



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# **ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA LA ADECUACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO DE PORT FÒRUM (BARCELONA)**

## **ANEJO 4. CLIMA MARÍTIMO Y DINÁMICA LITORAL**

Autor: Alejandro Folch Ruiz  
Tutora: María Esther Gómez Martín

*Valencia, septiembre de 2019*



## ÍNDICE

<b>1. OBJETO</b>	<b>3</b>
<b>2. NIVEL DEL MAR</b>	<b>5</b>
2.1. CAMBIO CLIMÁTICO	7
2.2. PROFUNDIDAD MÁXIMA A PIE DE DIQUE	8
<b>3. RÉGIMEN DE VIENTOS</b>	<b>9</b>
3.1. INVIERNO	10
3.2. PRIMAVERA	11
3.3. VERANO	12
3.4. OTOÑO	13
3.5. CONCLUSIÓN	14
<b>4. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE</b>	<b>15</b>
<b>4.1. RÉGIMEN EXTREMAL</b>	<b>15</b>
<b>4.1.1. Dirección del oleaje</b>	<b>15</b>
4.1.1.1. Inverno	16
4.1.1.2. Primavera	17
4.1.1.3. Verano	18
4.1.1.4. Otoño	19
4.1.1.5. Conclusión	19
<b>4.1.2. Altura de ola significativa</b>	<b>20</b>
<b>4.1.3. Periodo del oleaje</b>	<b>21</b>
4.1.3.1. Periodo pico de oleaje	21
4.1.3.2. Periodo medio de oleaje	21
<b>4.2. RÉGIMEN MEDIO</b>	<b>22</b>
<b>4.2.1. Altura de ola significativa y periodo pico</b>	<b>22</b>
<b>5. PROPAGACIÓN DE OLEAJE</b>	<b>27</b>
<b>5.1. RÉGIMEN EXTREMAL</b>	<b>27</b>
5.1.1. Situación de rotura	27
5.1.2. Metodología de propagación de oleaje	27
5.1.3. Datos de partida	29
5.1.4. Resultados	29
<b>6. DINÁMICA LITORAL</b>	<b>32</b>
<b>6.1. EVOLUCIÓN DEL LITORAL</b>	<b>32</b>
<b>7. REFERENCIAS</b>	<b>35</b>



## 1. OBJETO

El objeto de este anejo es la caracterización del clima marítimo en la zona de Port Fòrum. Para el análisis del clima marítimo se utilizará el *Banco de Datos Oceanográficos de Puertos del Estado*, ya que se trata de la fuente de datos más actualizada.

Por lo tanto, se emplearán la información de la Boya de Barcelona II y la Boya de Tarragona, que corresponden a las estaciones activas más cercanas al puerto. En este estudio se obtendrán datos acerca de los regímenes de vientos, las corrientes de la zona, además de la caracterización y propagación del oleaje.

También se obtendrá información de la ROM 0.3-91 “Recomendación para Oleaje y Atlas de Clima Marítimo en el Litoral español”.

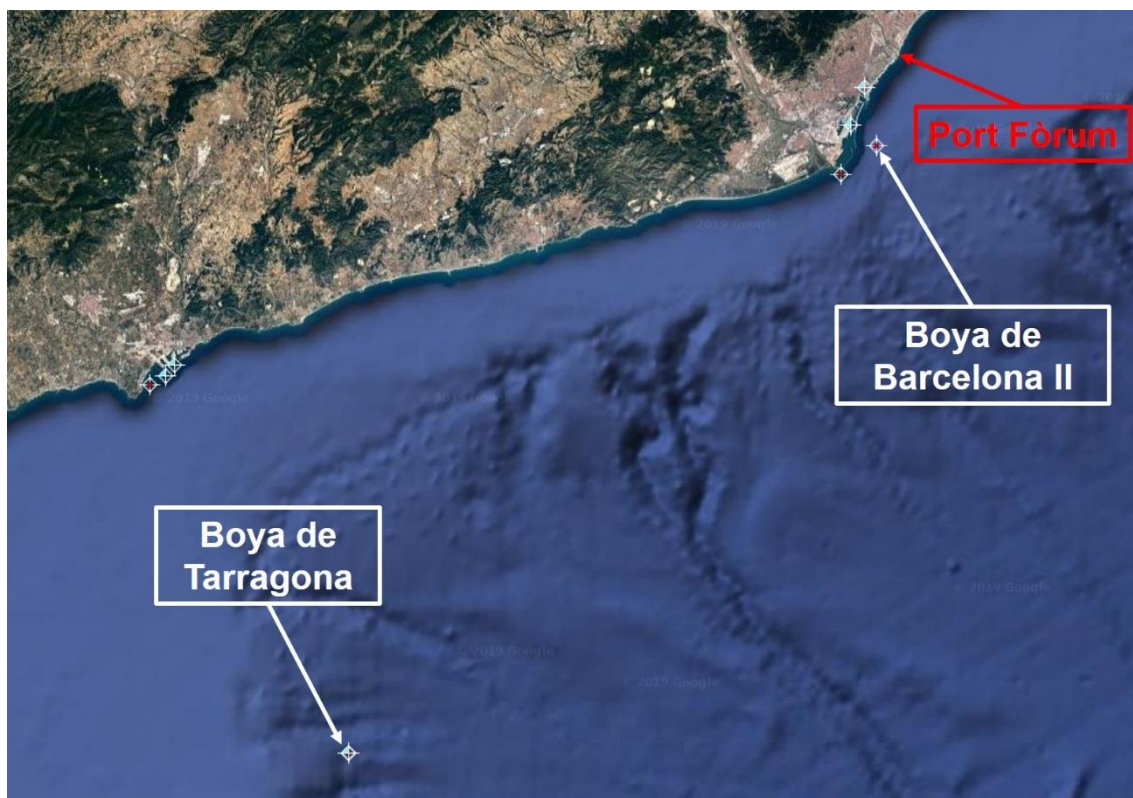


Figura 1. Localización de las boyas.

La Boya de Barcelona II pertenece a la Red de Boyas Costeras de Puertos del Estado, que ofrece medidas para formar el conjunto de datos Red Costera.

Las boyas de esta red se caracterizan por estar ubicadas en las proximidades de instalaciones portuarias, estando fondeadas, en general, a menos de 100 m. de profundidad. Por ello, en la mayoría de los casos, las medidas de oleaje están perturbadas tanto por el perfil de la costa, como por efectos de refracción y asomeramiento inducidos por el fondo marino.

Por lo indicado más arriba, las boyas de la Red Costera son representativas solo de condiciones locales, siendo esta boya de interés por encontrarse en las proximidades de Port Fòrum. Por otro lado, esta boya no se utilizará para el estudio del viento porque no ofrece ese tipo de información.

Código	Longitud	Latitud	Profundidad
1731	2.20° E	41.32 ° N	68 m

*Tabla 1. Características de la Boya de Barcelona II.*

La Boya de Tarragona pertenece a la Red de Boyas de Aguas Profundas de Puertos del Estado, también denominada Red Exterior, que ofrece medidas para formar el conjunto de datos de la Red Exterior.

Las boyas de esta red se caracterizan por estar fondeadas lejos de la línea de costa a gran profundidad (más de 200 metro de profundidad). Por tanto, las medidas de oleaje de estos sensores no están perturbadas por efectos locales. Por ello, cada boya proporciona observaciones representativas de grandes zonas litorales.

Esta boya se utilizará para caracterizar el régimen de vientos.

Código	Longitud	Latitud	Profundidad
2720	1.47° E	40.68° N	688 m

*Tabla 2. Características de la Boya de Tarragona.*

## 2. NIVEL DEL MAR

El Mareógrafo de Barcelona 2, situado en el puerto de Barcelona, pertenece a la *RED de MAREógrafos de Puertos del Estado (REDMAR)*, un resumen único y fácilmente actualizable de varios parámetros derivados de las medidas registradas por los mareógrafos de la red, relacionados con la marea y el nivel del mar en los puertos. Se usará la información del Mareógrafo de Barcelona 2 porque es el más cercano a Port Fòrum.



Figura 2. Localización del Mareógrafo de Barcelona 2.

Código	Longitud	Latitud
3758	2,17° E	41,34° N

Tabla 3. Características del Mareógrafo de Barcelona 2.

El *Informe REDMAR del Puerto de Barcelona*, obtenido de la página web de Puertos del Estado, ofrece datos los registrados por cada uno de los mareógrafos utilizados en el puerto, en una serie temporal de 1993 a 2017.

El clavo geodésico más cercano al Mareógrafo de Barcelona 2 es el “Clavo 146”, situado sobre la esquina derecha de la base de hormigón del mareógrafo y nivelado por el Instituto Cartográfico de Catalunya en 2011. Por otro lado, como se puede observar en la *Figura 3*, el cero del puerto no coincide con el cero REDMAR, existiendo una diferencia de 0,214 m entre los dos niveles de referencia.



Los datos se transmiten por GPRS a Puertos del Estado por correo electrónico cada minuto (muestreo 1 minuto). Además, este sensor mide agitación y transmite parámetros de oleaje cada 20 minutos.

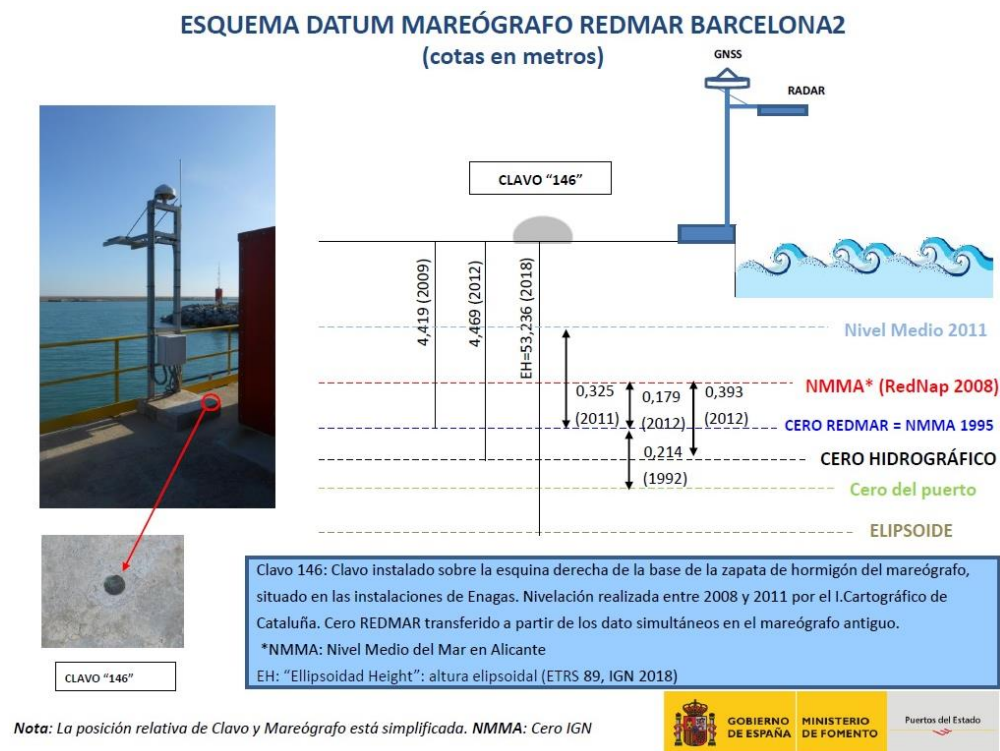


Figura 3. Cotas de los ceros de referencia respecto al clavo de referencia del Mareógrafo Barcelona 2.

A continuación, se muestra una imagen de las principales referencias del nivel del mar calculadas sobre todo el periodo de datos disponible (1993 - 2017). La unidad de las alturas es el centímetro y están referidas al cero REDMAR.



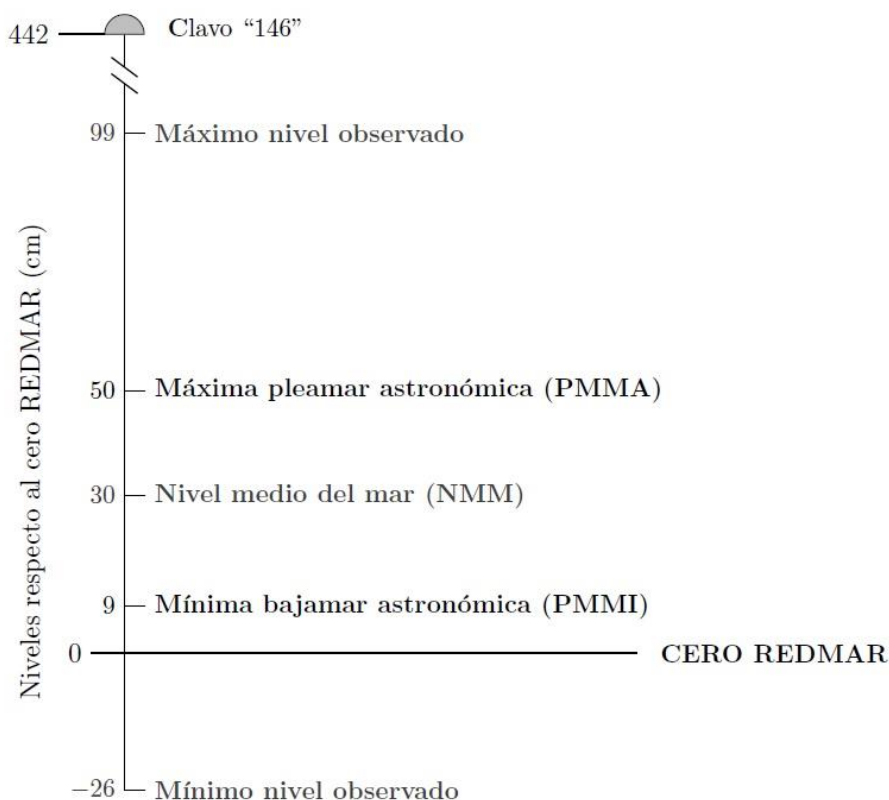


Figura 4. Principales referencias del nivel del mar de los mareógrafos usados en el puerto de Barcelona.

Por una parte, el cero del puerto coincide prácticamente con la mínima bajamar observada, solo existe una diferencia de 4,6 cm entre los dos niveles. Por otra parte, el máximo nivel observado en la serie histórica alcanza prácticamente un metro sobre el cero REDMAR y el mínimo nivel observado supera los 25 cm por debajo del cero REDMAR. Esto implica una carrera de marea máxima observada de 1,25 m.

## 2.1. CAMBIO CLIMÁTICO

Es indispensable considerar en este estudio un aumento del nivel del mar en el futuro como consecuencia del cambio climático.

Respecto a este tema se han realizado diversos estudios. Uno de los últimos es "*Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment*", que se publicó recientemente en la revista científica PNAS. La investigación, liderada por el profesor de la Universidad de Bristol Jonathan Bamber, revela que el nivel del mar podría crecer por encima de los dos metros de altura antes de que termine el siglo XXI. Es mucho más rápido de lo que hasta ahora se pensaba y afectaría directamente a todas las personas que viven en la costa. Sin embargo, los autores conceden a esta opción un 5 % de posibilidades.

Por otra parte, los datos que se manejaban hasta el momento eran mucho más conservadores: según la ONU, de seguir la misma trayectoria que se lleva hasta el momento, el nivel del agua crecería entre 0,52 y 0,98 metros para el final del siglo.

Por lo tanto, dado que no es posible dar una cifra exacta del aumento del nivel del mar, en este estudio se va a considerar un aumento del nivel del mar de 0,5 m en los próximos

25 años, coincidiendo con la vida útil mínima de las obras de adecuación del dique de abrigo. Se trata de un valor del lado de la seguridad, puesto que hay mucha incertidumbre entorno a cuánto aumentará el nivel del mar durante este siglo.

## 2.2. PROFUNDIDAD MÁXIMA A PIE DE DIQUE

Este dato es importante a la hora de realizar futuros cálculos. A continuación se muestra una imagen de los niveles máximos y mínimos observados en el Puerto de Barcelona respecto a los niveles de referencia más relevantes.

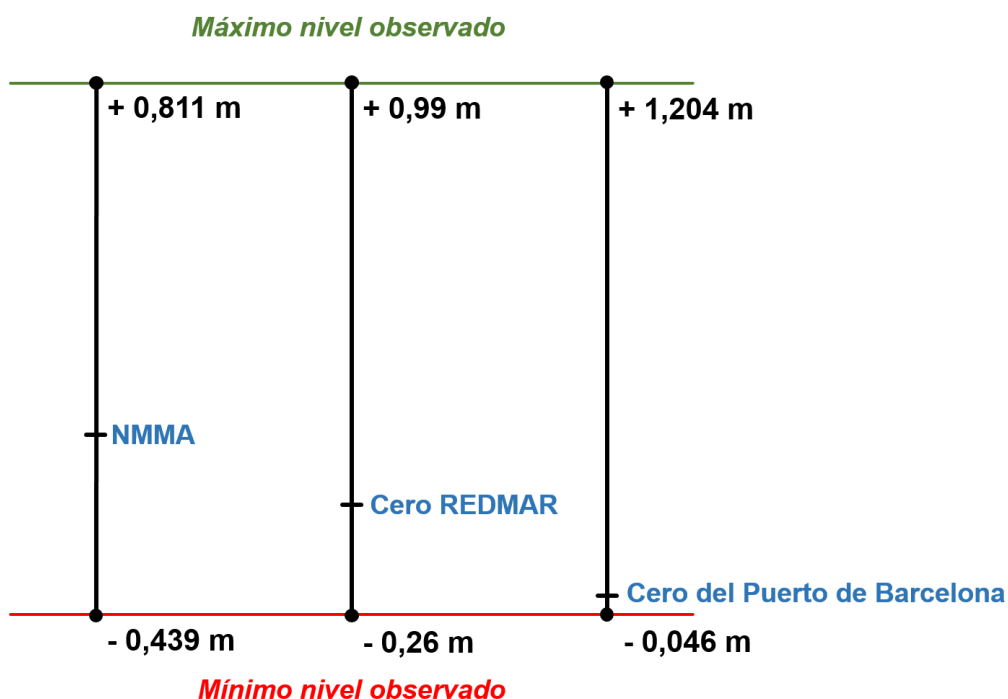


Figura 5. Máximo y mínimo nivel observado en el Puerto de Barcelona.

Puesto que en el Anejo 2. Estudios previos se estimó que la profundidad a pie de dique en condiciones normales era de 7 metros, en referencia al cero establecido por la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR), los valores a considerar como el caso más desfavorable de calado a pie de dique serán los siguientes.

Profundidad a pie de dique (Anejo 2. Estudios previos)	7 m
Máximo nivel observado (REDMAR)	0,99 m
Aumento del nivel del mar (cambio climático)	0,5 m
<b>Profundidad máxima a pie de dique</b>	<b>8,49 m</b>

Tabla 4. Estimación de la profundidad máxima a pie de dique.

Por lo tanto, se considerarán 8,5 m para futuros cálculos.

### 3. RÉGIMEN DE VIENTOS

El estudio de las direcciones principales de vientos se realizará por medio de las rosas de vientos, donde se representan 16 direcciones de vientos, indicando la frecuencia y la velocidad media del viento en cada una de las direcciones.

Con el objetivo de obtener los datos históricos de viento, se recurre a la Boya de Tarragona porque la Boya de Barcelona no los proporciona y las estaciones meteorológicas localizadas en el puerto de Barcelona pueden ofrecer datos alterados por las condiciones locales.

A continuación se mostrarán las rosas de viento correspondientes a cada una de las estaciones del año para poder identificar cuáles son las direcciones de procedencia y las velocidades de viento más frecuentes. Estas rosas se han extraído del *Informe de Clima Medio de Viento de la Boya de Tarragona*, disponible en la página web de Puertos del Estado.

Por motivos de distribución de espacio, los resultados se muestran a partir de la página siguiente.

### 3.1. INVIERNO

Lugar	Boya de Tarragona	Periodo	Diciembre – Febrero
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Agosto 2004 – Marzo 2017
Intervalo de calmas	0 – 1,0	Porcentaje de calmas	7,51 %

Tabla 5. Información de la rosa de viento de invierno.

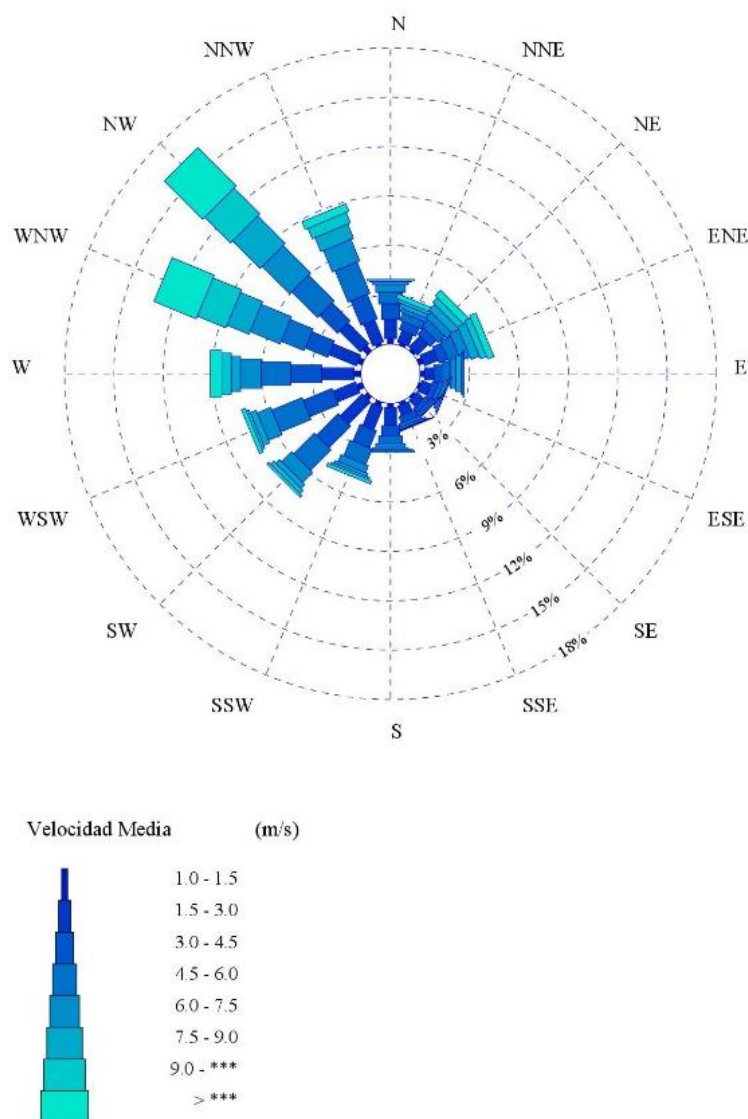


Figura 6. Rosa de viento de invierno.

A la vista de la figura anterior, las direcciones de procedencia de viento más frecuentes en invierno son el noroeste (NW) y oeste-noroeste (WNW). En cambio, casi la totalidad de las 16 direcciones de procedencia alcanzan velocidades superiores a 9 m/s.

### 3.2. PRIMAVERA

Lugar	Boya de Tarragona	Periodo	Marzo – Mayo
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Agosto 2004 – Marzo 2017
Intervalo de calmas	0 – 1,0	Porcentaje de calmas	11,04 %

Tabla 6. Información de la rosa de viento de primavera.

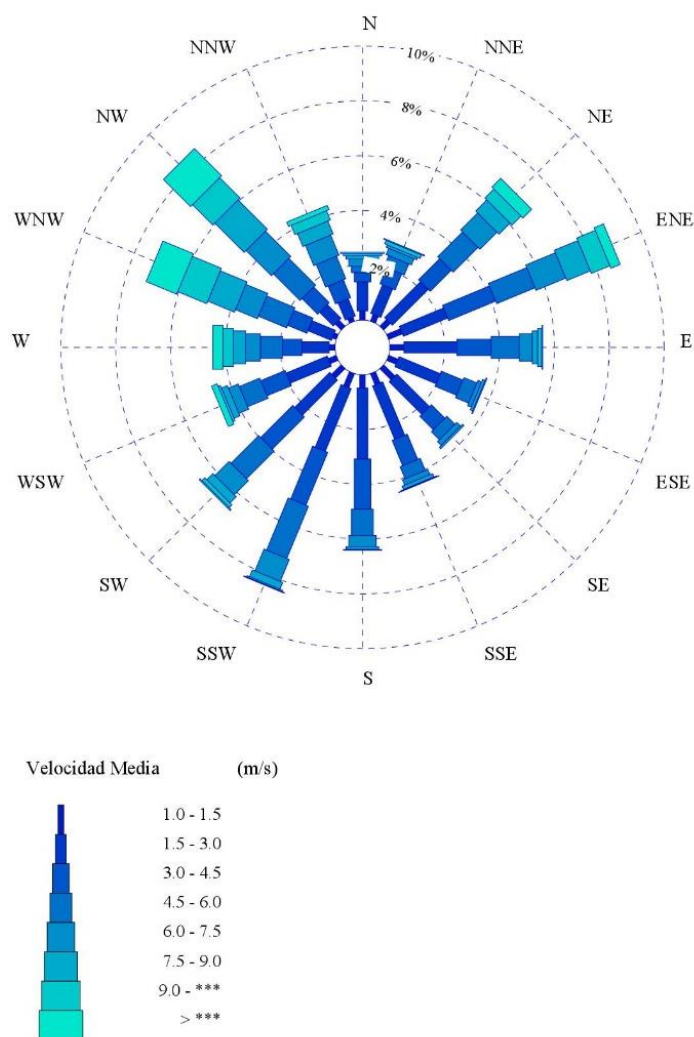


Tabla 7. Rosa de viento de primavera.

En primavera, se observa que las direcciones de procedencia de viento más frecuentes son principalmente el noroeste (NW), el estenoreste (ENE) y el sursuroeste (SSW). Estas tres tienen una frecuencia superior al 8%, cosa que indica la variedad de vientos que hay en esta época del año. Por otra parte, las direcciones que tienen mayor frecuencia de alcanzar vientos de 9 m/s son el noroeste (NW) y el oestenoroeste (WNW).

### 3.3. VERANO

Lugar	Boya de Tarragona	Periodo	Junio - Agosto
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Agosto 2004 – Marzo 2017
Intervalo de calmas	0 – 1,0	Porcentaje de calmas	13,55 %

Tabla 8. Información de la rosa de viento de verano.

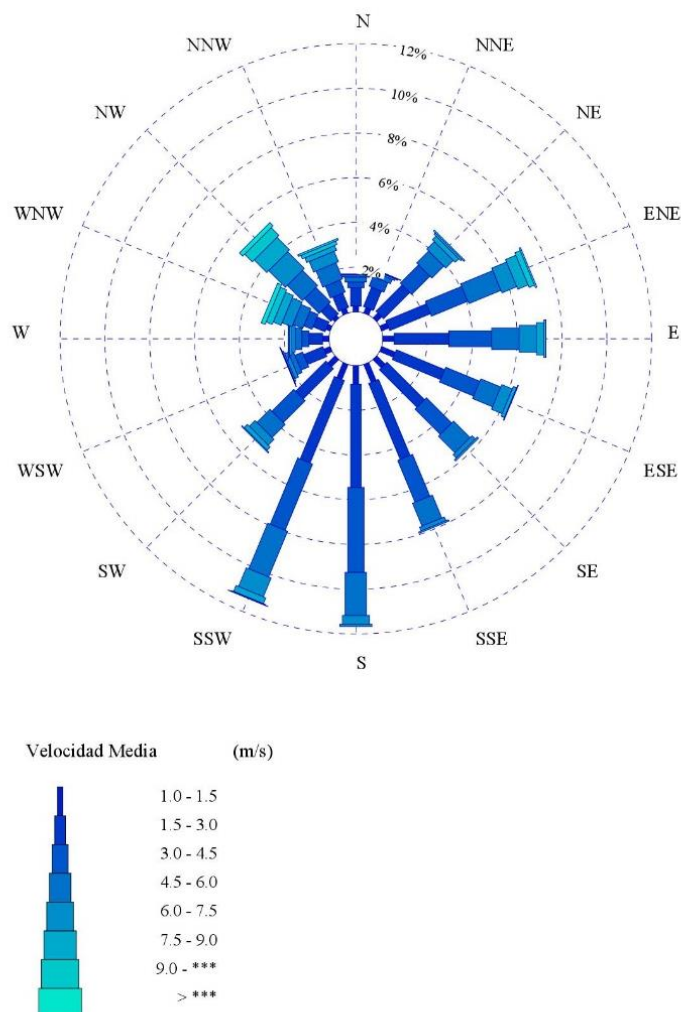


Figura 7. Rosa de viento de verano.

Las direcciones de procedencia de viento más frecuentes en verano son el sur (S) y el sursuroeste (SSW). Sin embargo, estas direcciones no son las que tienen una mayor velocidad, ya que los vientos del noroeste (NW) alcanzan velocidades superiores a 9 m/s.

### 3.4. OTOÑO

Lugar	Boya de Tarragona	Periodo	Septiembre - Noviembre
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Agosto 2004 – Marzo 2017
Intervalo de calmas	0 – 1,0	Porcentaje de calmas	12,39 %

Tabla 9. Información de la rosa de viento de otoño.

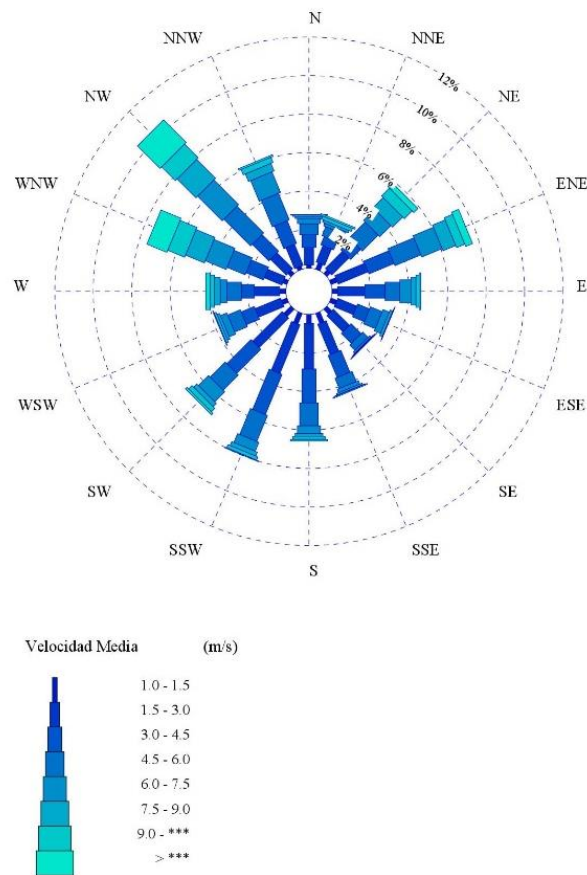


Figura 8. Rosa de viento de otoño.

En el caso de otoño, la dirección más frecuente de procedencia del viento es el noroeste (NW) con un 10%. En segundo lugar está el oestenoeste (WNW), el sursuroeste (SSW) y el estenoreste (ENE) con un 8% de frecuencia prácticamente. Las direcciones que tienen mayor frecuencia de altas velocidades de viento son el noroeste (NW) y el oestenoeste (WNW).



### **3.5. CONCLUSIÓN**

En general, las estaciones de primavera y otoño tienen un viento variado, sin clara predominancia de una dirección. En cambio, en invierno y verano el viento principalmente procede de una dirección determinada, siendo noroeste y sur, respectivamente.

## 4. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

### 4.1. RÉGIMEN EXTREMAL

La seguridad y la operatividad de una instalación en la costa puede estar condicionada por la acción del oleaje en situación de temporal. Es decir, en situaciones donde la altura del oleaje alcanza una intensidad poco frecuente.

Con el fin de acotar el riesgo que corre una instalación, debido a la acción del oleaje, es necesario tener una estimación de la frecuencia o probabilidad con la que se presentan temporales que superen una cierta Altura Significante de ola.

Un régimen extremal de oleaje, es precisamente, un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal de una cierta altura de riesgo.

#### 4.1.1. Dirección del oleaje

El estudio de la dirección del oleaje se realiza mediante las rosas del oleaje, donde se presentan 16 direcciones de oleaje, indicando la frecuencia y la altura de ola con respecto a su dirección de origen.

En este caso, se recurre a la Boya de Barcelona II porque se encuentra en un entorno cercano a Port Fòrum y ofrece información de oleaje.

Seguidamente, se mostrarán las rosas de oleaje correspondientes a cada una de las estaciones del año para poder identificar cuáles son las direcciones y las alturas de ola más frecuentes. Estas rosas se han extraído del *Informe de Clima Medio de Oleaje de la Boya de Barcelona II*, disponible en la página web de Puertos del Estado.

Por motivos de distribución de espacio, los resultados se muestran a partir de la página siguiente.

#### 4.1.1.1. Inverno

Lugar	Boya de Barcelona II	Periodo	Diciembre - Febrero
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Marzo 2004 – Mayo 2017
Intervalo de calmas	0 – 0,2	Porcentaje de calmas	5,76 %

Tabla 10. Información de la rosa de invierno.

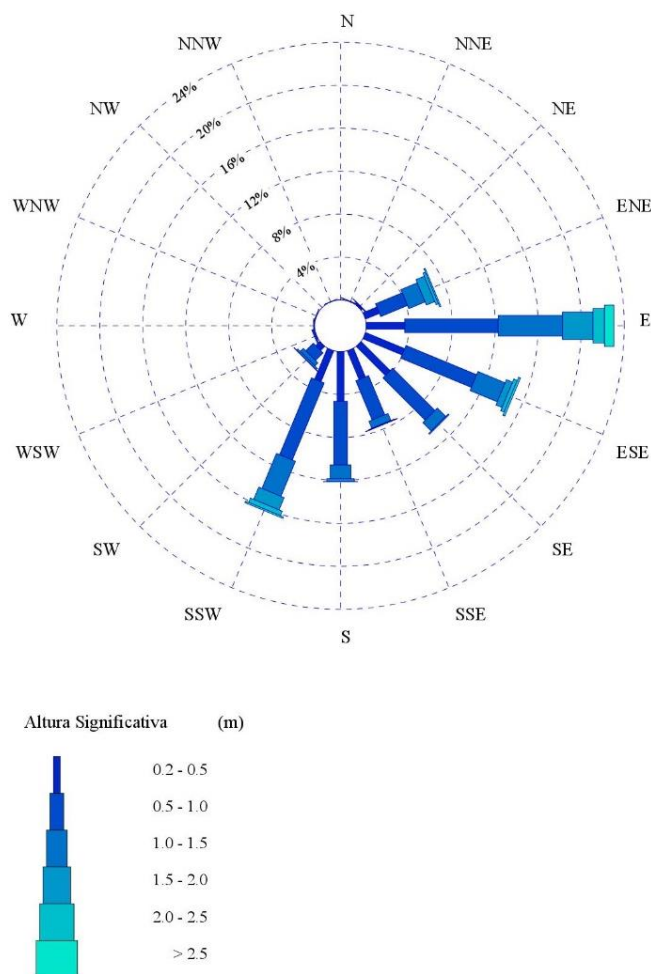


Figura 9. Rosa de oleaje de invierno.

En invierno la dirección de procedencia de oleaje más frecuente es este (E), con casi 24% de frecuencia. En segundo lugar aparece la dirección sursuroeste (SSW) con un 16% de frecuencia. Además, las direcciones que poseen una mayor altura de ola superando los 2,5 m son también el este (E) y el sursuroeste (SSW).

#### 4.1.1.2. Primavera

Lugar	Boya de Barcelona II	Periodo	Marzo – Mayo
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Marzo 2004 – Mayo 2017
Intervalo de calmas	0 – 0,2	Porcentaje de calmas	7,86 %

Tabla 11. Información de la rosa de oleaje de primavera.

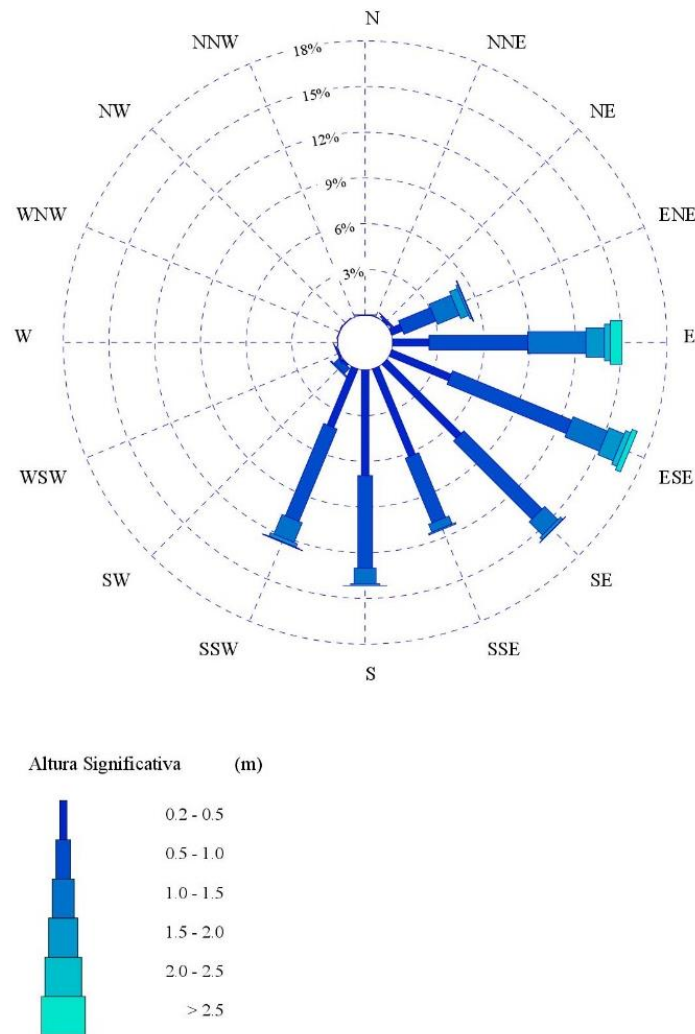


Figura 10. Rosa de oleaje de primavera.

La dirección reinante de procedencia en primavera pasa a ser el esteseeste (ESE), seguida muy de cerca por las direcciones sureste (SE) y este (E). Por otro lado, las direcciones de procedencia este (E) y esteseeste (ESE) son las que tienen una mayor altura de ola y superan los 2,5 m.

### 4.1.1.3. Verano

Lugar	Boya de Barcelona II	Periodo	Junio – Agosto
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Marzo 2004 – Mayo 2017
Intervalo de calmas	0 – 0,2	Porcentaje de calmas	12,83 %

Tabla 12. Información de la rosa de oleaje de verano.

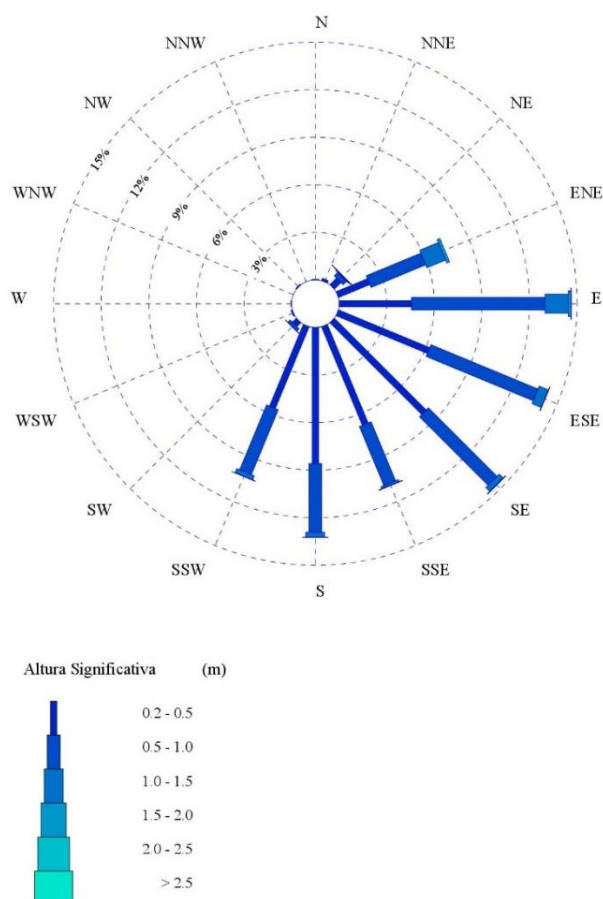


Figura 11. Rosa de oleaje de verano.

En verano, el este (E), el este sureste (ESE) y el sureste (SE) son nuevamente las direcciones de procedencia de oleaje más frecuentes con un 15% de frecuencia aproximadamente. Por otra parte, todas las direcciones presentan una altura de ola media de 2 m.

#### 4.1.1.4. Otoño

Lugar	Boya de Barcelona II	Periodo	Septiembre - Noviembre
Criterio de direcciones	Procedencia	Serie analizada	Marzo 2004 – Mayo 2017
Intervalo de calmas	0 – 0,2	Porcentaje de calmas	6,58 %

Tabla 13. Información de la rosa de oleaje de otoño.

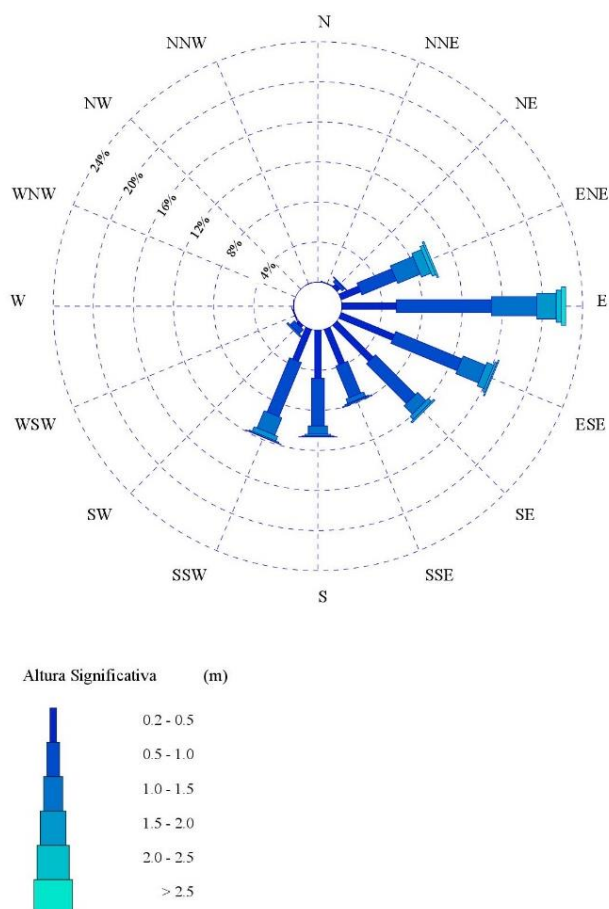


Figura 12. Rosa de oleaje de otoño.

En otoño, la dirección de procedencia de oleaje predominante es el este (E), con un 22% de frecuencia y alcanzando una altura de ola de 2,5 m. A continuación le sigue la dirección este-sureste (ESE), con un 20% de frecuencia.

#### 4.1.1.5. Conclusión

Finalmente, teniendo en cuenta el año entero, la dirección de procedencia de oleaje más frecuente es el este (E). Además, esta dirección es la que posee una mayor frecuencia de olas con altura mayor a 2,5 m. Sin embargo, también hay que tener en cuenta el oleaje con direcciones de procedencia este-sureste (ESE), sureste (SE) y sur (S), porque también condicionan el diseño de las obras de abrigo de Port Fòrum.

#### 4.1.2. Altura de ola significativa

La altura de ola significativa caracteriza de modo principal la severidad de un temporal. En el *Informe de Extremos Máximos de Oleaje por Direcciones de la Boya de Barcelona II* aparecen los resultados de régimen extremal escalares y por direcciones. Estas gráficas relacionan la altura de ola significativa ( $H_s$ ) con la probabilidad de excedencia anual.

En este estudio se utilizará la gráfica del régimen extremal direccional de oleaje procedente del este porque es la dirección más dominante de oleaje y la que produce mayores alturas de ola.

LUGAR :	Barcelona	SECTOR :	E (67.5:112.5)
PARÁMETRO :	Altura Significante	SERIE ANALIZADA :	Mar. 2004 - May. 2017
PROFUNDIDAD :	68.0m		

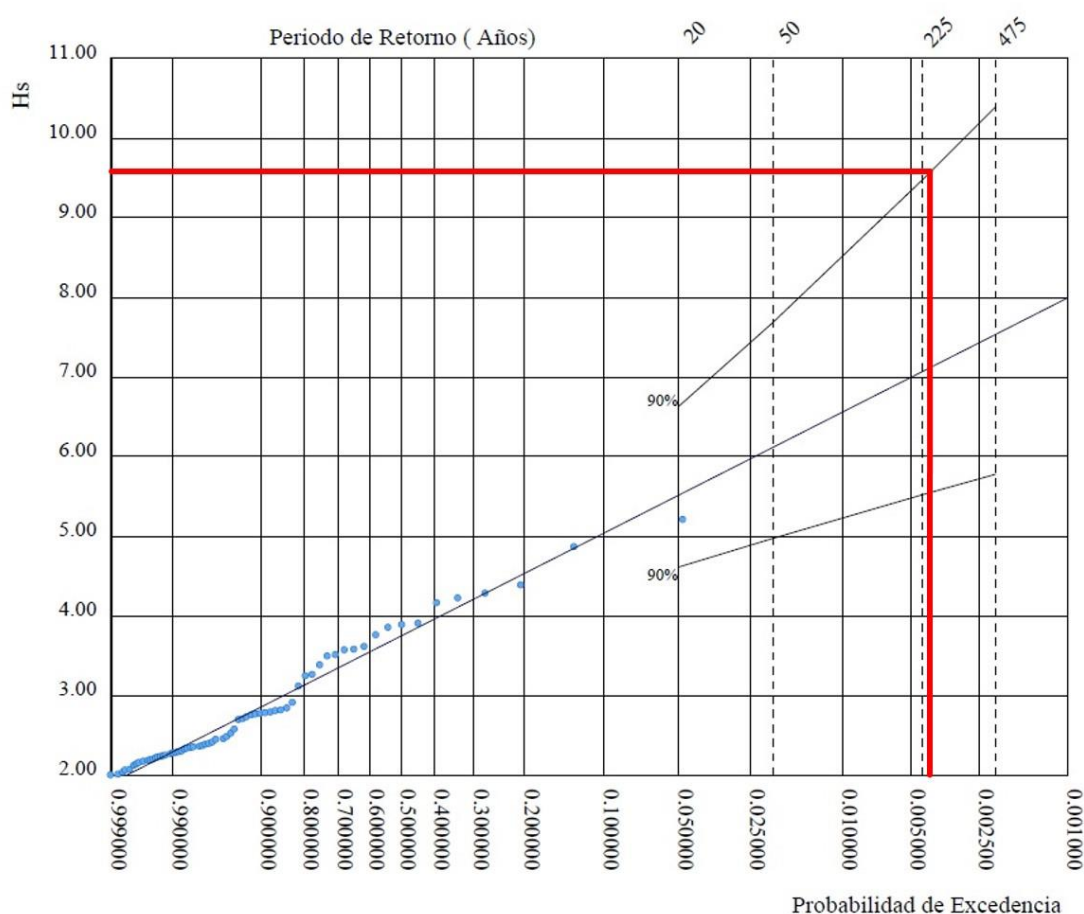


Figura 13. Régimen extremal direccional de oleaje del este.

Como se ha obtenido en el *Anejo 3. Criterios generales de proyecto*, el período de retorno a considerar es de 238 años y la probabilidad de excedencia anual de 0,004. Este valor corresponde, según la gráfica anterior, a una altura de ola significativa ( $H_s$ ) de aproximadamente 9,7 metros, teniendo en cuenta el corte con la banda superior de confianza del 90%.



#### 4.1.3. Periodo del oleaje

##### 4.1.3.1. Periodo pico de oleaje

La acción de un temporal también depende del periodo del oleaje. Una vez seleccionados los picos de temporal se establece una relación empírica entre el periodo de pico ( $T_p$ ) y la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ). En este caso, la relación establecida que aparece en el informe respecto al régimen extremal direccional de oleaje procedente del este es la siguiente:

$$T_p = 5,14 \cdot H_s^{0,42}$$

Entonces, aplicando la relación:

$$T_p = 5,14 \cdot H_s^{0,42} = 5,14 \cdot 9,70^{0,42} = 13,35 \text{ seg}$$

Se obtiene un periodo pico de oleaje 13,35 segundos.

##### 4.1.3.2. Periodo medio de oleaje

Es necesario calcular el periodo medio de oleaje para futuros cálculos. Con el objetivo de obtenerlo, se acude a la ROM 0.3-91 "Recomendación para Oleaje y Atlas de Clima Marítimo en el Litoral español". En primer lugar, se identifica el área que comprende la zona de Barcelona (área VIII) y en la parte "E – Registros Instrumentales: Correlaciones" aparece la relación entre el periodo pico y el periodo medio de oleaje.

E – REGISTROS INSTRUMENTALES: CORRELACIONES ALTURA DE OLA / PERIODO EN TEMPORALES					
BOYA	$P = H_s / L_T = \frac{2\pi H_s}{gT^2}$	$T_p / \bar{T}$	RELACION FINAL $H_s \text{ (m)}$ $T_p \text{ (s)}$	VALORES DE DISEÑO	
				$H_s \text{ (m)}$	$T_p \text{ (s)}$
ROSAS + PALAMOS	0.03 ~ 0.04	≈ 1.15	$T_p = (4.6-5.3)\sqrt{H_s}$	4	9 ~ 10.5
				6	11 ~ 13
				8	13 ~ 15
				10	14.5 ~ 16.5

Figura 14. Correlaciones del Área VIII. Fuente: ROM 0.3-91.

Por lo tanto, se establece de manera aproximada que el periodo medio en el caso de régimen extremal direccional del este es:

$$\frac{T_p}{T_m} = 1,15 \rightarrow T_m = \frac{T_p}{1,15} = \frac{13,35}{1,15} = 11,61 \text{ seg}$$

## 4.2. RÉGIMEN MEDIO

El régimen medio de una serie temporal corresponde al conjunto de estados de oleaje que más frecuentemente se puede encontrar. Por lo tanto, del mismo modo que en los apartados anteriores, se utiliza la página web de Puertos del Estado para extraer la información.

### 4.2.1. Altura de ola significativa y periodo pico

En el *Informe de Clima Medio de Oleaje de la Boya de Barcelona II* se encuentran las gráficas de régimen medio de altura de ola significativa clasificadas por direcciones, que relacionan la altura de ola significativa con la probabilidad de no excedencia. Únicamente se tendrán en cuenta las gráficas correspondientes a las direcciones de oleaje predominante: E, ESE, SE y S.

La probabilidad de no excedencia anual es de aproximadamente el 99,6%, dado que la probabilidad de excedencia anual era del 0,4%.

Para calcular el periodo pico se utilizará la fórmula que relaciona el periodo pico y la altura significativa de oleaje en el caso del régimen extremal escalar.

$$T_p = 5,17 \cdot H_s^{0,40}$$

Por motivos de distribución de espacio, los resultados se muestran a partir de la página siguiente.

- Dirección este (E)

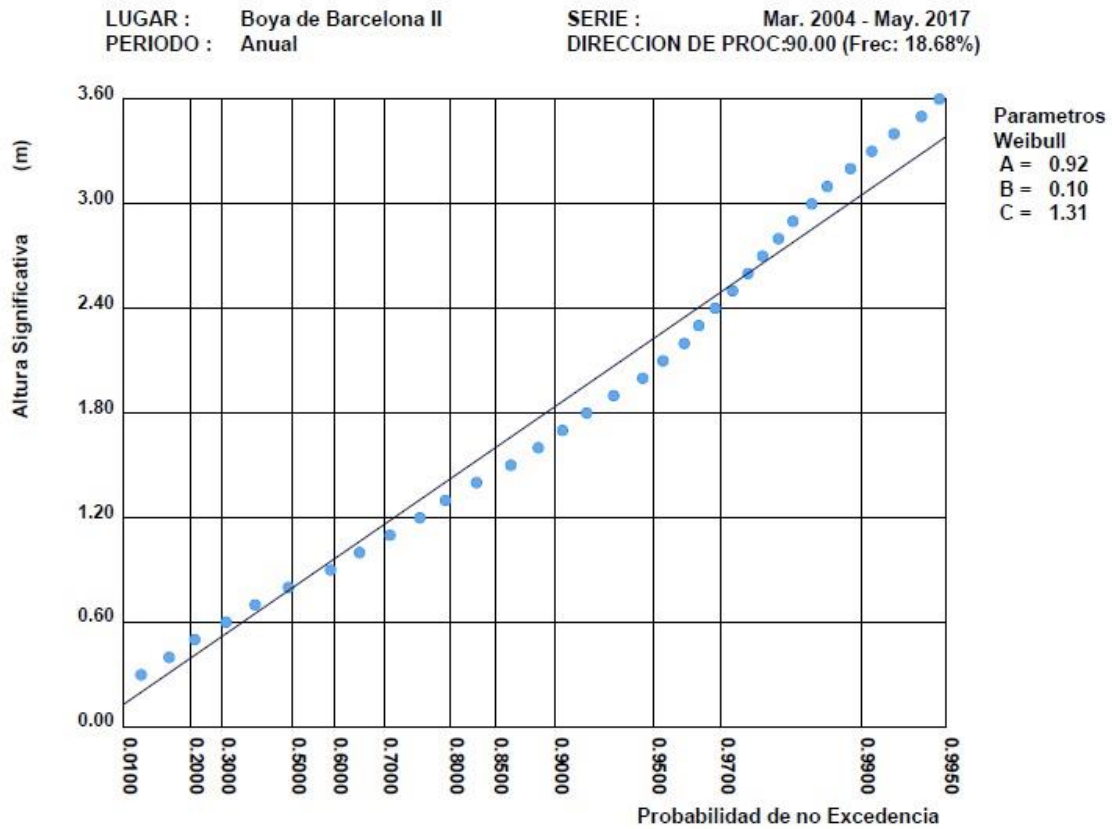


Figura 15. Régimen medio de altura de ola significativa (E).

Para una probabilidad de no excedencia del 99,6%, se obtiene una altura de ola significativa de 3,49 m. Para obtener el periodo pico se usa la fórmula expuesta que relaciona la al

$$T_p = 5,17 \cdot H_s^{0,40} = 5,17 \cdot 3,49^{0,40} = 8,52 \text{ seg}$$

- **Dirección este-sureste (ESE)**

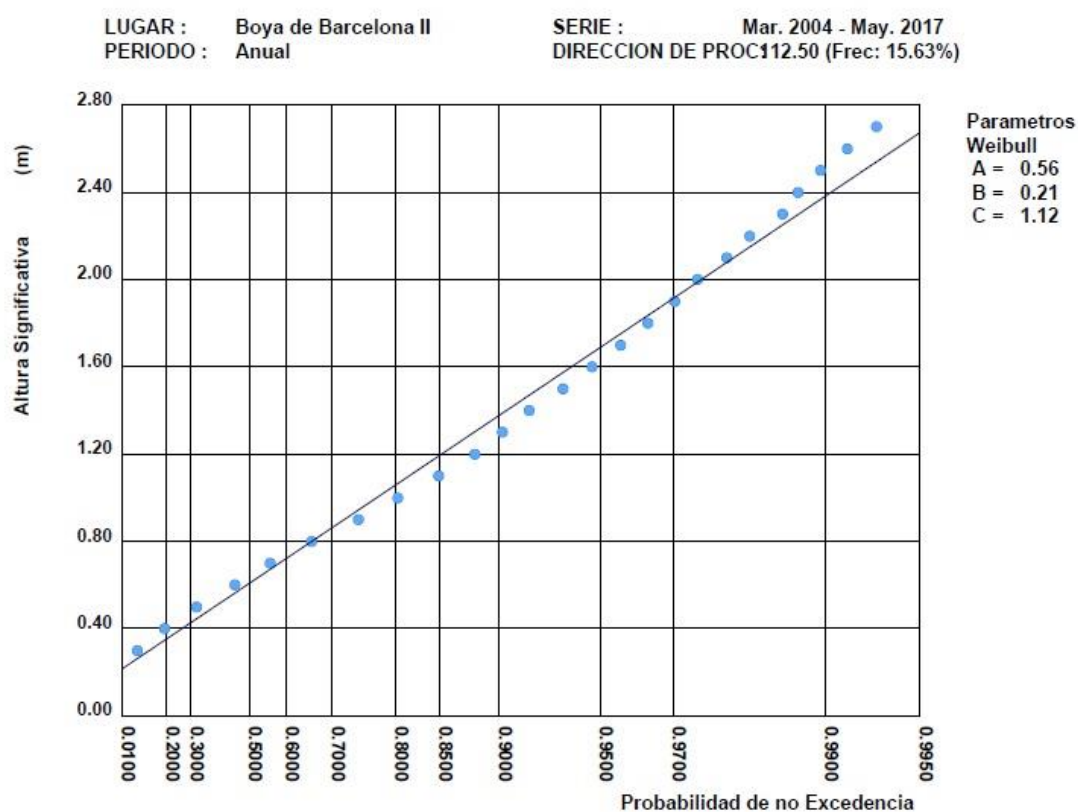


Figura 16. Régimen medio de altura de ola significativa (ESE)

Para una probabilidad de no excedencia del 99,6%, se obtiene una altura de ola significativa de 2,78 m. Para obtener el periodo pico se usa la fórmula expuesta previamente:

$$T_p = 5,17 \cdot H_s^{0,40} = 5,17 \cdot 2,78^{0,40} = 7,78 \text{ seg}$$

- Dirección sureste (SE)

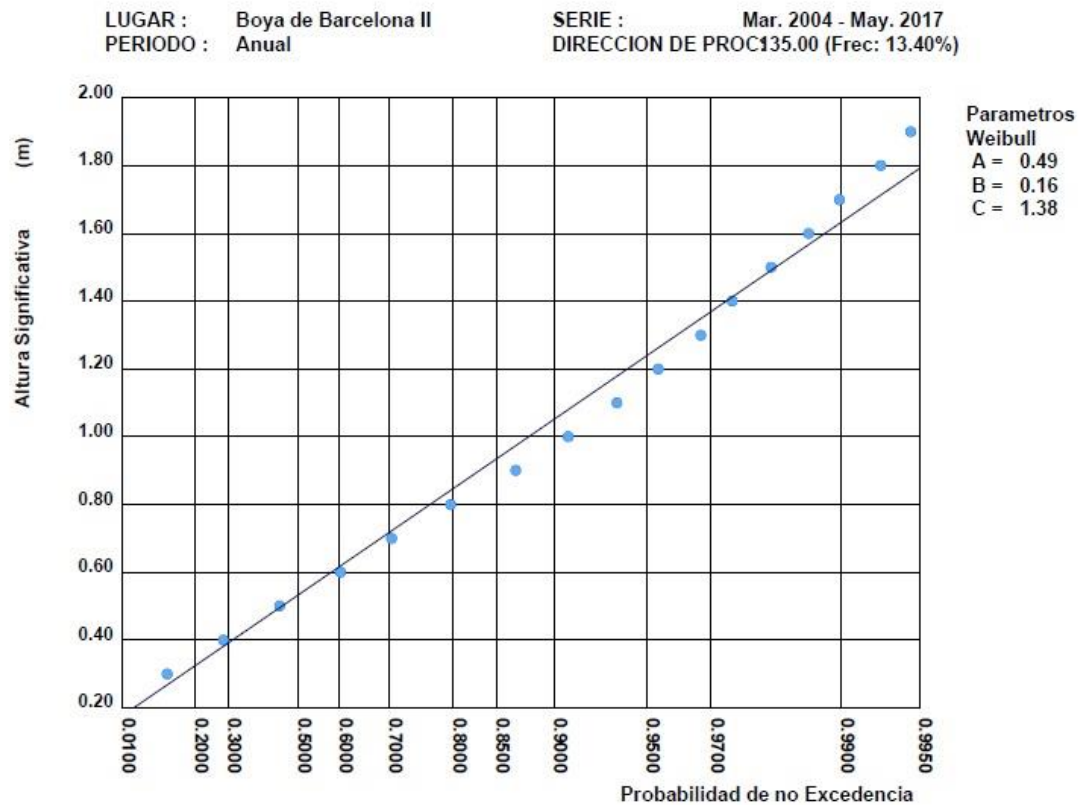


Figura 17. Régimen medio de altura de ola significativa (SE)

Para una probabilidad de no excedencia del 99,6%, se obtiene una altura de ola significativa de 1,85 m. Para obtener el periodo pico se usa la fórmula expuesta previamente:

$$T_p = 5,17 \cdot H_s^{0,40} = 5,17 \cdot 1,85^{0,40} = 6,61 \text{ seg}$$

- Dirección sur (S)

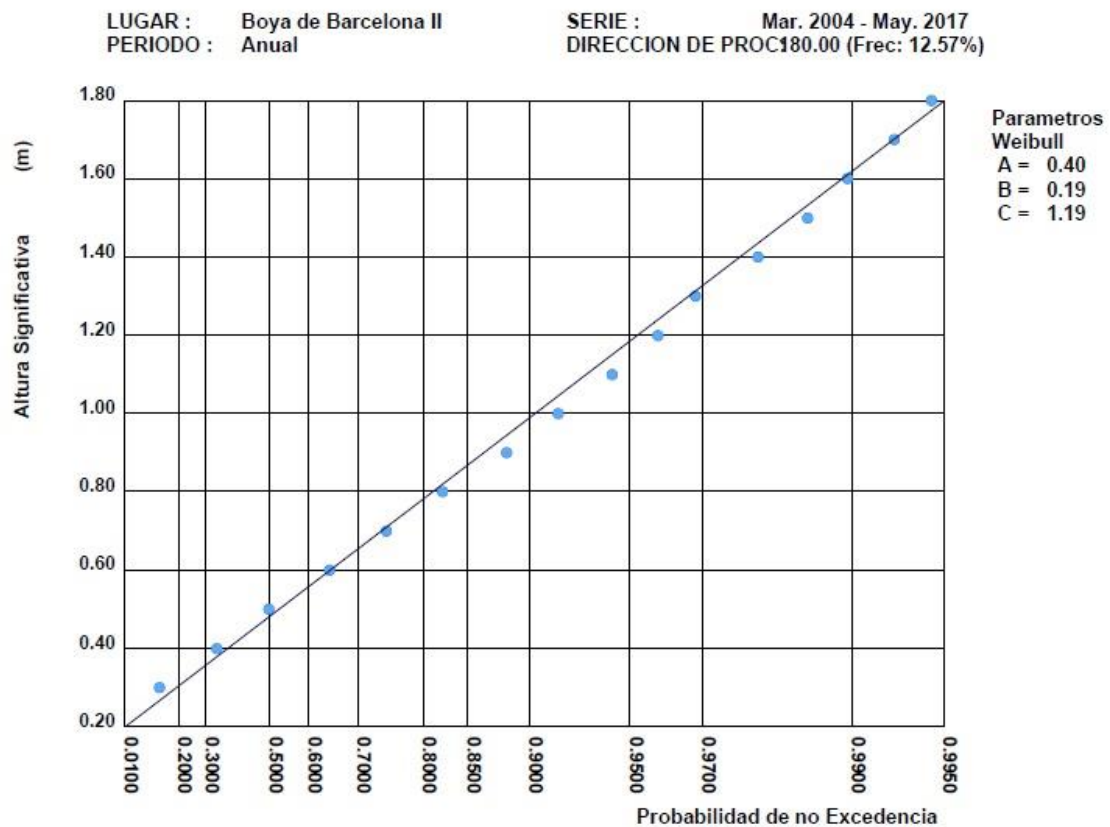


Figura 18. Régimen medio de altura de ola significativa (S).

Considerando una probabilidad de no excedencia del 99%, se obtiene una altura de ola significativa de 1,87 m. Para obtener el periodo pico se usa la fórmula expuesta previamente:

$$T_p = 5,17 \cdot H_s^{0,40} = 5,17 \cdot 1,87^{0,40} = 6,64 \text{ seg}$$

## 5. PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Es necesario realizar una propagación del oleaje para conocer de manera precisa las modificaciones que sufre la altura de ola cuando llega a las inmediaciones del puerto deportivo que se estudia.

### 5.1. RÉGIMEN EXTREMAL

#### 5.1.1. Situación de rotura

Al realizar la propagación de oleaje existen dos situaciones de rotura de las olas que pueden ocurrir. Si el dique está en aguas someras, la rotura del oleaje es por fondo, antes de llegar al dique. En cambio, si el dique está en aguas profundas, las olas rompen al impactar directamente contra el dique.

Sin embargo, esto depende realmente de la altura de ola en rotura por fondo. Para calcularla, se utilizará el criterio de rotura, que expresa que una ola rompe por fondo cuando la altura de la ola corresponde a cerca del 80% de la profundidad del mar en ese punto.

$$H_b = 0,78 \cdot d_{max}$$

Donde:

- $H_b$ : es la altura de ola en situación de rotura por fondo
- $d_{max}$ : profundidad máxima a pie de dique.

Puesto que se conoce el valor de  $d_{max}$ , calculado en el apartado 2. *Nivel del mar* de este anejo, se puede aplicar la ecuación.

$$H_b = 0,78 \cdot d_{max} = 0,8 \cdot 8,5 \cong 6,6 \text{ m}$$

Por lo tanto, esto quiere decir que cuando las olas que lleguen al dique sean mayores de 6,6 m, la rotura será por fondo y habrá que tomar esos valores. En el resto de los casos, las olas romperán al golpear directamente contra el dique.

#### 5.1.2. Metodología de propagación de oleaje

Se empleará el software *Microsoft Office Excel*, donde se ha programado el cálculo de la propagación lineal de oleaje utilizando el modelo de onda de Airy. Este modelo considera que la batimetría es paralela desde la profundidad de propagación hasta la profundidad a la que se pretende obtener la altura de ola corregida.

Este programa requiere como datos de entrada la altura de ola significativa ( $H_s$ ), el periodo medio del oleaje ( $T$ ) y el ángulo de incidencia ( $\alpha_0$ ) respecto a la perpendicular a la línea de costa en aguas profundas. Además, también necesita los valores de profundidad ( $d$ ) requeridos para propagar el oleaje partiendo de aguas profundas.

En primer lugar, se determina la longitud de onda en aguas profundas ( $L_0$ ) con la siguiente ecuación.

$$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$$



En segundo lugar, se determina a partir de qué profundidad se consideran aguas profundas para el caso estudiado.

$$d_o \geq \frac{L_o}{2}$$

A continuación se calcula la celeridad ( $C_0$ ) y la celeridad de grupo ( $C_{g0}$ ) en aguas profundas.

$$C_0 = \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi}$$

$$C_{g0} = n \cdot C_0 = \frac{1}{2} \cdot C_0$$

Después, para cada valor de la profundidad se calcula la longitud de onda ( $L$ ).

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)$$

Y se realizan una serie de comprobaciones.

$$\frac{d}{L_o} = \frac{d}{L} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)$$

Entonces, ya se pueden calcular los parámetros necesarios para obtener la altura de ola para cada profundidad. Primero se obtiene la celeridad ( $C$ ) y la celeridad de grupo ( $C_g$ ).

$$C = \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)$$

$$C_g = n \cdot C = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot \frac{d}{L}}{\sinh\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{d}{L}\right)} \right] \cdot C$$

Seguidamente se calcula el ángulo ( $\alpha$ ) y los coeficientes de asomeramiento ( $K_s$ ) y refracción ( $K_r$ ).

$$\alpha = \arcsen\left[\frac{C}{C_0} \cdot \sen(\alpha_0)\right]$$

$$K_s = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}}$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\alpha)}}$$

Finalmente, se calcula la altura de ola corregida a la profundidad determinada y se comprueba si rompe por fondo.

$$H_s^* = H_s \cdot K_s \cdot K_r$$

$$H_b = 0,78 \cdot d$$

### 5.1.3. Datos de partida

Seguidamente aparece una figura que muestra los diferentes ángulos de incidencia considerados, correspondientes a las direcciones de procedencia de oleaje más frecuentes: E, ESE, SE y S.

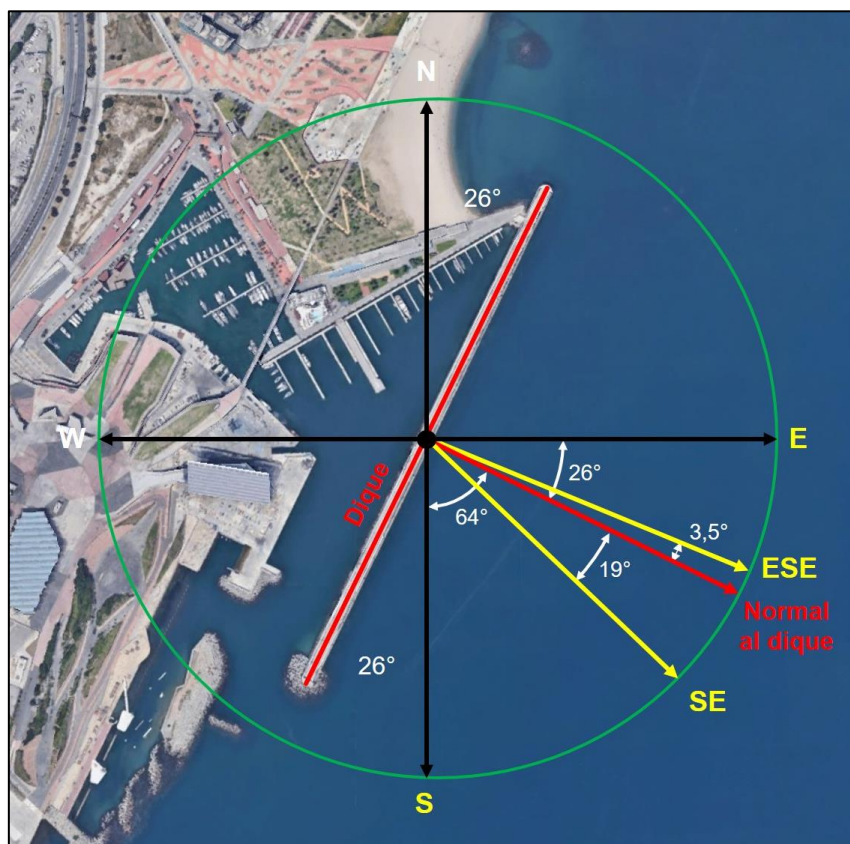


Figura 19. Ángulos de incidencia.

Sin embargo, solo se va a realizar el cálculo con la dirección de procedencia de oleaje más frecuente y que provoca mayores alturas de ola, el Este.

Por lo tanto, los datos que se tienen para realizar la propagación del oleaje en régimen extremal direccional del este son los siguientes.

Dirección	Hs (m)	T <sub>m</sub> (s)	Ángulo (°)
E	9,70	11,61	26

Tabla 14. Datos para calcular la propagación de oleaje en régimen extremal.

Se recuerda que estos datos son los recogidos por la Boya de Barcelona II.

### 5.1.4. Resultados

Al realizar la propagación de oleaje, surgió un problema: en este caso, la profundidad de 68 metros a la que se localizaba la boya no eran aguas profundas ya que es inferior a 105 metros como se aprecia en la tabla siguiente.

AGUAS PROFUNDAS			
L <sub>o</sub>	d <sub>o</sub>	C <sub>o</sub>	C <sub>g0</sub>
210 m	105 m	18,11 m/s	9,06 m/s

Tabla 15. Resultados en aguas profundas.

Como consecuencia, no se podía realizar correctamente la propagación de oleaje y se debía buscar el valor de altura de ola significativa y ángulo en aguas profundas para que a 68 metros se obtuvieran los valores de la Tabla 14. Hay que recordar que el periodo es constante y no hay que cambiarlo.

Tras realizar una propagación inversa, se determinó que los datos de partida necesarios para realizar la propagación de oleaje desde aguas profundas eran los siguientes.

Dirección	Hs (m)	T <sub>m</sub> (s)	Ángulo (°)
E	10,20	11,61	27

Tabla 16. Datos de partida para calcular la propagación de oleaje en régimen extremal.

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos y aparecen las diferentes alturas de ola asociadas a cada profundidad. Es importante destacar que en una profundidad entre 10 y 20 m la ola comienza a romper por fondo y a partir de entonces los resultados válidos son los de altura de ola en rotura (H<sub>b</sub>). Se han señalado en color verde las celdas con las alturas de ola correctas y definitivas.

d (m)	L (m)	C (m/s)	C <sub>g</sub> (m/s)	α (°)	K <sub>s</sub>	K <sub>r</sub>	H <sub>s</sub> * (m)	H <sub>b</sub> (m)
200	210	18,11	9,06	27,0	1,00	1,00	10,2	156,0
150	210	18,11	9,07	27,0	1,00	1,00	10,2	117,0
100	209	18,02	9,28	26,9	0,99	1,00	10,1	78,0
80	207	17,83	9,59	26,5	0,97	1,00	9,9	62,4
<b>68</b>	<b>204</b>	<b>17,57</b>	<b>9,90</b>	<b>26,1</b>	<b>0,96</b>	<b>1,00</b>	<b>9,7</b>	53,0
50	194	16,73	10,51	24,8	0,93	0,99	9,4	39,0
40	185	15,88	10,79	23,5	0,92	0,99	9,2	31,2
30	169	14,58	10,84	21,4	0,91	0,98	9,1	23,4
20	146	12,60	10,31	18,4	0,94	0,97	9,3	15,6
10	109	9,40	8,51	13,6	1,03	0,96	10,1	7,8
<b>8,5</b>	<b>102</b>	<b>8,74</b>	<b>8,02</b>	<b>12,7</b>	<b>1,06</b>	<b>0,96</b>	10,4	<b>6,6</b>
8	99	8,50	7,84	12,3	1,07	0,95	10,5	6,2
7	93	7,99	7,45	11,6	1,10	0,95	10,7	5,5
5	79	6,82	6,49	9,8	1,18	0,95	11,5	3,9

Tabla 17. Resultados de propagación de oleaje para el régimen extremal direccional del este.

Por otro lado, se comprueba que el valor de 10,20 m de altura de ola significativa y 27 ° de ángulo de incidencia determinados anteriormente corresponden a los valores en aguas profundas para que al realizar la propagación de oleaje se obtengan 9,70 m de

altura de ola significativa y  $26^\circ$  de ángulo de incidencia a 68 m de profundidad, donde se encuentra la Boya de Barcelona II.

Así pues, la altura de ola significativa corregida a pie de dique que se usará en futuros cálculos es  $H_s^* = 6,6$  m

## 6. DINÁMICA LITORAL

### 6.1. EVOLUCIÓN DEL LITORAL

La comarca del Maresme y áreas próximas, donde se sitúa Port Fòrum, ha sido intensamente urbanizada a lo largo de las últimas décadas, en especial su franja litoral. El paisaje natural costero estaría formado por largas playas interrumpidas por franjas de afloramientos rocosos (granito) donde se formaron diversas calas en medio de grandes acantilados. En la actualidad, el relieve costero ha sido radicalmente transformado con la construcción de diques, escolleras y puertos deportivos. Se presentan sus consecuencias en la dinámica del relieve costero y los procesos actuales.

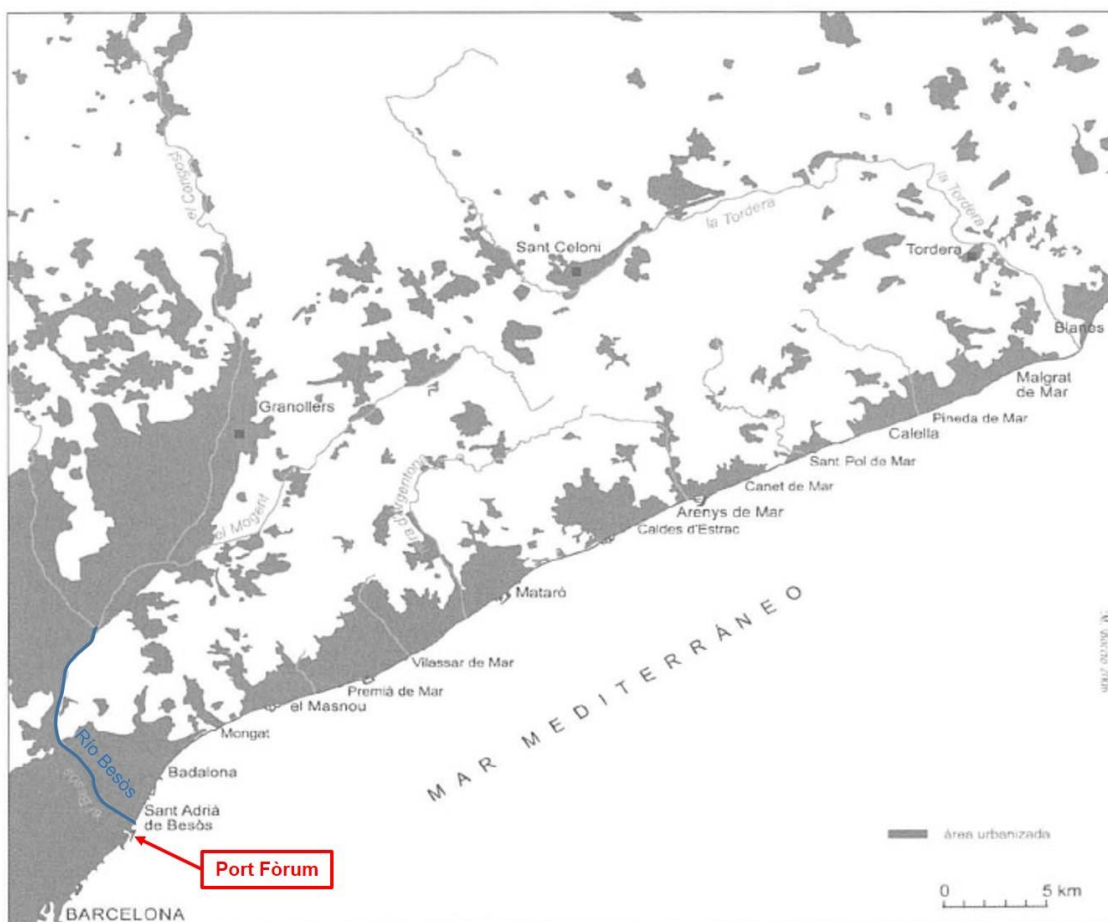


Figura 20. Mapa del espacio urbanizado de la comarca del Maresme y áreas próximas.

Los ríos con mayor caudal como el río Besòs, han modelado pequeños valles fluviales y han desarrollado deltas con lagunas, marismas y dunas. Los sedimentos transportados por los ríos han sido importantes por las características de los materiales de sus cuencas. Las corrientes marinas han redistribuido estos materiales dando lugar a la formación de largas playas. Su dirección dominante es de NE a SW.

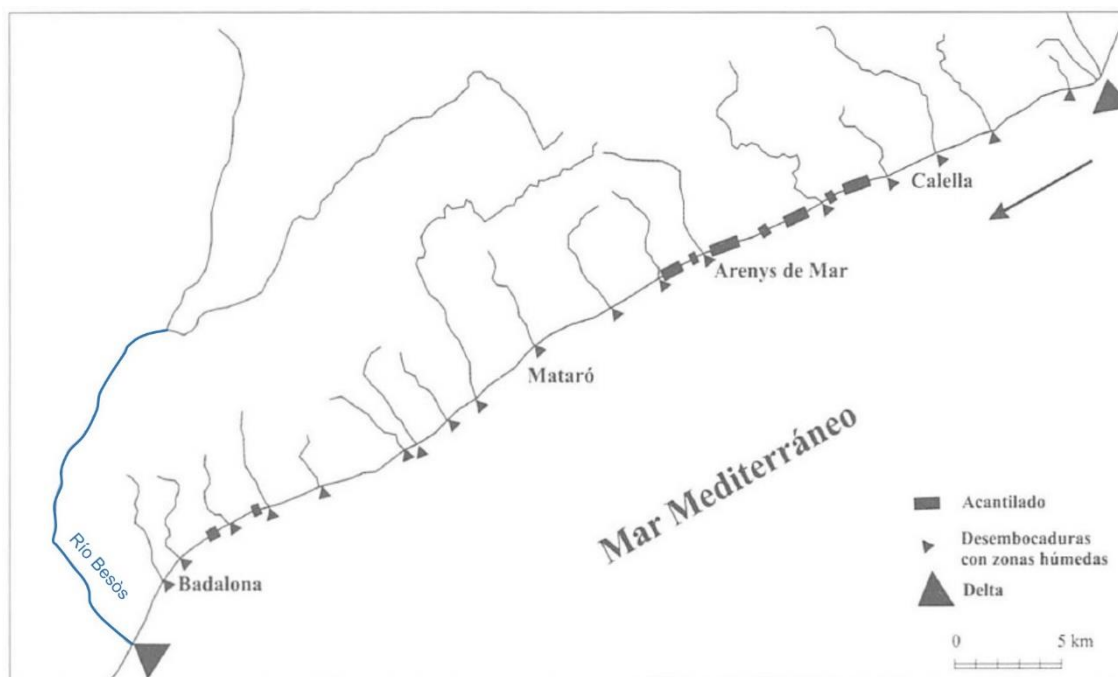


Figura 21. Mapa de localización de los acantilados, de los deltas y de las desembocaduras de la costa del Maresme sin la intervención humana.

Hasta mediados del siglo XIX, la dinámica geomorfológica del litoral del Maresme era regida fundamentalmente por los fenómenos naturales: corrientes marinas, oleaje, temporales y desbordamientos de los cursos fluviales.

Para la interpretación de las formas del relieve litoral de la comarca del Maresme y alrededores, se han establecido tres etapas. La primera está definida por los aprovechamientos agrícolas, en la que se desecaron zonas húmedas y se destruyeron o repoblaron los arenales. La segunda etapa, iniciada en la década de 1840, está caracterizada por la construcción de la línea de ferrocarril a lo largo de la costa del Maresme. La tercera etapa, partir de la década de 1950, está marcada por la urbanización masiva del litoral y el uso intensivo de los espacios costeros, que han comportado una transformación total del área litoral estudiada y una intervención continuada en la dinámica de estos paisajes.

Las consecuencias de todo esto es la destrucción de gran parte de los relieves del litoral y el bloqueo de los procesos naturales que modelan la morfología propia de ese ambiente. Por ejemplo, la construcción de los puertos ha motivado cambios en los efectos de la dinámica de las corrientes marinas.

Durante las dos primeras etapas se registra una transformación paisajística que comporta una destrucción de morfologías litorales. En este caso no se suelen considerar perjuicios indirectos sobre la actividad humana. Sin embargo, en la tercera etapa se constatan efectos altamente negativos para los intereses de la población humana en un corto periodo de tiempo. Hay puertos deportivos, pero se vacían las playas de arena. Éstas se pueden regenerar, pero a un coste muy elevado y, lo que es peor, de manera continuada.

Son numerosas las zonas de playa del litoral del Maresme convertidas en escollera y otras se han estrechado considerablemente. Sólo se mantienen las playas situadas al

noreste de los puertos, donde las corrientes marinas acumulan la arena al ser retenida por los diques.

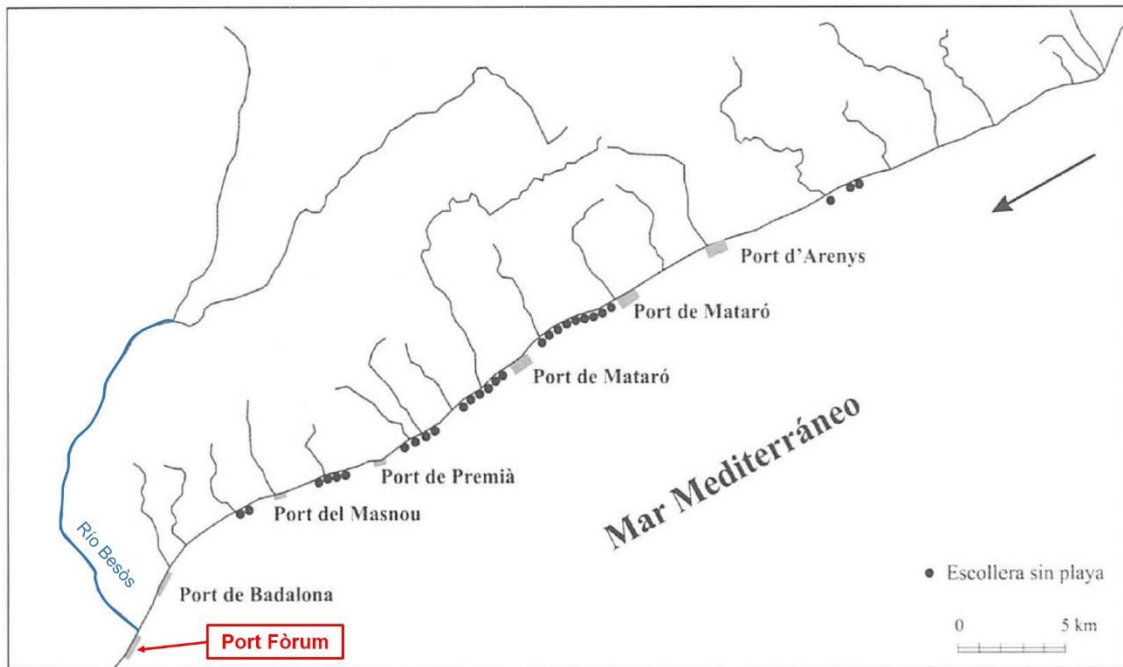


Figura 22. Mapa de la localización de los puertos deportivos y de la costa con escolleras sin playa del Maresme.



## 7. REFERENCIAS

PUERTOS DEL ESTADO (2019). *Oceanografía*.

<<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>> [Consulta: 23/07/2019]

PANAREDA CLOPÉS, J. M. y BOCCIO SERRANO, M. “Efectos de la dinámica litoral inducidos por la actividad humana en áreas urbanizadas: el caso del Maresme (Barcelona)” en *Territoris* (2007-2008), 7: 55 - 68.

<<https://www.raco.cat/index.php/Territoris/article/view/229581>> [Consulta: 21/06/2019]

