 2.16).

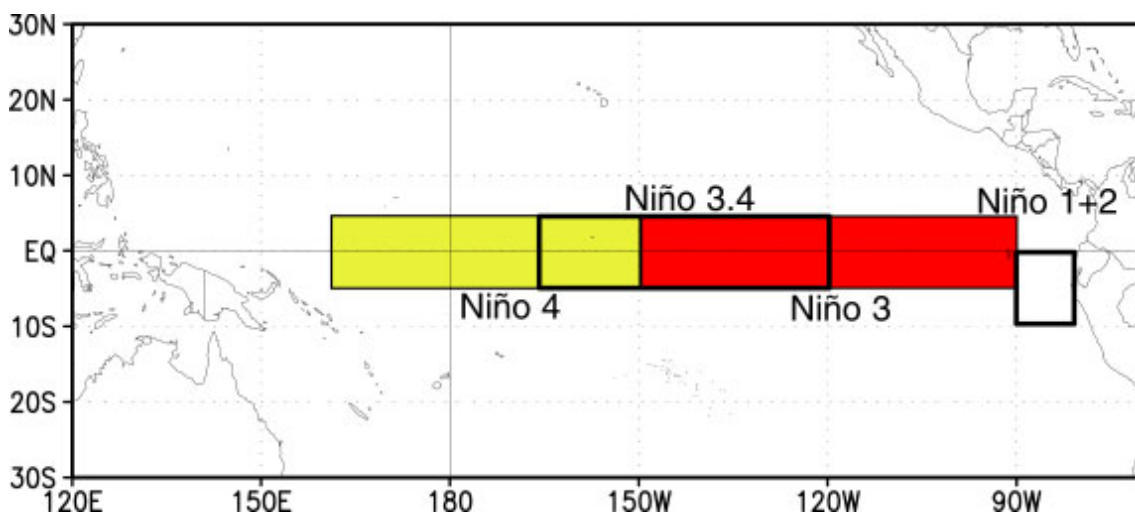


Figura 2.16 Regiones de medida de los índices Niño. Fuente: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream//tropics/enso.htm>



El índice SOI representa la componente atmosférica del fenómeno, denominada Oscilación del Sur. Este índice está basado en la diferencia de presiones estandarizadas a nivel del mar entre Tahiti en el Pacífico central y Darwin en Australia. En la fase positiva del SOI la presión barométrica en Tahití es mayor que en la zona de Darwin (fase Niña), mientras que en la fase negativa la presión aumenta en el oeste y cae en el este al debilitarse los vientos alisios (fase Niño).

Ambos índices están correlacionados, como se puede ver en la Figura 2.17. El panel superior muestra la evolución temporal del NIÑO 3.4 mientras que en el panel inferior se muestra el SOI para el mismo período de tiempo. Cuando la presión en Tahití es menor que en Darwin la anomalía de temperatura en el NIÑO 3.4 es positiva, ocurriendo el episodio calido del ENSO y por lo tanto situación de Niño. Por el contrario, cuando la presión en Tahití es mayor que en Darwin, la temperatura del NIÑO 3.4 es menor de lo normal y por lo tanto estamos ante un episodio de Niña (fase fría del ENSO).

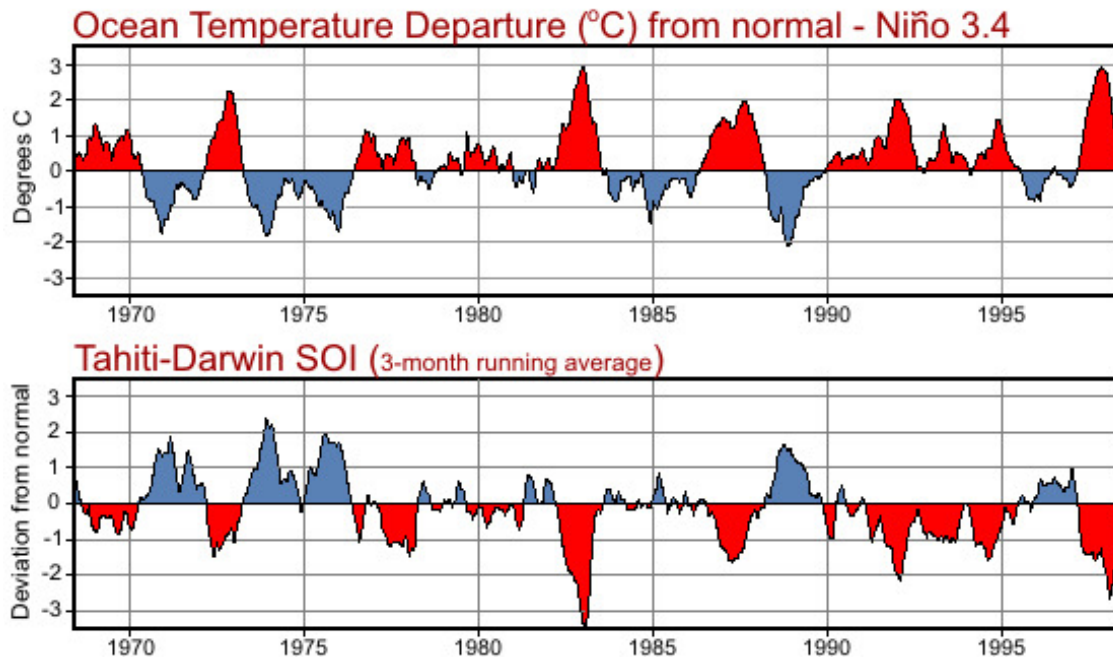


Figura 2.17 Evolución del índice NIÑO 3.4 (panel superior) y el SOI (panel inferior) en el mismo período de tiempo. Fuente: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tropics/enso.htm>

Las series temporales de los índices indican que el ciclo del ENSO tiene un período medio de 4 años; sin embargo, en el registro histórico el período varía entre los 2 y los 7

años. Las décadas de los 80 y 90 presentaron un ciclo del ENSO muy activo, con 5 episodios de Niño (1982/83, 1986/87, 1991/93, 1994/95 y 1997/98) y 3 de Niña (1984/85, 1988/89 y 1995/96). Además este período registró 2 de los episodios de Niño más fuertes del siglo (1982/83 y 1997/98), así como dos períodos consecutivos de condiciones de Niño durante 1991-1995 sin la alternancia de episodio frío.

#### 2.4.1.4 Patrón de Norte América-Pacífico (*Pacific North American pattern, PNA*)

El patrón de Norte América Pacífico (*Pacific North American pattern, PNA*) es uno de los sistema de variabilidad de baja frecuencia más prominentes en el hemisferio norte extra tropical. Está forzado por la relación entre las aguas cálidas de Hawai y las aguas frías de las islas Aleutianas de Alaska, por lo que se ve intensificado durante los períodos de Niño. Las masas de aire sobre estas zonas generan un patrón de circulación que afecta al clima de Norte América en casi todos los meses excepto Junio y Julio.

El patrón PNA está asociado con fluctuaciones fuertes en la localización e intensidad de la corriente de chorro (*jet stream*) asiática oriental. La fase positiva esta asociada a una intensificación de esta corriente y un movimiento hacia el este del *jet* en la zona próxima al oeste de los Estados Unidos. La fase negativa está asociada a una retracción del chorro hacia el oeste, es decir, el este de Asia, bloqueando la actividad del Pacífico Norte a latitudes altas y a una fuerte alteración de la configuración del flujo atmosférico sobre el Pacífico Norte central.

#### 2.4.1.5 Índice del Pacífico Oeste (*Western Pacific index, WP*)

El patrón del Pacífico Oeste (*West Pacific Pattern, WP*) es un modo primario de baja frecuencia que explica la variabilidad sobre el Pacífico Norte en todos los meses (Wallace y Gutzler, 1981, Barnston y Livezey, 1987). Durante el invierno y primavera el patrón consiste en un dipolo norte-sur de anomalías con un centro localizado sobre la península de Kamchatka y otro de signo contrario más amplio cubriendo una porción del sudeste asiático y latitudes bajas de la zona oeste del Pacífico norte. Por lo tanto, la fase negativa o positiva del patrón refleja variaciones zonales y meridionales en la posición e intensidad de la corriente de chorro en el oeste Pacífico. En verano y otoño

aparece un tercer centro de anomalías sobre Alaska y el mar de Beaufort con signo opuesto al del centro sobre el Pacífico Norte occidental. Esta estructura es más evidente en otoño, formando una ruta cuasi circular que se introduce en el oeste de los Estados Unidos.

#### 2.4.1.6 Patrón del Pacífico Este-Pacífico Norte (*East Pacific-North Pacific pattern*, EP/NP)

El patrón EP/NP está caracterizado por tres centros principales de anomalías de presión que se manifiestan fundamentalmente en las estaciones de primavera, verano y otoño. La fase positiva presenta altas presiones sobre Alaska y el oeste de Canadá y bajas sobre el Pacífico norte central y el este de Norte América. Los eventos fuertes de fase positiva están asociados con una intensificación y movimiento hacia el sur de la corriente de chorro del Pacífico, lo que da lugar a circulación anticiclónica sobre el oeste de Norte América y ciclónica sobre el este de los Estados Unidos. Los eventos fuertes de fase negativa del patrón dan lugar a situaciones opuestas en estas regiones.

La fase positiva del patrón EP/NP está asociada a temperaturas por encima de la media en la zona este del Pacífico norte y temperaturas por debajo de lo normal en el Pacífico Norte central y el este de Norte América. Además refleja condiciones húmedas en el norte de Hawai y secas sobre el sudoeste de Canadá.

#### 2.4.1.7 Oscilación del Atlántico Norte (*North Atlantic Oscillation*, NAO)

La oscilación del Atlántico Norte (Barnston y Livezey, 1987) es un importante fenómeno climático consecuencia de la interacción atmósfera-océano que condiciona el clima en Europa y partes de Norte América y Asia. La NAO consiste en un dipolo norte-sur formado por el centro de bajas presiones en Islandia y el centro de altas presiones en las Azores (Hurrell, 1995), produciendo cambios en la masa y campos de presión que modifican la trayectoria de las tormentas que cruzan el Atlántico Norte desde la costa este de América hasta Europa. Se han publicado un amplio número de índices que varían de acuerdo a la localización e instrumentación, destacando el índice de Hurrell (1995) calculado como la diferencia entre las anomalías de presión a nivel del mar estandarizada entre Lisboa (Portugal) y Stykkisholmujr (Islandia), o el de Jones et al. (1997) que utiliza los datos medidos entre Gibraltar (España) e Islandia.

En fase positiva, el gradiente de presión meridional de invierno sobre el Atlántico norte es grande. Esto es debido a que el centro de bajas en Islandia y de altas en las Azores tienen un efecto potenciador el uno sobre el otro. Eventos fuertes de la fase positiva están asociados a temperaturas por encima de lo normal en el este de Estados Unidos y a lo largo del norte de Europa y temperaturas bajas en Groenlandia y casos aislados en el sur y este de Europa. También están asociados a condiciones de precipitación abundantes en el norte de Europa y Escandinavia y condiciones secas en el sur y centro de Europa. Patrones opuestos de temperatura y precipitación son observados en eventos fuertes de la fase negativa.

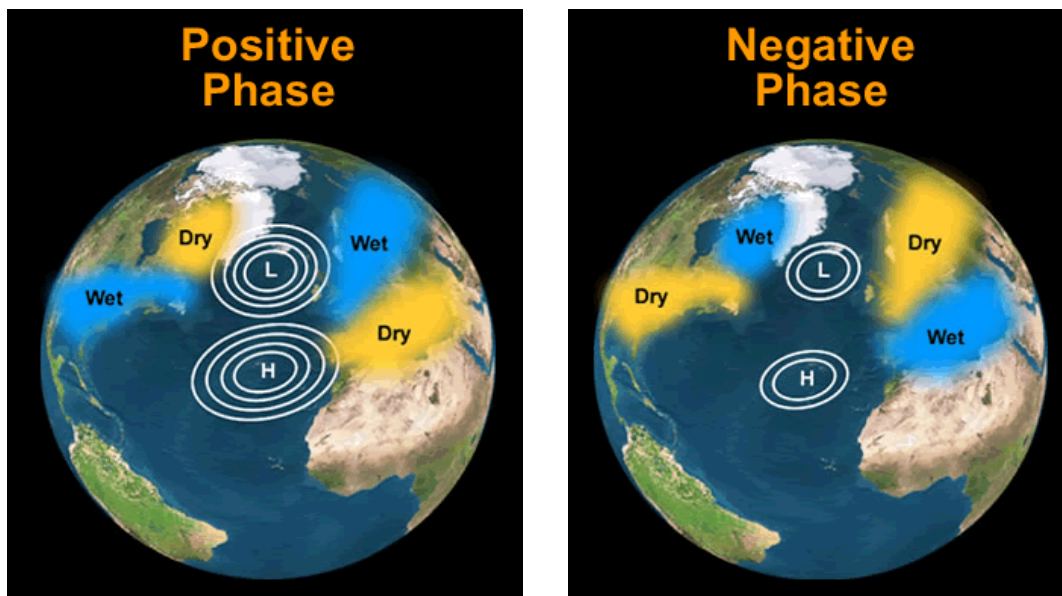


Figura 2.18 Fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) de la NAO. Fuente: <http://www.windows.ucar.edu>

La NAO está fuertemente vinculada a la oscilación del Ártico (AO), modo generador de la variabilidad en la circulación de todo el hemisferio norte. La NAO es considerada una oscilación muy similar a la AO pero más localizada sobre la cuenca Atlántica. Esto sugiere que los efectos en el Atlántico son más significativos de lo que se pensaba inicialmente, teniendo una significancia en el clima similar a la que tiene el ENSO en el Pacífico. La NAO ejerce una influencia dominante en las temperaturas, precipitación y tormentas y pesquerías y ecosistemas del sector Atlántico y los continentes cercanos.

#### 2.4.1.8 Patrón del Atlántico Este (*East Atlantic pattern, EA*)

El segundo modo principal de baja frecuencia sobre el Atlántico Norte es el patrón del Atlántico Este (Barnston y Livezey, 1987). El patrón EA aparece como un modo destacado en todos los meses y es estructuralmente similar a la NAO. Consiste en un dipolo Norte-Sur de anomalías de presión que se extiende en el Atlántico Norte de este a oeste. El centro de anomalías está desplazado en dirección sureste con respecto a las líneas nodales de la NAO, por lo que estos dos modos presentan cierta dependencia. Sin embargo, la localización en latitudes más bajas del centro del patrón EA contiene un vínculo subtropical más fuerte asociado a modulaciones en la intensidad y la localización del centro de presiones. Este vínculo subtropical es el que distingue el patrón EA de su homólogo NAO.

#### 2.4.1.9 Patrón del Atlántico Este-Oeste de Rusia (*East Atlantic-Western Russian pattern, EA/WR*)

El patrón EA/WR es uno de los tres patrones teleconectivos que afectan la zona de Eurasia a lo largo del año. Este patrón es predominante en todos los meses excepto Junio-Agosto y es referido por Barnston y Livezey (1987) como el patrón Eurasia-2. Consiste en cuatro centros principales de anomalías. Dos centros principales localizados sobre el mar Caspio y el oeste de Rusia componen el EA/WR de invierno. En los meses de primavera y otoño aparece un patrón tricelular, con dos centros principales de anomalías de presión de signo contrario localizados sobre el oeste/noroeste de Rusia y el noroeste de Europa. El tercer centro, con el mismo signo que el centro de Rusia, está localizado fuera de la costa portuguesa en primavera pero presenta un pronunciado desplazamiento hacia Newfoundland (Canadá) en otoño.

#### 2.4.1.10 Patrón de Escandinavia (*Scandinavian pattern, SCA*)

El patrón SCA consiste en un centro de circulación primaria que se extiende sobre Escandinavia y amplias zonas del océano Ártico y el norte de Siberia. El patrón escandinavo fue presentado previamente por Barnston y Livezey (1987) como el patrón Eurasia-1. Dos centros adicionales más débiles con signo opuesto al centro escandinavo están localizados sobre el oeste de Europa y el sector Mongolia/China Occidental. Este

patrón es un modo prominente de baja frecuencia en todos los meses salvo en Junio y Julio.

#### 2.4.1.II Dipolo del Océano Índico (*Indian Ocean Dipole*, IOD)

El IOD es un fenómeno combinado océano-atmósfera que tiene lugar en el océano Índico ecuatorial y afecta al clima en Australia y algunos países que rodean la cuenca Índica (Saji et al., 1999). Normalmente está caracterizado por anomalías negativas de temperatura superficial del agua en el sureste ecuatorial del océano Índico y anomalías positivas en el oeste del mismo océano. La intensidad del IOD se mide mediante un índice calculado a partir del gradiente de la temperatura superficial del agua en el oeste ecuatorial (50° E a 70° E, 10°S a 10°N) y el sureste ecuatorial (90°E a 110°E, 10°S a 0°S) del océano Índico. Este índice se denomina *Dipole Mode Index* (DMI). Cuando el índice DMI es positivo, el fenómeno es referido como el IOD positivo y cuando el DMI es negativo, entonces el fenómeno es referido como el IOD negativo (Figura 2.19).

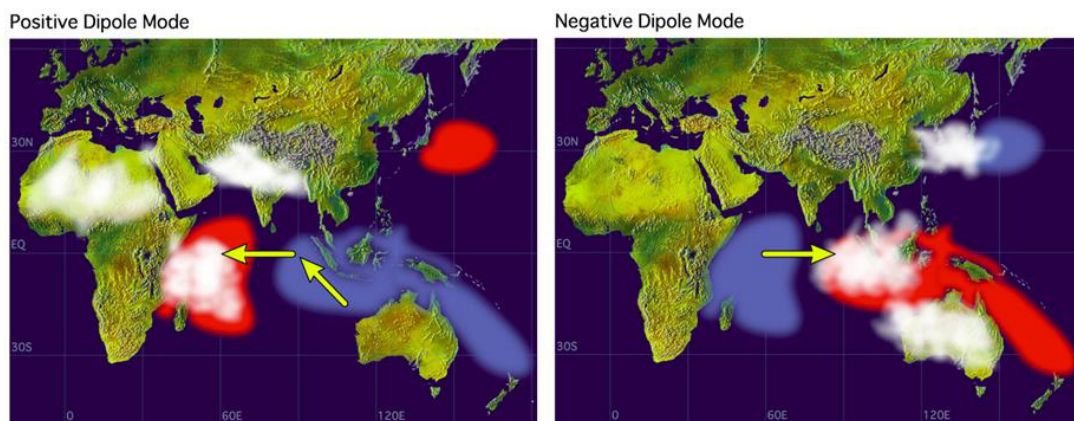


Figura 2.19 Fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) del IOD. Fuente: <http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/dl/iod/>

El nombre *Indian Ocean Dipole* fue concebido por los investigadores Saji et al. (1999) con el objetivo de representar la estructura zonal del dipolo de varios parámetros combinados océano-atmósfera tales como SST, presión a nivel del mar o anomalías de nivel del mar.

La fase positiva del índice está vinculada a temperaturas y precipitaciones por encima de la media en la región oeste del océano Índico (África oriental) y al enfriamiento de las

aguas en el este del Índico, lo que da lugar a sequías en las zonas de Indonesia y del centro y sur de Australia. La fase negativa del IOD produce condiciones opuestas, con calentamiento del agua y más precipitaciones en la parte oriental del Índico y enfriamiento y condiciones más secas en el oeste. Por último, hay que destacar también que el IOD afecta a la duración e intensidad del monzón sobre la región india.

En la Figura 2.20 se pueden ver los polos este y oeste del IOD en su fase positiva (Noviembre de 1997).

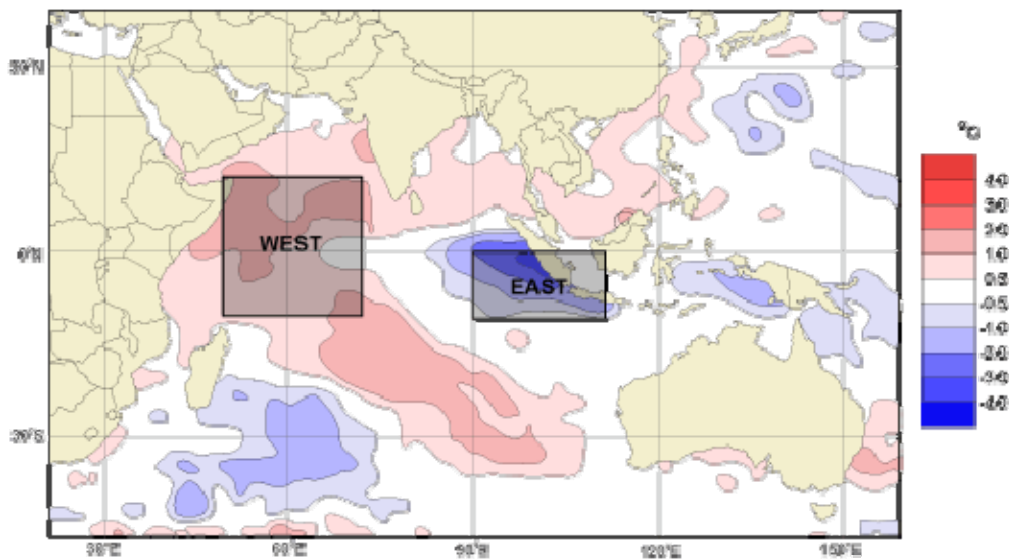


Figura 2.20 Anomalías de temperatura superficial del agua en el océano Índico en la fase positiva del IOD en Noviembre de 1997. Fuente: [http://www.bom.gov.au/climate/IOD/about\\_IOD.shtml](http://www.bom.gov.au/climate/IOD/about_IOD.shtml)

#### 2.4.1.12 Oscilación cuasi-bianual o “Vientos de Singapur” (*Quasi-Biennial Oscillation, QBO*)

La oscilación cuasi-bianual, también conocida como “Vientos de Singapur”, es una oscilación cuasi periódica de los vientos zonales ecuatoriales en la estratosfera tropical, alternando entre vientos del este y vientos del oeste con un período de 26-29 meses (Baldwin et al., 2001). Estos vientos alternantes se generan en la parte superior de la baja troposfera y se propagan disminuyendo en altura a razón de 1 km al mes hasta que se disipan en la tropopausa tropical. El movimiento descendente de los vientos del este es normalmente más irregular que los del oeste y la amplitud de la fase este alrededor de dos veces más fuerte que la fase oeste. En el perfil de vientos del QBO se puede ver que en la parte superior dominan los vientos hacia el este mientras que en la parte inferior es más probable encontrar los vientos hacia el oeste.

## 2.4.2 Síntesis series temporales índices climáticos

Una vez descritos cada uno de los índices climáticos que posteriormente se utilizarán como predictores, a continuación se muestran, en la Figura 2.21 las series temporales de cada uno de ellos.

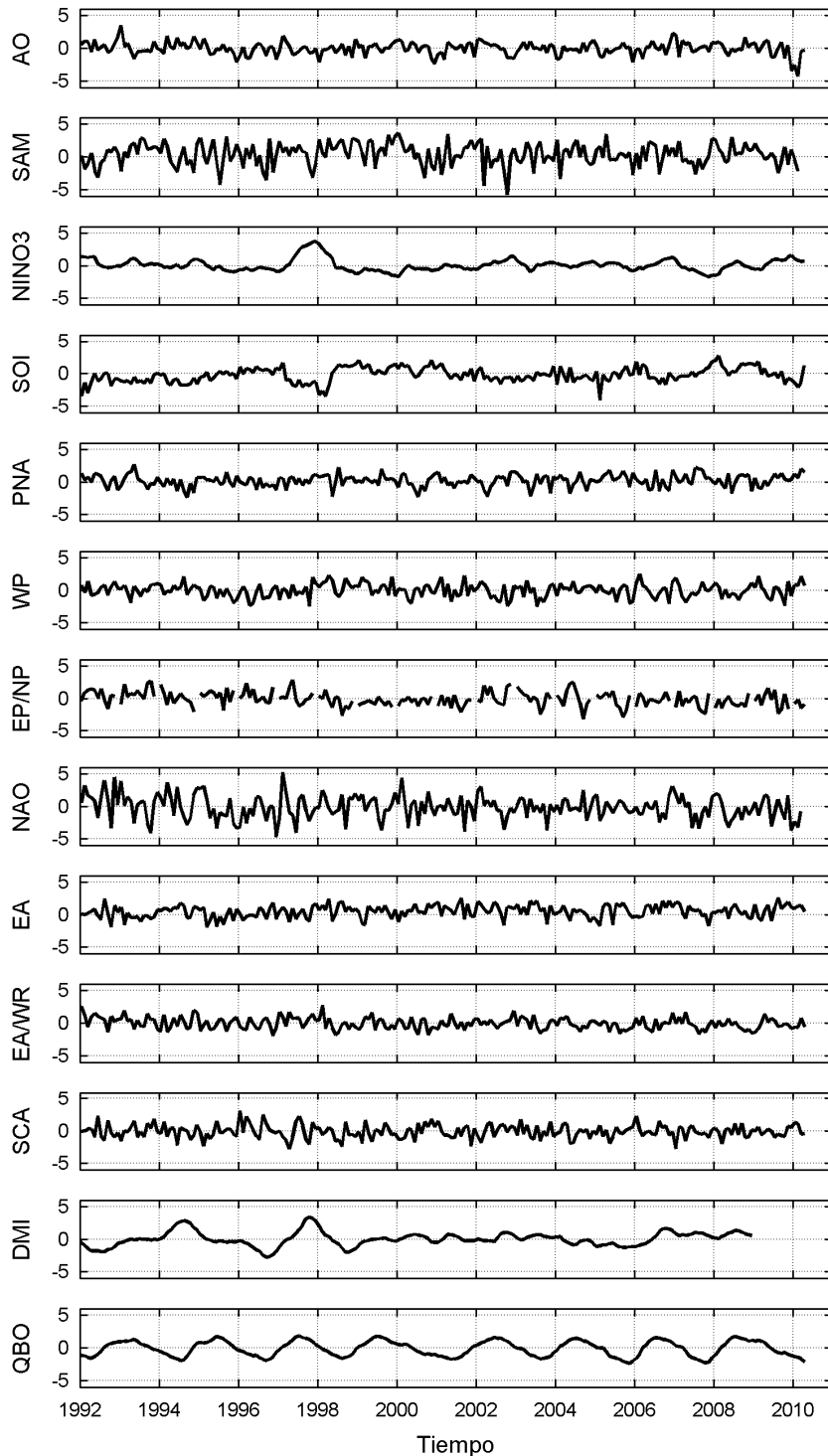


Figura 2.21 Series temporales de los índices climáticos utilizados como predictores en esta tesis



