

## EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS COSTERAS ESPAÑOLAS

Texto: Raúl Medina Santamaría  
CATEDRÁTICO DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

# D

De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), las excepcionales condiciones del litoral para el desarrollo de actividades humanas han propiciado que cerca de un 50% de la población mundial viva en la zona costera. Esta afirmación de carácter general es también válida en España, donde los municipios costeros, con apenas un 7% del territorio, albergan al 45% de la población nacional. Esta concurrencia de viviendas, industrias y servicios a lo largo del litoral hace que el valor de los bienes situados en una banda de 500 metros de la costa exceda, solo en Europa, el billón de Euros. (Proyecto EuroSION: <http://www.euroSION.org>).

Todos estos habitantes y bienes materiales se encuentran amenazados por la inundación y la erosión costera. Según las predicciones del IPCC, el riesgo de inundación aumenta cada año para infraestructuras urbanas, turísticas e industriales, tierras de cultivo, áreas de recreo y hábitats naturales. Dicho Panel Intergubernamental estima que el número anual de víctimas debido a la inundación costera alcanzará las 158.000 en 2020 y que más de la mitad de los humedales desaparecerán como consecuencia de dicha inundación.

El coste económico de las acciones de mitigación de los efectos frente a la inundación costera, íntimamente relacionados con la erosión litoral, va en aumento. De acuerdo con los resultados del proyecto EuroSION, en 2001 los fondos dedicados a la protección de las costas en Europa ascendió a 3.200 millones de Euros, un 30% más que en 1986. Es importante señalar que dicho cos-

### Según las predicciones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, el riesgo de inundación aumenta cada año para infraestructuras urbanas, turísticas e industriales, tierras de cultivo, áreas de recreo y hábitats naturales

te solo refleja las inversiones realizadas para proteger los bienes expuestos a un riesgo inminente, pero no los costes inducidos en las actividades humanas. Según estudios previos del IPCC dichos gastos tienen una media anual de unos 5.400 millones de Euros.

Los datos anteriores, unidos a las evidencias mundiales de cambios significativos en la dinámica marina en todos los océanos debido al cambio climático global, motivaron que la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) requiriera a los estados miembros la implementación de medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa (Artículo 4, b). En España es la Dirección General de Calidad y Eva-

**Importancia de las Zonas Costeras**

**IPCC:**

- 50% población vive en zonas costeras

**EUROSION:**

- 70 millones de Europeos en municipios costeros
- 1 billón de € en bienes y servicios en la franja costera de 500 m.

Este comportamiento produce una leve tendencia positiva en las duraciones de excedencia de alturas de ola. La dirección predominante del oleaje tiende a ser más del Oeste, con mayor intensidad en la costa occidental. Las tendencias que se obtienen para las variables de viento y marea meteorológica, tanto de régimen medio como extremal, son negativas exceptuando el viento extremal en la costa Oeste de Asturias, donde se produce un incremento. Aún así, estas últimas variaciones son mínimas.

#### GALICIA:

En la costa gallega se observa una zonación importante en la magnitud de las variables de estudio y sus tendencias marcadas por el cabo Finisterre, lo que genera un clima marítimo más suave en las Rías Bajas. La energía del oleaje tiende a aumentar, especialmente para los eventos extremales, entre Estaca de Bares y Finisterre.

#### COSTA MEDITERRÁNEA:

No se aprecian cambios relevantes en la magnitud de la energía del oleaje, 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. Las duraciones de excedencia de altura de ola estimadas tienden a aumentar ligeramente a lo largo de la costa, lo que implica una disminución de la operatividad de los puertos. En la Costa Brava, donde se detectan tendencias con un comportamiento similar al Noreste Balear, se observa una disminución energética del oleaje medio. Respecto a la dirección predominante del oleaje, se han producido variaciones en las Islas Baleares y en la Costa Brava se ha detectado una tendencia de giro horario en los oleajes, de forma que la dirección predominante tiende a ser más oriental.

El régimen medio del viento y marea meteorológica presenta una tendencia negativa, pero de muy pequeña escala. Es importante destacar la gran significancia estadística que aportan los resultados de tendencia negativa de marea meteorológica en el Mediterráneo, Baleares

luación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española de Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Conscientes de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, en colaboración con la Dirección General de Costas y la Universidad de Cantabria, desarrollaron un conjunto de estudios y herramientas científicas para la evaluación de los efectos del cambio climático en la costa española y el establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático cuyas principales conclusiones se resumen en el presente artículo.

### CAMBIOS DE LA DINÁMICA MARINA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Con base en los datos medidos por diversas instituciones (EPPE, INM, GKSS...) se han analizado las tendencias en la costa española de diversos parámetros representativos de los regímenes medio y extremal de clima marítimo. Estos parámetros son los que se han considerado fundamentales para analizar los agentes o forzamientos cuyas variaciones in-

ducidas en el cambio climático pueden tener efectos reseñables en los diferentes elementos que configuran la zona costera. En los apartados siguientes se señalan los valores de dichas tendencias, así como el valor medio de dichas variables en el año horizonte 2050.

#### NIVEL MEDIO DEL MAR EN EL LITORAL ESPAÑOL:

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 español es de 2.5 mm/año, por lo que extrapolando al año 2050, se tendría un ascenso del nivel medio de +0.125 m. Este valor se encuentra en la banda media de los contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su tercer 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.

#### COSTA CANTÁBRICA:

Se observa un aumento de la energía del oleaje que llega a la Costa Cantábrica. Este aumento es mayor para la rama alta de régimen medio ( $H_{S12}$ ), sin embargo, la magnitud del incremento es menor para los sucesos más extremales ( $H_{T50}$ ).

y costa Noroeste gallega, a pesar de ser sus variaciones muy pequeñas.

## GOLFO DE CÁDIZ:

El Golfo de Cádiz presenta una tendencia negativa muy clara en energía del oleaje para todas las variables de oleaje estudiadas, lo que confirma la tendencia a un clima marítimo más suave.

## CANARIAS:

Se detecta una zonación Norte-Sur clara en la tendencia de cambio de los temporales. Este hecho se explica dada la distinta naturaleza de generación de oleaje en el Norte (oleajes generados en el Atlántico Norte con un Fetch de generación muy extenso), respecto al Sur (oleajes generados en un área más próxima al archipiélago). Los resultados de variación a largo plazo indican que se ha producido un incremento de los temporales en el Norte y una tendencia a la disminución energética y giro horario de las direcciones del oleaje en el Sur.

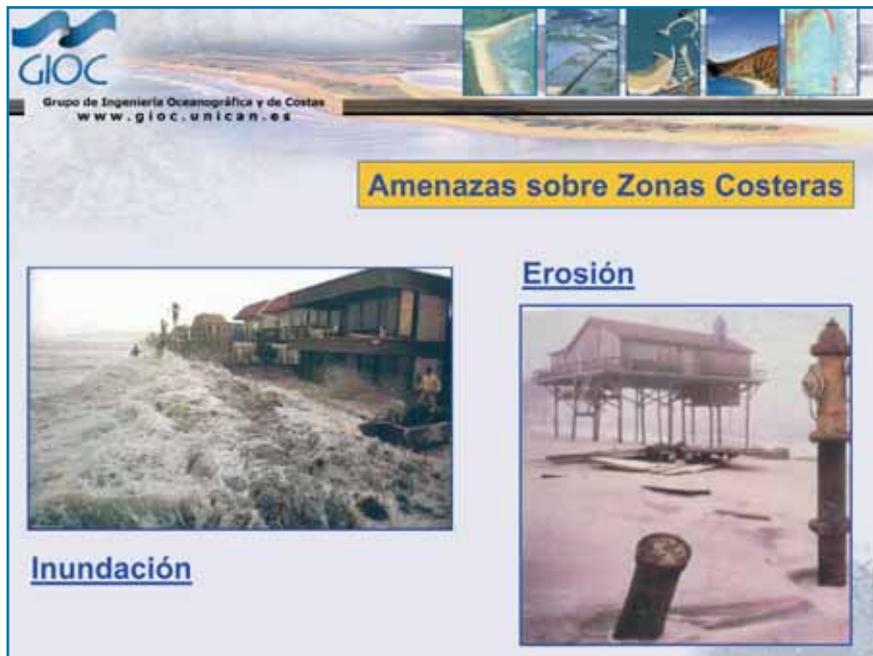
## EFFECTOS SOBRE LOS ELEMENTOS DEL LITORAL

El estudio teórico sobre los posibles efectos del cambio climático en los distintos elementos del litoral pone en evidencia que pequeños cambios en los parámetros que definen el oleaje incidente en la costa así como el posible aumento del nivel medio pueden acarrear importantes consecuencias en la zona costera. Este apartado tiene como objetivo resumir los efectos más importantes que se pueden producir en cada elemento litoral.

## EFFECTOS EN PLAYAS:

Los efectos más importantes que el cambio climático puede suponer en las playas son: a) una variación en la cota de inundación y b) un retroceso, o en su caso avance, de la línea de costa.

En el caso de la cota de inundación, este parámetro viene determinado por la probabilidad conjunta de la marea astronómica, de la marea meteorológica, del run-up en la playa y del posible aumento del nivel medio del mar.



Para el escenario considerado de cambio climático, se obtiene un aumento total de la cota de inundación, que es inducida principalmente por el aumento del nivel medio del mar. No obstante, en la cornisa Gallega y en la zona Norte de las Islas Canarias, el aumento es mayor que en el resto del litoral ya que en estas zonas se produce un aumento sig-

nificativo de la altura de ola significativa con un periodo de retorno de 50 años. Por otro lado, la variación de la marea meteorológica a lo largo de todo el litoral contrarresta parcialmente el aumento de la cota de inundación producido por la variación del nivel medio y de la altura de ola significativa. Como dato representativo, en el Mediterráneo se obtiene





## El IPCC estima que el número anual de víctimas debido a la inundación costera alcanzará las 158.000 en 2020 y que más de la mitad de los humedales desaparecerán como consecuencia de dicha inundación

un aumento de aproximadamente 20 cm, mientras que en la costa gallega y en las Islas Canarias puede alcanzar valores de 35 cm.

Otro efecto en las playas es el retroceso de la línea de costa. Este puede ser inducido por el aumento en el nivel medio, que hace que el perfil activo de la playa tenga que ascender para llegar al equilibrio dinámico con esta nueva condición de nivel medio. Para ello, es necesario cubrir el déficit de arena que se produce en el perfil activo y este se hará a expensas de la arena de la playa seca y de la berma, produciendo un retroceso de la línea de pleamar. Las playas constituidas por arenas más finas y mayores profundidades de corte, es decir, las más disipativas, serán aquellas que experimenten el

mayor retroceso. Este retroceso será mitigado en las playas con grandes alturas de berma.

A modo de ejemplo, considerando una playa tipo con un tamaño de grano de 0,3 mm, una berma de 1 m de altura de ola, y considerando la misma tasa de aumento para el nivel medio mencionada anteriormente, siendo el año objetivo el 2050, las playas más susceptibles al aumento del nivel medio del mar, son las que se sitúan en la cornisa Atlántica del litoral Español así como las situadas en las Islas Baleares, obteniéndose en estas zonas retrocesos del orden de 16 m. En la zona del Mediterráneo el retroceso será menor ya que la extensión del perfil activo de las playas es menor.

Otro parámetro que puede contribuir a un retroceso adicional de las

playas es la variación en la dirección del flujo medio de energía. Dicho retroceso es altamente dependiente del tipo de playa que se considere, así como de la propagación que el oleaje sufra desde profundidades indefinidas hasta la playa en concreto. Considerando una playa rectilínea no colmatada de arena de 1000 m de longitud una variación en la dirección en las proximidades de la playa, generaría un retroceso en la mitad de la playa y un avance en la otra mitad. Las playas más susceptibles a este tipo de retroceso corresponden a las playas de la zona Norte del mediterráneo, sobre todo las de la Costa Brava, siendo de especial relevancia el efecto en las islas Baleares y también en Sur de las Islas Canarias. En estas zonas el retroceso puede superar los 50 m ya que la variación de la dirección flujo medio de energía supera en ocasiones los 8°. En el resto del litoral este hecho tampoco puede ser depreciado observando valores del retroceso del orden de 20 m.

Otro efecto significativo es el posible cambio en el transporte potencial a lo largo de playas abiertas en equilibrio dinámico o en desequilibrio, playas típicas de la zona Mediterránea, sometidas a un transporte litoral muy activo. Teniendo en cuenta, la altura de ola significativa media anual y la dirección del flujo medio de energía y su variación media calculada, se ha calculado en cada zona de la costa del litoral, la dirección del flujo medio de energía actual y su correspondiente variación para el año 2050, en el punto de rotura correspondiente a la altura de ola significativa media anual. Para el escenario de cambio climático seleccionado, en la cornisa Cantábrica el transporte potencial actual aumentaría en un 30%, cosa que no supone que se produzcan grandes modificaciones en la morfología de la costa, ya que en esta zona la mayoría de las playas son encajadas. Sin embargo, en el Mediterráneo y en el Golfo de Cádiz se obtiene una reducción de las tasas de transporte potencial, lo que indica que en las playas so-

## La Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, en colaboración con la Dirección General de Costas y la Universidad de Cantabria, desarrollaron un conjunto de estudios y herramientas científicas para la evaluación de los efectos del cambio climático en la costa española y el establecimiento de políticas y estrategias de actuación

medidas a erosiones progresivas, la tasa de erosión será más lenta, ya que la capacidad de transporte se reducirá.

Por último, cabe mencionar que los posibles efectos del cambio climático en las playas son altamente dependientes de las características de la playa que se considere y de la propagación del oleaje hasta la misma, no siendo posible aplicar los valores globales aquí descritos a playas concretas sin un análisis particular.

### EFFECTOS EN ESTUARIOS:

El análisis realizado ha puesto de manifiesto que el parámetro que en mayor medida determina la configuración morfológica de equilibrio de los distintos elementos que configuran un estuario es el prisma de marea, es decir, el volumen de agua que entra y sale en cada ciclo de marea.

Si la tasa de generación de sedimento por la deposición de partículas calcáreas provenientes de conchas y de distintos organismos,

sumado a los aportes de los ríos, no es capaz de compensar el déficit de arena que se producirá en el interior de la bahía por el aumento del nivel medio del mar, se producirá un aumento del volumen de agua que entra y sale de la bahía, es decir, del prisma de marea. Las consecuencias del aumento del prisma de marea en la configuración de los distintos elementos morfológicos son las siguientes:

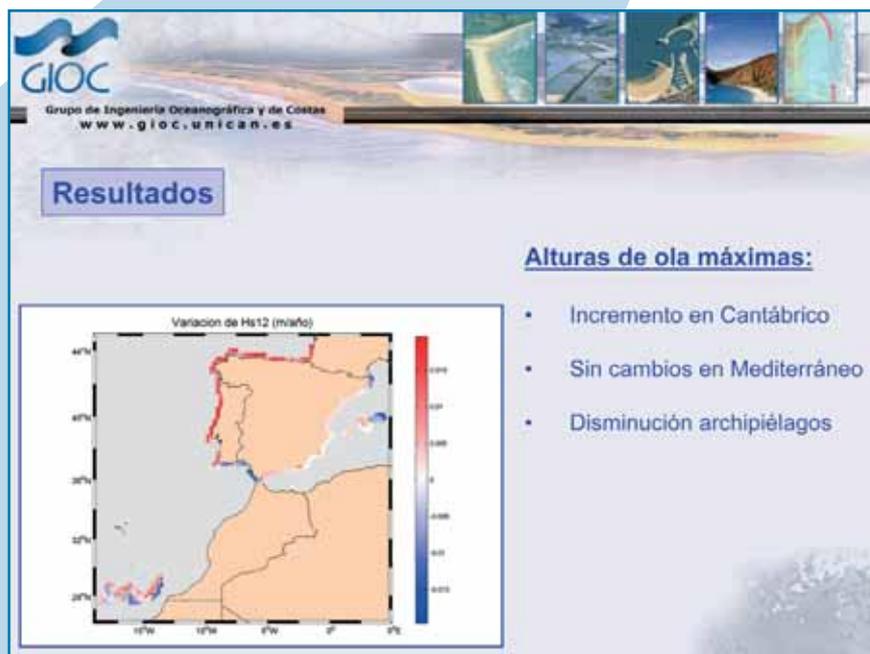
Un aumento del prisma de marea generará un déficit de sedimento en el interior de la bahía, que tenderá a restablecer dicho equilibrio aumentando la cota de las llanuras mareales.

Por ejemplo, considerando un estuario con un área total de 1,2 Km<sup>2</sup> y un prisma de marea de 3.600.000 m<sup>3</sup>, donde la tasa de aumento de la cota de las marismas por generación de sedimento por parte de la bahía es de  $2,2 \cdot 10^{-4}$  m/año, se estima que si el nivel medio aumenta 0,2 m en los siguientes 46 años, se produciría un déficit de arena en las llanuras mareales de 240.000 m<sup>3</sup>.

Un aumento del nivel medio, traducido en un aumento del prisma de marea, generará un incremento del área de la sección crítica de la desembocadura. Siguiendo el mismo ejemplo indicado en el apartado anterior, en el estuario tipo considerado se produciría un aumento de la sección crítica del 6%.

El aumento del prisma de marea generado por el aumento del nivel medio del mar, también generará modificaciones en el volumen del bajo exterior, que necesitará contener un mayor volumen de arena para restablecer la condición de equilibrio dinámico, es decir, el bajo exterior presentará un déficit de arena. Para el caso anteriormente mencionado, la variación del volumen del bajo exterior es de aproximadamente del 8%, es decir, en este caso aumentaría 62.000 m<sup>3</sup>.

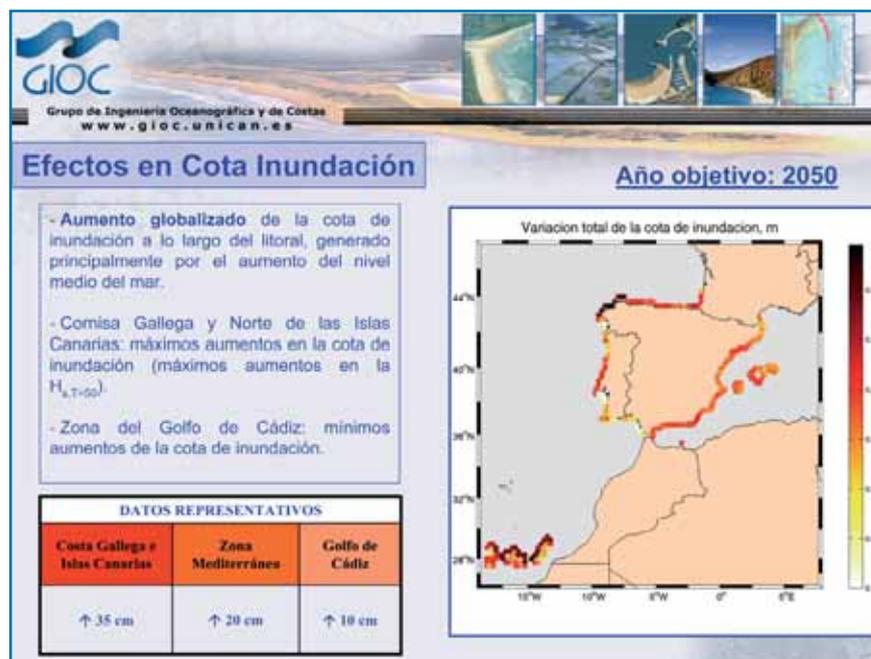
Dado que la zona exterior de los estuarios es la zona más activa en cuanto a dinámica sedimentaria se refiere, el déficit del bajo exterior será cubierto con arena disponible



de la playa adyacente, dando como resultado un retroceso adicional de la línea de costa, cuya magnitud dependerá del grado de desequilibrio generado en el bajo exterior, de la profundidad de corte del perfil de playa y de la longitud de la misma. Para el caso concreto analizado, suponiendo que la playa adyacente está sometida a una  $H_{s12}$  de 5 m, que la arena tiene un diámetro medio de 0,3 mm y que la longitud de la playa es de 1000 m, el retroceso que se estima es de aproximadamente 6,6 m.

Otro aspecto de relevancia en los estuarios es el régimen de inundación, de temperatura y de salinidad de las zonas interiores de los estuarios y el alcance del agua del mar aguas arriba del estuario. Estos factores determinan el tipo de ecosistemas que habitan las distintas zonas del estuario y por lo tanto si los regímenes se ven modificados se producirá un desplazamiento de los ecosistemas actuales. Este fenómeno es de suma importancia en estuarios donde la mezcla vertical es considerable. Estos regímenes son altamente dependientes de la carrera de marea, del caudal del río, del nivel medio del mar así como de la configuración particular de cada estuario, por lo que el análisis del cambio climático se debería realizar para cada estuario en particular haciendo uso de modelos numéricos bidimensionales (para el caso de estuarios con importante mezcla vertical). En el caso de estuarios con gran estratificación, la haloclina, interfase entre agua dulce y agua salda reduce la mezcla vertical, produciéndose el efecto de la cuña salina.

La extensión de la cuña salina aguas arriba es proporcional de la profundidad y es altamente dependiente de la relación entre las fuerzas de inercia y la estratificación, de forma que en flujos altamente estratificados la extensión de la cuña es mayor. Por otro lado al aumentar el caudal del río la extensión de la misma decrece. Retomando el ejemplo anterior, en un estuario caracterizado por una profundidad media de 6



m constante en el que desemboca un río con velocidades medias de 0,5 m/s, la extensión de la cuña es de 2177 m. Si se asume que para el año 2050 el nivel medio sufrirá un aumento de 0,2 m, la extensión de la cuña salina aumentará a 2393 m.

Cabe destacar que estos valores han sido obtenidos bajo la suposición de que el estuario es longitudinalmente constante y con sección rectangular y profundidad constante, por lo que para obtener valores más precisos es necesario recurrir a modelos numéricos bidimensionales 2DV o 3D, en ambos casos baroclínicos.

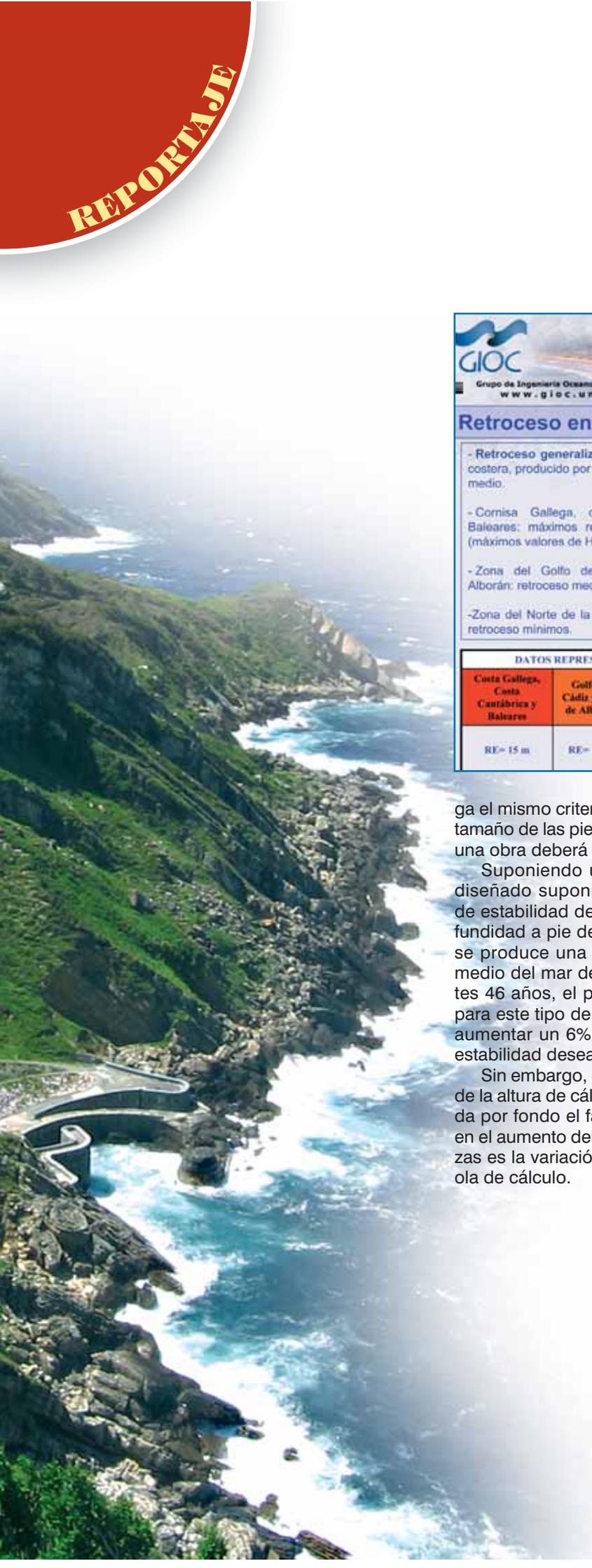
#### EFFECTOS EN OBRAS MARÍTIMAS:

Con respecto a los posibles efectos en obras marítimas, el cambio climático puede suponer importantes cambios en el rebase de las obras, tanto en estructuras en talud así como en estructuras verticales. Se ha obtenido que tanto las variaciones en el nivel medio así como en la altura de ola significativa del oleaje incidente en el dique pueden producir variaciones significativas en el rebase.

Con objeto de obtener una visión de que es lo que puede pasar a lo

largo del litoral español con esta variable funcional, se ha considerado una estructura vertical impermeable sin botaolas tipo, caracterizado por un francobordo de 1 m. suponiendo el escenario de cambio climático considerado a lo largo de este capítulo, y teniendo en cuenta las variaciones de las variables de clima marítimo calculadas se pone de manifiesto que esta variable, rebase, sufrirá importantes modificaciones con respecto a los valores actuales y que estas variaciones adimensionales serán más notables en la zona del Mediterráneo, sobre todo en la zona comprendida entre Málaga y Algeciras, donde se pueden alcanzar hasta variaciones del 250% con respecto a los rebases actuales (en este tipo de estructuras).

El estudio realizado también a puesto de manifiesto que el cambio climático puede acarrear importantes consecuencias en cuanto a la estabilidad de los diques se refiere, de forma que 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 fondo se producirá un desestabilización de las mismas, de forma que si se desea que la estructura mantenga



ga el mismo criterio de estabilidad el tamaño de las piezas que componen una obra deberá aumentar.

Suponiendo un dique en talud, diseñado suponiendo una función de estabilidad de 0.0797 y una profundidad a pie de dique de 10 m, si se produce una variación del nivel medio del mar de 0,2 en lo siguientes 46 años, el peso de las piezas, para este tipo de dique tipo, deberá aumentar un 6% para garantizar la estabilidad deseada.

Sin embargo, en estructuras donde la altura de cálculo no es la limitada por fondo el factor determinante en el aumento del tamaño de las piezas es la variación de esta altura de ola de cálculo.

Considerando como año objetivo el año 2050, y con base en los valores medios obtenidos para las tendencias de los valores extremos de la altura de ola significativa de periodo de retorno de 50 años, se ha evaluado el porcentaje de la variación adimensional del peso de las piezas de una estructura en talud a lo largo de la costa española. En general, en la cornisa Cantábrica se necesitara aumentar el tamaño de las de este tipo de estructuras en talud aproximadamente un 20%, excepto en la costa gallega (en los diques muy expuestos al oleaje exterior) donde las variaciones adimensionales deberían ser incluso del 50%.