

# Modelización del medio físico-marino

Isabel Martínez Marco  
Jefe de Área de Aplicaciones  
AEMET

[imartinezm@aemet.es](mailto:imartinezm@aemet.es)

Curso: PIB-M 2022-23

# Índice

- Teoría lineal de las olas de la superficie del océano
- Modelo de olas
- Configuraciones del modelo de olas del ECMWF
- Configuración del sistema de predicción de oleaje costero en AEMET: modelo AEWAM y sistema AESPOL (modelo SWAN)
- Productos del modelo de olas
- Verificación

## Teoría lineal de las olas de la superficie del océano

Eliminando los términos no lineales de las ecuaciones se obtienen soluciones sinusoidales para el desplazamiento vertical de la superficie libre:

$$\eta = a \operatorname{sen}(kx - \omega t)$$

$\omega$  (rd/s),  $f$  (Hz) : *frecuencia de la ola*

$k$  : *número de ondas*

$T$  : *periodo de la ola*

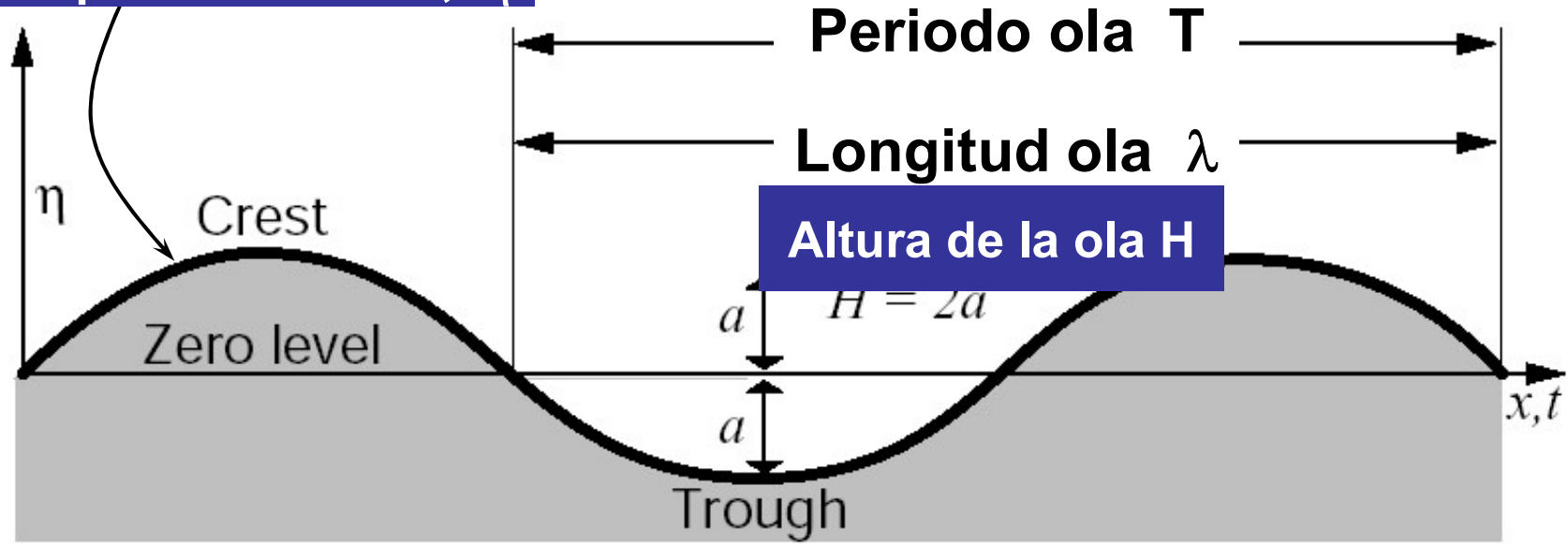
$L$  : *longitud de onda*     $a$  : *amplitud*

$a / L \ll 1$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Desplazamiento de la superficie del mar,  $\eta$



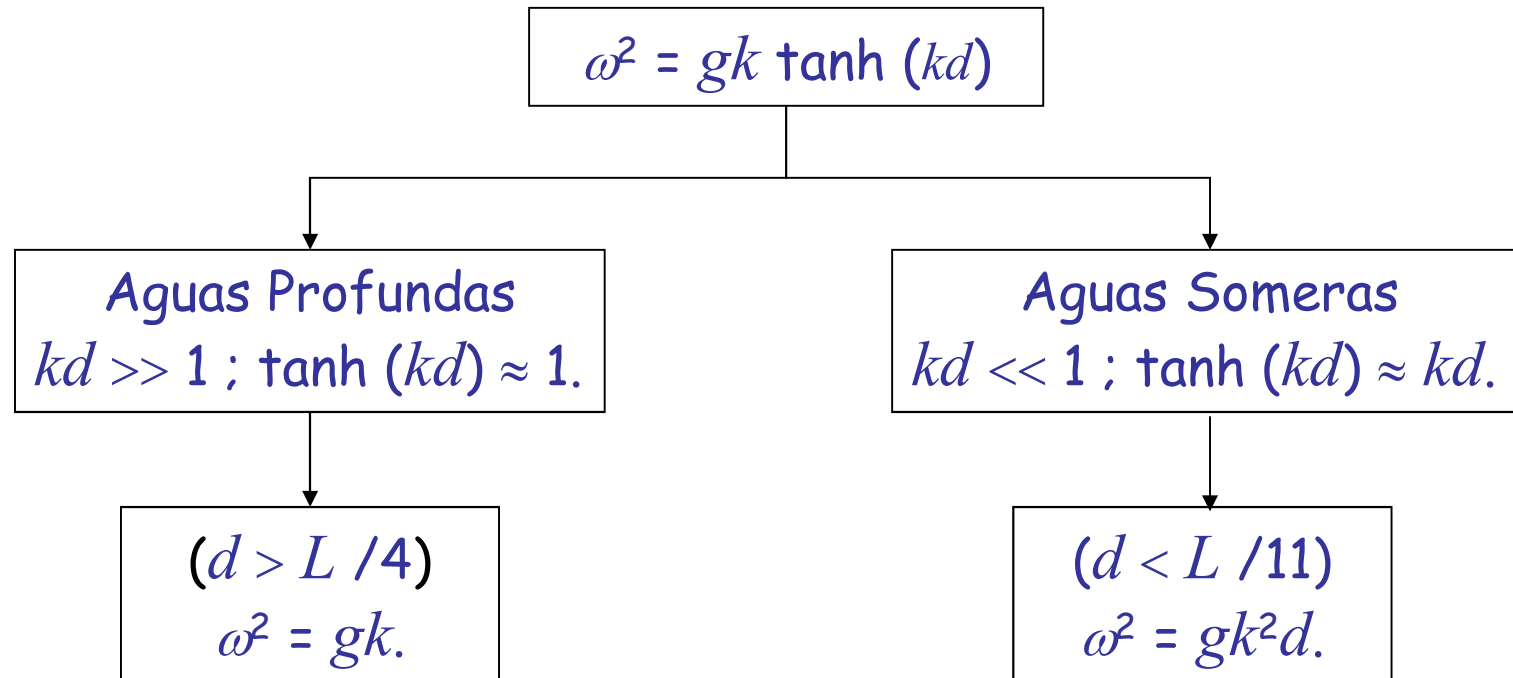
## Teoría lineal de las olas de la superficie del océano

La frecuencia de la ola,  $\omega$ , se halla relacionada con el número de ondas,  $k$ , a través de la **relación de dispersión** :

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

1. Aprox. de aguas profundas. Es válida cuando la profundidad del agua,  $d$ , es mucho mayor que la longitud de onda,  $L$ . En tal caso  $kd \gg 1$  y  $\tanh(kd) \approx 1$ .
2. Aprox. de aguas someras. Es válida si la profundidad del agua,  $d$ , es mucho menor que la longitud de onda,  $L$ . En tal caso  $kd \ll 1$  y  $\tanh(kd) \approx kd$ .

## Teoría lineal de las olas de la superficie del océano



Los límites  $d/L$  corresponden a diferencias del 10% entre la relación exacta y la aproximada. Hay características de las olas que sólo pueden medirse con precisiones de entre el 5% y el 10%.

## Teoría lineal de las olas de la superficie del océano

**Velocidad de fase ( $c$ ):** velocidad a la que se propaga una fase particular de la ola.

$$c = \frac{\omega}{k}$$

Aguas Profundas  
( $d > L / 4$ )  
 $\omega^2 = gk.$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega}$$

Aguas Someras  
( $d < L / 11$ )  
 $\omega^2 = gk^2d.$

$$c = \sqrt{gd}$$

# Teoría lineal de las olas de la superficie del océano

**Velocidad de grupo ( $c_g$ ):** velocidad a la que se propaga un grupo de olas.

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

Aguas Profundas  
( $d > L / 4$ )  
 $\omega^2 = gk.$

$$c_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{c}{2}$$

Aguas Someras  
( $d < L / 11$ )  
 $\omega^2 = gk^2d.$

$$c_g = \sqrt{gd} = c$$



## Teoría lineal de las olas de la superficie del océano

La *energía del oleaje*,  $E$ , medida en julios por metro cuadrado, está relacionada con la varianza del desplazamiento de la superficie libre  $\eta$  mediante:

$$E = \rho_w g \langle \eta^2 \rangle.$$

$\rho_w$  : densidad del agua del mar

$g$  : aceleración de la gravedad

$\langle \cdot \rangle$  : representa un promediado espacial o temporal.

## Teoría lineal de las olas de la superficie del océano

**Altura significativa del oleaje**,  $H_{1/3}$ , (en una área o que pasa por un punto) es la que se corresponde con la altura promedio del tercio de olas más altas.

Si el oleaje se agrupa en un estrecho rango de frecuencias,  $H_{1/3}$  se halla relacionado con la desviación estándar del desplazamiento de la superficie libre:

$$H_{1/3} = 4 \langle \eta^2 \rangle^{1/2}.$$

Esta relación resulta muy útil y en el presente es el mecanismo aceptado para establecer la altura significativa del oleaje a partir de medidas del desplazamiento de la superficie libre del mar

# Modelo de olas

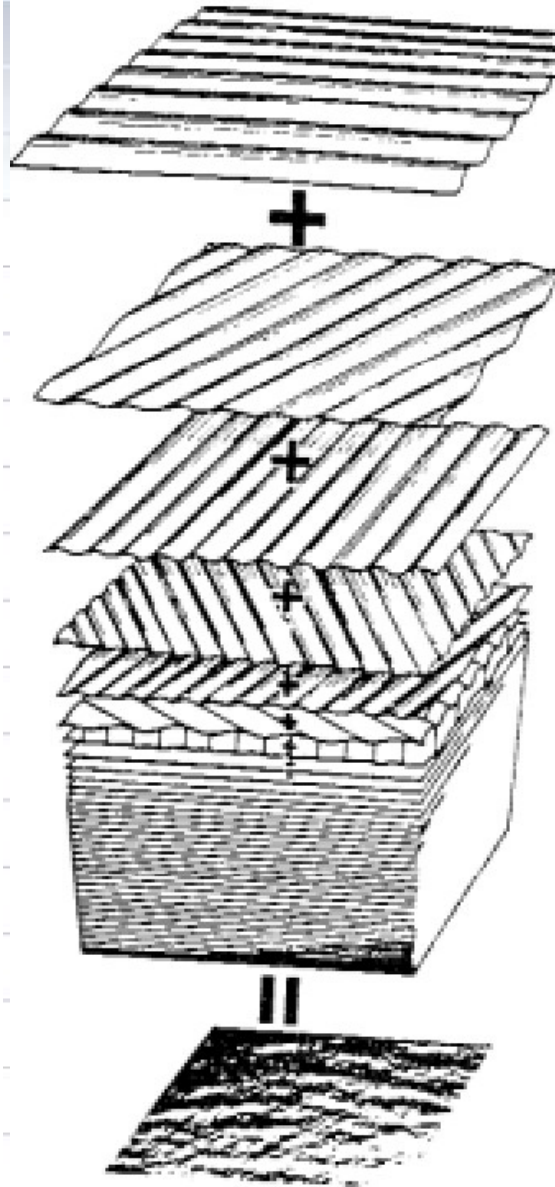
- Los sistemas de predicción de olas actuales se basan en la descripción estadística del oleaje (es decir, un promedio del conjunto de las olas individuales).
- En estos modelos, el estado del mar se describe por el espectro de olas de dos dimensiones  $F(f, \theta)$ , que está relacionado con la cantidad de energía contenida en el oleaje con frecuencia  $f$ , propagándose en la dirección  $\theta$ .
- Por ejemplo, la varianza media del desplazamiento de la superficie del mar  $\eta$  debida al oleaje se expresa como:

$$\langle \eta^2 \rangle = \iint F(f, \theta) df d\theta$$

- La energía media asociada con aquellas olas es

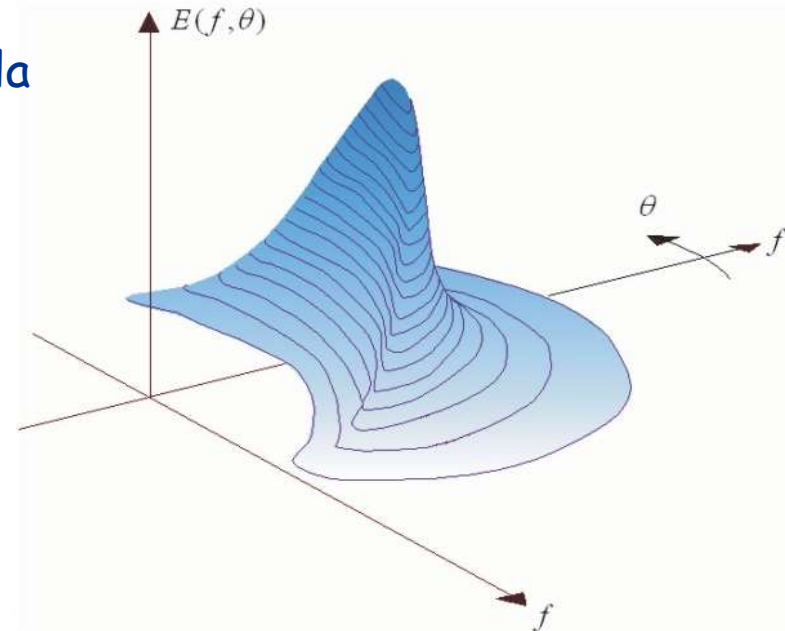
$$\langle energy \rangle = \rho_w g \langle \eta^2 \rangle$$

# Espectro del oleaje



- La superficie irregular del agua se puede descomponer en un número infinito de componentes sinusoidales con diferentes frecuencias ( $f$ ) y direcciones de propagación ( $\theta$ ).

- La distribución de la energía del oleaje entre estas componentes se llama:  
“espectro del oleaje”,  $F(f, \theta)$ .



# Modelo de olas

- La medida estadística para la altura del oleaje, se denomina altura significativa del oleaje  $H_s$ :

$$H_s = 4\sqrt{\langle \eta^2 \rangle}$$

El término altura significativa de oleaje es un valor histórico que parece bien correlacionado con la estimación visual de la altura de ola por los observadores con experiencia.

- El espectro 2-D se obtiene de la ecuación de balance energético (en su forma más simple: caso de aguas profundas):

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}_g F) = S_{in} + S_{nl} + S_{diss}$$

Donde la velocidad de grupo  $V_g$  se obtiene de la relación de dispersión que relaciona frecuencia y número de onda:

$$\omega^2 = gk$$

# Modelo de olas

$$\omega^2 = gk$$

$$\vec{V}_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}} \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|}$$

Es decir, la energía de las ondas largas se propaga más rápidamente que la de las ondas cortas

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}_g F) = S_{in} + S_{nl} + S_{diss}$$

donde

$S_{in}$ : efecto de la fuerza del viento (*generación*).

$S_{nl}$ : transferencia no lineal entre componentes diferentes del oleaje (*redistribución*).

$S_{diss}$ : efectos de la disipación.

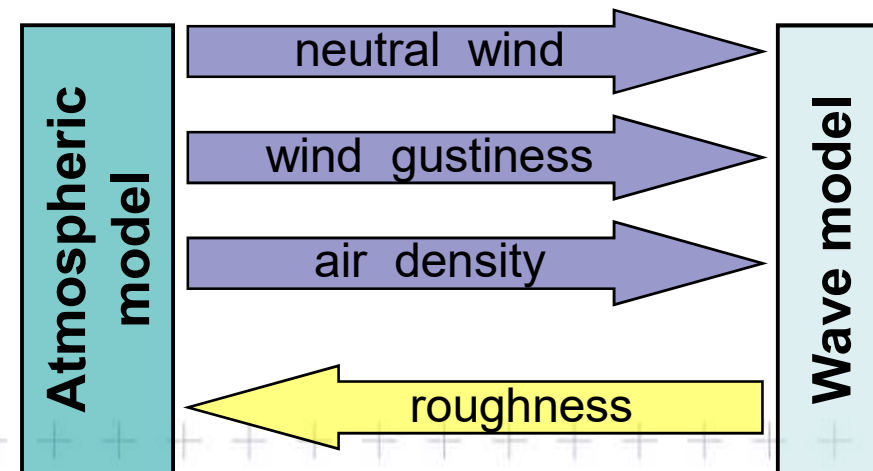
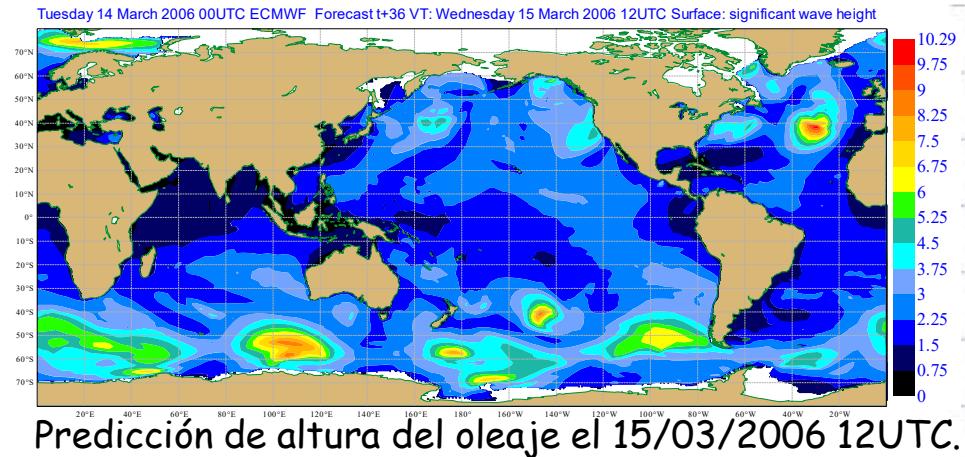
# Modelo de olas

- La predicción se realiza sobre las componentes individuales (frecuencias y direcciones de propagación) del espectro de oleaje, permitiendo que cada componente evolucione dependiendo del viento local, y que interactúe con el resto de las componentes de acuerdo a la teoría de Hasselmann.
- Por ejemplo, el oleaje se puede representar mediante 600 componentes en cada nodo de la malla que cubre el área a predecir. De esas 600 componentes, 25 son frecuencias y 24 son rumbos o direcciones ( $15^\circ$ ).
- Para reducir el tiempo de cálculo, los modelos emplean mallas anidadas con la mayor densidad de nodos en las proximidades de la costa y en las regiones de desarrollo habitual de temporales.

# Configuración del modelo de olas del ECMWF

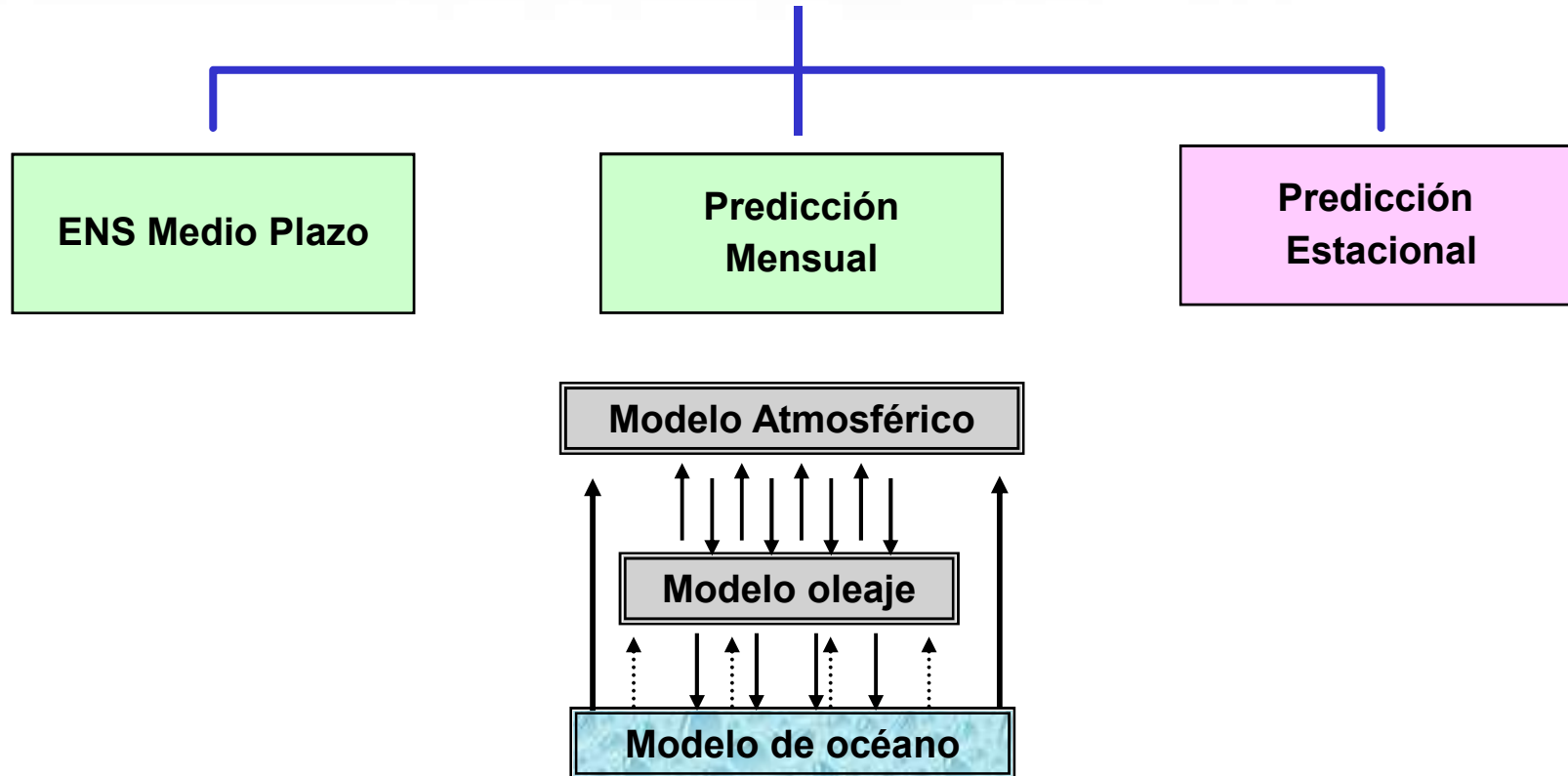
## Modelos Globales

- Global desde 81°S a 90°N
- Acoplado al modelo de atmósfera (IFS) con "feedback" del cambio de la rugosidad de la superficie del mar debido al oleaje.
- La interface entre WAM e IFS incluye densidad del aire y el efecto de las ráfagas en el crecimiento del oleaje y más recientemente también los vientos neutrales.
- Asimilación de vientos de ENVISAT y de altura del oleaje de altímetros Jason y espectros ASAR de ENVISAT.





# Sistema de Predicción del ECMWF



# Configuraciones del modelo de olas del ECMWF

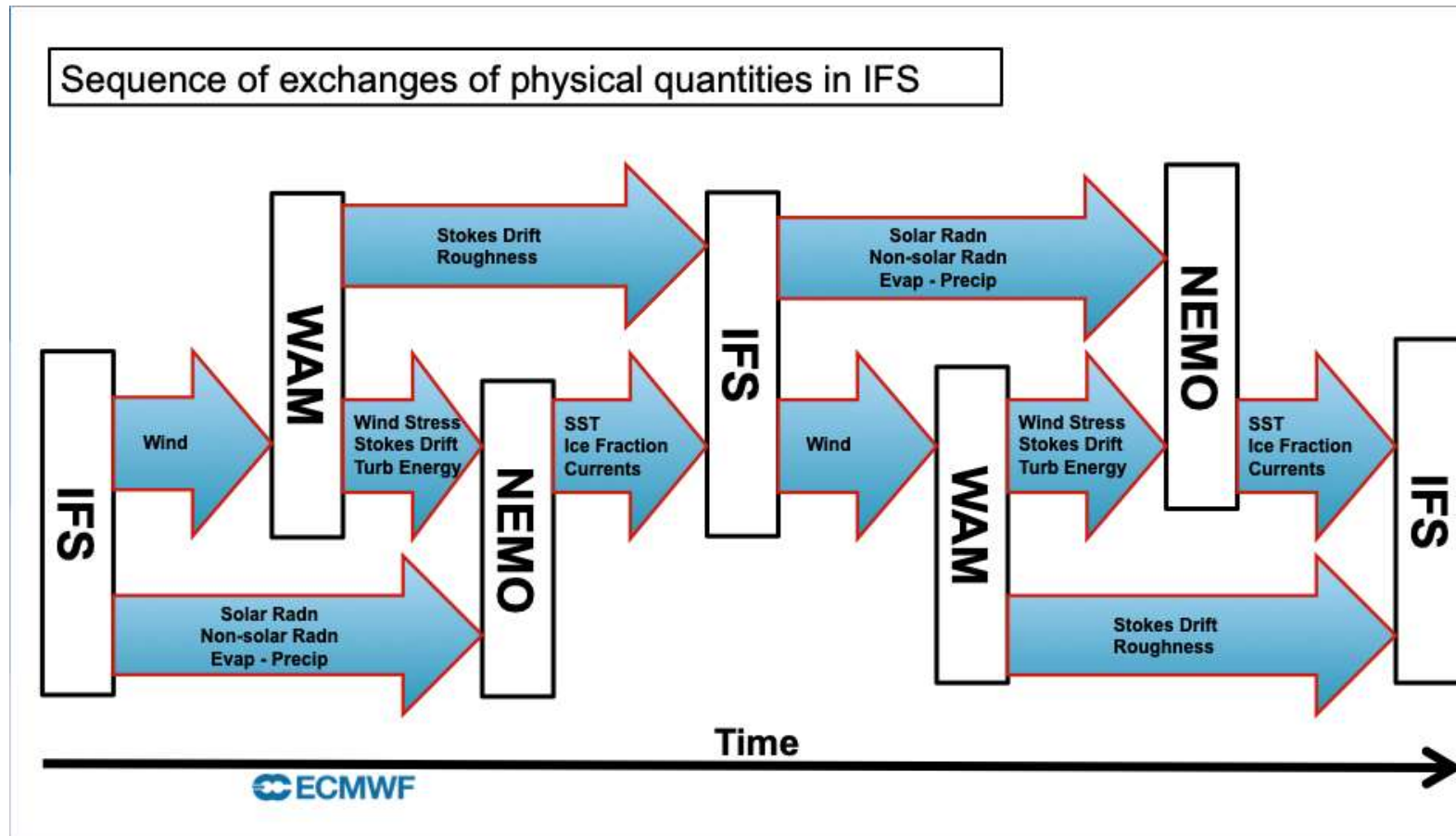
## ENS-WAM

- 14 km espaciado de grid.
- 36 frecuencias y 36 direcciones.
- Acoplado al modelo TL1279 y al modelo de océano NEMO y de hielos LIM2
- Análisis cada 6 horas y predicciones a 15 días desde las 0 y 12Z.

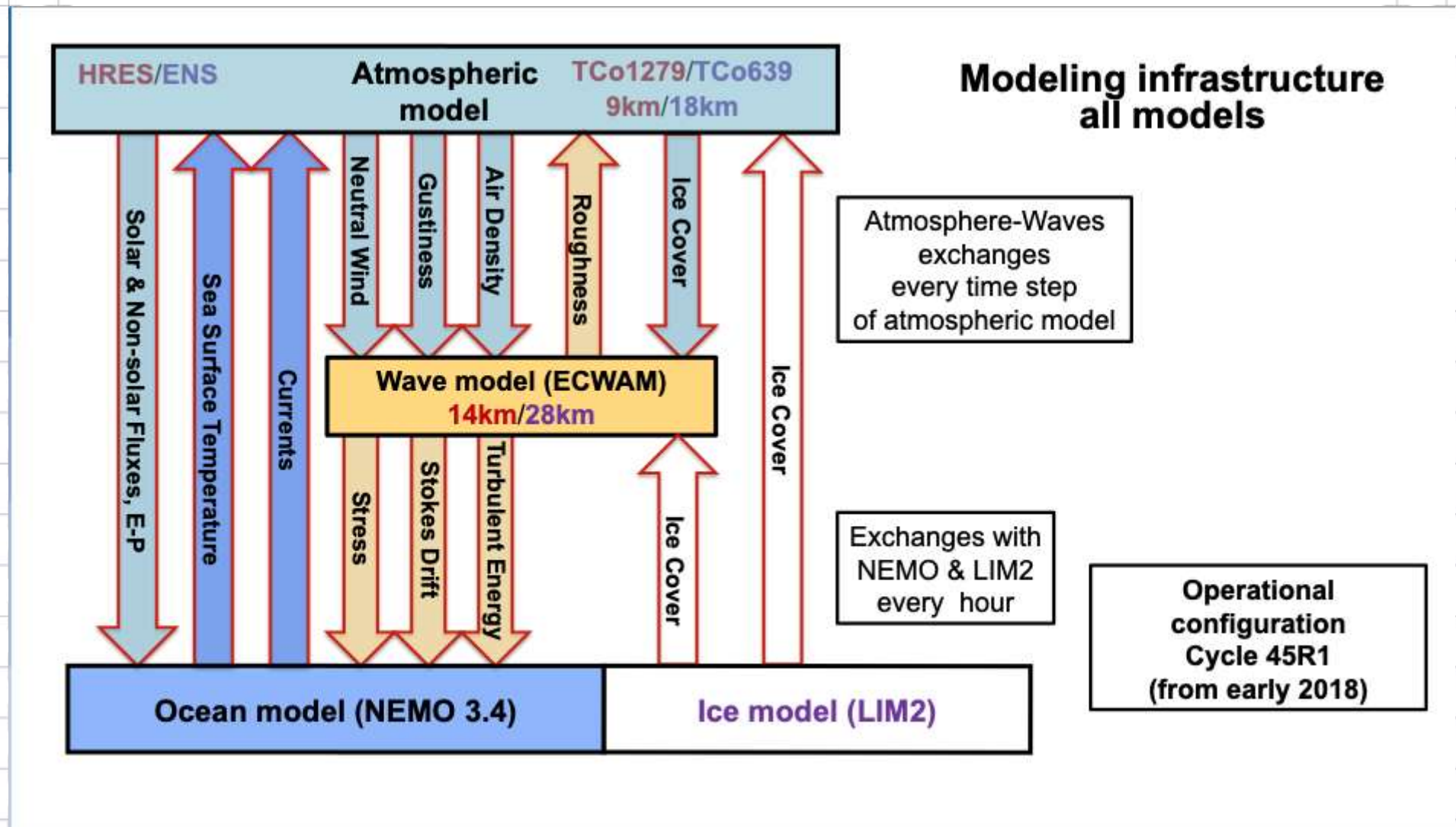
## ENS-WAM Extended

- 55 km espaciado de grid.
- 36 → 25 frecuencias
- 36 → 12 direcciones.
- Acoplado al modelo TL1279 → TL319 y al modelo de océano NEMO y de hielos LIM2
- (50+1) predicciones desde las 0 y 12Z (mensualmente dos veces a la semana y estacionalmente una vez al mes)

## Aumento de la complejidad del modelo hacia un Sistema Tierra



## Aumento de la complejidad del modelo hacia un Sistema Tierra



|            | Component        | Horizontal resolution |               | Vertical resolution [levels] |
|------------|------------------|-----------------------|---------------|------------------------------|
| Atmosphere | HRES             | 01280                 | ~9 km         | 137                          |
|            | ENS              | <b>01280</b>          | <b>~9 km</b>  | 137                          |
|            | ENS extended     | 0320                  | ~36 km        | 137                          |
| Wave       | HRES-WAM         | 0.125°                | ~14 km        | -                            |
|            | ENS-WAM          | <b>0.125°</b>         | <b>~14 km</b> | -                            |
|            | ENS-WAM extended | 0.5°                  | ~55 km        | -                            |
| Ocean      | NEMO 3.4         | 0.25°                 | ~28 km        | 75                           |

## MODELO AEWAM

### Configuración:

- Modelo: **ECWAM CY45R2**
- Dos ciclos diarios a 00 y 12 UTC
- Alcance: H+72
- Resolución espacial:  $1/24^\circ$  (~4.6 Km).
- Disponibilidad de productos:
  - Tri-horarios
  - ciclo de D/00 UTC a las ~21:30 del día D-1
  - ciclo de D/12 UTC a las ~09:30 del día D
- Condiciones iniciales: predicción del ciclo previo, 'actualizada' con 12 horas de viento/condiciones de contorno nuevos.
- Forzamiento: predicciones de viento del ciclo previo del ECMWF  $1/8^\circ$
- Condiciones de contorno:
  - Horarias, ECWAM  $1/8^\circ$  (~13.8 Km)
  - Del ciclo ECWAM previo: el ciclo AEWAM/D/[H+0...H+72] se obtiene a partir del ciclo ECWAM/D-12/[H+12...H+84]

# MODELO AEWAM

## Áreas

Cantábrico  
 Galicia  
 Altair / Azores  
 Charcot / Josephine  
 Porto / San Vicente / Casablanca  
 Madeira / Agadir / Tarfaya  
 Canarias  
 Cap Blanc / Cap Timiris  
 Sierra Leona / Golfo de Guinea I  
 Golfo de Guinea II  
 Golfo de Guinea III  
 Mediterráneo occidental  
 Mediterráneo oriental  
 Estrecho / Alborán

## Productos

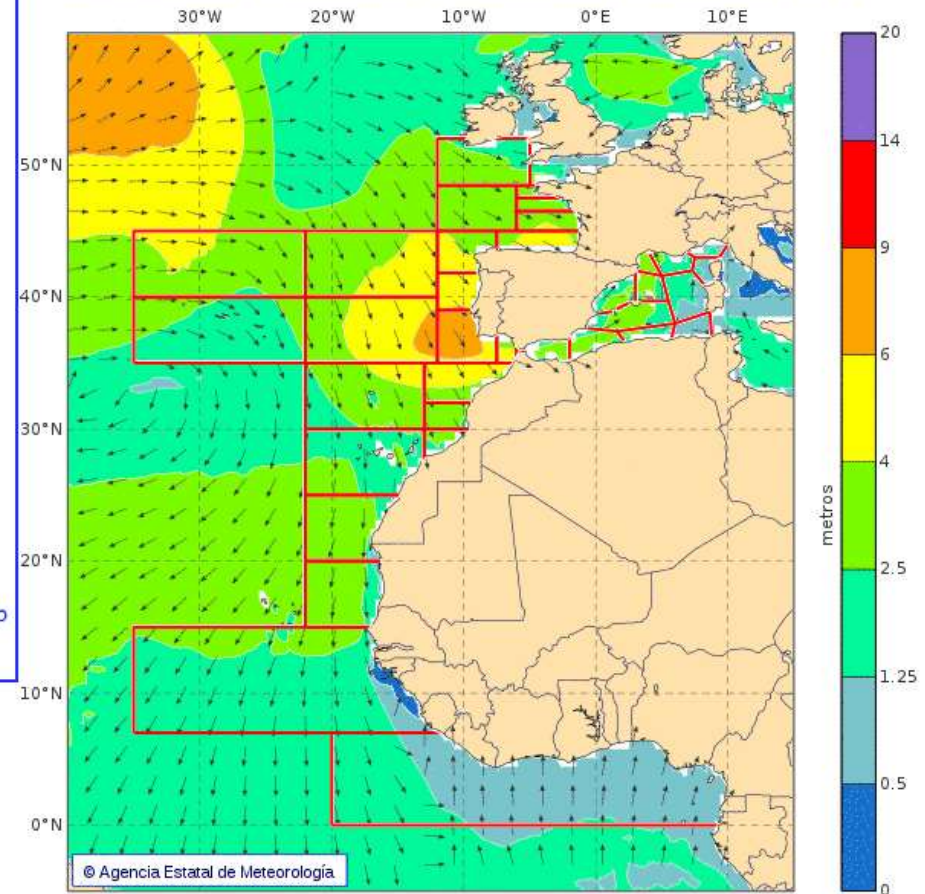
**Mar combinado:**  
 Hs y dirección media  
 Hs y partición fondo / viento  
 Hs y partición 3 fondo / viento  
 Periodo medio Tm-10  
 Periodo medio Tm01  
 Periodo medio Tm02  
 Periodo de pico espectral  
 Velocidad de deriva de Stokes  
 Altura máxima en 3 horas (freak)  
 Anchura direccional  
 Pendiente

**Mar de viento:**  
 Hs y dirección media mar viento

**Mar de fondo:**  
 Hs y dir media mar fondo total  
 Hs y dir medi mar de fondo primario  
 Hs y dir media mar de fondo secundario  
 Hs y dir media mar de fondo terciario

MAR TOTAL: Altura significativa del oleaje (color) | Dirección media del oleaje (vectores)

Elaborado: 2018-04-09 00:00:00 | Previsto: 2018-04-11 06:00:00 (H+54)



# Sistema de predicción de oleaje de aguas profundas: modelo AEWAM (AEmet WAVE Model)

<http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/maritima>

Predicciones de oleaje - AEWAM CY46R1 - 4 Km - v1.1 Junio 2021 - CIRRUS - NOTA: La versión CY45R2 dejará de actualizarse el 08/07/21

| ? Noviembre, 2021 |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <<                | <   | Hoy | >   | >>  |     |     |
| Lun               | Mar | Mie | Jue | Vie | Sab | Dom |
| 1                 | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
| 8                 | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |
| 15                | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  |
| 22                | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  |
| 29                | 30  |     |     |     |     |     |

Seleccione fecha

Última actualización:  
04-11-2021 00:41 UTC

Pasada:

00:00 UTC

Área:

Sinóptica

Prod:

Hs y dir media del mar

Sobre los forzamientos

Sobre el viento

Hitos (0)

Iniciar

-

+

<

>

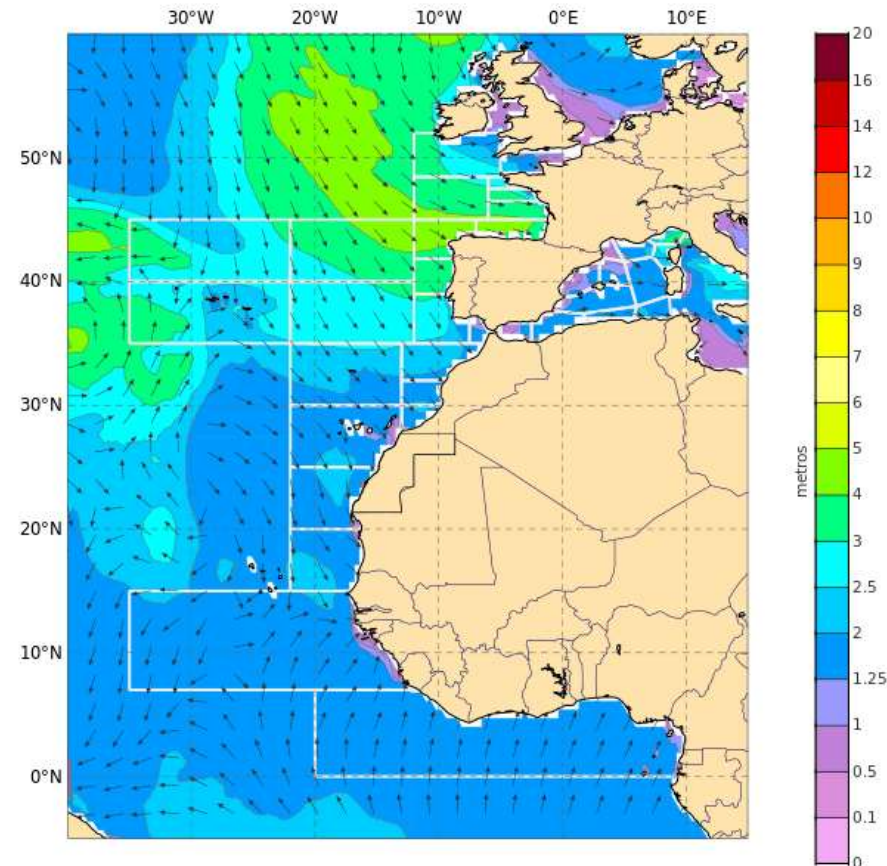
Captura

Campo N° 5

## Altura significativa (color) y dirección media (vectores) del mar combinado

Elaborado el martes 02-11-2021 00:00 | Previsto para el martes 02-11-2021 12:00 (H+12)

Versión: CY46R1 | Áreas de predicción (blanco)





## MODELO SWAN

### Configuración:

- Modelo: **SWAN versión 41.31**
- Dos ciclos diarios a 00 y 12 UTC
- Alcance: H+72
- Resolución espacial: 1 km
- Disponibilidad de productos: Horarios
  
- Condiciones iniciales: predicción del ciclo previo, 'actualizada' con 12, 9,6 y 3 horas de viento
  
- Condiciones de contorno procedentes del AEWAM
  
- Forzamiento: predicciones de viento del ciclo previo del HARMONIE

# Sistema de predicción de oleaje de aguas costeras: sistema AESPOL

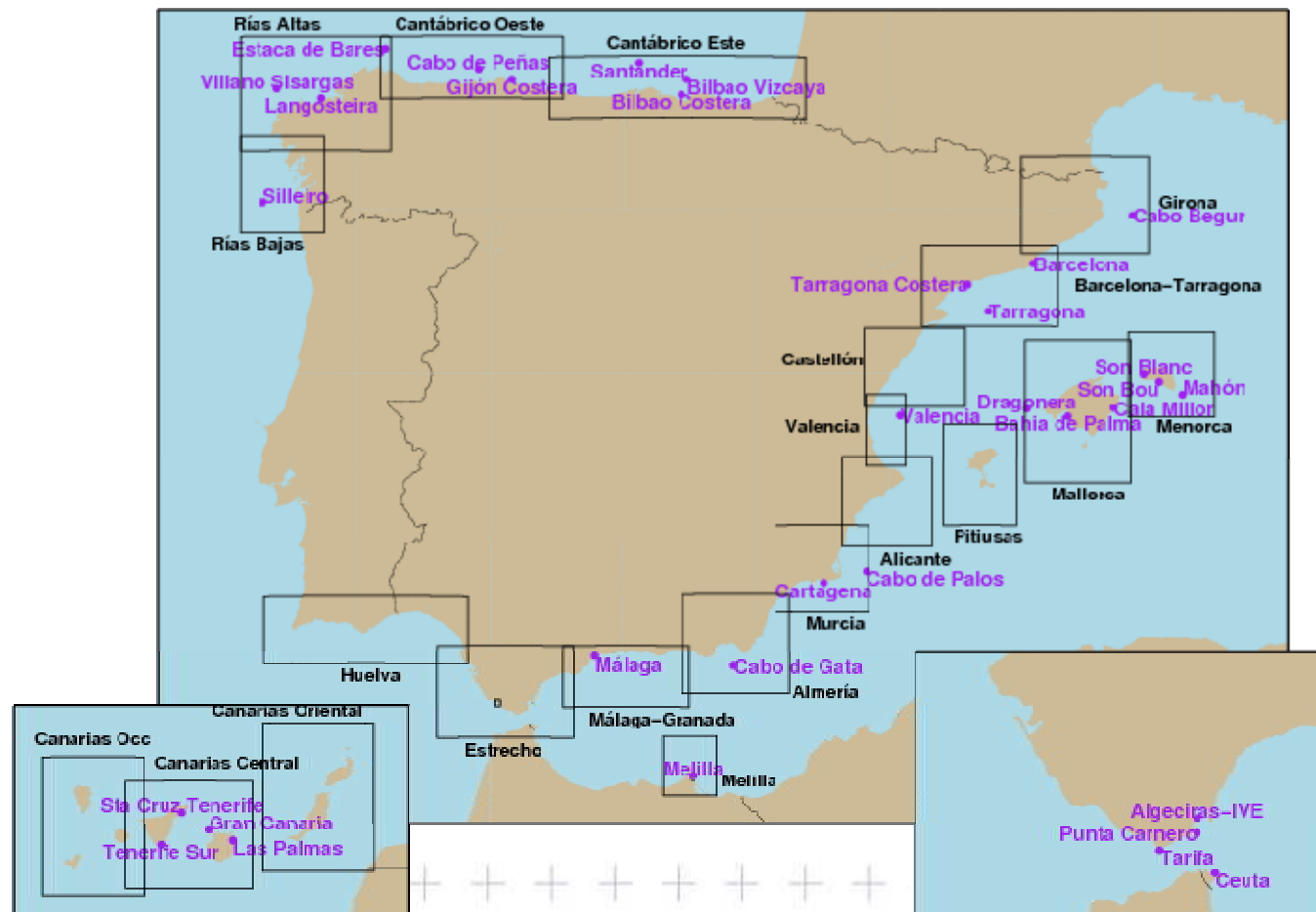


VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



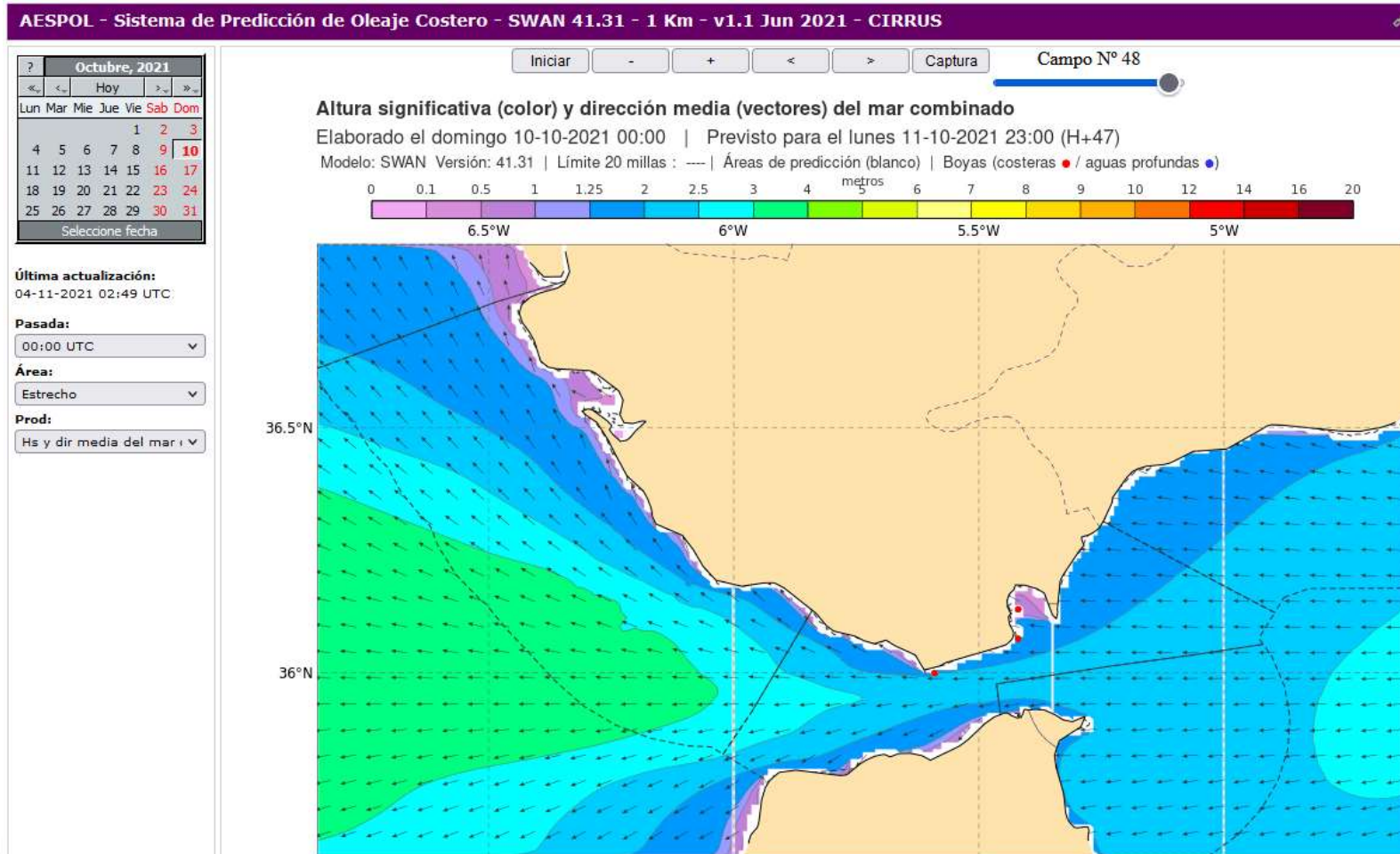
<http://oceano.aemet.es/~pn16/SWAN/>

Consta de 21 módulos del modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore)



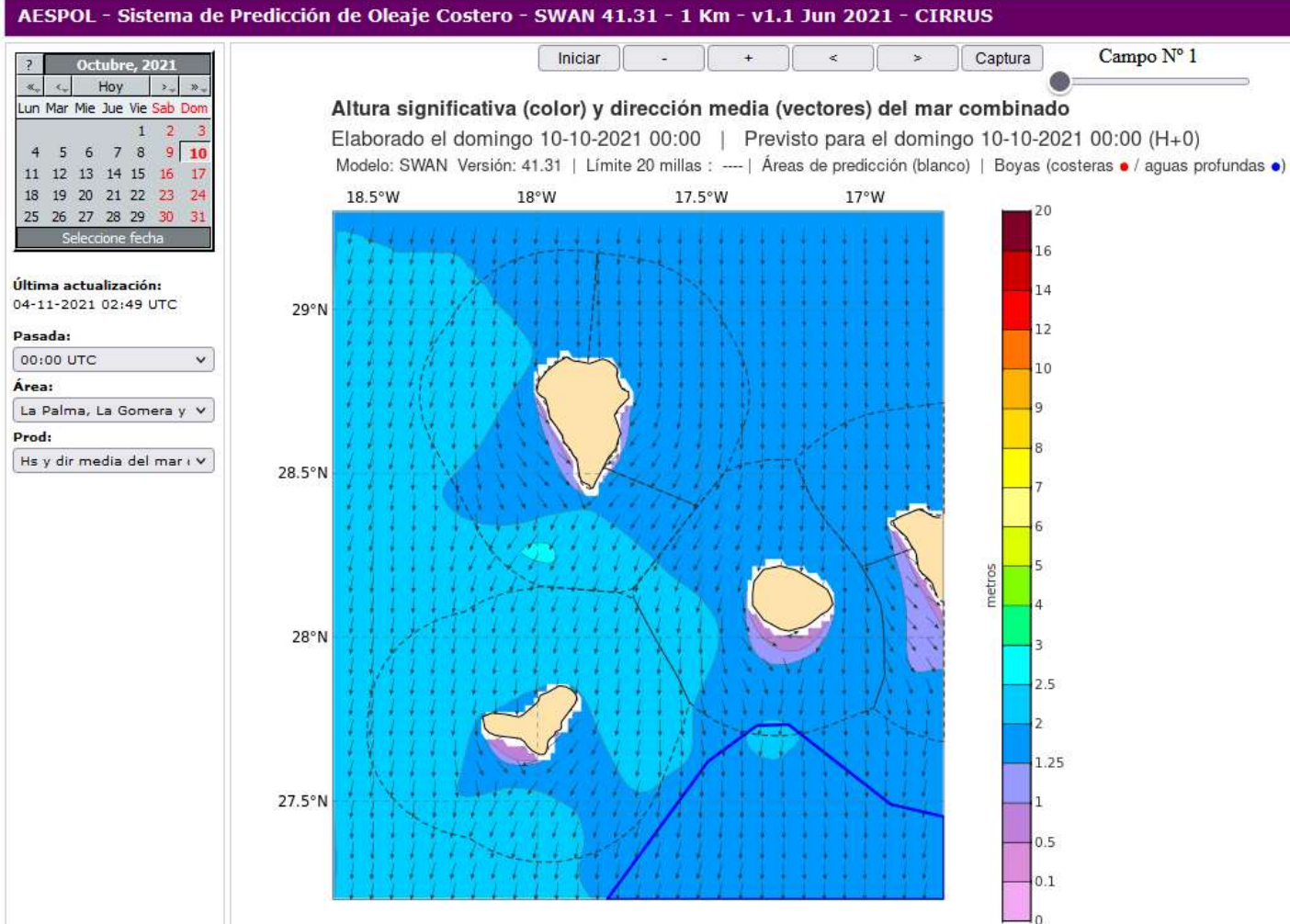
# Sistema de predicción de oleaje de aguas costeras: sistema AESPOL

## Ejemplo: el Estrecho de Gibraltar



# Sistema de predicción de oleaje de aguas costeras: sistema AESPOL

## Ejemplo: Islas Canarias



# Modelos más usados en sistemas operacionales

- Versión actual: WAM v4.5.5 (2015)
- Descarga libre: <https://github.com/mywave/WAM>
- Versión actual: WAVEWATCH III V5.1.6 (2016)
- Descarga libre previa solicitud:  
<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/license.shtml>
- Versión actual: SWAN v41.20 (2017)
- Descarga libre:  
<http://swanmodel.sourceforge.net/download/download.htm>
- Todos son modelos espectrales de tercera generación:
- No se hacen asunciones sobre la forma del espectro
- Resuelven explícitamente interacción no lineal con un término fuente
- Refracción y disipación con el fondo en aguas somera

# Productos del modelo de olas

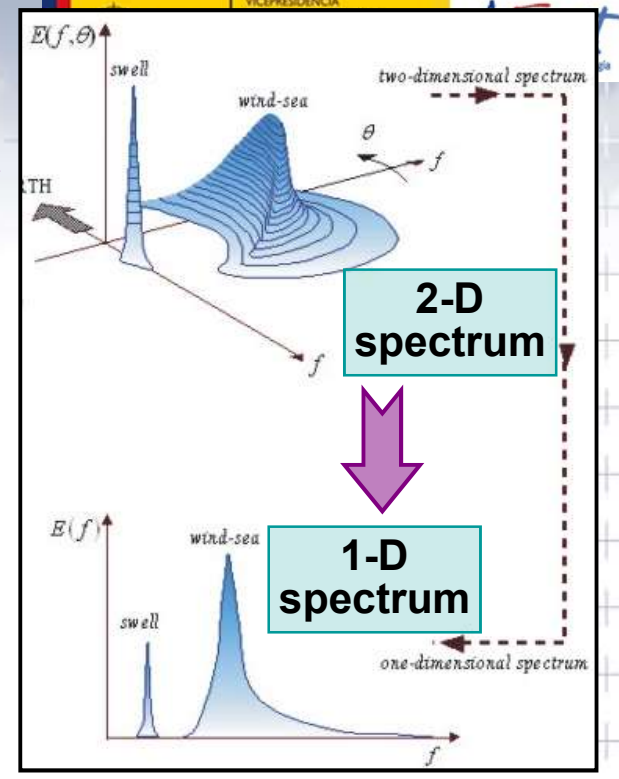
El espectro 2-D nos da una descripción completa del estado de la mar, sin embargo, se trata de una gran cantidad de datos (p. ej., 36x36 valores en cada punto de rejilla en el modelo global). Es necesario reducirlo a cantidades integradas:

- Espectro 1-D que se obtiene integrando el espectro 2-D alrededor de todas las direcciones.

Cuando se necesitan números simples, se reduce a cantidades escalares:

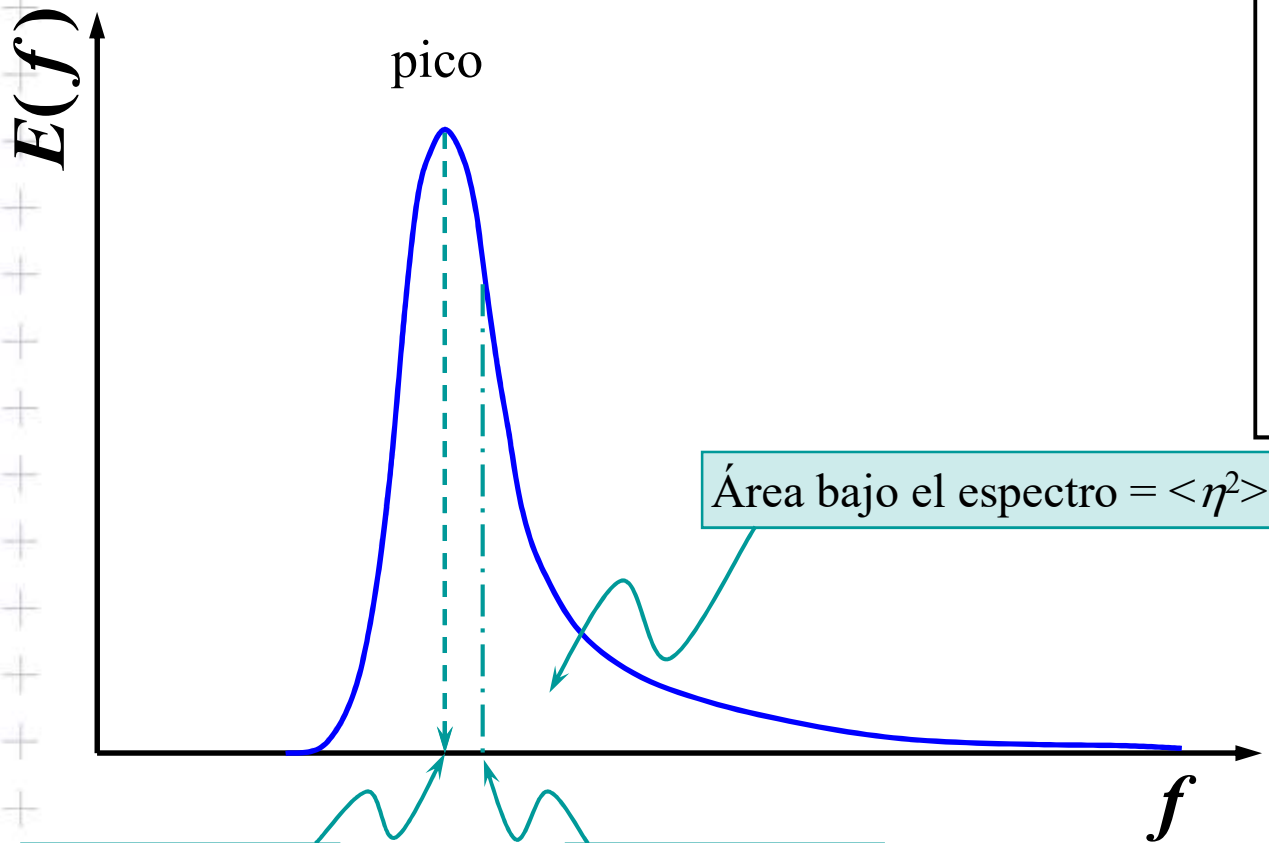
- Altura significativa del oleaje ( $H_s$ ).
- El periodo pico (periodo del pico del espectro 1-D).
- Periodos medios obtenidos de la integración con pesos del espectro 2-D.
- Dirección media integrada.

# Modelo de olas



2-D spectrum

1-D spectrum



$f_p$   
(frecuencia pico)

$\langle f \rangle$   
(frecuencia media)

Área bajo el espectro =  $\langle \eta^2 \rangle$

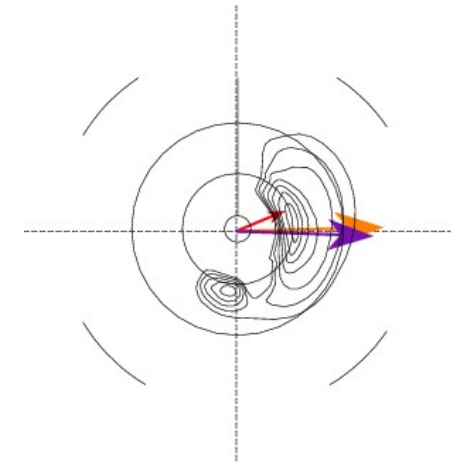
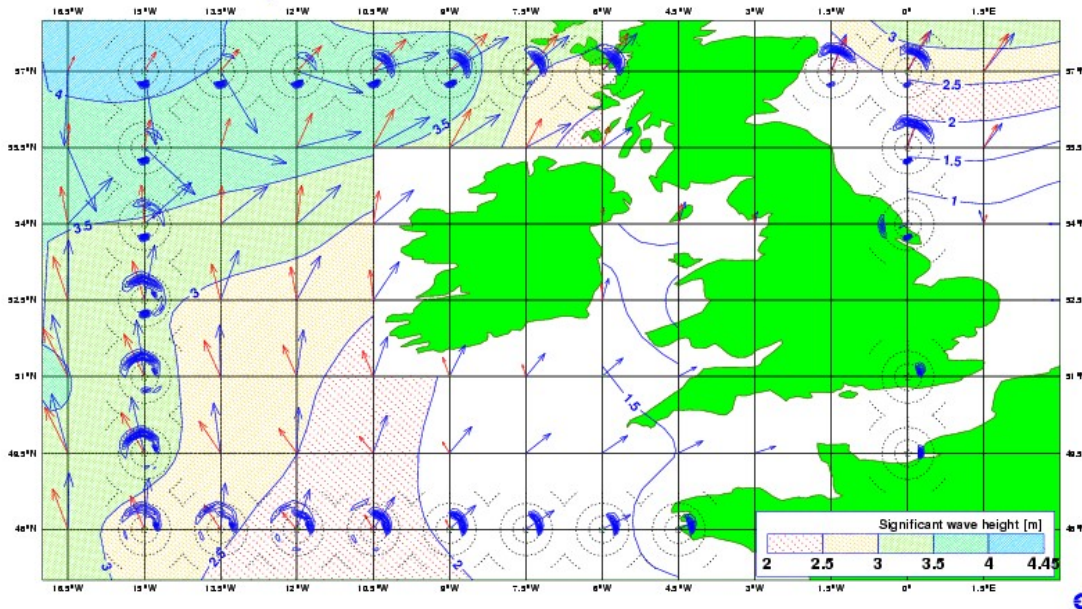
$$H_s = 4\sqrt{\langle \eta^2 \rangle}$$

$$T = 1 / f$$

# Productos del modelo de olas

Los espectros 2-D se utilizan para suministrar las condiciones de contorno al modelo de olas de área limitada.

Sunday 4 March 2001 12UTC ECMWF Forecast t+24 VT: Monday 5 March 2001 12UTC  
Surface: 2-d wave spectrum EXP: 0001

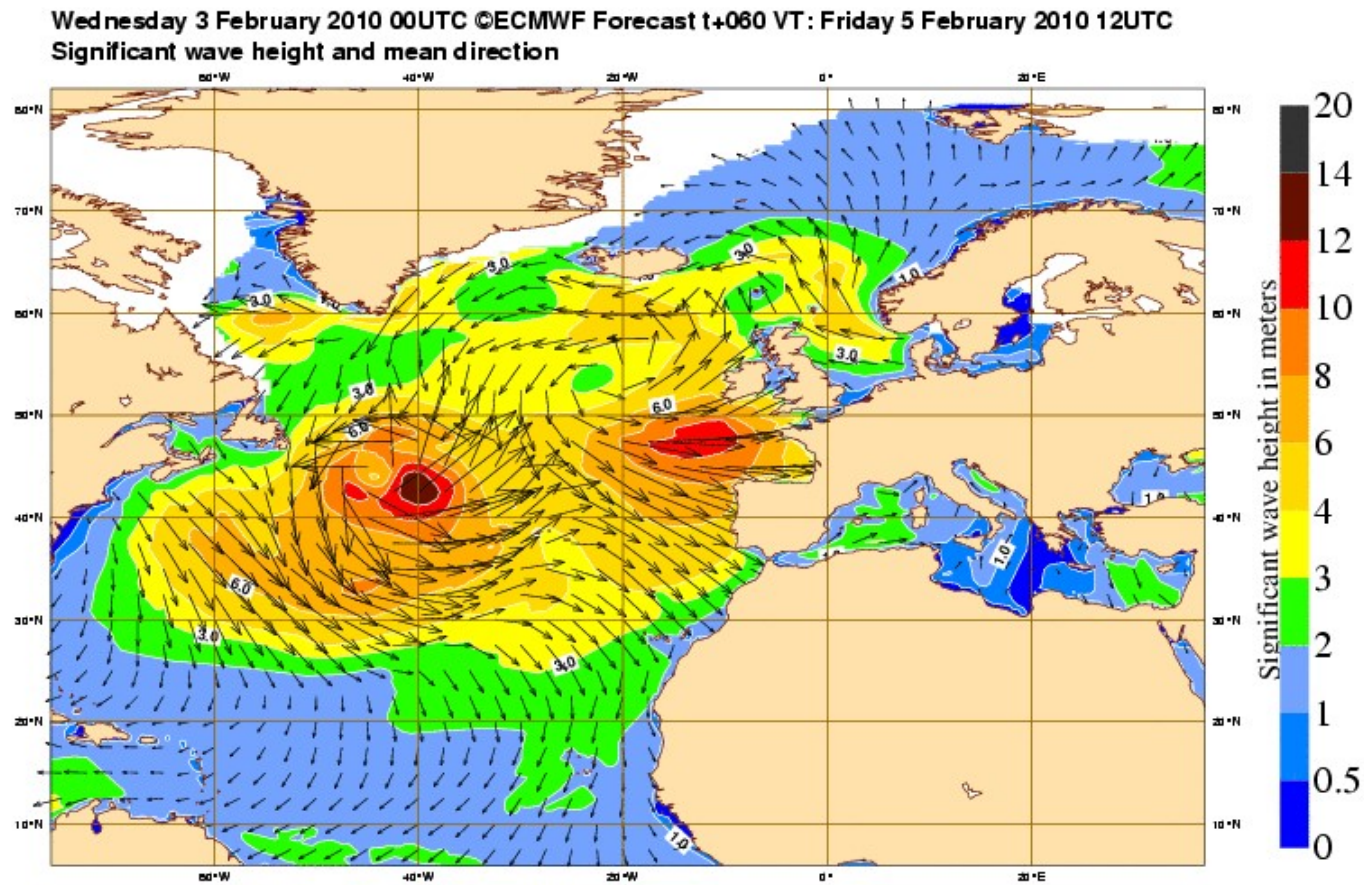


- mar de viento →
- Mar de fondo →
- Total →



Productos del modelo de olas disponibles en la web del ECMWF  
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>

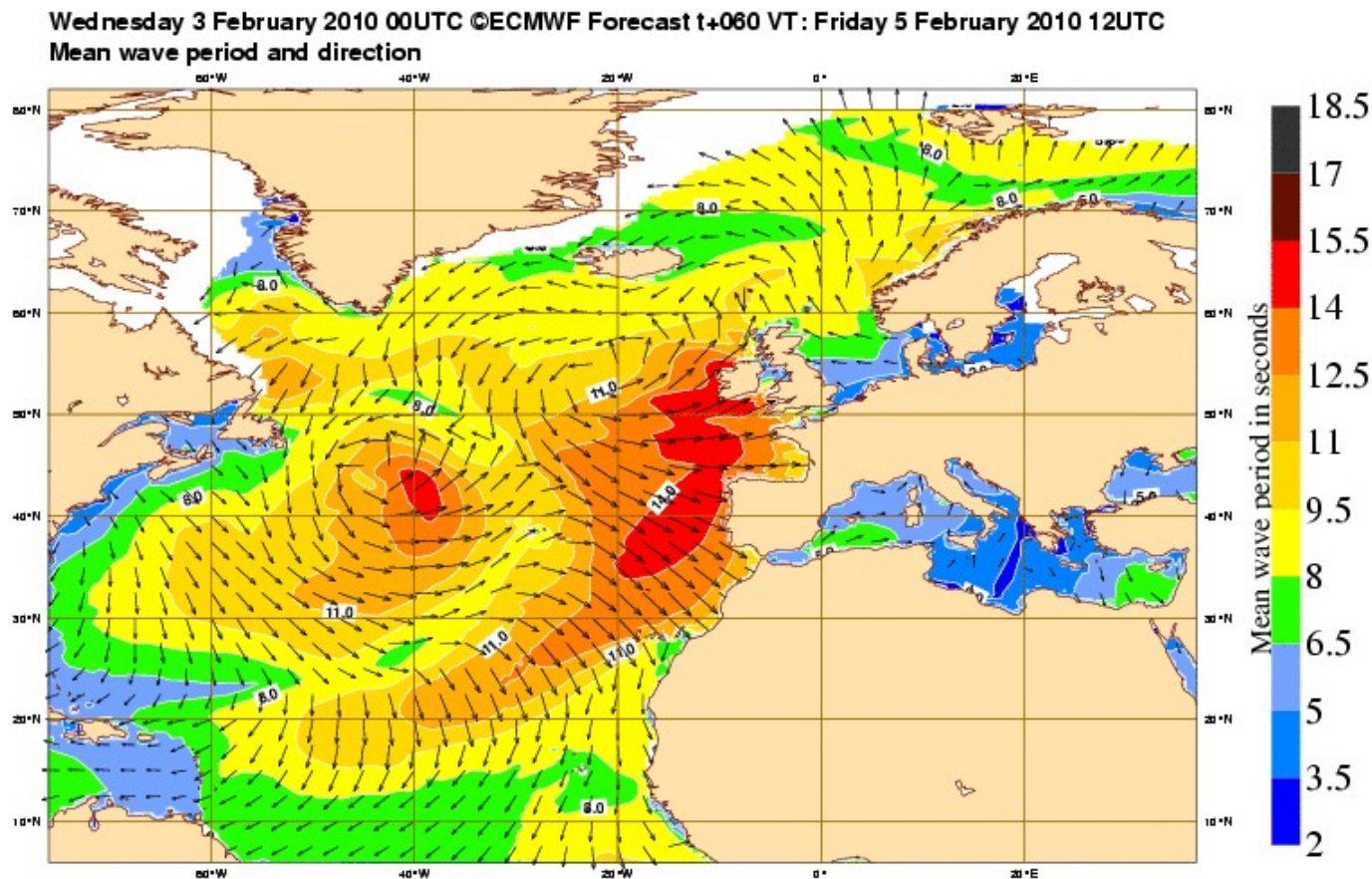
## Altura significativa del oleaje y dirección de propagación media



# Productos del modelo de olas disponibles en la web del ECMWF

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>

## Periodo y dirección medios del oleaje

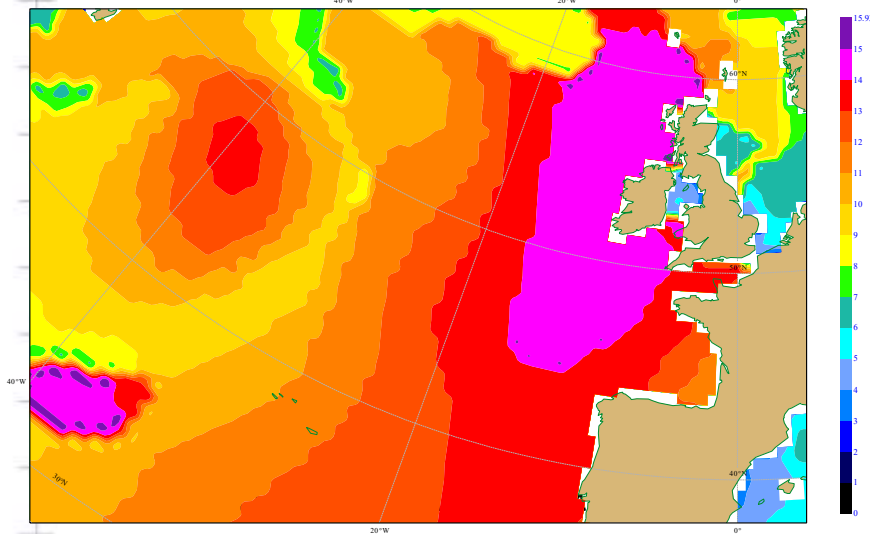


# Productos del modelo de olas disponibles en la web del ECMWF

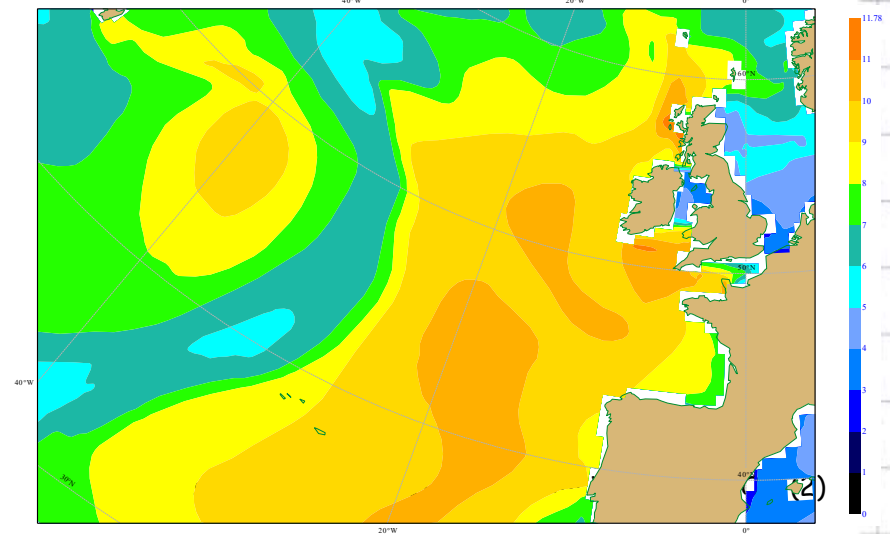
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>

Periodos del oleaje: en el pico del espectro o en la media

ECMWF Analysis VT:Saturday 7 April 2001 12UTC Surface: peak period 1d spectra



ECMWF Analysis VT:Saturday 7 April 2001 12UTC Surface: mean wave period (m2)

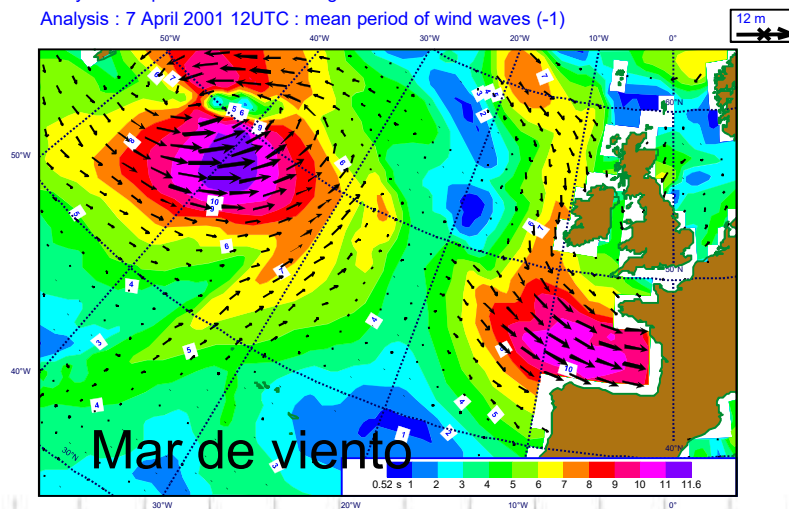


# Productos del modelo de olas

Se utiliza un esquema para dividir los campos globales de olas en campos de olas que se generan por la influencia directa del forzamiento del viento, unas son las olas generadas por el viento local, lo que se llama **"mar de viento"**, y otras son las olas que se generaron en otras áreas tiempo atrás y que se han propagado hasta alcanzar la zona que estamos observando, y se denomina **"mar de fondo"**. Se calcula también el periodo y la dirección media de estos campos.

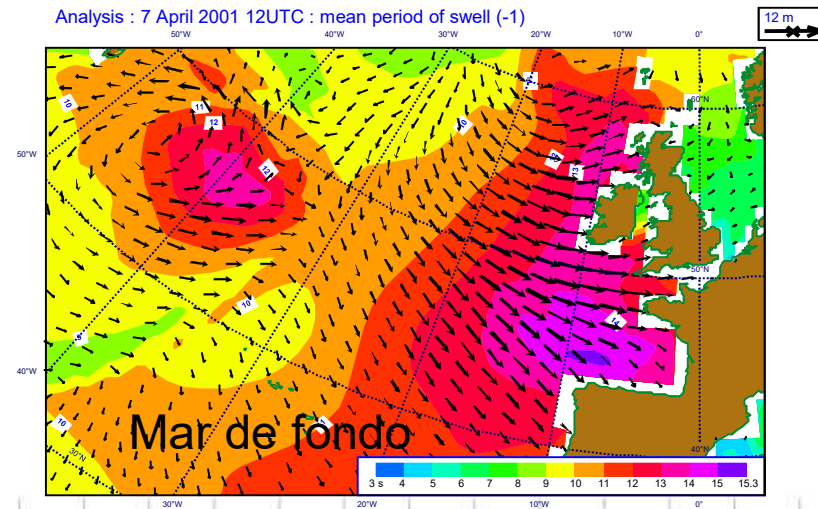
Analysis : 7 April 2001 12UTC : height and direction of wind waves

Analysis : 7 April 2001 12UTC : mean period of wind waves (-1)



Analysis : 7 April 2001 12UTC : height and direction of swell

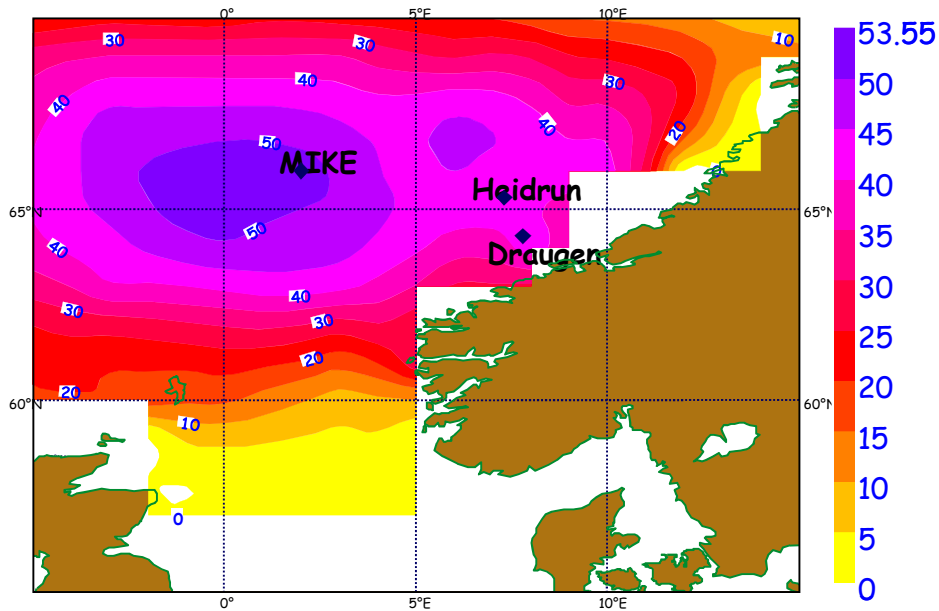
Analysis : 7 April 2001 12UTC : mean period of swell (-1)



# Productos del modelo de olas

Desde las predicciones de oleaje del ENS, es posible obtener probabilidades de ciertas condiciones del oleaje.

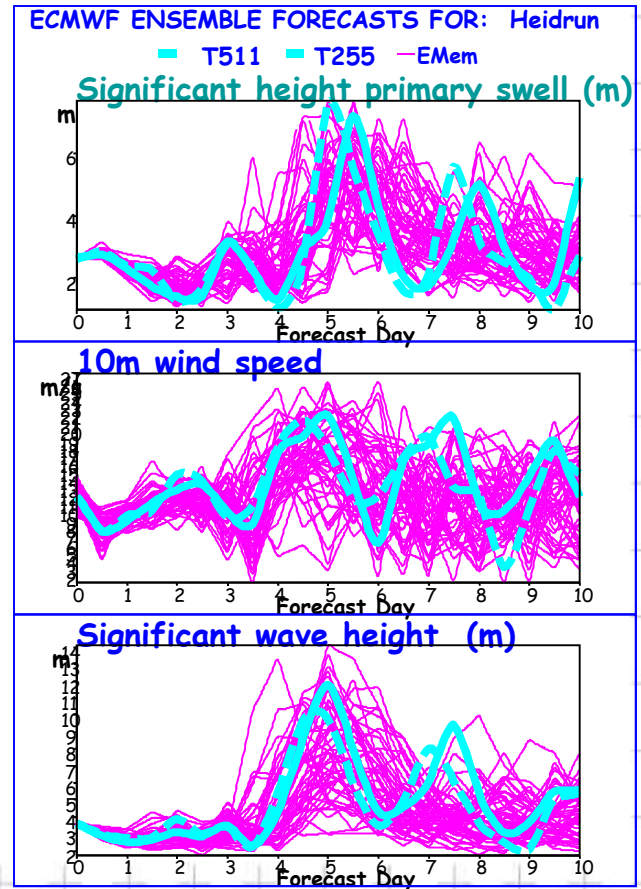
DATE: 20011106 LF3N LAT: 65.3 LONG: 7.3



06 November 2001 12 UTC ECMWF ENS probability forecast +120

ALTURA SIGNIFICATIVA DEL OLEAJE MAYOR QUE 8 m

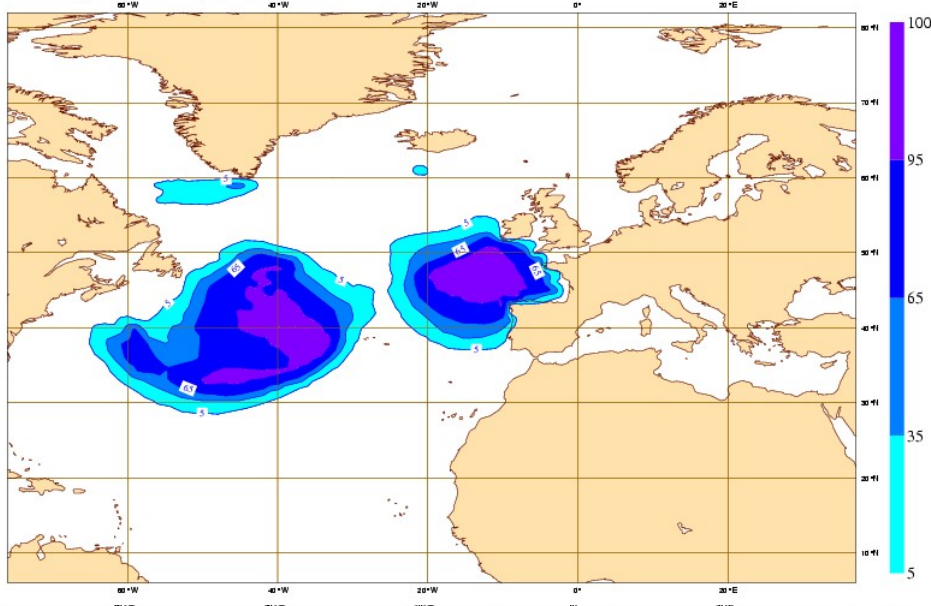
ECMWF Newsletter 95 - Otoño 2002



Productos del modelo de olas disponibles en la web del ECMWF  
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>

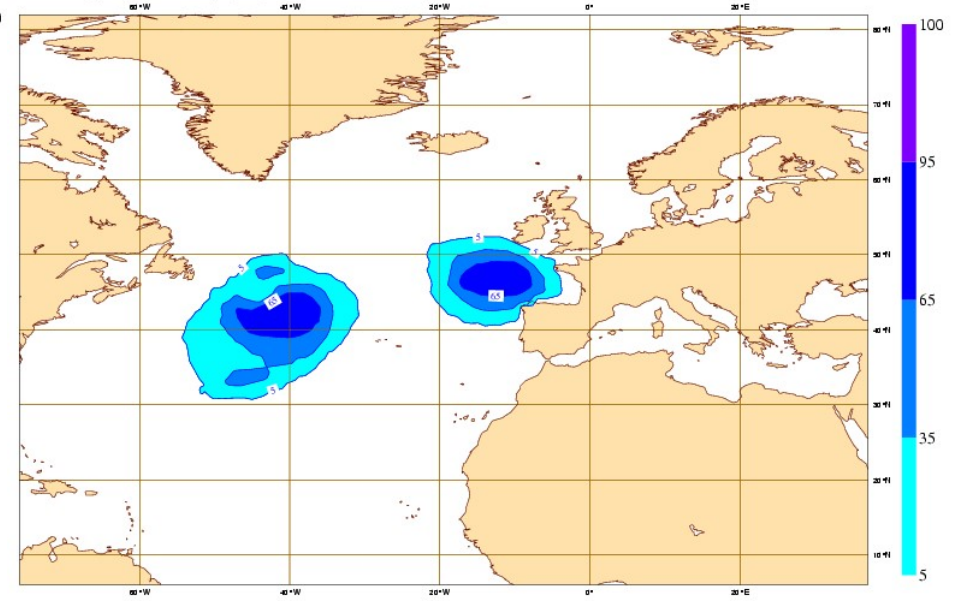
## Probabilidades bajo ciertas condiciones:

Wednesday 3 February 2010 00UTC ©ECMWF Forecast probability t+060 VT: Friday 5 February 2010 12UTC  
Surface: Significant wave height of at least 6 m



$H_s > 6m$

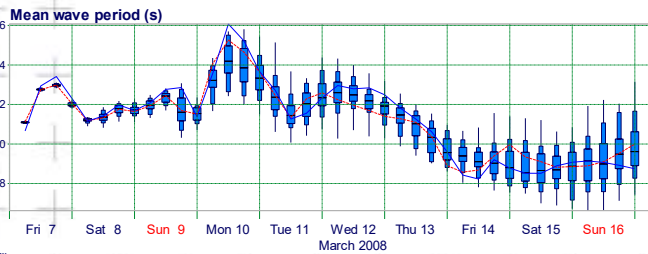
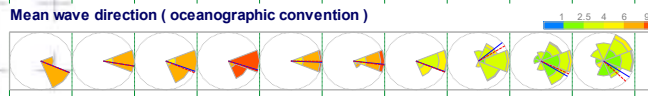
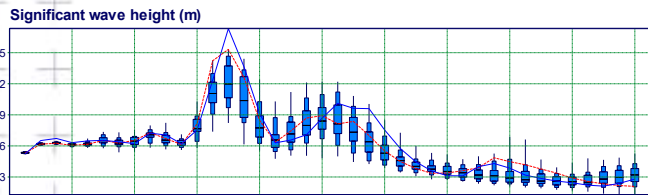
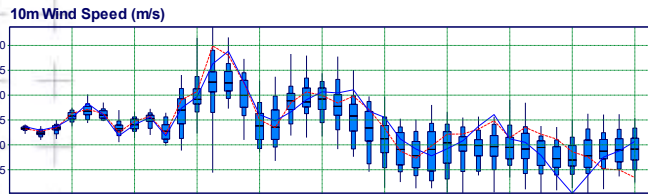
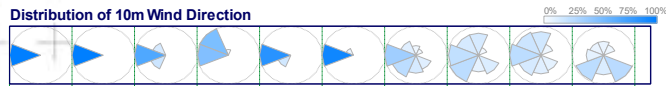
Wednesday 3 February 2010 00UTC ©ECMWF Forecast probability t+060 VT: Friday 5 February 2010 12UTC  
Surface: Significant wave height of at least 8 m



$H_s > 8m$

# Productos del Modelo de Olas: ENS WaveEPSgram

Wave Epsgram  
51.46° N 12° W (EPS sea point)  
Deterministic Forecast and EPS Distribution Friday 7 March 2008 00 UTC



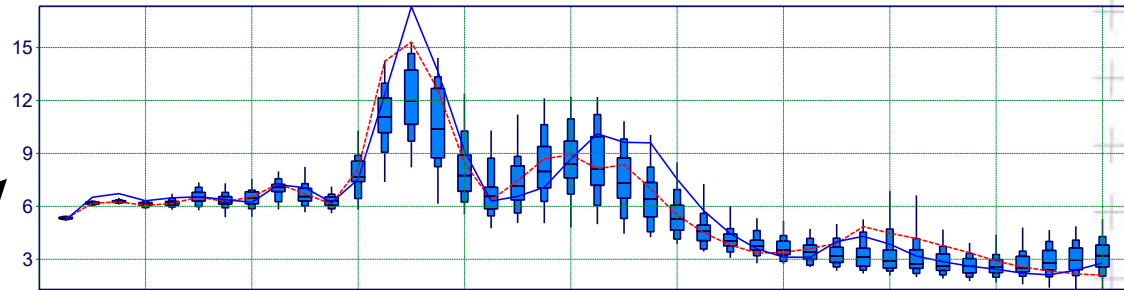
max  
90%  
75%  
median  
25%  
10%  
min

1° CTRL 0.36° OPS

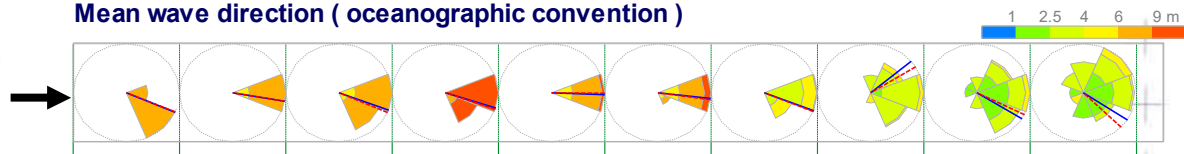
ECMWF

Como cualquier EPSgrama pero para velocidad y dirección del viento y altura significativa, dirección media y periodo medio del oleaje.

Significant wave height (m)



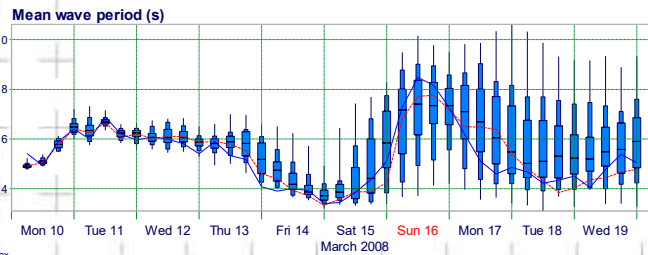
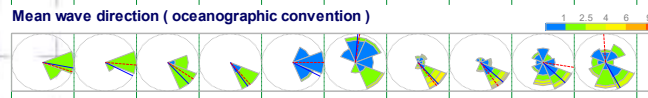
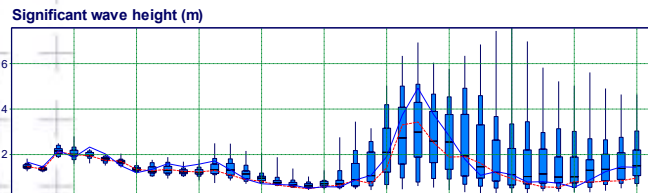
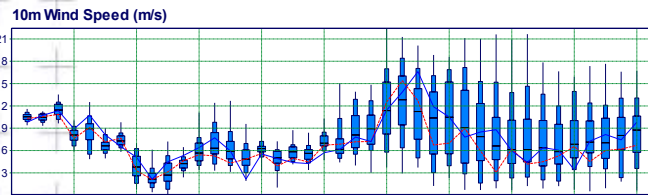
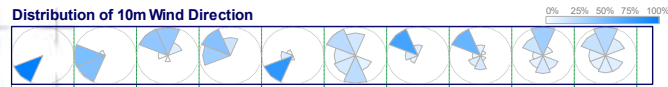
Mean wave direction (oceanographic convention)



Cada octante se colorea basándose en la distribución de la altura significativa del oleaje asociado con su dirección media. Las áreas coloreadas corresponden al número de miembros del ensemble con altura de olas en el rango especificado por la regla de colores.

# Productos del Modelo de Olas: ENS WaveEPSgram

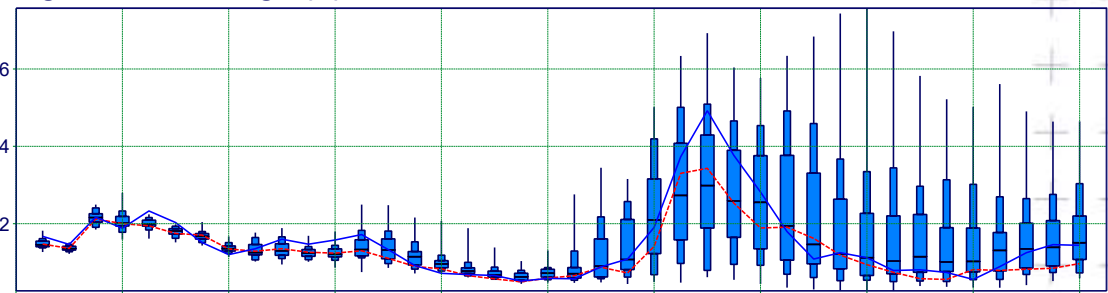
Wave Epsgram  
41.12° N 5.06° E (EPS sea point)  
Deterministic Forecast and EPS Distribution Monday 10 March 2008 00 UTC



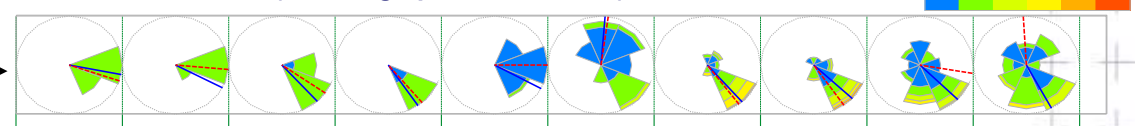
max  
90%  
75%  
median  
25%  
10%  
min  
MOS-PS+ 2.5.1

1° CTRL    0.36° OPS

## Significant wave height (m)

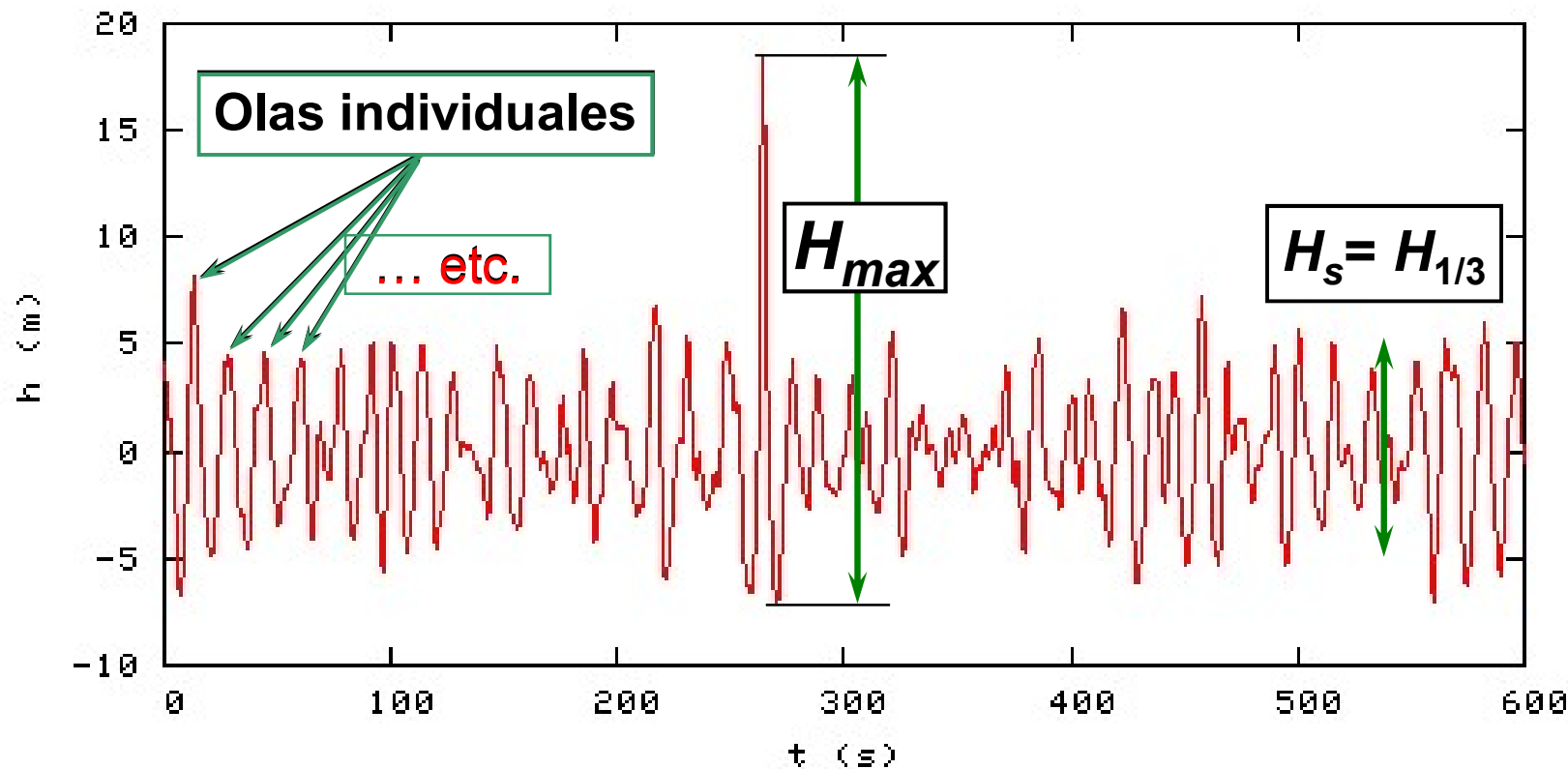


## Mean wave direction (oceanographic convention)





Olas individuales,  
Altura Significativa del oleaje,  $H_s$ ,  
Altura Máxima Individual del oleaje,  $H_{max}$ , y  
Freak Wave



Si  $H_{max} > 2.2H_s \rightarrow$  suceso de “freak wave”

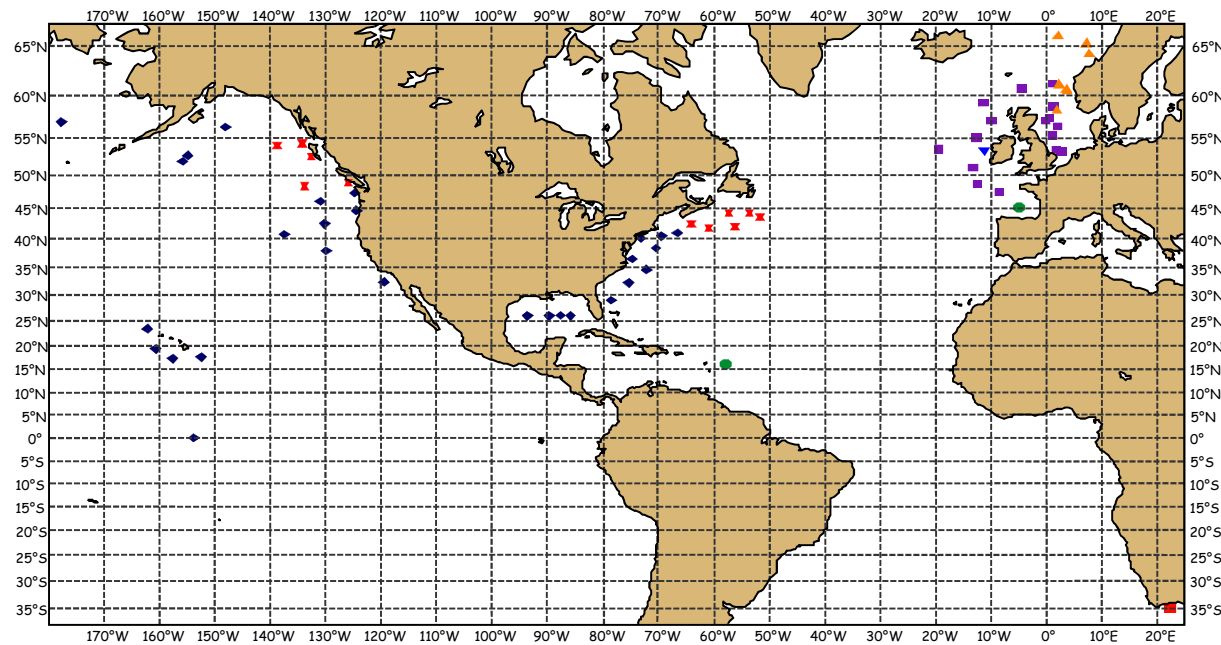
# Verificación: ¿ Frente a qué comparamos ?

- Datos in-situ (de boyas y plataformas)
- Datos de satélite (altímetros, SAR)
- Análisis de los modelos numéricos
- Comparación con otros centros

# Verificación

Altura y periodo del oleaje y espectros 1-D or 2-D, en algunas ocasiones, se pueden verificar frente a medidas de boyas.

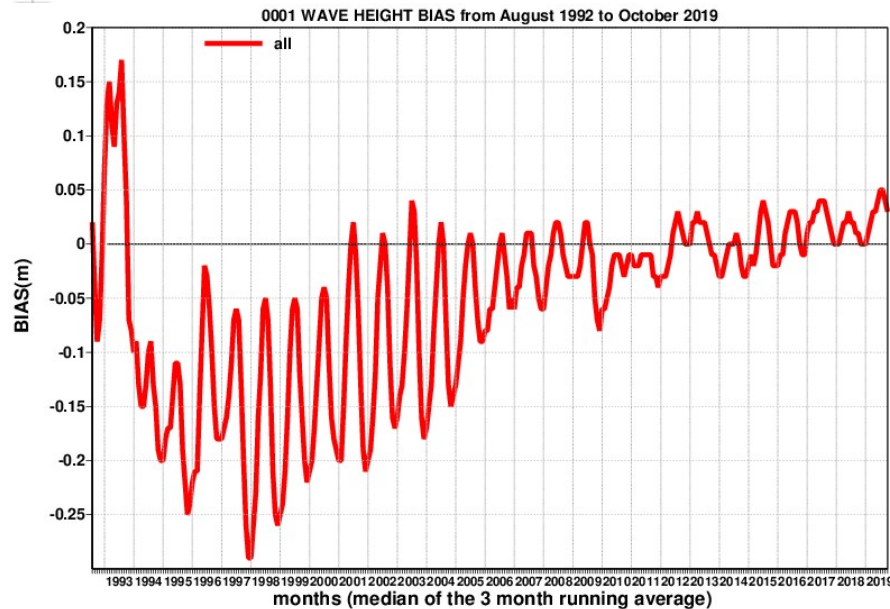
♦ NODC ▪ MEDS ▪ Met Office • MeteoFrance • Met Eireann ▲ DNMI ▪ SAWS



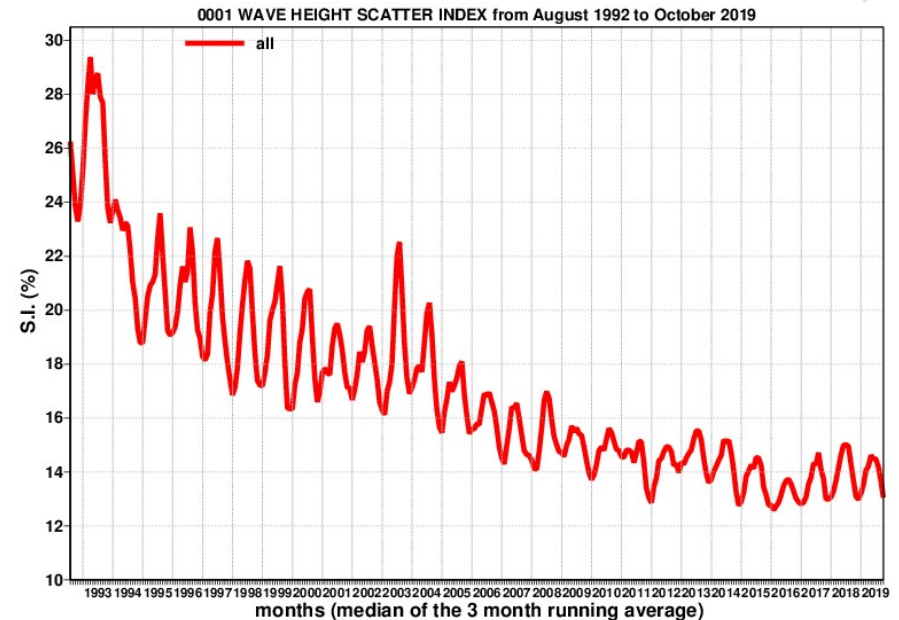
Medidas de oleaje y viento procedentes de boyas y plataformas, tal como son utilizadas por la verificación del ENS.

# Verificación

Altura del oleaje analizada frente a medidas de boyas desde Agosto de 1992.



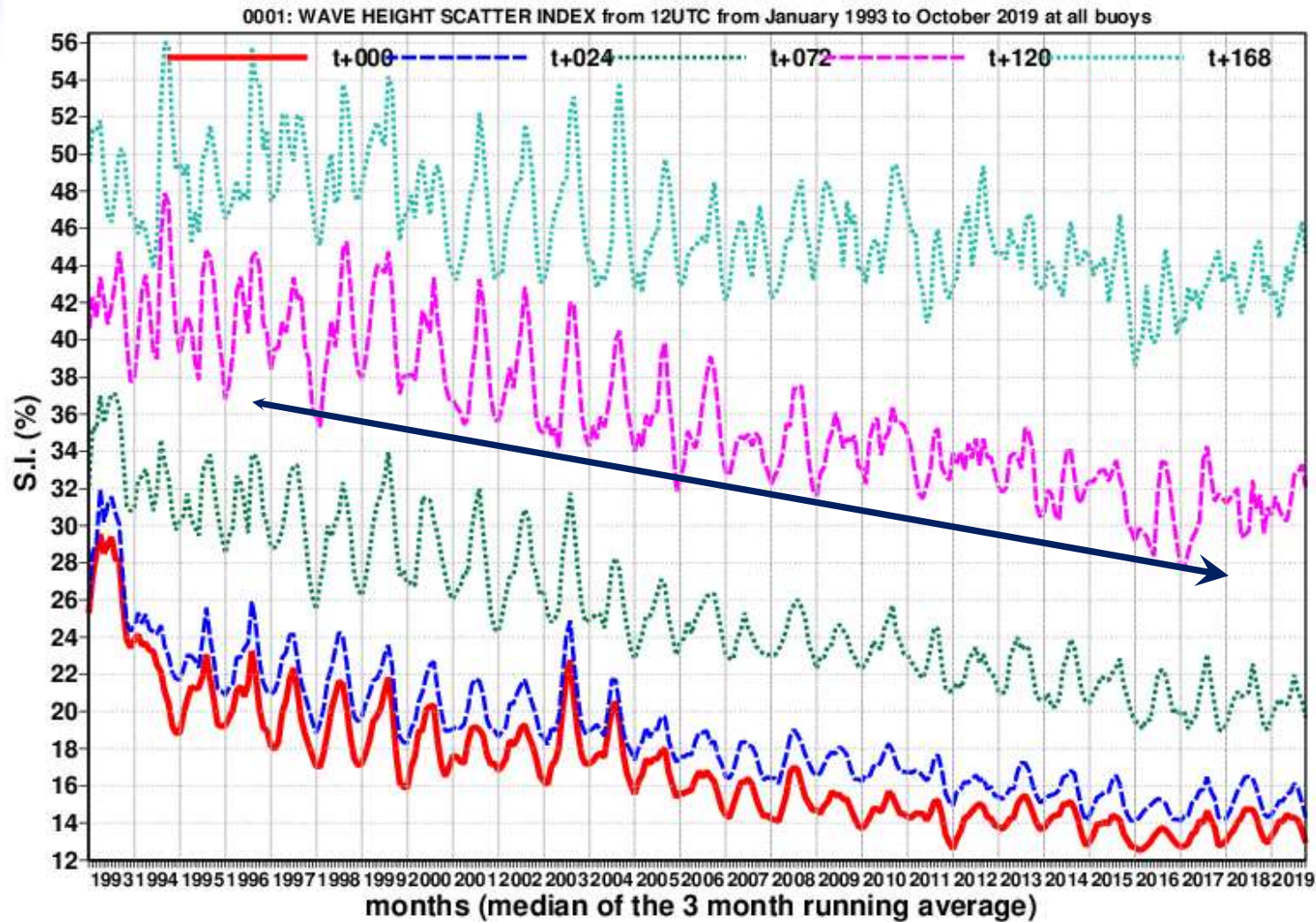
Sesgo=Modelo-observaciones



Desviación estándar de la diferencia normalizada por la media de las observaciones

# Verificación

Altura del oleaje prevista frente a medidas de boyas



7 day FC

5 day FC

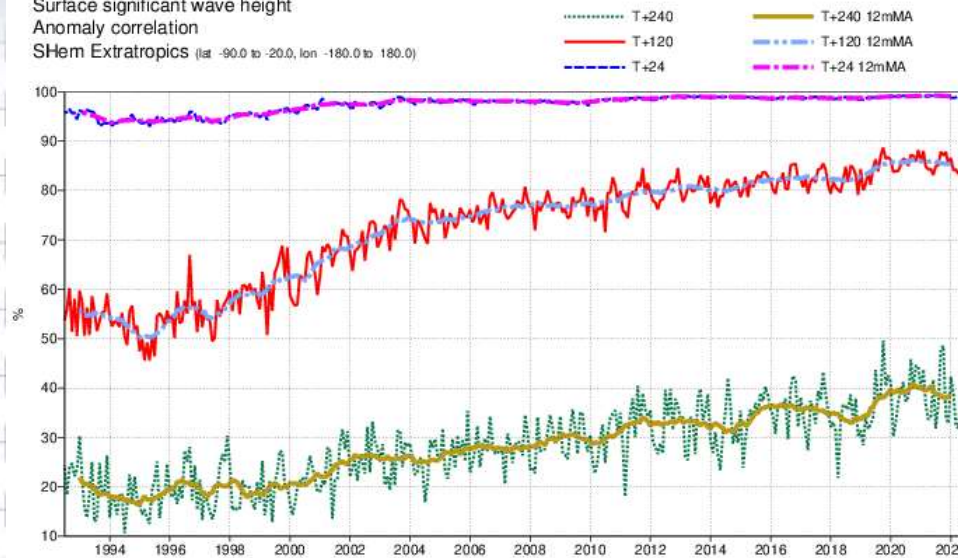
3 day FC

1 day FC

AN

# Verificación

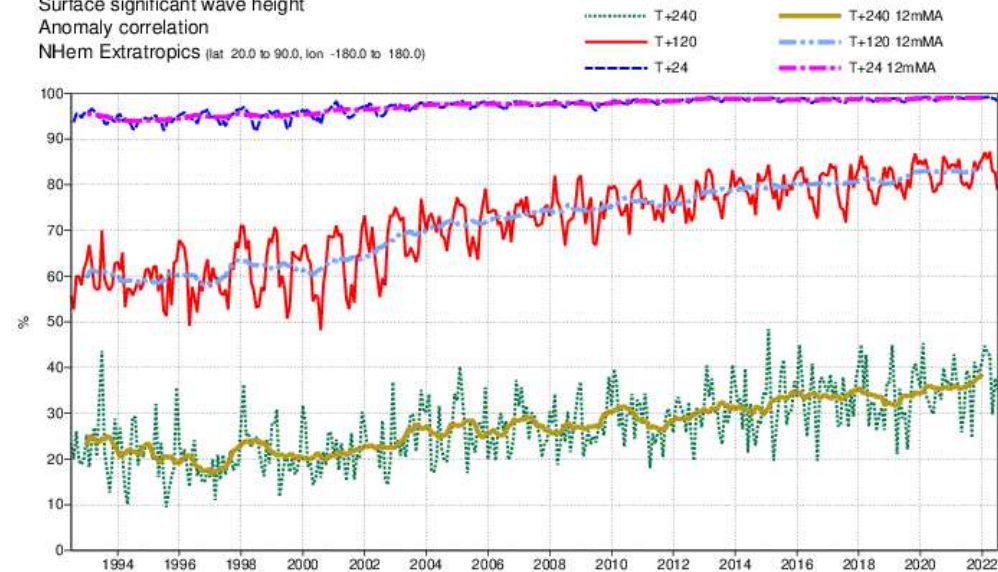
ECMWF 12UTC ocean waves  
Surface significant wave height  
Anomaly correlation  
SHem Extratropics (lat -90.0 to -20.0, lon -180.0 to 180.0)



Correlación de Anomalías Hemisferio Sur

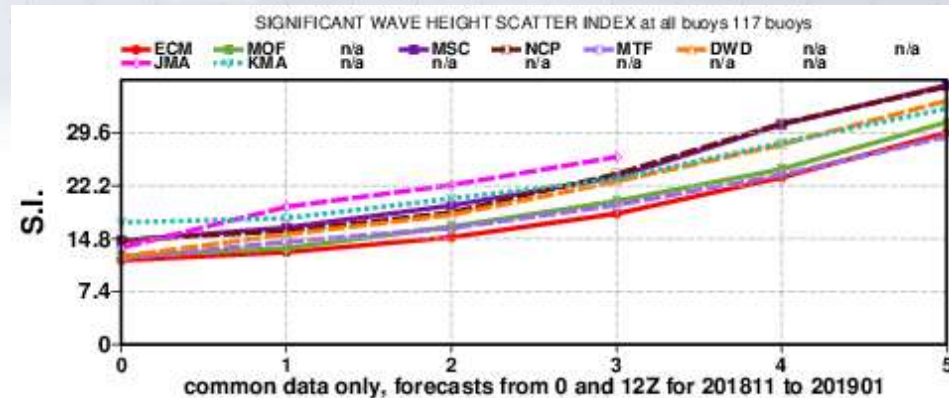
Correlación de Anomalías Hemisferio Norte

ECMWF 12UTC ocean waves  
Surface significant wave height  
Anomaly correlation  
NHem Extratropics (lat 20.0 to 90.0, lon -180.0 to 180.0)

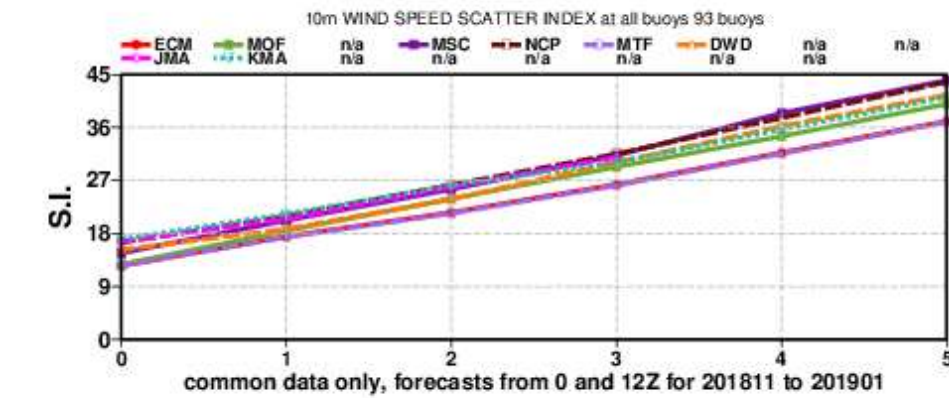


# Verificación

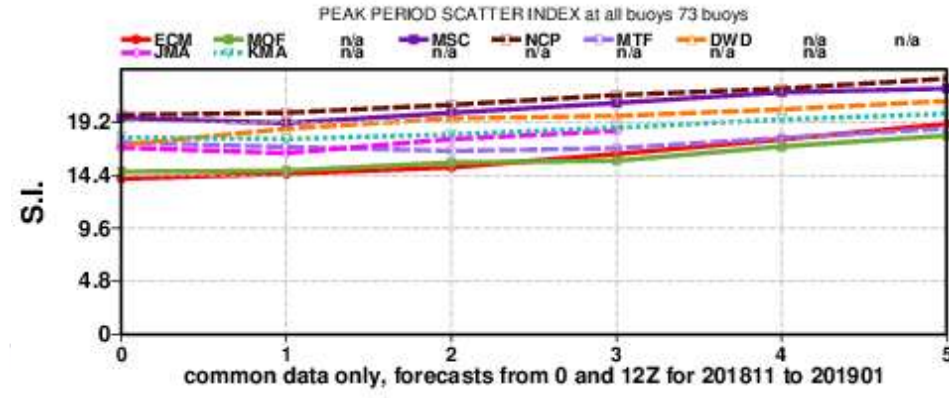
Comparación con otros centros operativos en un conjunto seleccionado de boyas.



Hs



viento



Periodo Pico