

ÍNDICE

1. FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS	1
1.1. CAUSAS DE LAS SOBREELEVACIONES DEL NIVEL DEL MAR	1
1.1.1. MAREA ASTRONÓMICA.....	1
1.1.2. DEPRESIÓN BAROMÉTRICA.....	3
1.1.3. VIENTO DE MAR A TIERRA	4
1.1.4. EFECTO CORIOLIS.....	4
1.1.5. OLEAJE.....	5
1.1.6. OTRAS CAUSAS	6
1.2. MEDICIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS SOBREELEVACIONES.....	7
1.3. CRITERIOS DE INUNDABILIDAD	9
1.3.1. Riberas en costa abierta	9
1.3.2. Riberas en entrantes de agua	9
2. INFORMACIÓN UTILIZADA	10
2.1. NIVELES DEL MAR.....	10
2.2. COTAS DEL TERRENO	15
2.3. USOS DEL SUELO.....	16
3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL GEOPROCESAMIENTO DE DATOS	16
3.1. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS INUNDABLES	16
3.2. VALORACIÓN DE LAS ÁREAS POTENCIALMENTE INUNDABLES	18
4. SELECCIÓN DE LAS ÁREAS CON RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN	19

APÉNDICES

- Apéndice 1. Procedimiento de trabajo GIS para delimitar las zonas inundables
 Apéndice 2. Mapas de ubicación de las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación marina.
 Apéndice 3. Cálculo de la cota de inundabilidad por mareas y oleaje en entrantes (ensenadas, rías y estuarios).

ILUSTRACIONES Y TABLAS

Ilustración 1. Puntos de predicción de marea astronómica	2
Ilustración 2. Mapa meteorológico (AEMET)	3
Ilustración 3. Mapa meteorológico 2 (AEMET)	4
Ilustración 4. Mapa de corrientes (ESEO)	5
Ilustración 5. Mareógrafos de Puertos del Estado.....	7
Ilustración 6. Boyas de oleaje de Puertos del Estado	8
Ilustración 7. Zonificación del litoral español por cota de inundación.....	122
Ilustración 8. Régimen medio del nivel de marea.....	122
Ilustración 9. Régimen extremal del nivel de marea.....	133
Ilustración 10. Orientaciones significativas de la costa	133
Ilustración 11. Régimen extremal de cota de inundación	144
Tabla 1. Cotas de inundación por marea y por oleaje	144
Tabla 2. Área con Riesgo Potencial Significativo de Inundación.....	20

1. FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

Consultado el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas se ha llegado a la conclusión de que la información sobre inundaciones en zonas costeras de origen marítimo, es decir, producidas por niveles extremadamente altos de la superficie del mar, es prácticamente inexistente. Las inundaciones en zonas costeras que aparecen registradas son siempre por desbordamiento de ríos o torrentes cerca de la desembocadura y éstas ya han sido incluidas en el inventario realizado para las inundaciones de origen fluvial.

Por otra parte, la aplicación de métodos geomorfológicos para identificar indicios de inundaciones pasadas en zonas costeras resulta poco eficaz porque, si la costa es elevada, no se han producido inundaciones, y si la costa es baja, el intenso desarrollo urbanístico y las numerosas regeneraciones de playas que se han llevado a cabo durante las últimas décadas ha hecho que, por un lado, hayan desaparecido dichos indicios y, por otro, que la topografía y las características hidráulicas (permeabilidad, rugosidad, pendiente) del terreno se hayan modificado sustancialmente.

En consecuencia, la evaluación preliminar de riesgos de inundación en las zonas costeras de esta Demarcación Hidrográfica se ha hecho fundamentalmente comparando los niveles del mar excepcionalmente elevados (período de retorno de 500 años) con las cotas actuales del terreno.

1.1. CAUSAS DE LAS SOBREELEVACIONES DEL NIVEL DEL MAR

1.1.1. MAREA ASTRONÓMICA

La marea astronómica se produce por la atracción que ejercen los astros (fundamentalmente la Luna, porque está cerca, y el Sol, porque tiene una gran masa) sobre los océanos. El efecto combinado de esta atracción con la rotación de la Tierra hace que en latitudes medias como las de España se manifieste como una sucesión de oscilaciones del nivel del mar con un máximo (pleamar) y un mínimo (bajamar) en cada ciclo. El período medio de oscilación es de aproximadamente doce horas y media. La carrera de marea (diferencia de cotas entre una pleamar y una bajamar sucesivas) en una localización determinada es mayor cuando los tres astros están alineados (Luna Nueva y Luna Llena), lo que se denomina marea viva. En Cuarto Creciente y en Cuarto Menguante las fuerzas atractivas son perpendiculares entre sí y como consecuencia, las carreras de marea son menores (marea muerta).

En la costa atlántica las mareas vivas son del orden de 3,5 metros, con pequeñas variaciones locales que dependen de la forma de la costa. En el Mediterráneo, sin embargo, son del orden de 0,3 metros. La diferencia se debe a que en la costa atlántica se acumula el efecto que la fuerza atractiva va ejerciendo a lo largo de todo el Océano Atlántico, mientras que en el Mediterráneo, esta acumulación se nota poco por el tamaño relativamente pequeño de su cuenca.



La evolución de los niveles de la marea astronómica en un emplazamiento concreto puede expresarse como suma de un conjunto de varias decenas de componentes senoidales;

$$\eta = \sum_m A_m \cos\left(\frac{2\pi}{T_m} t - \varphi_m\right)$$

donde η es el nivel del agua, T_m es el período de la componente de orden m .

La amplitud A_m y la fase φ_m de cada componente se determinan a partir de un análisis de los niveles registrados durante largos períodos de tiempo, usualmente un año. Una vez calculadas se pueden hacer predicciones muy exactas para decenas de años y a partir de estos datos, se pueden realizar análisis estadísticos de niveles con gran precisión.

En la figura siguiente se muestra un mapa de los puntos de la costa española donde es posible obtener datos de predicción suministrados por el departamento de Oceanografía y Meteorología de Puertos del Estado.

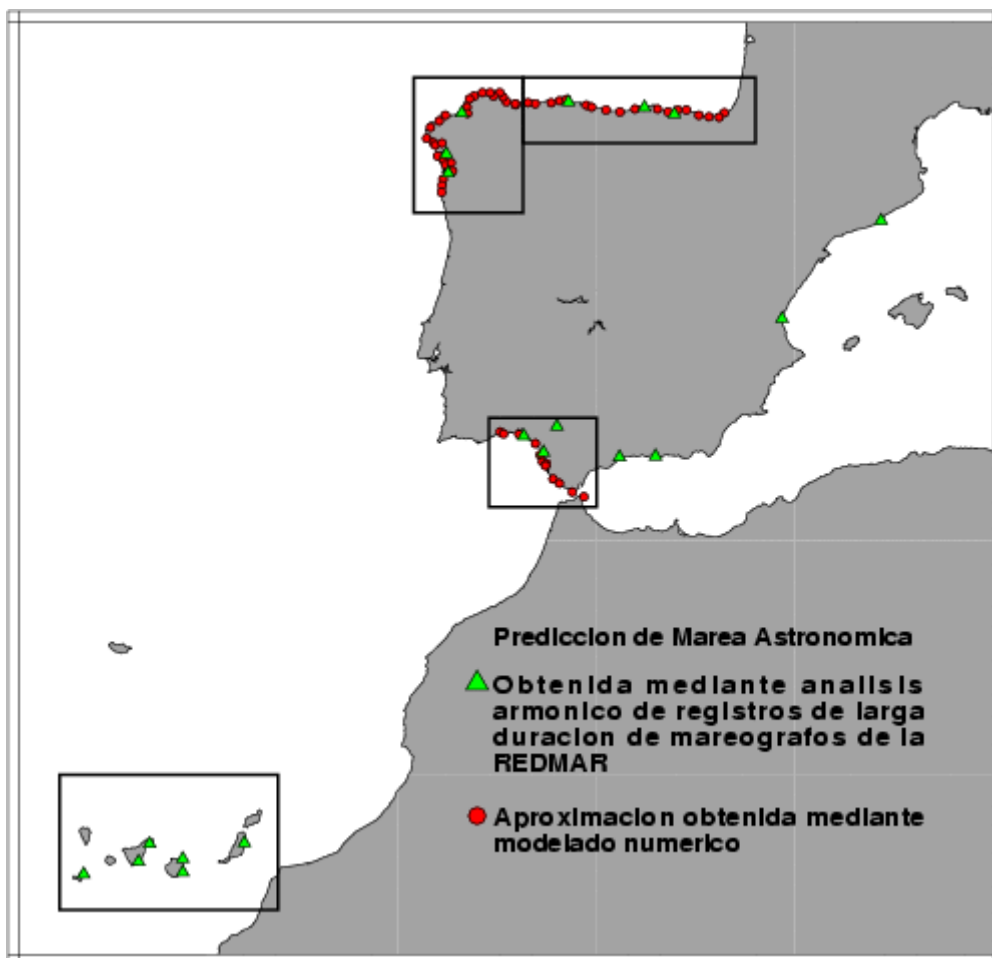


Ilustración 1. Puntos de predicción de marea astronómica

1.1.3. VIENTO DE MAR A TIERRA

Cuando se da una situación como la de la figura siguiente en la costa cantábrica en la que el viento sopla en dirección a tierra sobre una gran extensión de superficie marina, se produce una acumulación de agua en la costa hasta que se alcance una contrapendiente que contrarreste la fuerza que el viento ejerce sobre las aguas.

La expresión matemática de esta contrapendiente es:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{C_{\rho_{\text{aire}}} W_x^2}{\rho g H} \approx 10^{-7} \frac{W_x^2}{H} \quad (S.I.)$$

donde W_x es la velocidad del viento y H la profundidad del agua.

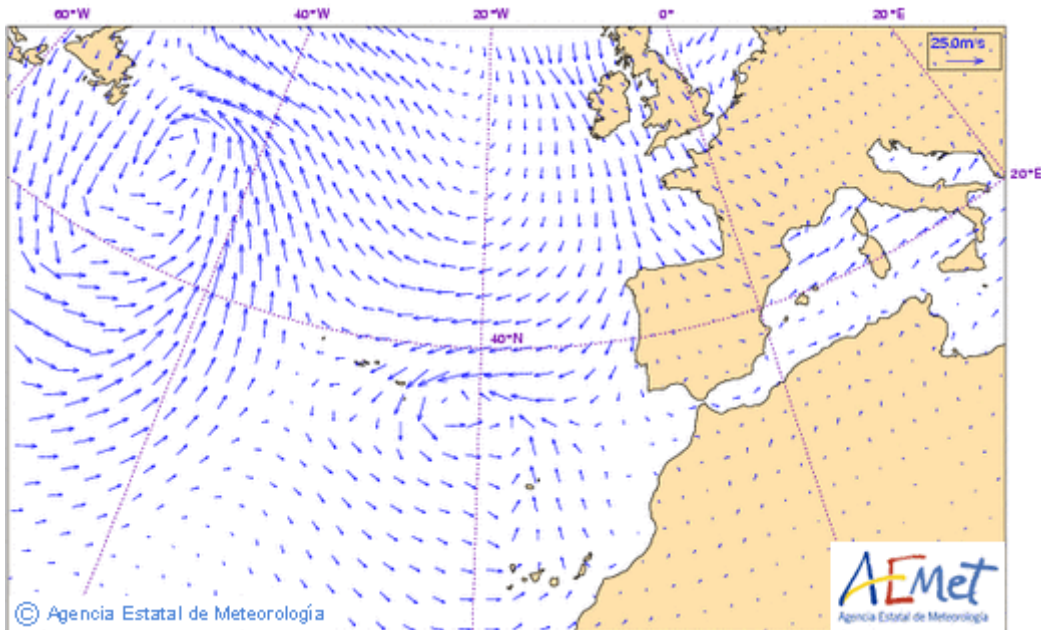
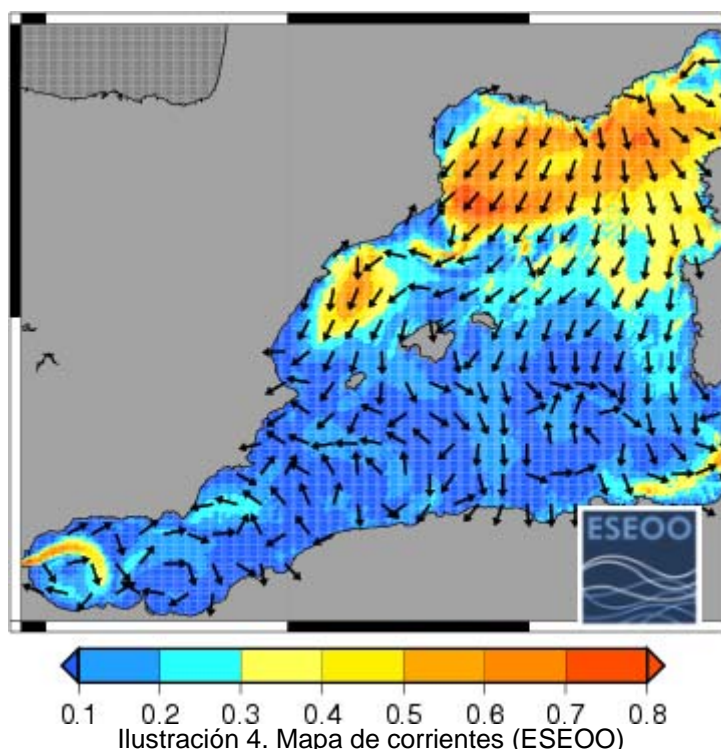


Ilustración 3. Mapa meteorológico 2 (AEMET)

1.1.4. EFECTO CORIOLIS

Cuando existe una corriente costera como sucede en la costa de las provincias de Tarragona y Castellón en la figura siguiente, el efecto Coriolis tiende a desviar la corriente hacia su derecha, pero si, como ocurre en la figura, la costa se encuentra a la derecha, lo que sucede es que se produce una acumulación de agua en la costa hasta que la contrapendiente anula la acción del efecto Coriolis. Matemáticamente puede expresarse como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{fv}{g} \approx 10^{-5} v \quad (S.I.; \lambda = 40^\circ)$$



1.1.5. OLAJE

La presencia de oleaje representa un flujo de energía que se dirige hacia la costa. Cuando ésta es abrupta y el mar tiene suficiente calado (acantilados, diques verticales), las olas se reflejan sin romper pero su amplitud se duplica.

En caso contrario, las olas rompen y tras la rotura, la lámina de agua, que posee una cierta energía cinética, se desplaza sobre la playa hasta alcanzar un nivel máximo. Después retrocede debido a la pendiente de la playa hasta que se encuentra con la ola siguiente. La cota R del nivel máximo que alcanza la lámina de agua para una ola determinada tomando como referencia el nivel medio del mar se llama *remonte* (“run-up” en la literatura anglosajona) y varía de forma aleatoria. Su valor medio \bar{R} se denomina *remonte medio* (“setup” en la literatura anglosajona) y es siempre positivo debido a que la energía que lleva la ola cuando remonta es superior a la que trae cuando retrocede.

Se han propuesto (Guza y Thornton, 1981 y 1982) las siguientes expresiones para estimar el remonte medio \bar{R} y el remonte significativo R_s (promedio del tercio de los remontes más altos):

$$\bar{R} = 0,17H_0 \qquad R_s = 3,48 + 0,71H_0 \quad (\text{en cm})$$

siendo H_0 la altura de ola significativa en aguas profundas.



De estas expresiones se deduce que el remonte medio es aproximadamente igual a la cuarta parte del remonte significativo.

Estudios posteriores (Holman, 1986; Ruggiero, Holman y Beach, 2004; Stockdon y otros, 2006) sugieren que la relación entre remonte y altura de ola significativa es una función lineal del parámetro de Iribarren

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} = \gamma \cdot \xi \quad \xi = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$$

donde $\operatorname{tg} \beta$ es la pendiente de la playa, L_0 la longitud de onda en aguas profundas correspondiente al período de pico, $R_{2\%}$ el valor del remonte que solo es superado por el 2% de las olas y γ una constante que varía según los autores. Una expresión de este tipo fue propuesta ya por Hunt en 1959 y por van Oorschoot y d'Angremont en 1968.

De esta expresión se deduce que el alcance horizontal máximo de la lámina de agua respecto a la posición de la línea de costa cuando no existe oleaje es independiente de la pendiente de la playa. En efecto, la segunda de dichas expresiones puede escribirse de la siguiente forma:

$$A_{2\%} = \frac{R_{2\%}}{\operatorname{tg} \beta} = \gamma \sqrt{H_0 L_0}$$

siendo $A_{2\%}$ el alcance horizontal.

Si se supone que la distribución de probabilidad para el conjunto de todas las olas correspondientes a un determinado estado de mar se ajusta a una distribución de Rayleigh, cuya densidad de probabilidad es:

$$f(R) = \frac{R \cdot \exp\{-R^2/(2\sigma^2)\}}{\sigma^2}$$

La relación entre el remonte razonablemente máximo $R_{2\%}$ y el remonte significativo R_s es

$$R_{2\%} = 1,4 R_s$$

1.1.6. OTRAS CAUSAS

Otras causas de sobreelevación del nivel del mar son los tsunamis y los efectos locales en las desembocaduras de ríos y estuarios.

Con respecto a los tsunamis, están registrados una decena de ellos que han afectado a algún punto del territorio español durante los últimos 2000 años, lo que da un período de retorno inferior a 500 años si se toma como unidad geográfica de referencia el país en su conjunto. Sin embargo, la probabilidad de que un punto

determinado cualquiera del país sea inundado por efecto de un tsunami es muy inferior (período de retorno superior a 500 años), por lo que no se tendrá en consideración esta causa de sobreelevación.

Los efectos locales en las desembocaduras se tienen en cuenta al estudiar las inundaciones fluviales suponiendo como condición de contorno un nivel del mar sobreelevado.

1.2. MEDICIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS SOBREELEVACIONES

En España existe una red de mareógrafos instalados en diferentes puertos que está gestionada por el departamento de Oceanografía y Meteorología de Puertos del Estado. La ubicación de estos mareógrafos puede verse en la figura siguiente.



Ilustración 5. Mareógrafos de Puertos del Estado

Los niveles registrados en estos mareógrafos corresponden a la suma de la marea astronómica y a lo que suele denominarse marea meteorológica, que es la suma de las sobreelevaciones debidas a depresiones barométricas, vientos de mar a tierra y efecto Coriolis. Al estar en el interior de los puertos, en áreas abrigadas de los temporales, los mareógrafos no registran el oleaje.



Un análisis estadístico de los niveles máximos registrados permite obtener el régimen extremal de niveles de marea, de donde se pueden calcular los niveles correspondientes a diferentes períodos de retorno.

Restando la marea astronómica, que como ya se ha dicho puede calcularse con una gran precisión, de los niveles registrados se obtiene una serie de residuos que corresponden a la marea meteorológica. Estos residuos pueden analizarse también estadísticamente para obtener su régimen extremal y los valores correspondientes a diferentes períodos de retorno.

Por el contrario, no existe una red similar para medir los remotes que el oleaje produce en las playas. Pero apoyándose en las expresiones que relacionan el remote con la altura de ola significativa, su análisis estadístico puede hacerse a partir del análisis estadístico de las alturas de ola, para las cuales sí existe una red de medida gestionada también por Puertos del Estado.

El oleaje se mide mediante boyas ancladas al fondo que tienen en su interior un acelerómetro que mide la aceleración que experimentan las boyas por efecto del paso de las olas. Integrando esta aceleración dos veces se obtiene el valor de la posición del nivel del mar. Como estos acelerómetros no registran las variaciones lentas, los niveles obtenidos ya tienen filtrados los efectos de la marea.

En la figura siguiente puede verse la ubicación de las boyas de esta red de medidas de oleaje.



Ilustración 6. Boyas de oleaje de Puertos del Estado

1.3. CRITERIOS DE INUNDABILIDAD

En este apartado todas las cotas que se mencionan están referidas al nivel medio del mar.

1.3.1. Riberas en costa abierta

Se han utilizado dos criterios de inundabilidad independientes en función de la duración de la sobreelevación.

El primero de ellos, que denominaremos *inundabilidad por mareas*, corresponde a las causas de sobreelevación que permanecen durante horas o días, tiempo suficiente para que el nivel del mar se propague hasta cualquier punto cuya cota se encuentre por debajo de dicho nivel. Entre éstas se consideran naturalmente las mareas astronómica y meteorológica, pero también se ha considerado como tal el valor del remonte medio, porque es un nivel que se sobrepasa aproximadamente la mitad del tiempo que dura un temporal. En consecuencia, se ha considerado que es inundable cualquier punto cuya cota sea inferior a la suma de la cota del nivel de marea de una pleamar media más el remonte medio calculado para un período de retorno de 500 años, siempre que exista una conexión hidráulica con la costa o que pueda formarse en condiciones de sobreelevación extraordinaria:

$$z < S_1 = S_{M,2\%} + \bar{R}_{\theta,500}$$

donde $S_{M,2\%}$ representa el nivel de marea que en un año promedio se sobrepasa el 2% del tiempo. El valor del remonte medio que se utiliza en cada tramo de costa es el que corresponde a la orientación de éste.

El segundo criterio de inundabilidad, que denominaremos *inundabilidad por oleaje*, corresponde al efecto del remonte de las olas. Desde este punto de vista se ha considerado inundable cualquier punto cuya cota sea inferior a la máxima cota que puede alcanzar el nivel del mar por efecto combinado de marea y oleaje con un período de retorno de 500 años, siempre que se encuentre a una distancia de la costa inferior a un valor proporcional a dicha cota:

$$z < S_2 = S_{M+R,\theta,500} \quad \text{y} \quad d < 35 S_2$$

El valor de S_2 depende también de la orientación del tramo de costa considerado.

1.3.2. Riberas en entrantes de agua

Las riberas de las masas de agua que parecen que se adentran en tierra más allá del trazado general de la línea de costa (ensenadas, rías, estuarios, zonas a resguardo de islas, etc.) tienen por la propia morfología costera un cierto grado de protección contra el oleaje. Por una parte, los temporales procedentes de direcciones oblicuas a la entrada o bocana del entrante de agua penetran muy poco en éste, por lo que la frecuencia de las alturas de ola excepcionales en el interior es menor que las que se



dan en la costa abierta. Por otra, si la anchura de la bocana es menor que la de la masa de agua protegida por ésta, el oleaje que incide normalmente a la bocana se abre en muchas direcciones; los frentes de ola pasan de ser aproximadamente planos a ser aproximadamente semicirculares y la energía del oleaje incidente se reparte de forma compleja entre estas direcciones; en resumen, se produce un fenómeno de difracción que puede modificar sustancialmente la altura de ola que llega a las riberas del entrante. Finalmente, en los tramos de ribera constituidos por playas, la profundidad que se encuentra el oleaje en su transporte desde la bocana hasta la playa va decreciendo, lo que provoca un fenómeno de refracción que también contribuye a disminuir la altura de ola.

Para tener en cuenta este grado de protección en las riberas de los entrantes se ha diseñado la metodología que se describe en el Apéndice 3 del presente documento. Es una metodología simplificada debido a que se trata de una evaluación preliminar de riesgos de inundación y a la necesidad de disponer de los resultados de los cálculos para toda la costa española en un tiempo breve. A pesar de ello, la aplicación de esta metodología ha hecho que el trabajo se haya multiplicado por 6 en comparación con el necesario para analizar toda la línea de costa como si fuera costa abierta.

2. INFORMACIÓN UTILIZADA

2.1. NIVELES DEL MAR

Los valores de los parámetros obtenidos mediante el análisis estadístico de los niveles del mar para esta evaluación preliminar de riesgos de inundación de zonas costeras se han extraído del informe *Atlas de inundación del litoral peninsular español* realizado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria para la entonces Dirección General de Costas en 1998.

En este estudio se descartaron los métodos directos de análisis extremal (método de los máximos anuales, método de los picos sobre un umbral, etc) porque las series de datos disponibles eran demasiado cortas. La metodología utilizada ha consistido en la simulación del proceso físico de inundación con base en las funciones de distribución de las variables marea astronómica, marea meteorológica, altura de ola significativa y período de pico.

Los métodos de simulación son métodos numéricos genéricos que generan una población de datos con base en las funciones de distribución de las variables que gobiernan dicha población. Estos métodos permiten un modelado más real de los procesos físicos que tienen lugar al incluir todo tipo de relación entre variables, siempre que ésta sea conocida o determinada a partir de datos medidos.

En el informe, las funciones de distribución se han determinado con base en la información disponible en las siguientes fuentes:

- Boyas de oleaje pertenecientes a la REMRO (Red Española de Registro y Medida de Oleaje, financiada por Puertos del Estado y operada por el CEDEX).
- Mareógrafos pertenecientes a la REDMAR (RED de MAREógrafos de Puertos del Estado).

- Mareógrafos pertenecientes al IEO (Instituto Español de Oceanografía).
- Datos visuales de oleaje del National Climatic Data Center de Asheville, Carolina del Norte.

El proceso general del cálculo de un régimen de niveles de cota de inundación es el siguiente:

- Estudio de la dependencia estadística entre las variables involucradas.
- Estudio de la dependencia temporal entre datos sucesivos de una variable.
- Obtención de las funciones de distribución de las diferentes variables.
- Establecimiento de formulaciones para factores de los que no hay información directa (por ejemplo oleaje a pie de playa en función de oleaje en boya, remonte en función de oleaje a pie de playa).
- Simulación temporal por el método de Montecarlo.
- Determinación de los regímenes de cota de inundación.

Teniendo en cuenta la ubicación de los diferentes puntos de medida se llevó a cabo una zonificación del litoral español cuyo resultado se indica en la ilustración 7.

Para cada una de estas zonas, mediante la simulación se obtuvieron los regímenes medio y extremal de los niveles del mar debido a la marea (astronómica más meteorológica).

Los resultados para la zona I-a, que es la aplicable a la zona costera de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental, se pueden ver en las dos figuras 8 y 9.

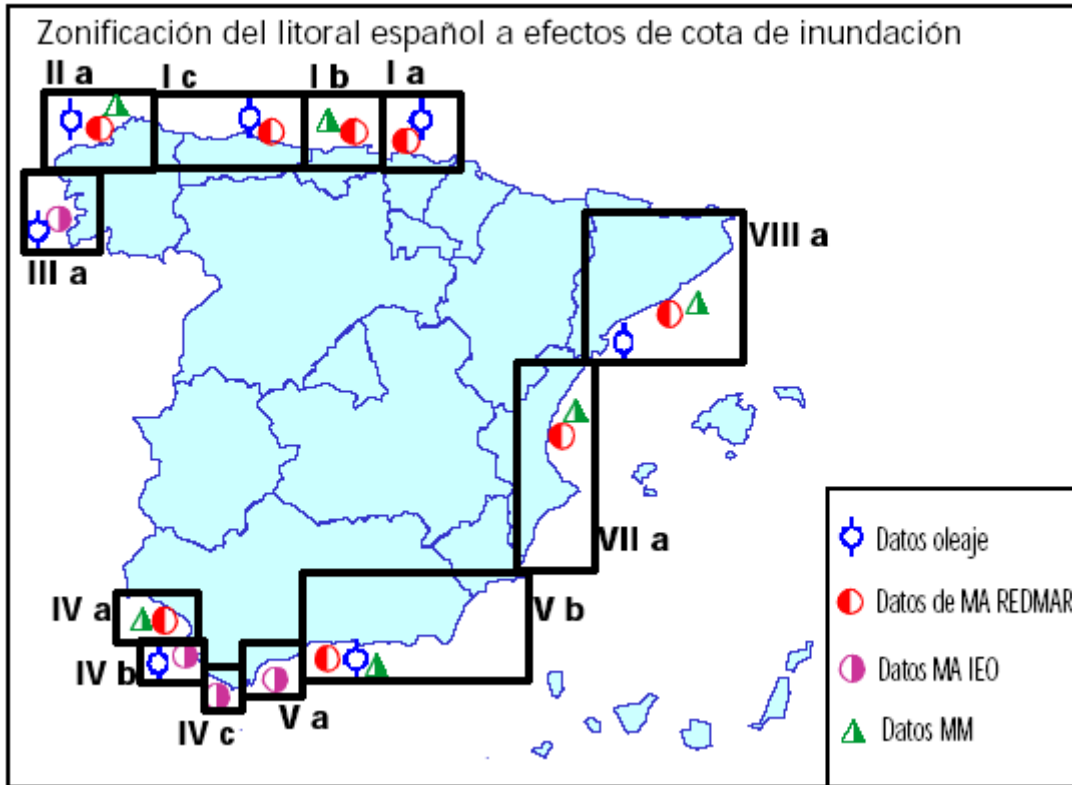


Ilustración 7. Zonificación del litoral español por cota de inundación

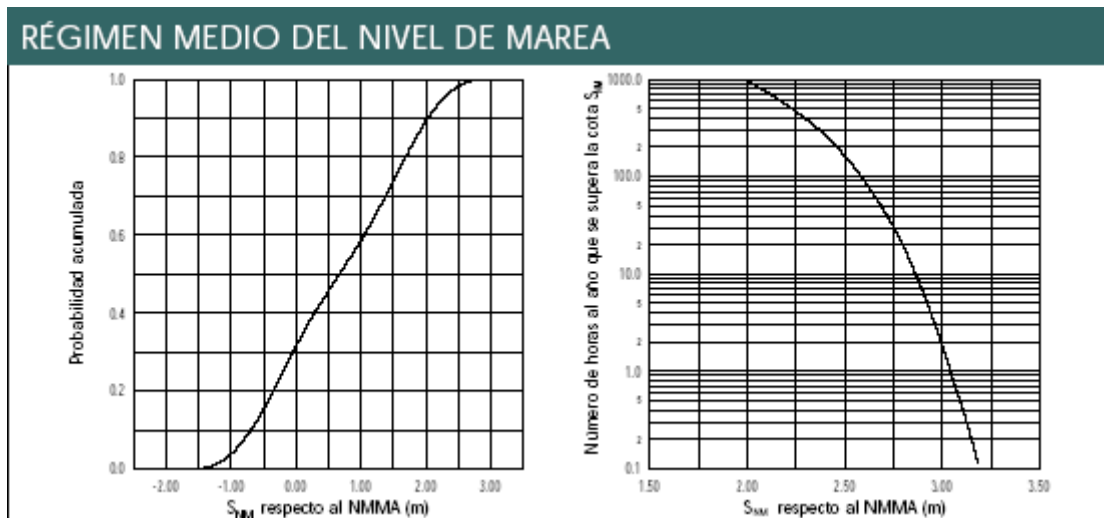


Ilustración 8. Régimen medio del nivel de marea

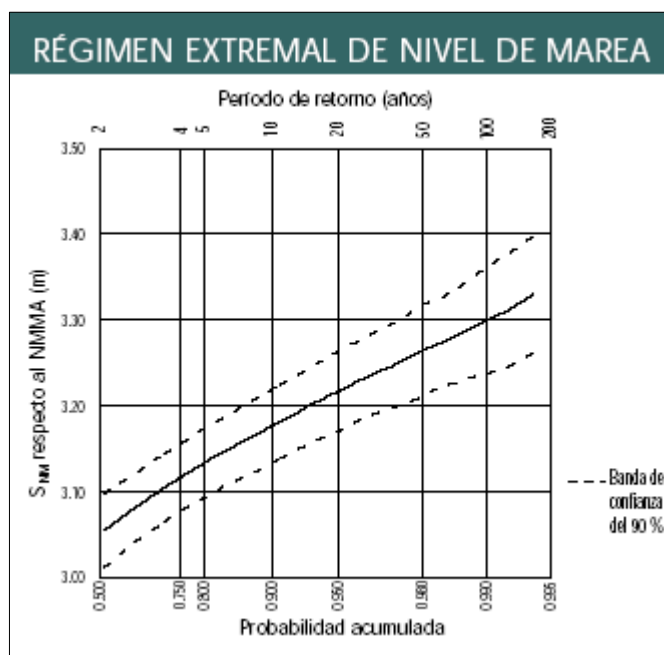


Ilustración 9. Régimen extremal del nivel de marea

Por otra parte, en cada zona, a partir de la estadística de datos de oleaje medidos en las boyas, haciendo propagaciones de oleaje, primero hacia atrás hasta llegar a grandes profundidades y luego hacia delante hasta llegar al pie de playa, se obtuvieron los regímenes medio (que no se han usado en el presente informe) y extremal de los niveles de mar debidos al efecto combinado de marea y remonte (denominado *cota de inundación* en el informe de la Universidad de Cantabria) para cada una de las orientaciones de playa que se han considerado significativas. Para la zona I-a dichas orientaciones se han representado en la figura siguiente mediante un vector normal a la playa con un color diferente para cada una de ellas:

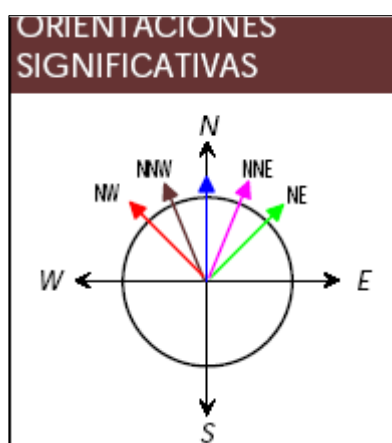


Ilustración 10. Orientaciones significativas de la costa

En la figura siguiente se representan los regímenes extremales de la cota correspondiente a marea más remonte ($S_{M+R, \theta}$) para cada una de las orientaciones. El

color de cada curva corresponde a la orientación de playa representada en la figura anterior con un vector del mismo color.

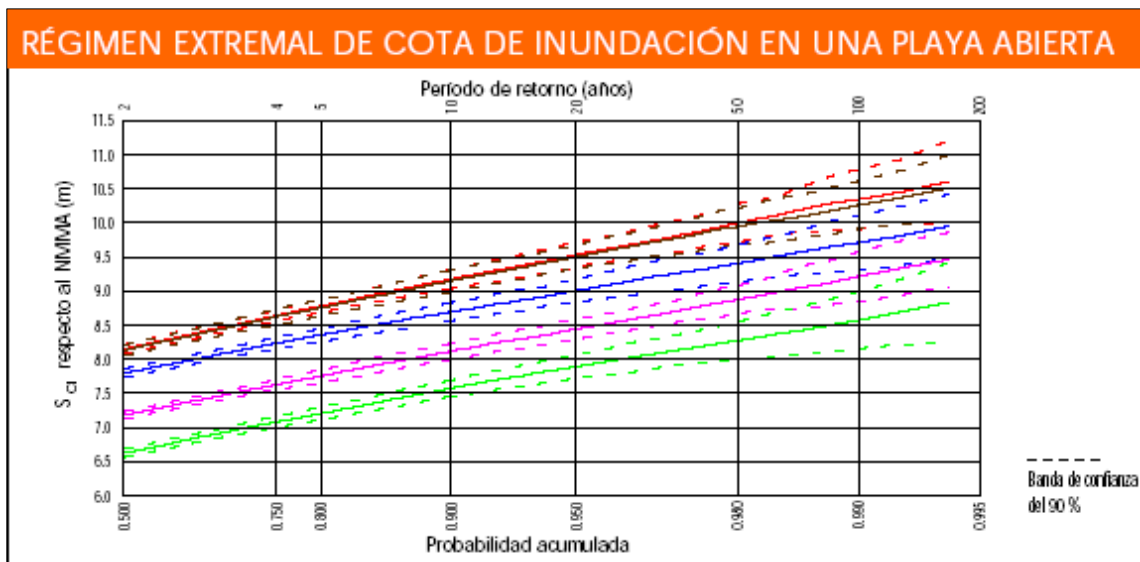


Ilustración 11. Régimen extremal de cota de inundación

Las curvas de los regímenes extremales se han extrapolado para calcular una estimación de las cotas correspondientes al período de retorno de 500 años.

A partir de estos gráficos se obtienen los siguientes valores (expresados en metros) para esta Demarcación Hidrográfica:

Tabla 1. Cotras de inundación (m) por marea y por oleaje

$S_{M, 2\%}$		2.5
$S_{M, 500}$		3.41
$S_{M+R, \theta, 500}$	NE	9,40
	NNE	10,00
	N	10,50
	NNW	11,10
	NW	11,30

El informe de la Universidad de Cantabria no proporciona información sobre el remonte medio. En base a las formulaciones propuestas por diferentes autores supondremos que el remonte medio para un período de 500 años es igual a la cuarta parte del remonte máximo para el mismo período de retorno, y éste a su vez lo supondremos igual a la diferencia entre la cota máxima de marea más remonte para 500 años y la cota del nivel de marea que en un año promedio se excede un 2% del tiempo:

$$\bar{R}_{500} = \frac{R_{2\%,500}}{4} = \frac{(S_{M+R,500} - S_{M,2\%})}{4}$$

Con estas hipótesis, el primer criterio de inundabilidad (inundabilidad por “mareas”) puede expresarse de la forma siguiente:

$$z < S_1 = S_{M,2\%} + \bar{R}_{\theta,500} = \frac{3}{4} S_{M,2\%} + \frac{1}{4} S_{M+R,9,500}$$

2.2. COTAS DEL TERRENO

Modelo Digital del Terreno

Como base de trabajo se ha utilizado un Modelo Digital del Terreno (MDT) proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), en hojas de 5 x 7.5 km (una cuarta parte de las hojas 1:25.000). Como referencia para la ubicación de las hojas sobre la cartografía base vectorial (línea de costa, batimetría, etc), se ha utilizado la malla de hojas 1:25.000, motivo por el cual en el presente trabajo las hojas de partida con las cuales se ha trabajado se han denominado “subhojas”.

Se han detectado errores del MDT en las zonas de interfase tierra-agua (en especial roquedos, bajos y en bastante ocasiones, playas), en los que aparecen cotas positivas en el mar. Se considera que pueden ser fallos de la metodología utilizada para generar los rasters a partir de las ortofotos. La tecnología LIDAR podrá proporcionar en el futuro una mayor fiabilidad en los datos altimétricos y, por tanto, será más apropiada para los estudios de inundaciones en detalle.

Servicio de ortofotos del PNOA

A pesar de disponer de gran parte de las ortofotos correspondientes a las subhojas de trabajo (proporcionadas asimismo por el IGN), se han utilizado fundamentalmente los servicios WMS del PNOA para realizar consultas rápidas, lo cual ha permitido agilizar las comprobaciones a la hora de contrastar el MDT con las imágenes reales. Gracias a este servicio se han buscado soluciones a los errores detectados con un considerable ahorro de tiempo.

Línea de costa

Debido a la cantidad de errores detectados en el MDT en las zonas de interfase tierra-agua, se consideró que no se debía utilizar la cota 0 del modelo como línea de costa (lo cual era la propuesta del primer procedimiento diseñado), ya que desvirtuaba la realidad y contribuía a incluir partes de mar como zonas inundables y, como consecuencia, a dejar sin inundar zonas con riesgo potencial de inundación.

Se decidió, por tanto, buscar una línea de costa fiable a partir de la cual definir las zonas potencialmente inundables por oleaje. El CEDEX dispone de una línea de costa digitalizada a una escala 1:50.000 (a partir de las cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina). Sin embargo se requería utilizar una línea de más detalle (al menos con el mismo detalle del MDT de partida).



Se solicitó al IGN la línea de costa obtenida en el marco del SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España), que se ha trazado en base a las ortofotos del PNOA (esto es, con la misma información de partida que el MDT con el que se iba a trabajar), pero se ha comprobado que también presentaba desajustes.

Como fuente de referencia adicional se ha utilizado la línea del límite del dominio público marítimo-terrestre suministrada por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, que en los tramos acantilados o de fuerte pendiente, que es donde las anteriores presentan más problemas, se ajusta con una gran precisión debido a que procede de planos a una escala bastante mayor.

Los trabajos, por tanto, se han realizado con una línea de costa deducida de las anteriores, dando más peso a una o a otra dependiendo del tipo de costa, si bien cabe señalar que la línea ha sido suavizada según la morfología natural de la costa en ciertos tramos, esto es, se han eliminado estructuras transversales a la costa como espigones, diques, etc, así como roques, islotes u otros entrantes en el mar aislados, lo cual es un requerimiento de la metodología aplicada (ver capítulo 3).

2.3. USOS DEL SUELO

Para realizar la valoración final de las zonas inundables se ha utilizado la misma metodología e información de partida utilizada para el desarrollo de la Cartografía de Zonas Inundables en aguas continentales en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental, suministrada por la Agencia Vasca del Agua.

3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL GEOPROCESAMIENTO DE DATOS

Todos los trabajos de tratamiento de información espacial se han desarrollado con ArcGIS 9.3.1. Para la mayoría de los pasos se ha trabajado en *Batch* (modalidad que permite procesar muchos ficheros a la vez).

3.1. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS INUNDABLES

Como ya se ha comentado, se han delimitado zonas inundables por oleaje y zonas inundables por marea siguiendo dos procedimientos diferentes. El trabajo original se planteó para tres períodos de retorno (10, 100 y 500 años) y dos escenarios (2010 y 2100), si bien los entregables con este informe se limitan al período de retorno de 500 años para 2011.

En la metodología diseñada, los valores de cotas de inundación a aplicar a cada tramo de costa dependen de la orientación de las mismas. No obstante, se comienza haciendo un cálculo preliminar de las zonas inundables por marea y por oleaje utilizando como cotas las correspondientes a la orientación pésima para esa demarcación. Para los tramos de costa en los que el ancho de la zona inundable sea inferior a 50 m los resultados se consideran definitivos.

A continuación se trazó una poligonal cuyos lados definían la orientación media de cada tramo de costa. La longitud de los lados de la poligonal dependerá del cuánto varíen la orientación y el grado de protección entre lados contiguos y de si existen o no en las proximidades usos del suelo de gran valor como núcleos de población, polígonos industriales o instalaciones críticas (p.e.: centrales nucleares o refinerías). Si no existen, los tramos pueden ser de varios kilómetros; si existen, dependerá de los casos, pero podrán ser de menos de un kilómetro.

Las poligonales se trazan en varias etapas. En la primera solo se consideran las costas abiertas (es decir, sin protección), pero colocando un lado de la poligonal en la entrada de cada uno de los entrantes. En la segunda se trazan las poligonales de cada entrante principal, colocando un lado en la entrada de cada entrante secundario. En la tercera se repite la operación para cada entrante secundario si se considera necesario.

A partir de las coordenadas de cada vértice de la poligonal, con ayuda de una hoja de cálculo diseñada específicamente para esta aplicación se calculan para cada lado de la poligonal: la orientación de la perpendicular, los coeficientes de difracción y de refracción (solo en entrantes), los valores de inundación por marea y oleaje utilizados para el cálculo de las cotas de inundación a aplicar y la anchura de la primera franja costera afectada (en el caso del oleaje).

A partir de los valores recogidos en la hoja de cálculo y de cara a comenzar el proceso de análisis espacial, se prepararon una serie de tablas con ArcGIS para "Reclasificar" de manera automática los raster. La reclasificación de los raster consiste en la asignación de nuevos valores a las celdas, en función de los criterios que le interesen al usuario. Lo que interesaba en este caso era obtener de los raster las zonas que quedaban entre la cota 0 y las cotas de inundación obtenidas a partir de los cálculos descritos. En particular, se prepararon tablas con los valores S_1 (para el caso de las inundaciones por marea) y con los valores S_2 (para el caso de las inundaciones por oleaje), para cada una de las orientaciones y períodos de retorno. Los valores nuevos se almacenan como un código GRID. Este código sirve posteriormente para la limpieza de los polígonos obtenidos a partir de los raster reclasificados. En el primer "Reclassify" interesa guardar todos los valores de los raster, con objeto de conservar las "subhojas" enteras, ya que el contorno sirve posteriormente para cortar la línea de costa por subhojas. Se generan, por tanto, tres valores: del mínimo a 0, de 0 a S_1 y de S_1 al máximo. A continuación se convierten los raster reclasificados en polígonos (*Spatial analyst- Convert- Raster to Feature*).

En este punto, el procedimiento se divide en el cálculo de las zonas inundables por oleaje y por marea. El esquema general del procedimiento está recogido en el Apéndice 1. Este esquema ha servido de guía para todas las personas implicadas en el trabajo GIS. A continuación se apuntan los pasos definidos en el mismo.

Zonas inundables por oleaje

- Cortar la línea de costa con las cajas obtenidas del *Reclassify*. Resultado: se obtiene la línea de costa correspondiente a cada subhoja. Herramienta Clip (*ArcToolBox-Analysis Tools-Extract- Clip*).



- Suavizar la línea de costa en los casos en que sea necesario. Resultado: se evita la pérdida de zonas inundables en los casos en los que existen accidentes del terreno que pueden desvirtuar el análisis. Herramienta: Editor.
- Buffer a las líneas de costa: teniendo en cuenta la orientación de las subhojas, se aplica un buffer a cada una de las líneas en función del valor recogido en la hoja de cálculo preparada. Resultado: franja costera en la que se va a aplicar el valor de cota de inundación por oleaje. Herramienta: Buffer (*ArcToolBox-Analysis Tools-Proximity- Buffer*)
- Cortar los raster que tienen línea costera con los buffer, para poder aplicar las cotas de oleaje. Resultado: raster correspondiente a la primera franja costera. Herramienta: Extract by mask (*ArcToolBox-Spatial Analyst Tools-Extract-Extract by mask*)
- Reclassificar los raster y hacer polígonos. Resultado: obtener los polígonos correspondientes a las zonas de inundación por oleaje. Herramientas: *Reclassify* y *Raster to Feature*.
- Limpieza: revisar la coherencia de los polígonos. Eliminar los elementos que no tengan conexión con el mar o unión a la primera franja. Herramienta: Editor.
- Merge: unión de todos los polígonos limpios. Resultado: polígono final de oleaje. Herramienta: Merge (*ArcToolBox- Data Management Tools- General-Merge*)

Zonas inundables por marea

- Seleccionar las zonas inundables por marea: de las cajas resultantes del primer *Reclassify*, se seleccionan las que tienen GRID code = 2 (es decir, las zonas que están entre la cota 0 y el valor S_{ref}). Resultado: polígonos de inundación por marea. Herramienta: Select (*ArcToolBox- Analysis Tools-Extract- Select*)
- Limpiar los polígonos de marea: con el *Editor*, eliminar todos los polígonos que hayan quedado en el mar (por fuera de la línea de costa). Asimismo, englobar polígonos de pequeño tamaño en manchas únicas.
- Merge: unión de todos los polígonos limpios. Resultado: polígono final de marea. Herramienta: Merge (*ArcToolBox- Data Management Tools- General-Merge*)

Como resultado se obtiene finalmente una capa de zonas potencialmente inundables por marea y otra de zonas potencialmente inundables por oleaje.

3.2. VALORACIÓN DE LAS ÁREAS POTENCIALMENTE INUNDABLES

Para calcular el valor de los daños potenciales de las zonas inundables, en primer lugar se simplificaron los polígonos, haciendo un *Merge* de las zonas inundables por marea y las inundables por oleaje, y posteriormente un *Dissolve*, de manera que quedara una sola capa de zonas inundables.

A continuación, dado que en ríos se ha calculado el riesgo por tramos de 500 metros, para las inundaciones de tipo costero debía aplicarse asimismo un criterio espacial a la hora de realizar dicho cálculo. Para ello, se ha elaborado un mallado de 200mx200m (4 Ha) en el dominio de las zonas inundables costeras resultantes del análisis GIS. El mallado resultante tiene 1.925 celdas, con superficies que varían entre 16 m² y 4 Ha. Las celdas del mallado han servido de marco espacial para calcular el riesgo, de cara a identificar las ARPSI.

Para el cálculo del riesgo, se ha cruzado el mallado con las capas facilitadas por la Agencia Vasca del Agua, a saber: daños materiales, población afectable y vías de comunicación afectadas. Cada una de las capas facilitadas contenía el coeficiente a aplicar por unidad (m² en el caso de la población afectable y daños materiales; y m en el caso de las vías de comunicación) a los polígonos contenidos. Dichos coeficientes debían ser multiplicados por la superficie potencialmente afectada por inundaciones y a continuación utilizados para calcular el riesgo, de acuerdo a la fórmula aplicada para inundaciones de tipo fluvial.

$$\text{RIESGO} = 8 \cdot \text{Hab afectados} \cdot 15.000 + 1 \cdot \text{Daños materiales} + 0,5 \cdot \text{Long ponderada vías} \cdot 100$$

De esta manera, se ha calculado para cada celda el sumatorio de la superficie afectada de cada tipo, y a continuación se ha multiplicado por el coeficiente correspondiente, calculando por último el riesgo en cada celda.

4. SELECCIÓN DE LAS ÁREAS CON RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN

Se han seleccionado como Áreas con Riesgo Potencial significativo de Inundación (ARPSIs) los tramos de costa con una elevada concentración en sus proximidades de zonas de riesgo elevado.

Se han hecho varios tanteos para determinar la sensibilidad del resultado obtenido en función del valor umbral de riesgo que se considere como elevado. Por ejemplo, se ha obtenido que con un umbral de 217 €/m², el 25% de la superficie inundable supera dicho umbral acumulando el 85% del riesgo. Un umbral de 147 €/m², resulta superado por el 32% de la superficie, que acumula un 90% de los daños. Sin embargo, en ambos casos las zonas que habría que considerar como ARPSIs son prácticamente idénticas.

Como resultado se han definido las 11 ARPSIs que se relacionan en la tabla siguiente, en la que también se presentan las coordenadas de los respectivos centroides.



Tabla 2. Área con Riesgo Potencial Significativo de Inundación

Mapa	Nombre ARPSI	Coordenada X	Coordenada Y
1	Bilbao	502.387	4.792.640
2	Plentzia	504.261	4.805.620
3	Ondarroa	546.622	4.796.510
4	Deba	552.247	4.793.560
5	Zumaia	560.469	4.793.460
6	Zarautz	567.427	4.793.030
7	Orio	570.920	4.792.240
8	Donostia (zona costera)	582.435	4.797.160
9	Donostia (zona Urumea)	583.850	4.795.330
10	Pasaia	587.942	4.796.620
11	Hondarribia	598.704	4.800.450

* La coordenadas están en proyección UTM, huso 30, Datum ETRS89.

En el Apéndice 2 del presente documento se han incluido planos de las 11 ARPSIs definidas y un mapa general de situación.

Se hace notar que la escala numérica que aparece en los planos se corresponde con una impresión del plano a tamaño A3.