



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA





FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

ANTECEDENTES



ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Fase III) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en “MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO”, suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guancho, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría
Investigador Principal





EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:



**FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.****FASE I a. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN****FASE I b. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR****FASE I c. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX****FASE I d. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI****ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”****ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS****ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsible cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.**FASE II a. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL****SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL****SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA****FASE II b. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por “elementos del litoral”, y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.





FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.

LA FASE III tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes a la Fase III:

Fase III. Estrategias frente al cambio climático en la costa.





FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

ÍNDICE

Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1.1
1.1. Estructura de este documento.....	1.1
Capítulo 2. POTENCIALES REPERCUSIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA: RESUMEN.....	2.1
2.1 Efectos sobre las variables del forzamiento.....	2.1
nivel medio del mar en el litoral español:.....	2.2
2.2. Efectos sobre los elementos del litoral.....	2.8
Capítulo 3. BASES PARA LA PROPUESTA DE ESTRATEGIAS FRENTE AL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	3.1
3.1. Introducción.....	3.1
3.2. Utilización de índices e indicadores para la propuesta de estrategia y políticas de actuación.....	3.1
3.3. Premisas para la propuesta de estrategias y políticas de actuación.....	3.14
Capítulo 4. ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS DE ACTUACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	4.1
ANEJOS	
Anejo III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX	
Anejo III-2. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA	





FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

Esta Fase III “*Estrategias frente al cambio climático en la costa*” tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

1.1. Estructura de este documento

La estructura de este Documento es la siguiente:

- En el **Capítulo 2** se realiza un resumen de los potenciales efectos del cambio climático en la costa española a partir de los resultados presentados en los documentos anteriores.
- En el **Capítulo 3** se analizan los índices e indicadores existentes, se propone un nuevo índice y se sientan las bases para la definición de las estrategias y políticas encaminadas a afrontar los problemas derivados del cambio climático.
- Finalmente, en el **Capítulo 4** se proponen unas estrategias y líneas de actuación para su consideración en las políticas de gestión de la costa.





FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

**CAPÍTULO 2. POTENCIALES REPERCUSIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
COSTA ESPAÑOLA: RESUMEN**





2. POTENCIALES REPERCUSIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA: RESUMEN

En este capítulo se realiza un resumen de las potenciales repercusiones del cambio climático en la costa española. Para ello se divide el resumen en dos partes. La primera corresponde a los efectos que el cambio climático produce sobre las variables físicas, agentes o forzamientos que se han considerado más importantes. La segunda parte corresponde a una serie de efectos teóricos que tienen en cuenta las características de los elementos fundamentales que componen la costa. La información completa se encuentra en los Anejos I y II de este documento que se corresponden a su vez con los documentos I c y II b del proyecto.

2.1 Efectos sobre las variables del forzamiento

Se han analizado las tendencias, para toda 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 inducidas en el cambio climático pueden tener efectos reseñables en los diferentes elementos que configuran la zona costera.

Oleaje (Altura de ola significativa, Período medio, Dirección del oleaje):

- Régimen medio de altura de ola significativa.
- H_{s12} (altura de ola superada sólo 12 horas al año).
- Dirección del flujo medio de energía.
- Duraciones de excedencias de altura de ola significativa.
- Régimen extremal de altura de ola significativa: frecuencias.
- Régimen extremal de altura de ola significativa: intensidades.
- H_{T50} (altura de ola significativa de 50 años periodo de retorno).

Marea meteorológica:

- Régimen medio de marea meteorológica.
- Régimen extremal de marea meteorológica: frecuencias.
- Régimen extremal de marea meteorológica: intensidades.
- MM_{T50} (marea meteorológica de 50 años de periodo de retorno).





Viento:

- Régimen medio de viento.
- Dirección del transporte potencial eólico.
- Duraciones de excedencias de viento.
- Régimen extremal de viento: frecuencias.
- Régimen extremal de viento: intensidades.
- W_{T50} (velocidad del viento de 50 años de periodo de retorno).

Nivel del mar

- Tendencia actual
- Prognosis de cambio

Las bases de datos utilizadas, así como las metodologías para el análisis de tendencias han sido descritas anteriormente en el Documento de la Fase I-b. A continuación se describe los resultados obtenidos y las características más relevantes observadas. Los resultados de tendencias se presentan de forma gráfica con un código de colores ('rojo' significa aumento y 'azul' significa disminución). Para la representación de los resultados de tendencias de intensidad de eventos extremales se ha representado sólo la variable de periodo de retorno de 50 años y su variación, ya que su comportamiento está muy relacionado con las variaciones obtenidas para los eventos extremales analizados. Es importante destacar que las variaciones que se describen a continuación no pertenecen a un estudio de detalle para localidades específicas, sino que son indicadores del comportamiento general (baja resolución) de las variables analizadas a lo largo del litoral español y su tendencia de cambio a lo largo de 44 años. Como se describe en la Fase I-d, las tendencias obtenidas pueden ser extrapoladas hasta el año 2050 con cierta fiabilidad.

A continuación se describe, de forma global, la información conjunta más relevante. En el caso de oleaje, nivel del mar y velocidad del viento se destacan los resultados obtenidos para aquellas zonas donde se observa una variación a largo plazo destacable.

Nivel medio del mar en el litoral español:

A nivel global se asume 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. Esta información ha sido complementada con los modelos globales contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su tercer informe, que establecen una variación del nivel del mar comprendida entre 9 y 88 cm en el intervalo correspondiente a 1990-2100. En este informe, el valor





medio de los escenarios presentados oscila entorno de +0.15 m, con una banda de confianza entre +0.1m y +0.25 m. En base a estos resultados, se asume en el año horizonte 2050, un ascenso del nivel del mar de +0.2 m en el litoral español.

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}). 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.

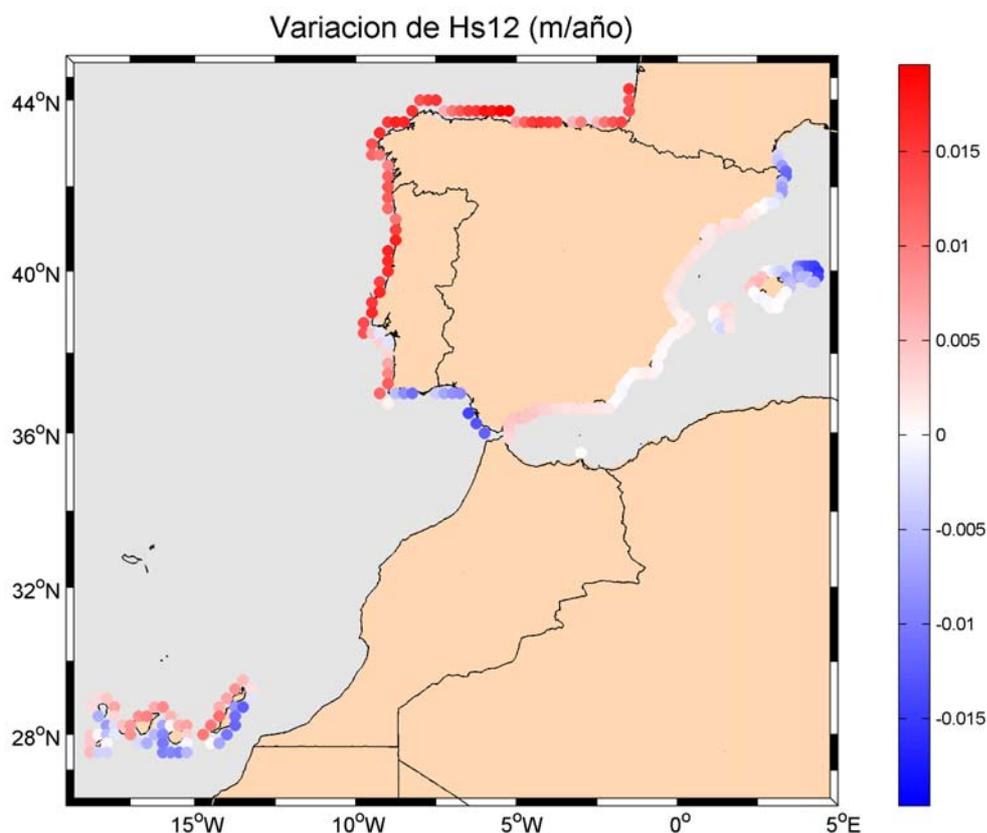


Figura 2.1. Variación de H_{s12} en (m/año) en todo el litoral español



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



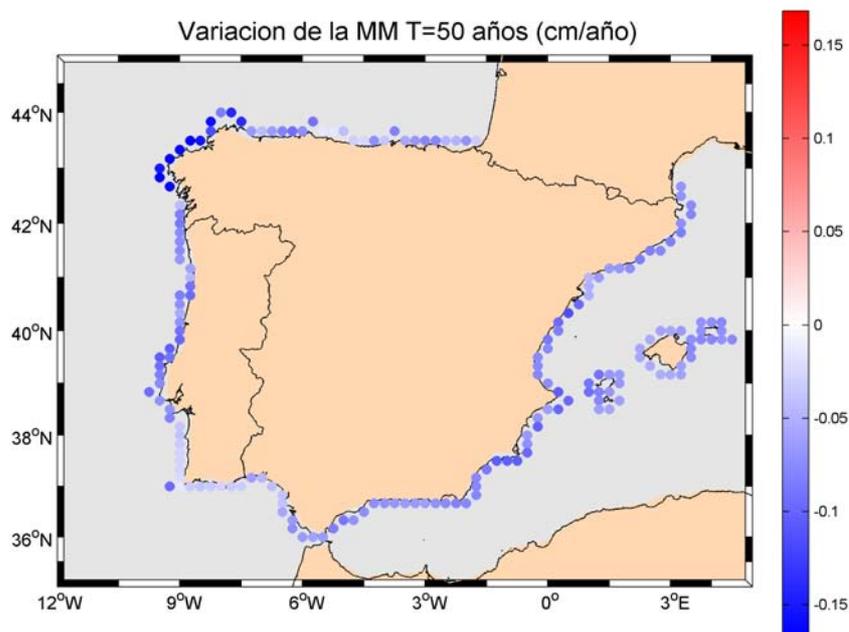


Figura 2.2. Variación de la intensidad del régimen extremal de marea meteorológica

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.

A continuación se presenta, de forma agregada, los resultados obtenidos para las principales variables analizadas en distintas áreas geomorfológicas del litoral español. Considerando 12 áreas, relativamente homogéneas, se ha representado el valor medio, máximo y mínimo, así como su principal variación obtenida. En la gráfica 2.3 se exponen los resultados de régimen medio y en la gráfica 2.4 para el régimen extremal.



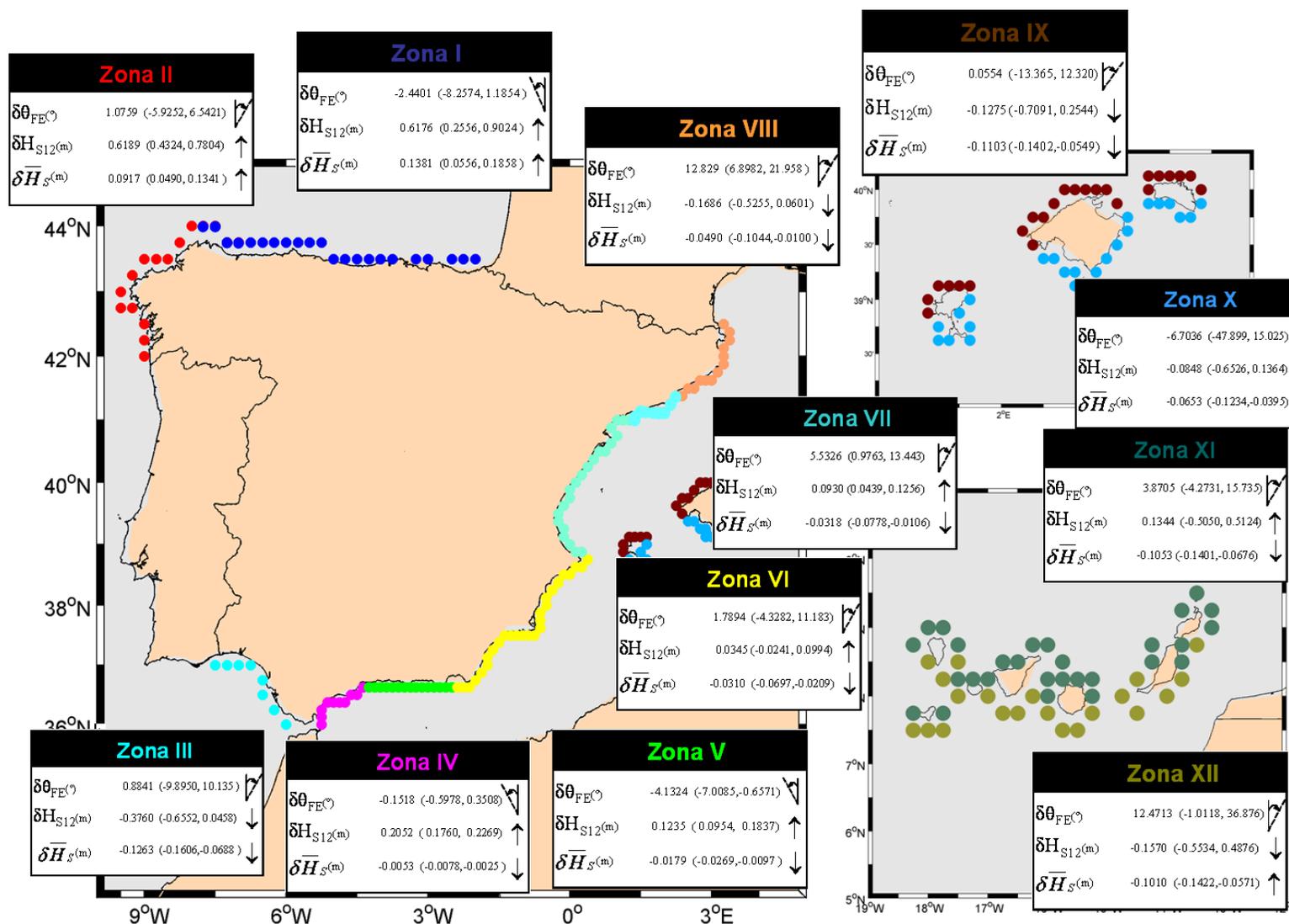


Figura 2.3 Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el periodo 1958-2001.



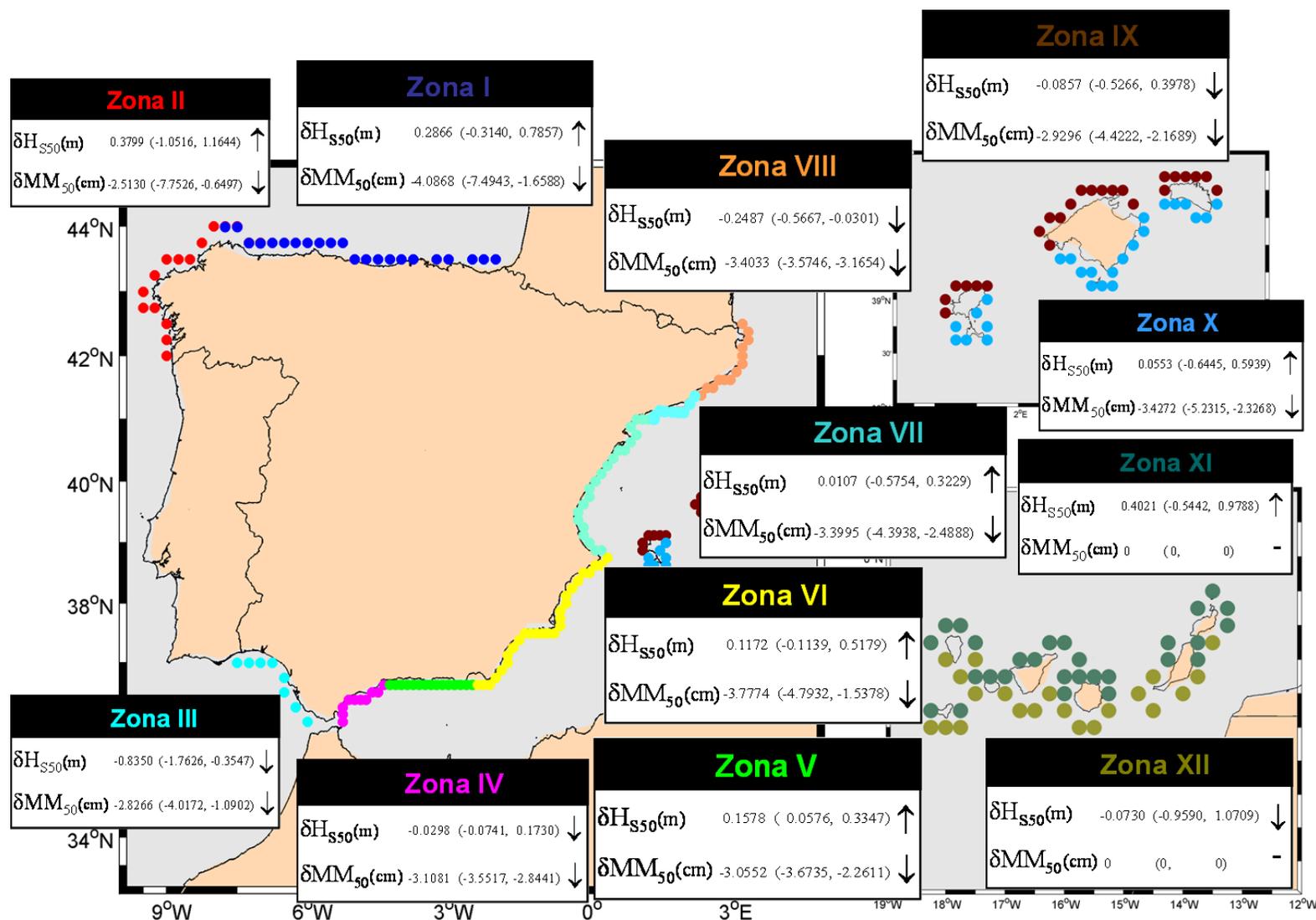


Figura 2.4 Variaciones obtenidas para las variables de régimen extremal durante el periodo 1958-2001.





2.2. Efectos sobre los elementos del litoral

El estudio teórico sobre los posibles efectos del cambio climático en los distintos elementos del litoral ha puesto 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.

Efectos en playas

Los efectos más importantes que el cambio climático puede suponer en las playas se reduce básicamente a una variación en la cota de inundación y a un posible 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.

El valor aquí utilizado para mostrar los resultados en todo el litoral es un valor aproximado de la cota de inundación, ya que como se menciona en el documento correspondiente, su cálculo preciso requeriría un tratamiento estadístico más sofisticado.

El escenario de cambio climático considerado corresponde a aquel en el que se producen los cambios medios estimados en el análisis realizado en la Fase I y se ha asumido que el nivel medio aumenta a una tasa de 0,004 m/año, que corresponde a la tendencia media obtenida por el panel Intergubernamental del Cambio Climático (PICC). Dado que la incertidumbre a la hora de cuantificar esta tendencia es muy elevada, los valores obtenidos en el cálculo realizado deben entenderse como valores orientativos del orden de magnitud del cambio. Por otro lado cabe destacar que el nivel de la marea astronómica se ha considerado igual a la pleamar media viva equinoccial correspondiente a cada fachada del litoral. En la figura 2.5 se muestra la variación adimensional de la cota de inundación a lo largo del litoral español.

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

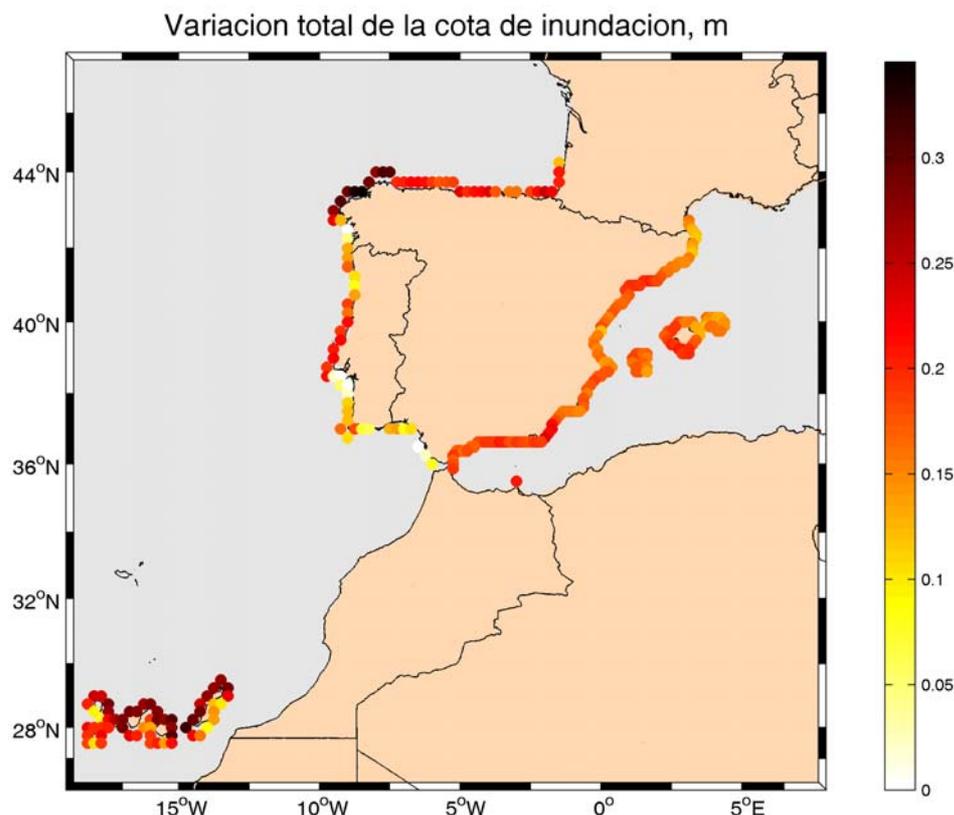


Figura 2.5 Variación neta de la cota de inundación a lo largo del litoral español.

Otro efecto en las playas es el posible **retroceso** de la línea de costa. Este puede ser inducido por un 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, se presenta a continuación en la figura 2.6, el valor estimado para el retroceso a lo largo del litoral español, considerando una playa tipo con un tamaño de grano de 0,3 mm, una berma de 1 m de altura de ola, donde la profundidad de corte viene determinada por la H_{s12} calculada en la Fase I y considerando la misma tasa de aumento para el nivel medio mencionada anteriormente, siendo el año objetivo el 2050.



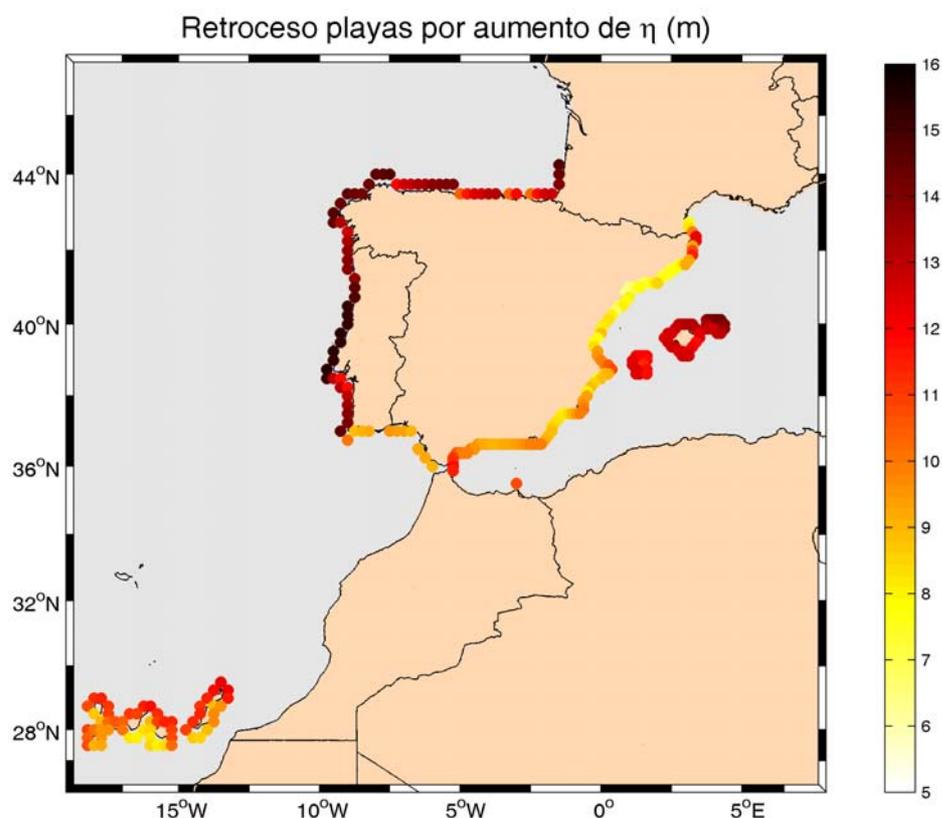


Figura 2.6 Retroceso de las playas por aumento del nivel medio a lo largo del litoral español.

Esta figura indica que 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.



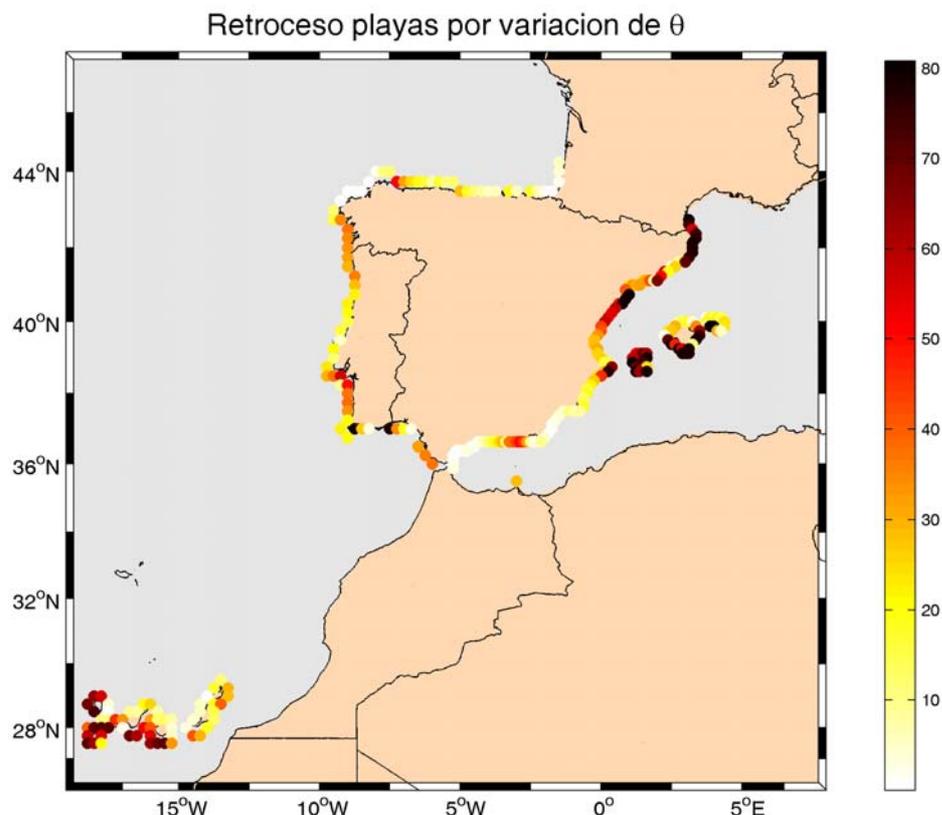


Figura 2.7 Retroceso de las playas por variación de la dirección del flujo medio de energía.

En la figura 2.7 se muestra el retroceso máximo esperado para el año 2050, en la que se ha considerado que la variación de la dirección del flujo medio de energía corresponde a la variación media calculada en la Fase I, una playa tipo de 1000 m de longitud, y se ha aplicado la ley de Snell para calcular la variación del flujo medio a 10 m de profundidad.

Obsérvese que 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 alcanzar hasta 70 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.

En cuanto a las playas encajadas colmatadas de arena, existe otro factor que corresponde al posible aumento de la profundidad de corte de la playa, que induciría grandes retrocesos en este tipo de playas. Para cuantificar este retroceso se asume que el perfil de la playa no cambia en forma, sólo cambia la extensión del perfil activo. También se asume que los cabos o diques que contiene la playa sólo son capaces de contenerla hasta cierta





profundidad y que esta se verá aumentada si se produce un aumento del H_{s12} , ya que ello sería indicativo de que la zona baja del perfil sería más activo más horas al año.

Se ha comprobado que el retroceso será mayor cuanto mayor sea la altura de ola significativa que es excedida en la playa y cuanto menor sea el tamaño de grano que compone la misma. Por otro lado, cabe destacar que este retroceso es proporcional a la variación de la altura de ola significativa que es superada 12 horas al año. Este factor puede tener importantes consecuencias en la cornisa Atlántica, donde la profundidad de corte es elevada y las playas están mayoritariamente encajadas y constituidas por arenas finas. Considerando una playa tipo caracterizado por una H_{s12} de 5 m y un tamaño de grano de 0,3 mm, si se produjese un aumento del 7 % en la altura de ola significativa, el retroceso generado sería del orden de 56,47 m. En el Mediterráneo, la altura de ola superada 12 horas al año es menor que en el Cantábrico. Dado que el retroceso en este caso es proporcional a la raíz cuadrada del H_{s12} , se estima que el retroceso máximo en la costa Mediterránea sea menor, del orden de 15 m aproximadamente.

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. Se ha demostrado que el cambio en la tasa de transporte puede ser consecuencia de variaciones en la altura de ola en rotura y en la dirección del oleaje en rotura.

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. Con esto ha sido posible la elaboración de un mapa orientativo del porcentaje de cambio en el transporte potencial a lo largo del litoral, ver figura 2.8.

Según la figura obtenida, 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 sometidas 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, siendo imposible establecer valores globales a los cambios mencionados.



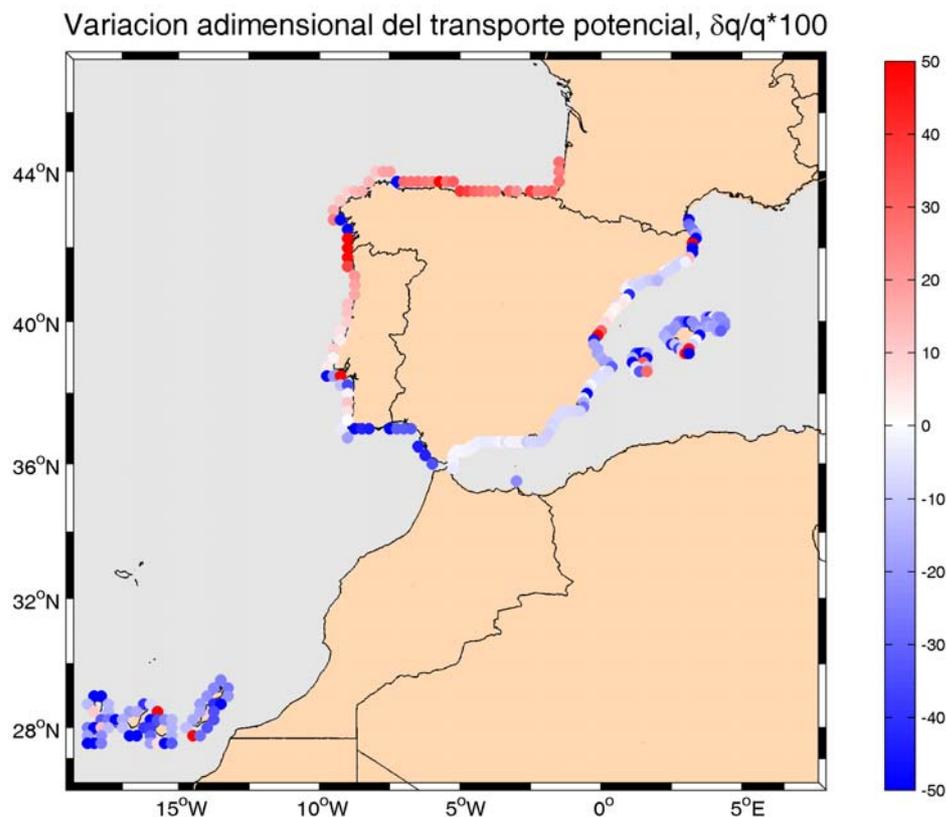


Figura 2.8 Retroceso de las playas por aumento del nivel medio a lo largo del litoral español.

Efectos 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 Km² y un prisma de marea de 3.600.000 m³, 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 m³.

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 que se suponía un aumento de 20 cm del nivel medio para el año futuro del 2050, 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 esta caso aumentaría 62.000 m³.

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 salada 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. En la figura 2.9 se muestra de forma gráfica dicha relación y permite determinar la extensión de la cuña en función de la velocidad del río V_r y de la profundidad a lo largo del estuario

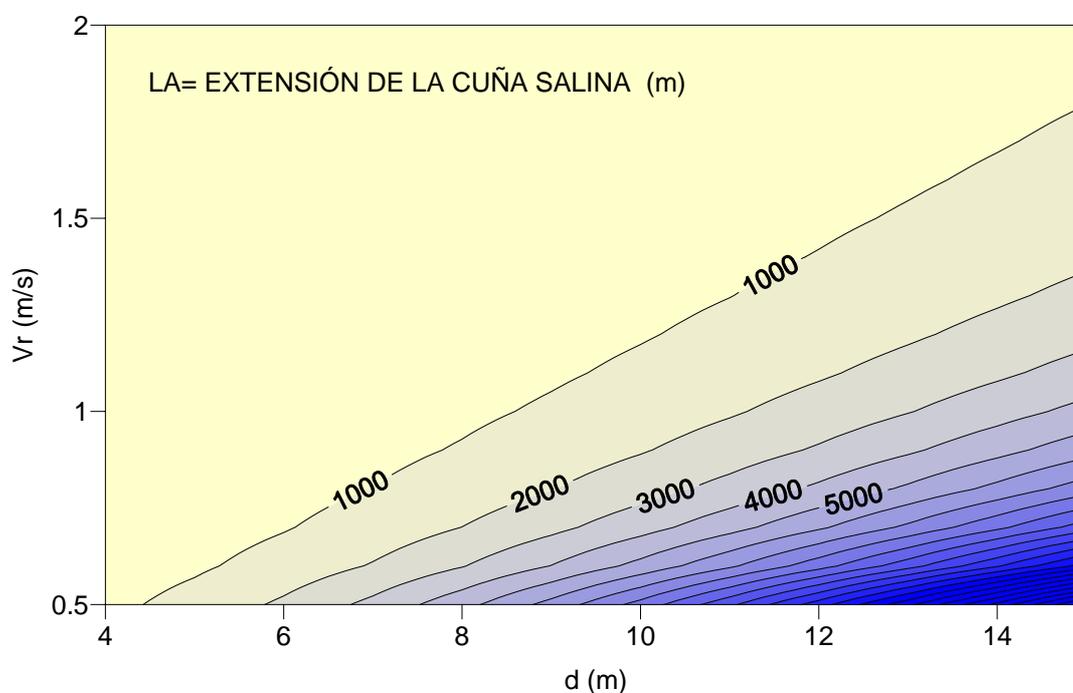


Figura 2.9 Variación de la extensión de la cuña salina en función de la velocidad del río y de la profundidad.

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.

Efectos en dunas

En cuanto al crecimiento de las dunas cabe mencionar que la intensidad y la dirección del viento son los principales parámetros que gobiernan el **transporte eólico** de sedimentos desde la playa hacia los sistemas dunares. Por ello, si estas dos son modificadas por efecto del cambio climático, también lo hará la capacidad de transporte desde la playa hacia las dunas, reduciendo o intensificando la tasa de crecimiento de las mismas. Si por ejemplo, la intensidad del viento disminuye, también disminuye la capacidad de transporte. Por otro lado, si la dirección del viento cambia intensificando la componente paralela a la costa, también se reducirá la capacidad de transporte ya que la que en realidad transporta sedimento desde la playa al trasdós es la perpendicular a la línea de costa.

Por otro lado, en el análisis a largo plazo y haciendo uso de la regla de Bruun (1962), se ha demostrado que un aumento en el nivel medio del mar, puede generar una **erosión dunar** y que la magnitud de la misma depende de los siguientes parámetros:

- La extensión de la playa seca
- El tamaño del sedimento que compone la playa
- La altura de la berma y de la duna
- La altura de ola significativa que es excedida 12 horas al año.

Las dunas más sensibles a la erosión, son aquellas situadas en el trasdós de playas disipativas, compuestas por arenas finas donde la profundidad de corte es elevada, con poca extensión de playa seca y bermas bajas.

En el documento de la Fase II se muestra un resumen de los posibles efectos, indicando las fórmulas que permiten estimar los efectos, el orden de magnitud de los efectos, así como la localización a lo largo del texto de las figuras indicativas de las fórmulas.

Efectos 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 variables de clima marítimo calculadas en la Fase II, se ha elaborado la figura 2.10, que representa la variación adimensional del rebase a lo largo de todo el litoral español, donde se pone de manifiesto que esta variable 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).

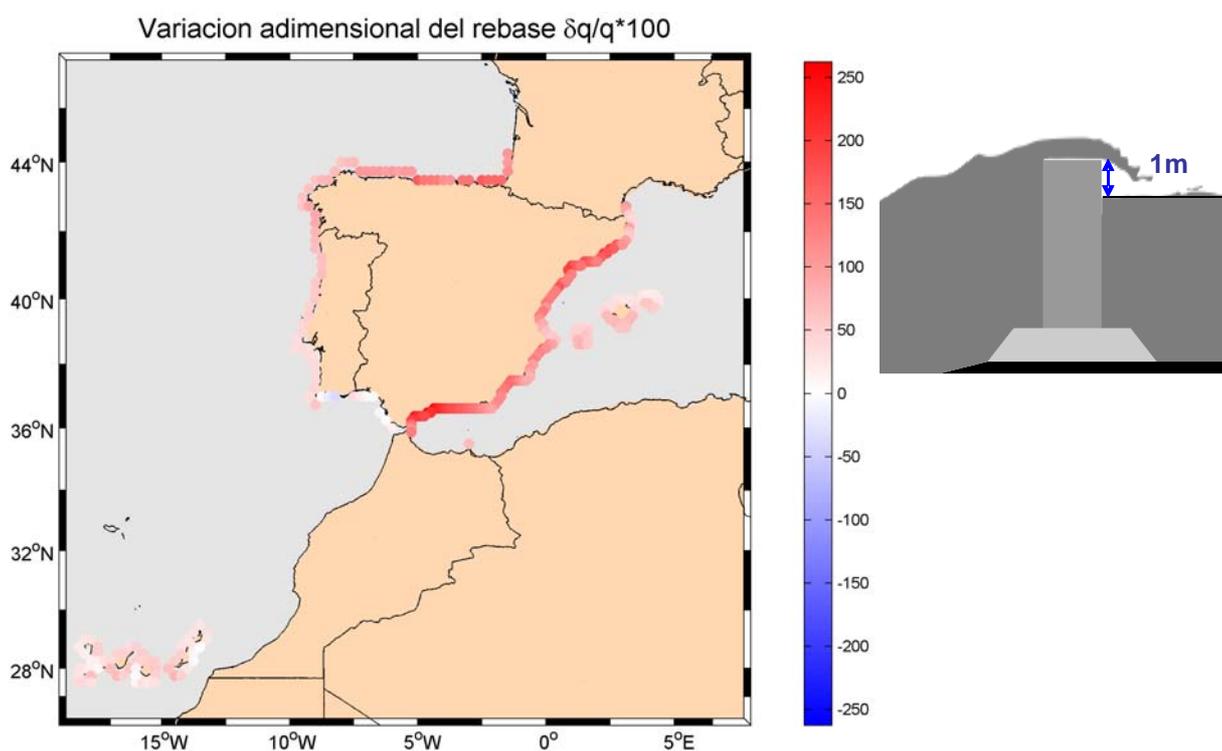


Figura 2.10 Porcentaje de variación adimensional del rebase a lo largo del litoral español. Altura de ola de cálculo limitada por fondo.





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 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 construido la figura 2.11, en la que se muestra el porcentaje de la variación adimensional del peso de las piezas de una estructura en talud a lo largo de la costa española. Obsérvese que 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%.

Este posible aumento de la pieza de las obras se traduce inmediatamente en un **aumento del área total de la obra**, es decir, de las dimensiones de las obras, cuyos patrones tipo serán similares a los presentados para el aumento del peso de las piezas del manto exterior.



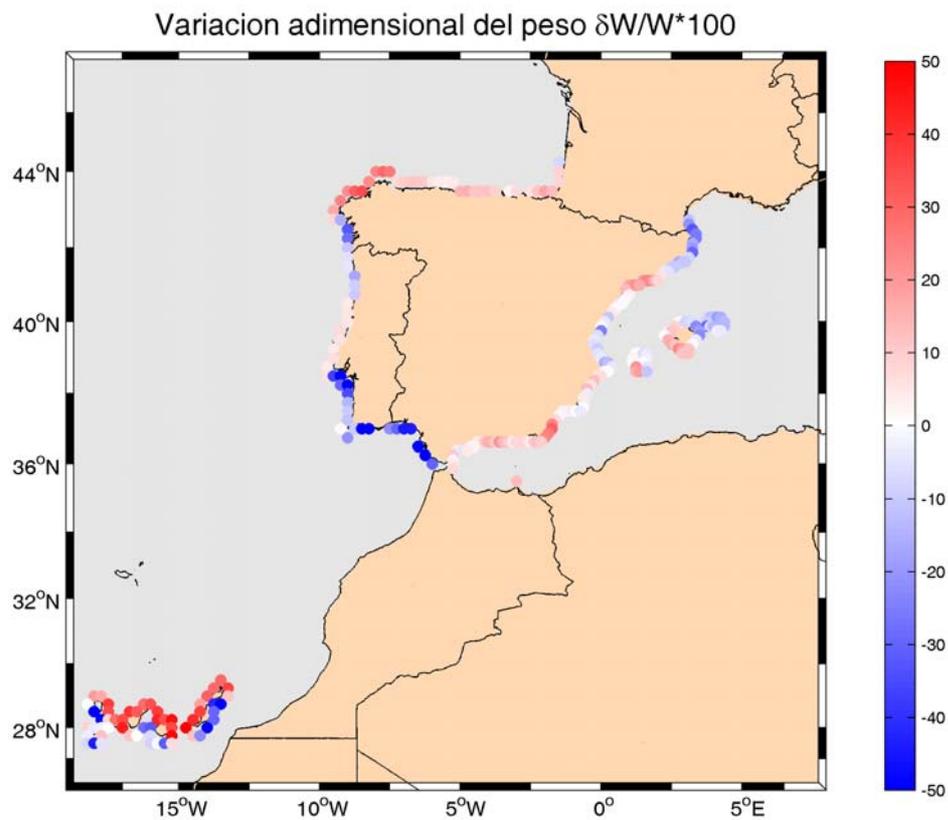


Figura 2.11. Porcentaje de variación adimensional del peso a lo largo del litoral español.
 Altura de ola de cálculo no limitada por fondo.





FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

**CAPÍTULO 3. BASES PARA LA PROPUESTA DE ESTRATEGIAS FRENTE AL
EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**





3. BASES PARA LA PROPUESTA DE ESTRATEGIAS FRENTE AL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

3.1. Introducción

El trabajo realizado en este proyecto se ha enmarcado en tres fases diferentes. La primera se ha dedicado al estudio de los agentes naturales cuya variabilidad puede incidir en cambios importantes en la costa española. La segunda fase se ha dedicado al análisis de los posibles efectos de dichos cambios sobre la costa española. A partir de ellos, se ha puesto claramente de manifiesto la necesidad de tomar medidas frente al problema del cambio climático en la costa.

Una vez analizadas las tendencias y variabilidad de los agentes considerados para analizar los posibles efectos del cambio climático y una vez considerados sus potenciales efectos sobre la costa española es necesario establecer una serie de estrategias de actuación. En este documento se proponen una serie de estrategias.

Los indicadores e índices son una herramienta importante que puede ser sumamente útil para establecer cuál es la situación en la que se encuentra nuestra costa y para fijar posibles estrategias de actuación. Por ello, en primer lugar se realiza un repaso a los posibles índices e indicadores presentes en la literatura y se propone una serie de índices e indicadores que se consideran más adecuados de acuerdo con la experiencia adquirida en este estudio.

Pero antes de presentar las posibles estrategias, es necesario realizar un conjunto de consideraciones que serán las premisas sobre las que se fundamentarán las estrategias propuestas. Estas premisas se fundamentan sobre la base de los resultados obtenidos y sobre la naturaleza de los mismos.

3.2. Utilización de índices e indicadores para la propuesta de estrategias y políticas de actuación

Introducción

Para el establecimiento de políticas o estrategias de actuación o la toma de decisiones siempre suele ser práctico contar con una serie de índices e indicadores que sirvan como orientación. En este caso, sería interesante poder encontrar con índices e indicadores que nos diesen de forma sintética la información más relevante sobre los efectos del cambio climático en la costa.





A partir de los resultados anteriormente presentados se ha puesto claramente de manifiesto que la presentación integrada de resultados en zonas más o menos homogéneas del litoral puede llevar a importantes equívocos a la hora de su interpretación, dado que los efectos del cambio climático pueden variar mucho en zonas cercanas en función de la naturaleza de la costa. Baste considerar que en una zona como Cantabria, en un tramo de costa de 20 km puede encontrarse una playa encajada, un puntal que sirve de entrada a un estuario o marisma, una zona dunar o un tramo con acantilados de roca. Nuestra escala de determinación de los agentes como el oleaje es como máximo de 15 km, por lo que la tendencia de cambio climático utilizada para toda esa extensión será la determinada en un punto o como máximo en dos. Más aún, si no se hacen los necesarios estudios de detalle los efectos sobre la costa serán infravalorados en algunas zonas y sobrevalorados en otras por lo que no será posible establecer las estrategias de actuación más adecuadas para ese tramo.

Sin embargo, es evidente que en muchos casos, y con el objetivo de concienciar a gestores y sociedad en general sobre la problemática asociada al cambio climático es necesario presentar este tipo de información integrada. En esta sección se presenta primeramente un resumen de los índices e indicadores encontrados en la literatura. Posteriormente se proponen una serie de indicadores o índices y se muestran algunos ejemplos de los resultados obtenidos para el litoral español. Finalmente, se propone un índice más integrador con el que se podría tratar de sintetizar toda la información relevante. Es necesario mencionar, sin embargo, que la obtención de mapas que muestren la distribución del valor de dicho índice a lo largo de toda nuestra costa, elaborado con la fiabilidad y resolución suficiente para la toma de decisiones, excede el alcance de este documento.

Revisión de la información existente

En una primera fase el esfuerzo se ha centrado en realizar una búsqueda bibliográfica sobre indicadores de los efectos del cambio climático en la costa. Para ello se ha investigado el trabajo realizado por diversos organismos o instituciones que son referencia en este tema, bien porque están relacionados con proyectos internacionales relacionados con el cambio climático (IPCC, UNESCO,...) o bien por ser centros de reconocido prestigio (EPA, NOAA,...). A continuación se recoge la información más relevante de entre toda la analizada.

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

En primer lugar se ha considerado los informes realizados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (www.ipcc.ch). En estos informes, en concreto, en el informe titulado: *Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas*, se analiza los cambios producidos en la atmósfera, clima y sistema biológico





terrestre durante el siglo XX. Para detectar los cambios producidos se utiliza indicadores, entre los cuales hay indicadores de concentración, meteorológicos, físicos, biológicos, económicos, etc. De todos ellos el único indicador relacionado con la costa con interés para España es el denominado *Media mundial del nivel del mar* (ver figura 3.1).

Cuadro RRP-1 Cambios en la atmósfera, clima y sistema biológico terrestre durante el siglo XX. ^a (continued)	
Indicadores	Cambios observados
<i>Indicadores físicos y biológicos</i>	
<u>Media mundial del nivel del mar</u>	Aumento a una velocidad media anual de 1 a 2 mm durante el siglo XX.
Duración de las capas de hielo en ríos y lagos	Disminución de unas 2 semanas en el siglo XX, en las latitudes medias y altas del Hemisferio Norte (<i>muy probable</i>).
Extensión y espesor del hielo marino en el Ártico	Disminución en un 40 por ciento en los últimos decenios desde finales del verano a principios del otoño (probable) y disminución de su extensión en un 10-15 por ciento desde el decenio de 1950, en primavera y verano.
Glaciares no polares	Retiro generalizado durante el siglo XX.
Capa de nieve	Disminución de su extensión en un 10 por ciento desde que se registran observaciones por satélite en los años 1960 (<i>muy probable</i>).
Permafrost	Fusión, calentamiento y degradación en las zonas polares, subpolares y regiones montañosas.
Fenómenos asociados con El Niño	Mayor frecuencia, persistencia e intensidad durante los últimos 20-30 años, en relación con los últimos 100 años.
Época de crecimiento	Aumento de 1 a 4 días por decenio durante los últimos 40 años en el Hemisferio Norte, especialmente en las latitudes altas.
Área de distribución de plantas y animales	Desplazamiento de plantas, insectos, pájaros y peces hacia los polos o hacia altitudes más altas.
Cría, floración y migración	Adelanto de la floración, la llegada de las primeras aves, la época de cría y la aparición de los insectos en el Hemisferio Norte.
Decoloración de arrecifes de coral	Aumento de la frecuencia, especialmente durante los fenómenos asociados con El Niño.
<i>Indicadores Económicos</i>	
Pérdidas económicas relacionadas con fenómenos meteorológicos	Aumento de las pérdidas mundiales, ajustadas a la inflación, en un orden de magnitud durante los últimos 40 años (véase la Figura 2-7 en P2). Una parte de la tendencia ascendente está vinculada a factores socioeconómicos, y otra parte, a factores climáticos.
^a Este cuadro sólo proporciona ejemplos de cambios fundamentales observados, y no es una lista exhaustiva. Incluye cambios atribuidos a los cambios climáticos antropogénicos y cambios que pueden haber sido causados por variaciones naturales o por cambios antropogénicos. Se indican los niveles de confianza cuando el Grupo de Trabajo correspondiente los evalúa de forma explícita. Un cuadro idéntico en el Informe de síntesis del TIE contiene referencias cruzadas a los informes del GTI y del GTII.	

Figura 3.1. Cuadro RRP-1. Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas (www.ipcc.ch).





UNESCO

Este organismo participa en un proyecto internacional: Global Ocean Observing System (GOOS) y su módulo GLOSS (Global Sea Level Observing system) dedicado a desarrollar una red internacional de medidas de nivel del mar para su aplicación en estudios de clima, oceanográficos y de investigación sobre variación del nivel del mar en la costa. El principal componente de GLOSS es el Global Core Network, que es una red compuesta de 290 estaciones de medida de nivel del mar distribuidas por todo el globo y con el propósito de investigar las tendencias a largo plazo de este indicador de cambio climático (figura 3.2). Los resultados de esta red para el litoral español han sido analizados en la Fase I de este proyecto y las conclusiones se han recogido en el documento correspondiente.

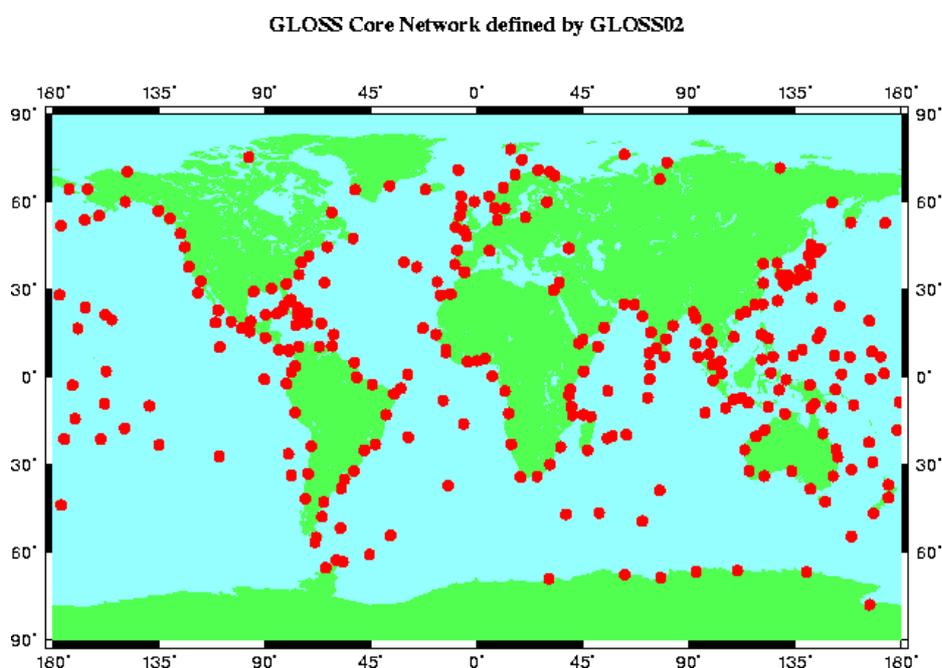


Figura 3.2. Global Core Network: red de medidas de GLOSS
<http://www.pol.ac.uk/psmsl/programmes/gloss.info.html>

UNEP (United Nations Environment Program)

En el libro publicado por este organismo: *Handbook of methods for climate change impacts assessment and adaptation strategies, 1998*, en el capítulo dedicado a las zonas costeras, se menciona que el primer punto importante en un estudio de valoración es la adquisición de datos y/o parámetros que caractericen el área de estudio. Como características fundamentales de las zonas costeras el estudio considera las siguientes:

- Geomorfología de la costa y topografía





- Registros históricos de cambio relativo del nivel del mar
- Tendencias en aporte de sedimentos y en patrones de erosión/acumulación
- Características hidrológicas y meteorológicas
- Características meteorológicas-oceanográficas
- Características del ecosistema

En este libro no se habla de indicadores en sentido estricto, pero de la anterior enumeración se puede deducir los parámetros/indicadores que pueden considerarse.

DEFRA: Department for Environment Food and Rural Affairs (UK)

Este organismo del Reino Unido publicó en 1999 un documento con 34 indicadores de cambio climático (www.nbu.ac.uk/iccuk/). En 2003, se publicó un documento titulado: *Review of UK climate change indicators*, en el cual se hacía una revisión del informe de 1999. De los 34 indicadores considerados aquellos relacionados con cambio climático en la costa son: Índice NAO (North Atlantic Oscillation), elevación del nivel medio y riesgo de inundación por marea en Londres.

OECD: Organisation for Economic Development and Co-operation

Los documentos publicados por esta organización relacionados con indicadores son:

- OECD environmental indicators. Development, measurement and use (2003)
- OECD key environmental indicators (2004)

Estos documentos consideran indicadores ambientales en general e incluidos en éstos, se encuentran los relacionados con cambio climático (ver figura 3.3).

Respecto a los indicadores de cambio climático, la OECD no considera ninguno relacionado con la costa.

Box 5 Structure of the OECD indicators Core Set by environmental issue

	PRESSURE	STATE	RESPONSE
Major issues	Indicators of environmental pressures	Indicators of environmental conditions	Indicators of societal responses
1. <u>Climate change</u>			
2. Ozone layer depletion			
3. Eutrophication			
4. Acidification			
5. Toxic contamination			
6. Urban environmental quality			
7. Biodiversity			
8. Cultural landscapes			
9. Waste			
10. Water resources			
11. Forest resources			
12. Fish resources			
13. Soil degradation (desertification, erosion)			
14. Material resources			
15. Socio-economic, sectoral and general indicators			





Figura 3.3. Indicadores ambientales. OECD (2004)

EPA: Environmental Protection Agency (USA)

En la página web de la EPA, se indica que este organismo tiene el objetivo de investigar sobre el desarrollo de indicadores de ecosistemas para que actúen como centinelas de cambio climático. Los estudios se centraran en indicadores terrestres, acuáticos y costeros, con especial atención en relacionar indicadores del estado de los ecosistemas con la salud humana.

ANZECC: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council

De este organismo se ha encontrado tres documentos relacionados con indicadores:

- Environmental Indicators. For national state of the environment reporting. Estuaries and the sea (1998)
- Core environmental indicators for reporting on the state of the environment (2000)
- Coast and oceans (2001)

Entre todos los indicadores considerados para analizar el estado del medioambiente, en el apartado de estuarios y mar, existe un grupo denominado “Procesos globales” en el que se considera dos indicadores: Nivel del mar y temperatura de la superficie del mar.

CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment

El informe publicado por este organismo se titula: *Climate, Nature, People: Indicators of Canada’s changing climate (2003)*. En este documento se clasifican los indicadores de cambio climático en tres grupos: clima, naturaleza y gente. Dentro de la categoría naturaleza, se considera, entre otros, la elevación del nivel medio del mar. En la figura 3.4 se puede ver los indicadores considerados por Canadá.

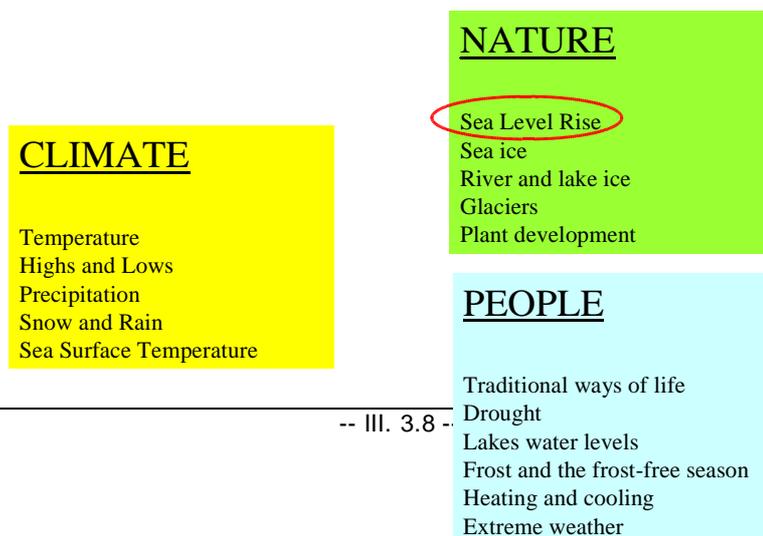




Figura 3.4. Clima, Naturaleza, Población: Indicadores de cambio climático en Canada (2003)

Una vez analizada la bibliografía disponible sobre indicadores de cambio climático se llega a la conclusión de que existe escasa información sobre indicadores específicos de cambio climático en la costa. Se pone claramente de manifiesto que el indicador por excelencia analizado por todos los trabajos revisados es la elevación del nivel del mar. Sin embargo, no se ha encontrado ningún estudio que tenga en cuenta otros parámetros relacionados con procesos fundamentales en la costa como por ejemplo el oleaje y el viento.

Propuesta de indicadores e índices

Es evidente que el repaso a la literatura ha evidenciado que los elementos de la costa afectados son muchos y que tratar de resumir en uno o dos índices o indicadores el impacto sobre el medio físico o sobre el ecosistema en general es sumamente difícil.

Sin embargo, y con el fin de conseguir la concienciación y difusión anteriormente citadas y dirigidas a políticos, gestores y sociedad en general, se recomienda utilizar como indicadores representativos de los posibles efectos del cambio climático los siguientes:

- Retroceso de línea de costa
- Cota de inundación
- Transporte potencial de sedimentos
- Rebase en obras marítimas
- Aumento del peso de las piezas en obras marítimas

El retroceso de la línea de costa es, como se ha visto anteriormente, el más extendido en la literatura. Sin embargo, en nuestro caso, ese retroceso no es el debido única y exclusivamente a la sobreelevación del nivel medio, sino que se han tenido en cuenta otras dinámicas que incluso pueden dar lugar a valores mucho mayores en función de la tipología del elemento considerado.

Asimismo, no es necesario extenderse en demasía en recalcar la importancia de la cota de inundación. Una de las ventajas de este índice es que incluye varias dinámicas. Es especialmente relevante para playas y zonas de costa baja.



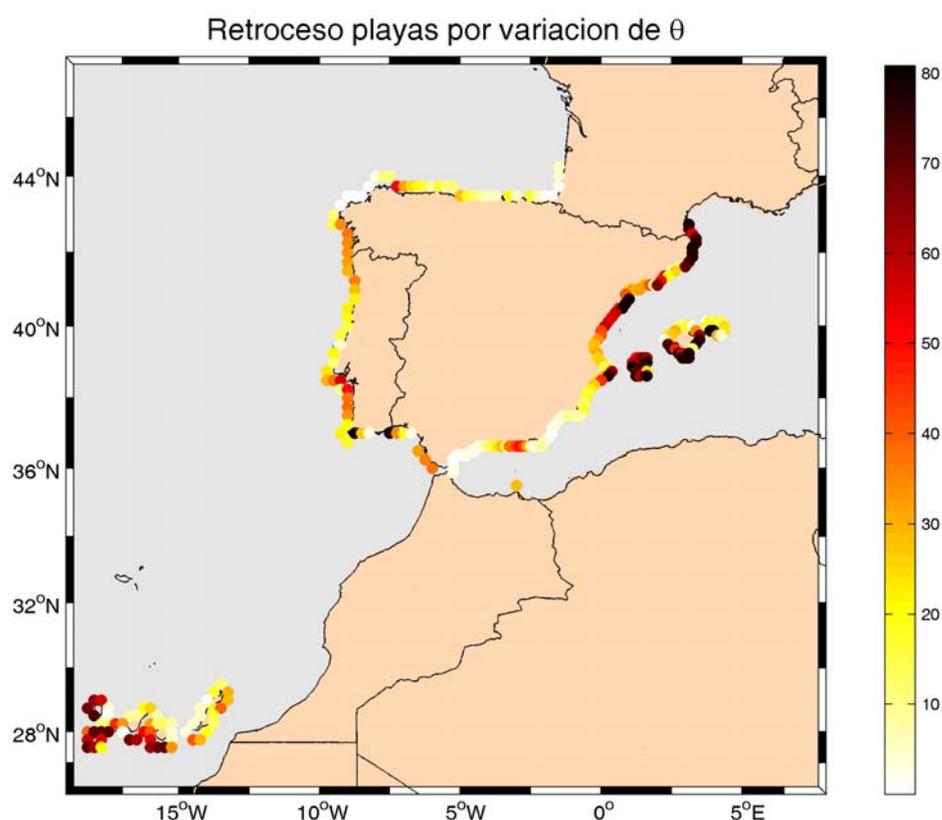


Figura 3.5 Retroceso de las playas por variación de la dirección del flujo medio de energía

El transporte potencial es otro indicador significativo especialmente 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

El rebase de obra marítimas es también muy importante dada la gran cantidad de puertos e infraestructuras localizadas en nuestra costa. Es un índice que muestra la pérdida de funcionalidad de las mismas por efecto del cambio climático; advierte del incremento de peligrosidad de daños a propiedades, personas, etc. por rebase en las mismas y nos da una indicación del coste que podría suponer el recrecimiento de los mismos.

Finalmente, el aumento del peso de las piezas en obras marítimas es también relevante en cuanto da información sobre la potencial pérdida de estabilidad y el coste económico de posibles reparaciones.

Pudiera considerarse otros semejantes derivados del análisis de los efectos teóricos, pero se considera que éstos son los que ofrecen unos resultados más representativos y desvirtúan





en menor medida las consecuencias del potencial efecto del cambio climático sobre la costa española.

Evidentemente, también podrían considerarse como indicadores algunos de los parámetros seleccionados para evaluar la variación de la dinámica costera y presentados en el Anejo 1 de este informe, dado que todos ellos han sido seleccionados teniendo en cuenta que hay una relación directa entre su variación y un efecto sobre la costa.

Obsérvese que los indicadores propuestos hacen referencia única y exclusivamente a cambios físicos en la costa aunque algunos de ellos podrían asociarse de manera indirecta con efectos ecológicos. Sin embargo, esta última parte no es objeto de este estudio.

Por otro lado, es evidente que los índices e indicadores planteados en este trabajo y cuyos mapas se han recogido en los Anejos 1 y 2, (ver ejemplo en figura 3.5), se han aplicado con una resolución relativamente baja dado que lo que se ha pretendido es dar una visión general del estado de nuestra costa. Por ello, parece necesario proponer un índice capaz de integrar una mayor cantidad de información y plantear una estrategia encaminada a la obtención de mapas de vulnerabilidad, riesgo, etc. con una mayor resolución basados en este nuevo índice.

El Índice de Vulnerabilidad Costera

Por todo lo visto anteriormente, parece necesario considerar algún índice adicional que agregue la mayor cantidad posible de información, pero siempre limitando la complejidad de su obtención, especialmente porque la longitud de nuestra costa es muy importante.

Por tanto, con el fin de integrar en la medida de lo posible la variación de los agentes inducida por el cambio climático con la respuesta de las diferentes unidades geomorfológicas presentes en la costa, se propone un índice llamado *índice de vulnerabilidad costera*. Este índice que será descrito a continuación presenta la gran ventaja de ser relativamente simple de obtener y puede dar resultados bastante fiables de los efectos del cambio climático en la costa. Esto es lo que se desprende de los resultados obtenidos por el US Geological Service en su aplicación a la costa Estadounidense.

Sin embargo, es necesario volver a hacer énfasis en que este índice es una aproximación y que, por tanto, no considera todos y cada uno de los elementos que deberían ser considerados. Además, no tiene en cuenta los efectos ecológicos.

El índice de vulnerabilidad costera (*coastal vulnerability index, CVI*) es el índice utilizado por el US Geological Service para la elaboración de una base de datos preliminar en la que se pretende valorar de manera aproximada los efectos de la sobrelevación del nivel medio





del mar sobre la costa atlántica, pacífica y el golfo de México (Hammer-Klose, E.S. and Thieler, E. 2001).

Este índice pretende clasificar de forma relativamente simple la vulnerabilidad relativa de la costa frente al ascenso del nivel del mar mediante una aproximación que combina la susceptibilidad del sistema costero a sufrir cambios con su capacidad natural de adaptarse a los cambios en las condiciones ambientales. De acuerdo con sus autores, la clasificación del nivel de vulnerabilidad puede obtenerse mediante la contribución relativa y la interacción de las siguientes seis variables:

- Rango de marea
- Altura de ola
- Pendiente de la costa
- Tasa de erosión o acreción
- Tasa de variación del nivel medio del mar
- Geomorfología

Los autores proponen utilizar el valor medio del rango de marea (m). Esta variable es importante pues condiciona la inundación de la costa. Aunque no queda explícito en su explicación parece derivarse que dicha variable contiene información de la marea meteorológica puesto que la información se ha obtenido de los mareógrafos situados en la costa. La altura de ola propuesta es la altura de ola media en (m). La inclusión de la altura de ola se considera importante por estar vinculada al transporte potencial de sedimentos y por contribuir a la inundación de la costa. La pendiente de la costa se expresa en % y está ligada a la susceptibilidad de la costa de ser inundada y a la velocidad del proceso de retroceso de la costa. En principio, se considera que costas más tendidas retrocederán más rápidamente que la más rígida. Para la obtención de esta variable utilizaron mallas topográficas y batimétricas extendidas 50 km hacia el interior y 50 km hacia mar abierto desde la línea de costa, es decir desde la planicie y sierra costera emergidas hasta la plataforma continental. La resolución empleada fue de 1 m en la vertical y 5 km en horizontal.

Las tasas de erosión/acumulación se expresa en m/año y, como es evidente, indica como se ha erosionado o ha acumulado el sedimento en un tramo de la costa. La tasa de variación del nivel medio del mar se introduce en mm/año. En su caso ha sido obtenida a partir de los registros históricos provenientes de sus estaciones de medida. Esta variable incluye, por tanto, la variación eustática global así como el movimiento local derivado de la tectónica y la isostasia. En cualquier caso las tendencias utilizadas son las obtenidas a partir de los análisis de los últimos 50 a 100 años. Finalmente, la geomorfología intenta introducir el potencial erosivo de las morfologías consideradas.





Con el fin de obtener un índice es asimismo necesario establecer una ponderación de las seis variables consideradas que exprese la vulnerabilidad de la costa debido a la sobre elevación del nivel del mar. La escala considera valores de vulnerabilidad de 1-5, con mayor vulnerabilidad a medida que crece el valor asignado. Las variables consideradas cuentan con información cuantitativa y cualitativa. A las variables numéricas se les asigna el riesgo con base en los rangos de valores observados, mientras que a la variable “geomorfología” se le asigna el valor de acuerdo con el potencial erosivo de las morfologías consideradas. La asignación de los riesgos y los rangos de las variables considerados, dependen de la zona y de quién elabora la tabla.

Ranking del índice de vulnerabilidad costera					
	muy bajo	bajo	moderado	alto	muy alto
Variable	1	2	3	4	5
Geomorfología	Costas rocosas Acantilados duros	Acantilados intermedios, costas recortadas	Acantilados bajos, llanuras aluviales	Playas de gravas, estuarios, lagunas costeras	Playas de arena, marismas, deltas, islas barrera, humedales
Pendiente de la costa (%)	>0.115	0.115-0.055	0.055-0.035	0.035-0.022	<0.022
Tasa de variación de nivel medio del mar (mm/año)	<1.8	1.8-2.5	2.5-3.0	3.0-3.4	>3.4
Erosión de la costa (m/año)	>2 acumulación	1.0-2.0 acumulación	-1.0-+1.0 estable	-1.1-2.0 erosión	<-2.0 erosión
Rango de marea medio (m)	>6	4.1-6.0	2.0-4.0	1.0-1.9	<1.0
Altura de ola media (m)	<0.55	0.55-0.85	0.85-1.05	1.05-1.25	>1.25

La tabla adjunta es la elaborada por el USGS para la costa atlántica de los Estados Unidos.

Una vez que se ha hecho la asignación de riesgo en función del rango para cada una de las variables, se puede integrar las seis variables en una única. Para ello, se obtiene un valor numérico como la raíz cuadrada de la media geométrica de las variables, es decir

$$CVI = \sqrt{(a * b * c * d * e * f) / 6}$$

donde a, b, c, d, e y f, representan los valores de riesgo asociados a las variables geomorfología, pendiente de la costa, tasa de variación del nivel del mar, tasa de erosión/acumulación de la costa, rango de marea medio y altura de ola media.





Obsérvese que los rangos de las variables consideradas y el riesgo asignado en la tabla son solo válidos para la costa atlántica y que, por tanto, y dado que la costa pacífica tiene otros rangos y asignaciones, el índice de vulnerabilidad costera absoluto no es comparable de costa a costa.

En el caso de los Estados Unidos, se elaboraron mapas temáticos de cada una de las variables y posteriormente un mapa del índice de vulnerabilidad costera.

Es necesario recordar que el CVI no tiene sentido físico pero ofrece información sobre el cambio potencial que se producirá en la costa por efecto de la variación del nivel del mar. Por tanto, los mapas resultantes pueden ser considerados como una base para desarrollar una base de datos que integre un mayor número de agentes susceptibles de variar por efecto del cambio climático o de elementos afectados o, por otro lado, servir como ejemplo didáctico del potencial existente para determinar los efectos del cambio climático sobre la costa con base en criterios objetivos.

Obsérvese que este índice, aunque introduce el oleaje, la marea o las tasas de erosión/acumulación, sólo considera la tasa actual de variación del nivel medio del mar como base para evaluar el efecto sobre la costa obviando, por ejemplo, la introducción directa de las tasas de variación de la altura de ola o de la dirección del flujo medio de energía. Más aún, la tasa de variación de nivel del mar considerada se basa en el valor actual y no tiene en cuenta las tendencias. Es decir, se establece una “foto cero” de la costa considerando un número limitado de parámetros.

Por tanto, la utilización de este índice convenientemente transformado para añadir o corregir algunas de sus variables gracias a análisis realizados en este proyecto, conjuntamente con la introducción de las tendencias calculadas, serviría para tener un índice integrado cuya evolución en el tiempo podría ser evaluada.

Es evidente que si se deseara realizar un trabajo equivalente para la costa española, la información aportada en este trabajo relativa a marea meteorológica y oleaje serviría para hacer una mejor estimación de dicho índice así como para evaluar la variación del índice de vulnerabilidad de la costa, por ejemplo en horizontes de 10, 20, 30, 40 y 50 años en el caso de que la estrategia contemplada fuese “no hacer nada”.

Es obvio que sería necesario hacer una serie de hipótesis adicionales sobre alguno de las variables consideradas, p.e., no variación de la pendiente de la costa, estudio de la variación de las tasas de erosión/acumulación, etc., pero en cualquier caso, se podría obtener un índice aproximado e integrado con los mismos objetivos anteriormente descritos.





Finalmente es necesario hacer constar que aunque entre las estrategias se considerase deseable la obtención de un mapa del índice de vulnerabilidad en la costa española, la recopilación de información de tasas de erosión/acumulación, la información topobatemétrica de precisión para la obtención de la pendiente o la determinación de la geomorfología de la costa con una resolución razonable requeriría un trabajo ingente para nuestros 8000 *km* de costa. Como ya se ha dicho el valor añadido sobre los gráficos anteriormente planteados es limitado para la puesta en marcha de estrategias o políticas frente a los efectos del cambio climático en la costas siempre y cuando no se alcance la resolución suficiente. Por ello, en el establecimiento de estrategias se propondrá la metodología que se considera más adecuada para la obtención de este tipo de mapas.

3.3. Premisas para la propuesta de estrategias y políticas de actuación

En los documentos anteriores se ha llevado a cabo un detallado análisis de las variables físicas que se han considerado más importantes a la hora de determinar el posible efecto del cambio climático sobre la costa. Asimismo, se han seleccionado aquellas variables secundarias con incidencia directa sobre la morfodinámica y varios de los usos e infraestructuras costeras que pueden verse afectados por las tendencias observadas en las variables representativas de los agentes considerados. Una vez finalizado el análisis, se puede llegar a las siguientes consideraciones que van a sustentar las estrategias y políticas posteriormente propuestas:

- Hasta el momento, en todos los estudios anteriores que han analizado el efecto del cambio climático sobre la costa se ha utilizado, salvo contadas excepciones, como único indicador el retroceso de la costa por efecto de la sobreelevación del nivel medio del mar.
- Todos los estudios ponen de manifiesto la importancia que el oleaje y especialmente la variabilidad que la frecuencia e intensidades de los temporales pueden tener sobre la costa, pero ignoran su efecto debido a la falta de datos y metodologías para la cuantificación de dicho efecto.
- Las estrategias y políticas de actuación propuestas hasta el momento se basan única y exclusivamente en la búsqueda de soluciones frente a la sobreelevación del nivel medio del mar.
- Este estudio ha considerado la sobreelevación del nivel medio del mar como agente fundamental, pero también ha incluido otros agentes tales como la marea meteorológica, las aportaciones del caudal de sedimento y muy especialmente el oleaje. Se han sentado las bases teóricas y se ha desarrollado la metodología necesaria para cuantificar la variación del oleaje o marea meteorológica a partir del retroanálisis de 44 años de datos.





- Los resultados obtenidos han puesto claramente de manifiesto que el efecto del oleaje debe ser también tenido en cuenta a la hora de establecer políticas y estrategias de actuación frente al cambio climático no sólo debido a la variación en la altura de ola, sino también por el cambio producido en la dirección del flujo medio de energía. Algunas variaciones de este parámetro pueden dar lugar a retrocesos en algunas playas mucho más importantes en magnitud que los debidos al ascenso del nivel del mar.
- El análisis de los resultados muestra claramente que el efecto del cambio climático está presente en mayor o menor medida en todo el litoral español y que su efecto depende fundamentalmente de dos elementos: 1) la tendencia de los agentes considerados y 2) la vulnerabilidad del tramo de costa considerado.
- Los valores de las tendencias obtenidos y sus efectos sobre los diferentes elementos costeros considerados han puesto de manifiesto que no es posible proponer estrategias o políticas de actuación por tramos homogéneos del litoral como inicialmente se había propuesto. Esto implica que: 1) las políticas o estrategias propuestas y encaminadas a la evaluación de los efectos del cambio climático en la costa deben ser de aplicación en todo el litoral español y, por tanto, planteadas globalmente y 2) la políticas de actuaciones e inversiones para la mitigación de los posibles efectos del cambio climático, deben ser priorizadas mediante la realización de estudios de detalle que consideren la vulnerabilidad de las zonas estudiadas. El documento de la Fase II c muestra una metodología para la realización de este tipo de estudios y su aplicación a varios casos reales.
- Mientras que las evidencias científicas que muestran que existe una tendencia a la sobre elevación del nivel medio del mar parecen convincentes, las estimaciones futuras del valor que va a tener esa sobre elevación es a priori insuficiente si se desean utilizar con el objetivo de fijar estrategias de actuación y planificación. El rango de valores estimados es muy grande, en parte debido a las incertidumbres asociadas a nuestro conocimiento científico actual y en parte debido a las diferentes estimaciones existentes en cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero se refiere. Sería ideal que cualquier tipo de estrategia o planeamiento pudiera basarse en una proyección de la variación del nivel medio del mar que tuviera asociada una cierta probabilidad de ocurrencia. Evidentemente, es muy difícil fijar cualquier tipo de estrategia si todo el rango de variabilidad considerado es igualmente probable. En cualquier caso, esto no es así dado que el rango de variabilidad obtenido se ha calculado como suma de componentes con diferentes rangos de incertidumbre. Más aún, las previsiones indicadas por el IPCC se basan en simulaciones realizadas con diferentes argumentos que han sido contruidos asumiendo diferentes condiciones económicas y sociales en el mundo. Estos argumentos fueron determinados indicando de forma explícita que no es posible cuantificar la probabilidad de ocurrencia asociada a cada uno de ellos. Desde el punto de vista estratégico y





cara a la planificación y diseño de actuaciones, esto es un verdadero problema dado que las estimaciones para finales del siglo XXI difieren considerablemente.

- Por otro lado, a partir del retroanálisis de datos realizado en el marco de este trabajo se ha podido estimar las tendencias de varios de los parámetros que se han considerado fundamentales para evaluar las acciones sobre la costa. Con el fin de sustentar de la manera más rigurosa posible la extrapolación de dichas tendencias a situaciones futuras, se han desarrollado modelos de tendencias así como la metodología necesaria para dotar a estas tendencias de unas bandas de confianza que puedan ser de aplicación en el marco de las aplicaciones planteadas en las estrategias que se recogen en la siguiente sección. Para la estimación de valores y su probabilidad asociada de las variables analizadas en este estudio, se considera que no se debe utilizar un horizonte mayor que el año 2050. Extrapolaciones por encima de dicho valor darían lugar a pérdidas de fiabilidad importantes. Con esta hipótesis de trabajo, debidamente sustentada mediante el estudio de fiabilidad de la extrapolación de las tendencias, se ha salvado la problemática anteriormente planteada, al menos, en cuanto al oleaje y marea meteorológica se refiere.
- Las extrapolaciones realizadas hasta el 2050 de las variables de oleaje o marea meteorológica a partir de las tendencias encontradas en el retroanálisis no han tenido en cuenta el cambio las posibles variaciones en las emisiones de gases de efecto invernadero pues se basan en las tendencias obtenidas en un retroanálisis que finaliza en nuestros días. Sin embargo, es sabido que estos cambios no parece que vayan a ser de gran importancia en las variaciones del nivel medio del mar antes del año 2050, debido a la gran inercia térmica de los océanos y de otras componentes del sistema climático. Más aún, un horizonte de 50 años parece adecuado para la puesta en marcha de políticas, estrategias y actuaciones posibles frente al efecto del cambio climático dado que coincide con la vida útil de muchas actuaciones en la costa. Además, 50 años está por debajo de la esperanza de vida media lo que ayudará considerablemente a mejorar la conciencia social frente al efecto del cambio climático.





FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

CAPÍTULO 4. ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS DE ACTUACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO





4. ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS DE ACTUACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Uno de los objetivos finales de este trabajo es el planteamiento de estrategias y políticas de actuación que puedan hacer frente a los posibles efectos del cambio climático. Indudablemente, el estudio realizado ha puesto de manifiesto que el cambio climático tiene y puede tener una incidencia muy importante sobre nuestro litoral en un futuro relativamente cercano y, por tanto, es necesario definir estrategias y políticas que hagan frente al mismo. Como ya se ha dicho anteriormente, dos son los factores que hay que tener en cuenta. Por un lado se debe considerar la variación de los agentes, principalmente dinámicas marinas, que se ven afectadas por el cambio climático. Por otro lado, se debe tener en cuenta las características propias, naturales, sociales y económicas, que pueden verse afectadas por el cambio de dichas dinámicas. La conjunción de ambas nos lleva al concepto de vulnerabilidad de la costa.

Además de la necesidad de actuación frente a los potenciales efectos del cambio climático, el estudio ha puesto claramente de manifiesto una serie de elementos que será necesario considerar a la hora de marcar las líneas estratégicas para el futuro. La primera de ellas es la existencia de importantes incertidumbres en el origen de la determinación de las variaciones de los agentes que inducen el cambio climático. Más aún, el grado de incertidumbre no es el mismo para cada uno de los agentes considerados. Estos niveles de incertidumbre se basan en nuestra falta de conocimiento científico, la falta de observaciones que sustenten las hipótesis de trabajo, el rango de variabilidad de los escenarios futuros, etc. Esta incertidumbre en la definición de los agentes lleva asociada un problema fundamental y es cómo trasladar de la manera más rigurosa posible dicha información al proceso de toma de decisiones, planeamiento, proyecto de actuaciones, etc.

La segunda parte corresponde más bien a las problemáticas derivadas de nuestro conocimiento del otro elemento fundamental en el proceso, es decir, la costa afectada y sus características. El estudio muestra que los efectos en los agentes son notorios en toda la costa española. Aunque la variación del nivel medio puede considerarse más globalmente, la variación de altura de ola, de la dirección del flujo medio de energía o del aporte de sedimento, muestra cambios sensibles en zonas muy cercanas por lo que es evidente que las acciones del cambio climático deben analizarse en la escala local. Esta consideración es todavía más relevante si se tiene en cuenta la heterogeneidad de nuestra costa desde el punto de vista geomorfológico, ecológico, social y económico. Por tanto, estudios encaminados a la determinación de la vulnerabilidad de nuestra costa frente a los efectos del cambio climático precisa un detallado (alta resolución) conocimiento de las características de la costa, sus condiciones naturales, demografía, usos, infraestructura, patrimonio, etc. Sin esta información, la toma de decisiones se verá limitada.





Otra consideración importante que se desprende del estudio es que es bastante previsible que la vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático se verá sensiblemente incrementada en aquellos tramos del litoral que se encuentren a día de hoy con problemas de desestabilización, erosión, ocupación indebida, etc. Por tanto, se deberían plantear líneas estratégicas que de forma indirecta contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático.

Finalmente, y de lo anterior se puede desprender también que todos los niveles del ámbito de toma de decisiones, administración local, autonómica y estatal, van a verse afectados en mayor o menor medida por los efectos del cambio climático. Asimismo, este problema va a afectar a toda la sociedad, tanto la que vive en la costa como la que lo hace en el interior, muy especialmente por sus posibles consecuencias sobre nuestro patrimonio natural y sobre el sistema socioeconómico. En consecuencia, es necesario establecer políticas de concienciación social así como otras orientadas a la introducción de recomendaciones o normativa que introduzca la consideración del cambio climático dentro de la planificación territorial de la costa.

Por tanto, a la luz de los resultados obtenidos en el análisis de los efectos del cambio climático sobre la costa española, y de las consideraciones anteriormente formuladas se plantean las siguientes estrategias y políticas de actuación:

- Estrategias destinadas a la reducción de incertidumbres asociadas a los posibles forzamientos inducidos por efecto del cambio climático y a la falta de conocimiento y metodologías para su análisis.
- Estrategias encaminadas a la evaluación cualitativa y cuantitativa de la vulnerabilidad de las zonas costeras.
- Estrategias encaminadas a la concienciación social de la problemática inducida en la costa por efecto del cambio climático.
- Estrategias encaminadas a la mitigación de los efectos del cambio climático mediante estrategias de actuación indirectas.
- Políticas encaminadas a la aplicación de estrategias de retroceso.
- Políticas encaminadas a la aplicación de estrategias de adaptación.
- Políticas encaminadas a la aplicación de estrategias de protección.





A continuación pasamos a describir cada una de ellas más detalladamente, proponiendo algunas acciones concretas.

Estrategias destinadas a la reducción de incertidumbres asociadas a los posibles forzamientos inducidos por efecto del cambio climático y a la falta de conocimiento y metodologías para su análisis

Son estrategias cuyo objetivo fundamental es mejorar nuestro conocimiento sobre el cambio climático, su temporalidad y magnitud, así como su incidencia sobre los diferentes elementos que componen la costa.

En cuanto a las incertidumbres existentes asociadas a la determinación de los agentes o forzamientos y de la vulnerabilidad de la costa es necesario aumentar la distribución espacial y la sistematización de las observaciones meteorológicas y oceanográficas. Esto solo es posible impulsando o apoyando el establecimiento de sistemas de observación y control.

Asimismo, es necesario favorecer los estudios de retroanálisis numérico de las variables fundamentales; incidir en la inclusión específica de estudios sobre cambio climático en la zona costera en los programas nacionales e internacionales de investigación en el ámbito de cambio climático o de temática marina; favorecer la participación de representantes españoles en los programas de investigación, foros de investigación y toma de decisiones relacionados con el cambio climático; favorecer el desarrollo de herramientas y metodologías de aplicación de técnicas teledetección, LIDAR, etc. para la detección de la respuesta geomorfológica/ecológica de la zona costera así como para la evaluación de riesgos y vulnerabilidad de la misma y favorecer el desarrollo de índices e indicadores que sirvan para establecer la vulnerabilidad de los ecosistemas costeros frente a la incidencia del cambio climático.

- Aumentar la distribución espacial y sistematización de observaciones meteorológicas y oceanográficas.
- Favorecer los estudios de retroanálisis numérico de variables relevantes.
- Favorecer la investigación en cambio climático.
- Favorecer la participación en foros internacionales de toma de decisiones.
- Favorecer el desarrollo de herramientas y metodologías para la evaluación de efectos y vulnerabilidad.





Estrategias encaminadas a la evaluación equitativa cualitativa y cuantitativa de la vulnerabilidad de las zonas costeras

Dada la longitud de la costa española, a priori, la realización de estudios de vulnerabilidad detallados y con la alta resolución requerida que cubran toda la costa parece inviable tanto desde el punto de material como económico. Un análisis detallada debería considerar el efecto del cambio climático sobre el medio natural, la agricultura, la producción energética y su uso, los recursos naturales, el sistema de transporte, cualquier tipo de infraestructuras, el sistema socioeconómico, etc. Es decir, en principio parece inviable poder cubrir todo nuestro litoral. Sin embargo, y como ya se ha dicho anteriormente, la determinación de la vulnerabilidad de la costa, la evaluación de potenciales pérdidas económicas o ambientales por efecto del cambio climático y una valoración aproximada de los costes derivados de las actuaciones destinadas a mitigar su efectos, podría resultar interesante para generar la concienciación social necesaria que justifique las políticas y estrategias propuestas. En el caso de considerarse pertinente, se sugiere realizar estudios detallados de vulnerabilidad en tramos específicos del litoral Cantábrico, Mediterráneo y Archipiélagos y extrapolar los resultados al resto del litoral español. La selección de la zona considerada en cada caso debe hacerse cuidando que sea representativa de la costa considerada. Este tipo de estudio piloto serviría para determinar en toda España de forma aproximada, por ejemplo, la superficie de pérdida de territorio por inundación; las zonas del litoral que precisan protección y la evaluación de su coste; el impacto económico general del efecto del cambio climático; la pérdida de hábitat protegidos; la pérdida de zonas de anidamiento de aves; etc. En el caso de llevar a cabo este tipo de iniciativa, es necesario fijar de manera muy estricta las prescripciones técnicas y metodologías para la elaboración de los mismos. Especial cuidado debe ponerse en la selección de las zonas piloto y en la interpolación de los resultados a toda nuestra costa.

- Realización de mapas basados en el índice de vulnerabilidad modificado en zonas piloto del litoral español. (Plan Director de Costas).
- Realizar una revisión del DPMT trazando un nuevos deslindes considerando el potencial efecto del cambio climático.
- Establecer en zonas de riesgo los criterios de evaluación técnica de las actuaciones considerando los posibles efectos del cambio climático (Estudios de detalle).
- Promover la creación de una gran base de datos centralizada e integrada en un SIG para gestión de la costa.





Con esta filosofía se propone la realización de un mapa preliminar de alta resolución de zonas piloto del litoral vulnerables al cambio climático y establecer en función de dicho mapa zonas con diferentes niveles de riesgo, por ejemplo utilizando el índice de vulnerabilidad anteriormente descrito. Se propone realizar este trabajo en el marco del nuevo Plan Director de Costas.

Sobre dichos mapas establecer una revisión del Dominio Público Marítimo Terrestre correspondiente mediante un trazado de un nuevo deslinde que incluya el efecto potencial del cambio climático bajo diferentes escenarios. Evaluar en dichas zonas usos, recursos e infraestructuras y plantear políticas de retroceso, adaptación y protección valorando el coste económico de las mismas y evaluando su repercusión ambiental.

Asimismo, en función de la vulnerabilidad establecida en cada zona, reglamentar la evaluación técnica de cualquier actuación en la costa para un horizonte al menos igual a la vida útil de la actuación. Esto incluye: regeneración de playas, paseos marítimos, instalaciones portuarias, infraestructuras próximas a la costa, etc.

El Ministerio de Medio Ambiente dentro de sus planes directores debería promover una acción horizontal destinada a recoger toda la información sobre la zona costera susceptible de ser integrada dentro de una gran base de datos homogeneizada y con un control de calidad y mantenimiento permanentes. La información debería proceder del Ministerio, Comunidades Autónomas, autoridades locales, Universidades y centros de investigación para su integración dentro de un SIG destinado finalmente a cualquier tipo de actuación en el ámbito de la Gestión Integrada de Zonas Costeras. Este objetivo, que en principio pudiera resultar muy ambicioso, se considera fundamental y podría implementarse a través de un proceso escalonado pero continuado de recogida e integración de información.

Estrategias encaminadas a la concienciación social de la problemática inducida en la costa por efecto del cambio climático

Incrementar la conciencia de los gestores de la administración central, administraciones autonómicas y locales y sociedad en general sobre la problemática del cambio climático, programando un conjunto de actividades de difusión que recojan la información relativa a los posibles escenarios, temporalidad e incidencia sobre la costa. Estas actividades de difusión deben alcanzar a gestores diversos dado que tanto los aspectos medioambientales, económicos, sociales, infraestructuras, agricultura, etc. se verán implicados en las potenciales consecuencias del cambio climático. Este programa debería integrarse también con iniciativas existentes en el campo de la educación ambiental.





- Impulsar programas de concienciación de gestores y técnicos en los diferentes ámbitos de las administraciones públicas.
- Fomentar la puesta en marcha de programas de Educación Ambiental con contenidos sobre los potenciales efectos del cambio climático en la costa.

Estrategias encaminadas a la mitigación de los efectos del cambio climático mediante estrategias de actuación indirectas

Los riesgos y consecuencias sobre la costa derivados del cambio climático tienen implicaciones muy similares a los impactos producidos por la acción del hombre sobre el ecosistema costero que son ya cuantificables a través de los problemas de erosión, pérdida de habitat costeros, alteración de los ecosistemas, etc.

La Gestión Integrada de Zonas Costeras (GICZ) sigue evolucionando y tiene ya algunas capacidades conducentes a buscar soluciones apropiadas basadas en una adecuada gestión y planificación frente al impacto directo al que el hombre somete a la zona costera. Muchas de estas soluciones son también aplicables a los problemas derivados de los efectos potenciales del cambio climático. La GICZ supone un marco conceptual en el que se puede: realizar una evaluación integrada del problema, marcar objetivos estratégicos, planificar y gestionar el sistema costero y sus recursos, teniendo en cuenta las perspectivas culturales, socioeconómicas, históricas así como los diferentes conflictos de intereses y usos.

- Evitar o minimizar cualquier tipo de actuación conducente a la desestabilización de la línea de la costa.
- Favorecer actuaciones conducentes a la estabilización de playas, y dunas; rehabilitación del transporte de sedimentos en zonas de erosión, etc.
- Favorecer la estricta aplicación de la Ley de Costas y su reglamento como herramienta fundamental para proteger la misma.

Quiere esto decir, que los posibles efectos del cambio climático deben introducirse como un elemento más que no puede ser obviado en la Gestión Integrada de las Zonas Costeras y que, por tanto, su incidencia debe considerarse dentro de cualquier proyecto de esta naturaleza.

Consecuentemente, es necesario minimizar el conjunto de actuaciones que conlleven consecuencias sobre la costa que tiendan a incrementar por sinergia los posibles efectos del cambio climático.





Entre otras, se considera necesario actuar sobre los factores antrópicos que contribuyen a la desestabilización actual de la zona costera. Eso puede llevarse a cabo mediante actuaciones tendentes a:

- La estabilización de playas y dunas.
- La limitación de transporte de sedimentos conducentes a problemas de erosión.
- La rehabilitación del transporte de sedimentos en zonas cuya limitación haya conducido a problemas de erosión.
- El aporte artificial de sedimentos para la estabilización.

Asimismo, es necesario implementar medidas tendentes a la protección del litoral mediante la introducción de una planificación y normativa conducente al mantenimiento y recuperación del mismo.

Finalmente, se hace constar que la estricta aplicación de la ley de costas en zonas no urbanas garantizaría permitir la aplicación de políticas de retroceso en el largo plazo o reducir los problemas derivados de la acción antrópica sobre la costa.

Políticas encaminadas a la aplicación de estrategias de retroceso

Las políticas de aplicación de retroceso son aquellas dirigidas principalmente al abandono de áreas altamente vulnerables y a la reubicación de las infraestructuras, cultivos, actividad industrial y población directamente afectada.

Un ejemplo de este tipo de política sería la conducente a facilitar la migración hacia el interior de zonas de marisma y humedales.

Para zonas altamente vulnerables donde el retroceso sea posible en la situación actual, es necesario establecer la planificación necesaria para evitar futuros desarrollos. Este podría llevarse a cabo mediante una estricta aplicación de la Ley de Costas y muy especialmente si los deslindes son revisados en zonas altamente vulnerables para tener en cuenta los posibles efectos del cambio climático.

Para zonas parcialmente ocupadas pero potencialmente recuperables en el medio plazo, se propone anticipar la planificación territorial necesaria para evitar la instalación de nuevas infraestructuras o el aumento de las superficie urbanizadas. Para ello sería necesario revisar los planes urbanísticos y de ordenación del territorio o proponer que en las revisiones de los mismos se tengan en cuenta los estudios de vulnerabilidad o recomendaciones del Ministerio de Medio Ambiente a este respecto.





- Facilitar la migración hacia el interior de zonas de marismas y humedales favoreciendo las estrategias de retroceso.
- En zonas altamente vulnerables evitar futuros desarrollos en zonas de retroceso. Revisión de deslindes y aplicación de la Ley de Costas.
- En zonas parcialmente recuperables introducir la planificación territorial necesaria introduciendo estudios de vulnerabilidad frente al efecto del cambio climático.
- En nuevas ocupaciones realizar concesión de permisos condicionados; concesiones limitadas; acuerdos de reubicación y/o demolición.
- Retirada paulatina de subvenciones a cultivos en zonas bajas del litoral que puedan ser ocupados para estrategias de retroceso
- Establecimiento de estrategias de expropiación/indemnización
- Incentivos fiscales para la compra de terrenos con fines conservacionistas.

En el caso de nuevas ocupaciones se propone la concesión de permisos condicionados; concesiones administrativas que condicionen su duración a horizontes limitados por el posible efecto del cambio climático e incluyendo acuerdos de reubicación y/o demolición.

Asimismo, se puede proponer la retirada de subsidios gubernamentales para aquellas actividades que se desee abandonen dichas áreas. Un ejemplo, pudiera ser retirar paulatinamente las subvenciones a los cultivos que actualmente existen en zonas bajas del litoral, como el delta del Ebro o de algunas zonas de pastizal en los estuarios y marismas, para posibilitar que dichos terrenos fuesen ocupados por el mar.

Evidentemente uno de los problemas que surge en este tipo de estrategia es la transformación de terrenos privados en públicos. Como consecuencia de ello, sería necesario establecer las políticas necesarias de expropiación y sus indemnizaciones correspondientes.

Otra posibilidad es, como sucede en otros países, incentivar fiscalmente desde el gobierno la compra por parte entes privados o fundaciones conservacionistas de terrenos potencialmente afectados.

Políticas encaminadas a la aplicación de estrategias de adaptación

Estas políticas se fundamentan en la conservación del ecosistema costero en consonancia con una ocupación y uso racional de áreas vulnerables al efecto del cambio climático con base en una gestión de adaptación progresiva.





Probablemente, de entre las tres políticas posibles ésta es la que está más en consonancia con la filosofía general que rige lo que conocemos como Gestión Integrada de las Zonas Costeras, dado que se persigue la búsqueda de un equilibrio principalmente entre el subsistemas natural y los de usos e infraestructuras.

Para su implementación se propone potenciar la Gestión Integrada de las Zonas Costeras; un planeamiento y ordenación anticipada de la zona costera que conduzca a la atenuación de impactos en la costa; la modificación de los usos del territorio; adaptar las normas de edificación, construcción de infraestructuras y planificación urbana; la protección de los ecosistemas en peligro; la regulación estricta de zonas altamente vulnerables y finalmente, iniciar una estrategia para el análisis de posibles iniciativas para asegurar las zonas de riesgo.

Otro aspecto importante en la estrategia de adaptación es la introducción en el diseño y en la re-evaluación de la fiabilidad y funcionalidad de las infraestructuras portuarias y de la operatividad de las mismas los posibles efectos del cambio climático. Este objetivo puede conseguirse si se introduce en las Recomendaciones de Obras Marítimas de Puertos del Estado (ROM 0.0., ROM 0.3., etc.) la recomendación de considerar las tendencias en las acciones (oleaje, dirección, marea meteorológica, viento) obtenidas en este estudio en el diseño funcional y estabilidad de las infraestructuras portuarias. Para ello, se deberá fijar una metodología compatible con la metodología de cálculo establecida actualmente en la ROM.

- Favorecer la implementación de una Gestión Integral de la Zona Costera en la que se incluya los potenciales efectos del cambio climático como un elemento más a considerar.
- Favorecer un planeamiento y ordenación del territorio anticipándose al cambio climático; modificación de usos; adaptación de normas de edificación en zonas vulnerables; protección de ecosistemas en peligro, etc.
- Introducir en el diseño de nuevas infraestructuras costeras el efecto del cambio climático en la vida útil de la obra.
- Re-evaluar las infraestructuras en zonas de alta vulnerabilidad.
- Fomentar la introducción del efecto del cambio climático en las Recomendaciones de Obras Marítimas y en otras recomendaciones y normas aplicables a infraestructuras en zonas altamente vulnerables.

En algunos proyectos nuevos, será necesario tener en cuenta que probablemente realizar el proyecto constructivo teniendo en cuenta el potencial efecto del cambio climático a priori, podría ser más barato que realizar los posibles recrecimientos necesarios una vez que el efecto del cambio climático sea efectivo.





Asimismo, sería importante considerar la re-evaluación de obras de protección de la costa como espigones y muy especialmente diques exentos. El efecto del cambio climático incidirá esencialmente sobre el rebase y la difracción inducida por los mismos y, por tanto, conducirá a variaciones importantes de la línea de costa protegida, posiblemente no compatibles con los objetivos establecidas en el diseño inicial.

En cualquier caso, todo este nuevo proceso estará condicionado por la vida útil de las infraestructuras y el riesgo asumible.

Políticas encaminadas a la aplicación de estrategias de protección

Estas políticas están dirigidas a la defensa de áreas vulnerables: poblaciones, actividades económicas, infraestructuras y recursos naturales. Se basan esencialmente en la aplicación individual o mixta de una de estas dos tipologías de defensa: tipologías rígidas y tipologías blandas. Entre las tipologías rígidas se encuentran: diques, muros, barreras, espigones, revestimientos, etc. así como barreras frente a la intrusión salina.

Las tipologías blandas incluyen la regeneración de playas, restauración de dunas, generación de humedales y marismas, rehabilitación del transporte litoral, reforestación, etc.

- A partir de los trabajos anteriores determinación de zonas de protección.
- Determinación de las líneas de máximo retroceso admisible
- Introducción de medidas para la evaluación objetiva del retroceso
- Determinación de opciones de protección utilizando preferentemente tipologías "blandas".
- Introducción en cualquier diseño de actuaciones de protección el efecto potencial del cambio climático y los correspondientes estudios de impacto en las zonas adyacentes.

Una de las actuaciones fundamentales sería fijar, a partir de las evaluaciones obtenidas de la vulnerabilidad de la costa, la línea de máximo retroceso admisible. La evaluación continua de la línea de la costa mediante técnicas de seguimiento o instalación de testigos serviría para poner de inmediato en marcha las actuaciones necesarias para evitar el incremento de dicho retroceso, ya sea mediante el uso de tipologías rígidas o blandas de defensa. Este tipo de políticas está muy ligada a la anterior propuesta sobre la revisión de los deslindes. Sin embargo, la implementación de la misma se puede realizar como una recomendación o como ley de obligado cumplimiento como sucede en Holanda donde una vez llegado a ese límite es obligado realizar una realimentación. Sin embargo, es evidente que la situación en Holanda es diferente.





FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

ANEJOS



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX



**ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO
XX**

ÍNDICE

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA OLEAJE

- 2.1 RÉGIMEN MEDIO DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE
- 2.2 Hs12 (ALTURA DE OLA SUPERADA SÓLO 12 HORAS AL AÑO)
- 2.3 DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA
- 2.4 DURACIONES DE EXCEDENCIAS DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE
- 2.5 RÉGIMEN EXTREMAL DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE: FRECUENCIAS
- 2.6 RÉGIMEN EXTREMAL DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE: INTENSIDADES

CAPÍTULO 3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA MAREA METEOROLÓGICA

- 3.1 RÉGIMEN MEDIO DE MAREA METEOROLÓGICA
- 3.2 RÉGIMEN EXTREMAL DE MAREA METEOROLÓGICA: FRECUENCIAS
- 3.3 RÉGIMEN EXTREMAL DE MAREA METEOROLÓGICA: INTENSIDADES

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA VIENTO

- 4.1 RÉGIMEN MEDIO DE VIENTO
- 4.2 DIRECCIÓN DEL TRANSPORTE POTENCIAL EÓLICO
- 4.3 DURACIONES DE EXCEDENCIAS DE VIENTO
- 4.4 RÉGIMEN EXTREMAL DE VIENTO: FRECUENCIAS⁵
- 4.5 RÉGIMEN EXTREMAL DE VIENTO: INTENSIDADES

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS PARA NIVEL MEDIO DEL MAR

CAPÍTULO 6. RESUMEN DE RESULTADOS





ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN





1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presentan los resultados de tendencias, para toda la costa española de diversos parámetros representativos de los regímenes medio y extremal de clima marítimo y de las tendencias de variación del nivel medio del mar.

Oleaje (Altura de ola significativa, Período medio, Dirección del oleaje):

- Régimen medio de altura de ola significativa.
- H_{s12} (altura de ola superada sólo 12 horas al año).
- Dirección del flujo medio de energía.
- Duraciones de excedencias de altura de ola significativa.
- Régimen extremal de altura de ola significativa: frecuencias.
- Régimen extremal de altura de ola significativa: intensidades.
- H_{T50} (altura de ola significativa de 50 años periodo de retorno).

Marea meteorológica:

- Régimen medio de marea meteorológica.
- Régimen extremal de marea meteorológica: frecuencias.
- Régimen extremal de marea meteorológica: intensidades.
- MM_{T50} (marea meteorológica de 50 años de periodo de retorno).

Viento:

- Régimen medio de viento.
- Dirección del transporte potencial eólico.
- Duraciones de excedencias de viento.
- Régimen extremal de viento: frecuencias.
- Régimen extremal de viento: intensidades.
- W_{T50} (velocidad del viento de 50 años de periodo de retorno).

Nivel del mar

- Tendencia actual
- Prognosis de cambio

Las bases de datos utilizadas, así como las metodologías para el análisis de tendencias han sido descritas anteriormente en el Documento de la Fase I-b. A continuación se describe los resultados obtenidos y las características más relevantes observadas. Los resultados de





tendencias se presentan de forma gráfica con un código de colores ('rojo' significa aumento y 'azul' significa disminución). Para la representación de los resultados de tendencias de intensidad de eventos extremos se ha representado sólo la variable de periodo de retorno de 50 años y su variación, ya que su comportamiento está muy relacionado con las variaciones obtenidas para los eventos extremos analizados. Es importante destacar que las variaciones que se describen a continuación no pertenecen a un estudio de detalle para localidades específicas, sino que son indicadores del comportamiento general de las variables analizadas a lo largo del litoral español y su tendencia de cambio a lo largo de 44 años. Como se describe en la Fase I-d, las tendencias obtenidas pueden ser extrapoladas hasta el año 2050 con cierta fiabilidad. La totalidad de los casos y variables analizadas se presentan en el Anejo I-3 adjunto.





ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO
XX

CAPÍTULO 2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA OLEAJE





2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA OLEAJE

2.1 Régimen medio de altura de ola significativa

Los resultados son acordes con el comportamiento medio ya conocido del oleaje para nuestras costas. Se detecta una gran diferencia en magnitud entre el Mar Mediterráneo y la costa atlántica del oleaje característico, obteniéndose los valores más grandes en la costa atlántica. Las zonas más energéticas son la costa occidental de Galicia, seguidas por el litoral cantábrico. La región Sur atlántica, Baleares, la Costa Brava y la Costa Blanca presentan alturas de ola significativa medias algo mayores que la magnitud media de la costa mediterránea. En el caso de las islas Canarias se observa una zonación norte-sur, con las olas más grandes en el norte de las islas. (ver figura 2.1)

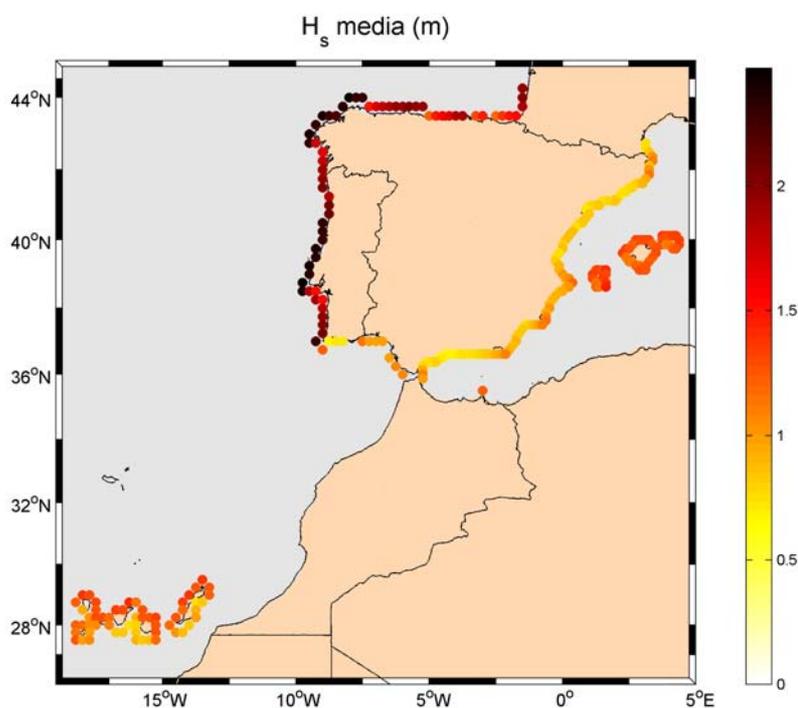


Figura 2.1 Altura de ola significativa media entre el periodo 1958-2001.

Como se aprecia en la figura 2.2, las variaciones resultantes indican un aumento de la altura de ola media en el área Noroccidental del litoral español superior a 10 cm en 40 años y una disminución para el área Sur-oriental. El aumento de la altura de ola significativa media es menor en la región de las Rías Bajas. Las disminuciones de la altura de ola media relevantes en la península se producen en las zonas donde la altura de ola presentaba olas un poco mayores (Costa Brava, Costa Blanca y costa sur atlántica). Las islas Baleares presentan una disminución mayor al Norte.



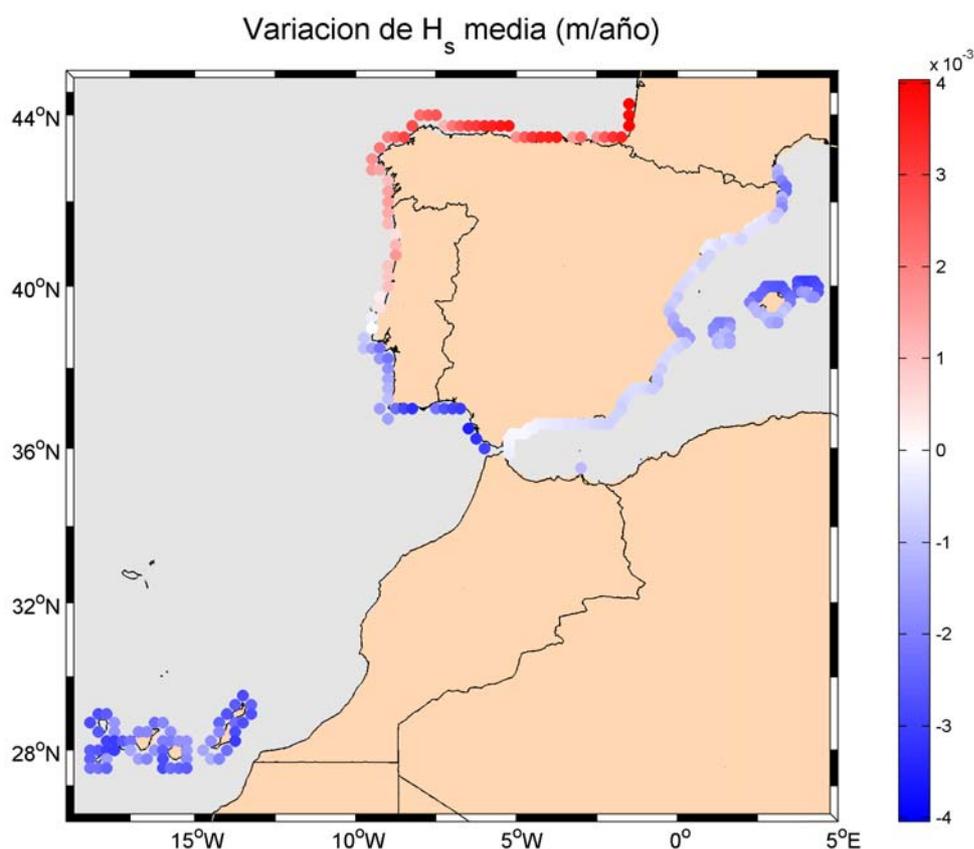


Figura 2.2. Variación de la altura de ola significativa media entre el periodo 1958-2001.

2.2 H_{s12} (altura de ola superada sólo 12 horas al año)

Como se puede observar en la figura 2.3, los valores mayores de H_{s12} se localizan entre Estaca de Bares y Finisterre (≈ 6.5 metros de altura de ola), seguidas de los valores que se alcanzan en el litoral cantábrico y las islas Baleares. A lo largo del litoral mediterráneo, la H_{s12} resultante presenta valores mayores en torno a Cabo de la Nao y máximos en la Costa Brava. En el caso de Canarias se sigue apreciando una zonación Norte-Sur, de mayor a menor magnitud de H_{s12} .



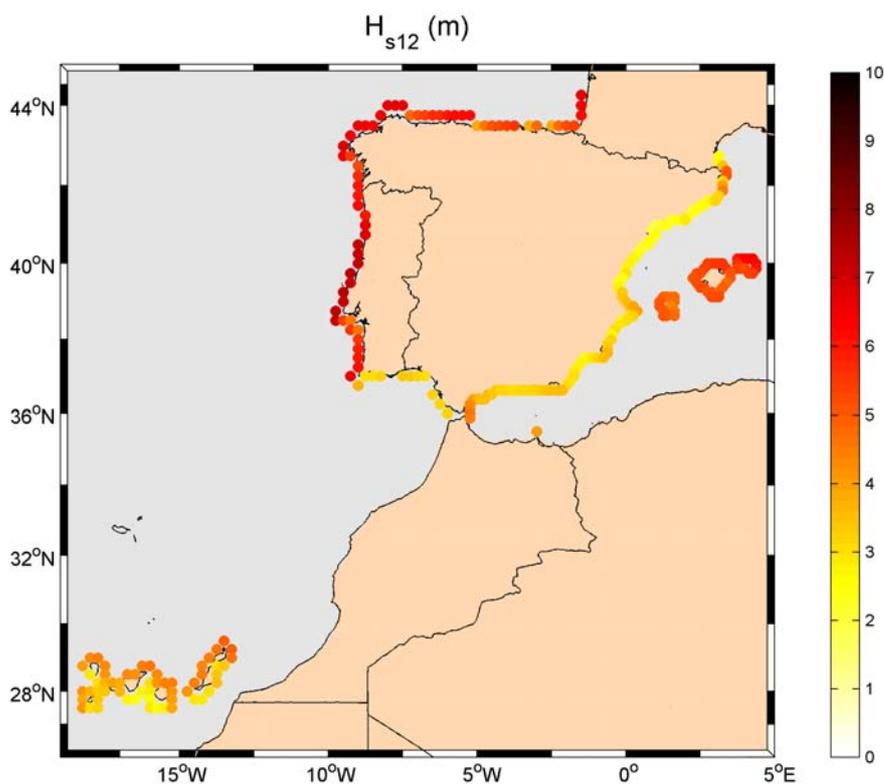


Figura 2.3. Altura de ola significativa superada sólo 12 h. al año entre el periodo 1958-2001.

Se puede apreciar un aumento importante en la zona del Cantábrico y de Galicia (más de medio metro en 40 años), así como en la zona Norte de Canarias. Por el contrario, en el golfo de Cádiz, en la zona Sur de Canarias, en la Costa Brava y en la zona oriental de las Baleares la H_{s12} ha disminuido en los últimos 40 años. En el resto del Mediterráneo las tendencias son prácticamente nulas. (ver figura 2.4).



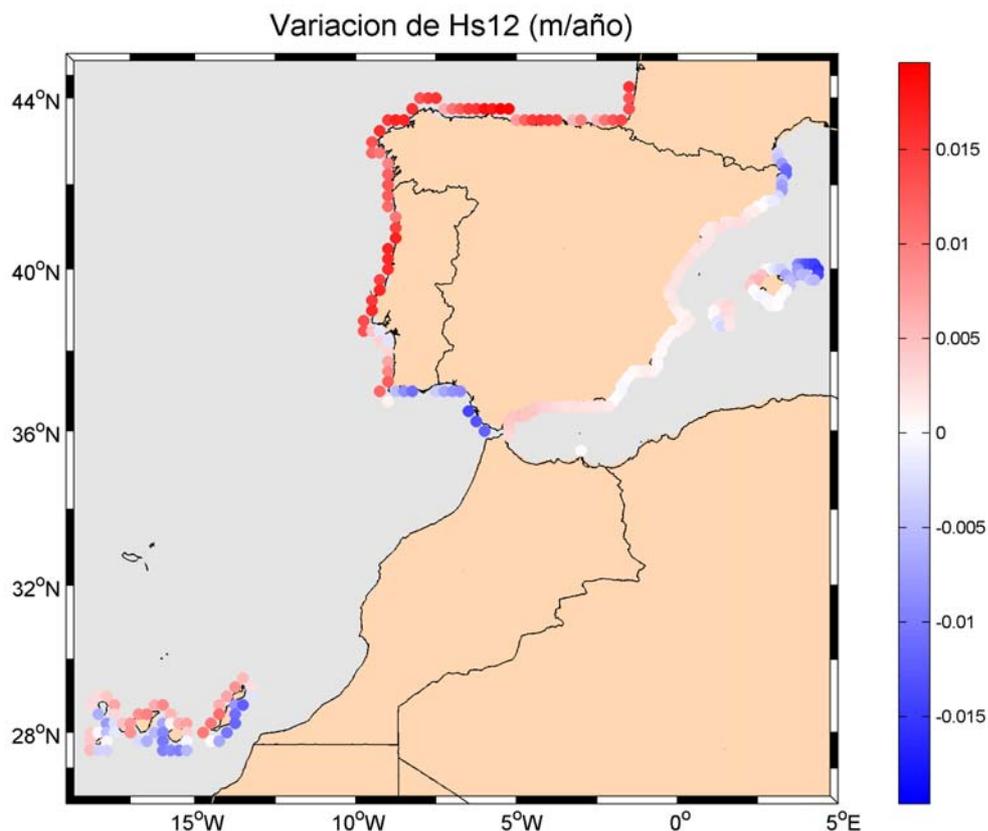


Figura 2.4. Variación de altura de ola significante superada sólo 12 h. al año entre el periodo 1958-2001.

2.3 Dirección del flujo medio de energía

En la figura 2.5 se representa la dirección del flujo medio energía del oleaje, que coincide con la dirección de los oleajes más energéticos. Obsérvese, a modo de ejemplo, la dirección Noroeste de todo el Cantábrico, la cual es la más energética.



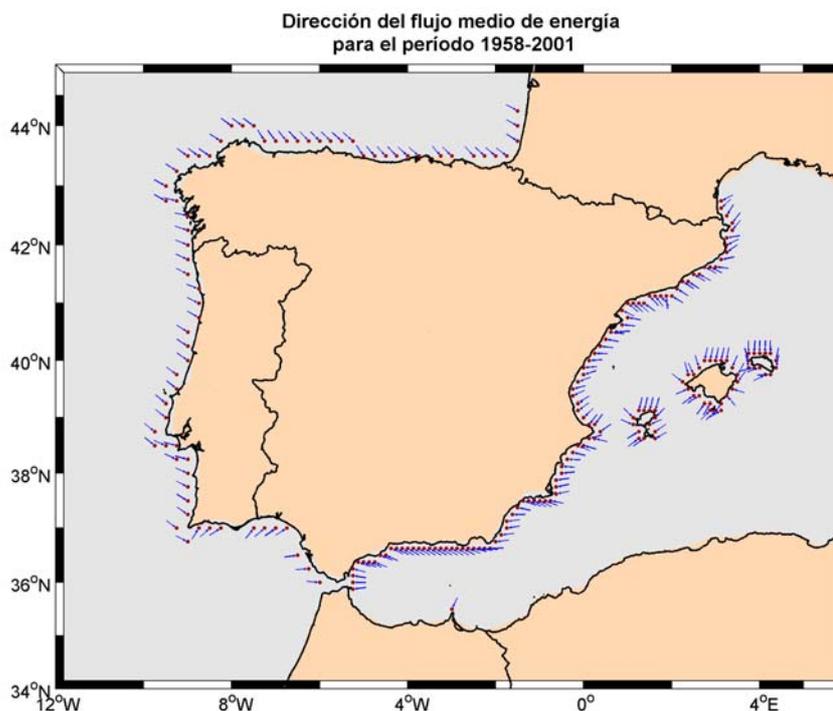


Figura 2.5. Dirección del flujo medio de energía del oleaje para el período 1958-2001.

El análisis de tendencias muestra que las variaciones más reseñables (figure 2.6) son el importante giro hacia la derecha en la costa del Maresme y Costa Brava, así como en la zona sur de Canarias y el cambio de dirección predominante del oleaje, de Suroeste a Sur, en algunas regiones del litoral sur de Baleares. La variación en el ángulo de la Costa Brava y del Maresme indica un cambio en la dirección predominante del oleaje de forma que el oleaje llega a las costas con una dirección más oriental. En el Suroeste de las Islas Baleares se produce un giro antihorario de la dirección predominante del oleaje.



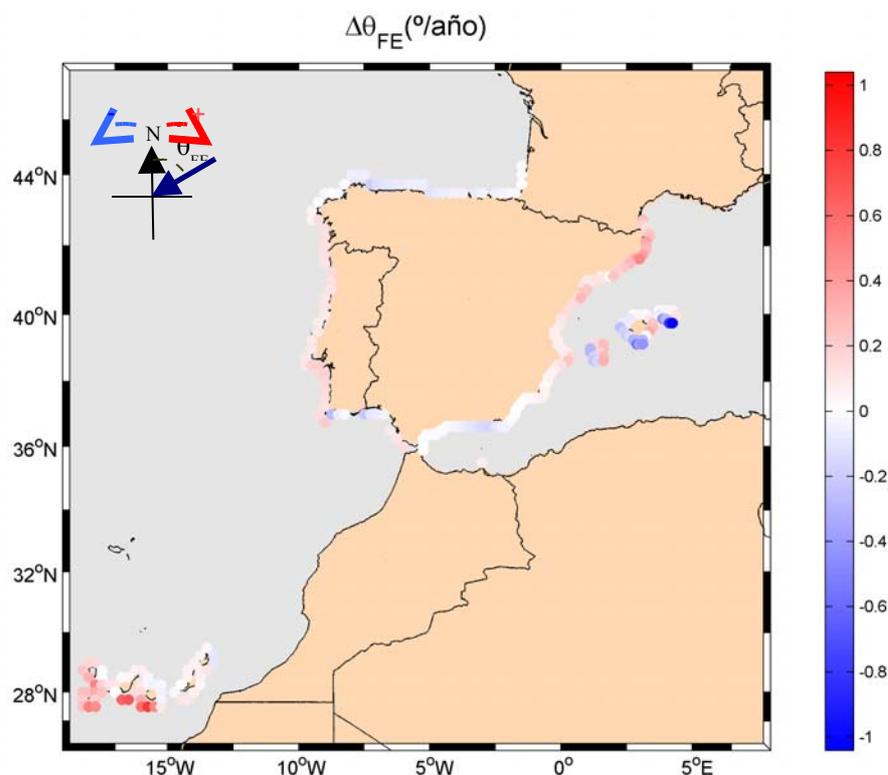


Figura 2.6. Variación de la dirección del flujo medio de energía del oleaje para el periodo 1958-2001.

2.4 Duraciones de excedencias de altura de ola significativa

Las duraciones de excedencia de altura de ola presentan una gran relación con la estabilidad de las playas (variación de las bermas o en la profundidad de cierre) y con operatividad de obras marítimas, especialmente en el diseño de puertos. Para el diseño de puertos es de gran utilidad conocer la duración media y la duración máxima más probable anual de excedencia de un determinado umbral de altura de ola significativa. Por este motivo, las variaciones que puedan sufrir estos parámetros a lo largo del tiempo deberían ser tenidas en cuenta en su diseño en función de su vida útil. Para el diseño de un puerto en una determinada localidad sería necesario estudiar la variabilidad, en detalle, de las duraciones de excedencia de altura de ola. La variabilidad que se muestra a continuación permite definir, a grandes rasgos, las tendencias más importantes.

En la figura 2.7 se observa, en la gráfica superior, la variación media anual de la duración media (en horas) de los eventos marítimos que superan el 98 % de las alturas de ola significantes asociadas al régimen medio de cada zona. En la gráfica inferior se muestra la variación anual del tiempo máximo de excedencia más probable cada año (en horas).





Respecto a las variaciones de la duración media se observa un incremento generalizado (en torno a 4 horas tras 44 años) a lo largo del litoral mediterráneo, exceptuando la Costa Brava. Este incremento presenta valores máximos entre Cabo de Palos y Cabo de Gata. Se produce un ligero decremento para la Costa Brava, región Norte de las Islas Baleares y Golfo de Cádiz.

Para el caso de las duraciones máximas las tendencias siguen un patrón parecido a las duraciones medias, pero las variaciones resultantes presentan mayor magnitud en más puntos de la costa. Se observa una disminución de la duración máxima en el Golfo de Cádiz, Costa Brava, costa Norte de Baleares y costa sur del archipiélago canario. Se sigue produciendo un aumento generalizado en la costa mediterránea y se aprecia un leve incremento de la costa cantábrica.

Se puede apreciar un decremento del número de sucesos al año en el Golfo de Cádiz y costa Sur de Canarias.



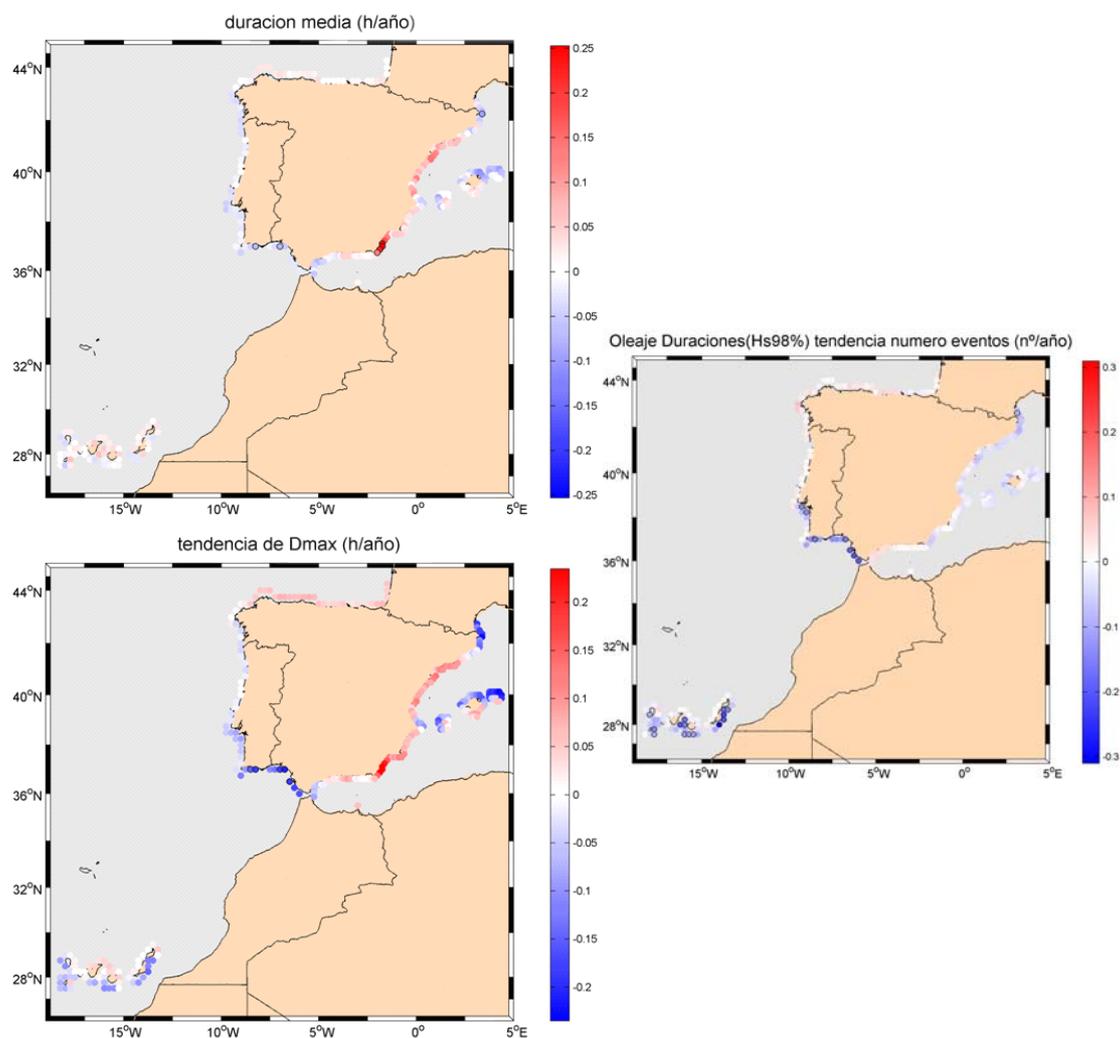


Figura 2.7 Resultados del análisis de tendencias para duraciones de excedencia de altura de ola significativa para el periodo 1958-2001.

2.5 Régimen extremal de altura de ola significativa: frecuencias

Respecto al número medio de temporales al año (definidos como sucesos independientes que superan el umbral del percentil del 95% de H_s), los resultados indican (figura 2.8) que la frecuencia de eventos extremos es mayor en las islas Baleares que en el resto de España. La frecuencia de estos temporales también es ligeramente mayor en la costa cantábrica y la Costa Brava.



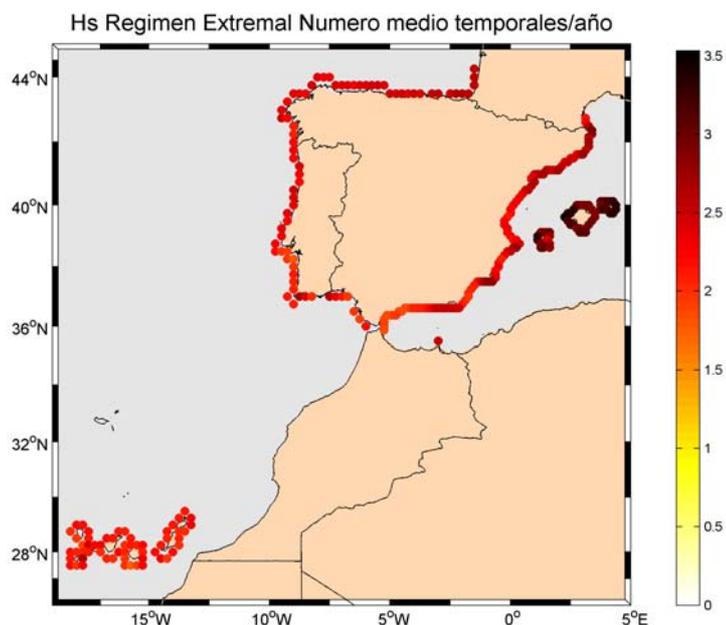


Figura 2.8. Número medio de temporales al año durante el periodo 1958-2001.

En la figura 2.9 se puede observar que en la zona norte de Canarias se ha producido un importante aumento del número de temporales al año (aumento del 30% en 44 años). Asimismo, en la costa oriental del Cantábrico se ha producido un leve aumento del número de temporales. En las Rías Bajas, golfo de Cádiz, Costa Brava y costa Sureste de Canarias es evidente un decremento. Esta disminución es especialmente importante en el Golfo de Cádiz donde, tras 44 años, se ha producido una reducción importante del número de temporales al año.



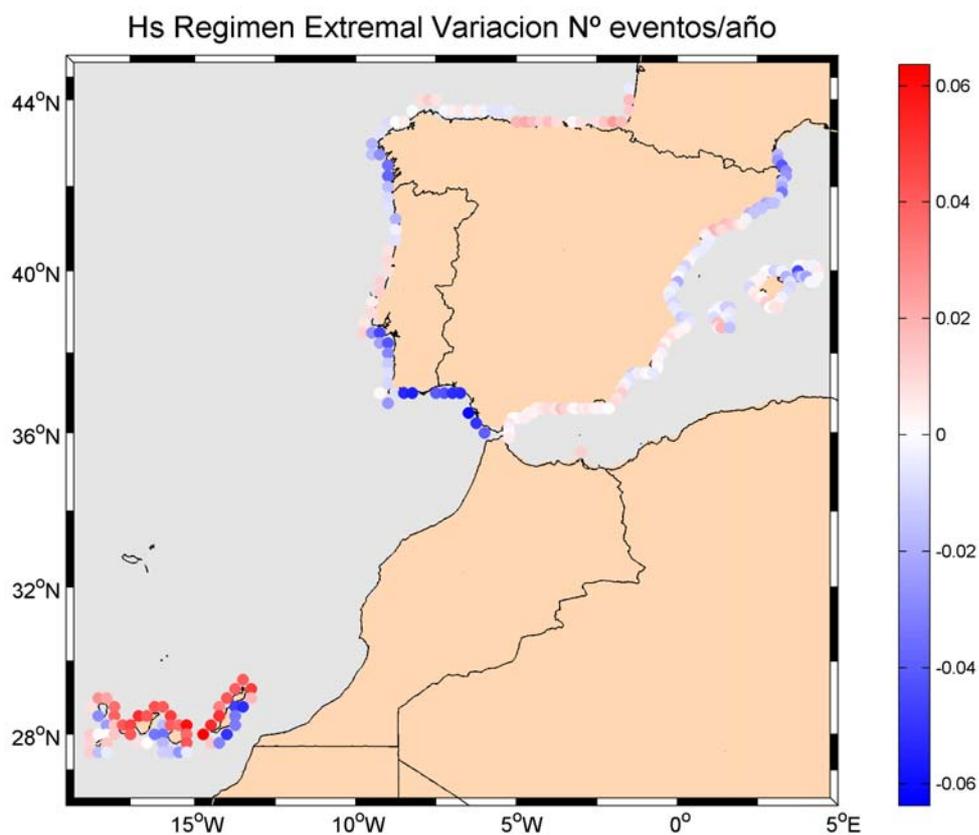


Figura 2.9. Variación del número medio de temporales al año durante el periodo 1958-2001.

2.6 Régimen extremal de altura de ola significativa: intensidades

En la figura 2.10 se observa que la H_{T50} alcanza los valores mayores en la costa gallega y en el Cantábrico, donde es sabido se producen los mayores temporales en España. Los H_{T50} de menor magnitud se encuentran en el área de Tarragona, la Costa del Sol y la zona Sur de Canarias.



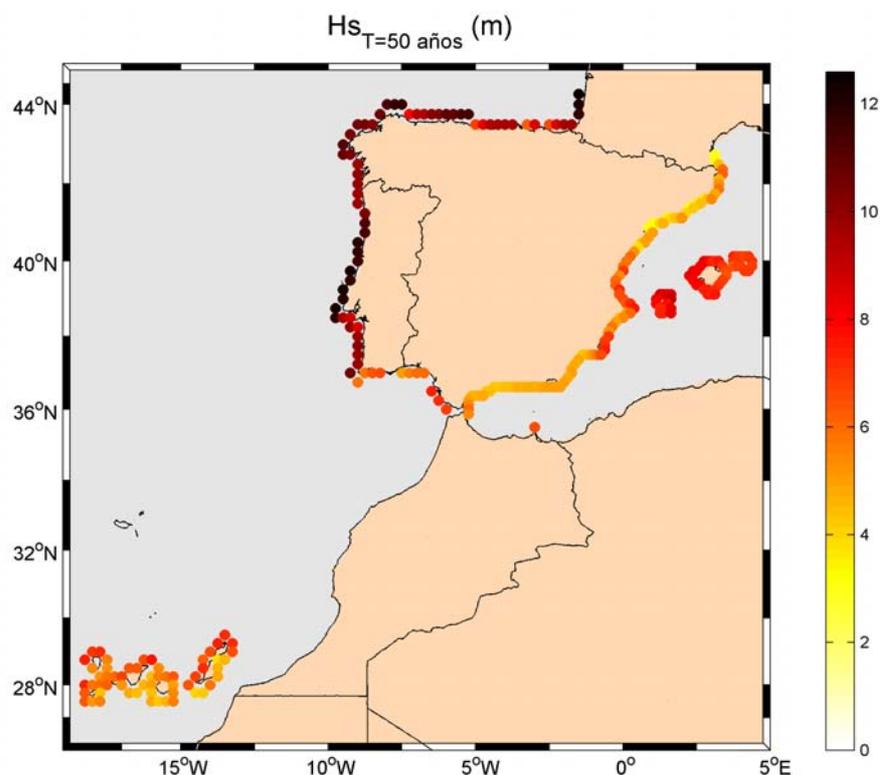


Figura 2.10. Altura de ola significativa de 50 años de periodo de retorno para el periodo 1958-2001.

Las variaciones mostradas en la H_{T50} (figura 2.11) indican el mayor aumento (en torno a 2 cm/año) entre Estaca de Bares y Finisterre. Se detecta un aumento, algo menor: ≈ 1 cm/año, en la costa situada al Norte del archipiélago Canario y un ligero aumento, de milímetros al año, en la costa cantábrica. Se observa una importante reducción de la magnitud de los eventos extremales en el Golfo de Cádiz (mayor de un metro en 40 años) y, de menor variación (≈ 1 cm/año), en la Costa Brava, región más occidental de las islas Baleares y Sureste de Canarias.



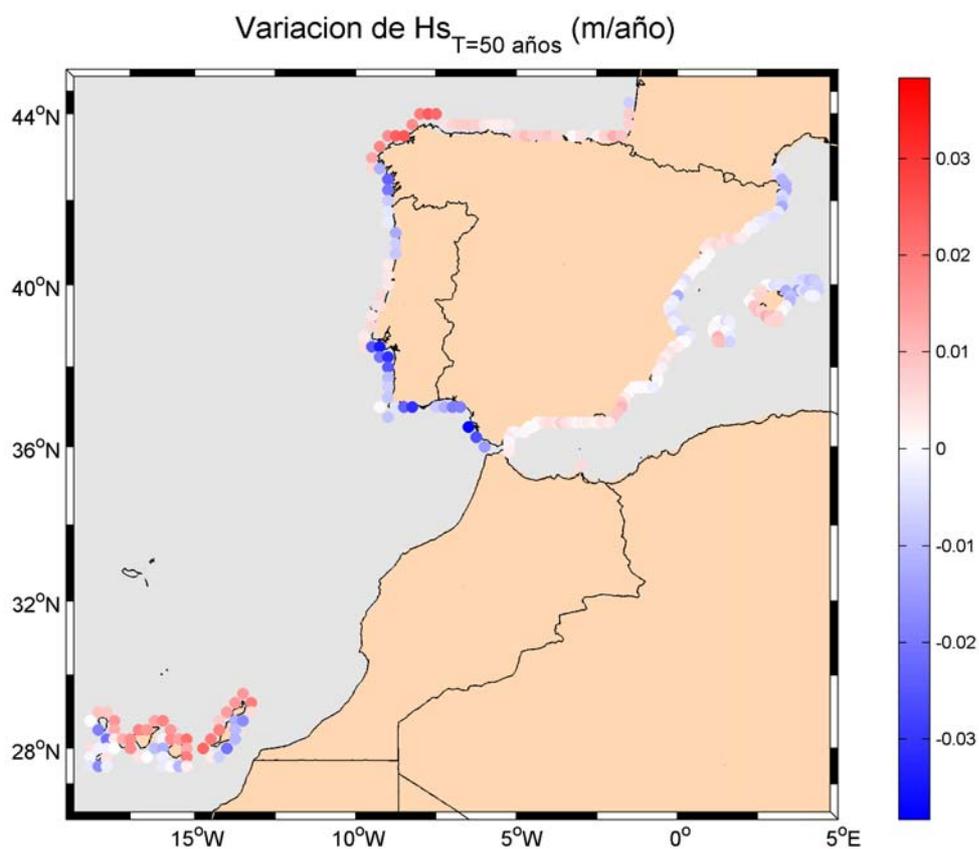


Figura 2.11 Variación de la altura de ola significativa de 50 años de periodo de retorno para el periodo 1958-2001.





ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO
XX

CAPÍTULO 3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA MAREA METEOROLÓGICA



3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA MAREA METEOROLÓGICA

3.1 Régimen medio de marea meteorológica

Se ha producido una disminución de los valores medios de marea meteorológica en la mitad Norte peninsular, en Palma de Mallorca y Menorca (ver figura 3.1). Esta disminución es mayor en la costa noroccidental de Galicia y el litoral occidental asturiano.

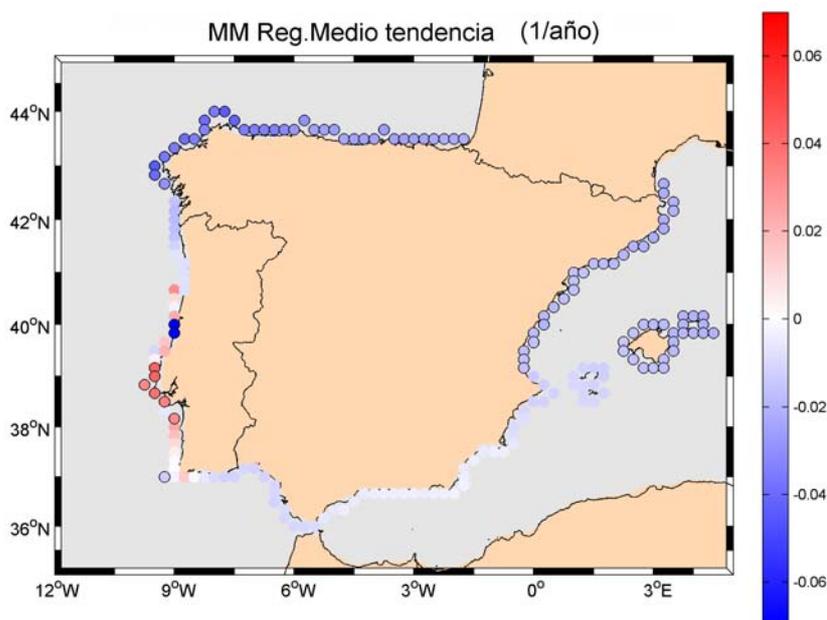


Figura 3.1 Variaciones del régimen medio la marea meteorológica durante el periodo 1958-2001.

3.2 Régimen extremal de marea meteorológica: frecuencias

Se ha producido una disminución generalizada de la frecuencia de los sucesos extremos de marea meteorológica en toda el área estudiada (ver figura 3.2). Esta disminución de la ocurrencia de sucesos presenta una fiabilidad de cálculo estadístico muy alta, especialmente en la costa mediterránea, Baleares y costa Noroeste gallega, donde las tendencias negativas son más acusadas.



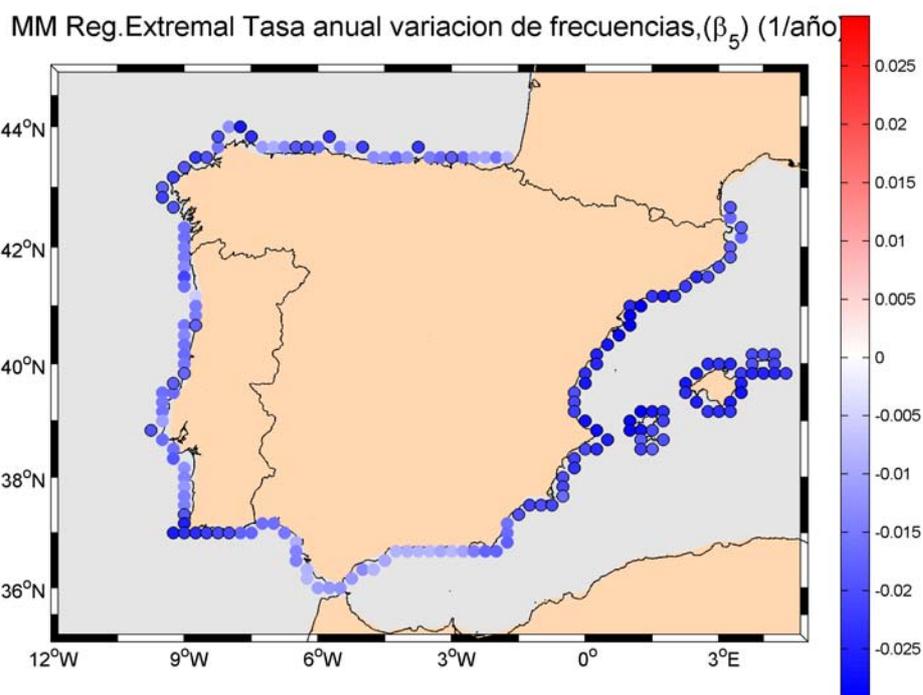


Figura 3.2 Variaciones en la ocurrencia de sucesos extremales de la marea meteorológica durante el periodo 1958-2001.

3.3 Régimen extremal de marea meteorológica: intensidades

Acorde con los resultados de H_{T50} , la MM_{T50} presenta los valores mayores en la costa gallega y la costa occidental cantábrica (figura 3.3). Este hecho es totalmente razonable dados los procesos dominantes climatológicos que son los forzamientos de ambas variables. Los valores más pequeños aparecen en la costa Sur peninsular, ya que es donde el área de generación del proceso que provoca residuos en la marea es menor.



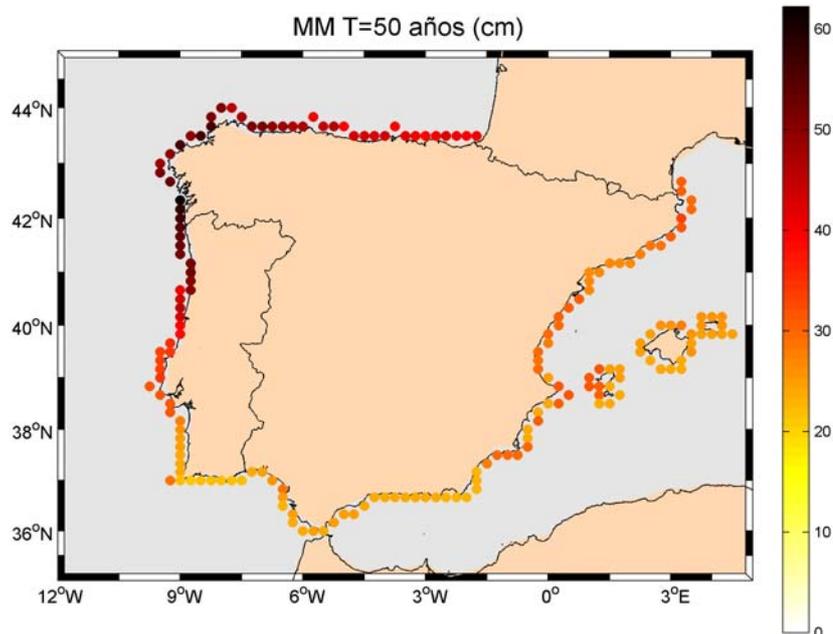


Figura 3.3 Marea meteorológica de 50 años de periodo de retorno.

En general se ha producido, para todo el litoral, una disminución en la intensidad del régimen extremal de marea meteorológica. A destacar la zona de Galicia, con una disminución de hasta 7 cm en 44 años en la zona de Galicia (aproximadamente, un 10% de la marea meteorológica de 50 años de período de retorno) y la costa mediterránea, con un descenso del orden de los 3-4 cm en 44 años.



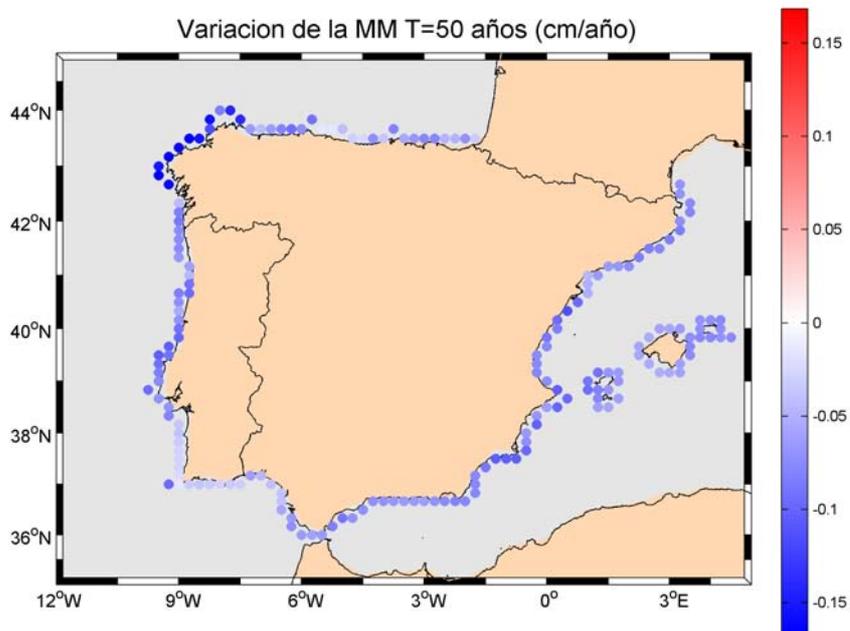


Figura 3.4 Variación de la marea meteorológica de 50 años de periodo de retorno.





ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO
XX

CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA VIENTO





4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA VIENTO

4.1 Régimen medio de viento

Las velocidades del viento medias que afectan al litoral español (ver figura 4.1) se encuentran zonificadas de la siguiente manera: las intensidades de mayor magnitud (≈ 20 Km/h) se dan en la costa occidental peninsular, Golfo de Cádiz, Galicia y la costa occidental de Asturias, en las islas Canarias y Baleares, siendo de mayor magnitud en Galicia y Canarias. La región oriental peninsular recibe un viento medio menor, en torno a 10 Km/h.

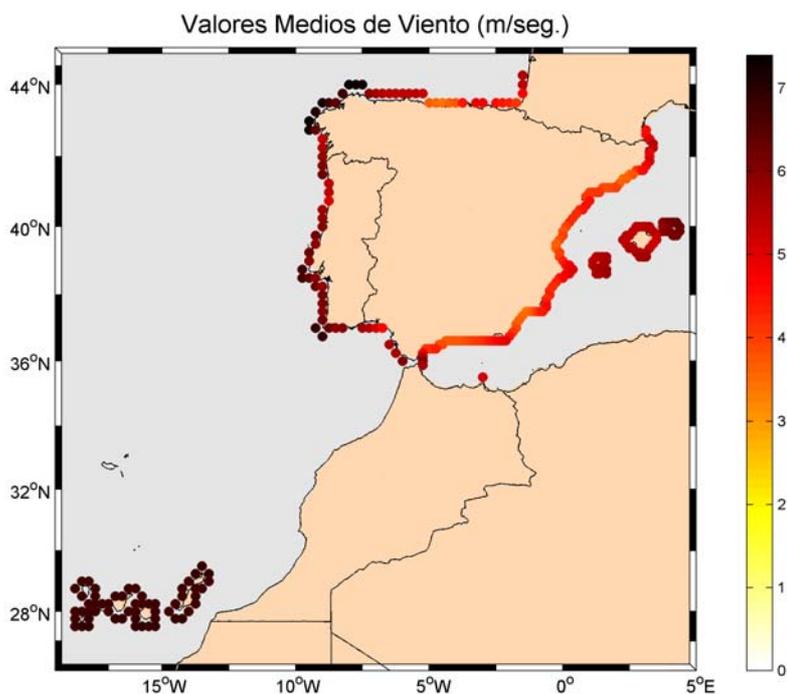


Figura 4.1 Velocidades del viento medias durante el periodo 1958-2001.

Las variaciones registradas (figura 4.2) indican una reducción generalizada de la velocidad media del viento. Sin embargo, esta disminución no supera los 3 Km/h en 40 años, para los casos más extremos (la Costa Brava y litoral Noreste de Canarias), por lo que estas variaciones son relativamente pequeñas.



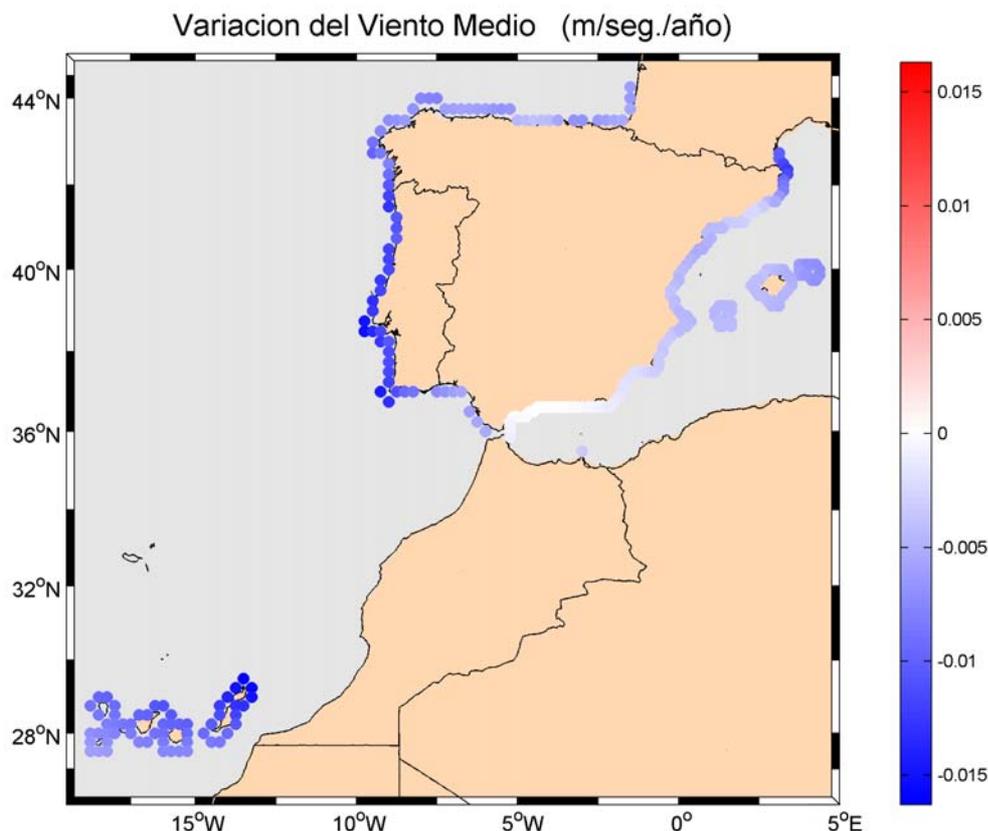


Figura 4.2. Variación del viento medio durante el periodo 1958-2001.

4.2 Dirección del transporte potencial eólico

En la figura 4.3 se observa que la dirección del viento predominante es, principalmente de dos tipos: viento de componente Oeste (entre 225° y 315°) y viento de componente Norte (entre 315° y 45°). Los vientos de componente Oeste se dan en la costa atlántica peninsular, denominados “Gallego” y “Galerna” en la costa cantábrica y “Poniente” en el Golfo de Cádiz. Entre los vientos de componente Norte cabe destacar el viento de “Tramontana” en Menorca y la costa Brava. Es importante señalar en este apartado que las variaciones de la dirección predominante de vientos no están suficientemente caracterizadas debido a la resolución temporal del modelo meteorológico forzador de los datos de viento de HIPOCAS. Por tanto la fiabilidad de estos resultados es menor que la del resto de variables analizadas.





Figura 4.3 Dirección del transporte eólico durante el periodo 1958-2001.

Las principales variaciones que se detectan (figura 4.4) son un giro horario de las direcciones en la costa Sur peninsular y un giro antihorario en la costa atlántica Norte, especialmente entre Estaca de Bares y Finisterre.



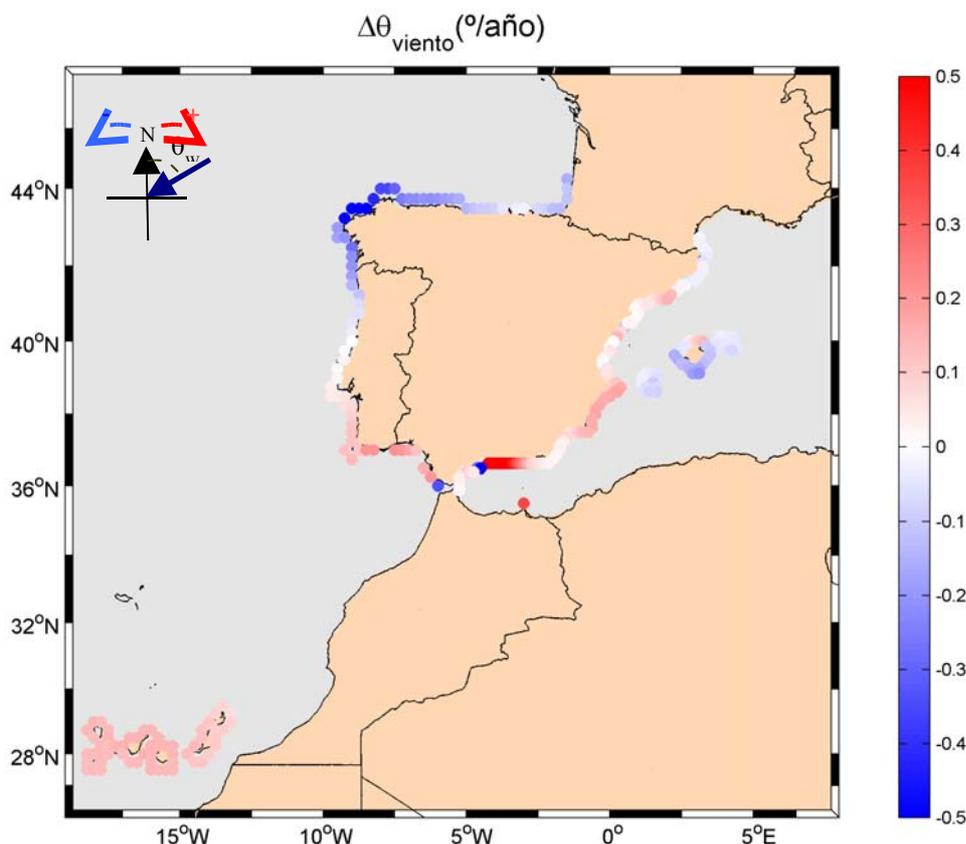


Figura 4.4 Variación de la dirección del transporte eólico durante el periodo 1958-2001.

4.3 Duraciones de excedencias de viento

Las variaciones de duraciones de excedencia de viento influyen en distintos aspectos del litoral español, por ejemplo en las maniobras portuarias o en el uso de las playas. Las variaciones detectadas para el caso de duraciones de excedencia de viento (figura 4.5) indican un decremento leve (≈ 2 horas en 44 años) a lo largo de la costa mediterránea y un descenso importante en la Costa Brava, tanto de la duración media, como máxima que supera un umbral del percentil del 98 %. La grafica de la parte derecha indica la variabilidad en la frecuencia de estas duraciones. Se aprecia un descenso de la frecuencia de estos sucesos en Canarias, el Golfo de Cádiz y la costa oriental cantábrica.



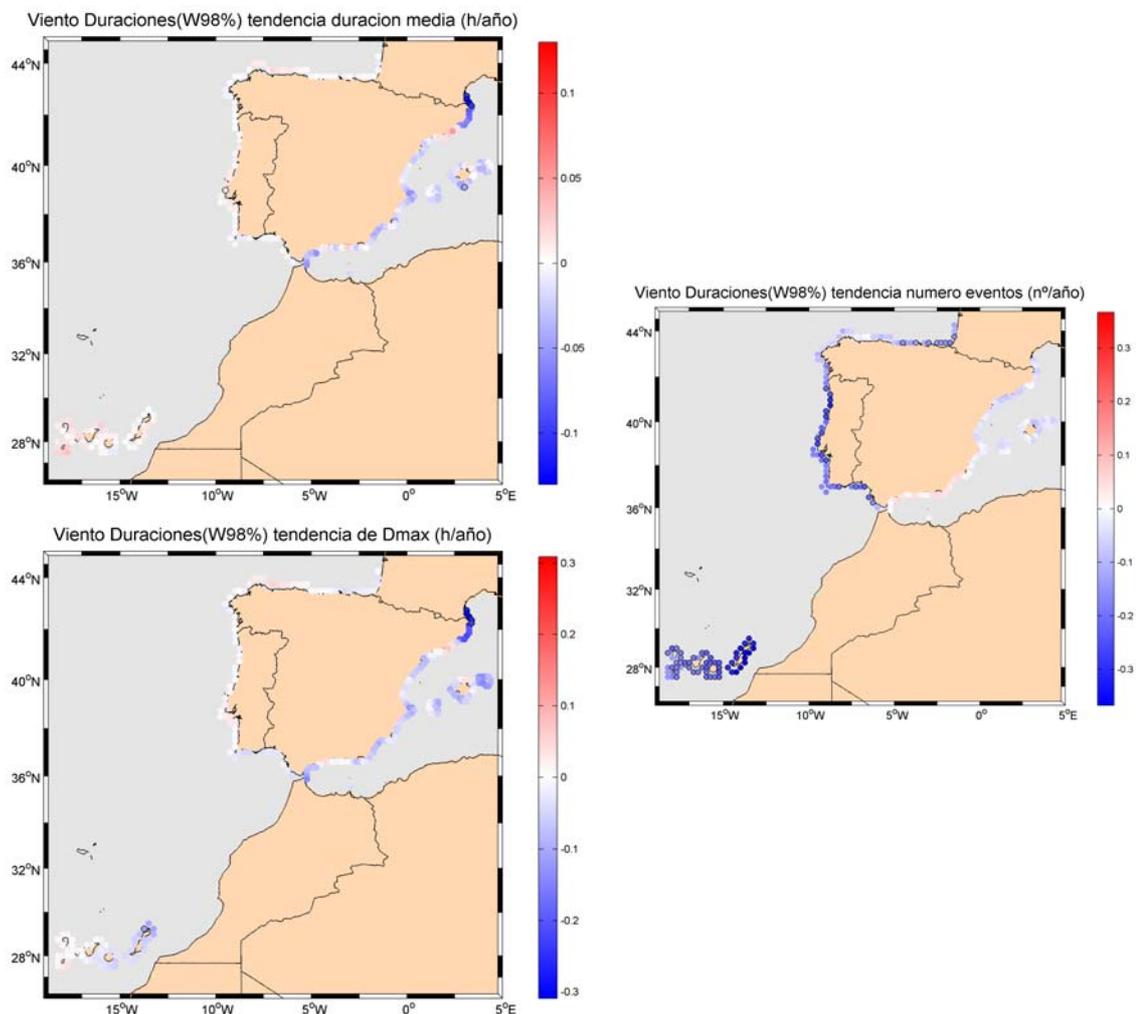


Figura 4.5. Resultados del análisis de tendencias de duraciones de excedencia de viento durante el periodo 1958-2001.

4.4 Régimen extremal de viento: frecuencias

Se ha producido una importante disminución de la tasa de ocurrencia de sucesos extremos en la costa occidental peninsular y Canarias (ver figura 4.6), exceptuando la costa occidental asturiana, donde el número de sucesos extremos aumenta. En el Mediterráneo las variaciones son mínimas. Como en el caso de oleaje, los eventos extremos son sucesos independientes que superan el umbral del 95 %.



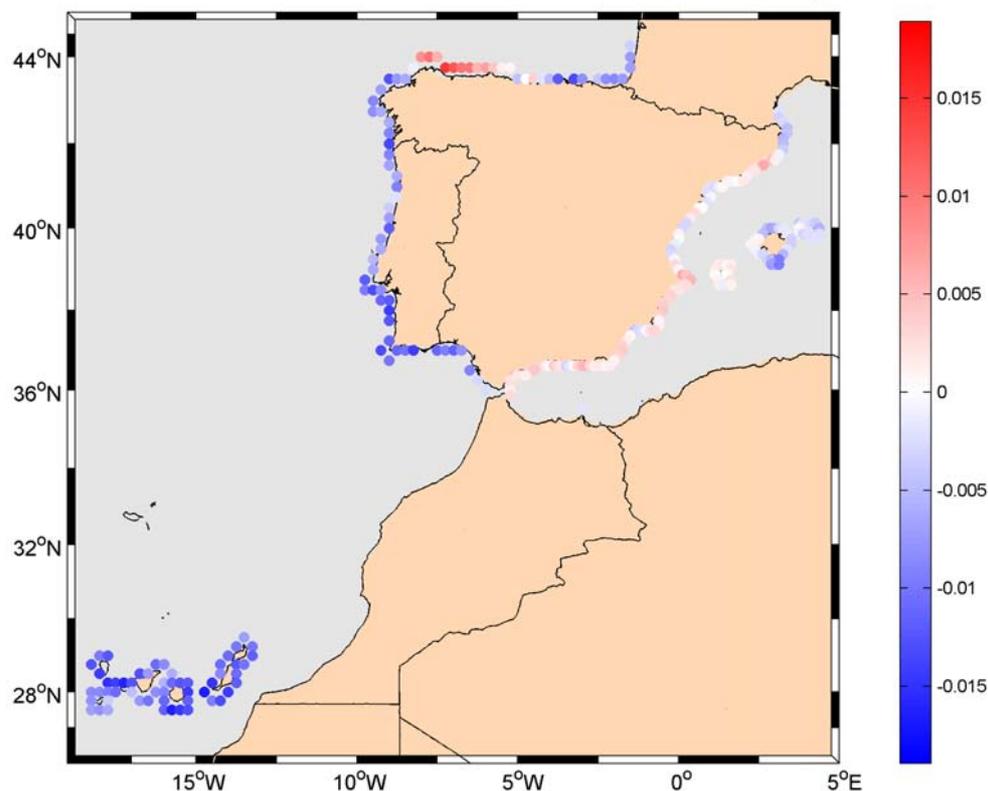
Viento Reg. Extremal Tasa anual de variación de frecuencias, (β_5) (1/año)

Figura 4.6 Variación de la ocurrencia de eventos extremos de viento durante el periodo 1958-2001.

4.5 Régimen extremal de viento: intensidades

Los vientos de periodo de retorno de 50 años de mayor magnitud se localizan en la costa asturiana y gallega desde Estaca de Bares hasta Finisterre (vientos en torno a 100 Km/h), seguidos en magnitud del W_{T50} del Golfo de Cádiz y Baleares. A lo largo de la costa Mediterránea el W_{T50} presenta gran uniformidad y no alcanza los 70 Km/h (ver figura 4.7).



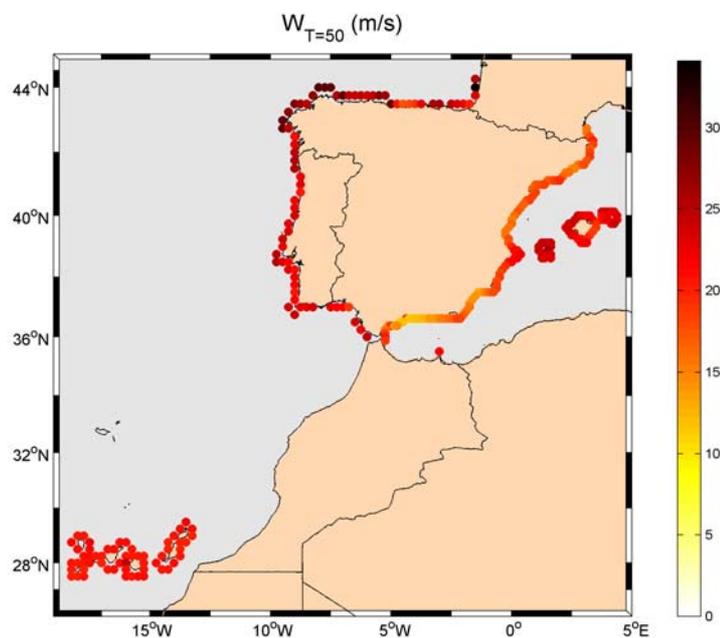


Figura 4.7 Velocidad del viento de 50 años de periodo de retorno.

Las variaciones de viento extremal que se han producido (figura 4.8) son relativamente reducidas (la máxima tendencia de cambio obtenida indica una variación de 7 Km/h en 44 años para el W_{T50}). Entre estas variaciones de pequeña magnitud, cabe destacar la disminución en las Islas Canarias, Golfo de Cádiz, costa Oeste de Galicia y costa cantábrica oriental. En la costa Norte de Galicia y occidental de Asturias se produce un aumento, mientras que a lo largo de la costa mediterránea las variaciones son mínimas.



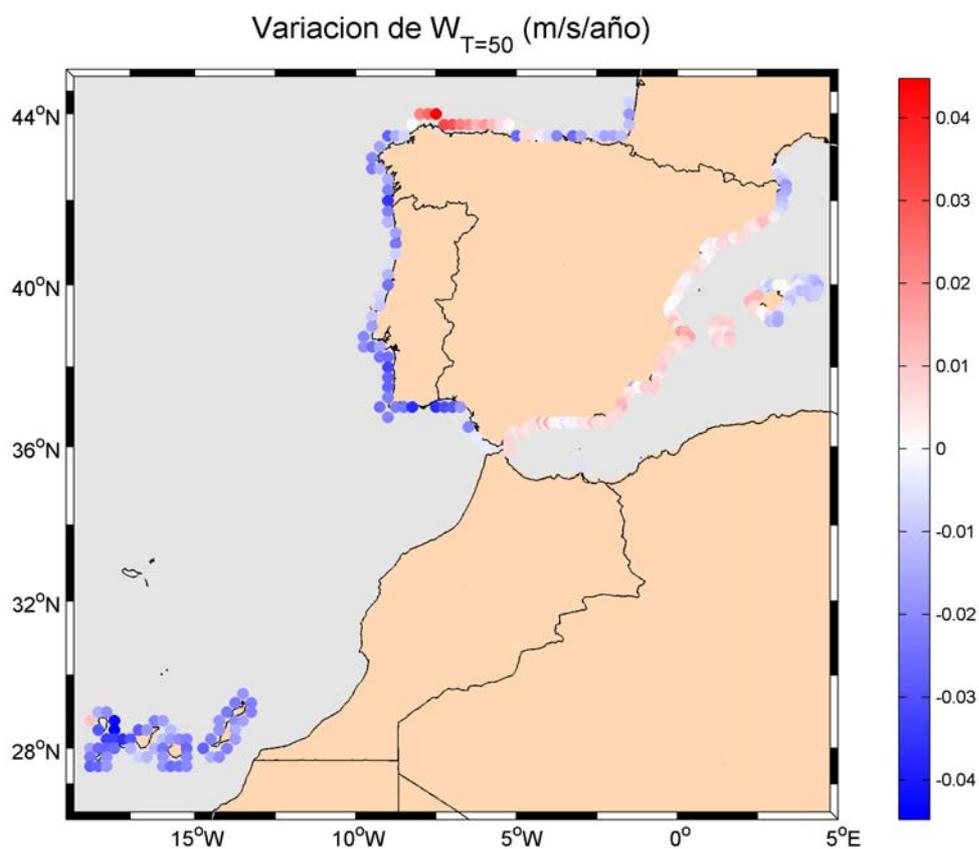


Figura 4.8. Variación de la velocidad del viento de 50 años de periodo de retorno para el periodo de 1958-2001.





ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX

CAPÍTULO 5. VARIACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR





5. VARIACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

Si se observa en la figura 5.1 las predicciones del IPCC en el año 2050, para los distintos escenarios de cambio climático, la incertidumbre en la predicción es menor y prácticamente todos los escenarios coinciden en su valor medio en el entorno de +0.15m, con una banda de confianza entre +0.1m y +0.25m. Por tanto, el valor de ascenso del nivel medio del mar que se ha considerado es de +0.2 m y constante para todas las zonas del litoral español. Lógicamente, en aquellos elementos del litoral afectados por subsidencia, el ascenso relativo del nivel del mar puede ser incluso mayor (por ejemplo, el delta del Ebro).

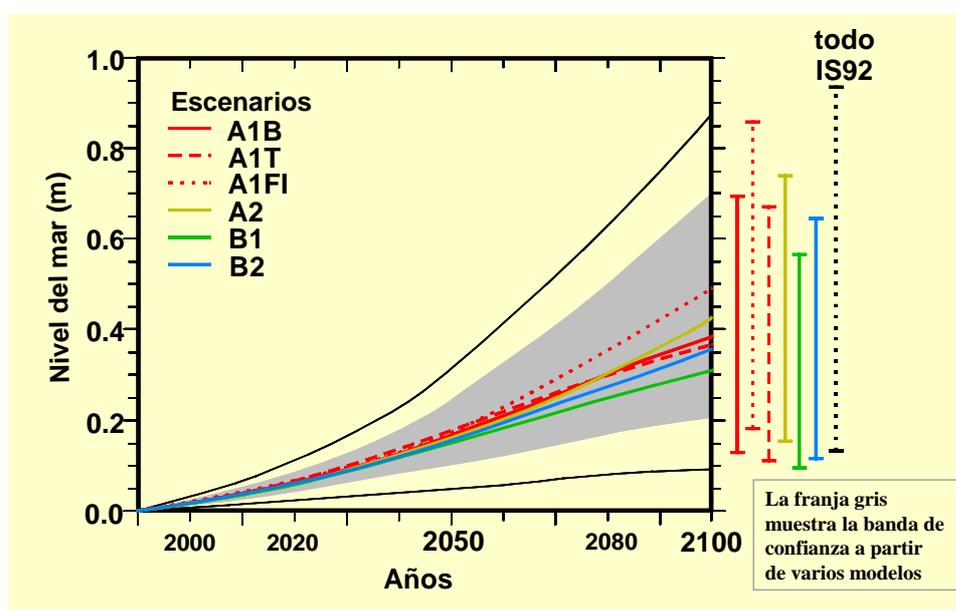


Figura 5.1. Escenarios de subida del nivel medio del mar (IPCC, 2001)

Por otro lado, cabe señalar que la tendencia actual de variación del nivel medio que se ha obtenido (Marcos et al., 2004) es de 2.5 mm/año (entre 1 y 2 mm/año para el IPCC), por lo que extrapolando al año 2050, se tendría un ascenso del nivel medio de +0.125 m. Esta extrapolación no tiene en cuenta ninguna variación de largo plazo de los factores que condicionan la variación del nivel del mar, pero aún así el valor obtenido de +0.125 m está dentro del orden de magnitud de la variación predicha por los distintos escenarios.





ANEJO III-1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO
XX

CAPÍTULO 6. RESUMEN DE RESULTADOS





6. RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se describe, de forma global, la información conjunta más relevante. En el caso de oleaje, nivel del mar y velocidad del viento se destacan los resultados obtenidos para aquellas zonas donde se observa una variación a largo plazo destacable.

Nivel medio del mar en el litoral español:

A nivel global se asume 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. Esta información ha sido complementada con los modelos globales contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su tercer informe, que establecen una variación del nivel del mar comprendida entre 9 y 88 cm en el intervalo correspondiente a 1990-2100. En este informe, el valor medio de los escenarios presentados oscila entorno de +0.15 m, con una banda de confianza entre +0.1m y +0.25 m. En base a estos resultados, se asume en el año horizonte 2050, un ascenso del nivel del mar de +0.2 m en el litoral español.

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 extremos (H_{T50}). 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 extremos, 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 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.

A continuación se presenta, de forma agregada, los resultados obtenidos para las principales variables analizadas en distintas áreas geomorfológicas del litoral español. Considerando 12 áreas, relativamente homogéneas, se ha representado el valor medio, máximo y mínimo, así como su principal variación obtenida. En la gráfica 6.1 se exponen los resultados de régimen medio y en la gráfica 6.2 para el régimen extremal.



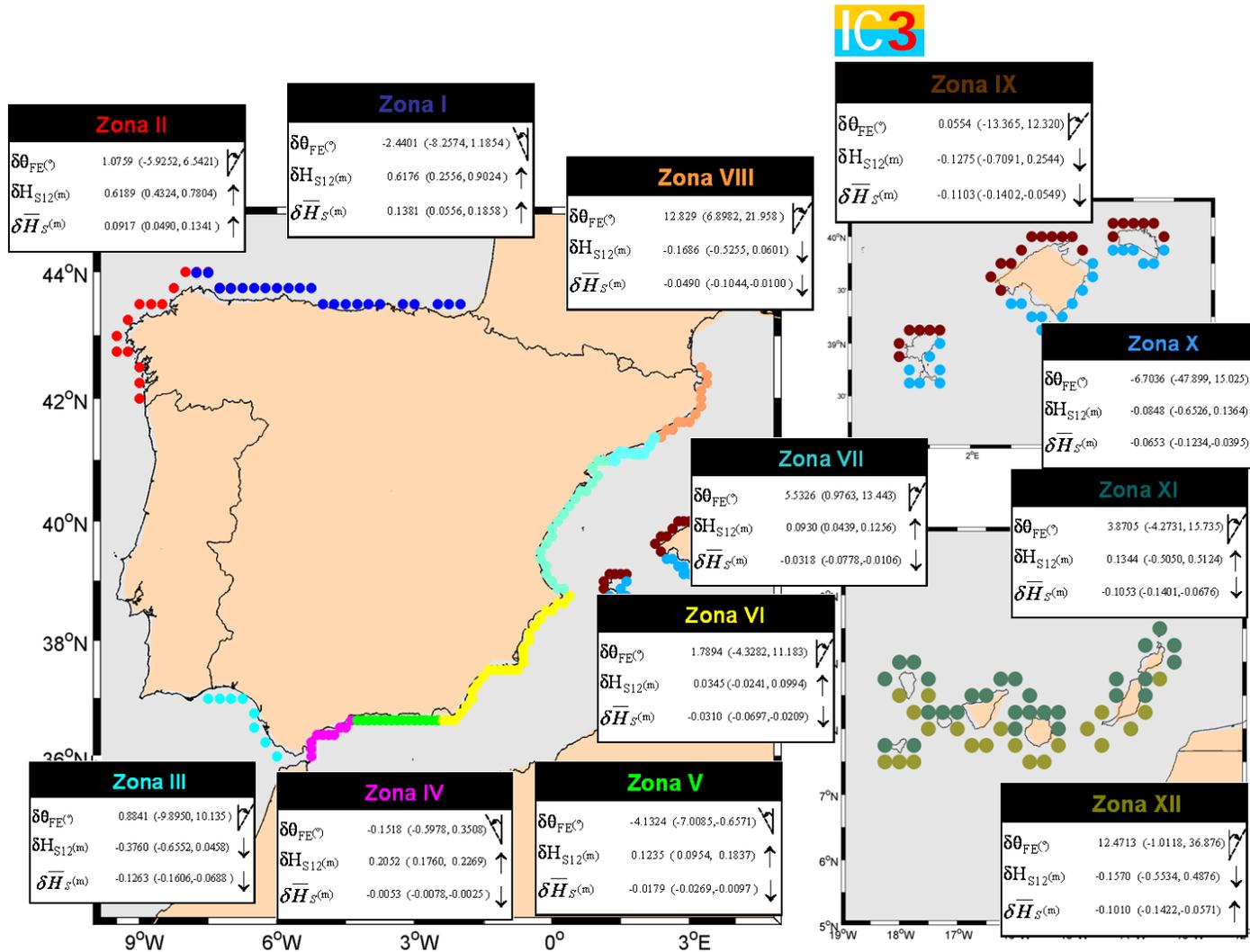


Figura 6.1 Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el periodo 1958-2001.



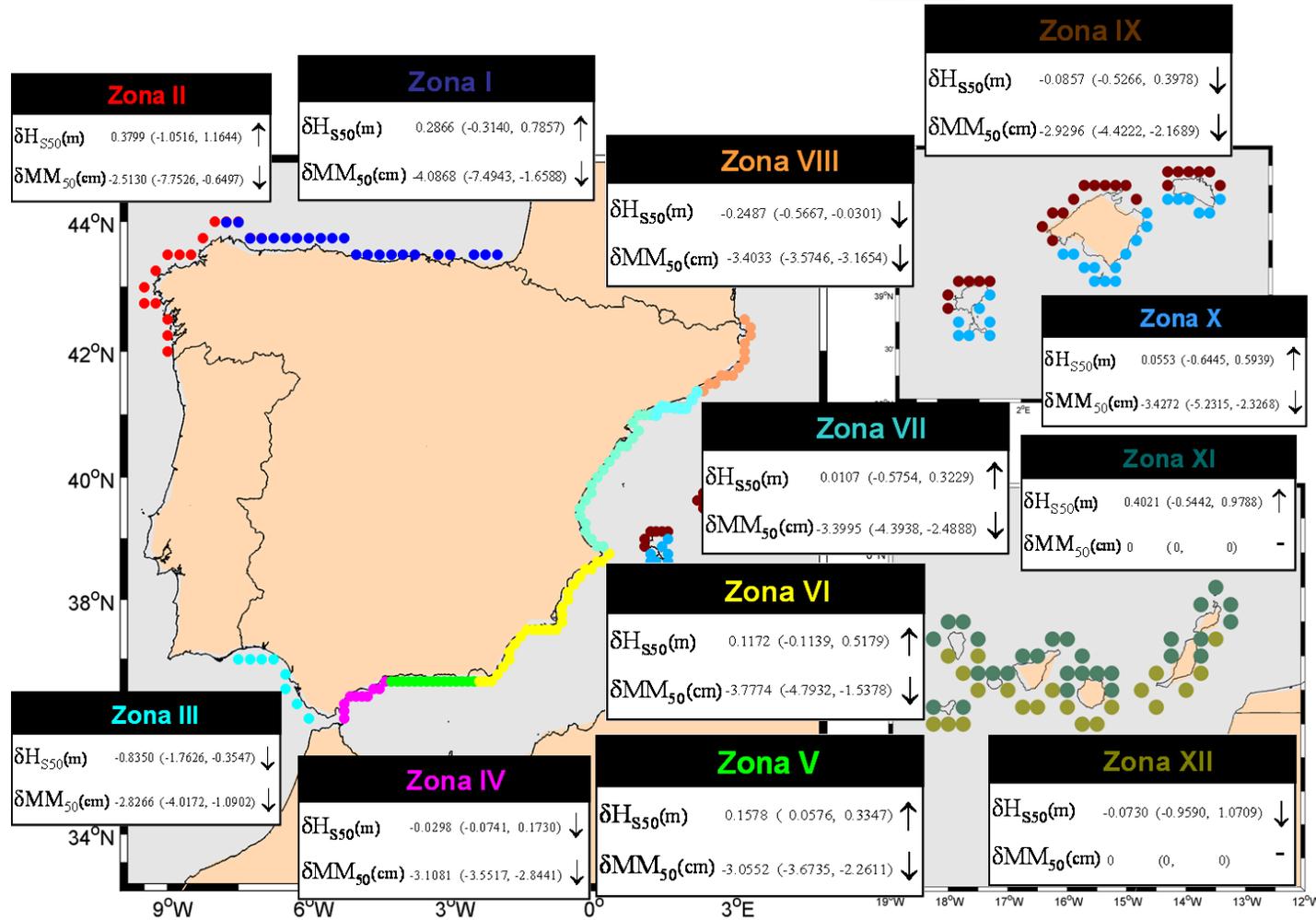


Figura 6.2 Variaciones obtenidas para las variables de régimen extremal durante el periodo 1958-2001.



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

ANEJO III-2. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA



**ANEJO III-2. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA
ESPAÑOLA**



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

ANEJO III-2. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA



**ANEJO III-2. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA
ESPAÑOLA**

ÍNDICE



Índice

CAPÍTULO 1. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA

1.1. INTRODUCCIÓN

1.2. EFECTOS EN PLAYAS

1.3 EFECTOS EN ESTUARIOS

1.4. EFECTOS EN DUNAS

1.5. EFECTOS EN OBRAS MARÍTIMAS



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



FASE III. ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

ANEJO III-2. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA



**ANEJO III-2. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA
ESPAÑOLA**





1. RESULTADOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA ESPAÑOLA

1.1. Introducción

El estudio teórico sobre los posibles efectos del cambio climático en los distintos elementos del litoral ha puesto 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 capítulo tiene como objetivo resumir los efectos más importantes que se pueden producir en cada elemento litoral.

1.2. Efectos en playas

Los efectos más importantes que el cambio climático puede suponer en las playas se reduce básicamente a una variación en la cota de inundación y a un posible 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 calcular con exactitud el valor actual de este parámetro a lo largo de la costa española es necesario recurrir a un modelo probabilístico que considere las funciones de distribución de las variables deterministas, como lo es la marea astronómica, y de las variables aleatorias, como lo son el oleaje, y por lo tanto el run- up y la marea meteorológica. Asimismo, para calcular la posible variación de la cota de inundación, se deberían estimar las tendencias del oleaje y de la meteorológica con unas bandas de confianza del 95% y aplicar la misma metodología (de probabilidad conjunta) a esta situación futura. No obstante, dado que el alcance del presente documento es el plasmar cuáles pueden ser el efecto del cambio climático en la cota de inundación, y no el obtener unos mapas detallados de la cota de inundación a lo largo del litoral, se ha asumido, como primera aproximación, cierto periodo de retorno para las variables consideradas y que la cota de inundación es la suma lineal de estas variables. De forma que se obtiene la siguiente formulación par la cota de inundación:

$$CI = MA + MM + RU \quad (1)$$

Donde:

CI= cota de inundación (m)

MA= marea astronómica (m)

MM= marea meteorológica (m)

RU= run up (M)





Asumiendo que el run –up puede ser representado a partir de la formulación propuesta por Nielsen (1991) y considerando que el parámetro representativo del estado de mar es la altura de ola significativa del 2% se obtiene que:

$$CI = MA + MM + 0.0792 \left(H_s \frac{9.81T^2}{2\pi} \right)^{0.5} \quad (2)$$

Donde:

H_s = altura de ola significativa (m)

T = periodo de pico asociado (s)

Aplicando el método de las perturbaciones a la siguiente formulación y asumiendo que en un futuro se pueda producir un aumento del nivel medio se obtiene la siguiente expresión que permite calcular la posible variación adimensional de la cota de inundación:

$$\frac{\delta CI}{CI} = \frac{\delta MM + \delta \eta + 0.0396 \left(\frac{gT^2}{2\pi} \right)^{0.5} \frac{\delta H_s}{\sqrt{H_s}}}{MA + MM + 0.0792 \left(H_s \frac{9.81T^2}{2\pi} \right)^{0.5}} \quad (3)$$

Donde:

δCI = variación de la cota de inundación (m).

δMM = variación de la marea meteorológica (m).

δH_s = variación de la altura de ola significativa(m).

$\delta \eta$ = variación del nivel medio (m).

Nótese que esta expresión representaría un valor aproximado de la cota de inundación, ya que como se ha mencionado anteriormente, su cálculo preciso requeriría un tratamiento estadístico más sofisticado.

Con objeto de reflejar la importancia de los posibles cambios en la cota de inundación en el litoral español, se ha evaluado con los datos obtenidos en el análisis realizado en la Fase I, la variación adimensional que experimentará la cota de inundación para un escenario de cambio climático, considerando variables extremas de la altura de ola significativa y de la marea meteorológica con un periodo de retorno de 50 años. El escenario de cambio climático considerado corresponde a aquel en el que se producen los cambios medios





estimados en el análisis realizado en la Fase I y se ha asumido que el nivel medio aumenta a una tasa de 0,004 m/año, que corresponde a la tendencia media obtenida por el panel Intergubernamental del Cambio Climático (PICC). Dado que la incertidumbre a la hora de cuantificar esta tendencia es muy elevada, los valores obtenidos en el cálculo realizado deben entenderse como valores orientativos del orden de magnitud del cambio. Por otro lado cabe destacar que el nivel de la marea astronómica se ha considerado igual a la pleamar media viva equinoccial correspondiente a cada fachada del litoral. En la figura 1 se muestra la variación adimensional de la cota de inundación a lo largo del litoral español.

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



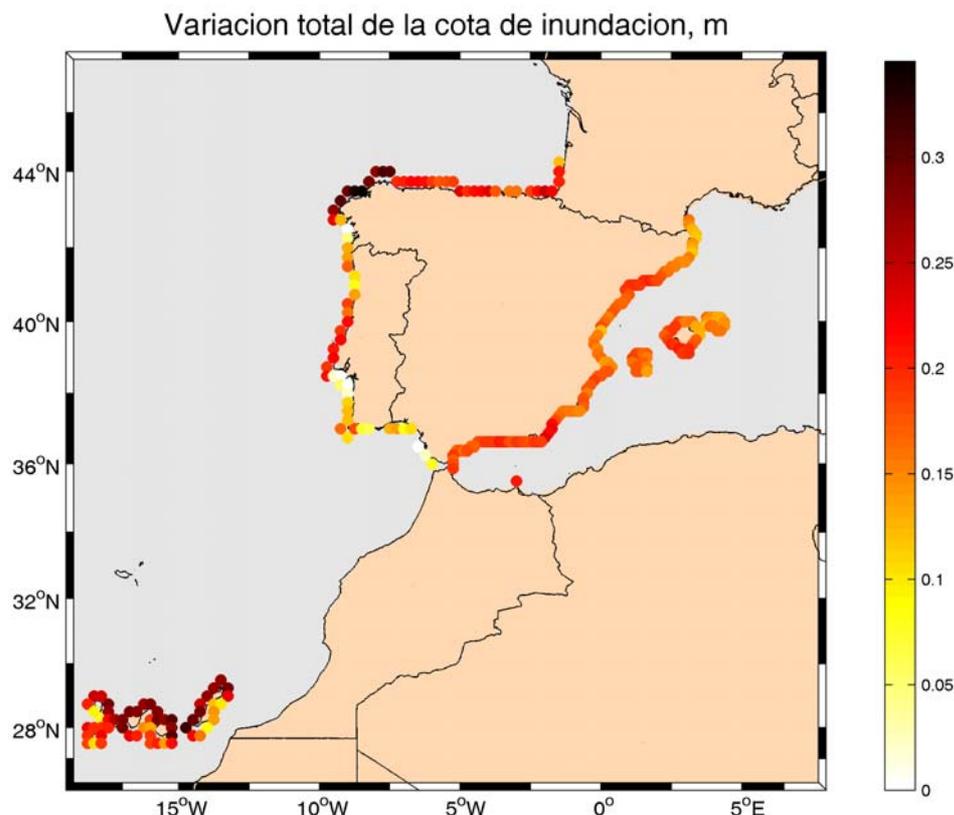


Figura 1. Variación neta de la cota de inundación a lo largo del litoral español.

Otro efecto en las playas es el posible **retroceso** de la línea de costa. Este puede ser inducido por un 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. Este efecto puede ser cuantificado haciendo uso de la regla de Bruun, que propone la siguiente expresión para el retroceso de la playa:

$$RE = \frac{\Delta\eta \cdot W_*}{h_* + B} = \Delta\eta \frac{(1.57H_{s12})^{1.5}}{(0.51w^{0.44})^{1.5} (1.57H_{s12} + B)} \quad (4)$$

Donde:

RE = retroceso de la playa (m).

W = velocidad de caída del grano (m/s).

H_{s12} = altura de ola significante excedida 12 horas al año (m).





- B = altura de la berma (m).
 W_* = extensión del perfil activo de la playa (m).
 h_* = profundidad de corte de la playa (m).

Según esta expresión, 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, se presenta a continuación en la figura 2, el valor estimado para el retroceso a lo largo del litoral español, considerando una playa tipo con un tamaño de grano de 0,3 mm, una berma de 1 m de altura de ola, donde la profundidad de corte viene determinada por la H_{s12} calculada en la Fase I y considerando la misma tasa de aumento para el nivel medio mencionada anteriormente, siendo el año objetivo el 2050.

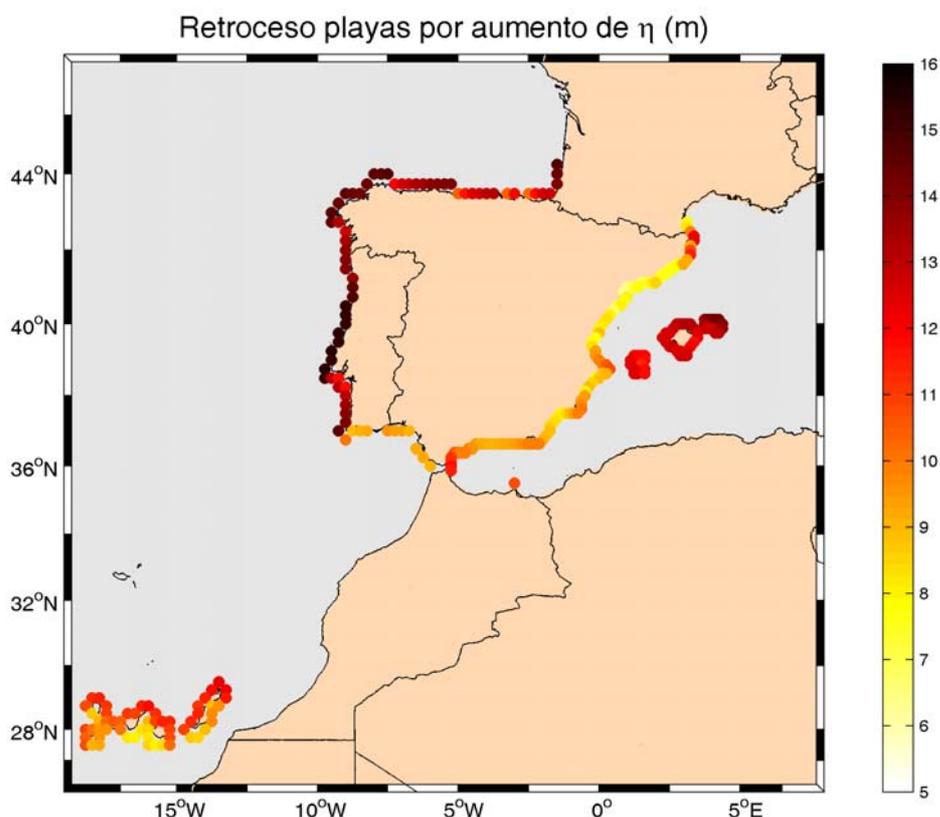


Figura 2. Retroceso de las playas por aumento del nivel medio a lo largo del litoral español.

Esta figura indica que 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. Tal como se ha indicado en el capítulo III, 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. La expresión que en este caso permite estimar el cambio es la siguiente:

$$RE_{\max} = \frac{L}{2} \operatorname{tg}(\Delta\beta) \tag{5}$$

Donde:

L= longitud de la playa (m)

$\Delta\beta$ = Variación en la dirección del flujo medio de energía (°).

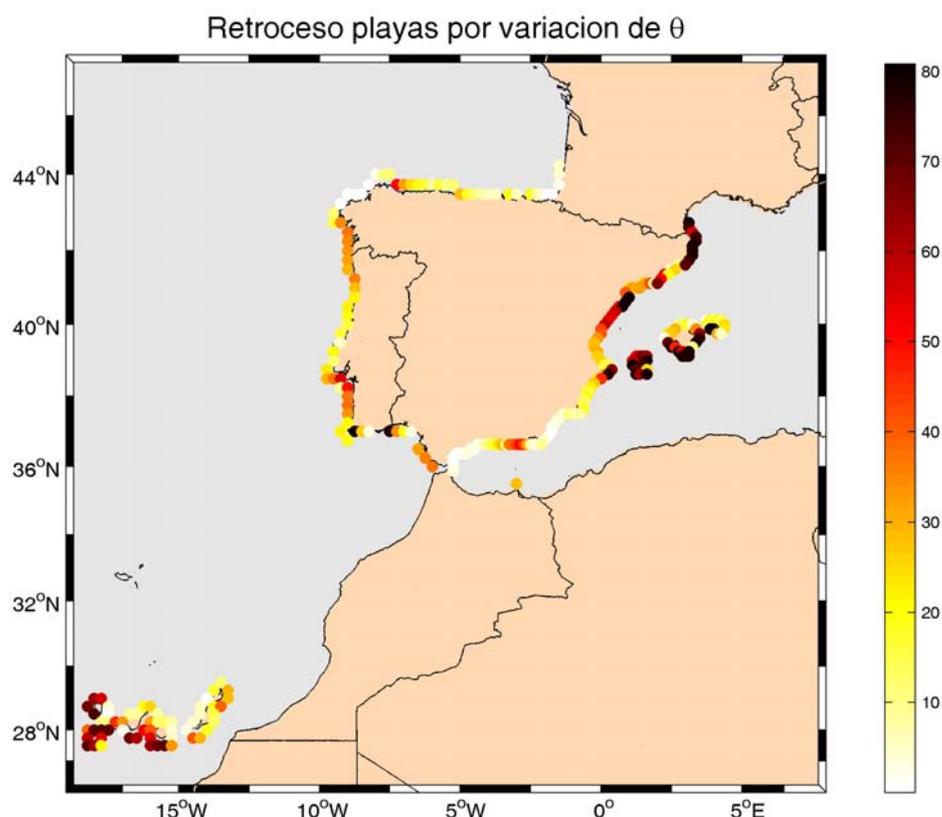


Figura 3. Retroceso de las playas por variación de la dirección del flujo medio de energía.





En la figura 3 se muestra el retroceso máximo esperado para el año 2050, en la que se ha considerado que la variación de la dirección del flujo medio de energía corresponde a la variación media calculada en la Fase I, una playa tipo de 1000 m de longitud, y se ha aplicado la ley de Snell para calcular la variación del flujo medio a 10 m de profundidad.

Obsérvese que 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 alcanzar hasta 70 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.

En cuanto a las playas encajadas colmatadas de arena, existe otro factor que corresponde al posible aumento de la profundidad de corte de la playa, que induciría grandes retrocesos en este tipo de playas. Para cuantificar este retroceso se asume que el perfil de la playa no cambia en forma, sólo cambia la extensión del perfil activo. También se asume que los cabos o diques que contiene la playa sólo son capaces de contenerla hasta cierta profundidad y que esta se verá aumentada si se produce un aumento del la H_{s12} , ya que ello sería indicativo de que la zona baja del perfil sería más activo más horas al año. La expresión que nos permite cuantificar dicho retroceso es la siguiente:

$$RE = 2.9508 \frac{\sqrt{H_{s12}} \delta H_{s12}}{(0.51w^{0.44})^{3/2}} \quad (6)$$

Donde:

H_{s12} = altura de ola significativa excedida 12 horas al año (m).

δH_{s12} = variación de la altura de ola significativa excedida 12 horas al año (m).

Según la formulación propuesta el retroceso será mayor cuanto mayor sea la altura de ola significativa que es excedida en la playa y cuanto menor sea el tamaño de grano que compone la misma. Por otro lado, cabe destacar que este retroceso es proporcional a la variación de la altura de ola significativa que es superada 12 horas al año. Este factor puede tener importantes consecuencias en la cornisa Atlántica, donde la profundidad de corte es elevada y las playas están mayoritariamente encajadas y constituidas por arenas finas. Considerando una playa tipo caracterizado por una H_{s12} de 5 m y un tamaño de grano de 0,3 mm, si se produjese un aumento del 7 % en la altura de ola significativa, el retroceso generado sería del orden de 56,47 m. En el Mediterráneo, la altura de ola superada 12 horas al año es menor que en el Cantábrico. Dado que el retroceso en este caso es proporcional a la raíz cuadrada del H_{s12} , se estima que el retroceso máximo en la costa Mediterránea sea menor, del orden de 15 m aproximadamente.





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. Tal como muestra la formulación perturbada para el transporte potencial, el cambio en la tasa de transporte puede ser consecuencia de variaciones en la altura de ola en rotura y el la dirección del oleaje en rotura:

$$\frac{\delta Q}{Q_a} = \frac{2.5}{H_{b,a}} (\delta H_b) + 2\delta\alpha_r \frac{1}{\text{tg}(2\alpha_r)} \quad (7)$$

Donde:

δQ = variación del transporte potencial (m²/s).

Q_a = transporte potencial actual (m²/s).

$H_{b,a}$ = altura de ola en rotura actual (m).

δH_b = variación de la altura de ola en rotura (m).

α_r = ángulo de incidencia del oleaje en rotura (°).

$\delta\alpha_r$ = variación del ángulo de incidencia del oleaje en rotura (°).

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. Con esto ha sido posible la elaboración de un mapa orientativo del porcentaje de cambio en el transporte potencial a lo largo del litoral, ver figura 4.



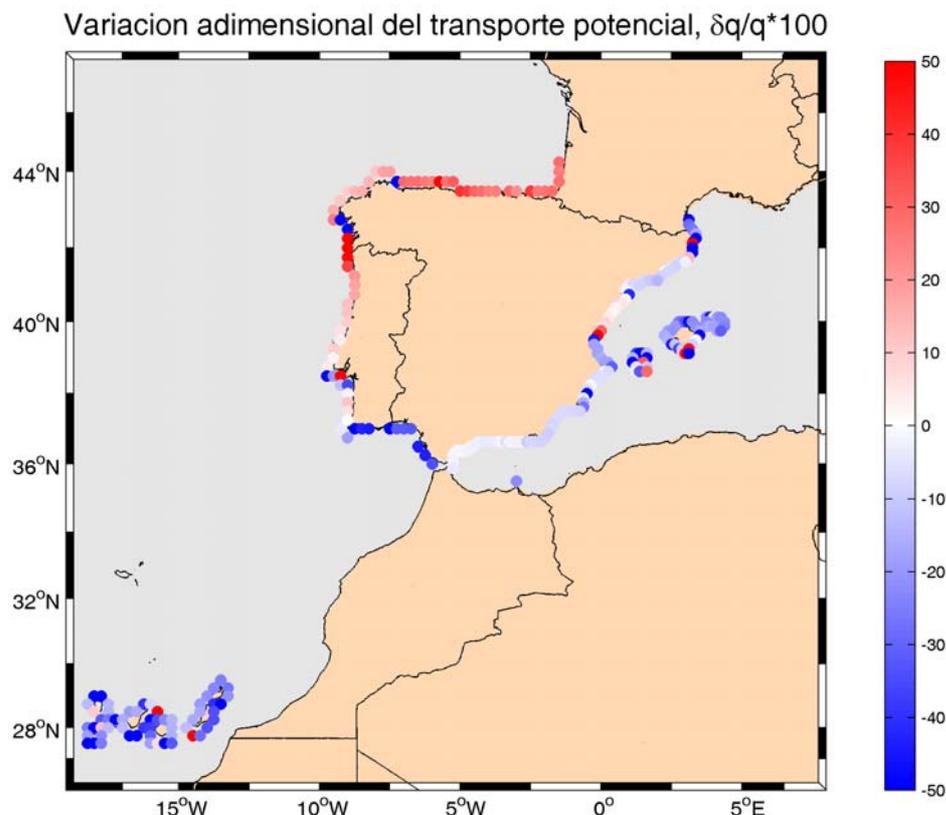


Figura 4. Retroceso de las playas por aumento del nivel medio a lo largo del litoral español.

Según la figura obtenida, 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 sometidas 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, siendo imposible establecer valores globales a los cambios mencionados. Por ello, para cada playa en particular, es esencial aplicar las formulaciones obtenidas en esta sección, en concreto en el capítulo III, y en su caso los ábacos correspondientes. Por otro lado, ya que el cambio climático también puede tener un efecto en el estado morfodinámico modal de la playa así como los cambios con respecto a esa forma modal, es necesario que a la hora de analizar cada playa en concreto, se consideren dichos efectos.





1.3 Efectos en estuarios

El análisis realizado en el capítulo 4 de esta sección 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:

1. 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. El déficit de arena se puede cuantificar a partir de la siguiente formulación:

$$\Delta V_m = (\Delta \eta - \alpha)(A_b - 0.025 A_b \sqrt{A_b}) \cdot 10^6 \quad (8)$$

donde: V_m = volumen de las llanuras mareales (m^3)

$V_{m,eq}$ = volumen de equilibrio de las llanuras mareales (m^3)

ΔV_m = déficit de volumen de las llanuras mareales (m^3)

Por ejemplo, considerando un estuario con un área total de $1,2 \text{ Km}^2$ y un prisma de marea de $3.600.000 \text{ m}^3$, 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 $0,2 \text{ m}$ en los siguientes 46 años, se produciría un déficit de arena en las llanuras mareales de 240.000 m^3 .

2. 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**, que en base a la formulación propuesta por O'Brien (1969) se obtiene que dicha variación es:

$$\frac{\Delta A_{eq}}{A_{eq,act}} = \frac{A_f \cdot 10^6}{\Omega_{act}} (\Delta \eta - \alpha) = \frac{\Delta \Omega}{\Omega_{act}} \quad (9)$$

donde: $A_{eq,act}$ = área de la sección de equilibrio actual (m^2).





$A_{eq, fut}$ = área de la sección de equilibrio actual (m^2).

Ω_{act} = prisma de marea actual (m^3).

$\Delta\Omega$ = variación del prisma de marea (m^3).

Es decir, el aumento adimensional del área de la sección crítica es igual al aumento adimensional del prisma de marea. Siguiendo el mismo ejemplo indicado en el apartado anterior, en el que se suponía un aumento de 20 cm del nivel medio para el año futuro del 2050, en el estuario tipo considerado se produciría un aumento de la sección crítica del 6%.

3. 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. En este caso, dicho déficit de arena puede ser estimado por la siguiente formulación:

$$\Delta V_e = K (\Omega_{act} + (\Delta\eta - \alpha)(A_b - 0.025A_b\sqrt{A_b}) \cdot 10^6)^{1.23} - K (\Omega_{act})^{1.23}$$

$$\frac{\Delta V_e}{V} = 1.23 \frac{\Delta\Omega}{\Omega_{act}} \quad (10)$$

donde ΔV_e = variación del volumen del bajo exterior (m^3).

Esta formulación indica que la variación adimensional del volumen del bajo exterior es proporcional a la variación adimensional del prisma de marea, siendo el coeficiente de proporcionalidad de 1,23. Para el caso anteriormente mencionado, la variación del volumen del bajo exterior es de aproximadamente del 8%, es decir, en esta caso aumentaría 62.000 m^3 .

4. 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. Este retroceso puede ser cuantificado a partir de la siguiente expresión:

$$RE_a = \frac{\Delta V_{eq}}{L(1.57H_{s12} + B)} \quad (11)$$

donde RE_a = retroceso adicional (m).

L = longitud de la playa (m).





h_* = profundidad de corte de la playa (m).

B = altura de la berma (m).

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.

5. Otro aspecto de relevancia en los estuarios es el **regimen 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 regimenes 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 equilibrio de la cuña salina, para el caso de canales rectangulares de profundidad constante, puede ser calculada a partir de la expresión propuesta por Keulegan (1966):

$$LA = d \frac{0.88}{280(R_d)^{-1} + 0.148(R_d)^{-1/4}} (2F_d)^{-5/2} \quad (12)$$

Donde:

LA = extensión de la cuña salina (m)

Rd = Número adimensional de Richardson.

F_r = Número adimensional de Fraude

d = profundidad total (m)

Según esta expresión, 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. En la figura 5 se muestra de forma gráfica dicha relación y permite determinar la extensión de la cuña en función de la velocidad del río V_r y de la profundidad a lo largo del estuario



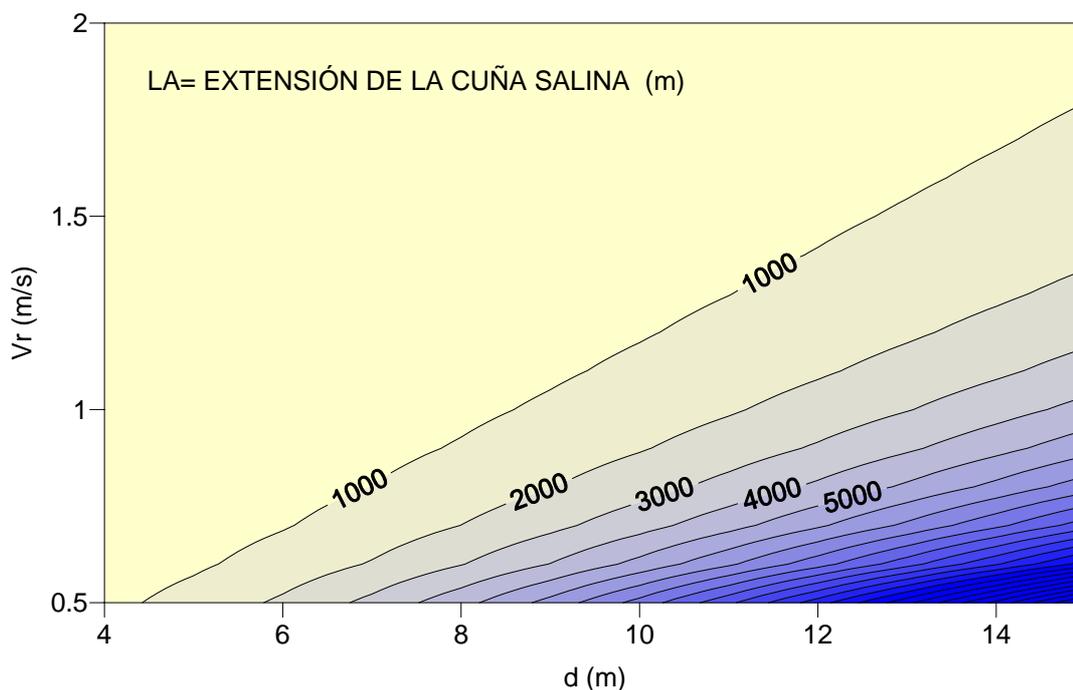


Figura 5. Variación de la extensión de la cuña salina en función de la velocidad del río y de la profundidad.

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.

En la tabla 4.2, del capítulo IV se resumen todas las conclusiones obtenidas, indicando la formulación que nos permite cuantificar los efectos así como la localización a lo largo del texto de las gráficas correspondientes.





1.4. Efectos en dunas

En cuanto al crecimiento de las dunas cabe mencionar que la intensidad y la dirección del viento son los principales parámetros que gobiernan el **transporte eólico** de sedimentos desde la playa hacia los sistemas dunares. Por ello, si estas dos son modificadas por efecto del cambio climático, también lo hará la capacidad de transporte desde la playa hacia las dunas, reduciendo o intensificando la tasa de crecimiento de las mismas. Si por ejemplo, la intensidad del viento disminuye, también disminuye la capacidad de transporte. Por otro lado, si la dirección del viento cambia intensificando la componente paralela a la costa, también se reducirá la capacidad de transporte ya que la que en realidad transporta sedimento desde la playa al trasdos es la perpendicular a la línea de costa. Para cuantificar dicha variación se puede hacer uso de la siguiente expresión:

$$\frac{\delta q_n}{q_n} = 3 \frac{\delta U_z}{U_z} - \delta \alpha \operatorname{tg} \alpha \quad (13)$$

Donde:

q_n = Transporte potencial perpendicular a la costa (m^2/s).

δq_n = variación del transporte potencial perpendicular a la costa (m^2/s)

U_z = Velocidad del viento a la altura z (m/s)

δU_z = Variación de la velocidad del viento a la altura z (m/s)

$\delta \alpha$ = Variación en el ángulo de incidencia del oleaje ($^\circ$)

α = ángulo de incidencia del viento con respecto a la costa ($^\circ$)

Por otro lado, en el análisis a largo plazo y haciendo uso de la regla de Bruun (1962), se ha demostrado que un aumento en el nivel medio del mar, puede generar una **erosión dunar** y que la magnitud de la misma depende de los siguientes parámetros:

- La extensión de la playa seca
- El tamaño del sedimento que compone la playa
- La altura de la berma y de la duna
- La altura de ola significativa que es excedida 12 horas al año.

Las dunas más sensibles a la erosión, son aquellas situadas en el trasdos de playas disipativas, compuestas por arenas finas donde la profundidad de corte es elevada, con poca extensión de playa seca y bermas bajas.

En las tablas 5.1 y 5.2 del capítulo 5 se muestra un resumen de los posibles efectos, indicando las fórmulas que permiten estimar los efectos, el orden de magnitud de los





efectos, así como la localización a lo largo del texto de las figuras indicativas de las fórmulas.

1.5. Efectos 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. Haciendo uso de la formulación empírica obtenida por Franco et al (1994), se obtiene 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 variables de clima marítimo calculadas en la Fase II, se ha elaborado la figura 6, que representa la variación adimensional del rebase a lo largo de todo el litoral español, donde se pone de manifiesto que esta variable 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).



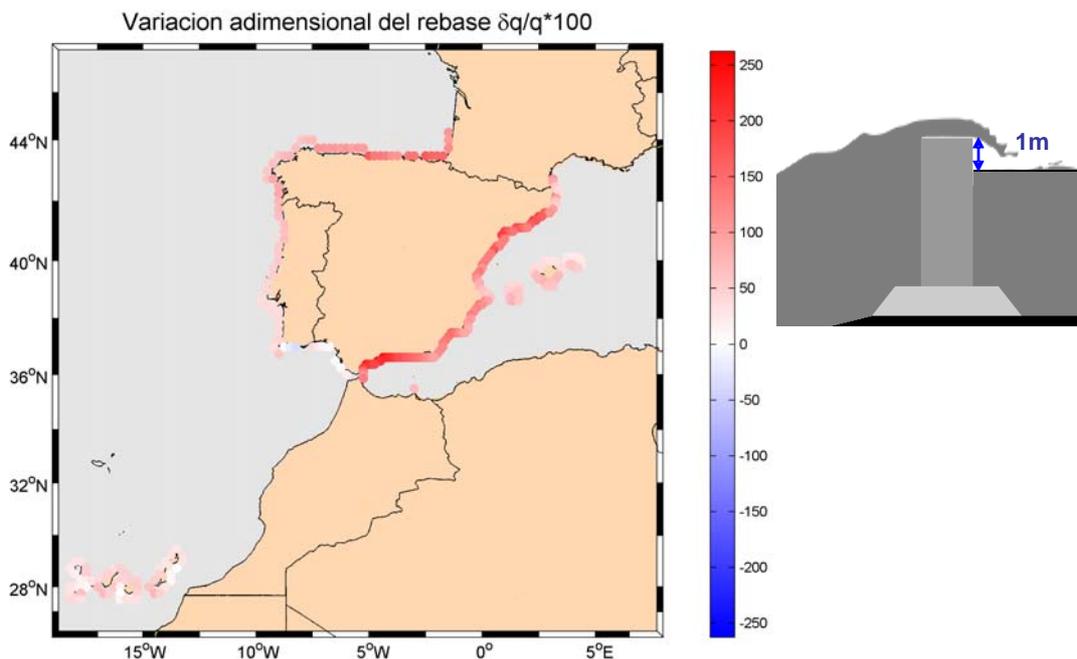


Figura 6. Porcentaje de variación adimensional del rebase a lo largo del litoral español. Altura de ola de cálculo limitada por fondo.

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 el mismo criterio de estabilidad **el tamaño de las piezas** que componen una obra deberá aumentar. La relación entre la variación del peso de las obras y el aumento del nivel medio viene dado por la siguiente expresión:

$$\frac{\delta W_{50}}{W_{50}} = 3 \left(\frac{\Delta \eta}{h} \right) \tag{14}$$

Donde:

- H = profundidad a pie de dique (m).
- W_{50} = Peso medio de las piezas del manto superior (Kg).
- δW_{50} = variación del peso de las piezas (Kg).
- $\Delta \eta$ = variación del nivel medio (m).





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 los 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, siendo la relación la siguiente:

$$\frac{\delta W_{50}}{W_{50}} = 3 \left(\frac{\delta H_{ic}}{H_{ic}} \right) \quad (15)$$

Considerando como año objetivo el año 2050, y en base a 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 construido la figura 7, en la que se muestra el porcentaje de la variación adimensional del peso de las piezas de una estructura en talud a lo largo de la costa española. Obsérvese que en general, en la cornisa Cantábrica se necesitará 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%.

Este posible aumento de la pieza de las obras se traduce inmediatamente en un **aumento del área total de la obra**, es decir, de las dimensiones de las obras, cuyos patrones tipo serán similares a los presentados para el aumento del peso de las piezas del manto exterior.



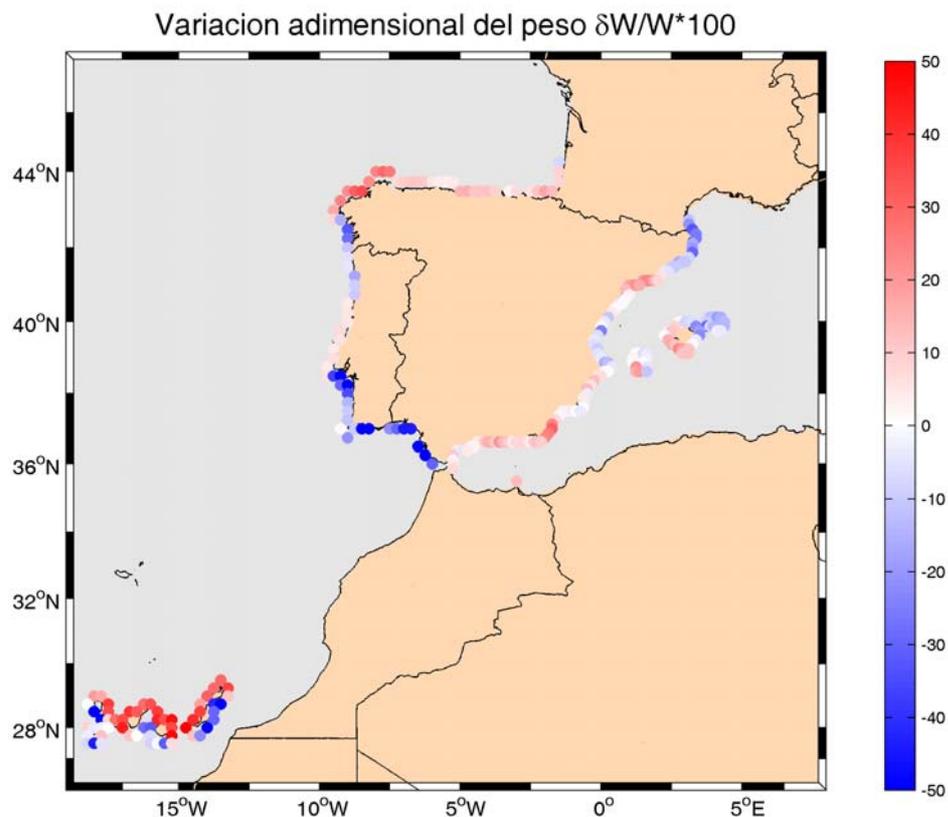


Figura 7. Porcentaje de variación adimensional del peso a lo largo del litoral español.
 Altura de ola de cálculo no limitada por fondo.

En la tabla 6.6 se resumen los aspectos más representativos de estudio realizado, indicando cuáles son las variables funcionales que pueden afectarse por el cambio climático, cuáles son las variables hidrodinámicas que inducen a estos efectos y qué formulación puede ser utilizada para calcular estos efectos. Asimismo, se indican las localizaciones de las gráficas y ábacos a lo largo del texto.

