



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESIS D'ESPECIALITAT

### Títol

**ESTADO ACTUAL, PREVISIÓN Y EFECTO DEL  
REBASE EN LAS PRINCIPALES INFRAESTRUCTURAS  
DEL LITORAL CATALÁN ANTE UN CAMBIO DEL  
NIVEL MEDIO DEL MAR**

### Autor/a

**JOSÉ VICENTE SAURA FERRERES**

### Tutor/a

**FRANCESC XAVIER GIRONELLA I COBOS  
AGUSTÍN SÁNCHEZ-ARCILLA CONEJO**

### Departament

**ENGINYERIA HIDRÀULICA, MARÍTIMA I AMBIENTAL**

### Intensificació

**ENGINYERIA MARÍTIMA**

### Data

**OCTUBRE 2010**

# **ESTADO ACTUAL, PREVISIÓN Y EFECTO DEL REBASE EN LAS PRINCIPALES INFRAESTRUCTURAS DEL LITORAL CATALÁN ANTE UN CAMBIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR**

Tesina de especialidad  
Autor: José Vicente Saura Ferreres

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

Universitat Politècnica de Catalunya



Dirigida por:

**Francesc Xavier Gironella i Cobos**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

**Agustín Sánchez-Arcilla Conejo**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Octubre 2010



“EL FUTUR NO ÉS UN REGAL, ÉS UNA CONQUESTA”

ROBERT KENNEDY



## AGRADECIMIENTOS

Esta tesina es el primer paso para finalizar el largo camino que emprendí hace unos años, un camino lleno de sacrificios y momentos duros, pero también con muchas experiencias inolvidables. Sería imposible poder enumerar a todas las personas que de una manera u otra han hecho posible que llegue este momento, y por ello quisiera mostrar mi más sincero agradecimiento a todas ellas.

A mis tutores, Xavier Gironella Cobos y Agustín Sánchez-Arcilla, por su paciencia, sus consejos y su comprensión, ayudándome en todo lo posible para que pudiese acabar este trabajo a tiempo. Por confiar en mí y otorgarme una beca para cursar el Máster en Ingeniería y Gestión Portuaria.

A todos mis amigos de caminos, con los que he compartido día a día un sinfín de horas de estudio, momentos de diversión y horas de bar que jamás olvidaré. Porque sin ellos no hubiera sido lo mismo, y porque todos juntos estamos consiguiendo nuestro reto, logrando nuestro sueño.

A mis amigas/os de Vinaròs, por su paciencia y comprensión al no haber podido estar con ellos todo lo que me hubiera gustado. Por los ánimos y la amistad que me han proporcionado, y por desear tanto como yo este momento.

Y finalmente, a mi familia, a mis cuatro mujeres, porque también son parte de esta tesina. Ellas han sido mi verdadero apoyo y por las que realmente he seguido adelante. Siempre han sido un refugio donde evadirme en los momentos flojos. Mis dos hermanas, Begoña y Rosa M<sup>a</sup>, por sus consejos y por estar siempre ahí, ayudándome en todo lo que pueden y más. A mi “mamita”, por sacrificarse y luchar día a día por mí, para poder darme una carrera, y por enseñarme todo lo necesario para poder caminar por la vida; soy lo que soy gracias a ella. Y por último, a mi “yaya”, mi ángel de la guarda, ejemplo a seguir por su espíritu luchador; a tí, allá donde estés.

A todos vosotros, gracias.



**Título:** Estado actual, previsión y efecto del rebase en las principales infraestructuras del litoral catalán ante un cambio del nivel medio del mar.

**Autor:** José Vicente Saura Ferreres

**Tutores:** Francesc Xavier Gironella i Cobos y Agustín Sánchez Arcilla

**Palabras clave:** litoral catalán, puertos, rebase, cambio climático, nivel medio del mar.

## RESUMEN

Los puertos, mediante sus actividades ligadas al comercio, la industria y el ocio, son centros generadores de actividad económica y de creación de ocupación. Son infraestructuras que desarrollan las operaciones portuarias y logísticas relacionadas con el transporte marítimo y su interconexión con otros modos de transporte. De ahí su gran importancia en los sectores económicos locales y autonómicos.

La costa catalana se caracteriza por poseer un alto número de puertos sometidos directamente a la acción del mar. En todos los casos, los diques de abrigo tienen asociadas determinadas actividades en su trasdós incompatibles con la existencia de flujos de oleaje sobre las mismas, por lo que uno de los principales objetivos a cumplir por los mismos es la de evitar un rebase excesivo, capaz de provocar la inoperatividad o averías en sus infraestructuras.

En la fase de diseño de los puertos, uno de los principales parámetros para combatir el rebase es la cota de coronación de los diques, que se puede ver reducida a medida que el nivel medio del mar aumenta como consecuencia de un casi evidente cambio climático. Se estima que para el año 2050 se tendría un ascenso del nivel medio de +0.20 m, mientras que para finales de siglo se puede considerar que un ascenso de +0.50 m es un escenario más que razonable, aunque algunas hipótesis más pesimistas (pero no descartables) vaticinan subidas de hasta +1.00 m [1]. Ante estas predicciones, se prevé que el rebase sufrirá importantes modificaciones con respecto a los valores actuales.

La evidencia de que el cambio climático es una realidad, permite tomar conciencia de la necesidad de emprender acciones para adaptarse a sus efectos con suficiente antelación. Así pues, especialmente relevante resulta ser el análisis de todas aquellas infraestructuras que fueron calculadas para unos niveles del mar y unas condiciones de dinámicas generales que van a verse modificadas en el horizonte de su vida útil esperada.

Consecuentemente y a pesar que el análisis de estrategias de adaptación en el sector portuario requiere estudios de detalle para cada uno de los puertos, pues los elementos que condicionan los impactos son de carácter local, la presente tesina se desarrolla con la idea de realizar un análisis de sensibilidad a nivel global del mayor número de estructuras portuarias catalanas posibles frente al incremento del NMM. La intención es elaborar un mapa de alarmas que permita resaltar aquellos puertos en los que será necesario actuar de manera más inminente.



**Title:** Current status, forecasting and impact of the overtopping in the main infrastructure of the Catalan coast due to a change of mean sea level.

**Author:** José Vicente Saura Ferreres

**Supervisors:** Francesc Xavier Gironella i Cobos y Agustín Sánchez Arcilla

**Keywords:** Catalan coast, ports, overtopping, climate change, mean sea level.

## ABSTRACT

Harbours are centers which promote great economic activity and create thousands of jobs thanks to their activities, linked to the trade, the industry and the leisure time. They are infrastructures which develop logistic and harbour operations related to the maritime transport and its interconnection with other means of transport. Therefore, they are of great importance in the economic, local and autonomic, sector.

The Catalan coast stands out due to the large number of harbours which receive, directly, the wave forces coming from the off-shore. In each and every case, the jetties aim is to prevent an excessive overtopping which would cause their ineffectiveness or breakdowns in their infrastructures.

In the harbours design process, one of the most important parameters to avoid the overtopping is the crown height of the levees, which may be reduced due to the climatic change. The forecast for 2050 is the increase of the sea level of about +0.20 meters, while in 2010 it is foreseen to increase +0.50 m, even though the most pessimistic forecasts foresee an increase of +1.00 meter in a hundred years [1]. After the previous forecasts, it is for sure that the overtopping will suffer great modifications regarding the current values.

The evidence of the climatic change is the reason which makes people become conscious of the need of undertaking actions to adapt the infrastructures to its effect in advance. Thereafter, it is of great relevance to analyze all the infrastructures which were calculated for a specific sea level and dynamic conditions which will be modified in the horizon of their useful life.

Consequently, this Thesis is developed with the idea of doing a sensibility analysis of the harbours infrastructure in most of the Catalan ports, susceptible to the increase in the average sea level. Although the analysis of the adaption strategies in the harbours sector would also require a detailed study for each and every harbour because of their local parameters, the labor of this Thesis is to draw up an alarm map which allows to highlight those ports in which urgent works will be necessary.



## ÍNDICE

<b>Capítulo 1. Introducción y objetivos.....</b>	<b>1</b>
1. Contexto .....	1
2. Antecedentes .....	2
3. Objetivos.....	4
4. Metodología de trabajo .....	4
5. Estructura de la tesina .....	5
<b>Capítulo 2. El cambio climático.....</b>	<b>7</b>
1. Introducción .....	7
2. El cambio climático .....	8
3. Previsibles cambios en los forzamientos.....	10
3.1 Introducción general a los forzamientos .....	10
3.2 Análisis de los cambios observados.....	11
3.2.1 Nivel del mar .....	12
3.2.2 Magnitud del oleaje .....	14
3.2.3 Dirección de abordaje del oleaje.....	14
4. Estudio de los efectos del cambio climático sobre el litoral .....	14
<b>Capítulo 3. El rebase.....</b>	<b>15</b>
1. Definición de rebase. El fenómeno físico .....	15
1.1 El remonte (Run-up).....	15
1.2 El rebase.....	16
2. Tipos de rebase .....	17
3. Principales parámetros y procesos del rebase .....	17
3.1 Parámetros influyentes en el rebase .....	18
3.1.1 Características del oleaje (y del fondo).....	18
3.1.2 Configuración en planta/batimetría local.....	19
3.1.3 Propiedades del fluido .....	20
3.1.4 Características del dique .....	20

3.1.5	Características del viento .....	21
3.2	Procesos influyentes en el rebase.....	21
4.	Estudio del rebase .....	22
4.1	Modelos numéricos.....	23
4.2	Modelado físico.....	24
5.	El rebase en el diseño de diques de abrigo.....	24
5.1	Clima extremal versus clima medio.....	26
5.2	Períodos de retorno .....	27
5.3	Descargas medias de rebase tolerables .....	28
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Análisis de Sensibilidad .....</b>	<b>31</b>
1.	Introducción .....	31
2.	Posibles afecciones del cambio climático en los puertos.....	32
2.1	Cambios en las borrascas.....	32
2.2	Subida del nivel medio del mar .....	33
3.	Formulación del problema.....	34
4.	Análisis de sensibilidad .....	36
4.1	Herramientas de cálculo propuestas por el Eurotop (European Overtopping Manual) .....	36
4.1.1	Métodos empíricos - Eurotop.....	36
4.1.2	PC-Overtopping.....	37
4.1.3	Neural Network (Redes Neuronales) .....	37
4.1.4	Elección del método de cálculo .....	38
4.2	Uso de la herramienta de cálculo .....	39
4.2.1	Entrada de los datos y salida de resultados .....	41
4.3	Obtención de las características del oleaje .....	43
4.4	Simulación de la subida del nivel medio del mar .....	46
4.5	Resultados.....	48
4.5.1	Ficha informativa de cada puerto.....	48
4.5.2	Análisis de los resultados obtenidos.....	50
4.5.3	Mapa de sensibilidad .....	61
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Introducción a las Estrategias de adaptación.....</b>	<b>67</b>
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>69</b>

---

<b>Capítulo 7. Futruas líneas de investigación .....</b>	<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEJOS.....</b>	<b>79</b>
Fichas resumen/informativas de cada puerto .....	79



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Secuencia de rebase en el Port Olímpic durante el temporal del 11 de noviembre de 2001 [4].	2
<b>Figura 2.</b> Rotura de las losetas del pavimento del Port Olímpic [4].	3
<b>Figura 3.</b> Rebase en el puerto de Blanes durante el temporal de 26 de Diciembre de 2008 [6].	3
<b>Figura 4.</b> Barco destrozado como consecuencia del temporal de 26 de Diciembre de 2008 [6].	3
<b>Figura 5.</b> Tendencias de las temperaturas anuales en cuatro períodos de 1901 a 2000. El grado de la tendencia está representado por el tamaño del círculo y el sentido por el color rojo para crecimiento, azul para descenso y verde para constancia [10].	8
<b>Figura 6.</b> Anomalías absolutas de la temperatura media anual con respecto a la media del período 1961-1990 en el NE de España (°C) (1869-1998) [11].	9
<b>Figura 7.</b> Variación del nivel del mar a partir del mareógrafo del puerto de Santander [11].	10
<b>Figura 8.</b> Izquierda: previsión del incremento de la temperatura global en °C para varios escenarios [13].	10
<b>Figura 9.</b> Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el período 1958-2001 [1].	11
<b>Figura 10.</b> Tendencias de nivel del mar obtenidas a partir de datos del satélite TOPEX entre 1993 y 2005 [14].	12
<b>Figura 11.</b> Medidas de las variaciones del NMM realizadas con el satélite TOPEX-POSEIDON [1].	13
<b>Figura 12.</b> Definición de altura de rebase $R_{u2\%}$ [19].	16
<b>Figura 13.</b> Principales variables que intervienen en el fenómeno del rebase [3].	16
<b>Figura 14.</b> Esquema de los principales parámetros involucrados en el rebase [22].	18
<b>Figura 15.</b> Tipos de rotura según el número de Iribarren [23].	18
<b>Figura 16.</b> Esquema de la influencia de la batimetría en el rebase. Derecha: caso en el que el puerto se “abre” al mar; Izquierda: caso en el que el puerto se “cierra” a la costa (fuente propia).	19

<b>Figura 17.</b> Esquema de las posibles afecciones en la ingeniería marítima como consecuencia del cambio climático y sus correspondientes parámetros de estudio (fuente propia).....	31
<b>Figura 18.</b> Croquis del cambio en la dirección de abordaje del oleaje debido al giro de las borrascas (fuente propia).....	33
<b>Figura 19.</b> Situación de los puertos analizados en el estudio (fuente propia). .....	35
<b>Figura 20.</b> Esquema de cálculo de la red neuronal para el rebase (fuente propia). .....	38
<b>Figura 21.</b> Pasos a seguir para empezar a ejecutar el programa. ....	39
<b>Figura 22.</b> Distintas opciones propuestas por el programa para asimilar la estructura objeto de análisis. ....	40
<b>Figura 23.</b> Hoja de cálculo para una de las secciones que ofrece el programa. ....	42
<b>Figura 24.</b> Situación de los puntos de medida a lo largo del litoral catalán con instrumentación de la Generalitat de Catalunya (puntos rojos) y de puertos del Estado (puntos amarillos) [38]. ....	44
<b>Figura 25.</b> Ejemplo de la ficha resumen/informativa realizada para cada puerto estudiado (fuente propia). ....	49
<b>Figura 26.</b> Rebases picos en la tormenta de noviembre de 2001 [4]. ....	52
<b>Figura 27.</b> Tendencia exponencial de la evolución del rebase para algunos de los puertos analizados según diferentes incrementos del nivel medio del mar: +0.20 m, +0.50 m y +1.00 m (fuente propia). ....	54
<b>Figura 28.</b> Ejemplo de puertos con varias secciones en los que el incremento de la tasa media de rebase es mayor en la sección de menor calado (fuente propia). ....	55
<b>Figura 29.</b> Evolución de la tasa media de rebase para el puerto de Barcelona (fuente propia). ....	56
<b>Figura 30.</b> Evolución de la tasa media de rebase para los puertos de Barcelona y Tarragona (fuente propia). ....	57
<b>Figura 31.</b> Tendencia lineal que se da en el puerto de Palamós (fuente propia). ....	58
<b>Figura 32.</b> Evolución del rebase para los puertos Port Olímpic y Port Fórum (fuente propia). ....	58
<b>Figura 33.</b> Tendencias cuasi lineales o muy poco exponenciales que se dan en algunos puertos del litoral catalán (fuente propia).....	60

<b>Figura 34.</b> Aumento de la tasa media del caudal de rebase (en %) respecto del valor actual para una subida del NMM de +0.20 m (fuente propia).....	61
<b>Figura 35.</b> Aumento de la tasa media del caudal de rebase (en %) respecto del valor actual para una subida del NMM de +0.50 m (fuente propia).....	62
<b>Figura 36.</b> Aumento de la tasa media del caudal de rebase (en %) respecto del valor actual para una subida del NMM de +1.00 m (fuente propia).....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el período 1958-2001 para la costa catalana [1]. .....	12
<b>Tabla 2.</b> Período de retorno según el carácter de la obra [23]. .....	27
<b>Tabla 3.</b> Límites de rebase para peatones [23]. .....	28
<b>Tabla 4.</b> Límites de rebase para vehículos [23]. .....	28
<b>Tabla 5.</b> Límites de rebase para la propiedad detrás de la defensa [23]. .....	29
<b>Tabla 6.</b> Niveles Característicos de las aguas libres exteriores en las zonas costeras españolas [41]. .....	48
<b>Tabla 7.</b> Límites de rebase para daños en la coronación o en la parte posterior [23]. .....	51
<b>Tabla 8.</b> Resumen de las tendencias de la evolución del rebase con los porcentajes de aumento para los casos 1, 2 y 3 (fuente propia). .....	60



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1. Contexto

---

España, y en concreto Cataluña, marco territorial del estudio de la presente tesina, se caracteriza por poseer un alto número de puertos situados fuera de la protección natural que ofrecen bahías y estuarios, y por lo tanto, sometidos directamente a la acción del mar. En ellos, la actividad portuaria se hace simplemente posible gracias a la existencia de infraestructuras de abrigo que permiten la creación de zonas de agua tranquila, necesarias para garantizar una mínima operatividad y seguridad.

Sin embargo, en los últimos años se ha observado un incremento de los daños producidos en los paseos marítimos y en los puertos de todo el litoral catalán como consecuencia directa del aumento del rebase que han sufrido las obras marítimas.

El fenómeno del rebase se produce cuando la cota superior de la lámina de agua supera la cota de coronación del dique o francobordo, en cuyo caso el agua pasa de la zona de barlomar a la zona de sotamar del dique [2]. Así pues, al ser la cota de coronación de los diques uno de los parámetros determinantes en el rebase, se hace necesario estudiar la influencia sobre este fenómeno ante un posible incremento del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático. Si se produce dicha variación ascendente del nivel del mar, el francobordo efectivo de los diques de abrigo disminuirá, por lo que habrá que estudiar cómo evoluciona el rebase ante tal situación.

## 2. Antecedentes

Con los temporales, la problemática principal en los puertos viene asociada a la mala funcionalidad u operatividad que tienen algunos diques de abrigo. En concreto, la mayor parte de los problemas vienen siempre asociados a fenómenos de gran rebase, que pueden producir tanto fallos operativos, como estructurales, afecciones a otras infraestructuras portuarias, elevados daños materiales e incluso poner en peligro la seguridad de las personas. Un buen ejemplo de ello fueron las consecuencias de los temporales que sacudieron la costa catalana en noviembre de 2001 y diciembre de 2008.

En este apartado, con la visión de las últimas consecuencias y problemas a lo largo del litoral catalán, tanto en el ámbito portuario como en el de costas, que tienen hoy en día los temporales marítimos, se pretende sensibilizar y hacer reflexionar sobre el posible aumento, tanto en número como en frecuencia, de los daños que un temporal con idénticas condiciones de oleaje a las actuales, podría provocar en los puertos catalanes si disminuye la cota de coronación de los diques de abrigo como consecuencia de una subida del nivel medio del mar.

El Port Olímpic fue uno de los puertos más castigados por el temporal de noviembre de 2001. El oleaje rebasó completamente el dique de abrigo alcanzándose caudales de rebase importantísimos (figura 1), lo que supone un gran riesgo para las embarcaciones atracadas en el interior del puerto.



Figura 1. Secuencia de rebase en el Port Olímpic durante el temporal del 11 de noviembre de 2001 [3].

En dicho puerto, el fuerte impacto del oleaje contra el suelo provocó abundantes roturas en el pavimento. En algunos casos, el mar tuvo suficiente fuerza como para arrancar las losetas del pavimento. La figura 2 muestra el desprendimiento de algunas de las losas del paseo peatonal del dique de abrigo y del muelle adosado.

En diciembre de 2008 se produjo el último gran temporal de levante que afectó a la costa catalana, el peor en los últimos 50-70 años [4].

En Blanes, el temporal afectó a las playas, al paseo marítimo y sobre todo a las instalaciones del puerto, donde varios barcos se hundieron y otros tantos sufrieron serios daños (figuras 3 y 4). La agitación producida en la dársena debido al rebase fue tal que provocó la rotura de muchos de los cabos, dejando los barcos a la deriva.



*Figura 2. Rotura de las losetas del pavimento del Port Olímpic [3].*



*Figura 3. Rebase en el puerto de Blanes durante el temporal de 26 de Diciembre de 2008 [5].*



*Figura 4. Barco destrozado como consecuencia del temporal de 26 de Diciembre de 2008 [5].*

### 3. Objetivos

---

La intención principal de este trabajo es avanzar en el estudio de la afección del rebase en los diques de abrigo de la costa catalana ante una subida del nivel medio del mar, como consecuencia del cambio climático. Para ello, los objetivos planteados son los que se presentan:

- 1) Plantear las posibles afecciones del cambio climático en las infraestructuras portuarias del litoral catalán.
- 2) Analizar, a partir de la información necesaria y disponible, las tendencias de cambio del rebase en los diques de abrigo del litoral catalán ante una subida del nivel del mar como consecuencia del cambio climático.
- 3) Realizar un análisis de sensibilidad de los puertos que configuran el litoral catalán, destacando aquellos en los que será necesario llevar a cabo unas mayores actuaciones o realizarlas en un período de tiempo menor.
- 4) Sentar las bases para la formulación de una metodología de estrategias de adaptación en las zonas portuarias de la comunidad catalana.

### 4. Metodología de trabajo

---

La metodología de trabajo para la elaboración del mapa de sensibilidad de los puertos catalanes ha sido la siguiente:

- 1) Elaborar un catálogo de las diferentes tipologías estructurales de los diques de abrigo de los puertos catalanes, necesario para el posterior estudio del rebase (anexo 1).
- 2) Realizar una revisión de las herramientas propuestas por el "Manual Europeo de Rebase" para el cálculo del rebase, escogiendo una de ellas para aplicar a todas las estructuras una misma herramienta de cálculo.
- 3) Analizar para cada uno de los puertos estudiados, la tendencia del rebase para diferentes subidas del nivel medio del mar. Para cada una de las tres supuestas subidas, también se han comparado los resultados obtenidos en cada puerto para la tasa media de rebase.

---

## 5. Estructura de la tesina

---

El trabajo realizado se estructura en los siguientes capítulos:

- Los dos primeros (capítulo 2 y 3) hacen referencia al estado del arte tanto del cambio climático como del rebase.
- El capítulo cuatro se presentan las diferentes herramientas de cálculo que podemos utilizar y se escoge una de ellas, explicándose el procedimiento a seguir para estimar los valores de la tasa media de rebase para tres supuestos incrementos del nivel medio del mar. Dentro del mismo capítulo se disertan los resultados obtenidos en el cálculo, razonando las tendencias observadas. Finalmente, después del tratamiento de los datos obtenidos se procede a la elaboración del mapa de vulnerabilidad de los diques de abrigo de los puertos catalanes frente a los tres escenarios considerados.
- En el siguiente capítulo (capítulo 5) se proponen los puntos clave en la redacción de las estrategias de adaptación.
- Finalmente, en los dos últimos capítulos (capítulos 6 y 7), se exponen las conclusiones a las que se ha llegado tras realizar la presente tesina y se plantean las futuras líneas de investigación.



## CAPÍTULO 2. EL CAMBIO CLIMÁTICO

### 1. Introducción

---

El clima de la Tierra ha variado fuertemente de forma natural a lo largo de su historia como consecuencia de diferentes factores (actividad del Sol, variaciones de la órbita de la Tierra, impacto de meteoritos, corrientes oceánicas, erupciones volcánicas intensas, etc.) [6]. A pesar de ello, estos forzamientos de carácter natural son insuficientes para explicar satisfactoriamente las alteraciones observadas en las últimas décadas, las cuales sólo pueden entenderse si se tienen en cuenta los forzamientos de tipo antropogénico. Éstos son muy diversos, e incluyen desde las emisiones de distintos tipos de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, etc.), hasta cambios en el uso del suelo [7].

Desde hace dos décadas se está trabajando intensamente en el denominado "cambio climático", entendido como un calentamiento desordenado e incontrolado de la atmósfera terrestre debido a la acción del hombre y por tanto de escala corta, es decir del orden de décadas. Sin embargo, muchos expertos prefieren hablar de variabilidad climática en lugar de cambio climático, ya que si se repiten las pautas climáticas, está será la sexta vez que ocurre un calentamiento así a lo largo de la historia en periodos de unos 1.100 años a partir de fluctuaciones de sólo 2 grados en la temperatura, mientras que el cambio climático es algo más dramático, con fluctuaciones que pueden alcanzar los 10 grados [8].

Los principales problemas del cambio climático (o de la variabilidad climática) en las zonas costeras se relacionan con potenciales cambios en la dinámica troposférica y oceánica, y en todos los fenómenos y parámetros ligados al tiempo y al clima. Entre estos, los cambios que afectan al comportamiento de las borrascas, los vientos, el oleaje, las corrientes y el nivel del mar, son los que, a su vez, producen un impacto mayor sobre el litoral.

## 2. El cambio climático

Los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [9] indican que las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles están modificando la atmósfera terrestre, que ello ya está afectando al clima de la Tierra, y que es prácticamente seguro que el factor determinante sean las emisiones generadas en el uso de combustibles fósiles. Así se desprende de la tendencia a una mayor concentración de CO<sub>2</sub> durando los siglos XIX y XX, tal y como se señala en el 4º informe de Evaluación del IPCC (2007).

A continuación se indica una larga lista de las claras evidencias sobre el actual proceso de Cambio Climático, bien de carácter global, o a una escala espacial más limitada.

- a) La temperatura media del aire ha tenido una tendencia lineal de aumento positivo de  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$  de 1906 a 2005 [9]. Esta temperatura viene subiendo desde 1861, aunque con grandes variaciones, de tal modo que la mayor parte del incremento se produce en dos períodos, de 1910 a 1950 y de 1976 a 2000, tal y como puede apreciarse en la figura 5.

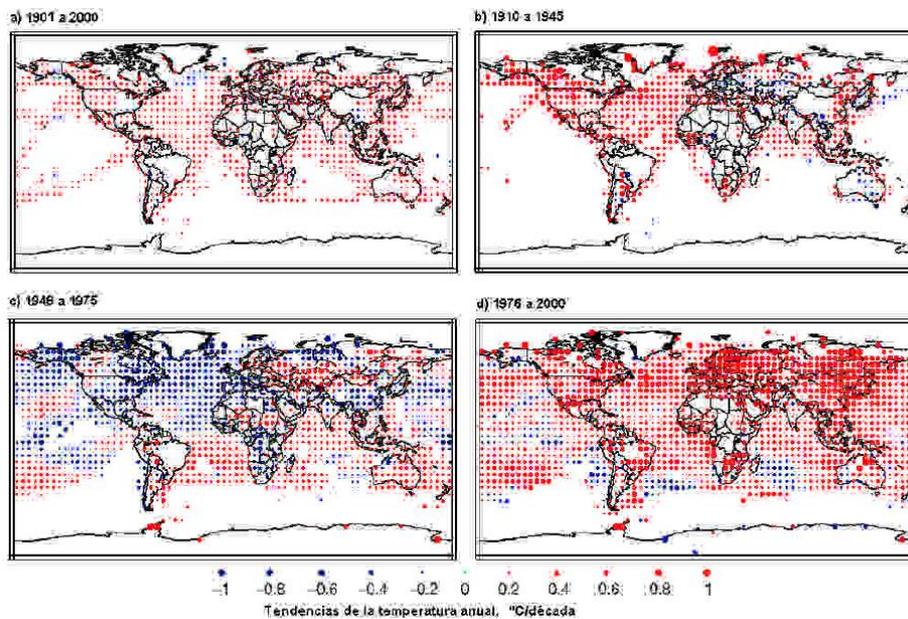


Figura 5. Tendencias de las temperaturas anuales en cuatro períodos de 1901 a 2000. El grado de la tendencia está representado por el tamaño del círculo y el sentido por el color rojo para crecimiento, azul para descenso y verde para constancia [9].

Durante el siglo XX, y particularmente desde la década de los años 70, las temperaturas en España han aumentado de forma general, con una magnitud algo superior a la media global del planeta (figura 6) [10].

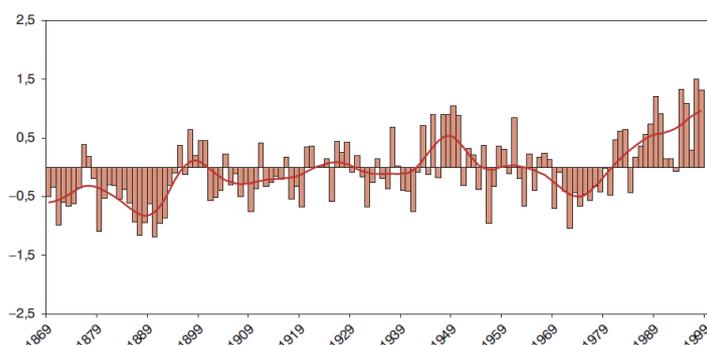


Figura 6. Anomalías absolutas de la temperatura media anual con respecto a la media del período 1961-1990 en el NE de España (°C) (1869-1998) [10].

Las proyecciones climáticas que se obtienen utilizando modelos climáticos globales muestran que a lo largo del siglo XXI se producirá un incremento relativamente uniforme de la temperatura en la Península Ibérica, con una tendencia media de 0,4 °C/década en invierno y de 0,7 °C/década en verano para el escenario menos favorable (A2 del IPCC), y de 0,4 °C y 0,6 °C/década, respectivamente, para el escenario más favorable (B2 del IPCC) [10].

- b) Observaciones desde el año 1961 indican que la temperatura media de los océanos ha aumentado hasta profundidades mayores a los 3000 m. Este calentamiento está provocando su expansión térmica y contribuyendo al aumento del nivel medio del mar [6].
- c) Los glaciares y la cubierta de nieve están disminuyendo en ambos hemisferios, lo que contribuye también al aumento del nivel del mar [6].

Se estima que la contribución de los hielos de Groenlandia a la velocidad de subida del NMM puede haber sido de  $0.23 \pm 0.16$  mm/a, y para el futuro se calcula que la tasa de subida será de  $0.3 \pm 0.2$  mm/a por grado de aumento de temperatura. Por lo que respecta al descenso de los hielos antárticos, para un aumento de la temperatura de 1°C, los resultados varían entre -0.2 mm/a y -0.38 mm/a [11].

- d) El nivel medio global del mar mundial aumentó en un promedio de 1.8 mm (de 1.3 a 2.3) por año entre 1961 y 2003. El cambio fue más rápido entre 1993 a 2003, alrededor de 3.1 (de 2.4 a 3.8) por año. Existe una elevada confianza de que la velocidad del aumento de nivel del mar observado se incrementó desde el siglo XIX al XX [6].

En España, las proyecciones de los modelos elaborados a partir de los datos existentes (figura 7) varían entre 10 y 68 cm para final de siglo, por lo que es razonable esperar un aumento de 50 cm en el NMM, con 1 m como escenario más pesimista [10].

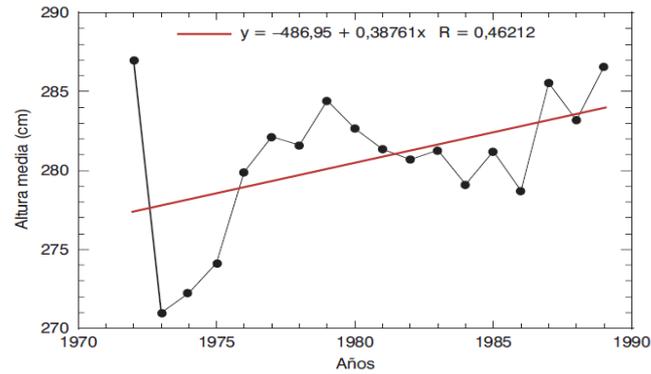


Figura 7. Variación del nivel del mar a partir del mareógrafo del puerto de Santander [10].

Los modelos climáticos, bajo distintos tipos de desarrollo o escenarios, han estudiado los cambios en el clima para el período 1990 al 2100 (figura 8). Con los datos disponibles y el nivel de conocimiento de los fenómenos involucrados, a partir de los modelos desarrollados, las previsiones para el 2100 son [1]:

- Un incremento de la temperatura entre 1,4 y 5,8 °C.
- Un aumento planetario del nivel medio del mar de 0,1 a 0,9 metros.

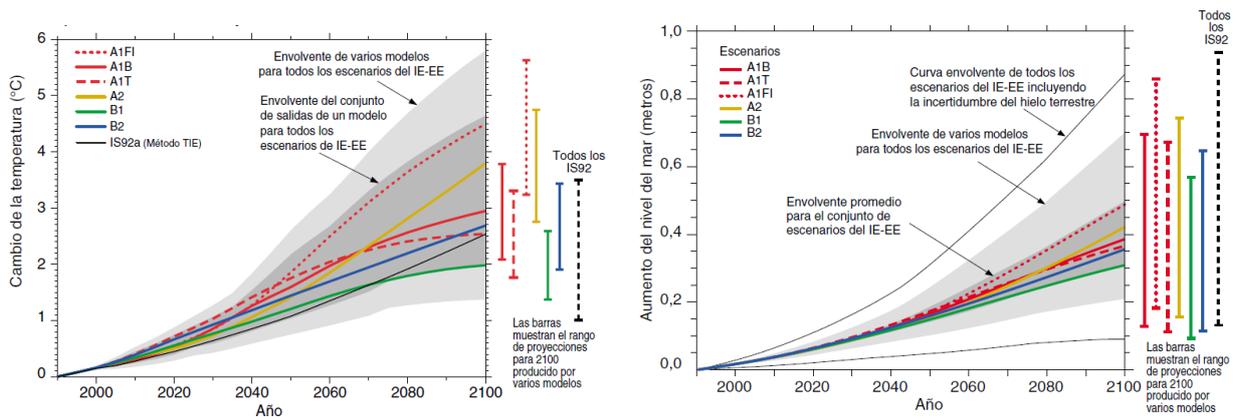


Figura 8. Izquierda: previsión del incremento de la temperatura global en °C para varios escenarios [12]. Derecha: previsiones del incremento global del nivel medio del mar para varios escenarios [12].

### 3. Previsibles cambios en los forzamientos

#### 3.1 Introducción general a los forzamientos

La detección de cambios en los forzamientos (vientos, olas, mareas, corrientes, etc.) que conforman los sistemas costeros españoles entraña una gran dificultad pues requiere la utilización de registros de variables oceanográficas de gran duración, una alta resolución espacial y una alta resolución temporal. Más aún, la complejidad asociada al carácter aleatorio de estos forzamientos, requiere una selección

cuidadosa de cuáles son los índices e indicadores cuyo análisis puede conducir a una mejor evaluación de los impactos producidos por los cambios experimentados en dichos forzamientos [13].

Por otro lado, es necesario indicar que dado el carácter aleatorio de las variables consideradas, cualquier estudio que use estas fuentes de datos debe considerar tanto un análisis estadístico de los valores medios como de los extremos. El análisis de valores medios es importante para evaluar condiciones medias de los elementos que componen la costa o para el análisis de la funcionalidad de las infraestructuras. El análisis de extremos es relevante, como su propio nombre indica, para evaluar condiciones extremas en los elementos costeros así como para el estudio de la estabilidad de las infraestructuras.

### 3.2 Análisis de los cambios observados

En el marco del proyecto realizado por la Universidad de Cantabria para la Oficina Española del Cambio Climático y la Dirección General de Costas del Ministerio del Medio Ambiente, se ha realizado un estudio de re-análisis de 44 años de datos (1958-2001) obtenidos mediante simulación numérica en el que se han considerado las variables meteorológicas y oceanográficas más relevantes para evaluar los posibles efectos del cambio climático en la costa [1].

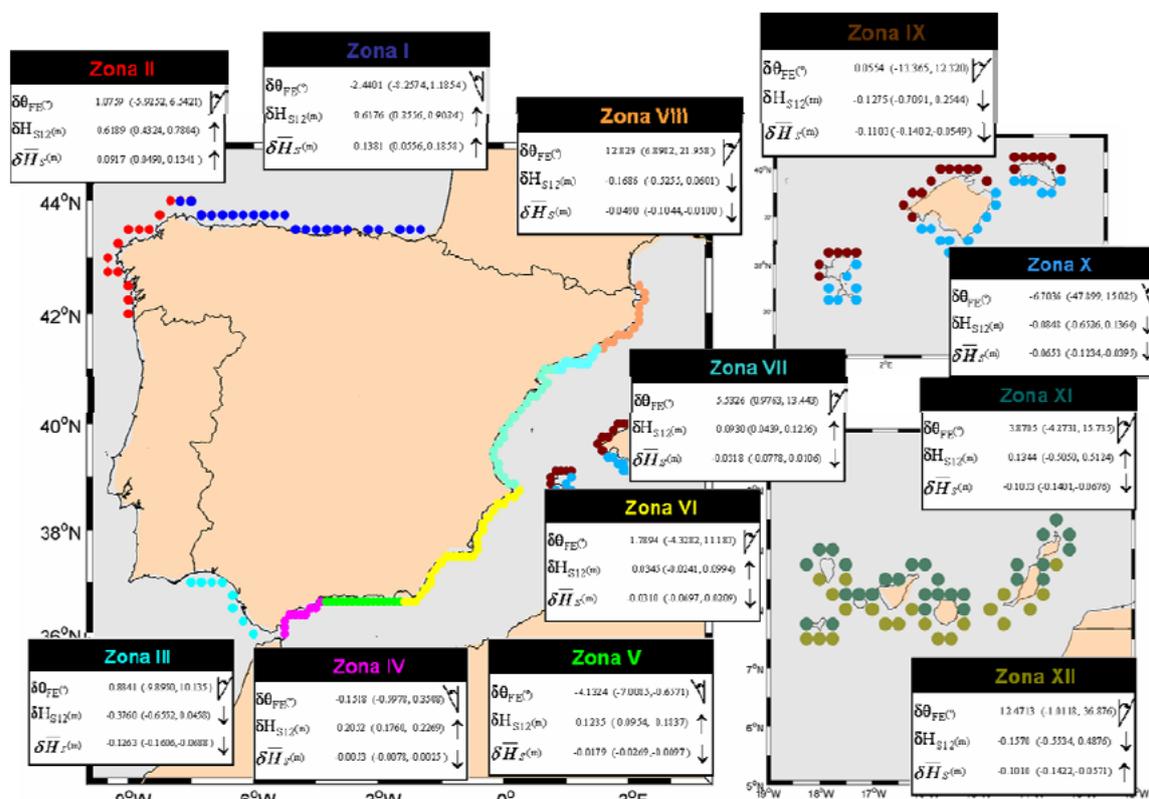


Figura 9. Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el período 1958-2001 [1].

El anàlisi ha servido para estudiar las tendencias de dichas variables y realizar la predicción de la evolución futura de las mismas. Los resultados más relevantes para la costa española se resumen en la figura 9: considerando 12 áreas relativamente homogéneas, se ha representado el valor medio, máximo y mínimo de las variables dirección del oleaje, altura de ola superada 12 horas al año y altura de ola significativa (en la figura se exponen los resultados de régimen medio) [1]. Los valores representativos para la cornisa catalana se adjuntan en la tabla 1:

Tabla 1. Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el período 1958-2001 para la costa catalana [1].

	ZONA VII	ZONA VIII
$\delta\theta_{FE}(^{\circ})$	5.5326 (0.9763, 13.443)	12.829 (6.8982, 21.958)
$\delta H_{S12}(m)$	0.0939 (0.0439, 0.1256)	-0.1686 (-0.5255, 0.0601)
$\delta \bar{H}_S(m)$	-0.0318 (-0.0778, -0.0106)	-0.0490 (-0.01044, -0.0100)

### 3.2.1 Nivel del mar

El nivel del mar es, sin duda alguna, uno de los elementos más importantes a la hora de evaluar los previsible impactos del cambio climático en zonas costeras. Entre otros, dos son los factores primordiales a tener en cuenta: el aumento de volumen por aumento de la temperatura de los océanos y los cambios en el balance hídrico (aportación/detracción de agua de los océanos). Por su puesto, otro factor importante es el debido a fenómenos asociados a la tectónica y a la subsidencia costera.

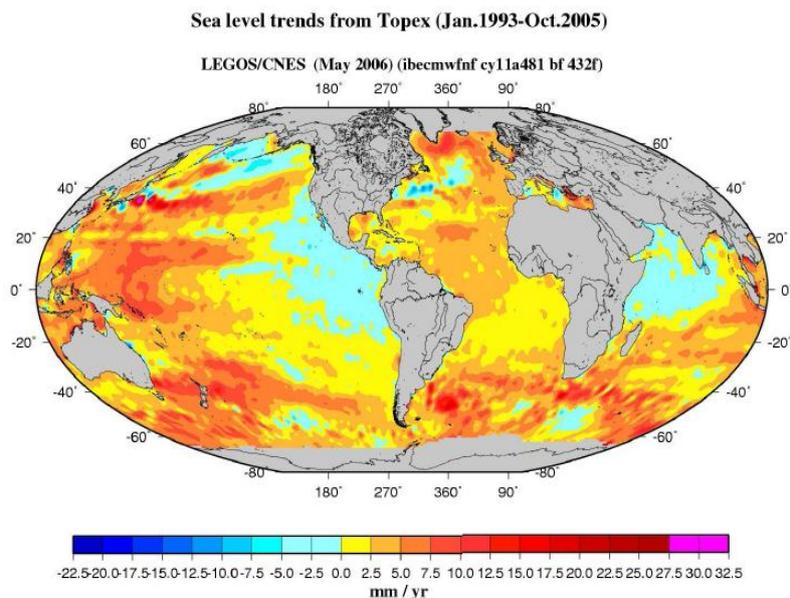


Figura 10. Tendencias de nivel del mar obtenidas a partir de datos del satélite TOPEX entre 1993 y 2005 [13].

Son muchas las evidencias de grandes cambios en el nivel del mar a lo largo de la historia, por lo que el conocimiento del fenómeno ha ido permitiendo tener mayores capacidades de predicción. A pesar de todo, todavía hay algunos factores que no están completamente considerados. Un elemento relevante que añade todavía una mayor problemática, es el hecho de que el nivel del mar varía, ascendiendo o descendiendo de forma diferente en todo el mundo. En la figura 10 se muestran las tendencias del nivel del mar obtenidas a partir de observaciones de altimetría del satélite TOPEX entre 1993 y 2005. Por un lado, se puede comprobar la fuerte variabilidad espacial anteriormente mencionada, viéndose cómo hay zonas con aumentos de hasta 15 mm/año y áreas en las que el nivel del mar muestra una tendencia descendente de hasta 8 mm/año [13].

Los registros proporcionados por el satélite (figura 11) revelan que entre 1993 y 1996 el nivel permaneció estable con un ruido de  $\pm 0.5$  cm, mientras que entre 1997 y 1998 se registraron amplias oscilaciones del nivel del mar global coincidiendo con episodios ENSO (El Niño Southern Oscillation). Entre 1998 y 2000 el registro es irregular, sin una tendencia clara pero posiblemente con una pequeña subida menor a 0.5 mm/año [1].

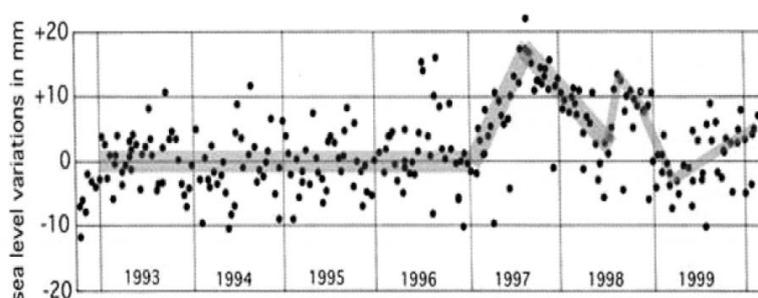


Figura 11. Medidas de las variaciones del NMM realizadas con el satélite TOPEX-POSEIDON [1].

Las previsiones del IPCC para finales de siglo se han ido reduciendo según se disponía de datos más fiables, desde 50-90 cm (IPCC 1998) a 13-68 cm (IPCC 2001). Los valores de INQUA (International Union for the Study of Quaternary Sea-Level Change and Coastal Evolution Commission) y del IGCP (International Geosciences Programme Projects 369 and 437) son aún más modestos: 10-20 cm [1].

A partir de los datos de los mareógrafos existentes a lo largo de la costa española se ha determinado que la tendencia actual de variación del nivel medio del mar en el litoral catalán es de 2.5-3,0 mm/año, por lo que extrapolando al año 2050, se tendría un ascenso del nivel medio de +0.125 a +0,20 m. Este valor se encuentra en la banda media de los contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su último informe, que establecen una variación del nivel del mar entorno de +0.15 m, con una banda de confianza entre +0.1m y +0.25 m [14].

A partir de esos datos se puede considerar que un ascenso de alrededor de 50 cm para finales de siglo es un escenario razonable. Una hipótesis pesimista bastante menos probable pero no descartable sería un ascenso del orden de 1 m, correspondiente con el máximo de algunas predicciones [1].

### 3.2.2 Magnitud del oleaje

A nivel español, se observa en las medidas instrumentales un aumento de la energía del oleaje que llega a la Costa Cantábrica y Gallega. Este aumento es mayor para la rama alta de régimen medio, siendo la magnitud del incremento aun mayor para los sucesos más extremales en la costa de Galicia. Este comportamiento produce una leve tendencia positiva en las duraciones de excedencia de alturas de ola (duración de los temporales) [14].

En la costa mediterránea no se aprecian cambios relevantes en la magnitud de la energía del oleaje, lo que confirma la tendencia a un clima marítimo más suave, aunque sí destacables peculiaridades en Cabo de la Nao debidas a su situación geográfica y en la Costa Brava dada su cercanía al Golfo de León [1].

### 3.2.3 Dirección de abordaje del oleaje

Respecto a la dirección predominante del oleaje, se han producido variaciones en las Islas Baleares y en la Costa Brava, donde se ha detectado una tendencia de giro horario en los oleajes de forma que la dirección predominante tiende a ser más oriental [1].

## 4. Estudio de los efectos del cambio climático sobre el litoral

---

Para llevar a cabo un estudio de los efectos del cambio climático sobre el litoral, el primer paso es detectar los fenómenos océano-meteorológicos de interés afectados por el cambio climático —fenómenos o variables principales— (nivel medio del mar, viento, etc.). Estos fenómenos primarios o principales, a su vez, inducen cambios en procesos o variables que afectan directamente a la costa y a sus infraestructuras —fenómenos o variables secundarios— (erosión, oleaje, etc.). A ambos tipos de variables se les denomina variables climáticas [12].

El paso siguiente consiste en diferenciar y presentar cada elemento de la costa susceptible de ser afectado por el cambio climático. Para ello, se considera la costa dividida en espacios y procesos, que a su vez pueden ser naturales o artificiales. A cada elemento y actividad se le asignan las variables climáticas que interviene y los posibles impactos [12].

## CAPÍTULO 3. EL REBASE

### 1. Definición de rebase. El fenómeno físico

Cualquier estructura marítima interacciona de muy distintas formas con el oleaje incidente. En determinados estados de mar, las olas pueden sobrepasar la estructura produciéndose un flujo de agua que pasa por encima de ellas. Este fenómeno es conocido en ingeniería marítima como el rebase del oleaje.

La ROM [15] define el rebase como la parte del agua que remonta la coronación de un dique o muro como consecuencia del oleaje y que no vuelve directamente al mar. Así pues, antes de profundizar en el rebase vemos que para su comprensión es necesaria la definición previa del remonte (Run-up).

#### 1.1 El remonte (Run-up)

Este fenómeno tiene lugar después de que la ola rompa, produciéndose el movimiento hacia adelante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por el talud [16]. Así pues, se define el remonte como la altura vertical,  $R$ , medida sobre el nivel de agua en reposo, que puede alcanzar la superficie del mar al remontar una obra costera o portuaria [17]. Debido a la naturaleza estocástica de las olas incidentes, cada ola que alcance la estructura dará lugar a un remonte distinto [18]. Es por este motivo que generalmente, para estudiar el remonte, se trabaja con la altura de remonte excedida solamente por el 2% de las olas incidentes,  $R_{u2\%}$ .

En la figura 12 vemos la definición de la altura de remonte  $R_{u2\%}$ . En ella también se puede observar que el remonte del oleaje es un proceso complejo que depende de varias variables [17]:

- Característiques del oleaje incidente ( $H$ ,  $T$ ,  $\theta$ ).
- Calado a pie de estructura.
- Pendiente del fondo del mar frente a la estructura.
- Características de la estructura (talud, rugosidad, permeabilidad, etc.).
- Dirección y velocidad del viento.

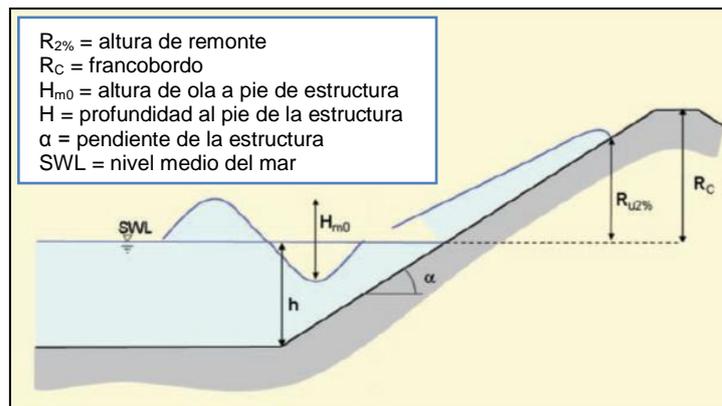


Figura 12. Definición de altura de rebase  $R_{0.2\%}$  [18].

## 1.2 El rebase

El rebase se define de forma teórica de acuerdo con la estructura, si es un paramento vertical o es un dique en talud, debido a que el oleaje responde de forma distinta ante la diferencia geométrica de las secciones.

Por lo general, se define el rebase como el fenómeno que se produce como consecuencia del remonte de las olas en la cara exterior del dique, siempre y cuando la altura de dicho remonte sea lo suficientemente alta para pasar por encima de la coronación, en cuyo caso el agua pasará de zona de barlomar a la zona de sotamar del dique [2].

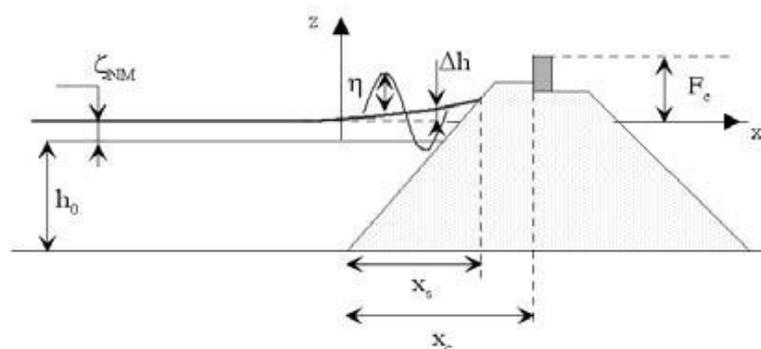


Figura 13. Principales variables que intervienen en el fenómeno del rebase [2].

Como vemos en la figura 13, para el análisis del problema, se define el ascenso del nivel medio debido a las mareas astronómica y meteorológica como  $\zeta_{NM}$ , mientras que el del oleaje (wave set-up) se define por  $\Delta h$ . El desplazamiento vertical del nivel medio del mar sobre la profundidad de referencia debido a la transformación del tren de olas sobre el talud  $\Delta h$  depende de la secuencia de olas y de la rotura del oleaje.

## 2. Tipos de rebase

---

Según las características y la forma en que se produce el rebase, el fenómeno se puede clasificar en tres grandes grupos:

- 1) Rebase tipo "green water". El rebase se caracteriza por ser una capa de agua continua, de espesor relativamente pequeño, que pasa por encima de la coronación [18].
- 2) Rebase tipo "white water". Se produce cuando las olas impactan y rompen directamente sobre la estructura produciendo un gran volumen de agua pulverizada que sobrepasan el dique, ya sea por su propia inercia o por el empuje del viento que proviene de mar adentro [18].
- 3) Rebase tipo "spray". Se debe al efecto de un fuerte viento que arranca literalmente pequeñas cantidades de agua de las crestas de las olas y las empuja por encima del dique. Sólo rebasaran aquellas gotas que provengan de las olas más próximas al dique. Incluso con muy fuertes vientos, esta forma de rebase tiene unas consecuencias irrelevantes en comparación con los dos tipos anteriores [18], por lo que generalmente no está incluido en la formulación existente para el rebase. El agua sólo tiene capacidad de mojar, no ejerce fuerza sobre los objetos, pero puede generar problemas de visibilidad además de distribuir espacialmente el agua salada que puede hacer daño a la vegetación, deteriorar estructuras, etc. [19].

## 3. Principales parámetros y procesos del rebase

---

En la bibliografía especializada apenas existen trabajos que traten de explicar el porqué sucede el rebase, ya que hasta ahora su estudio se ha centrado en analizar su magnitud y su efecto sobre la obra o sobre las actividades que tras ella se realizan [20]. El rebase es un proceso físico muy complejo debido a la gran cantidad de fenómenos físicos (rotura, remonte, transmisión, etc.) y parámetros involucrados. No depende linealmente de ninguno de los factores implicados en el fenómeno, sino que su ocurrencia y magnitud dependen de la conjunción simultánea de una serie de ellos.

### 3.1 Parámetros influyentes en el rebase

Muchos de los parámetros que afectan al rebase son aquellos que tienen significado en el remonte. Cuando el oleaje incide sobre una obra de abrigo, la interacción entre ellos depende de los siguientes factores:

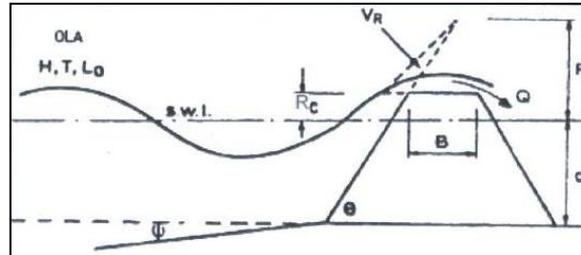


Figura 14. Esquema de los principales parámetros involucrados en el rebase [21].

#### 3.1.1 Características del oleaje (y del fondo)

- Altura de ola, H.
- Período, T.
- Longitud de onda,  $L_0$ .
- Celeridad del oleaje, C.
- Energía del oleaje, E.
- Ángulo de incidencia del oleaje,  $\beta$ , en relación con la normal a la estructura.
- Profundidad del agua al pie de estructura, d.
- Talud mar adentro,  $\Psi$ .

Al variar la altura y la longitud de la ola incidente, también varía el peralte ( $s = H/L$ ), parámetro que nos proporciona información sobre la forma de la ola. Cuando la ola se propaga hacia la costa en aguas intermedias, el peralte disminuye temporalmente a un valor ligeramente menor que el que tenía en aguas profundas ( $h/L < 0.05$ ), aumentando bruscamente al entrar en aguas someras ( $h/L > 0.5$ ): la altura de ola aumenta y la longitud disminuye, haciéndose la ola inestable hasta el punto en que rompe.

Para identificar el tipo de rotura se recurre al Número de Iribarren, definido como el cociente entre la pendiente del talud y el peralte de la ola sobre el talud ( $\xi_{m-1,0} = \tan \alpha / \sqrt{H_{m0}/L_0}$ ) [22]. Tal y como se ve en la figura 15, existen cuatro tipos de rotura:



Figura 15. Tipos de rotura según el número de Iribarren [22].

El ángulo de ataque se define al pie de la estructura (después de que el oleaje haya sufrido cualquier transformación) como el ángulo que forma la dirección de propagación del oleaje y la perpendicular a la estructura.

Si el oleaje incidente es oblicuo, llega menos energía por metro lineal de estructura, por lo que tanto los remotes como los rebases disminuyen. Siempre se ha asumido que el rebase es máximo cuando las olas golpean la estructura perpendicularmente y tiende a cero conforme el ángulo de incidencia es menor. Sin embargo, aunque no existen muchos datos al respecto, Owen [23] encontró sin tener ninguna explicación a sus relatos que el rebase es máximo no cuando las olas se aproximan perpendicularmente, sino cuando lo hacen con un ángulo aproximadamente de  $15^\circ$ . Así pues, hay que tener cuidado en no asumir demasiada reducción del rebase para ángulos de incidencia oblicuos menores a  $15^\circ$ .

### 3.1.2 Configuración en planta/batimetría local

En la mayoría de los casos, los diques de abrigo de los puertos se diseñan intentando reseguir, dentro de lo posible, las líneas batimétricas del fondo del mar. Con la refracción, que experimenta el oleaje a medida que se aproxima a la costa, las crestas del oleaje tienden a ponerse paralelas a la batimetría del fondo, de forma que los rayos tienden a ponerse ortogonales. Como consecuencia, los puntos de cambio de dirección de los diques de abrigo son zonas sensibles al rebase.

Si se da el caso que el dique se “abra” hacia el mar (forma cóncava vista desde el mar) las ortogonales del oleaje tienden a separarse a medida que se acercan al dique (figura 16); como consecuencia la energía incidente por metro lineal disminuye. Sin embargo el oleaje que incide sobre el dique puede reflejarse, produciéndose una superposición de ondas que pueden dar lugar a fenómenos locales de aumento del nivel del mar, siendo mucho más fácil que el rebase pueda tener lugar.

Por el contrario, en el caso de que el dique se “cierre” hacia la costa (forma convexa vista desde el mar) las ortogonales tienden a juntarse a medida que se acercan al dique (figura 16), aumentándose la energía del oleaje incidente en el punto de inflexión. En este caso, al haber más energía, el remote también será mayor, por lo que el rebase tiene una mayor probabilidad de suceder.

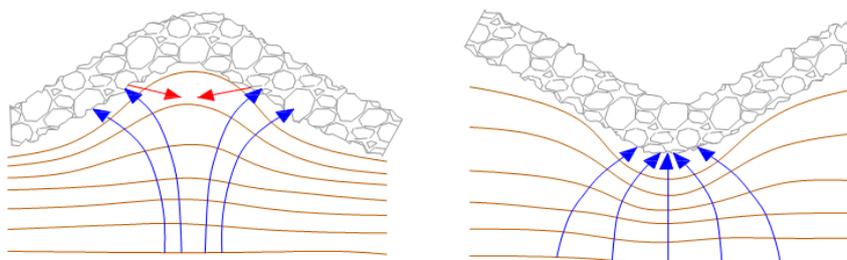


Figura 16. Esquema de la influencia de la batimetría en el rebase. Derecha: caso en el que el puerto se “abra” al mar; Izquierda: caso en el que el puerto se “cierra” a la costa. (Fuente propia).

### 3.1.3 Propiedades del fluido

- Densidad,  $\rho$ .
- Viscosidad dinámica,  $\mu$ .
- Tensión superficial.

Dada la gran dificultad de poder medir y cuantificar “in situ” la totalidad de los parámetros influyentes en el rebase, es necesaria la realización de modelados físicos que ayudan a entender el fenómeno físico y permiten desarrollar la mayoría de las formulaciones empíricas existentes. Es en los modelados físicos donde las propiedades del fluido son realmente significativas.

La tensión superficial juega un papel importante porque cambia tanto el perfil de la ola incidente como el perfil del chorro formado. Ambos efectos influyen directamente sobre la cantidad de rebase que se produce en los modelos reducidos.

Estudios realizados [24] han demostrado que cuanto menor es el modelo reducido, menor es el remonte del chorro y por tanto menor es el rebase. En los modelos reducidos, la tensión superficial no está a la misma escala que las estructuras ensayadas, está una escala mayor, por lo que actúa de manera mucho más importante. Extrapolar datos de modelos experimentales a escala puede inducir a subestimar el rebase debido al efecto escala en la tensión superficial, sobre todo para francobordos de dique suficientemente altos y escalas de modelo pequeñas.

### 3.1.4 Características del dique

- Geometría de la estructura.
- Ángulo de inclinación de la estructura,  $\alpha$ .
- Ancho de la coronación,  $B$ .
- Rugosidad de la superficie,  $\varepsilon$ .
- Permeabilidad de la estructura.
- Francobordo,  $R_c$ .
- Tipo de elemento del manto.

Los diques de abrigo pueden tener tipología vertical, en talud o mixto, y las combinaciones que entre ellas surgen. Los procesos que influyen en el rebase pueden aparecer de manera simultánea o no dependiendo de la tipología de dique que se considere, de ahí la importancia que tiene la geometría de la estructura frente al rebase.

Por otra parte, como es lógico pensar, cuanto mayor sea el francobordo menor es la probabilidad de que el rebase se produzca en forma de flujo continuo sobre la coronación. Es más probable que para francobordos suficientemente altos el rebase no se produzca como un flujo sobre el dique, sino que la causa que lo produzca sea la rotura violenta de una ola contra la estructura (rebase tipo “white water”).

Algunas investigaciones han llegado a la conclusión de que el incremento del ancho de coronación produce una reducción del rebase [25]. Se ha establecido que la anchura de coronación mínima debería ser igual a tres veces  $D_{n50}$  (diámetro relativo de la capa de bloques del manto principal) [26].

Existe una gran variedad de tipos de elementos que responden de forma distinta frente al rebase. Por ejemplo, se ha observado que la escollera presenta menos rebase que los cubos o que los tetrápodos interactúan mejor contra la descarga [25].

La influencia de la rugosidad ha sido analizada para varios tipos de superficies de talud, reflejándose el peso de la rugosidad mediante el factor  $\gamma_f$ . A mayor rugosidad el rebase disminuye, ya que se disipa mucha más energía que en una superficie lisa.

### 3.1.5 Características del viento

- Velocidad,  $\omega$ .
- Dirección,  $\theta_\omega$ .

En el estudio realizado por Yamashiro, Yoshida y Murakami [19], a partir de la recopilación de medidas de campo (tanto de olas incidentes como del viento) en un puerto pesquero de Japón durante los inviernos de 2005 a 2007, las conclusiones obtenidas fueron [19]:

- 1) Hay una gran correlación entre las alturas de ola, el remonte y la distancia recorrida por el spray debido a la acción del viento.
- 2) Analizando todos los datos conjuntamente no se encontró una gran correlación entre la velocidad del viento y la distancia recorrida por el spray, pero sí si se analizaban los datos según las direcciones del viento.
- 3) La distancia de transporte del spray ( $D$ ) como consecuencia de la acción del viento se puede estimar a partir de la altura de remonte ( $R$ ) y de la velocidad del viento ( $U$ ) según la expresión:

$$\ln D = \alpha \ln R + \beta \ln U \quad \text{donde } \alpha, \beta \text{ son parámetros de ajuste.}$$

## 3.2 Procesos influyentes en el rebase

La interacción oleaje-dique no sólo se traduce en el fenómeno del remonte, sino también en los fenómenos de reflexión, transmisión y disipación. Estos fenómenos influyen en el tipo de rotura del oleaje sobre el dique, y por tanto, en las variaciones del nivel medio del mar a pie de dique, y en la magnitud y posición del antinodo de la onda incidente ante el dique [20]. Se ha demostrado que tanto la disipación como la reflexión asociada a la rotura del oleaje claramente controlan el proceso del rebase [2].

Así, para un talud y una altura de ola incidente dados, es el periodo el que influye sobre el tipo de oleaje a partir del Número de Iribarren. Se pueden dar las siguientes condiciones [20]:

- Si se cumple que  $I_r < 2,5$  la rotura se produce en spilling o plunging. El nivel medio se incrementa, mientras que el coeficiente de reflexión influye en la altura total de ola. La ocurrencia de rebase en este caso viene provocada por la interacción del aumento del nivel medio sumada al ascenso producido por la altura de ola total.
- Por otro lado, para  $I_r > 2,5$  la rotura se produce en collapsing o surging. El coeficiente de reflexión en este caso aumenta, obteniéndose alturas de ola totales del orden de hasta el 50% mayores que en el caso anterior. La ocurrencia de rebase en este caso vendrá provocada por la magnitud del antinodo que se forme ante el dique y su posición.

## 4. Estudio del rebase

---

Existe toda una serie de métodos capaces de analizar el rebase para diferentes tipos de estructuras dadas las características del oleaje y el nivel medio del mar. Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes según diferentes circunstancias. A groso modo, existen cuatro grandes tipos de métodos de estudio.

Los métodos analíticos, en teoría, basándose en la física que gobierna los procesos, podrían usarse para describir la respuesta de la estructura frente a la interacción dique-oleaje, aunque son tantos y tan complejos los procesos que intervienen en el rebase que es muy difícil que un método analítico proporcione una estimación fiable.

En la actualidad, la predicción del rebase se realiza generalmente mediante formulaciones empíricas (métodos empíricos) que describen la respuesta de los diques frente al rebase en función de los principales parámetros de la estructura y del oleaje. Estas formulaciones se basan principalmente en resultados de laboratorio a escalas reducidas y que presentan cierta componente física.

Son muchas las formulaciones empíricas desarrolladas con el tiempo por diferentes autores. El European Overtopping Manual [18] recopila las más importantes proporcionando tres herramientas de cálculo (“Empirical Methods”, “PC-Overtopping” y “Neural Network”) para estimar los rebases de diferentes tipos de estructura.

En los casos en los que no se dispone de datos o en los que los métodos anteriores no proporcionan unos resultados suficientemente fiables, existen dos alternativas más complejas. Una de ellas son los modelos numéricos, que se usan

para simular el proceso del rebase a partir de una serie de simplificaciones. Es por lo tanto, un método de estudio limitado a ciertos tipos de estructura y de exposición al oleaje. La segunda opción es el modelado físico, en el que la estructura a estudiar se ensaya en un canal de oleaje (2D) o piscina (3D) a una escala convenientemente reducida. Son muy útiles para analizar diferentes aspectos del rebase así como para evaluar la respuesta de la estructura.

#### 4.1 Modelos numéricos

Los modelos empíricos, al utilizar ecuaciones relativamente sencillas para describir el rebase en función de los parámetros de la ola incidente y de los de la estructura, las ecuaciones y los coeficientes que se derivan están limitados (relativamente) a un pequeño número de configuraciones de estructuras simples. En cambio, los modelos numéricos son menos restrictivos [18].

La energía de disipación, la infiltración del agua y la interacción oleaje-estructura, entre otros, son procesos que tienen lugar durante el rebase, afectando la manera en que la ola rebasa el dique y determinan la descarga media y máxima. Todos ellos son un conjunto de fenómenos de complicada naturaleza, por lo que no existen modelos numéricos capaces de abarcar con exactitud todos los procesos que intervienen el rebase de una manera efectiva económica y computacionalmente [18]. Este es el gran inconveniente de los métodos numéricos.

Existen, sin embargo, ciertos modelos que pueden tener en cuenta simultáneamente algunos de los procesos. De hecho, y gracias a esto, es con los métodos numéricos con los que se han obtenido las simulaciones más realistas del rebase.

Recientemente se ha empezado a considerar los canales numéricos (entendiéndose como tal a un modelo numérico equivalente a un canal físico de oleaje en el que se pueda simular la generación de olas y la interacción ola-estructura) como una posible herramienta de apoyo al diseño de estructuras costeras como complemento a las formulaciones empíricas y a los modelos físicos [18].

Son varios los canales numéricos presentados en la literatura científica. Éstos pueden ser agrupados de varias formas. Básicamente se dividen en dos grupos:

- Los basados en las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSW: Non Linear Shallow Water Equations).
- Los basados en las ecuaciones de Navier Stokes, que se subdivide según la forma de discretizar las ecuaciones de gobierno ( Volume of Fluid (VOF), Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) o Particle Finit Element Method (PFEM)).

## 4.2 Modelado físico

Tanto el canal (2D) como la piscina de oleaje (3D) son un instrumento único que permite reproducir a escalas próximas a la real el comportamiento de un perfil estructural y sometido a las condiciones de oleaje y nivel medio del mar que se deseen.

La necesidad de los modelos físicos viene determinada por la imposibilidad de dar respuesta a los múltiples problemas de la ingeniería marítima mediante el uso exclusivo de modelos numéricos, pues dada la complejidad de muchos de estos problemas, en unos casos se desconoce la forma de plantear o de resolver las ecuaciones que rigen el fenómeno físico en estudio y en otros el desconocimiento son relativos al funcionamiento del propio fenómeno físico [27].

Los modelos físicos son especialmente útiles cuando el rebase se ve afectado por diferentes factores cuya influencia individual o combinada es en gran parte desconocida o difícil de predecir.

Habitualmente los ensayos físicos se utilizan para desarrollar formulaciones empíricas que describan el rebase y predigan las características de las olas rebasantes. Son fórmulas que no cuantifican los vertidos y los volúmenes de rebase con precisión, especialmente para volúmenes pequeños, aunque proporcionan una aproximación del orden de magnitud. Esto está parcialmente causado por los efectos de escala y al hecho de que son muy pocas las medidas de campo existentes [18].

Los efectos de escala son el resultado de la reproducción incorrecta de la interacción estructura–oleaje en el modelo a escala. Resultados cien por cien fiables sólo se pueden esperar si se cumplen simultáneamente las leyes de Froude y Reynolds, lo que por desgracia es imposible que ocurra, de manera que dichos efectos no se pueden evitar al reproducir y ensayar un modelo reducido [18].

---

## 5. El rebase en el diseño de diques de abrigo

---

Cataluña se caracteriza por poseer un alto número de puertos situados fuera de la protección natural que ofrecen bahías y estuarios, y por lo tanto, sometidos directamente a la acción del mar. En ellos, la actividad portuaria se hace simplemente posible gracias a la existencia de infraestructuras de abrigo que permiten la creación de zonas de agua abrigada necesarias para garantizar una mínima operatividad y seguridad.

El carácter operativo es un indicador de las repercusiones económicas, sociales y ambientales que se pueden producir cuando no se alcanzan o se reducen las condiciones de operatividad. Es, por tanto, indicativo de la magnitud de las

consecuencias ocasionadas por las paradas operativas en la fase de servicio [15]. En realidad, desde un punto de vista funcional, la transmisión de energía sobre el dique (rebase) y a través del mismo, son condicionantes fundamentales de diseño.

En lo que se refiere a la seguridad, ésta depende de la protección proporcionada por las estructuras marítimas contra las acciones del oleaje y de su vulnerabilidad frente al rebase, ya que otro de los factores determinantes en el diseño de los diques rompeolas es el relativo a la estabilidad estructural. Mediante el tipo y el peso utilizado para las piezas del manto principal, el dique ha de ser capaz de resistir las sollicitaciones del oleaje. Dado un fenómeno de rebase, las partes más sensibles del dique son la coronación y principalmente el talud interior del dique, ya que ven aumentar la acción del flujo de rebase a medida que disminuye el francobordo, traduciéndose paralelamente en una disminución de la estabilidad.

En resumen, vemos que tanto para garantizar una mínima operatividad en las operaciones portuarias como para estudiar la estabilidad del dique, el rebase juega un papel muy importante.

De hecho, las instalaciones portuarias suelen ser diseñadas con un alto grado de precisión para asegurar condiciones de muy poca o nula rebasabilidad. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, asegurar tal condición es prácticamente imposible. Hay que tener en cuenta que, si bien una altura de coronación elevada aumenta el grado de protección de la estructura, el coste de construcción también aumenta, por lo que el diseño debe basarse en un compromiso adecuado entre la economía de la obra y su comportamiento hidráulico frente al oleaje de diseño [17].

Los criterios de selección de la altura de coronación que se utilizan son:

- tomar como referencia la altura de remonte producida por el oleaje de diseño y elegir una altura de coronación mayor, de tal forma que “no ocurran rebases”.
- tomar como referencia un cierto valor permisible de la tasa de rebases,  $q$ , y elegir una altura de coronación tal que el volumen de agua que sobrepase el dique se mantenga por debajo de “una cantidad máxima tolerable” [17].

Respecto al primer criterio (criterio del remonte), aparece un problema básico, y es que existen muy pocos datos de medidas en prototipo o en laboratorio del remonte del oleaje real, de tal forma que resulta difícil establecer la altura de remonte de referencia. Además, aun cuando existiesen dichas medidas, surgiría la cuestión de cuál sería la altura de remonte más apropiada a efectos de diseño ( $R_M$ ,  $R_{1/3}$ ,  $R_{1\%}$ ,  $R_{2\%}$ ?). Elegir una altura de coronación más alta que el remonte máximo producido por el oleaje de proyecto, procurando impedir los rebases del oleaje, resulta en la mayoría de los casos económica y estéticamente inaceptable [17].

Es por lo tanto, el segundo criterio el que hoy en día tiene mayor aceptación pese a la reluctancia de los proyectistas a admitir la existencia de un cierto número

anual de rebases, especialmente en aquellas áreas en que se desarrollan actividades portuarias en el trasdós del dique [17]. Lógicamente, la cantidad de rebases que puede tolerar una estructura costera desde el punto de vista de su integridad estructural, es muy superior a la que sería permisible desde el punto de vista de su funcionalidad.

Uno de los problemas observados al trabajar con la tasa media de rebase,  $q$ , es que al tratarse de valores medios, se producen situaciones individuales del orden de 100 veces superiores que dan lugar a unos rebases mucho más problemáticos de lo esperado.

## 5.1 Clima extremal versus clima medio

Para el diseño de cualquier obra marítima, el análisis del clima marítimo es esencial para la correcta caracterización de las acciones hidrodinámicas actuantes sobre la estructura y la determinación de los principales parámetros del oleaje necesarios para el diseño de la misma.

Los temporales y los sucesos extremos son los causantes de los desperfectos más impredecibles y de mayor consideración que se pueden dar en un puerto, y por lo tanto, de mayor gasto de reparación asociado. Es por este motivo que en el análisis de estabilidad de un dique de abrigo realizado en la fase de diseño de un puerto, es el clima extremal el utilizado para estudiar el oleaje y poder determinar las acciones de diseño a soportar por la obra marítima. A partir del preestablecimiento de la vida útil de la estructura se escoge la altura de ola de diseño (ola extrema que deberá soportar el dique) asociada a un período de retorno determinado (método determinista), o bien, considerando la respuesta de la estructura, se escoge una probabilidad de fallo aceptable (método probabilista).

Por el contrario, el clima medio es el que permite realizar el estudio de la agitación interior del puerto, las estimaciones del tiempo medio en que la bocana o algún muelle pueden estar inoperativos o analizar las afecciones a la dinámica litoral. El clima medio, es por lo tanto, una herramienta para valorar la operatividad de un puerto. El régimen medio se define como el conjunto de estados de mar que pueden darse en condiciones normales y utiliza la función de distribución que define la probabilidad de excedencia de un determinado valor de la altura de ola significativa. En la fase de servicio y para aquellos casos en los que no haya sido especificado a priori, la inoperatividad de un puerto queda definida, en función del tipo de estructura y una vez producida la parada, por un cierto número de horas. La duración máxima normalmente no supera las 24 horas al año [28].

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que en el estudio de la operatividad mediante la caracterización del oleaje según el clima medio, no se tiene en cuenta las paradas debidas al rebase, ya que por lo normal, las alturas de ola máxima que se encuentran en el clima medio son inferiores a las alturas de ola que se necesitan para que se produzca el rebase de un dique. La solución para tener en cuenta las paradas

en la operatividad portuaria debidas al rebase es estudiar el rebase según el régimen extremal, pero tomando un oleaje de diseño no mayor a los 10 años de período de retorno; esto es lo que propone tanto la práctica habitual como la experiencia [29].

## 5.2 Períodos de retorno

No existe a nivel internacional ninguna norma o recomendación aprobada que pueda ser utilizada para la obtención del período de retorno con el que se analizan los daños que se derivan de un suceso de rebase.

Los diferentes niveles de riesgo que pueden ser tolerados en una estructura dependen de las circunstancias del lugar, de las directrices establecidas a nivel nacional, del balance entre riesgo-beneficios, y del nivel total de exposición. Como ejemplo, la protección de un puerto comercial importante como puede ser el de Barcelona o Tarragona debe tener menores niveles de rebase que otros puertos de segunda categoría o bien, el mismo rebase pero con un período de retorno mucho mayor.

A modo de orientación, algunas publicaciones han propuesto una guía de valores orientativos para casos de inundaciones de grandes extensiones debidas al rebase. Tal y como muestra la tabla 2, el período de retorno se asigna según el carácter de la estructura y su vida útil. A pesar de que los valores no se corresponden con los períodos de retorno que se tendrían que utilizar para la evaluación de los rebases, es una de las pocas informaciones que se dispone sobre el tema.

Tabla 2. Período de retorno según el carácter de la obra [22].

Tipo de estructura	Vida útil	Período de retorno
	(años)	(años)
Actuaciones temporales	1-20	5-50
Protecciones costeras	30-70	50-100
Defensas de grandes zonas contra inundaciones	50-100	100-1.000
Estructuras especiales de gran inversión	200	1000-10.000
Centrales nucleares o similiar	-	>10.000

### 5.3 Descargas medias de rebase tolerables

La definición de un límite tolerable de rebase es aún una pregunta sin total respuesta, debido a la alta irregularidad del fenómeno y las grandes dificultades para cuantificarlo. Muchos factores deben tenerse en cuenta para definir la seguridad de las obras de defensa de costas y puertos que se construyen en la actualidad. Es obvio que el criterio de rebase a tomar en el diseño depende del grado de protección y el riesgo considerado, teniendo en cuenta la gran probabilidad de que las olas más altas se produzcan en el momento de los máximos niveles del mar.

Una de las investigaciones más completa y de hecho, la más utilizada, fue la realizada por Fukuda y Uno, donde se evalúa el efecto de diferentes tasas de rebase sobre medidas y observaciones de campo [18]. Como resultado de posteriores estudios se ha establecido una serie de cantidades aceptables de rebases ( $m^3/m/s$ ) con respecto a tres objetos diferentes: una casa, un coche y una persona (tablas 3, 4 y 5).

Tabla 3. Límites de rebase para peatones [22].

Tipo de daño y motivo	Tasa media de rebase	Volumen máximo <sup>(1)</sup>
	q (l/s/m)	V <sub>max</sub> (l/m)
Personal cualificado, bien calzado y protegido, consciente de la probabilidad del rebase, con rebases no muy importantes y sin peligro de caer del muelle.	1-10	500
Peatones conscientes del peligro y no asustados, con visión clara del mar, y capaces de alcanzar zonas seguras <sup>(2)</sup> .	0.1	20-50

<sup>(1)</sup>Nota: Límites referidos a velocidades de rebase por debajo de  $v_c \approx 10$  m/s. Para rebases más violentos, de mayor velocidad, los volúmenes máximos disminuirían.

<sup>(2)</sup>Nota: El no cumplimiento de una de las condiciones no requiere un límite más severo.

Tabla 4. Límites de rebase para vehículos [22].

Tipo de daño y motivo	Tasa media de rebase	Volumen máximo <sup>(1)</sup>
	q (l/s/m)	V <sub>max</sub> (l/m)
Conducción a baja velocidad, con rebase de tipo "green water" sin fuertes flujos.	10-50 <sup>(1)</sup>	100-1.000
Conducción a velocidad moderada o alta, con rebase tipo "white water" con grandes flujos.	0.01-0.05 <sup>(2)</sup>	5-50 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Nota: Límites referidos a rebases definidos en autovías.

<sup>(2)</sup>Nota: Límites referidos a rebases definidos en carreteras situadas inmediatamente detrás del dique.

Tabla 5. Límites de rebase para la propiedad detrás de la defensa [22].

Tipo de daño y motivo	Tasa media de rebase	Volumen máximo
	$q$ (l/s/m)	$V_{\max}$ (l/m)
Daños significativos o hundimiento de grandes yates.	50	5.000-50.000
Hundimiento de barcos pequeños a 5-10 m distancia del dique. Daños a grandes yates.	$10^{(1)}$	1.000-10.000
Elementos estructurales.	$1^{(2)}$	~
Daños a elementos a una distancia de 5-10 m.	$0.4^{(1)}$	~

(1)Note: Límites referidos al rebase definido en el propio dique.

(2)Note: Límites referidos al rebase efectivo definido en los edificios.

Uno de los puntos débiles de los valores presentados en las tablas anteriores para el límite de rebase, es que sólo se refieren a la tasa media de rebase, y por lo tanto no son un buen indicador para según qué circunstancias. Hay que pensar que en ocasiones, la máxima intensidad de rebase que se llega a alcanzar dentro de una tormenta, puede ser cientos de veces mayor que la intensidad promedio de rebase. Es por este motivo, que un mejor indicador para los rebases admisibles sería el máximo volumen individual, ya que se limitaría el rebase para cada ola y no el caudal medio.



## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### 1. Introducción

Son muchas las consecuencias que pueden acarrear los efectos del cambio climático dentro del campo de la ingeniería marítima. Los problemas más importantes se relacionan con potenciales cambios en las principales características del oleaje (altura, período y dirección) así como con el posible ascenso del nivel medio del mar (NMM). Las consecuencias que pueden provocar se engloban dentro de dos grandes grupos:

- Afecciones a estructuras marítimas (puertos y obras de defensa)
- Cambios en la dinámica litoral (en Cataluña, las zonas más vulnerables ante tales cambios serán los deltas del Ebro y del Llobregat y las playas rigidizadas o confinadas)



Figura 17. Esquema de las posibles afecciones en la ingeniería marítima como consecuencia del cambio climático y sus correspondientes parámetros de estudio (fuente propia).

Es necesario tener en cuenta que las estructuras marítimas han sido diseñadas para cumplir unas condiciones de funcionalidad y estabilidad estructural que son directamente dependientes del clima marítimo y, por tanto, de todas las dinámicas asociadas al mismo: fundamentalmente, nivel medio, marea meteorológica, marea astronómica, corrientes y viento. Más aún, su diseño se ha realizado para una vida útil del orden de décadas en el que se evidenciarán los efectos del cambio climático, por lo que parece evidente que alguna de estas infraestructuras (especialmente las más recientes) no pueden quedar al margen de cualquier plan de adaptación al cambio climático.

Entre estas estructuras, la costa catalana cuenta con un número importante de puertos, de ahí la importancia de un estudio para prever las posibles afecciones que puede acarrear el cambio climático en estas obras marítimas.

La evidencia de que el cambio climático ya es una realidad, permite tomar conciencia de la necesidad de emprender acciones para conocer sus efectos con suficiente antelación, por lo que es necesario detectar y evaluar los posibles impactos que pueden sufrir en un futuro relativamente cercano los puertos en función de los distintos forzamientos.

## 2. Posibles afecciones del cambio climático en los puertos

---

En este apartado se analizan de forma cualitativa las consecuencias que podrían acarrear los previsibles cambios en las borrascas y en el nivel medio del mar sobre las estructuras portuarias.

### 2.1 Cambios en las borrascas

Las borrascas pueden verse alteradas en su intensidad, frecuencia y trayectoria. Un aumento en la intensidad de las borrascas traería consigo un aumento de los niveles del mar extremos, esencialmente debido a mareas meteorológicas (variación del nivel del mar inducido por el viento y la presión atmosférica), así como de las alturas de ola. Esto puede producir un aumento en los episodios de erosión costera, daños producidos por inundaciones y aumentar los episodios de rebase y fallo de obras de defensa de la costa, paseos marítimos y otras infraestructuras localizadas en la franja litoral. El aumento de la frecuencia de las borrascas conduciría al consiguiente aumento del riesgo de inundación y daños asociados, con lo que los períodos de retorno de los eventos menos frecuentes disminuirían respecto a los actuales.

Desde el punto de vista funcional, los puertos se diseñan con unas condiciones límite de agitación interior o de acceso por la bocana que garanticen la operatividad y

la explotación de los mismos. El cambio en la trayectoria de las borrascas puede conducir a variaciones importantes en las direcciones de abordaje del oleaje y en su intensidad, por lo que el diseño en planta de muchos de los puertos actuales no sería el adecuado para asegurar unos niveles mínimos de operatividad en algunos de sus muelles y terminales, lo que se traduciría en importantes pérdidas económicas y de seguridad.

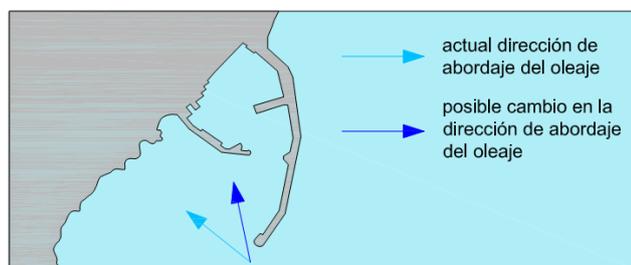


Figura 18. Croquis del cambio en la dirección de abordaje del oleaje debido al giro de las borrascas (fuente propia).

## 2.2 Subida del nivel medio del mar

Para garantizar la funcionalidad de un puerto también es necesario diseñar los diques de abrigo con una cota de coronación que garantice que no se superan unos ciertos umbrales de rebase del oleaje.

Con el aumento del nivel medio del mar, bien sea consecuencia del deshielo de los casquetes polares o bien de la expansión térmica que pueden sufrir los mares y océanos como efecto de la subida de la temperatura, unido a un aumento de la marea meteorológica (explicada en el apartado anterior), se reducirá el francobordo de los diques con el que fueron diseñados en su día. Como consecuencia, los volúmenes de rebase sufrirán un aumento respecto a los valores que se dan en la actualidad con los grandes temporales de mar.

Otro aspecto en el que la subida del mar puede repercutir, es la estabilidad estructural de los diques. Independientemente de la tipología del dique, bien sea en talud, vertical o las combinaciones que entre ellos se pueden dar, ésta ha sido calculada para unos niveles de mar y unas condiciones de dinámicas generales que van a verse modificadas sustancialmente por el cambio climático en el horizonte de su vida útil esperada.

Si se produce un aumento del nivel medio del mar, en aquellas estructuras en las que la altura de ola de cálculo esté delimitada por el fondo, se producirá una desestabilización de las mismas, de forma que si se desea que la estructura mantenga el mismo criterio de estabilidad, el tamaño de las piezas que componen una obra deberá aumentar. La pérdida de estabilidad también se podría producir por el desequilibrio de las banquetas que garantizan que no se produzca erosión a pie de dique.

### 3. Formulación del problema

---

El elevado número de puertos comerciales, deportivos y pesqueros existentes a lo largo de la costa catalana constituyen un eslabón fundamental como infraestructura de la industria, pero también de la actividad pesquera y turística. Al ser su ubicación punto de interacción entre los flujos provenientes de tierra, el océano y la atmosfera, se caracterizan por una gran fragilidad y vulnerabilidad frente a cualquier tipo de presión externa. En este contexto, los puertos son infraestructuras que requieren de una especial atención, pues el impacto del cambio climático sobre los mismos puede tener consecuencias de gran relevancia.

Planteadas en el apartado anterior las distintas afecciones que se pueden dar, se desarrolla un gran abanico de posibilidades en el estudio del comportamiento de los puertos frente al rebase y a la estabilidad ante los cambios inducidos por el cambio climático.

Después de todas las investigaciones relacionadas con el estudio de la variación de los forzamientos marinos, es la subida del nivel medio del mar el parámetro del que se posee una mayor información y previsión sobre su evolución en unas decenas de años vista. Es por este motivo que de todos los diferentes caminos que se pueden tomar para estudiar el comportamiento de un puerto ante el cambio climático, se decide estudiar la respuesta del rebase únicamente ante un previsible aumento del nivel del mar, manteniendo el resto de las variables constantes según las condiciones actuales.

Para el planteamiento de estrategias de adaptación en el sector portuario catalán es evidente que se requiere información de alta resolución espacial, pues cada puerto se verá sometido a impactos diferentes y su vulnerabilidad será diferente.

Sin la intención de realizar un estudio de detalle para cada uno de los puertos catalanes (al ser de carácter local los elementos que condicionan los impactos) que se requiere para el planteamiento y descripción de las estrategias de adaptación ante los cambios provocados por una subida del nivel medio del mar, la presente tesina sí que se plantea con el objetivo de elaborar un análisis de sensibilidad de todos los puertos del litoral catalán, con la intención de encontrar cuáles de ellos serán los más afectados. El objetivo final es la realización de un mapa de alarmas donde resalten aquellos puertos en los que se necesitará actuar de una forma más inminente.

A pesar de esta idea inicial, no ha sido posible analizar la respuesta de todos y cada uno de los puertos catalanes. Para ello se debe disponer de las características geométricas que proporcionan las secciones transversales de los diques de abrigo de los puertos (inclinaciones de los taludes, longitud de las bermas, cota de coronación, etc.). Sin embargo, en la fase de búsqueda y recopilación de la información necesaria (entre ella, las diferentes secciones transversales), se han encontrado muchos problemas al no estar todos los puertos dispuestos a proporcionar información de sus diques de abrigo. Así pues, sólo se han podido analizar aquellos puertos en los que

sus secciones transversales se han encontrado en el atlas “Diques de Abrigo de España” [30], o bien han sido obtenidos a partir de la base de datos del Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC. A pesar de todo, ha habido un par de puertos incluidos en el atlas que no se han podido analizar ya que la información que se proporcionaba era anterior a las obras de ampliación i/o transformación posteriores a la edición del catalogo que han sufrido estos puertos.

En la figura 19 se puede observar la localización de todos los puertos analizados. Se ha intentado que no quedara un gran vacío entre puerto y puerto para que el mapa de vulnerabilidad no quedara sesgado. Todos los puertos considerados existen actualmente a excepción del puerto de Aiguablava, en el que las secciones estudiadas son las propuestas en el anteproyecto de ampliación del pequeño puerto deportivo existente hoy en día.



Figura 19. Situación de los puertos analizados en el estudio (fuente propia).

No se han tenido en cuenta en el análisis de sensibilidad los embarcadores de Tortosa, Deltebre, Amposta y Sant Jaume d'Enveja (pertenecientes a “Ports de la Generalitat” [31] al tratarse de obras situadas en las orillas del río Ebro en las que no se aprecian fallos funcionales por rebase.

Falta comentar que no se ha hecho distinción alguna entre los puertos estudiados, siendo todos ellos de muy diferente tamaño y funciones. Así pues, se ha evaluado la respuesta de los diques de abrigo tanto de los dos grandes puertos de titularidad estatal presentes en Cataluña (Barcelona y Tarragona), como de los puertos de titularidad Autonómica y puertos concesionarios (siempre y cuando se haya podido disponer de la información necesaria), cuyas actividades son reguladas en ambos casos por "Ports de la Generalitat"

## 4. Análisis de sensibilidad

---

Tal y como se ha visto en el capítulo del estado del arte del rebase, existe una extendida gama de métodos capaces de analizar el rebase partiendo de las características del oleaje y de la geometría de la estructura a analizar.

Como en la actualidad la predicción del rebase se realiza comúnmente a través de formulaciones empíricas, y ante la imposibilidad de realizar un ensayo físico en un canal de oleaje para cada una de las tipologías estructurales de cada uno de los puertos catalanes, para ver cómo puede evolucionar el caudal medio de rebase con la subida del nivel medio del mar, se ha decidido utilizar uno de los métodos empíricos existentes.

Los métodos empíricos se basan en la representación simplificada de la física del proceso mediante en una serie de ecuaciones, normalmente adimensionales, que relacionan los principales parámetros del rebase con los de la ola incidente y los de la estructura analizada. La forma y los coeficientes de las ecuaciones se ajustan para reproducir los resultados obtenidos en los modelos físicos y los datos de campo.

Son muchas las formulaciones desarrolladas con el tiempo por diferentes autores según la tipología de dique a analizar. El European Overtopping Manual (Eurotop) [18] presenta las más importantes y actualizadas, proporcionando los métodos de cálculo más recientes. ("Empirical Methods", "PC-Overtopping" y "Neural Network") para evaluar los rebases. Consecuentemente, el siguiente paso es decidir cuál de las tres herramientas utilizar en nuestro análisis.

### 4.1 Herramientas de cálculo propuestas por el Eurotop (European Overtopping Manual)

#### 4.1.1 Métodos empíricos - Eurotop

Fundamentándose en tres manuales existentes ([32], [33], [34]) y con los ajustes y calibraciones realizados a partir de los resultados obtenidos en el proyecto

europeo CLASH [35], basado en el estudio de las medidas de campo disponibles y de los valores medidos en ensayos de laboratorio, se desarrolló en el año 2007 el Manual Europeo de Rebase Eurotop [18], manual que incorpora nuevas técnicas para predecir el rebase en la mayoría de las estructuras marítimas europeas.

Paralelamente a este manual se desarrolló una herramienta de cálculo online para ayudar al usuario a establecer, a partir de una serie de pasos, predicciones en el rebase de diques en talud y diques verticales. Tras introducir las características del oleaje y las geométricas de la sección, el programa calcula de forma instantánea el rebase que se estima.

#### 4.1.2 PC-Overtopping

Se trata de un programa basado en los resultados de campo y de laboratorio observados en una estructura de dique en talud, por lo que los diques a estudiar deben ser obligatoriamente en talud.

PC-overtopping establece que prácticamente cualquier tipología de dique en talud puede modelarse por un número ilimitado de secciones. Cada sección se introduce en el programa según coordenadas x-y y con el factor de rugosidad correspondiente. Después de ejecutar el programa, se obtienen los parámetros más importantes en el estudio del rebase, no sólo de la descarga media: altura de remonte ( $R_{u2\%}$ ), descarga media de rebase, porcentaje de olas rebasantes, volumen de rebase individual por ola, y el francobordo que se requiere para una descarga media preestablecida.

El principal inconveniente es que no se puede analizar el rebase en estructuras verticales o en estructuras en talud con una coronación permeable y/o rugosa.

#### 4.1.3 Neural Network (Redes Neuronales)

Las redes neuronales entran dentro del ámbito de la inteligencia artificial y en este contexto se definen como sistemas que intentan reproducir la estructura de los cerebros humanos.

Las redes neuronales se organizan en forma de capas y dentro de cada capa hay uno o más elementos de procesamiento llamado "neuronas". La primera capa es la capa de entrada, y el número de neuronas es igual al número de parámetros de entrada. La última capa es la capa de salida, en la que coincide de nuevo el número de neuronas con el de parámetros de salida que han sido estimados.

Las capas existentes entre las capas de entrada y salida son capas ocultas y constan de un número de neuronas que se define en la configuración inicial de la red neuronal. Cada neurona de cada capa recibe información de la capa anterior y

produce una salida, siguiéndose este procedimiento hasta que se genera la neurona de salida, que es la que genera la predicción final de toda la red neuronal.

La red CLASH, desarrollada a partir del proyecto CLASH [35] se estructuró en una red neuronal de tres capas con una única capa oculta. Son 15 los parámetros de entrada y uno el de salida, que es la tasa media de rebase ( $q$ ).

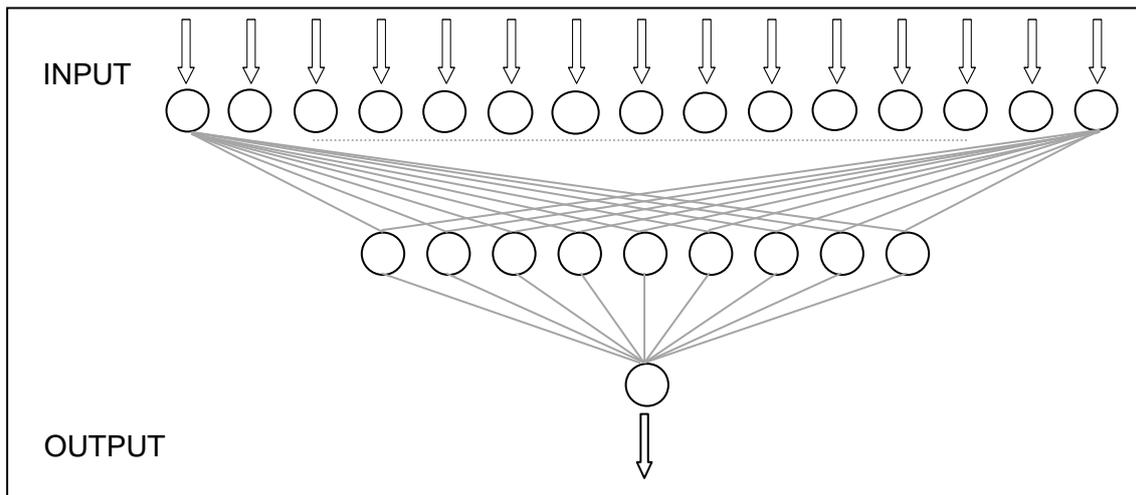


Figura 20. Esquema de cálculo de la red neuronal para el rebase (fuente propia).

#### 4.1.4 Elección del método de cálculo

Independientemente del método que se escoja, el propio Manual Europeo de Rebase nos advierte que las herramientas que proporciona no están destinadas a realizar los cálculos previos de diseño de una estructura, sino que sólo proporcionan una estimación del caudal de rebase. Como en este estudio sólo se pretende realizar una evaluación cualitativa (y no cuantitativa) de la evolución del rebase para la posterior realización del mapa de sensibilidad de los puertos catalanes ante una subida del nivel medio del mar, la limitación no plantea ningún obstáculo para seguir adelante con el estudio.

En el momento de escoger uno de los tres métodos presentados, toma fuerza la idea evaluar todas las secciones de diques de los puertos catalanes mediante una herramienta común. Como entre las tipologías a evaluar existen tanto diques en talud, como verticales, como mixtos, inmediatamente queda descartado el PC-Ovetopping, pues como tal y como hemos dicho anteriormente, este método sólo permite analizar diques en talud sin una coronación permeable.

Pese a que los parámetros estructurales de una Red Neuronal describen casi todas las posibles configuraciones que puede tomar un dique de abrigo, se necesitan

algunos datos que no constan en el atlas de puertos del que se han extraído la mayoría de las secciones estudiadas. Además, hay que tener en cuenta que los valores de salida de la red neuronal están basados únicamente en la base de datos “CLASH DATABASE” generada a raíz del proyecto CLASH [35], por lo que para el análisis del rebase en unas condiciones de nivel medio del mar diferentes a las actuales, puede que los resultados no sean del todo fiables. Es por este motivo, por el que se ha calculado los rebases en las diferentes secciones de abrigo de los puertos con el primer de los métodos planteados, el “Método Empírico – Eurotop”. La decisión viene argumentada también por el hecho de que con este método se pueden estudiar, en principio, tanto los diques verticales como los diques en talud, siendo el punto de partida las formulaciones empíricas desarrolladas por los autores más importantes en el cálculo de rebases (Owen, Goda, De Waal, Van der Meer, Pedersen, Allsop, etc.).

## 4.2 Uso de la herramienta de cálculo

En este apartado se pretende explicar con más detalle cómo se trabaja con el instrumento de análisis escogido de los proporcionados por el Eurotop [18], cómo funciona la entrada de datos y cómo es la salida de los resultados.

Al entrar en la página web de la organización se debe ir a la pestaña de las herramientas de cálculo y escoger la opción “Empirical Methods”.

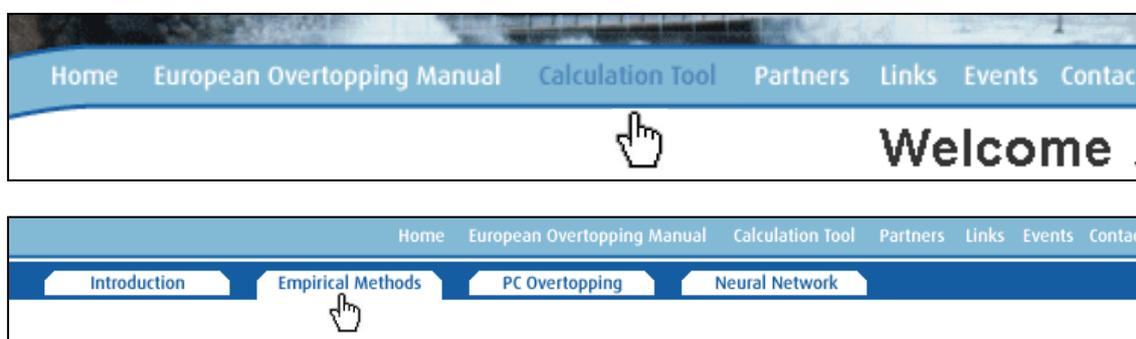
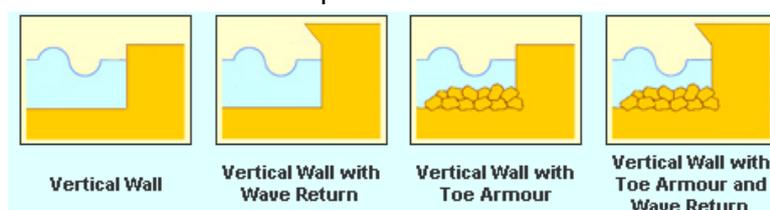


Figura 21. Pasos a seguir para empezar a ejecutar el programa.

Una vez dentro, se ha de asimilar el dique que se quiere estudiar a una de las opciones planteadas por el programa. Se dividen en tres grupos: diques verticales, diques en talud de protección costera (motas de contención), y diques en talud.

### Diques verticales



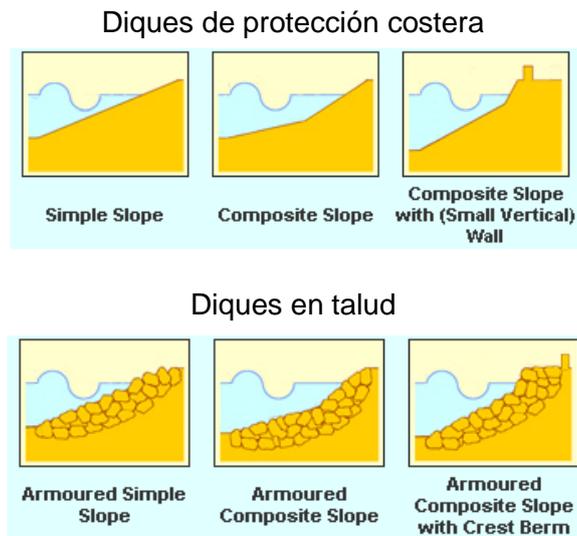


Figura 22. Distintas opciones propuestas por el programa para asimilar la estructura objeto de análisis.

Las configuraciones que se utilizan para equiparar las diferentes secciones son principalmente las tres opciones planteadas para los diques en talud, ya que ésta es la tipología predominante en los diques de abrigo de los puertos del litoral catalán. Aunque no es tan común, también se han utilizado la primera y tercera de las alternativas propuestas para los diques verticales.

A pesar de simular las mismas geometrías, los diques de protección costera (Coastal Dikes & Embankment Seawalls) se diferencian de los diques en talud (Armoured Rubble Slopes & Mounds) en el material utilizado para su construcción y el elemento dispuesto en la capa más exterior del dique. Se trata de diques prácticamente impermeables que emplean hormigón, asfalto, hierba u otros elementos muy poco permeables como revestimiento de la cara exterior de barlomar. Son los típicos diques o motas de protección de zonas situadas en grandes áreas de depresión, como por ejemplo los Países Bajos.

En el momento de asimilar cada una de las secciones de dique a una de las opciones propuestas por el programa, el usuario puede apreciar básicamente dos limitaciones en la herramienta de cálculo:

- Sólo tiene en cuenta la porosidad exterior del dique, no considera la posibilidad de flujo en el interior de la estructura.
- No se pueden introducir con exactitud todas y cada una de las características geométricas, por lo que es imposible reproducir con fidelidad todas las secciones que se quieren estudiar en esta tesina.

Las estructuras escogidas para el cálculo del rebase son las más parecidas a las que se quieren estudiar, pero no idénticas, por lo que si se quisiera realizar un estudio exhaustivo y en detalle de la evolución del rebase en cada uno de los puertos,

queriéndose conocer de forma cuantitativa los cambios, este método no sería válido para conseguir los propósitos establecidos. Como consecuencia, hay que volver a remarcar que en esta tesina sólo se estudia de forma cualitativa dicha evolución, por lo que se aceptará el método como herramienta de trabajo para poder realizar el análisis de sensibilidad de los puertos catalanes con el objetivo final de formular un primer mapa de alarma en las estructuras portuarias ante una subida del nivel medio del mar.

#### 4.2.1 Entrada de los datos y salida de resultados

Para cualquier tipo de las opciones planteadas, es necesario introducir las características del oleaje y las geométricas del dique para que el programa sea capaz de proporcionar una estimación en el caudal medio de rebase.

Según que opción se escoja, las características geométricas a introducir serán unas u otras. En cada caso, se proporciona un pequeño dibujo de la sección de estudio en el que se representan los parámetros que deben introducirse.

A continuación, a modo de ejemplo, se presenta en la figura 23 la hoja de cálculo que ofrece el programa para calcular el rebase en una de las secciones que más se repite en los diques de abrigo de los puertos catalanes.

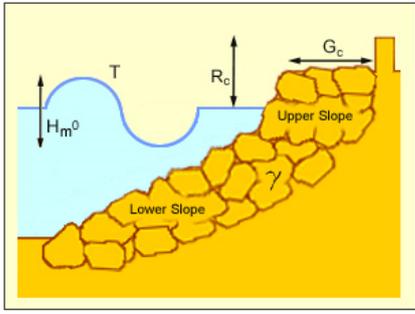
El primer paso a realizar, es la elección del tipo de análisis con el que se quiere obtener el valor del rebase. Se ha de escoger entre un análisis probabilístico o bien determinístico. En el presente estudio, como lo que se quiere estudiar es la evolución del rebase y no cuantificar su valor, cualquiera de las dos opciones es válida siempre y cuando se calculen todos los rebases de todos los puertos con el mismo criterio. Sin embargo, como la mayoría de las estructuras portuarias existentes a lo largo de la costa catalana fueron diseñadas bajo el concepto determinista, finalmente se ha decidido realizar todos los cálculos con la opción del análisis determinístico.

El siguiente paso a realizar ya es la introducción de las características del oleaje: el período y la altura. En el próximo apartado se explica cómo se obtienen los valores a introducir. Sólo comentar que el programa cuenta con varias posibilidades en lo que respecta al período; las opciones son:

- Período medio calculado como la media aritmética de todos los períodos de cada ola que se da en un estado de mar (es el utilizado en este estudio).
- Período pico. Es el período correspondiente al máximo energético espectral (pico del espectro). Es el período elegido (argumentación en el próximo apartado).
- Período medio espectral definido como la relación entre los momentos espectrales de orden -1 y 0.

### Armoured Composite Slope with Crest Berm

Method Selection  Probabilistic  **Deterministic**



Beta Results

Breaking Type / Other Info

---

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

---

**T** (wave period)  s  Tm  Tp  Tm-1,0

**H<sub>m0</sub>** (Wave Height at the Toe of the Structure)  m

**R<sub>c</sub>** (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level)  m

**G<sub>c</sub>** (The width of the structure crest)  m

**Lower Slope**

(e.g. 1 in 2)   in

**Upper Slope**

(e.g. 1 in 2)   in

**v** (coefficient for reduction factors)  ▼

- Smooth impermeable surface (1)
- Rocks (1 layer, impermeable core) (0.6)
- Rocks (1 layer, permeable core) (0.45)
- Rocks (2 layers, impermeable core) (0.55)
- Rocks (2 layers, permeable core) (0.4)**
- Cubes (1 layer, random positioning) (0.5)
- Cubes (2 layers, random positioning) (0.47)
- Antifers (0.47)
- HARO's (0.47)
- Accropode (0.46)
- Xbloc (0.45)
- CORE-LOC (0.44)
- Tetrapods (0.38)
- Dolosse (0.43)

Figura 23. Hoja de cálculo para una de las secciones que ofrece el programa.

Lo explicado hasta el momento, es común para todas las tipologías de dique que se pueden analizar. En cambio, las características geométricas que se deben introducir varían según el caso examinado.

Para el ejemplo planteado, se introduce el valor del francobordo, la amplitud de la berma superior del dique y las pendientes del talud de barlomar. En el caso de que el dique de abrigo disponga de un espaldón, será esta la sección a utilizar, pero si el talud está formado por una sola pendiente, se introducirá el mismo valor en las casillas "lower slope" y "upper slope". Si por el contrario, son más de dos las pendientes que componen el talud o bien existe una o más bermas sumergidas, el perfil se aproxima a dos pendientes, ya que es éste el máximo número de pendientes que se puede introducir.

El tipo de material que conforma el manto exterior del dique, se tiene en cuenta en el valor del coeficiente de reducción “V”. El desplegable nos permite escoger entre mantos de escollera monocapa o bicapa con núcleo permeable o impermeable, o entre cualquier otro tipo de elemento que se pueda utilizar en el manto principal (cubos, acrópodos, tetrápodos, etc.).

Una vez introducidos todos los datos necesarios se ejecuta el programa dándole a la tecla “Calculate Overtopping Rate”, obteniéndose instantáneamente el valor de la tasa media de rebase. También se informa de si la ola ha roto o no al alcanzar la estructura.

### 4.3 Obtención de las características del oleaje

La caracterización del remonte y el rebase sobre una estructura marítima requiere determinar las condiciones del oleaje a pie de obra, por lo que resulta necesario hacer una propagación del oleaje a pie de estructura. Una vez se ha caracterizado el fenómeno oceanográfico a pie de estructura, ya se puede estudiar la interacción entre el oleaje y el dique, evaluada principalmente mediante el remonte y el rebase.

Los diques de abrigo de los puertos son estructuras de gran envergadura que presentan cambios de sección a lo largo de su longitud. El oleaje también va cambiando su altura de ola a medida que va avanzando hacia la costa, de esta manera, a distintos calados de pie de estructura se presentan distintas alturas de ola. Por estos motivos, tanto por los cambios de sección como por los cambios del oleaje, los temporales suelen dañar más unas partes de los diques que otras, por lo cual se ha decidido analizar la respuesta de cada una de las secciones presentes en los diques de abrigo bajo aquellas condiciones que le pueden ser más perjudiciales. Como consecuencia, la propagación del oleaje necesita realizarse desde el punto de obtención de los datos hasta cada uno de los tramos del dique de abrigo del puerto.

Dicha propagación se puede realizar, por ejemplo como primera aproximación, usando la teoría lineal en la que se consideran exclusivamente los coeficientes de Shoaling y de Refracción. Se trata respectivamente, de un coeficiente que afecta a la altura de la ola a medida que ésta se acerca a la línea de la costa y va notando el fondo marino, y un coeficiente que tiene en cuenta el cambio de la dirección del oleaje al notar el fondo. Para los puertos del litoral catalán, se prescindiría de los coeficientes de difracción y reflexión por ser de escasa importancia en comparación con los otros dos considerados. Como se puede apreciar, esta teoría no modifica el período al considerar que se mantiene constante a lo largo de la irradiación del oleaje. Una vez realizada la propagación del oleaje para cada una de las direcciones predominantes, se debería de escoger la dirección que presentara las peores alturas y períodos de ola.

Los datos de partida se pueden obtener a partir de los registros de la red de boyas oceanográficas XIOM perteneciente a la Generalitat de Catalunya, o bien a partir de las boyas de la red de aguas profundas o de la red costera de Puertos del Estado (también podrían utilizarse los puntos WANA o los SIMAR). En este sentido, para cada uno de los puertos considerados se utilizarían los datos de la boya más cercana.

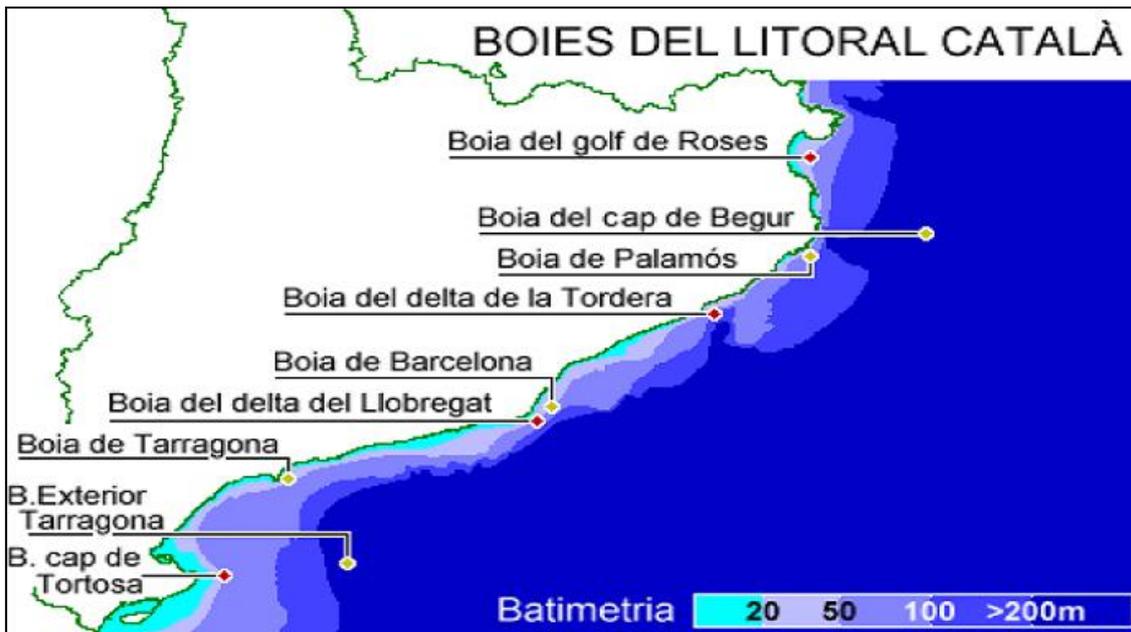


Figura 24. Situación de los puntos de medida a lo largo del litoral catalán con instrumentación de la Generalitat de Catalunya (puntos rojos) y de puertos del Estado (puntos amarillos) [36].

Se ha de ser consciente que esta teoría de propagación introducirá un cierto error que será mayor cuanto más cerca de la orilla se esté propagando, por lo que para el análisis de sensibilidad que se realiza, no es necesario realizar dicha propagación, pudiéndose simplificar el proceso de obtención de las características del oleaje para cada tramo de los diques de abrigo.

Si en vez de realizarse un análisis de sensibilidad global ante una subida del nivel del mar, se estudiara de forma detallada los valores que se estiman para el rebase para cada uno de los puertos, la altura de ola a pie de dique con la que se tiene que trabajar, sí que debería obtenerse de la propagación del oleaje.

La simplificación utilizada en el presente estudio, se basa en el oleaje limitado por fondo. Cuando la altura de ola no viene limitada por el fondo, el proceso de la selección del parámetro de altura de ola de cálculo es un problema complejo relacionado con el nivel de riesgo que se quiera aceptar. Por el contrario, cuando un estado de mar tiene limitadas las mayores olas por la rotura debida al fondo, es de

prever que las olas límite sean las que peores consecuencias traigan consigo, tanto a nivel estructural como operativo.

Así pues, a pesar de que en muchos de los puertos catalanes no sea el caso más común, se ha decidido estudiar cada tramo de los diques de abrigo frente a las peores condiciones de oleaje que les podrían llegar hoy en día.

Estas condiciones son las que induce la llegada perpendicular al dique y a pie de estructura, de la máxima altura de ola físicamente posible, es decir, que no haya experimentado rotura antes de llegar a la estructura. De hecho, en las zonas de profundidad reducida, esta altura de ola es el parámetro básico para el diseño de estructuras de protección costera.

En función del calado a pie de estructura y utilizando alguno de los criterios de rotura existentes, es posible estimar la altura de ola máxima que puede incidir sobre la estructura (que será la de la mayor ola que rompa sobre la misma).

Para olas en profundidades reducidas e intermedias, donde se encuentran habitualmente los puertos, básicamente existen dos tipos de criterios de rotura [37]:

- I. Criterios que expresan las condiciones de rotura en función de parámetros locales de la ola y características batimétricas
- II. Criterios que especifican la altura de ola en rotura en función de características batimétricas y peralte de la onda en la zona offshore ( $H_0/L_0$ ).

De entre estos dos tipos de criterios de rotura, el que interesa aplicar para la obtención de la máxima altura de ola que puede incidir en las diferentes secciones, es el primero. Dentro de este grupo existen varios criterios, pero finalmente se opta por utilizar el de McCowan, quien determinó que el oleaje rompe cuando su altura alcanza un valor igual a una fracción de la profundidad [37]:

$$H = \gamma h_b$$

A pesar de las primeras aproximaciones hechas por el autor para  $\gamma$ , bajo la misma base teórica, otros investigadores han obtenido el valor teórico aplicable en la obtención, en oleaje irregular, de la altura de ola significativa (utilizada normalmente para la calcular de la tasa media de rebase  $q$ ) [37]:

$$\gamma = \frac{0.78}{\sqrt{2}} \approx 0.55$$

El motivo de la elección de este método reside en el bajo error relativo, inferior al 20%, frente al 30% o más que presentan otros métodos [37]. Así pues, se puede asumir que las aproximaciones son lo suficientemente válidas.

Hay que comentar que para las supuestas subidas del nivel medio del mar analizadas, no se ha considerado la variación del calado a pie de estructura para la obtención de la máxima altura de ola incidente en el dique. El motivo son los bajos

porcentajes en los que aumentaría la altura a considerar, siendo en los casos más extremos de un 5% aproximadamente.

Una vez obtenido el valor de la altura de la ola a considerar para cada tramo de dique de abrigo, el siguiente paso es obtener el otro parámetro del oleaje que se necesita introducir en el programa para poderlo ejecutar: el período asociado a cada altura de ola.

Si se dieran las alturas de ola consideradas, éstas tendrían lugar en condiciones de temporal extremo. Según el personal del LIM [38], el periodo de pico asociado a los mayores temporales registrados en el litoral catalán está en torno a los 11-13 segundos. Para este estudio de sensibilidad, se ha considerado representativo un valor común del periodo de pico de 11 s para todo el litoral.

Un análisis en detalle de la configuración de la costa muestra que, a pesar de considerar las peores condiciones de oleaje posibles para cada tramo de dique de abrigo, hay algunos puertos en los que es muy difícil que se puedan dar como consecuencia de la protección que ejercen algunos elementos naturales. Éste puede ser el caso de Sant Carles de la Ràpita o incluso Alcanar (Cementos del Mar), puertos relativamente protegidos por la flecha de arena del Trabucador del Delta del Ebro.

Cabe decir que, la posible sobreestimación de las características del oleaje como resultado del eventual abrigo que puede ofrecer la costa en algunos puntos del litoral catalán no distorsiona los resultados del análisis de sensibilidad, puesto que en los diferentes casos analizados, incluido el correspondiente a la respuesta del dique en la actualidad, se han utilizado siempre las mismas características del oleaje.

#### 4.4 Simulación de la subida del nivel medio del mar

Asumida la posible subida del nivel medio del mar como una de las consecuencias que el cambio climático puede provocar en el medio marino, se plantea cómo evolucionará el previsible aumento en la magnitud y frecuencia del rebase y cómo este incremento puede afectar a los diferentes puertos del litoral catalán.

Con el programa que se ha utilizado, la manera en la que se ha estudiado la influencia del ascenso del nivel del mar en el rebase al que se verán sometidas las estructuras portuarias, ha sido simular la pérdida de francobordo que se producirá a medida que se incrementará el nivel del mar.

Tal y como se ha visto en el capítulo 2 de la presente tesina, son muchas las estimaciones y previsiones que se han realizado por los investigadores con respecto a la cuantificación de los posibles aumentos del nivel del mar.

Para el análisis de sensibilidad realizado, se han considerado tres posibles subidas del nivel medio del mar:

- CASO 1: subida de +0.20 m.
- CASO 2: subida de +0.50 m.
- CASO 3: subida de +1.00 m.

El primero hace referencia a la extrapolación, para el año 2050, de una subida de 2.5-3 mm/año, obteniéndose una subida de entre +0.125 y +0.20 m [14]. El segundo caso se basa en la publicación “Impactos sobre las zonas costeras. Impactos del cambio climático en España” [1], en la que se considera que un ascenso de alrededor de 50 cm para finales de siglo es un escenario más que razonable. En cambio, el último de los casos se fundamenta en las hipótesis más pesimistas correspondientes con el máximo de algunas predicciones, bastante menos probables pero no descartables, que estiman una subida del nivel del mar para finales de siglo del orden de 1 m.

Para todos los puertos objeto de estudio, los valores de rebase que se obtienen en cada uno de los casos analizados, se comparan con los obtenidos para el rebase que se produciría hoy en día con el nivel medio de mar actual y las peores características del oleaje que se pudiesen dar (CASO 0).

En el nivel medio actual, se acepta cierta variabilidad vertical que se considera “normal” y que tiene en cuenta ciertas oscilaciones de período mucho mayor que las olas que se dan en cualquier costa. Habitualmente se consideran dos componentes en estas oscilaciones:

- La componente periódica asociada con la marea astronómica
- La componente no periódica asociada con la marea meteorológica

La componente astronómica juega un papel primordial en las costas mesomareales y macromareales del litoral atlántico español, pero en la costa micromareal Mediterránea su efecto es muy pequeño, no superándose los 30 cm.

La marea meteorológica se debe al efecto combinado de la presión atmosférica (efecto barométrico invertido) y la tensión tangencial del viento, pudiéndose dar sobreelevaciones de importante consideración ante la presencia de una borrasca.

Hay que tener en cuenta que las peores alturas de ola, que en todos los casos analizados se considera que son las que llegan a los puertos para el estudio del rebase, sólo se podrían dar en caso de fuerte temporal, por lo que además de las correspondientes subidas del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático, también se ha de considerar la sobreelevación que resulta de una marea meteorológica.

El valor que se ha tomado para simular el aumento del nivel del mar fruto de una marea meteorológica es el máximo que proporciona la ROM 02-90 [39] (tabla 6). Este valor tiene en cuenta la simultaneidad de la mayor marea astronómica y meteorológica que se pueden dar.

Tabla 6. Niveles Característicos de las aguas libres exteriores en las zonas costeras españolas [39].

		Mar con marea astronómica	Mar sin marea astronómica significativa	Zonas con marea astronómica sometidas a corrientes fluviales	Corriente fluvial no afectada por mareas
En condiciones normales de operación	Nivel máximo	PMVE	NM + 0.3 m	PMVE y NMI	NMI
	Nivel mínimo	BMVE	NM - 0.3 m	BMVE y NME	NME
En condiciones extremas de operación	Nivel máximo	PMVE + 0.5 m	NM + 0.8 m	PMVE y NMaxA	NMaxE
	Nivel mínimo	BMVE - 0.5 m	NM - 0.8 m	BMVE y NMinE	NMinE

En resumen, las situaciones que se han estudiado han sido:

- CASO 0: NMM actual + 0.8 m.
- CASO 1: NMM actual + 0.8 m + 0.20 m.
- CASO 2: NMM actual + 0.8 m + 0.50 m.
- CASO 3: NMM actual + 0.8 m + 1.00 m.

## 4.5 Resultados

### 4.5.1 Ficha informativa de cada puerto

En el anejo 1 que se encuentra al final de esta tesina se encuentran las fichas informativas que se han elaborado para cada uno de los puertos analizados. En ellas se muestran resumidos los principales aspectos que se han tenido en cuenta en la evaluación de las diferentes secciones de cada dique. A modo de ejemplo, en la figura 25 se enseña la ficha del puerto de Les Cases d'Alcanar.

En la parte superior de la ficha se muestra un plano en planta del puerto estudiado, indicándose las diferentes secciones que conforman el dique de abrigo. También se ha indicado cuál es la dirección más desfavorable con la que los temporales pueden incidir sobre el puerto.

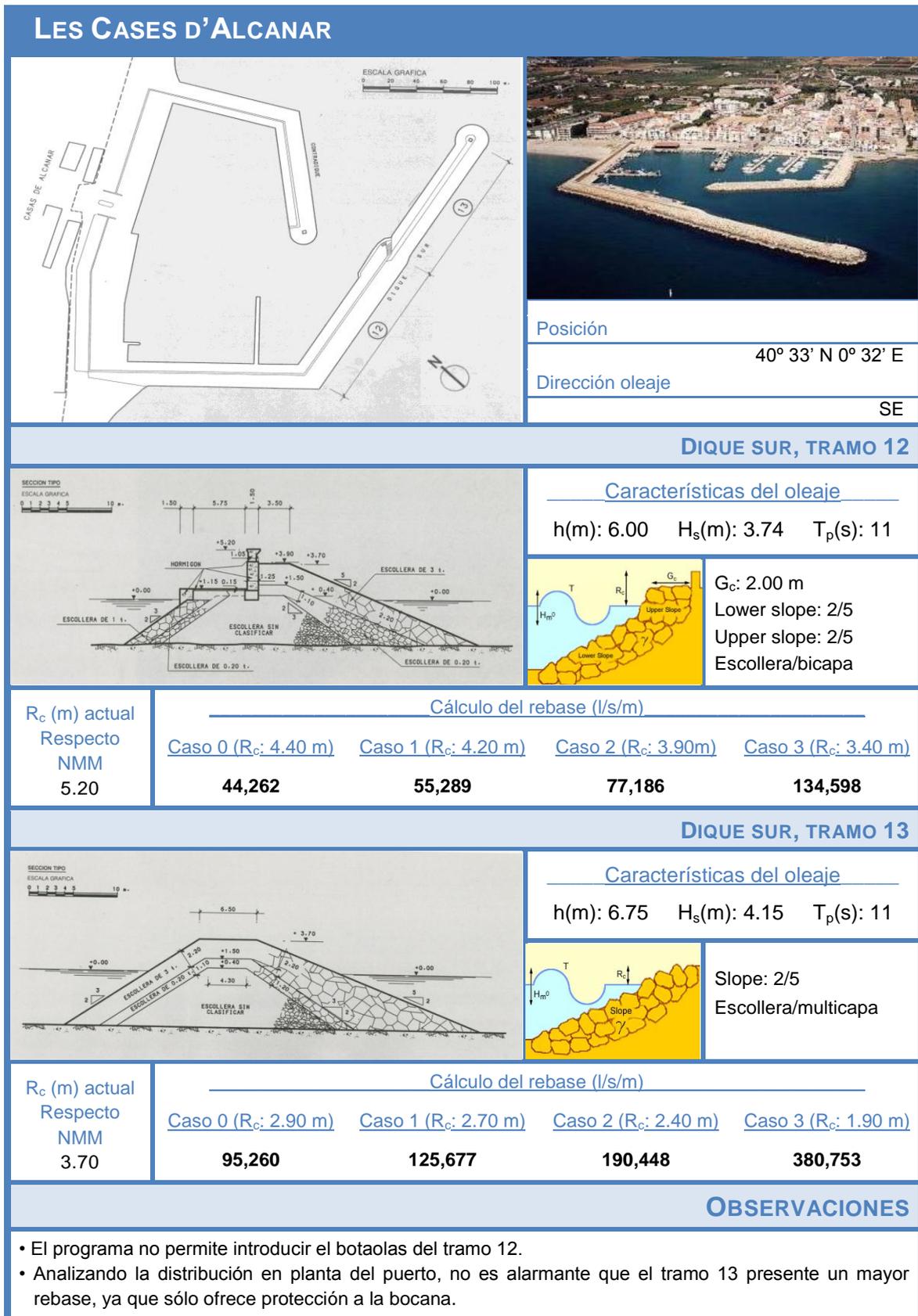


Figura 25. Ejemplo de la ficha resumen/informativa realizada para cada puerto estudiado (fuente propia).

A continuación, y para cada uno de los tramos del dique principal, se adjunta una sección transversal donde se reflejan sus características principales. Junto con ésta, se muestra cual de todas las opciones de las que ofrece el programa “Métodos Empíricos” del Eurotop se ha escogido para evaluar la respuesta de la sección frente al rebase, indicándose el valor de las características geométricas que se han de incluir en la entrada de los datos. Se especifican también las peores condiciones del oleaje con las que se han realizado los cálculos, teniendo en cuenta que la dirección de ataque del oleaje siempre ha sido la perpendicular al tramo.

La última información con la que se acompaña cada tramo es la cota de coronación con respecto al nivel medio actual, así como con los valores estimados por la herramienta de cálculo para cada una de los supuestos aumentos del nivel del mar, simulados como ya se ha dicho, a partir de la disminución del francobordo; de hecho, para cada incremento se indica el francobordo con el que se realizan los cálculos.

La ficha concluye con un apartado para las observaciones que se hayan podido realizar a lo largo del análisis del puerto, tales como simplificaciones en las secciones transversales que hayan tenido que realizarse para poder asimilarlas a una de las opciones del programa, aspectos importantes del dique que no se pueden tener en cuenta y que pueden reducir notablemente los valores del rebase (como por ejemplo la existencia de un botaolas en el espaldón), o una primera y rápida interpretación de los valores obtenidos para el rebase.

#### 4.5.2 Análisis de los resultados obtenidos

Una vez se han definido todos los parámetros del oleaje con los que se realiza el estudio, se identifica cada una de las secciones de los puertos con una de las opciones que proporciona el programa, y se decide cuáles serán los casos analizar, ya no queda ningún cabo suelto que impida poder ejecutar el programa que proporciona los valores de la tasa media de rebase.

Si se analizan los resultados obtenidos (que se adjuntan, tal y como se ha comentado, en las fichas resumen/informativas), una de las primeras observaciones que se puede realizar a nivel general es el elevado valor que toman las tasas de rebase en todos los casos, incluido el caso 0 (rebases en la actualidad), cuyos valores obtenidos son muy superiores a los límites máximos que se recomienda que se den a lo largo de la vida útil de la estructura, llegando a ser en algunos casos, incluso de 2 y 3 órdenes de magnitud mayores a los preestablecidos.

Una justificación a los altos valores de rebase que se obtienen es que con las condiciones de oleaje que se tienen en cuenta (recordemos que son las peores a las que se pueden enfrentar las estructuras y que raramente se dan) el programa de cálculo queda fuera de rango, pudiéndose dar el caso de que los valores de rebase se sobreestimen. Presumiblemente, lo mismo sucedería si se utilizara cualquier otra herramienta de cálculo existente; la explicación recae en que la mayoría de éstas se

basan en formulaciones desarrolladas a partir de los caudales medidos en ensayos de laboratorio a escalas reducidas, por lo que es lógico pensar que para los rebases que se obtienen bajo condiciones excepcionales, las fórmulas empíricas no se ajusten demasiado bien. De hecho, este es uno de los principales inconvenientes que presenta el estudio del rebase: encontrar cuáles son los límites inferiores y superiores entre los cuales las formulaciones existentes se ajustan a la realidad.

Aún siendo conscientes de que los valores estimados son elevados, si se comparan algunos de ellos con las descargas límites aceptables (que proporciona el “Handbook of Coastal and Ocean Engineering” [22]) para que no se produzcan daños significativos en la coronación o en el trasdós de los diques de abrigo (tabla 7), se ve que los rebases obtenidos tampoco están fuera de un intervalo de aceptación. Más aún si se tiene en cuenta que al considerar las mayores alturas de ola posible, el período de retorno asociado a las mismas aumentaría considerablemente, aumentándose también las tasas medias de rebase.

Tabla 7. Límites de rebase para daños en la coronación o en la parte posterior [22].

Tipo de daño y motivo		q (l/s/m)
<b>Diques en talud</b>	Sin daños si la coronación y el talud interior están bien protegidos.	50-200
	Sin daños en la coronación o en el talud interior (cubiertos de hierba).	1-10
	Sin daños en la coronación o en el talud interior (no protegidos).	0.1
<b>Paseos marítimos o diques verticales</b>	Daños a paseos pavimentados detrás de la defensa.	200
	Daños a paseos ligeramente protegidos o con césped.	50

De hecho, si se contrastan de forma general con los valores obtenidos en el estudio cuantitativo de los fenómenos de rebase que se produjeron en el temporal de mar de noviembre de 2001 [3], las estimaciones generadas por el programa resultan no ser tan disparatadas como en un principio se pensó. Por ejemplo, en la figura 26 se puede comprobar que el rebase que se produjo en el puerto de Canyelles (cerca del 800 l/s/m) se acerca bastante al obtenido en esta tesina para el caso 0 (alrededor de 1000l/s/m).

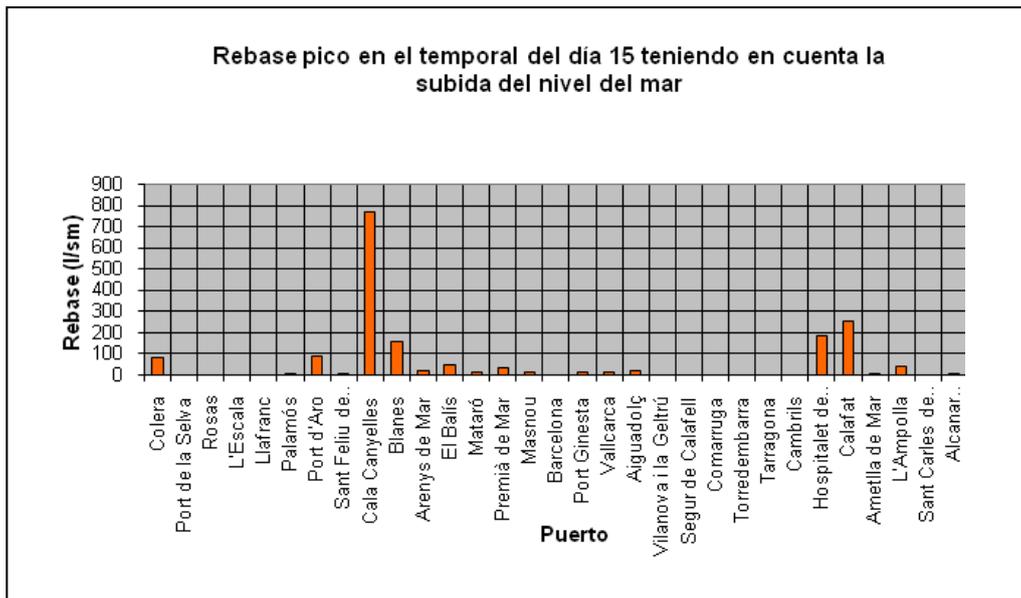


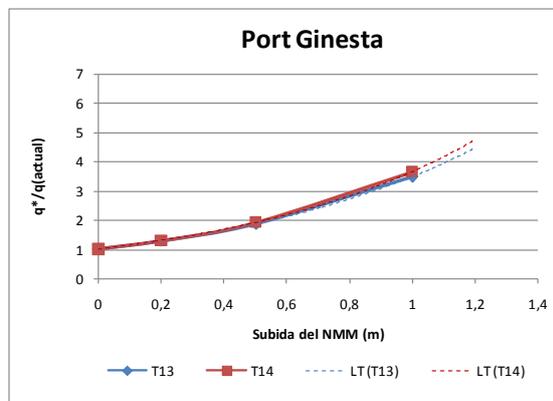
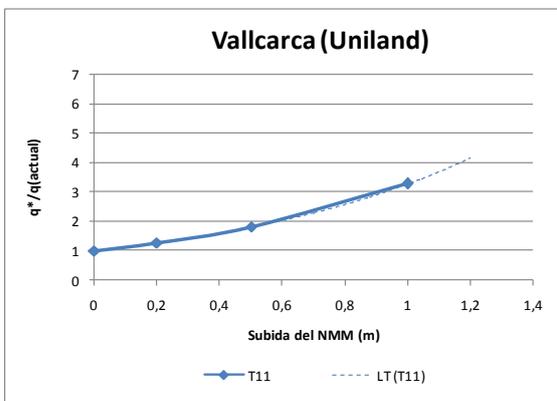
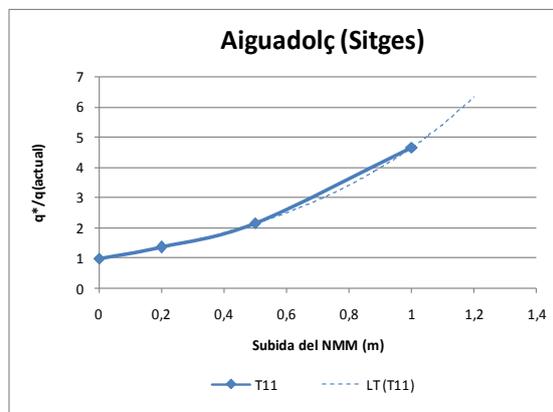
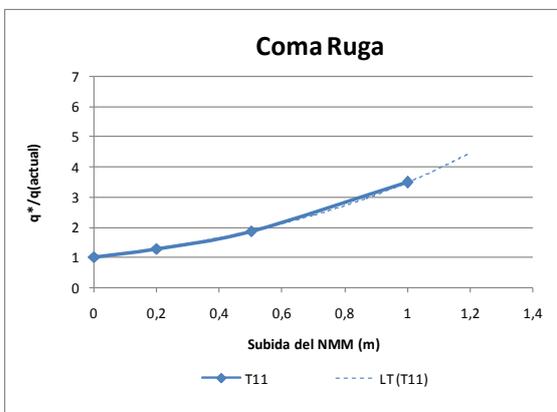
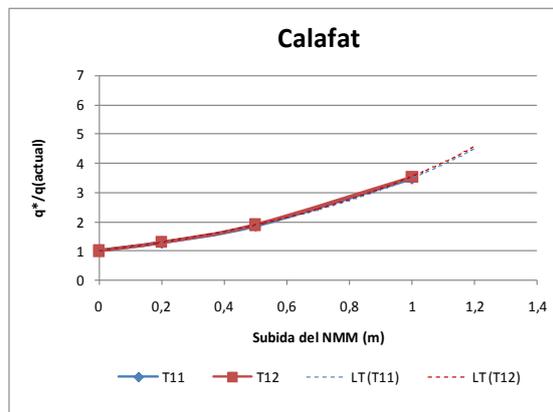
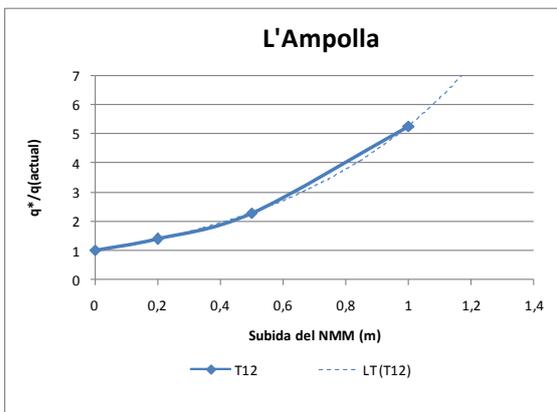
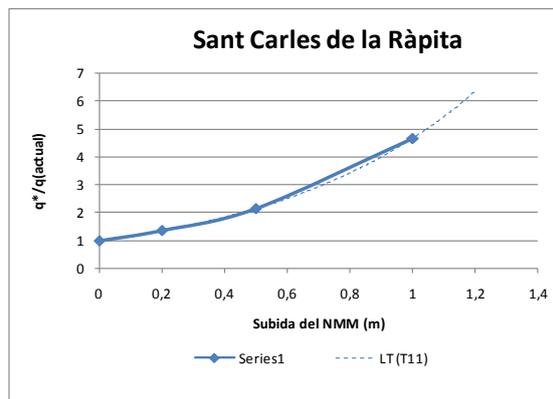
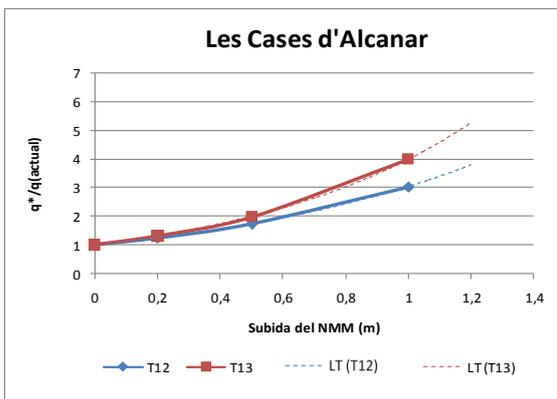
Figura 26. Rebases picos en la tormenta de noviembre de 2001 [3].

Realizadas estas observaciones previas, a continuación se expone para cada uno de los puertos considerados la evolución de la tasa media de rebase que se obtiene del análisis de resultados. Dicha evolución se ha examinado a partir de los incrementos que experimenta el rebase respecto a los valores del caso 0 (valores del rebase en la situación actual suponiendo las peores alturas de olas posible). Para ello se ha definido el parámetro  $q^*$  como el valor del rebase que se produce en cada uno de los tres casos analizados. También se ha representado para cada sección la línea de tendencia (LT) que siguen los valores obtenidos.

Si se examina con detenimiento la evolución que presenta el rebase para los distintos incrementos del nivel medio del mar considerados, se puede observar cómo en la mayoría de los casos (para más del 60% de los puertos) la tendencia general es que los incrementos de rebase aumentan de forma exponencial con la pérdida de francobordo (figura 27).

Para una subida del nivel medio del mar de 1 m, la tasa media de rebase se multiplica, por lo general, por 4, llegando a 5 en algunos casos. En cambio, para el incremento de 0.2, estos aumentos se sitúan alrededor del 20-50% de los que se podrían producir hoy en día. Finalmente, para el caso 2 (subida del NMM de 0.50 m), los porcentajes llegan hasta el 50-120% de los calculados para la actualidad.

Sólo hay dos casos en los que la tendencia exponencial es mucho más pronunciada que en el resto, por lo que los efectos adversos que conllevarían los rebase serían aún mayores. Este es el caso de L'Hospitalet de l'Infant o Aiguablava.



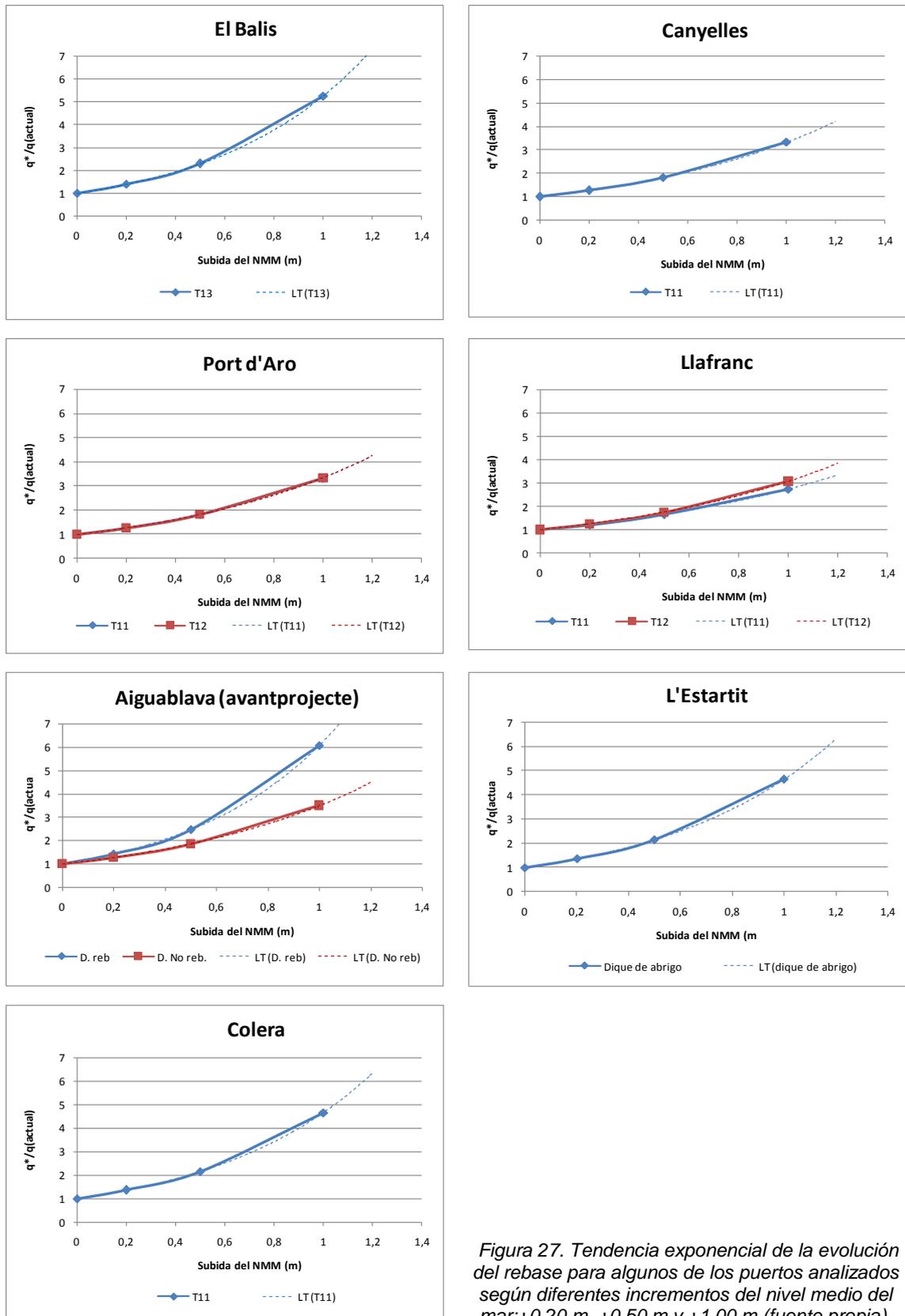


Figura 27. Tendència exponencial de l'evolució del rebase per alguns dels ports analitzats segons diferents increments del nivell mitjà del mar: +0.20 m, +0.50 m i +1.00 m (font pròpia).

Las características del oleaje que se han considerado en todos los casos han sido siempre las mismas, pero hay que aclarar que si se produjera un incremento del nivel medio del mar, la consecuencia complementaria a la pérdida de altura de coronación sería el aumento del calado a pie de estructura que influye directamente en la altura de ola incidente. Si el calado aumentara, resultarían alturas de olas mayores a las actuales, por lo que cabe esperar que si se tuviera en cuenta no tan sólo la pérdida de francobordo sino también el aumento en la altura de ola propagada, las tendencias exponenciales que ahora resultan serían mucho más pronunciadas.

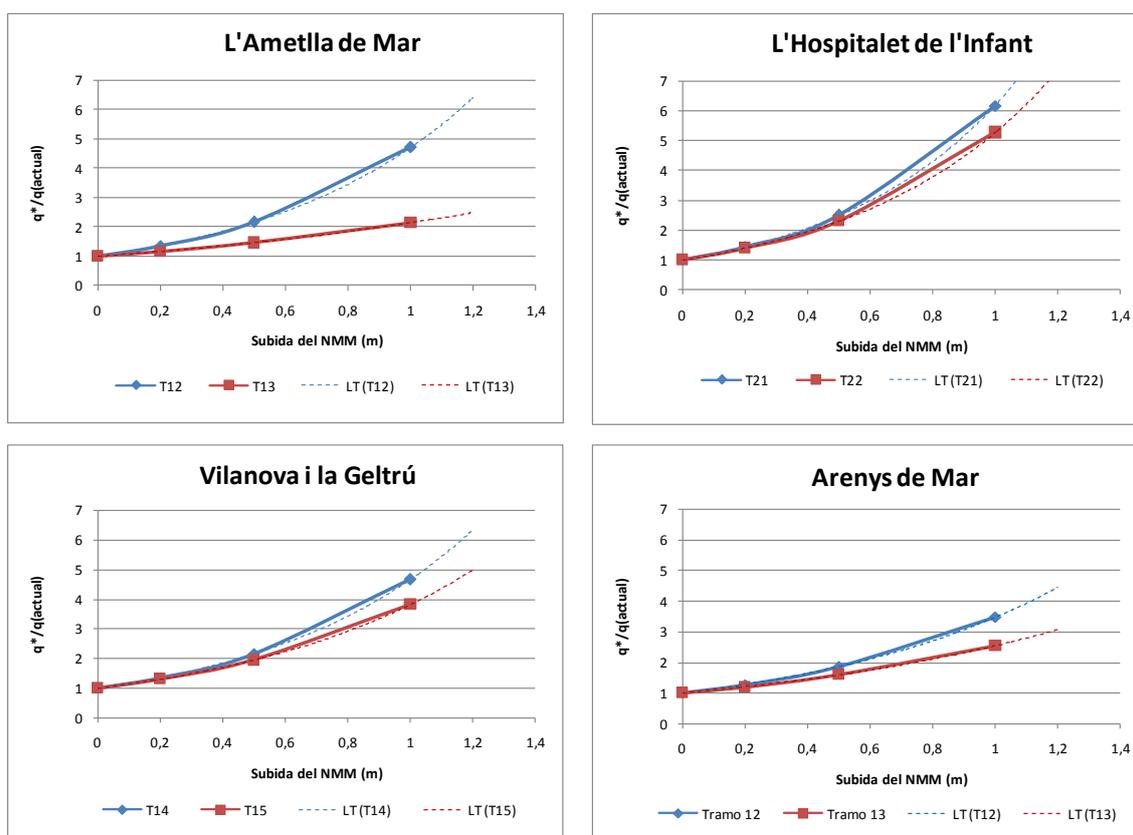


Figura 28. Ejemplo de puertos con varias secciones en los que el incremento de la tasa media de rebase es mayor en la sección de menor calado (fuente propia).

Destaca que en muchos de los puertos cuyos diques de abrigo están formados por dos tipologías estructurales, el incremento de rebase en la sección de menor calado, y que generalmente ofrece mayor protección a la dársena interior (algunos tienen muelles en los que atracan los barcos), es mayor que el que se produce en el tramo más interior del dique, de mayor calado, y que por lo general sólo ofrece protección a la bocana. Si se revisan las secciones del programa a las que se han asimilado las secciones reales, por lo general, las primeras son secciones con coronación, diseñadas como estructuras no rebasables o muy poco rebasables mientras que las segundas se diseñan para permitir unas ciertas tasas de rebase. Así

pues, es muy lógico que la subida del nivel del mar produzca unos incrementos mayores en los diques diseñados como no rebasables. Esta tendencia se puede observar claramente en la figura 28 para los puertos de L'Ametlla de Mar, L'Hospitalet de l'Infant y Vilanova i la Geltrú. También ocurre en los puertos de Tarragona y Barcelona (figura 29 y 30).

Además de las tendencias exponenciales vistas por el momento, hay algunas secciones de puertos en las que los incrementos de la tasa de rebase tienen un crecimiento claramente lineal. Este comportamiento se puede observar en los puertos de Blanes, Palamós, Port Fórum, Port Olímpic y en los puertos más importantes de la costa catalana: Tarragona y Barcelona.

Es muy destacable el caso de Barcelona (figura 29), que a pesar de los problemas con el rebase que se le atribuyen hoy en día presenta uno de los incrementos de la tasa media de rebases más pequeños de todo el litoral catalán. En su dique de abrigo se diferencian 4 secciones distintas: las dos primeras se sitúan en un calado de 16 m, mientras que las otras dos llegan hasta los 20 m de profundidad. Es uno de los puertos en los que las secciones de menor calado experimentan unos incrementos de rebase mayores, aunque en este caso, no muy destacables, seguramente por la poca diferencia entre los grandes calados que presenta.

Para el peor de los escenarios analizados y para las secciones que mayores aumentos de rebase experimentan (como ya se ha dicho, las dos primeras, correspondientes a los tramos 12 y 13), los caudales que se dan en la actualidad sólo se multiplican, aproximadamente, por dos. Lógicamente, este es un valor bajo si se compara con los incrementos que se dan en los puertos analizados anteriormente (figuras 27 y 28).

Es de sentido común que los aumentos para los casos 1 y 2 sean aún mucho menores. De hecho, para el incremento de 0.5 m (caso 2) el crecimiento del rebase es del 50%, no llegando al 20% para un incremento de 0.20 m (caso 1).

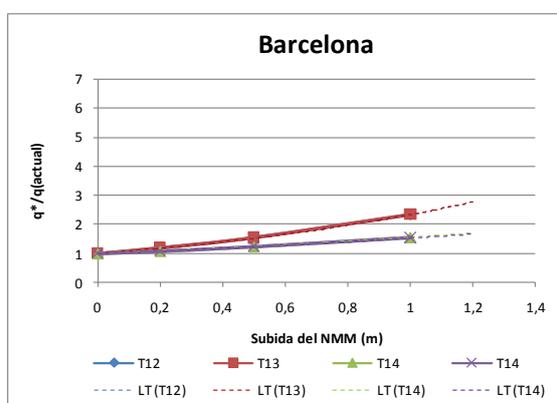


Figura 29. Evolución de la tasa media de rebase para el puerto de Barcelona (fuente propia).

Para el puerto de Tarragona (figura 30), el comportamiento de sus cinco tramos guarda una cierta correlación con los de Barcelona. En este caso, las respuestas se agrupan en tres tendencias.

El tramo 12, el de menor calado (8 m), es el que experimenta un mayor incremento del rebase, siendo su tendencia igual de exponencial como la que se ha visto que tienen la gran mayoría de los puertos catalanes. Los tramos 14, 15 y 16, los de mayor calado (15, 23 y 27 m respectivamente), tienen prácticamente una respuesta idéntica: son los que presentan una menor afectación; para la mayor subida del nivel medio del mar que se ha considerado, el rebase estimado no llega a ser el doble del actual.

En el tramo intermedio, el 13, a pesar de que el incremento que sufre el rebase es el doble del que se da en los tramos 14, 15 y 16, su tendencia exponencial es muy poco pronunciada.

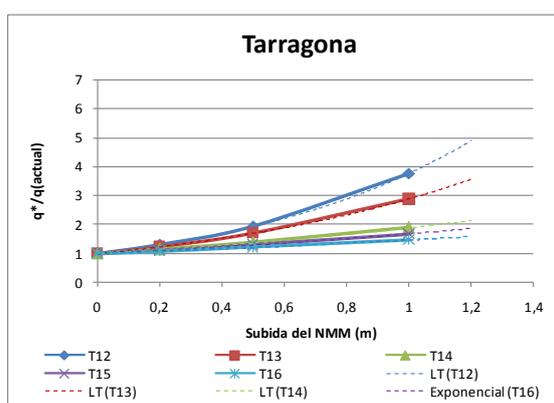


Figura 30. Evolución de la tasa media de rebase para los puertos de Barcelona y Tarragona (fuente propia).

Tiene una cierta lógica que estos dos últimos puertos, el de Barcelona y el de Tarragona, sean unos de los menos sensibles a la subida del nivel medio. Se trata de puertos con una gran repercusión en la economía e industria de Cataluña, por lo que están diseñados con unas cotas de coronación considerables (que varían entre los +7.60 y los +12.80) para reducir al mínimo posible los días de inoperatividad del puerto. Son estas grandes cotas de coronación las responsables del los bajos incrementos del rebase, que pese a que pueden suponer grandes problemas para estos puertos dada su importante actividad, no son tan importantes comparados con los que se dan para el resto de los puertos.

La sección del dique de abrigo del puerto de Palamós es otra de las secciones que menores crecimientos de rebase experimenta para las subidas del nivel del mar analizadas. Los porcentajes de incremento para el caso 1, caso 2 y caso 3 son, respectivamente, de 10%, 25% y 60% (figura 31).

La característica común entre los puertos de Tarragona, Barcelona y Palamós es el gran calado; en Palamós se llega a los 20 m. Así pues, una primera conclusión a

la que se podría llegar es que la tendencia del incremento del rebase es más lineal cuanto mayor sea el calado de las secciones.

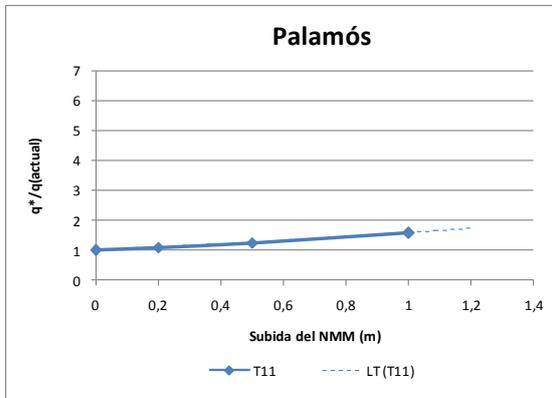


Figura 31. Tendencia lineal que se da en el puerto de Palamós (fuente propia).

Como excepción, los puertos Port Olímpic y Port Fórum (figura 32) responden ante las supuestas subidas del nivel del mar con una tendencia claramente lineal sin caracterizarse por un gran calado. Una posible explicación es que este sea el resultado de la combinación del tipo de estructura (dique vertical y dique mixto respectivamente) con, relativamente, unas bajas alturas de ola de cálculo.

En el Port Olímpic, la altura de ola se limita considerablemente por la presencia del dique sumergido que hay ubicado en frente del dique de abrigo, por lo que los incrementos del rebase no son tan importantes que en otros puertos.

Aún siendo la evolución del rebase muy lineal (de hecho es el puerto del litoral catalán con el menor incremento), e incluso pareciendo que llegue a estabilizarse a primera vista, los resultados obtenidos para el Port Fórum seguramente serían incluso algo menores en la realidad: el dique diseñado en forma de “U” que permite la captación y drenaje de los caudales de rebase.

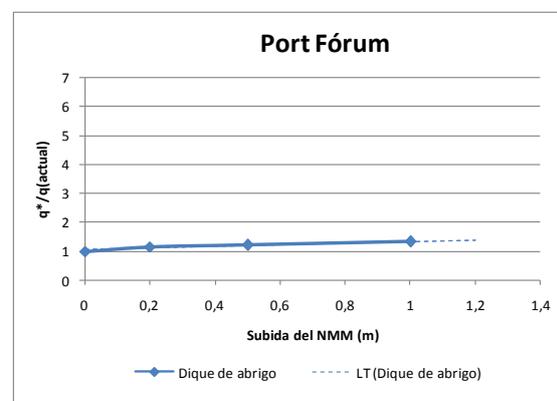
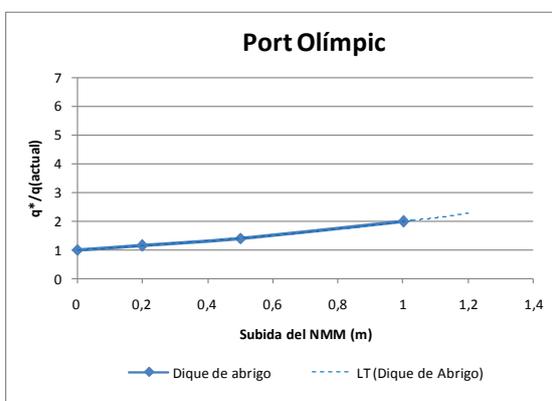
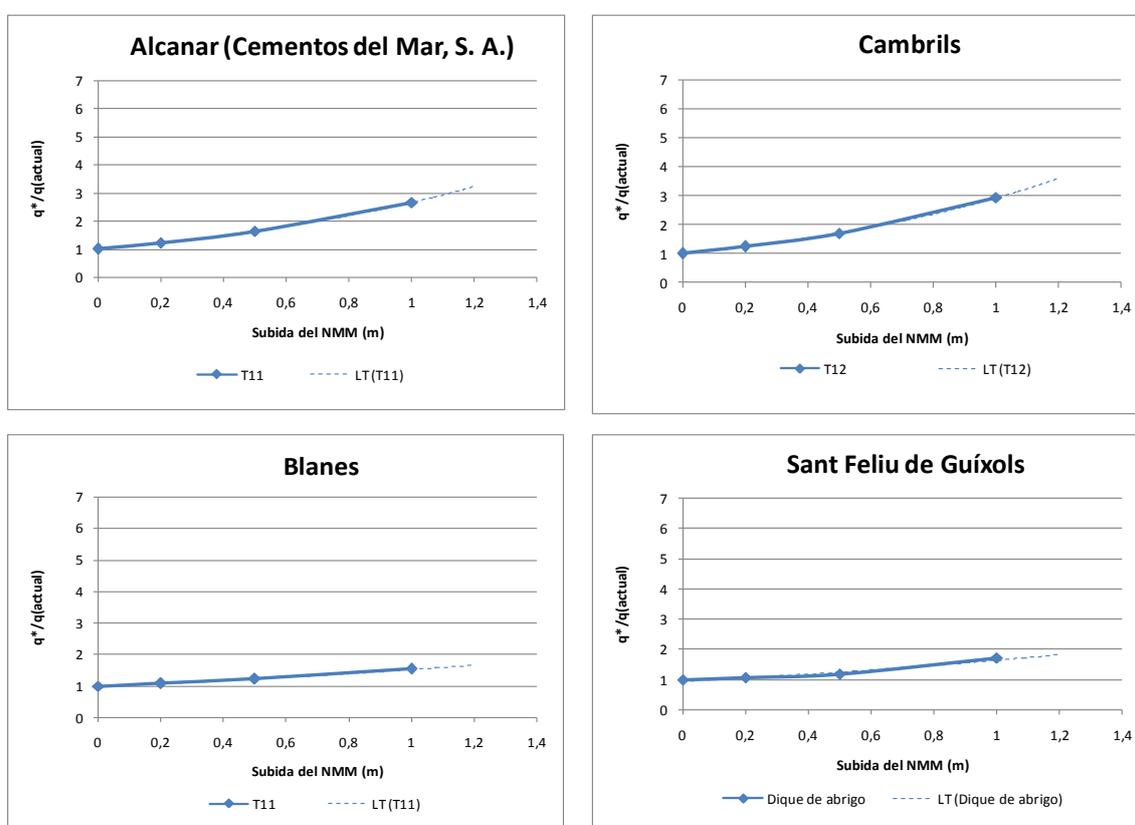


Figura 32. Evolución del rebase para los puertos Port Olímpic y Port Fórum (fuente propia).

Para el resto de los puertos que se han podido estudiar, la tendencia que se observa para el rebase con la subida del nivel del mar no es tan lineal como la vista en los puertos de Barcelona, Palamós o Port Fórum, pero la evolución de los incrementos es muy poco exponencial. Para el caso 3, los rebases se duplican o triplican como máximo, mientras que para los casos 1 y 2, los porcentajes con los que se agrandan las tasas medias de rebase están alrededor del 20 y 50% respectivamente.

Después de analizar las principales características geométricas, puede parecer que este comportamiento se deba al calado “intermedio” en el que se encuentran las secciones de estos puertos, aproximadamente entre los 8 y los 15 m. Sin embargo, es el puerto de Roses una excepción al ser su calado de 4 m; en este caso, la interpretación a la tendencia lineal puede ser el resultado de la sección a la que se asimila la estructura: dique vertical con berma de pie. Para que funcionara el programa y no diera error, la altura de ola máxima venía condicionada por el calado existente por encima de la berma. Como consecuencia resulta una altura de ola de cálculo muy pequeña que combinada con la tipología de dique, podría explicar la tendencia tan poco exponencial del rebase que se da.

Los puertos en los que se aprecia una tendencia ligeramente lineal o muy poco exponencial son principalmente los que aparecen en la figura 33:



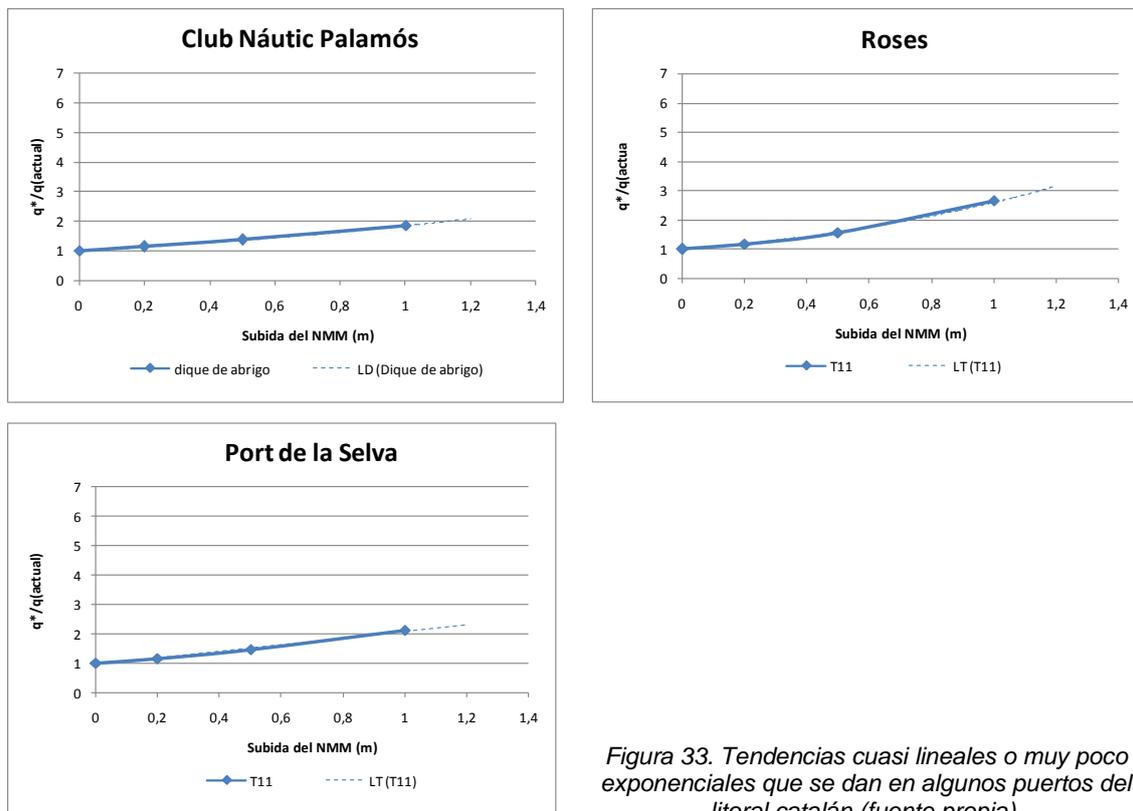


Figura 33. Tendencias cuasi lineales o muy poco exponenciales que se dan en algunos puertos del litoral catalán (fuente propia).

Nuevamente, se quiere remarcar que la situación de referencia o de partida respecto de la que se han obtenido los incrementos, es la actual, por lo que si hoy en día ya hay rebases excesivos en algunos temporales, el problema crecería para mayores niveles medios del mar. Tal y como se acaba de ver, este crecimiento puede ser lineal o bien exponencial.

A modo resumen, se adjunta una tabla (tabla 8) donde se pueden ver las tendencias más generales de la evolución del rebase con los porcentajes aproximados de aumento para los tres escenarios futuros supuestos:

Tabla 8. Resumen de las tendencias de la evolución del rebase con los porcentajes de aumento para los casos 1, 2 y 3 (fuente propia).

	% de aumento de la tasa media de rebase		
	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Crecimiento exponencial	20-50	50-120	120-500
Crecimiento exponencial suave	10-30	30-90	90-200
Crecimiento lineal	10-20	20-50	50-100

### 4.5.3 Mapa de sensibilidad

Con tal de poder realizar los mapas de vulnerabilidad de los puertos catalanes analizados ante un previsible aumento del nivel medio del mar, se ha representado en un histograma para cada uno de los tres casos analizados, el porcentaje en el que aumentaría la tasa media de rebase en la sección que peor respuesta experimenta (figuras 34, 35 y 36); el color de cada barra indica el grado de vulnerabilidad al que se expone el puerto: a mayor tonalidad, mayor vulnerabilidad.

Aunque por lo general concuerdan los valores de rebase obtenidos en los casos analizados con los porcentajes en los que se ve aumentado el rebase con respecto al que se produciría en la actualidad, hay que comentar que no sucede lo mismo en el caso de L'Ametlla de Mar. En este puerto, aún produciéndose incrementos de aproximadamente el 400% para una subida del nivel medio de 1 metro, la tasa media de rebase obtenida es del 0.241 l/m/s, valor muy por debajo de los obtenidos en el resto de los puertos estudiados y que no implica un aumento excesivo de la vulnerabilidad del puerto.

La explicación a este hecho recae en la elevada cota de coronación del dique de abrigo (a la + 8.00 m) frente a la máxima altura de ola que puede derivarse del calado a pie de estructura ( $H_s = 3.74$  m).

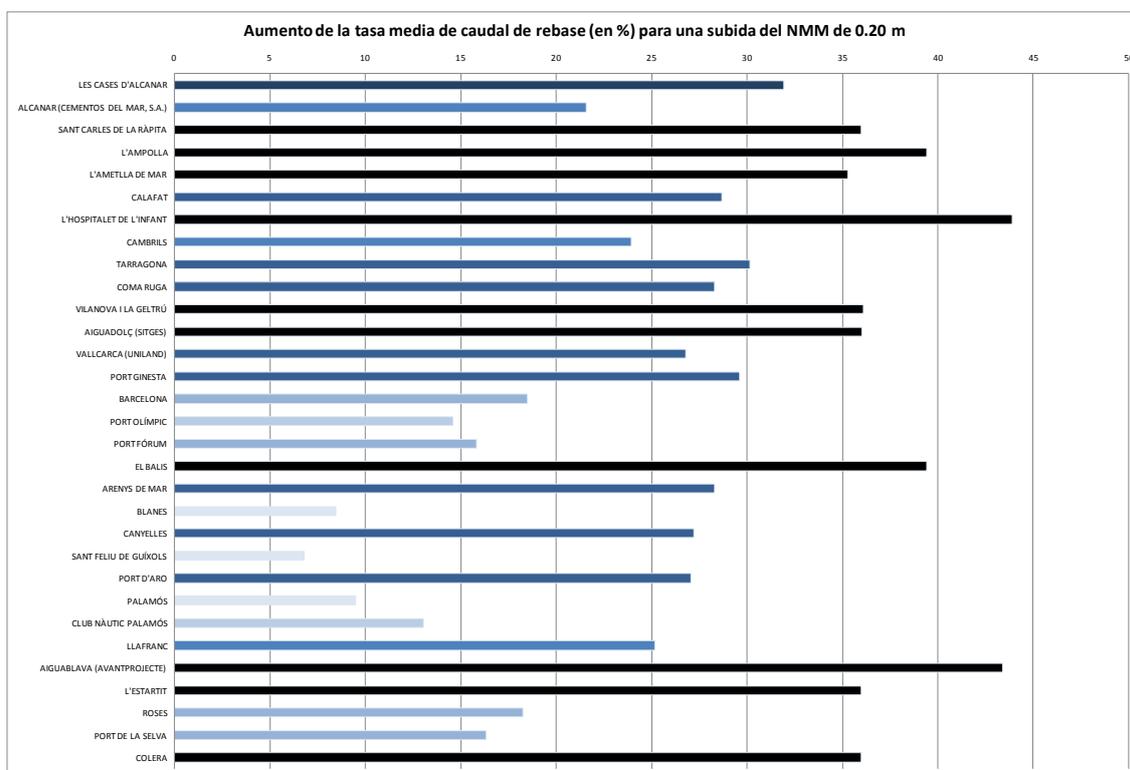


Figura 34. Aumento de la tasa media del caudal de rebase (en %) respecto del valor actual para una subida del NMM de +0.20 m (fuente propia).

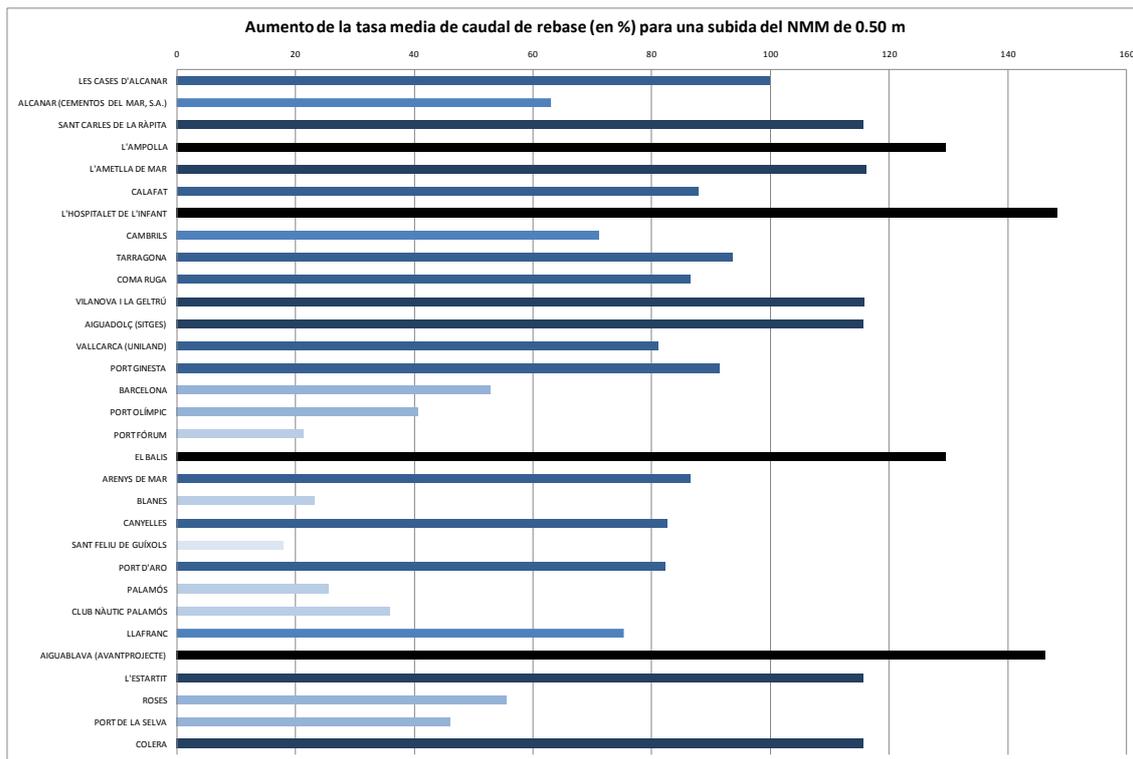


Figura 35. Aumento de la tasa media del caudal de rebase (en %) respecto del valor actual para una subida del NMM de +0.50 m (fuente propia).

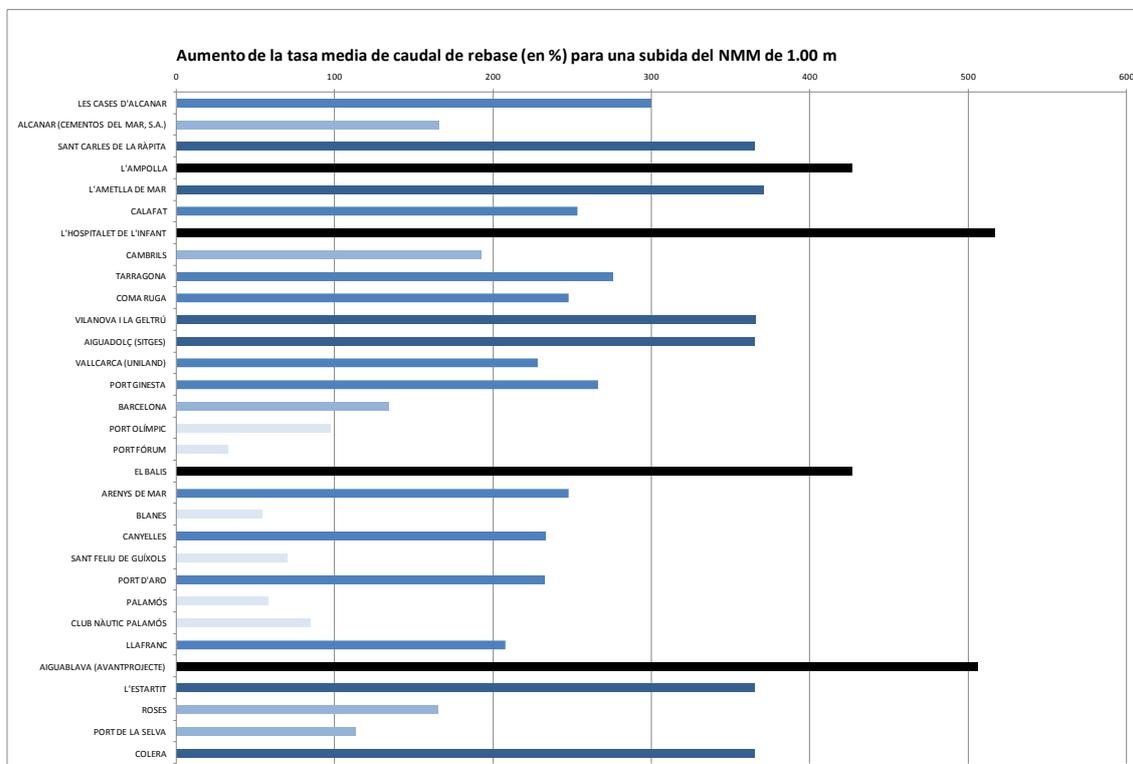


Figura 36. Aumento de la tasa media del caudal de rebase (en %) respecto del valor actual para una subida del NMM de +1.00 m (fuente propia).

Para hacer que los niveles de vulnerabilidad sean mucho más visibles, en el mapa que se adjunta en la siguiente página, los puertos se clasifican sólo según 4 niveles: nivel muy bajo, bajo, medio y muy alto.

La naturaleza aleatoria del oleaje queda patente en el mapa: la cantidad de agua que sobrepasa los diques de abrigo está irregularmente distribuida en el espacio y en el tiempo. A pesar de que no hay una tendencia clara en la distribución de los niveles de vulnerabilidad a lo largo de la costa catalana, sí que se observa una ligera acumulación de puertos con mayores incrementos en la tasa media de rebase en los puertos de la mitad sur de Cataluña por debajo de Barcelona, a excepción del puerto de L'Ametlla de Mar.

Del análisis de la información que proporciona el mapa, se puede comprobar que el riesgo de los puertos estudiados ante una subida del nivel medio del mar es prácticamente idéntico para los tres casos considerados. Son tan solo los puertos de Barcelona, Port Fórum, Palamós y Port de la Selva los que responden de forma distinta en las tres subidas que se han tenido en cuenta.

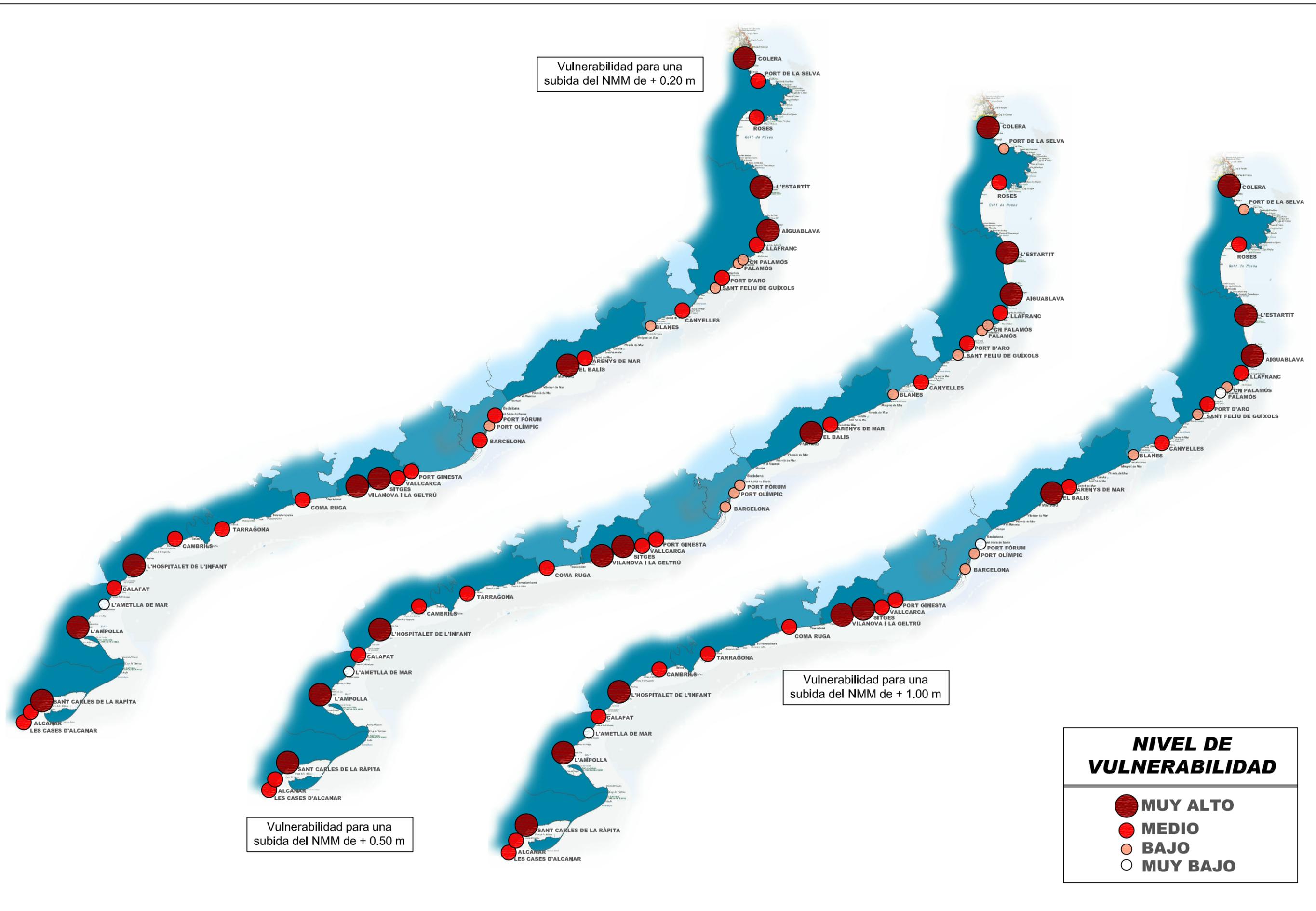
Para el segundo caso considerado, los puertos de Barcelona y Port de la Selva pasan de un nivel de vulnerabilidad medio a un nivel bajo, manteniéndose esta tendencia en el caso 3. Para el puerto de Palamós, el nivel de vulnerabilidad permanece constante en los dos primeros casos, mientras que para el tercero, se pasa de un nivel bajo a uno muy bajo. Algo similar ocurre en el Port Fórum, aunque en este puerto los cambios de nivel son paulatinos: con las progresivas subidas del nivel del mar se pasa de un nivel de riesgo medio a uno bajo y posteriormente a un nivel muy bajo.

Estos descensos en el nivel de vulnerabilidad comentados no significan que con los progresivos incrementos del nivel medio del mar los riesgos en los correspondientes puertos disminuyan. Como en el resto de los puertos catalanes, una subida periódica del nivel medio se traduce en un aumento del rebase, pero según las características del oleaje incidente y las geométricas del dique, estos incrementos serán mayores en unos puertos que en otros. Consecuentemente, los descensos en el nivel de vulnerabilidad de los puertos indican que para las subidas analizadas, son otros los puertos que estarían más expuestos frente a los sucesos de rebase.

Si de ahora en adelante se realiza un plan de estrategias de adaptación frente a los efectos inducidos por el cambio climático en el sector portuario catalán, con la ayuda del mapa de vulnerabilidad realizado se puede conocer cuáles serán los primeros puertos en los que se tendrán que aplicar las medidas de mitigación. Éstos serían los de Sant Carles de la Ràpita, L'Ampolla, L'Hospitalet de l'Infant, Vilanova i la Geltrú, Aiguadolç (Sitges), Port Balis, Aiguablava, L'Estartit y Colera.

Hay que remarcar que los niveles de vulnerabilidad estudiados sólo se refieren a los aumentos del caudal medio de rebase que se producirían con la subida del nivel del mar, no se relacionan estos aumentos con las actividades que se desarrollan en el trasdós del dique. Si se hiciera (proponiéndose como una posible línea de

investigación en el futuro), probablemente alguno de los niveles que resultan ahora cambiarían. Seguramente el puerto de Barcelona o Tarragona serían ejemplos de ello: las importantes operaciones portuarias y logísticas que se desarrollan en sus muelles podrían verse afectadas por un ligero aumento del rebase, por lo que las consecuencias económicas serían mucho mayores que las de otro puerto con los mismos incrementos de rebase pero con una actividad menor.



Vulnerabilidad para una subida del NMM de + 0.20 m

Vulnerabilidad para una subida del NMM de + 1.00 m

Vulnerabilidad para una subida del NMM de + 0.50 m

**NIVEL DE VULNERABILIDAD**

- MUY ALTO
- MEDIO
- BAJO
- MUY BAJO



## CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LAS ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

Entendiendo la adaptación como un proceso por el que se promueven, desarrollan e implementan estrategias destinadas a paliar, moderar y gestionar las consecuencias del cambio climático, es evidente que el sector portuario de Cataluña va a precisar una estrategia de adaptación dadas las grandes consecuencias negativas que se pueden producir.

Estas estrategias de adaptación pueden plantearse a priori o a posteriori, aunque es necesario recordar que la adaptación es un proceso constantemente en progreso y que, por lo tanto, se trata de un proceso iterativo que requiere estrategias de seguimiento y evaluación.

En puertos de nueva construcción como el de Aiguablava, la mejor estrategia de adaptación consiste, sin duda, en introducir el elemento del cambio climático en su diseño. Con esta información y en función de las inversiones necesarias será posible realizar las mejoras necesarias durante la construcción inicial o diferir las actuaciones en el tiempo.

En los puertos ya existentes, tal y como ya se ha comentado, las estrategias de adaptación se han de realizar a partir de estudios de detalle para cada uno de los puertos al ser de carácter local los elementos que condicionan los impactos. A pesar de todo, algunas posibles medidas comunes podrían ser:

- Aumento de la coronación de los diques de abrigo.
- Aumento de la estabilidad de las estructuras mediante diferentes técnicas, como por ejemplo el aumento del peso de las piezas del manto principal.
- Protección de edificaciones, grúas y otros elementos en la superestructura que puedan ser dañados por los aumentos, tanto en la frecuencia como en la cantidad, de los flujos de rebase.

A parte las actuaciones directas ejemplificadas anteriormente, existe toda una serie de medidas que son necesarias llevar a cabo, tanto a nivel local, como regional y nacional, para una correcta definición de las medidas de adaptación. Entre estas cabe señalar:

- Estrategias encaminadas a la evaluación cualitativa y cuantitativa de la vulnerabilidad de las zonas costeras. La primera de ellas es la que se ha llevado a cabo en esta tesina. Para la evaluación cuantitativa, es necesario la puesta en marcha de sistemas de seguimiento y toma de datos sistemática.
- Estrategias encaminadas a la concienciación social de la problemática inducida en la costa (tanto en playas como en estructuras costeras y portuarias) por el efecto del cambio climático.
- Estrategias encaminadas a la mitigación de los efectos del cambio climático mediante estrategias de actuación indirectas.
- Estrategias encaminadas a la aplicación de estrategias de retroceso.
- Políticas encaminadas a la aplicación de estrategias de adaptación.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Siendo conscientes de todos los cambios que el cambio climático puede provocar en los forzamientos (vientos, olas, mareas, corrientes, etc.) y en las variables oceanográficas (nivel medio del mar, temperatura, densidad, etc.), el estudio realizado en esta tesina se ha centrado en analizar cómo se ve afectado el rebase que se produce en los puertos catalanes para un aumento del nivel medio del mar.

Uno de los principales parámetros para combatir el rebase, y de hecho, uno de los puntos críticos en la fase de diseño de un puerto, es la coronación efectiva del dique, que se reduce a medida que el nivel del mar aumenta. Así pues, se ha estudiado la evolución del rebase ante tres posibles subidas del nivel del mar dejando constantes el resto de los parámetros involucrados en el fenómeno (características geométricas y del oleaje). Las subidas del mar han sido documentadas y respaldadas por estudios científicos previos.

En vez de realizar un estudio en detalle para cada uno de los puertos del litoral catalán necesarios para la redacción de un análisis cuantitativo, se ha decidido llevar a cabo una evaluación cualitativa de la vulnerabilidad del máximo número de puertos posible, paso previo a la elaboración del plan de estrategias de adaptación.

Después de todo el trabajo de recopilación y análisis de la información necesaria y del estudio y valoración de los resultados obtenidos con la herramienta de cálculo, las conclusiones más importantes a las que se llegan son las que a continuación se presentan.

Las posibles afecciones que pueden sufrir los puertos, se deben principalmente a cambios en las borrascas y en el nivel medio del mar:

► Los cambios en la intensidad y trayectoria de las borrascas pueden suponer un aumento de las mareas meteorológicas y de las alturas de ola, que conjuntamente

con la subida generalizada del nivel medio, implicaría un incremento de los episodios de rebase y fallos en la operatividad.

► Con la subida del nivel medio del mar, el francobordo con el que fueron diseñados los puertos se reducirá entre 0.20 y 1 metro según algunos estudios, por lo que los volúmenes de rebase sufrirán un aumento respecto a los valores que se dan en la actualidad con los temporales de mar. Como consecuencia, se incrementaría el número de paradas operativas y aumentaría el número de daños que se producen con los temporales de mar.

Respecto al estudio del rebase:

► La evaluación del rebase es un proceso complejo y lleno de incertidumbres debido a la gran cantidad de fenómenos físicos y parámetros involucrados.

► Dada la imposibilidad de ensayar físicamente en el canal de oleaje todos los diques de abrigo existentes a lo largo de la costa catalana, se ha constatado la utilidad que ofrece el uso de las herramientas proporcionadas por el Eurotop.

► Con tal de seguir los mismos criterios en la evaluación del rebase en todas las secciones, se quería trabajar siempre con la misma herramienta. Analizando las características de cada una de ellas se optó por la alternativa "Empirical Methods", aunque con ella, ciertas secciones no se han podido asimilar con fidelidad. En la elección del método de cálculo han quedado patentes las limitaciones y simplificaciones a las que las investigaciones del rebase se ven sujetas, siendo todas las herramientas de cálculo instrumentos a mejorar con el tiempo.

Respecto al análisis de los resultados obtenidos:

► En el caso de partida (caso 0) correspondiente a la actualidad, los valores de la tasa media de rebase son muy superiores a los máximos establecidos para no interrumpir ninguna actividad portuaria, aunque hay que pensar que los valores se han obtenido considerando las máximas alturas de ola que podrían incidir en cada sección. De hecho, en algunos casos, los valores que resultan no difieren en exceso de los que se registraron durante los temporales de noviembre de 2001 o de diciembre de 2008. Así pues, la herramienta de cálculo utilizada se puede suponer lo suficientemente buena como para utilizarla en la elaboración del mapa de sensibilidad.

► Se puede comprobar la gran influencia del nivel del mar en el rebase. Al aumentar el nivel del mar en los tres casos analizados se estiman unos rebases mayores a los actuales en todos los puertos del litoral catalán.

► La tendencia general del incremento de la tasa media de rebase es, en la mayoría de los puertos, exponencial, siendo en algunos de ellos mucho más pronunciada que en otros. En general y como a respuesta extrema, los rebases pueden llegar a cuadruplicar o incluso quintuplicar (sólo se da en dos puertos) las

situaciones actuales. Para las subidas de mar de +0.20 y +0.50 m, los caudales de rebases aumentan entre un 20-50% y un 50-120% respectivamente.

► Un cierto número de secciones presentan una evolución lineal, produciéndose unos incrementos comprendidos entre el 50 y el 100% para los casos más desfavorables, y entre el 10 y el 20% para los casos más favorables.

► En las secciones en las que el aumento del rebase no es claramente lineal pero es muy poco exponencial, los porcentajes de crecimiento varían entre el 10-30% para el caso 1, entre el 30-90% para el caso 2 y entre el 90-200% para el caso 3.

► A partir del estudio de la evolución del rebase en los diques de abrigo de los puertos de Tarragona y Barcelona (formados por más de una sección) y de aquellos en los que la tendencia exponencial no es muy pronunciada, se puede observar que la propensión de la tasa media de rebase es más lineal cuanto mayor sea el calado a pie de dique. Como excepción destacan los puertos Port Olímpic y Port Fórum, en los que la evolución lineal se puede deber a la combinación de las simplificaciones realizadas para asimilar las secciones a una de las opciones del programa de cálculo y a las suaves características del oleaje que resultan.

► En muchos de los puertos cuyos diques de abrigo están formados por más de una sección, se puede observar cómo los incrementos de rebase son mayores en aquellos tramos diseñados como no rebasables (tramos en los que en su trasdós se ubican muelles y/o amarres) que en los diseñados como rebasables (generalmente sólo ofrecen protección a la bocana o a las zona más exteriores del puerto).

Respecto al análisis de sensibilidad:

► La vulnerabilidad en los puertos catalanes ante una subida del nivel medio del mar para los tres escenarios analizados es prácticamente idéntica.

► Los puertos que responden de forma diferente para las tres subidas que se han tenido en cuenta son los de Barcelona, Port Fórum, Palamós y Port de la Selva. En todos ellos, se experimenta una disminución de nivel en la escala de vulnerabilidad considerada.

► Los descensos no significan que los riesgos a los que se exponen los puertos disminuyan al aumentar el nivel medio del mar, sino que para los progresivos incrementos, el porcentaje con el que aumenta el rebase es menor, siendo otros los puertos que resultarían más vulnerables.

► Para los tres casos analizados, el puerto que presentaría menos problemas es el de L'Ametlla de Mar (seguramente consecuencia de la gran cota de coronación del dique de abrigo en comparación con el calado existente) y el de Port Fórum, mientras que los puertos en los que sería necesario actuar en primer lugar serían los de Sant Carles de la Ràpita, L'Ampolla, L'Hospitalet de l'Infant, Vilanova i la Geltrú, Aiguadolç (Sitges), Port Balis, Aiguablava, L'Estartit y Colera.

► Es probable que los niveles de vulnerabilidad que resultan en este estudio pudieran cambiar si se relacionaran los aumentos del rebase obtenidos con las actividades que se desarrollan en el trasdós del dique mediante un estudio económico.

Finalmente, comentar los puntos clave en la redacción de las estrategias de adaptación una vez realizada la evaluación cualitativa de la vulnerabilidad:

- Concienciación social.
- Estudio de estrategias directas e indirectas encaminadas a la mitigación de los efectos del cambio climático, así como la elaboración de políticas encaminadas a la aplicación de las estrategias de adaptación.

## CAPÍTULO 7. FUTRUAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Dada la complejidad en la previsión de los efectos del cambio climático y del estudio del rebase, son muchas las posibles futuras líneas de investigación. Sin embargo, la estructura de esta tesina puede ser una guía para complementar el trabajo de próximas investigaciones y estudios.

En primer lugar, debería ampliarse la cantidad de secciones estudiadas, intentando conseguir, por un medio u otro, la información de aquellos puertos que no ha sido facilitada para su análisis en la presente tesina.

Es indispensable profundizar en el conocimiento de la influencia del cambio climático sobre el nivel medio del mar y sobre los factores impulsores del oleaje, ya que es necesario conocer con exactitud si se están produciendo variaciones en la intensidad, frecuencia, duración y trayectoria de los temporales que afectan directamente los puertos. El actual conocimiento de los fenómenos meteorológicos y oceánicos extremos no permite prever su comportamiento a largo plazo. Dada la importancia que estos fenómenos tienen a la hora de planificar y gestionar las infraestructuras portuarias, es necesario desarrollar y poner en marcha sistemas de seguimiento y toma de datos sistemática enfocados a su comprensión y modelización.

Otra posible línea de trabajo es la elaboración de un estudio de detalle para cada uno de los puertos del litoral catalán, realizando propagaciones particulares a cada uno de ellos. Se recomienda que el estudio se realice individualmente, es decir, que un mismo trabajo no analice los diques de abrigo de dos puertos diferentes. De esta manera se podrán tener en cuenta todos y cada uno de los elementos de carácter local que condicionan los impactos sobre los diques, realizar una evaluación económica en detalle, y estudiar los rebases analizando la influencia conjunta de varios parámetros. El resultado final de la unión de todas las investigaciones desembocaría en un estudio cuantitativo muy completo de la vulnerabilidad portuaria a lo largo de toda la costa catalana.

Planteado un primer análisis cualitativo de la vulnerabilidad de los puertos catalanes y sentadas las bases para la redacción de las estrategias de adaptación, se propone el estudio detallado del comportamiento de posibles medidas a adoptar.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cendrero, A., Sánchez-Arcilla, A. y Zazo, C. Impactos sobre las zonas costeras. Impactos del cambio climático en España, 2005.
- [2] Clavero, M., Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., Losada, M.A. Influencia de la reflexión y el nivel del mar en el rebase en diques en talud. X jornadas españolas de costas y puertos. Santander, 2009.
- [3] Julià, T. El temporal de mar de noviembre de 2001 y sus efectos en el litoral catalán. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC, 2003.
- [4] Corral, S. Temporal de levante del 26/12/2008 en L'Escala/Costa Brava/Girona. <http://www.meteored.com>, 2010.
- [5] 1any del terrible temporal de sant Esteve . <http://blanesenimatges.wordpress.com>, 2010.
- [6] Baldasano, J. M. Evidencias del actual cambio climático. Cambio climático y sus consecuencias. Presidència de la Generalitat Valenciana, 2007.
- [7] Vargas, M., García, M. C., Moya, F., Tel, E., Parrilla, G, Plaza, F y Lavín, A. Cambio climático en el Mediterráneo español. Instituto Español de Oceanografía: Ministerio de Educación y Ciencia, 2007.
- [8] Santiago, J. M., Losada, M. A., Sánchez, E., Baquerizo, A., Ortega, M. y Ávila, A. Una mirada desde las Ciencias Ambientales a nuestra costas. Libro del II Congreso Andaluz de Desarrollo Sostenible. Cadiz, 2007.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch), 2010
- [10] Oficina española de cambio climático. Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente. <http://www.mma.es>, 2010.
- [11] Ros, J. El cambio climático y la subida del nivel del mar. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Gabinete de Formación y Documentación, 1993.
- [12] Acinas, J. A. Efectos del cambio climático sobre el litoral y respuestas de la ingeniería de costas. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Madrid, 2002.
- [13] Agencia Canaria de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático. Estudio previo. Plan Canario de Adaptación al Cambio Climático: afecciones sobre infraestructuras costeras y litoral, 2009.

- [14] Losada, I. El cambio climático en las zonas costeras; previsiones y estrategias de Adaptación. <http://www.agenergia.org>, 2010.
- [15] Puertos del Estado. ROM 1.0-09. <http://www.puertos.es>, 2009.
- [16] Tomás, L. Procesos costeros vs daños inducidos por el impacto de temporales a lo largo del litoral catalán. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC, 2010.
- [17] Olivares, F. J. Remonte y rebase del oleaje en diques verticales. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Gabinete de Formación y Documentación, 1993.
- [18] Pullen, T., Allsop, N.W.H, Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., Van der Meer, J.W. Eurotop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. <http://www.overtopping-manual.com>, 2007.
- [19] Yamahiro, M., Yoshida, A. y Murakami, K. Effect of wind on landward transportation of spray generated by wave overtopping at vertical breakwater. Coastal Engineering, 2008.
- [20] Clavero, M. Comportamiento de los diques en talud frente a la acción del oleaje y criterios para el reparto de la probabilidad conjunta de fallo en la vida útil. Tesis doctoral Universidad de Granada, 2007.
- [21] Sánchez-Arcilla, A. Curs intensiu d'enginyeria de costes. Generalitat de Catalunya, 1987.
- [22] C Kim, Y. Handbook of coastal and ocean engineering. World Scientific, 2010.
- [23] Owen, M.W. Overtopping of sea Defences. International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures. Copventry (England), 1982.
- [24] Jervis and Peregrine. Overtopping of waves at a wall: a theoretical approach. Proceeding, Int. Conf. On Coast. Engng, 1996.
- [25] Amiti, P. and Franco, L. Wave overtopping on rubble mound breakwaters. Coastal engineering, 1988.
- [26] CIRIA/CUR. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering. CIRIA Special Publication, 1983.
- [27] Negro, V. Apuntes de clase del Màster en Ingenieria y Gestión Portuaria. Màster UPC, 2010.
- [28] Puertos del Estado. ROM 0.0. <http://www.puertos.es>, 2001.
- [29] Negro, V. y Varela, O. Diseño de Diques Rompeolas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección seinor, 2008.

- [30] Diques de Abrigo de España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Puertos y Costas. Subdirección General de Inversiones Portuarias. Área de Proyectos y Obras. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Secretaría General Técnica. Vol. III, 1988.
- [31] Ports de la Generalitat. <http://www.portsgeneralitat.org>, 2010.
- [32] Besley, P. EA. Overtopping Manual.
- [33] Technical Advisory Committee for Flood Defence in the Netherlands (TAW). TAW 2002 Technical Report. Wave run-up and wave overtopping at dikes. Delft, 2002.
- [34] Die Küste. EAK 2002: Empfehlungen des Arbeitsausschusses Küstenschutzwerke, 2002.
- [35] CLASH. Crest level assessment of coastal structures by full scale monitoring, neural network prediction and hazard analysis on perisible wave overtopping. [www.chash-eu.org](http://www.chash-eu.org), 2010.
- [36] Xarxa d'Instruments Oceanoràfics i Meteorològics. <http://www.xiom.cat>, 2010.
- [37] Sierra, J.P. y Lo Presti, A. Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular. Ingeniería del Agua, Vol. 5, 1998.
- [38] LIM. Laboratorio de Ingeniería Marítima. UPC. Barcelona, 2010.
- [39] Puertos del Estado. ROM 02-90. <http://www.puertos.es>, 1990.



---

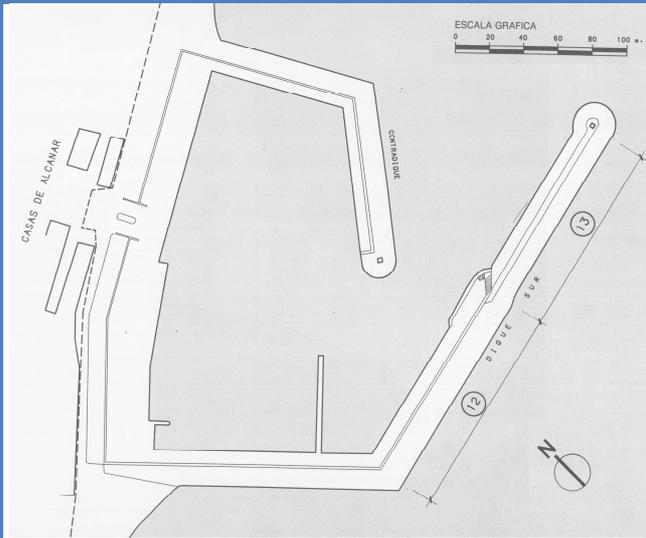
## ANEJOS

### **Fichas resumen/informativas de cada puerto**

---



# LES CASES D'ALCANAR



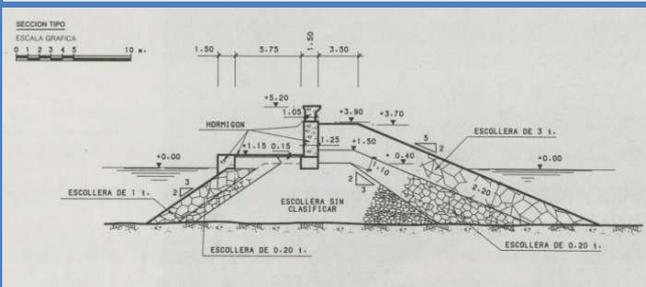
Posició

40° 33' N 0° 32' E

Direcció oleaje

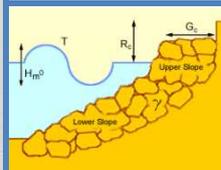
SE

## DIQUE SUR, TRAMO 12



Características del oleaje

$h(m): 6.00$   $H_s(m): 3.74$   $T_p(s): 11$



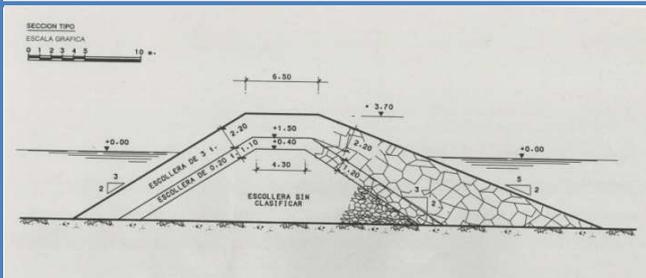
$G_c: 2.00$  m  
Lower slope: 2/5  
Upper slope: 2/5  
Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
5.20

Cálculo del rebase (l/s/m)

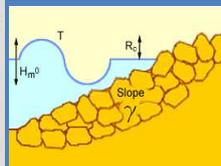
Caso 0 ( $R_c: 4.40$ m)	Caso 1 ( $R_c: 4.20$ m)	Caso 2 ( $R_c: 3.90$ m)	Caso 3 ( $R_c: 3.40$ m)
44,262	55,289	77,186	134,598

## DIQUE SUR, TRAMO 13



Características del oleaje

$h(m): 6.75$   $H_s(m): 4.15$   $T_p(s): 11$



Slope: 2/5  
Escollera/multicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
3.70

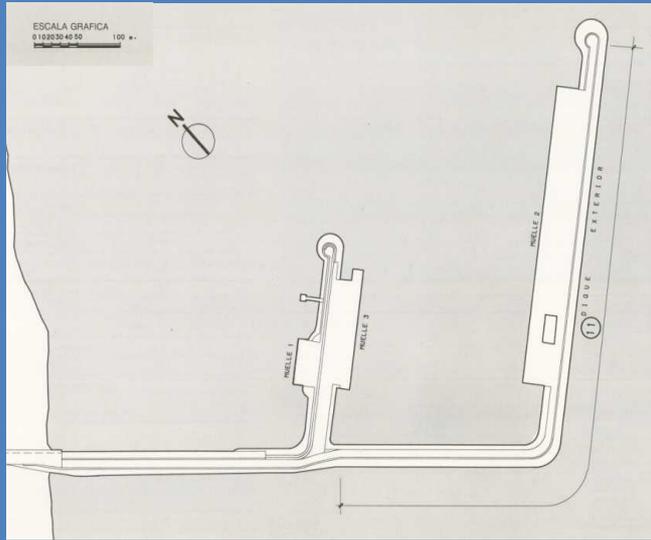
Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 2.90$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.40$ m)	Caso 3 ( $R_c: 1.90$ m)
95,260	125,677	190,448	380,753

## OBSERVACIONES

- El programa no permite introducir el botaolas (elemento que reduce el rebase) del tramo 12.
- Analizando la distribución en planta del puerto, no es alarmante que el tramo 13 presente un mayor rebase, ya que sólo ofrece protección a la bocana.

# ALCANAR (CEMEX)



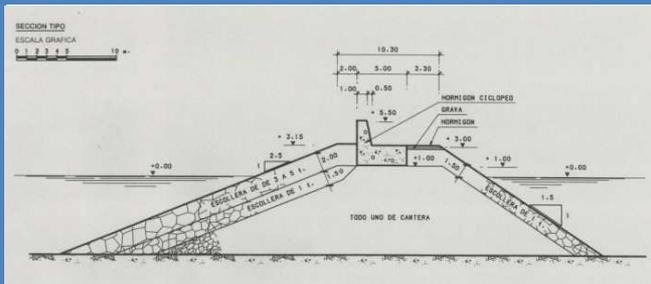
Posición

40° 32' N 0° 32' E

Dirección oleaje

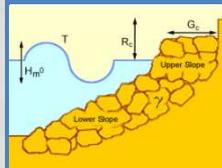
SE

## DIQUE SUR, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 8.00$   $H_s(m): 4.84$   $T_p(s): 11$



$G_c: 2.00$  m

Lower slope: 1/2.5

Upper slope: 1/2.5

Escollera/bicapa

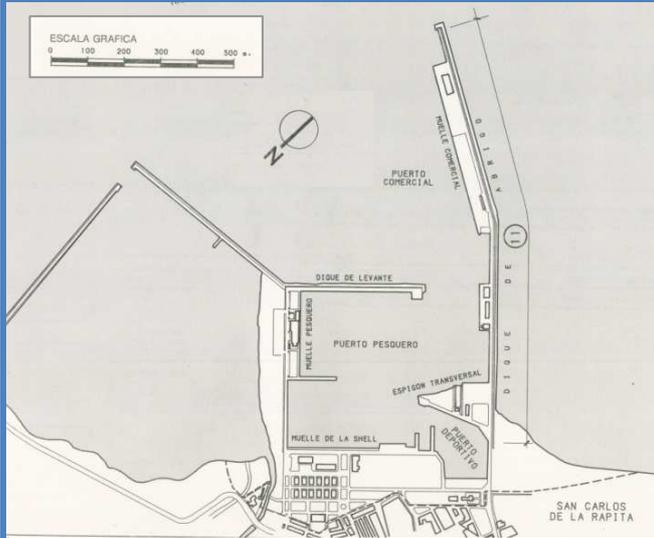
$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
5.50

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 4.70$ m)	Caso 1 ( $R_c: 4.50$ m)	Caso 2 ( $R_c: 4.20$ m)	Caso 3 ( $R_c: 3.70$ m)
79,898	97,152	130,265	212,384

## OBSERVACIONES

# SANT CARLES DE LA RÀPITA



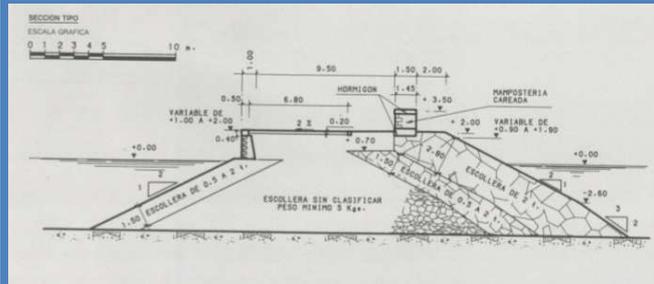
Posición

40° 36' N 0° 36' E

Dirección oleaje

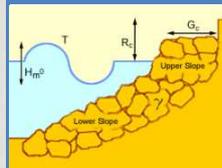
S

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



Características del oleaje

$h(m): 6.00$   $H_s(m): 3.74$   $T_p(s): 11$



$G_c: 2.00$  m

Lower slope: 2/3

Upper slope: 1/2

Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
3.50

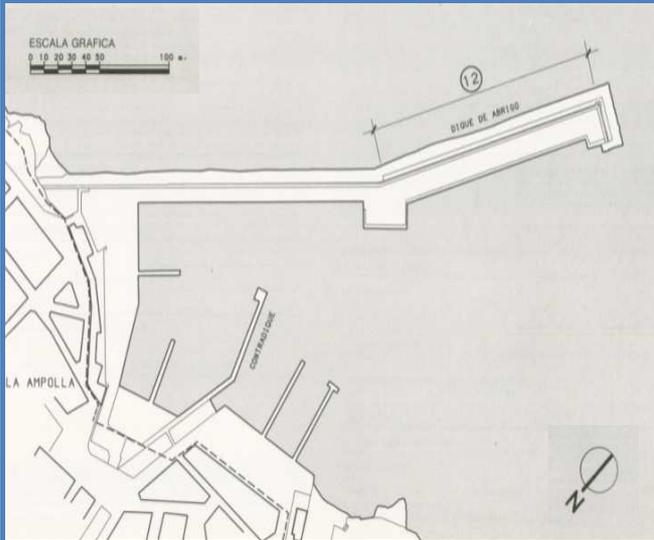
Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.50$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.20$ m)	Caso 3 ( $R_c: 1.70$ m)
71,349	97,034	153,849	331,959

## OBSERVACIONES

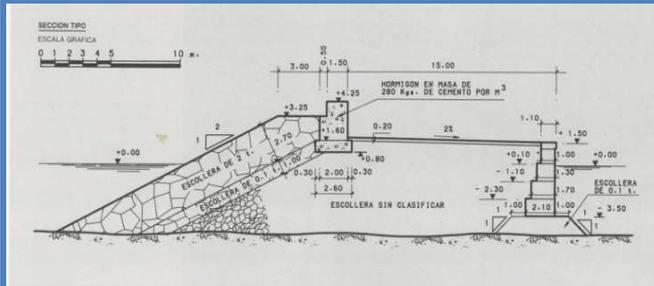
- El programa no permite introducir la profundidad a la que cambia la inclinación del talud.

# L'AMPOLLA



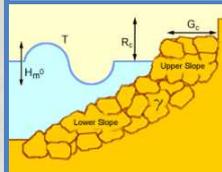
Posición	40° 48' N 0° 43' E
Dirección oleaje	E

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 12



### Características del oleaje

$h(m): 5.50$     $H_s(m): 3.46$     $T_p(s): 11$

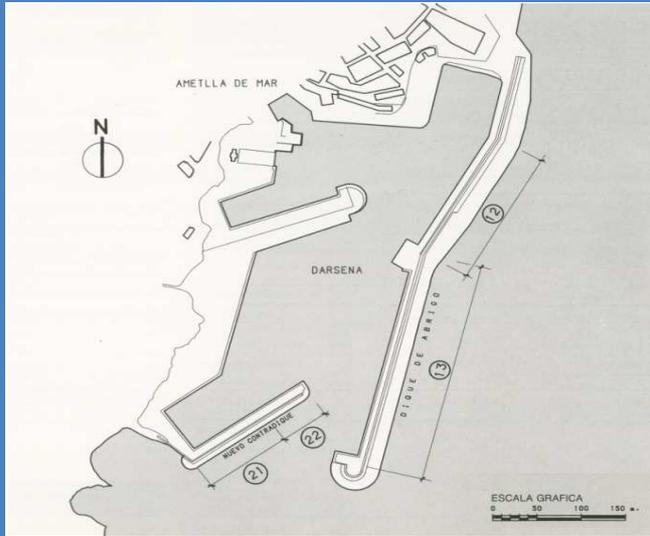


$G_c: 3.5 m$   
 Lower slope: 1/2  
 Upper slope: 1/2  
 Escollera/tricapa

$R_c$ (m) actual Respecto NMM 4.25	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	<u>Caso 0 (<math>R_c: 3.45 m</math>)</u> <b>8,755</b>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 3.25 m</math>)</u> <b>12,207</b>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 2.95 m</math>)</u> <b>20,096</b>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 2.45 m</math>)</u> <b>46,130</b>

## OBSERVACIONES

# L'AMETLLA DE MAR



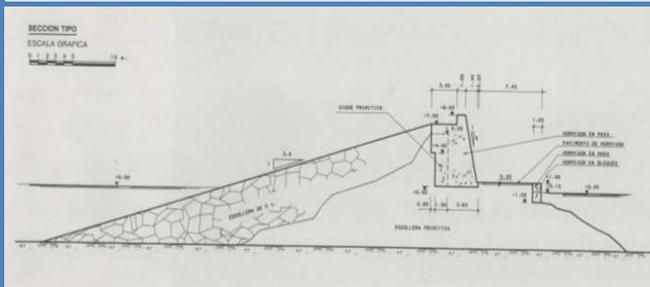
Posición

40° 52' N 0° 47' E

Dirección oleaje

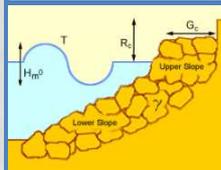
E

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 12



Características del oleaje

$h(m): 6.00$   $H_s(m): 3.74$   $T_p(s): 11$



$G_c: 3$  m

Lower slope: 1/3.5

Upper slope: 1/3.5

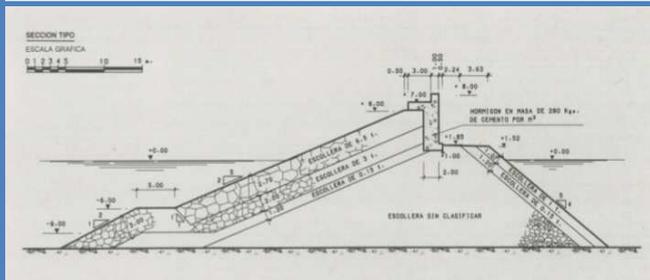
Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**8.00**

Cálculo del rebase (l/s/m)

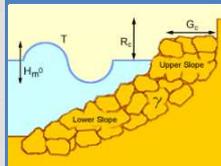
Caso 0 ( $R_c: 7.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 7.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 6.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 6.20$ m)
<b>0,068</b>	<b>0,092</b>	<b>0,147</b>	<b>0,320</b>

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 13



Características del oleaje

$h(m): 11$   $H_s(m): 6.49$   $T_p(s): 11$



$G_c: 2.5$  m

Lower slope: 1/2

Upper slope: 2/5

Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**8.00**

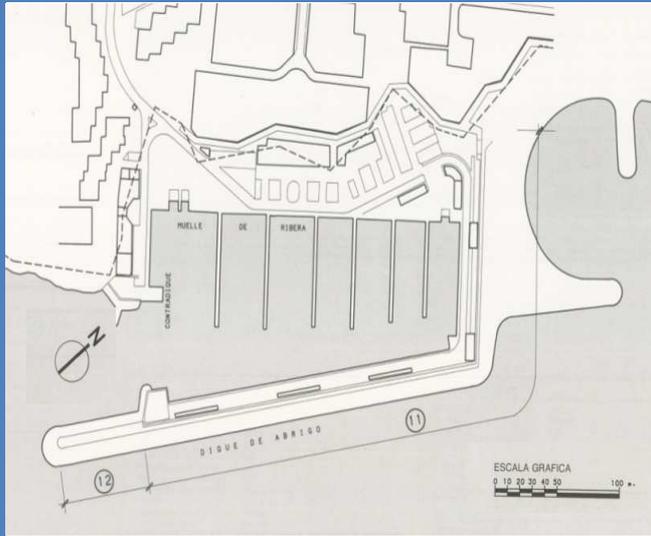
Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 7.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 7.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 6.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 6.20$ m)
<b>47,530</b>	<b>55,331</b>	<b>69,497</b>	<b>101,616</b>

## OBSERVACIONES

- En el tramo 13, tanto el espaldón como el talud no se pueden reproducir con fidelidad, por lo que el espaldón se aproxima a una geometría rectangular de dos metros de espesor coronada a la cota +8.00m (quedando una berma de superior de 2.5 m), y el talud se aproxima a un talud de doble pendiente, siendo el punto de transición el punto medio de la berma.

# CALAFAT



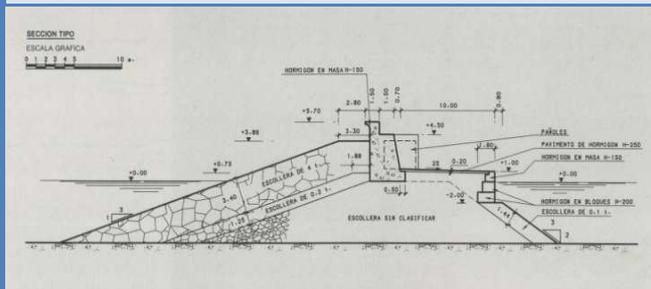
Posición

41° 59' N 0° 51' E

Dirección oleaje

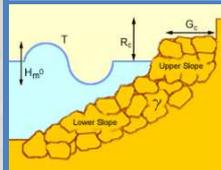
E

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



Características del oleaje

$h(m): 7.00$   $H_s(m): 4.29$   $T_p(s): 11$



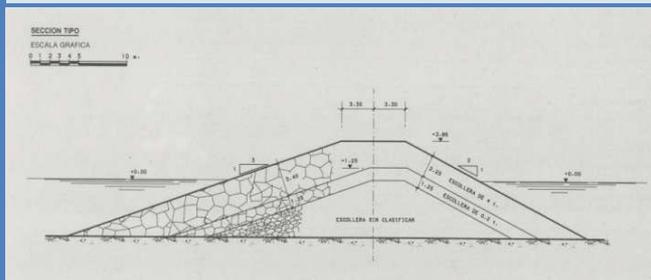
$G_c: 3.30$  m  
Lower slope: 1/3  
Upper slope: 1/3  
Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**5.70**

Cálculo del rebase (l/s/m)

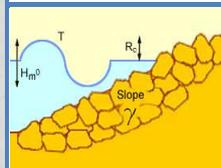
Caso 0 ( $R_c: 4.90$ m)	Caso 1 ( $R_c: 4.70$ m)	Caso 2 ( $R_c: 4.40$ m)	Caso 3 ( $R_c: 3.90$ m)
<b>14,196</b>	<b>18,214</b>	<b>26,471</b>	<b>49,358</b>

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 12



Características del oleaje

$h(m): 7.50$   $H_s(m): 4.56$   $T_p(s): 11$



Slope: 1/3  
Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**3.86**

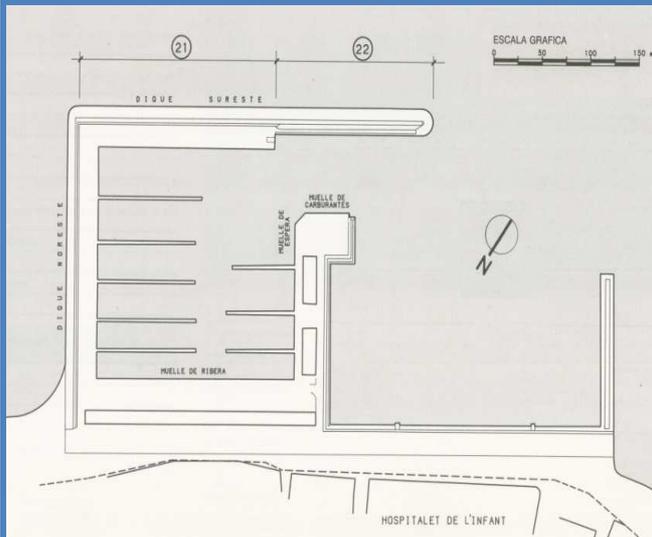
Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 3.06$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.86$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.56$ m)	Caso 3 ( $R_c: 2.06$ m)
<b>128,696</b>	<b>165,640</b>	<b>241,757</b>	<b>454,144</b>

## OBSERVACIONES

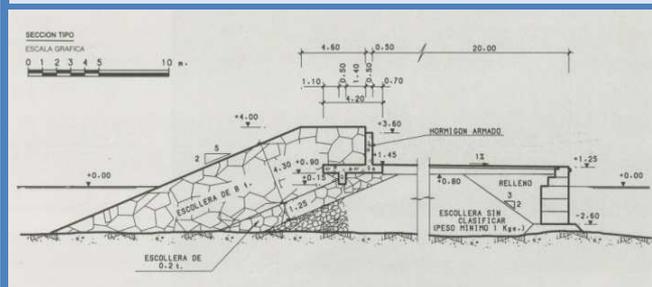
- El programa no permite reproducir el botaolas del espaldón del tramo 11, por lo que los valores de rebase obtenidos para este tramo serían menores.

# L'HOSPITALET



Posición	40° 59' N 0° 55' E
Dirección oleaje	ESE

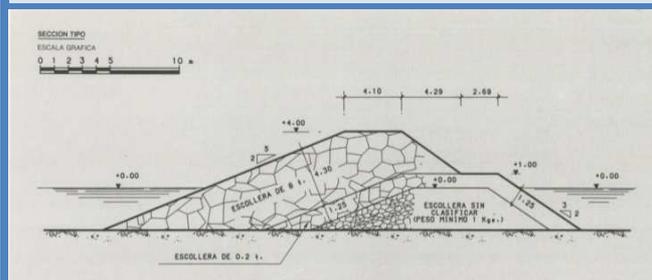
## DIQUE SURESTE, TRAMO 21



Características del oleaje	
$h(m): 5.00$	$H_s(m): 3.19$ $T_p(s): 11$
Slope: 2/5	
Escollera/tricapa	

$R_c$ (m) actual Respecto NMM 4.00	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 ( $R_c: 3.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 3.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 2.20$ m)
	<b>10,413</b>	<b>14,984</b>	<b>25,865</b>	<b>64,246</b>

## DIQUE SURESTE, TRAMO 22



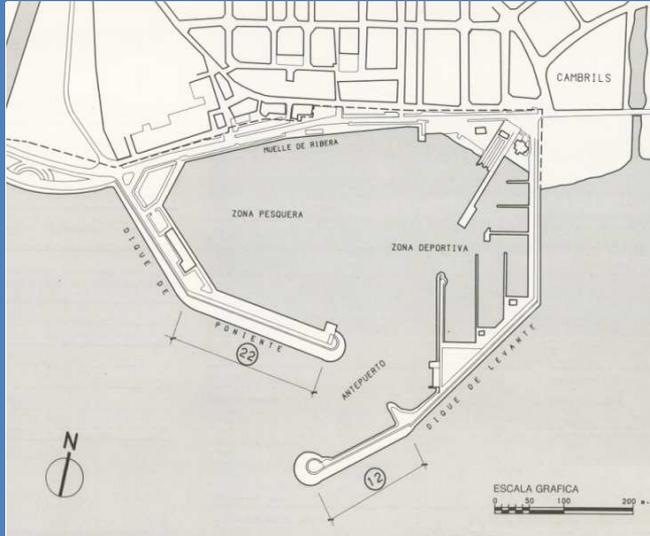
Características del oleaje	
$h(m): 5.50$	$H_s(m): 3.46$ $T_p(s): 11$
Slope: 2/5	
Escollera/tricapa	

$R_c$ (m) actual Respecto NMM 4.00	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 ( $R_c: 3.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 3.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 2.20$ m)
	<b>19,767</b>	<b>27,560</b>	<b>45,373</b>	<b>104,152</b>

## OBSERVACIONES

- A pesar de que los dos tramos analizados se estudian mediante la misma aplicación y tienen la misma pendiente y francobordo, es normal que el tramo 22 presente mayor rebase, ya que al presentar un mayor calado, la altura de ola considerada para esta sección también resulta mayor.

# CAMBRILS



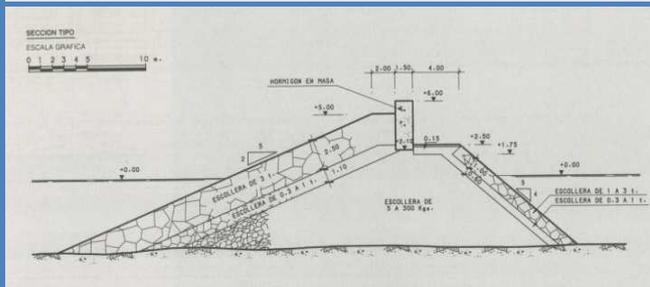
Posición

41° 3' N 1° 3' E

Dirección oleaje

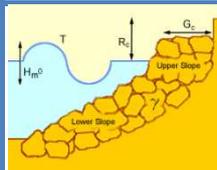
SE

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 12



### Características del oleaje

$h(m): 6.50$     $H_s(m): 4.01$     $T_p(s): 11$



$G_c: 2.00$  m  
 Lower slope: 2/5  
 Upper slope: 2/5  
 Manto bicapa

$R_c$  (m) actual  
 Respecto NMM  
**6.00**

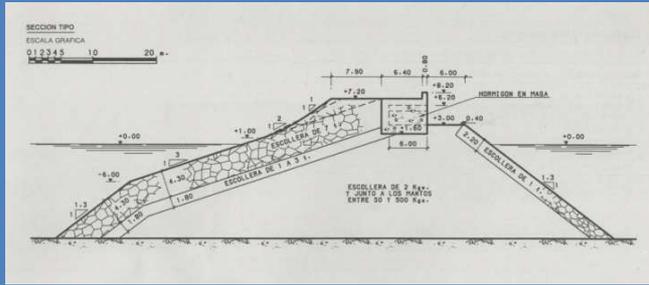
### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 5.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 5.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 4.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 4.20$ m)
<b>23,990</b>	<b>29,739</b>	<b>41,046</b>	<b>70,226</b>

## OBSERVACIONES

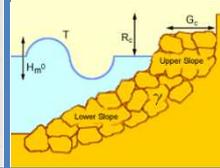


### DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 14



#### Características del oleaje

$h(m): 15$     $H_s(m): 8.69$     $T_p(s): 11$



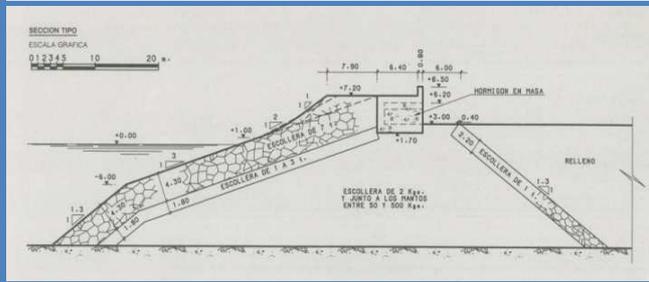
$G_c: 14.30$  m  
Lower slope: 1/1.3  
Upper slope: 1/3  
Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**8.20**

#### Cálculo del rebase (l/s/m)

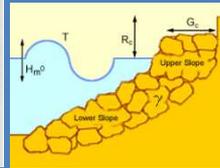
<u>Caso 0 (<math>R_c: 7.60</math> m)</u>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 7.40</math> m)</u>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 7.10</math> m)</u>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 6.60</math> m)</u>
<b>34,914</b>	<b>39,582</b>	<b>47,780</b>	<b>65,388</b>

### DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 15



#### Características del oleaje

$h(m): 23$     $H_s(m): 13.09$     $T_p(s): 11$



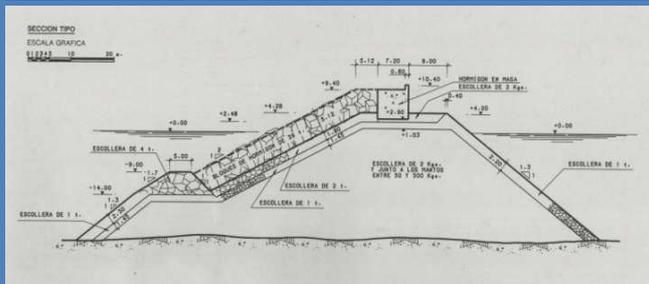
$G_c: 14.30$  m  
Lower slope: 1/1.3  
Upper slope: 1/3  
Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**8.50**

#### Cálculo del rebase (l/s/m)

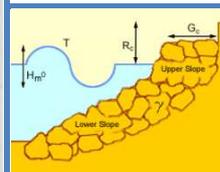
<u>Caso 0 (<math>R_c: 7.70</math> m)</u>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 7.50</math> m)</u>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 7.20</math> m)</u>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 6.70</math> m)</u>
<b>290,287</b>	<b>321,540</b>	<b>374,839</b>	<b>484,017</b>

### DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 16



#### Características del oleaje

$h(m): 27$     $H_s(m): 15.29$     $T_p(s): 11$



$G_c: 12.32$  m  
Lower slope: 1/1.5  
Upper slope: 1/2  
Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**10.40**

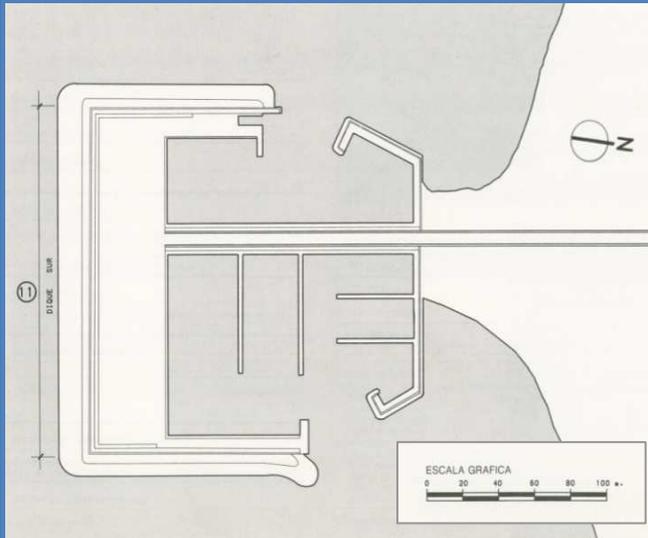
#### Cálculo del rebase (l/s/m)

<u>Caso 0 (<math>R_c: 9.60</math> m)</u>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 9.40</math> m)</u>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 9.10</math> m)</u>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 8.60</math> m)</u>
<b>925,557</b>	<b>997,356</b>	<b>1117,029</b>	<b>1348,110</b>

### OBSERVACIONES

- La sección del tramo 13 está formada por tres pendientes diferentes; para introducirla en el programa se ha simplificado el perfil a una sección de dos pendientes, siendo el punto donde cambia la inclinación, el punto medio de la segunda pendiente en la sección real. De forma análoga, también se ha sintetizado la sección del tramo 16.
- En los tramos 14 y 15 se han despreciado las dos pendientes superiores de las 4 que conforman el perfil pero se han mantenido las bermas de coronación a las que dan lugar.
- Los elevados valores del rebase obtenidos en los tramos 15 y 16 se deben a las severas condiciones de oleaje que se derivan del gran calado existente en estos tramos.

# COMA RUGA



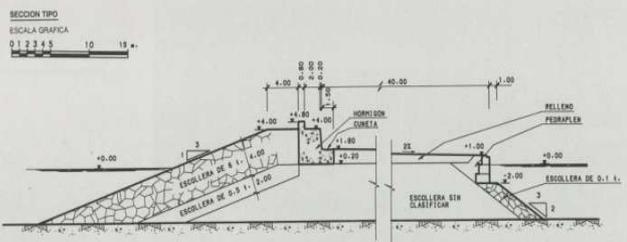
Posición

41° 10' N 1° 30' E

Dirección oleaje

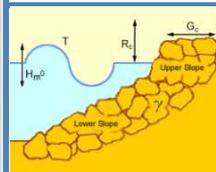
SSE

## DIQUE SUR, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 7.00$   $H_s(m): 4.29$   $T_p(s): 11$



$G_c: 4.00$  m  
 Lower slope: 1/3  
 Upper slope: 1/3  
 Escollera/tricapa

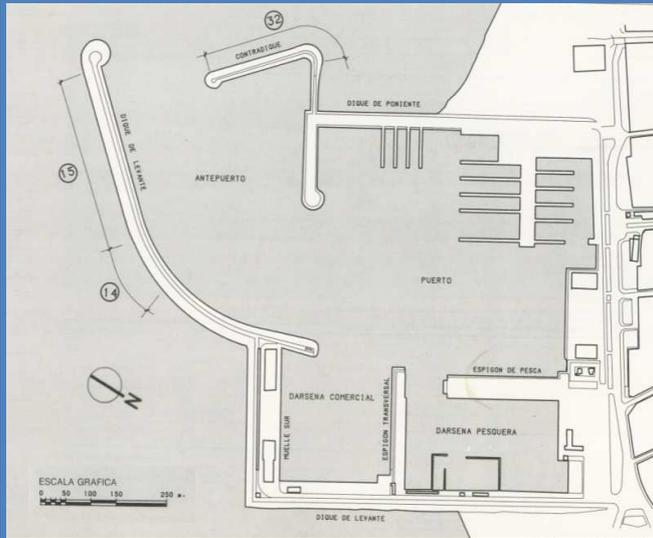
$R_c$  (m) actual  
 Respecto NMM  
**4.80**

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 4.00$ m)	Caso 1 ( $R_c: 3.80$ m)	Caso 2 ( $R_c: 3.50$ m)	Caso 3 ( $R_c: 3.00$ m)
<b>34,115</b>	<b>43,770</b>	<b>63,611</b>	<b>118,610</b>

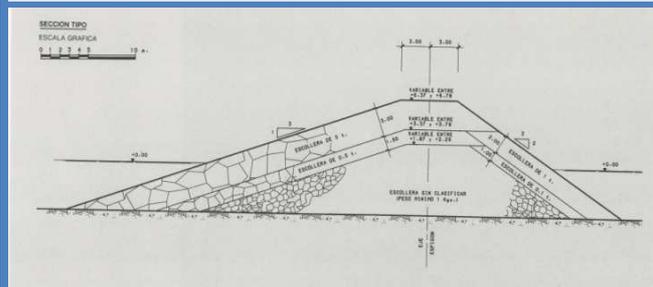
## OBSERVACIONES

# VILANOVA I LA GELTRÚ



Posición	41º 12' N 1º 43' E
Dirección oleaje	ESE

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 14



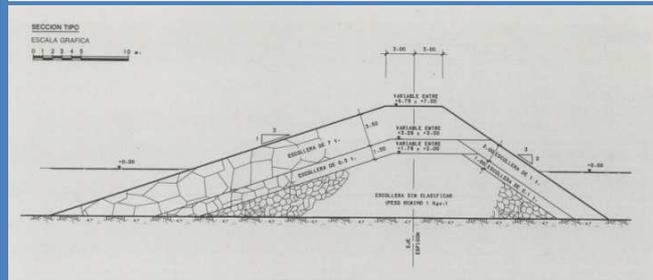
Características del oleaje

$h(m): 6.00$     $H_s(m): 3.74$     $T_p(s): 11$

Slope: 1/3  
Escollera/bicapa

$R_c$ (m) actual Respecto NMM <b>6.58</b>	<u>Cálculo del rebase (l/s/m)</u>			
	<u>Caso 0 (<math>R_c: 5.78</math> m)</u> <b>0,626</b>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 5.58</math> m)</u> <b>0,852</b>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 5.28</math> m)</u> <b>1,351</b>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 4.78</math> m)</u> <b>3,915</b>

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 15



Características del oleaje

$h(m): 7.00$     $H_s(m): 4.29$     $T_p(s): 11$

Slope: 1/3  
Escollera/bicapa

$R_c$ (m) actual Respecto NMM <b>6.89</b>	<u>Cálculo del rebase (l/s/m)</u>			
	<u>Caso 0 (<math>R_c: 6.09</math> m)</u> <b>1,587</b>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 5.89</math> m)</u> <b>2,075</b>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 5.59</math> m)</u> <b>3,102</b>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 5.09</math> m)</u> <b>6,063</b>

## OBSERVACIONES

- Para los dos tramos del dique de abrigo, la cota de coronación es variable entre el lado de sotamar y barloomar. Para el análisis, se ha calculado como la media entre las dos cotas.



# VALLACARCA (UNILAND)



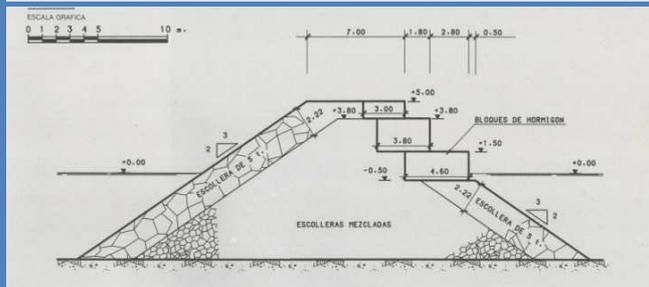
Posición

41º 14' N 1º 52' E

Dirección oleaje

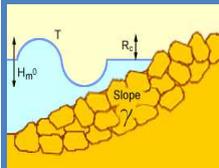
SE

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 8.00$   $H_s(m): 4.84$   $T_p(s): 11$



Slope: 2/3

Escollera/bicapa

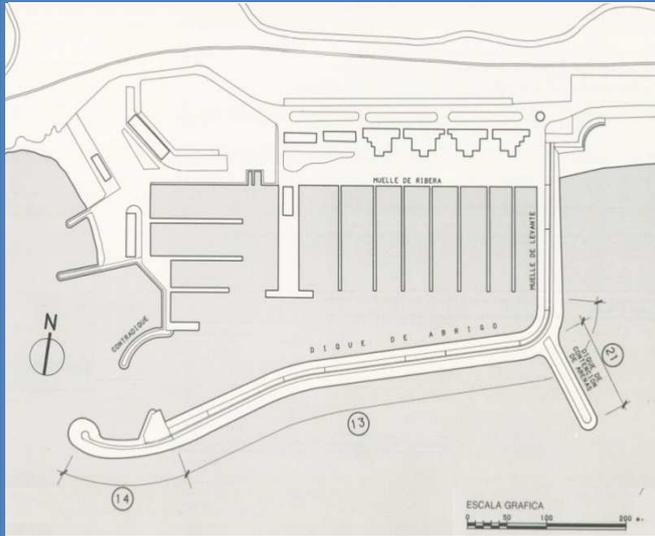
$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
5.00

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 4.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 4.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 3.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 3.20$ m)
<b>45,410</b>	<b>57,589</b>	<b>82,247</b>	<b>148,969</b>

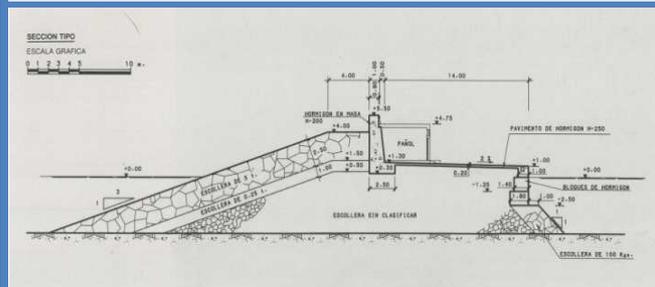
## OBSERVACIONES

# PORT GINESTA



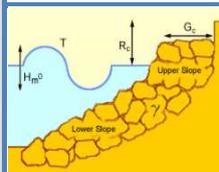
Posición	41º 16' N 1º 56' E
Dirección oleaje	SSE

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 13



### Características del oleaje

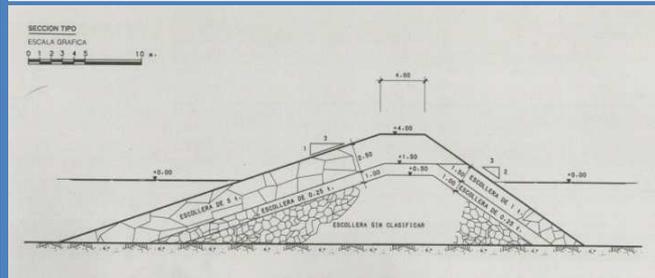
$h(m): 7.00$   $H_s(m): 4.29$   $T_p(s): 11$



$G_c: 4\text{ m}$   
 Lower slope: 1/3  
 Upper slope: 1/3  
 Escollera/bicapa

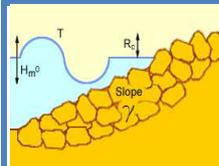
$R_c$ (m) actual Respecto NMM 5.50	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 ( $R_c: 4.70\text{ m}$ ) <b>14,260</b>	Caso 1 ( $R_c: 4.50\text{ m}$ ) <b>18,296</b>	Caso 2 ( $R_c: 4.20\text{ m}$ ) <b>26,589</b>	Caso 2 ( $R_c: 3.70\text{ m}$ ) <b>49,579</b>

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 14



### Características del oleaje

$h(m): 7.00$   $H_s(m): 4.43$   $T_p(s): 11$



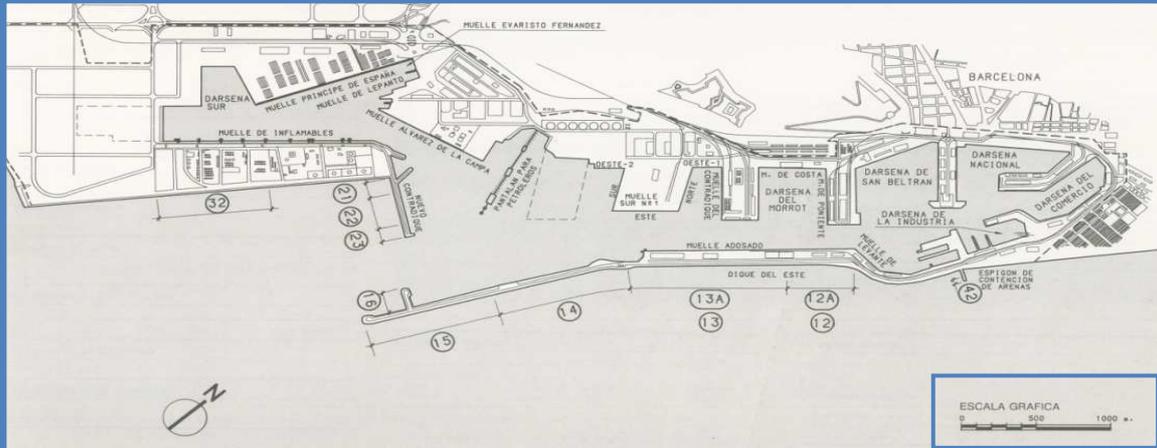
Slope: 1/3  
 Escollera/bicapa

$R_c$ (m) actual Respecto NMM 4.00	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 ( $R_c: 3.20\text{ m}$ ) <b>91,755</b>	Caso 1 ( $R_c: 3.00\text{ m}$ ) <b>118,951</b>	Caso 2 ( $R_c: 2.70\text{ m}$ ) <b>175,581</b>	Caso 3 ( $R_c: 2.20\text{ m}$ ) <b>335,992</b>

## OBSERVACIONES

- Analizando la distribución en planta del puerto, no es alarmante que el tramo 14 presente un mayor rebase, ya que sólo ofrece protección a la bocana.

# BARCELONA



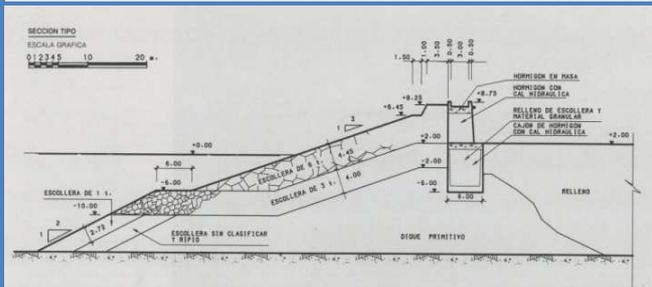
Posición

41° 20' N 2° 10' E

Dirección oleaje

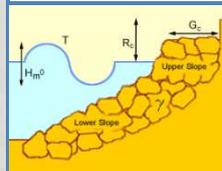
ESE

## DIQUE DEL ESTE, TRAMO 12



Características del oleaje

$h(m): 16.00$   $H_s(m): 9.24$   $T_p(s): 11$



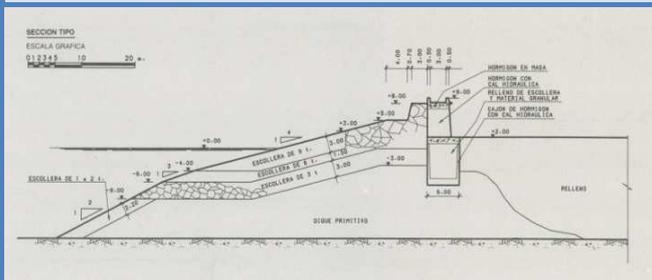
$G_c: 1.5$   
Lower slope: 1/2.5  
Upper slope: 1/3.5  
Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
8.75

Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 7.95$ m)	Caso 1 ( $R_c: 7.75$ m)	Caso 2 ( $R_c: 7.45$ m)	Caso 3 ( $R_c: 6.95$ m)
18,087	21,434	27,653	42,278

## DIQUE DEL ESTE, TRAMO 13



Características del oleaje

$h(m): 16.00$   $H_s(m): 9.24$   $T_p(s): 11$



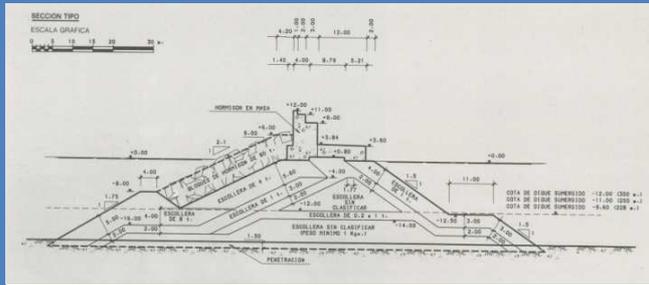
$G_c: 4$   
Lower slope: 1/2  
Upper slope: 1/4  
Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
9.00

Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 8.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 8.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 7.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 7.20$ m)
14,628	17,335	22,364	34,192

## DIQUE DEL ESTE, TRAMO 14



### Características del oleaje

$h(m)$ : 20.00  $H_s(m)$ : 11.44  $T_p(s)$ : 11



$G_c$ : 4 m

Lower slope: 1/1.8

Upper slope: 1/2.22

Cubos

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
12.00

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c$ : 11.20m)

Caso 1 ( $R_c$ : 11.0m)

Caso 2 ( $R_c$ : 10.70m)

Caso 3 ( $R_c$ : 10.20m)

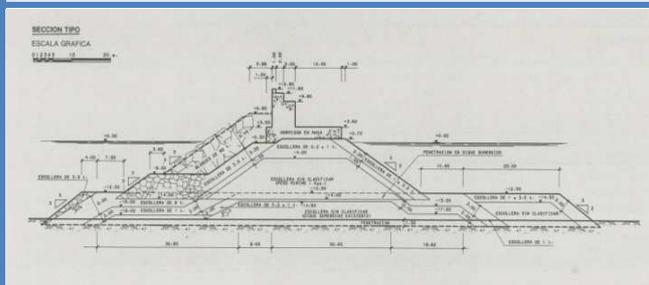
**161,499**

**176,182**

**200,749**

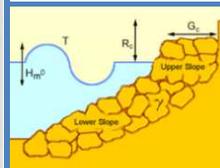
**249,539**

## DIQUE DEL ESTE, TRAMO 15



### Características del oleaje

$h(m)$ : 20.00  $H_s(m)$ : 11.44  $T_p(s)$ : 11



$G_c$ : 1.5 m

Lower slope: 1/2

Upper slope: 1/1.8

Cubos

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
12.80

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c$ : 12.0m)

Caso 1 ( $R_c$ : 11.80m)

Caso 2 ( $R_c$ : 11.50m)

Caso 3 ( $R_c$ : 11.00m)

**142,955**

**155,723**

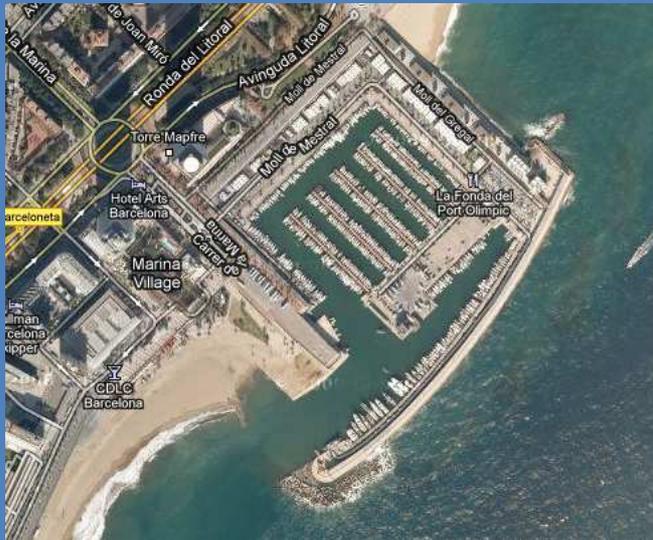
**177,046**

**219,267**

## OBSERVACIONES

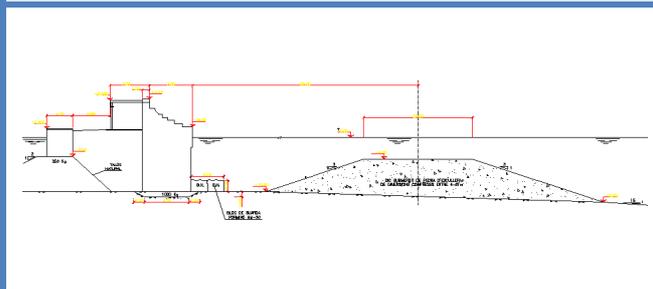
- En el tramo 13, la pendiente intermedia de las 3 que conforman el perfil se desprecia por estar aplicada a un tramo muy pequeño comparado con las otras pendientes.
- Las secciones de los tramos 12, 14 y 15 se simplifican a secciones de doble pendiente, siendo el punto donde cambia la inclinación, el punto medio de las bermas existentes en los perfiles reales.
- Los elevados valores del rebase obtenidos en los tramos 15 y 16 se deben a las severas condiciones de oleaje que se derivan del gran calado existente en estos tramos.

# PORT OLÍMPIC, BARCELONA



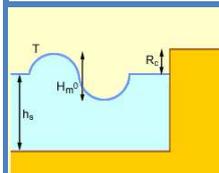
Posición	41º 23' N 2º 13' E
Dirección oleaje	ESE

## DIQUE DE ABRIGO



### Características del oleaje

$h(m): 4.00$     $H_s(m): 2.64$     $T_p(s): 11$



$h_s: 10.8$  m

$R_c$ (m) actual Respecto NMM 7.15	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	<u>Caso 0 (<math>R_c: 6.35</math> m)</u> <b>7,080</b>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 6.15</math> m)</u> <b>8,114</b>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 5.85</math> m)</u> <b>9,955</b>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 5.35</math> m)</u> <b>14,000</b>

## OBSERVACIONES

- La sección transversal del puerto no se asemeja a ninguna de las opciones planteadas por el programa. Por ello, el dique se asemeja a un dique completamente vertical coronado a la cota de coronación real y con un calado de 4 m, que es el calado que queda por encima del dique sumergido dispuesto en frente del dique.

# PORT FÓRUM, BARCELONA



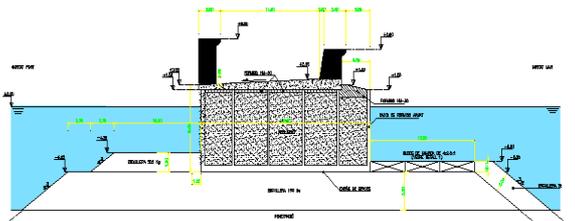
Posición

41° 25' N 2° 14' E

Dirección oleaje

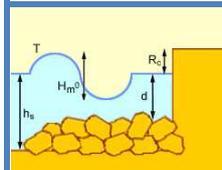
ESE

## DIQUE DE ABRIGO



### Características del oleaje

$h(m): 5.00$   $H_s(m): 3.19$   $T_p(s): 11$



$h_s: 11.40$  m  
 $d: 5.80$  m

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
5.00

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 4.20$  m)

66,733

Caso 1 ( $R_c: 4.00$  m)

77,319

Caso 2 ( $R_c: 3.70$  m)

81,022

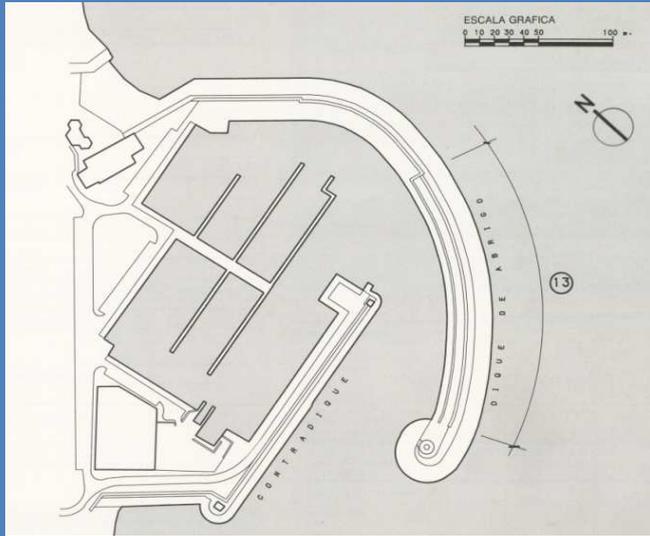
Caso 3 ( $R_c: 3.20$  m)

88,396

## OBSERVACIONES

- La sección se asemeja a un dique completamente vertical coronado a la cota +5.00 m (cota de coronación real).

# EL BALIS (SANT ANDREU DE LLAVANERES)



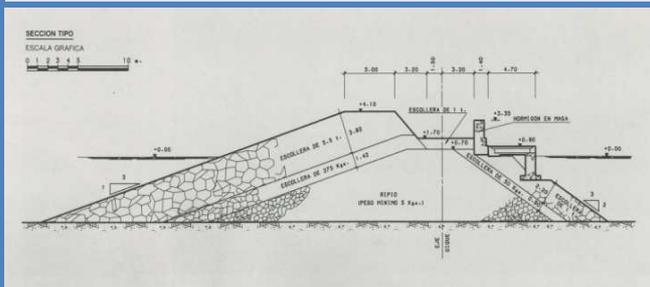
Posición

41º 33' N 2º 3' E

Dirección oleaje

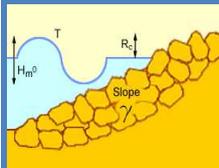
SE

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 13



### Características del oleaje

$h(m)$ : 5.50     $H_s(m)$ : 3.46     $T_p(s)$ : 11



Slope: 1/3

Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
4.10

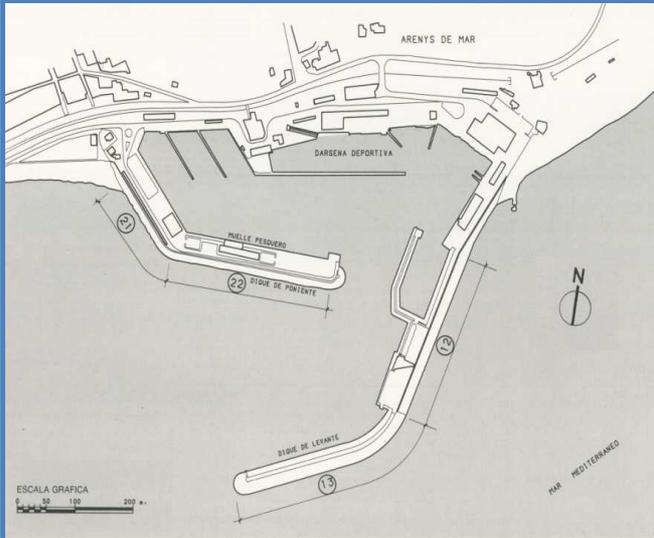
### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c$ : 3.30 m)	Caso 1 ( $R_c$ : 3.10 m)	Caso 2 ( $R_c$ : 2.80 m)	Caso 3 ( $R_c$ : 2.30 m)
16,740	23,340	38,426	88,205

## OBSERVACIONES

- A pesar de la ampliación que ha sufrido el puerto (cuyas secciones no se disponen), se sigue analizando únicamente el rebase en la zona indicada ya que continúa siendo el dique más expuesto al rebase ante un temporal.

# ARENYS DE MAR



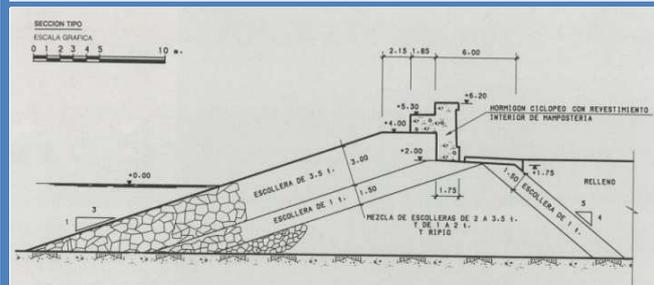
Posición

41º 34' N 2º 33' E

Dirección oleaje

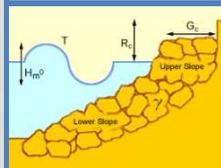
SE

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 12



Características del oleaje

$h(m): 7.00$   $H_s(m): 4.29$   $T_p(s): 11$



$G_c: 3$  m

Lower slope: 1/3

Upper slope: 1/3

Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**6.20**

Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 5.60$  m)

**6,148**

Caso 1 ( $R_c: 5.40$  m)

**7,888**

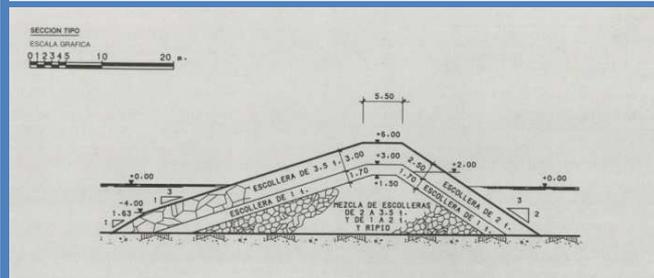
Caso 2 ( $R_c: 5.10$  m)

**11,464**

Caso 3 ( $R_c: 4.60$  m)

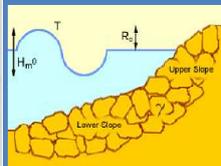
**21,376**

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 13



Características del oleaje

$h(m): 7.40$   $H_s(m): 4.51$   $T_p(s): 11$



Lower slope: 1/3

Upper slope: 1/1.63

Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**6.00**

Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 5.20$  m)

**56,662**

Caso 1 ( $R_c: 5.00$  m)

**68,352**

Caso 2 ( $R_c: 4.70$  m)

**90,561**

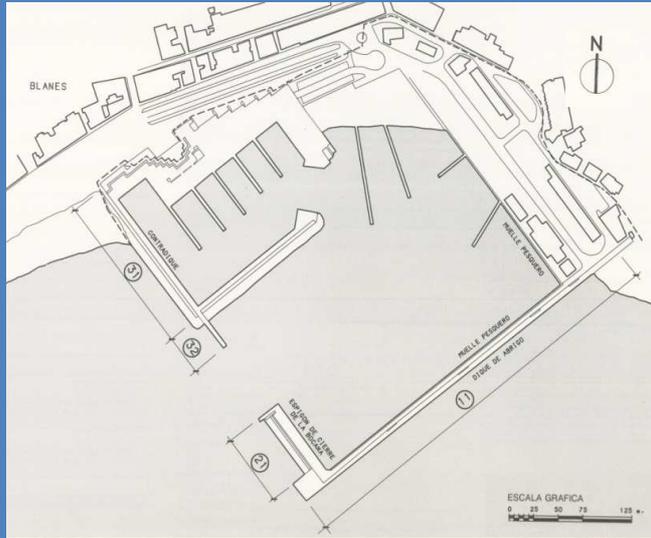
Caso 3 ( $R_c: 4.20$  m)

**144,741**

## OBSERVACIONES

- Para el análisis, la coronación del tramo 12 se asemeja a una sección rectangular de 2.75 m de anchura coronada a la cota +6.20 (de ésta manera, la berma superior del talud pasa de 2.15 m a 3 m).
- En el tramo 13, el programa no permite introducir a qué profundidad se produce el cambio de pendiente.

# BLANES



Posición

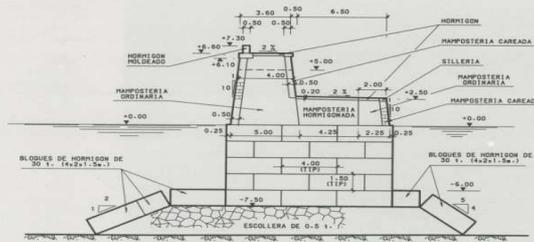
41º 40' N 2º 47' E

Dirección oleaje

SE

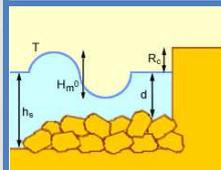
## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11

ESCALA GRAFICA  
0 1 2 3 4 5 10 m



### Características del oleaje

$h(m): 10.50$     $H_s(m): 6.22$     $T_p(s): 11$



$h_s: 11$  m  
 $d: 6.80$  m

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**7.30**

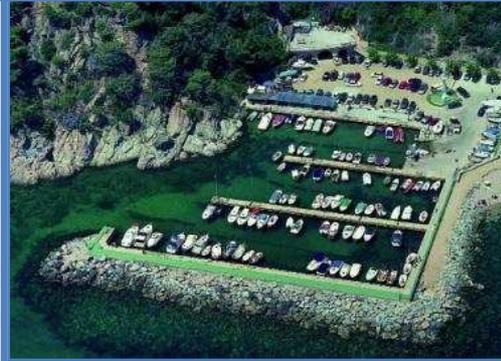
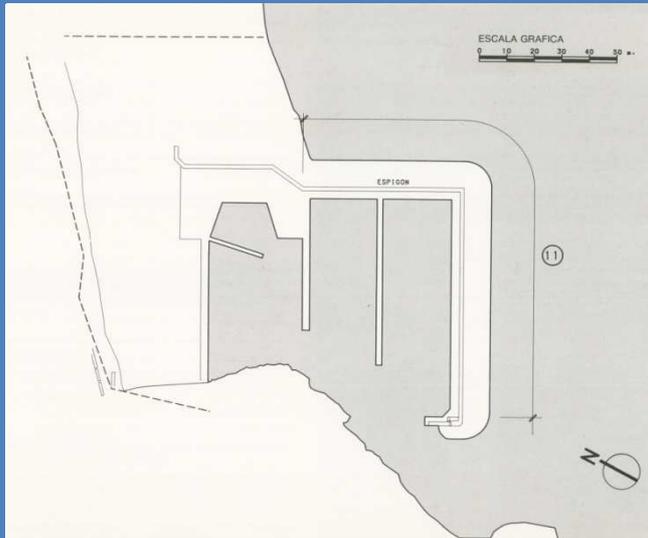
### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 6.50$ m)	Caso 1 ( $R_c: 6.30$ m)	Caso 2 ( $R_c: 6.00$ m)	Caso 3 ( $R_c: 5.50$ m)
<b>150,245</b>	<b>140,264</b>	<b>134,239</b>	<b>124,127</b>

## OBSERVACIONES

- La ligera inclinación de la parte superior del dique vertical no se puede considerar en el programa; dada su poca inclinación (1:10) se considera vertical.
- Los elevados valores del rebase que se obtienen se deben al calado a pie de estructura; al ser relativamente elevado, las condiciones de oleaje que se derivan son parcialmente duras.

# CANYELLES



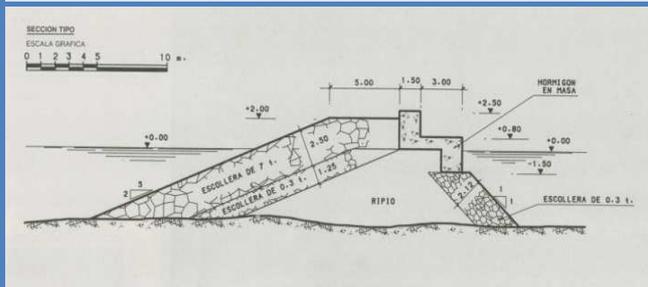
Posición

41° 42' N 2° 53' E

Dirección oleaje

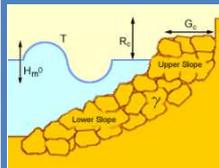
SE

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 5.00$     $H_s(m): 3.19$     $T_p(s): 11$



$G_c: 5.00$  m  
 Lower slope: 2/5  
 Upper slope: 2/5  
 Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
 Respecto NMM  
**2.50**

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 1.70$ m)	Caso 1 ( $R_c: 1.50$ m)	Caso 2 ( $R_c: 1.20$ m)	Caso 3 ( $R_c: 0.70$ m)
<b>1185,412</b>	<b>1235,905</b>	<b>1338,558</b>	<b>1618,198</b>

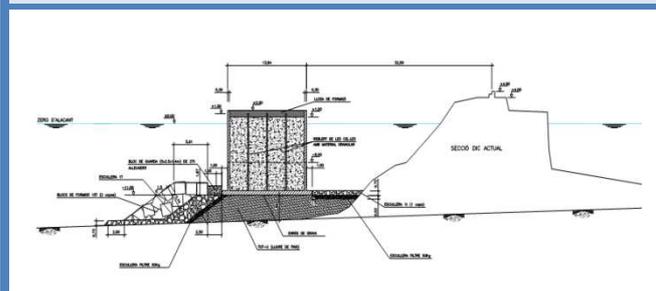
## OBSERVACIONES

# SANT FELIU DE GUÍXOLS



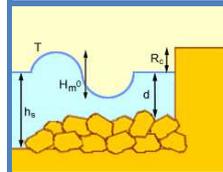
Posición	41º 46' N 3º 1' E
Dirección oleaje	SE

## CAJONES DE ABRIGO



### Características del oleaje

$h(m): 9.13$     $H_s(m): 5.46$     $T_p(s): 11$



$h_s: 15.80$  m  
 $d: 9.93$  m

$R_c$ (m) actual Respecto NMM + 2.00	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 ( $R_c: 1.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 1.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 0.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 0.20$ m)
	<b>1076,155</b>	<b>1149,501</b>	<b>1269,000</b>	<b>1833,33</b>

## OBSERVACIONES

- Los elevados valores del rebase obtenidos se explican por las severas condiciones de oleaje que se derivan del gran calado existente en esta zona.
- Los elevados valores del rebase que se obtienen se deben a la baja coronación de los cajones verticales analizados. Hay que recordar que los cajones no forman parte del dique de abrigo, sino que se construyeron a posteriori para reducir el rebase en el dique principal.

# PORT D'ARO



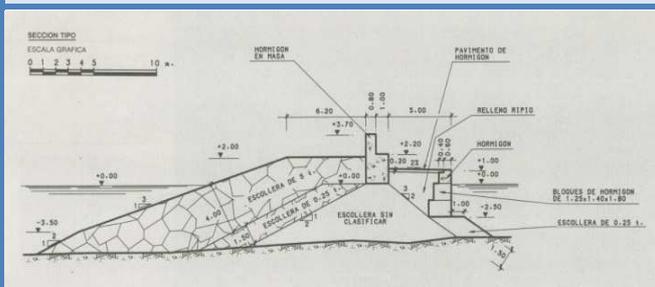
Posición

41º 48' N 3º 4' E

Dirección oleaje

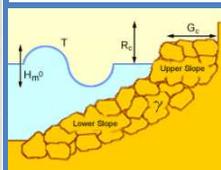
E

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



Características del oleaje

$h(m): 5.00$   $H_s(m): 3.19$   $T_p(s): 11$



$G_c: 6.20$  m

Lower slope: 1/2

Upper slope: 1/3

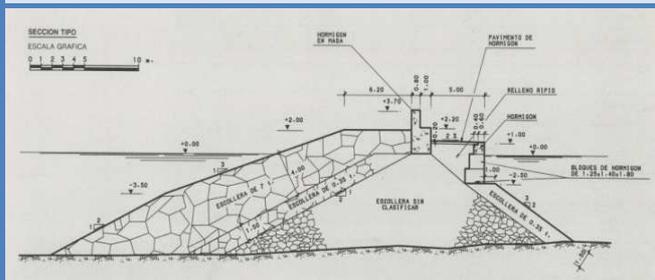
Escollera/multicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
3.70

Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 2.90$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.40$ m)	Caso 3 ( $R_c: 1.90$ m)
24,860	31,630	45,393	82,887

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 12



Características del oleaje

$h(m): 9.00$   $H_s(m): 5.39$   $T_p(s): 11$



$G_c: 6.20$  m

Lower slope: 1/2

Upper slope: 1/3

Escollera/multicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
3.70

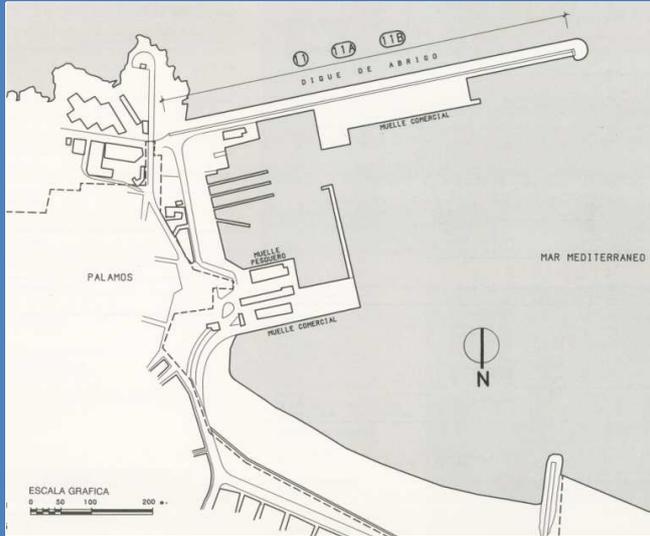
Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 2.90$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.40$ m)	Caso 3 ( $R_c: 1.90$ m)
331,407	398,869	526,663	836,957

## OBSERVACIONES

- El programa no permite introducir a qué profundidades se cambia de pendiente en el talud.
- Analizando la distribución en planta del puerto, no es alarmante que el tramo 12 presente un mayor rebase, ya que sólo ofrece protección a la bocana, no hay ningún barco atracado en la parte de sotamar.

# PALAMÓS



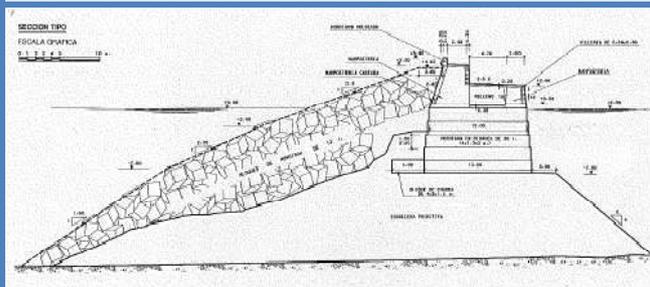
Posición

41º 50' N 3º 7' E

Dirección oleaje

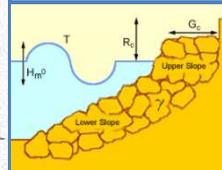
SE

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 20.00$     $H_s(m): 11.44$     $T_p(s): 11$



$G_c: 3.0$  m  
 Lower slope: 1/1.6  
 Upper slope: 1/2.6  
 Cubos/multicapa

$R_c$  (m) actual  
 Respecto NMM  
**5.80**

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 5.00$ m)	Caso 1 ( $R_c: 4.80$ m)	Caso 2 ( $R_c: 4.50$ m)	Caso 3 ( $R_c: 4.00$ m)
<b>2151,235</b>	<b>2355,994</b>	<b>2700,248</b>	<b>3389,374</b>

## OBSERVACIONES

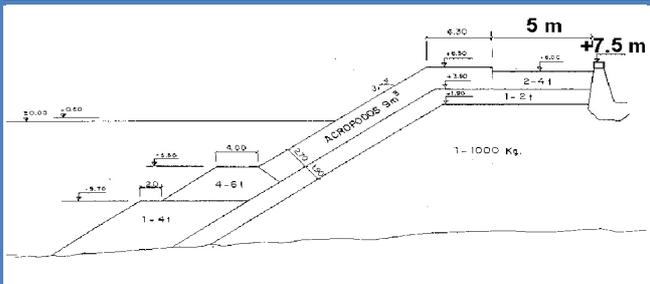
- El talud está formado por tres pendientes diferentes; debido a la pequeña diferencia entre las dos inclinaciones superiores, éstas se aproximan a una sola (calculada como la media entre las dos), quedando la sección definida por dos pendientes.
- Los elevados valores del rebase obtenidos se explican por las severas condiciones de oleaje que se derivan del gran calado existente en esta zona.
- El programa no permite introducir a qué profundidades se cambia de pendiente en el talud.

# CLUB NÀUTIC PALAMÓS



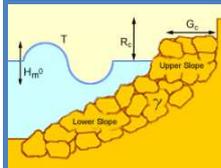
Posición	41° 51' N 3° 8' E
Dirección oleaje	ESE

## DIQUE DE ABRIGO



### Características del oleaje

$h(m): 14.00$     $H_s(m): 8.14$     $T_p(s): 11$



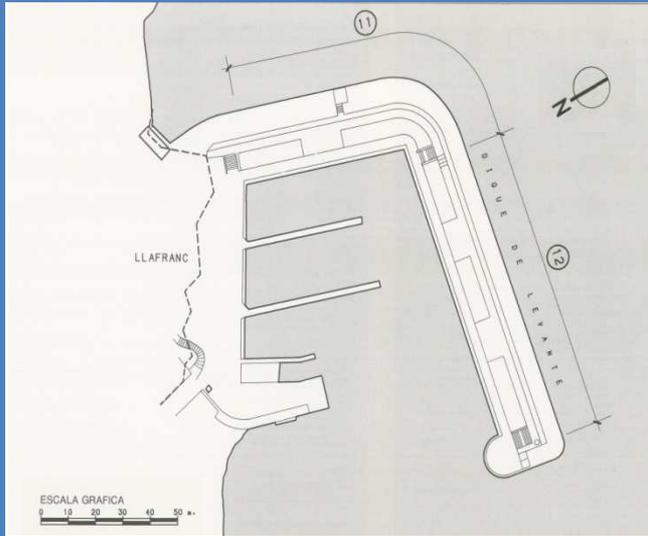
$G_c: 11.30$  m  
 Lower slope: 3/4.5  
 Upper slope: 3/4.5  
 Acropodos

$R_c$ (m) actual Respecto NMM 7.5	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	<u>Caso 0 (<math>R_c: 6.70</math> m)</u> <b>90,544</b>	<u>Caso 1 (<math>R_c: 6.50</math> m)</u> <b>102,379</b>	<u>Caso 2 (<math>R_c: 6.20</math> m)</u> <b>123,095</b>	<u>Caso 3 (<math>R_c: 5.70</math> m)</u> <b>167,349</b>

## OBSERVACIONES

- El escalón de la berma superior no se puede tener en cuenta en el programa, por lo que se supone una única berma superior de 11.30 m de anchura.
- Las bermas intermedias del talud tampoco se pueden estudiar con el Eurotop, por lo que se calcula la pendiente media de todo el perfil.

# LLAFRANC



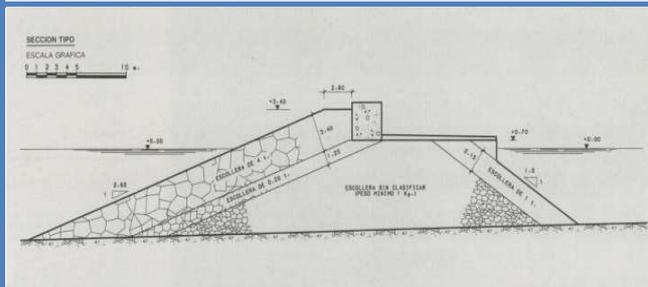
Posición

41º 53' N 3º 12' E

Dirección oleaje

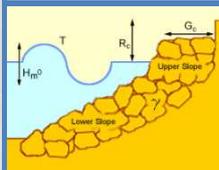
SSE

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 11



Características del oleaje

$h(m): 8.50$   $H_s(m): 5.12$   $T_p(s): 11$



$G_c: 2.80$  m

Lower slope: 1/2.65

Upper slope: 1/2.65

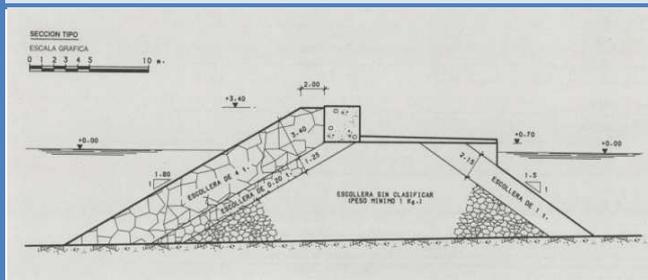
Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**3.80**

Cálculo del rebase (l/s/m)

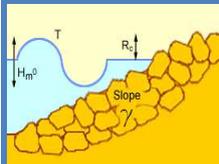
Caso 0 ( $R_c: 3.00$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.80$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.50$ m)	Caso 3 ( $R_c: 2.00$ m)
<b>391,438</b>	<b>490,016</b>	<b>686,325</b>	<b>1203,363</b>

## DIQUE DE LEVANTE, TRAMO 12



Características del oleaje

$h(m): 8.50$   $H_s(m): 5.12$   $T_p(s): 11$



Slope: 1/1.80

Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**3.40**

Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 2.60$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.40$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.10$ m)	Caso 3 ( $R_c: 1.60$ m)
<b>404,173</b>	<b>494,406</b>	<b>668,895</b>	<b>1107,003</b>

## OBSERVACIONES

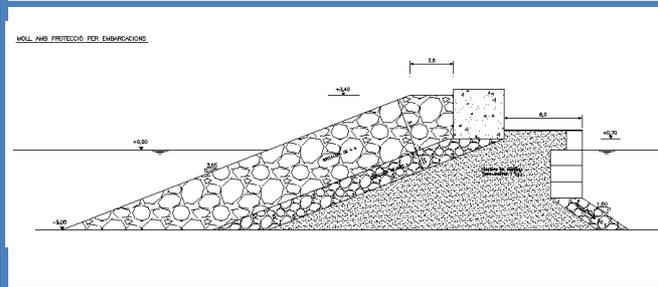
- Los elevados valores del rebase en estas dos secciones se debe a la combinación de un pequeño francobordo y a las relativamente duras condiciones del oleaje derivadas del gran calado, mucho mayor del necesario para las funciones deportivas del puerto.

# AIGUABLAVA (AVANTPROJECTE D'AMPLIACIÓ)



Posición	41°57'N 3°12'E
Dirección oleaje	E

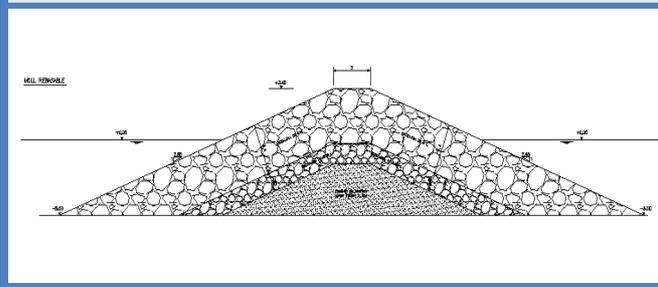
## DIQUE CON PROTECCIÓN PARA EMBARCACIONES



Características del oleaje	
h(m): 5.00 H <sub>s</sub> (m): 3.19 T <sub>p</sub> (s): 11	
	G <sub>C</sub> : 2.8 m
	Lower slope: 1/2.65
	Upper slope: 1/2.65
	Escollera/bicapa

R <sub>c</sub> (m) actual Respecto NMM 3.80	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 (R <sub>c</sub> : 3.00 m) <b>32,902</b>	Caso 1 (R <sub>c</sub> : 2.80 m) <b>47,183</b>	Caso 2 (R <sub>c</sub> : 2.50 m) <b>81,027</b>	Caso 3 (R <sub>c</sub> : 2.00 m) <b>199,545</b>

## DIQUE REBASABLE

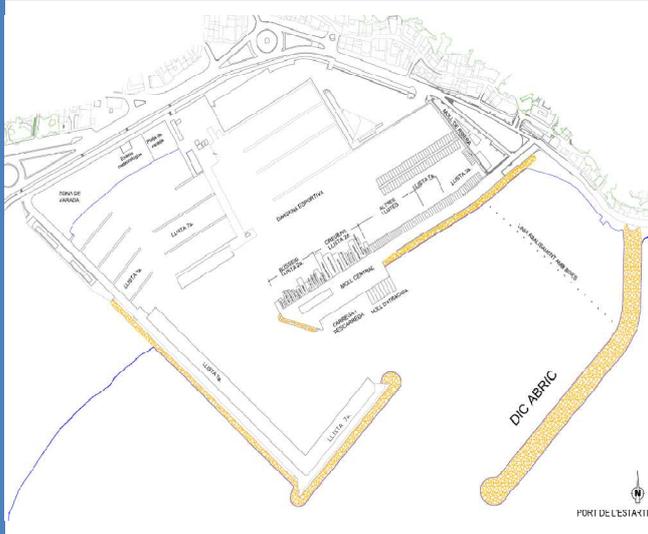


Características del oleaje	
h(m): 5.00 H <sub>s</sub> (m): 3.19 T <sub>p</sub> (s): 11	
	Slope: 1/2.65
	Escollera/bicapa

R <sub>c</sub> (m) actual Respecto NMM 3.40	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 (R <sub>c</sub> : 2.60 m) <b>88,658</b>	Caso 1 (R <sub>c</sub> : 2.40 m) <b>111,861</b>	Caso 2 (R <sub>c</sub> : 2.10 m) <b>164,056</b>	Caso 3 (R <sub>c</sub> : 1.60 m) <b>310,581</b>

## OBSERVACIONES

# L'ESTARTIT



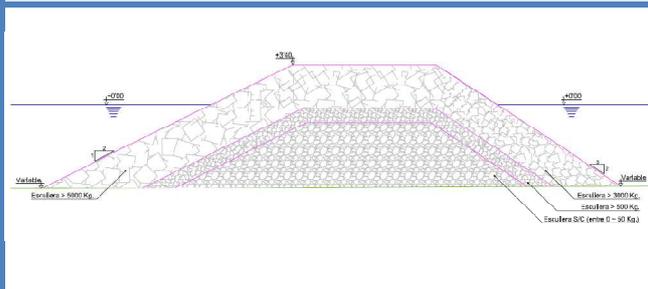
Posición

42° 4' N 3° 11' E

Dirección oleaje

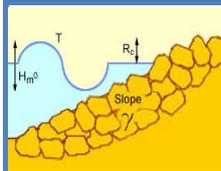
SE

## DIQUE DE ABRIGO



### Características del oleaje

$h(m): 6.00$   $H_s(m): 3.74$   $T_p(s): 11$



Slope: 1/2

Escollera/bicapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM

3.40

### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 2.60$  m)

**83,206**

Caso 1 ( $R_c: 2.40$  m)

**113,161**

Caso 2 ( $R_c: 2.10$  m)

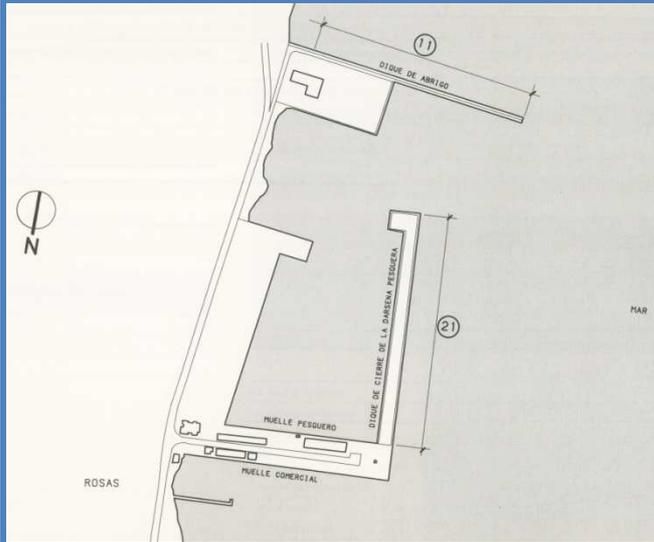
**179,475**

Caso 3 ( $R_c: 1.60$  m)

**387,127**

## OBSERVACIONES

# ROSES



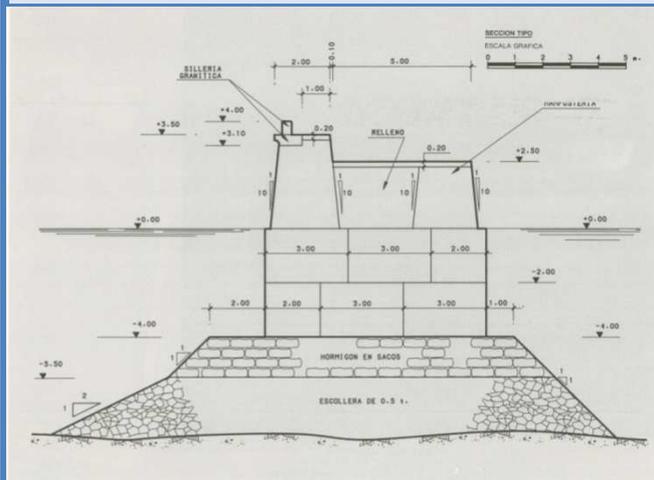
Posición

42º 15' N 3º 10' E

Dirección oleaje

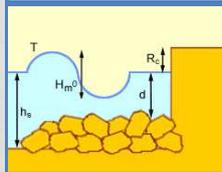
NNE

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 4.00$     $H_s(m): 2.64$     $T_p(s): 11$



$h_s: 7.80$  m  
 $d: 4.80$  m

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
4.00

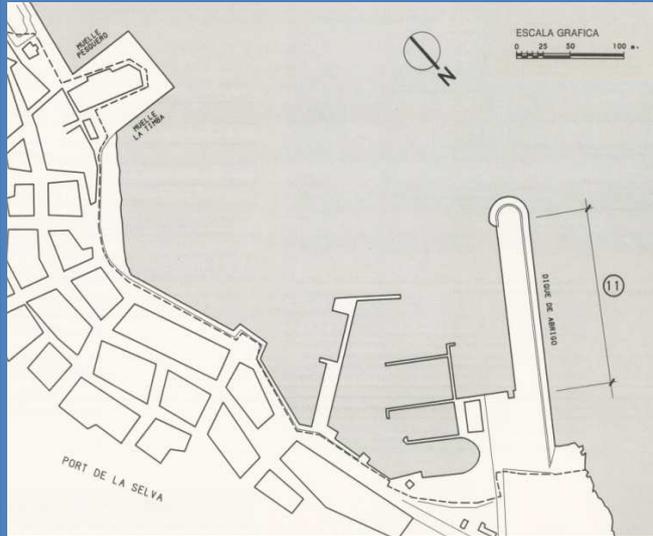
### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 3.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 3.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 2.20$ m)
54,881	64,908	85,363	145,384

## OBSERVACIONES

- A pesar de la ampliación que ha sufrido el puerto (y que no queda reflejada en la planta), se sigue estudiando el tramo 11 ya que continua siendo el dique de abrigo del puerto, y por lo tanto, el más expuesto a la acción del rebase.

# PORT DE LA SELVA



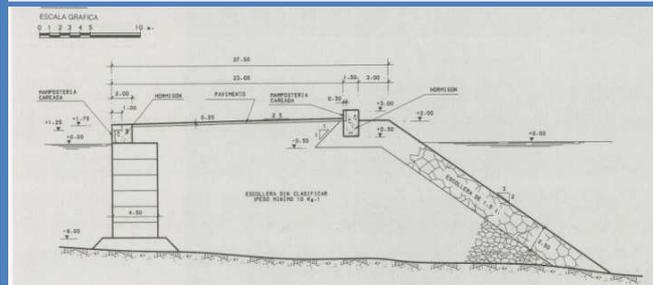
Posición

42º 20' N 3º 11' E

Dirección oleaje

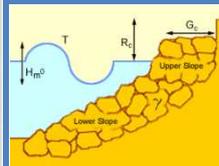
NNW

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 13.00$     $H_s(m): 7.59$     $T_p(s): 11$



$G_c: 3$  m

Lower slope: 2/3

Upper slope: 2/3

Escollera/tricapa

$R_c$  (m) actual  
Respecto NMM  
**3.00**

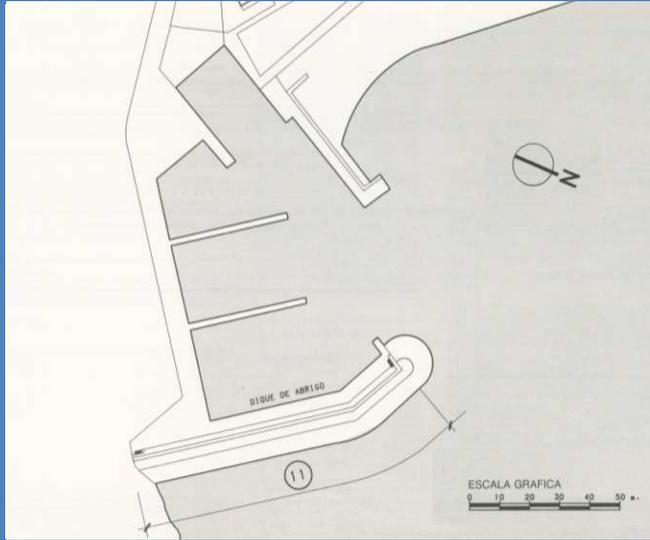
### Cálculo del rebase (l/s/m)

Caso 0 ( $R_c: 2.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 2.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 1.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 1.20$ m)
<b>2474,019</b>	<b>2878,759</b>	<b>3613,338</b>	<b>5277,327</b>

## OBSERVACIONES

- Los elevados valores del rebase en estas dos secciones se debe a la combinación de un pequeño francobordo y a las relativamente duras condiciones del oleaje derivadas del gran calado, mucho mayor del necesario para las funciones deportivas del puerto.

# COLERA



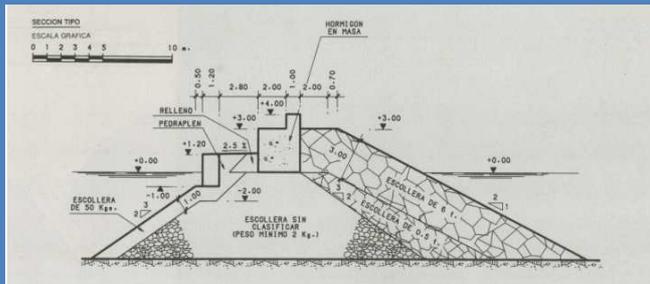
Posición

42º 24' N 3º 9' E

Dirección oleaje

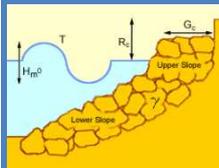
ENE

## DIQUE DE ABRIGO, TRAMO 11



### Características del oleaje

$h(m): 6.00$     $H_s(m): 3.74$     $T_p(s): 11$



$G_c: 2.70$  m  
 Lower slope: 1/2  
 Uper slope: 1/2  
 Escollera/tricapa

$R_c$ (m) actual Respecto NMM 4.00	Cálculo del rebase (l/s/m)			
	Caso 0 ( $R_c: 3.20$ m)	Caso 1 ( $R_c: 3.00$ m)	Caso 2 ( $R_c: 2.70$ m)	Caso 3 ( $R_c: 2.20$ m)
	<b>33,078</b>	<b>44,986</b>	<b>71,349</b>	<b>153,899</b>

## OBSERVACIONES