# MEMORIA GENERAL

# C.S. ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO REQUERIDO POR EL R.D. 903/2010 EN LA COSTA ESPAÑOLA

# INDICE

**1.- INTRODUCCIÓN ..... 1**
1.1.- Antecedentes ..... 1
1.2.- Objeto del estudio ..... 3
1.3.- Ámbito del estudio ..... 3

**2.- METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA EXTENSIÓN DE LA INUNDACIÓN ..... 5**
2.1.- Introducción ..... 5
2.2.- Aproximación metodológica con nivel del mar (1ª) ..... 8
2.2.1.- Introducción ..... 8
2.2.2.- Metodología ..... 8
2.3.- Aproximación metodológica con nivel del mar y oleaje (2ª) ..... 10
2.3.1.- Introducción ..... 10
2.3.2.- Metodología ..... 11

**3.- ACTUALIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL RIESGO ..... 34**
3.1.- Introducción ..... 34
3.2.- Metodología ..... 34
3.3.- Resultados ..... 35

**4.- METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE PELIGROSIDAD DE INUNDACIÓN ..... 35**
4.1.- Introducción ..... 35
4.2.- Metodología ..... 36
4.2.1.- Inundación por nivel ..... 36
4.2.2.- Inundación por nivel y oleaje ..... 36
4.2.3.- Mapas de peligrosidad ..... 37
4.2.4.- Consideraciones a la metodología aplicada ..... 37
4.2.5.- Representación de líneas legales ..... 44
4.3.- Resultados ..... 46

**5.- METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN ..... 46**

5.1.- Introducción ..... 46
5.2.- Metodología ..... 46
5.2.1.- Afección a la población ..... 46
5.2.2.- Afección a la actividad económica ..... 47
5.2.3.- Afección a puntos de especial importancia y áreas protegidas ambientalmente 51
5.3.- Resultados..... 52

**6.- REFERENCIAS ..... 52**

**APÉNDICE I**: Bases de datos del Proyecto C3E
**APÉNDICE II**: Modelo numérico IH-2VOF

## INDICE DE FIGURAS

**Figure 1.** Ámbito de estudio ..... 4
**Figure 2.** Factores que afectan a la cota de inundación ..... 5
**Figure 3.** Ajuste del régimen extremal de cota de inundación en una posición del Mar Cantábrico (izquierda) y en una posición del Mar Mediterráneo (derecha).... 10
**Figure 4.** Ejemplo de la segmentación realizada en la línea de costa. Puntos rojos cada 200 m. ..... 13
**Figure 5.** Esquema para determinar el perfil asociado a cada punto de la costa. ..... 14
**Figure 6.** Representación de la altura de ola significante superada 12 horas al año ($Hs_{12}$) hasta los 50 m de profundidad. ..... 15
**Figure 7.** Ejemplo de la segmentación realizada en la isla de Formentera. En rojo, los puntos de la línea de costa cada 200 m. En blanco, perfiles del terreno según la dirección del flujo medio de energía de los temporales. ..... 15
**Figure 8.** Esquema para determinar el perfil emergido y sumergido ..... 16
**Figure 9.** Cuantil del 95% de la altura de ola significante (izquierda) y cuantil del 95% de marea meteorológica. (tomadas de www.c3e.ihcantabria.com) ..... 17
**Figure 10.** Ejemplo de dos perfiles con el mismo número de Iribarren (Ir) y run-up adimensional (Ru/Hs). Perfil izquierda: Pendiente 1/10, Ru = 1.1 m, Hs = 1 m, Tp = 12 s. Perfil derecha: Pendiente 1/5, Ru = 4.4 m, Hs = 4 m, Tp = 12 s ..... 19
**Figure 11.** Ejemplo de perfil adimensional con un número de Iribarren, Ir = 1.5..... 20
**Figure 12.** Ejemplo de adimensionalización de un perfil real (Emergido + Sumergido) con un estado de mar de Hs = 4 m y Tp = 12 s. ..... 21
**Figure 13.** Clasificación K-Mean de perfiles adimensionalizados con los 81 clústers más representativos. ..... 23
**Figure 14.** Ejemplo de 4 clústers (Nº 11, 51, 78 y 119) de perfiles adimensionalizados clasificados con K-Mean (121 clústers). Se representa en cada uno de ellos el centroide (línea negra) y la banda de confianza del 95 % (zona gris). ..... 24
**Figure 15.** Ajustes lineales del run-up adimensional ($Ru_{2\%}$/Hs) en 4 clústers (Nº 11, 51, 78 y 119). Los puntos negros son los resultados de las ejecuciones del modelo IH2VOF, la línea negra es el ajuste de los datos a una recta y las líneas discontínuas son distintas bandas de confianza al 95%, 90%, 80% y 68.5% respectivamente. ..... 26

**Figure 16.** Ajustes lineales del alcance de la inundación adimensional (I2%/√L0Hs) en 4 clústers (Nº 11, 51, 78 y 119). Los puntos negros son los resultados de las ejecuciones del modelo IH-2VOF, la línea negra es el ajuste de los datos a una recta y las líneas discntínuas son distintas bandas de confianza al 95%, 90%, 80% y 68.5% respectivamente. .....27

**Figure 17.** Ejemplo de ajuste del régimen extremal de cota de inundación con nivel del mar y oleaje.....30

**Figure 18.** Ejemplo de ajuste del régimen extremal de distancia de inundación con nivel del mar y oleaje. .....31

**Figure 19.** Ejemplo de la extensión de la inundación a partir de la cota de inundación (líneas discontinuas horizontales) y distancia de inundación (líneas continuas verticales) para Tr=10, 50, 100 y 500 años en el perfil Nº 9950 (perfil emergido) calculado con nive del mar y oleaje .....32

**Figure 20.** Ejemplo de la extensión de la inundación (líneas continuas verticales) a partir de la cota de inundación (líneas discontinuas horizontales) y distancia de inundación (líneas discontinuas verticales) para Tr=10, 50, 100 y 500 años en el perfil Nº 161 (peril emergido) calculado con nivel del mar y oleaje.....33

**Figure 21.** Ejemplo de la extensión de la inundación (de zonas de playa no cubiertas por SIOSE.....39

**Figure 22.** Ejemplo de delimitación de la extensión de la inundación.....40

**Figure 23.** Ejemplo de representación de zona inundable con vulnerabilidad intermitente. .....41

**Figure 24.** Ejemplo de representación de DPMT (línea roja) sobre zona inundable de T=100 años de período de retorno .....42

## INDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Relación de las 22 Demarcaciones Hidrográficas relacionadas con el ámbito de estudio ..... 4

**Tabla 2.** Categorías en Mapa de riesgo nacional ..... 47

**Tabla 3.** Correspondencias de las etiquetas de SIOSE con las categorías para los mapas de riesgo. Coberturas simples ..... 49

**Tabla 4.** Correspondencias de las etiquetas de SIOSE con las categorías para los mapas de riesgo. Coberturas compuestas predefinidas ..... 50

# 1.- INTRODUCCIÓN

## 1.1.- ANTECEDENTES

La Directiva 2007/60 del Consejo Europeo publicada el 6 de noviembre del 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación (en adelante, "Directiva de Inundaciones"), cuya trasposición al ordenamiento jurídico español es el objeto del Real Decreto 903/2010, del 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, publicado en el BOE Nº171 del 15 de julio del 2010, tiene como objetivo generar nuevos instrumentos a nivel comunitario para reducir las posibles consecuencias de las inundaciones mediante la gestión del riesgo, apoyada en cartografía de peligrosidad y de riesgo.

La implantación de esta Directiva se está llevando a cabo por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente a través de la Dirección General del Agua y la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar en los ámbitos competencia de la Administración General del Estado. En este sentido se ha puesto en marcha el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), un instrumento de apoyo a la gestión de dichos espacios, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa.

El eje central del SNCZI es el visor cartográfico de zonas inundables, que permite a todos los interesados visualizar los estudios de delimitación del Dominio Público Hidráulico y los estudios de cartografía de zonas inundables, elaborados por el Ministerio y aquellos que han aportado las Comunidades Autónomas. En la actualidad sólo se ha elaborado la primera fase (fase 1) que exigía la Directiva de Inundaciones: la Evaluación Preliminar de los Riesgos de Inundación (en adelante EPRI), definiendo unas Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs).

La Directiva prevé dos fases más para su implementación. En primer lugar está la fase 2 que tiene que estar redactada para finales del año 2013 y consiste en la elaboración de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de las áreas que se han definido como potenciales frente a los riesgos de inundación en la fase 1. La fase 3 consiste en la redacción de los Planes de Gestión de estas zonas y tiene que estar finalizada para finales del 2015.

El objeto del presente documento es obtener los mapas de peligrosidad por inundación y los mapas de riesgo de inundación para posteriormente, en una siguiente fase, poder elaborar los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación, todo ellos según indica el RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.

Para la elaboración de estos trabajos se ha contado con el apoyo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (en adelante IH Cantabria), que ha desarrollado para el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente las metodologías y herramientas que permiten la determinación de la extensión de las zonas inundables a lo largo de las costas españolas a partir de la información generada en el proyecto C3E (Cambio Climático en la Costa Española, Ref 20080050084091, www.c3e.ihcantabria.es).

Este proyecto, realizado en el marco del Plan Nacional de I+D+i y financiado por la Secretaría de Estado de Cambio Climático del entonces Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino tuvo como uno de sus resultados la elaboración de una extensa base de datos de variables meteo-oceánicas a lo largo de la costa española que, si bien fue desarrollada para otro fin, su adaptación para su uso en el caso de inundación costera permite no sólo un gran ahorro en lo que se refiere a los trabajos de estudios y modelado matemático requeridos para dar cumplimiento a las exigencias de la Directiva de Inundaciones, sino también un alto grado de precisión en la evaluación de los riesgos asociados a las inundaciones difícilmente obtenibles de otra manera, con el consiguiente beneficio para las administraciones públicas y la sociedad en general.

La metodología adoptada para la obtención de estos mapas ha sido, por tanto, compleja aunque dada la amplitud del trabajo y la necesidad de homogeneizar situaciones ha sido necesaria adoptar ciertas simplificaciones dejando, en cualquier caso, los resultados obtenidos del lado de la seguridad.

**Finalmente, es importante destacar que, si bien el RD 903/2010 indica la necesidad de representar en los mapas de peligrosidad la delimitación de la zona de dominio público marítimo-terrestre, la ribera del mar y la zona de servidumbre de protección en zonas costeras, estos mapas, así obtenidos, no tienen por objeto cuestionar las limitaciones anteriormente citadas sino obtener unos mapas que sirvan como instrumento adecuado para la posterior Gestión de las Zonas Inundables.**

## 1.2.- OBJETO DEL ESTUDIO

El presente "Contrato de Servicios Elaboración de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación Costera por el R.D. 903/2010 en la Costa Española" tiene por objeto la actualización y determinación de la extensión de las zonas inundables definidas en la Fase 1 y la elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación costera a lo largo del litoral español.

## 1.3.- ÁMBITO DEL ESTUDIO

El ámbito geográfico de los trabajos objeto del presente estudio comprende el litoral de toda la costa Española.

El litoral español está dividido en 22 Demarcaciones Hidrográficas (Tabla 1) para las que se ha realizado el presente trabajo de actualización y elaboración del los mapas de peligrosidad y riesgo en las zonas previamente determinadas como inundables en la Fase de EPRI (Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación).

**Tabla 1.** Relación de las 22 Demarcaciones Hidrográficas relacionadas con el ámbito de estudio

| DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS RELACIONADAS CON EL ÁMBITO DE ESTUDIO | |
|---|---|
| D.H. de Galicia-Costa | D.H. del Cantábrico Occidental |
| D.H. del Cantábrico Oriental | D.H. del Distrito de Cuenca Fluvial de Catalunya |
| D.H. del Ebro | D.H. del Júcar |
| D.H. del Segura | D.H. de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas |
| D.H. de Tinto, Odiel y Piedras | D.H. del Guadalquivir |
| D.H. de Guadalete y Barbate | D.H. del Guadiana |
| D.H. de las Islas Baleares | D.H. de Gran Canaria |
| D.H. de Fuerteventura | D.H. de Lanzarote |
| D.H. de Tenerife | D.H. de La Palma |
| D.H. de La Gomera | D.H. de El Hierro |
| D.H. de Ceuta | D.H. de Melilla |

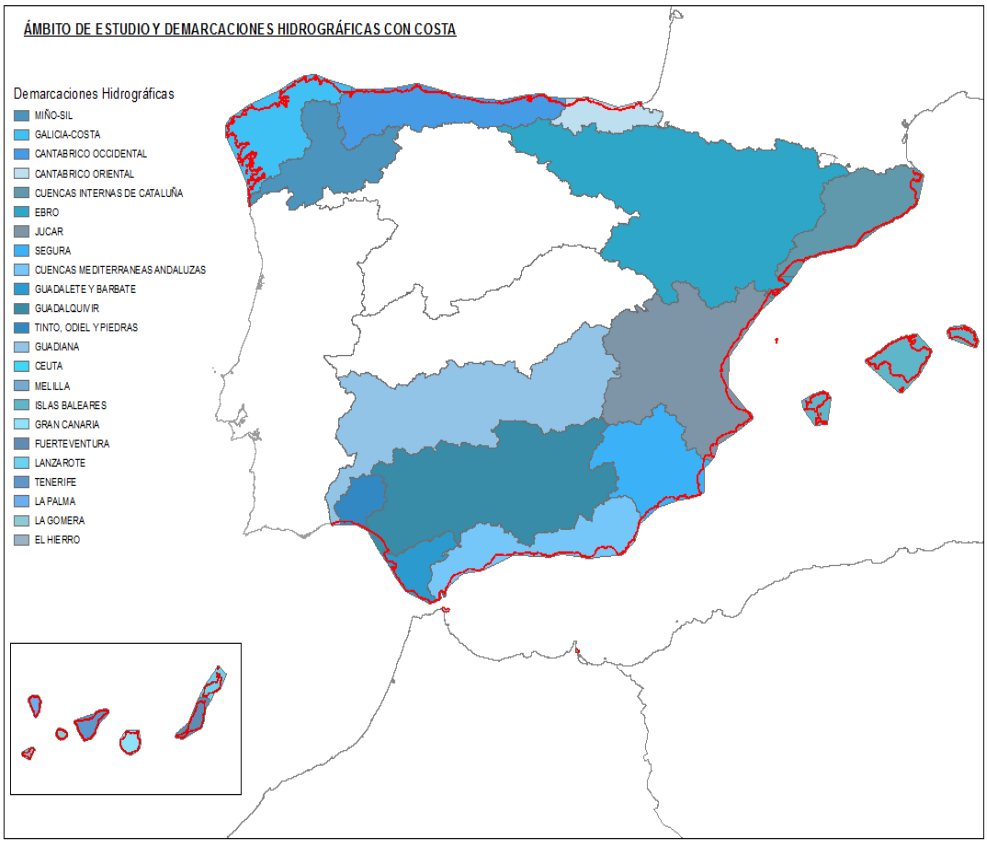


**Figure 1. Ámbito de estudio**

# 2.- METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA EXTENSIÓN DE LA INUNDACIÓN

## 2.1.- INTRODUCCIÓN

El régimen de inundaciones en la costa debido a la acción conjunta de la dinámica marina y meteorológica es un fenómeno especialmente complejo, tanto por el gran número de elementos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción entre dichos elementos.

El fenómeno de inundación en una playa, o tramo de costa cualquiera, puede ser representado de acuerdo al siguiente esquema, Figure 2: en un instante determinado, la playa está caracterizada por un nivel de marea (NM) compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe en la playa, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de playa "*Run-Up*" (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí. Además de la interacción entre los elementos (oleaje – batimetría - nivel de marea - ascenso), el fenómeno de la inundación presenta la complicación añadida de que algunos de los factores (marea meteorológica, oleaje...) son variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad.

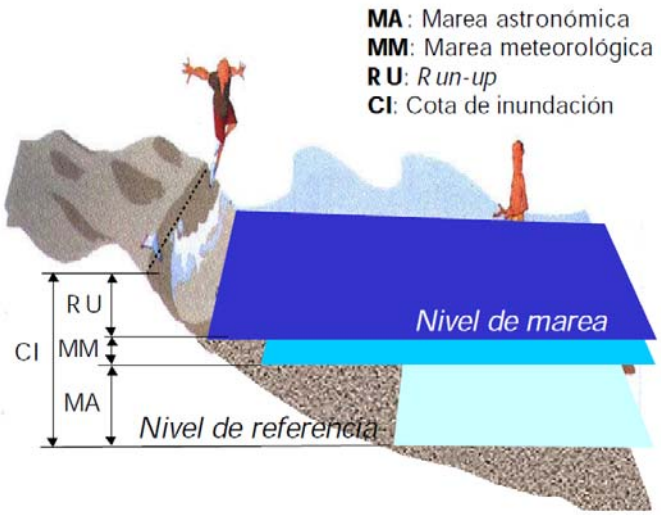


**Figure 2. Factores que afectan a la cota de inundación**

Por consiguiente, cada evento de inundación tendrá una probabilidad de ser sobrepasado y, por lo tanto, la obtención de las máximas inundaciones, para cada perfil batimétrico, serán función del periodo de retorno o de la probabilidad anual de ocurrencia de tales fenómenos.

Para obtener los eventos extremos de inundación asociados a determinados periodos de retorno, resulta necesario caracterizar el régimen extremal de todas las dinámicas que intervienen en el fenómeno de inundación a lo largo de todo el litoral español. Ello hace imprescindible tener información de calidad durante largos periodos de tiempo (varias decenas de años) de todas esas variables aleatorias; de forma que sea factible el estudio de la recurrencia de los eventos más extremos que intervienen en la inundación, pues se repiten con relativa poca frecuencia.

Para ello se cuenta con las bases de datos de oleaje y nivel del mar (MA, MM y referencia del Nivel Medio del Mar en Alicante (Ref)) generadas en el marco del Proyecto C3E antes mencionado. Dichas bases de datos cubren todo el litoral español con una resolución espacial de, al menos, 200 m y están compuestas por series horarias, generadas de forma homogénea y continua desde el año 1948 hasta el año 2008 (más de 60 años de datos). La principal característica de estas bases de datos es que, aunque han sido generadas numéricamente, se ha aplicado un exhaustivo proceso de validación y/o corrección con información instrumental (boyas, mareógrafos y satélites), verificándose la excelente calidad de las mismas.

Como ya se ha mencionado, resolver los procesos de inundación costera combinando las dinámicas de oleaje y nivel del mar con la batimetría, en una ubicación concreta, es difícil, y más aún si se realiza para toda la costa española. De hecho, en sí mismo, el tratamiento de toda la información disponible es un complicado problema a resolver. Como ejemplo, una serie de 60 años de una variable contiene más de medio millón de datos y si únicamente se dispone de 3 parámetros para caracterizar el oleaje (altura de ola significante, periodo de pico y dirección media) y 2 para el nivel (marea astronómica y marea meteorológica) se tienen 2.5 millones de datos en cada posición en la costa. Además, las dinámicas marinas varían mucho al aproximarse a la costa, por las condiciones batimétricas locales, por lo que es necesario caracterizar dichas dinámicas a escalas del orden de centenares de metros. Por lo que, si por ejemplo, se discretiza la línea de costa cada 200 m (que son más de 30 000 posiciones), esto supondría más de 80 billones de datos únicamente para caracterizar las dinámicas costeras.

Por otro lado, el cálculo de la inundación de una porción del perfil de playa producida por los movimientos del mar de largo plazo, o mareas, y de corto período asociados al oleaje, es especialmente complicado. En las playas, las zonas de rompientes y de ascenso-descenso se caracterizan por la completa transformación de la dinámica debida al oleaje incidente, y de otras dinámicas de características y escalas temporales muy diferentes, incluyendo desde la turbulencia de pequeña escala (con periodos inferiores al oleaje incidente) hasta flujos medios y ondas infragravitatorias de gran escala (con periodos muy superiores al del oleaje incidente). Además, todos los procesos anteriormente citados se ven altamente influenciados por otros factores locales como la forma del perfil de playa, que afecta a la transformación del oleaje en rotura y a la magnitud del run-up.

Tradicionalmente existen formulaciones empíricas que determinan el valor del run-up en playas a partir de la observación de éste en playa reales, como las de Strockdon *et al*. (2006) o las de Nielsen *et al*. (1991). Estas formulaciones tienden a simplificar en exceso la física del problema usando únicamente la energía de oleaje fuera de la zona de rompientes sin considerar aspectos como la forma del perfil de playa o la pendiente de ésta, anteriormente citados.

El uso de modelos numéricos está por tanto justificado debido a la gran cantidad de información a manejar y a los costes asociados. Dentro de las opciones existentes en el estado del arte, el modelo IH-2VOF (www.ih2vof.ihcantabria.com), que se enmarca dentro de la familia de los modelos bidimensionales que resuelven las ecuaciones completas de Navier–Stokes, aparece como el óptimo para el estudio de la hidrodinámica de la zona de rompientes y de swash. Uno de los aspectos más importantes que justifican su uso es el hecho de que no requiere de hipótesis simplificativas para la determinación de la teoría de ondas a usar o para la caracterización del tipo de rotura o de su localización a lo largo de la playa. Además su exhaustiva validación a partir de ensayos de laboratorio, centrados en los procesos no lineales de transformación del oleaje en la zona de rompientes, reducen la incertidumbre en su uso. En contrapartida, el coste computacional es relativamente elevado, lo que condiciona la cantidad de simulaciones a realizar. Como orden de magnitud, la simulación numérica de un estado de mar de una hora de duración tarda del orden de 4 días en un ordenador convencional.

Como se ha puesto de relevancia, la complejidad de los distintos aspectos que conforman el cálculo de la inundación a lo largo de las costas españolas hace necesario definir una

metodología que simplifique el problema de forma que sea resoluble, eficiente y precisa. Así en una primera aproximación se inunda todo el litoral únicamente con la dinámica nivel del mar, sin oleaje. Con esta aproximación se tienen resultados válidos en las zonas donde el oleaje no tiene relevancia (interior de rías y estuarios o al abrigo de infraestructuras exteriores). Tras esta primera aproximación, se corrigen las zonas del litoral donde el oleaje incide directamente, es decir, en la línea de costa propiamente dicha que no está al abrigo del oleaje. En esta segunda aproximación se trazan perfiles del terreno para resolver de forma bidimensional la inundación, perfil a perfil, incorporando el efecto combinado del oleaje y del nivel del mar.

## 2.2.- APROXIMACIÓN METODOLÓGICA CON NIVEL DEL MAR (1ª)

### 2.2.1.- Introducción

En este apartado se desarrolla la primera de las dos aproximaciones o fases de la metodología general para el cálculo de la extensión de la inundación a lo largo del litoral español. Así, en esta primera aproximación se inunda únicamente con la dinámica nivel del mar, sin oleaje.

Como ya se ha comentado, con esta primera aproximación se obtienen resultados válidos en las zonas donde el oleaje no tiene relevancia (interior de rías y estuarios o al abrigo de infraestructuras exteriores). Posteriormente, con la segunda aproximación, se corregirán las zonas del litoral donde el oleaje incide directamente, es decir, en la línea de costa propiamente dicha que no está al abrigo del oleaje.

Como no se incorpora el oleaje en los cálculos de la extensión de la inundación, tampoco se requiere el uso del modelo numérico IH-2VOF.

### 2.2.2.- Metodología

La metodología de esta primera fase, para la inundación con nivel del mar, consta de dos partes bien diferenciadas. En primer lugar se ajusta, para cada posición "*i*" a lo largo del litoral español, el régimen extremal de cota de inundación a partir de las series de datos de nivel del mar del proyecto C3E (ver Apéndice I); calculándose la cota de inundación

asociada a distintos periodos de retorno (CI Tr). En segundo lugar se corta el Modelo Digital del Terreno con las cotas de inundación calculadas, obteniéndose la extensión de la inundación para cada periodo de retorno y generándose finalmente los mapas de peligrosidad asociados a cada uno de dichos periodos.

Los datos de nivel del mar se obtienen del proyecto C3E, como superposición de la Marea Astronómica (MA), Marea Meteorológica (MM) y referencia del nivel medio del mar respecto al nivel medio del mar en Alicante (Ref) en cada posición "*i*". Por lo que respecta a la Cota de Inundación en cada punto ($CI_i$) se define a partir de las series de datos horarios, ya mencionadas, que abarcan desde 1948 hasta 2008 y disponen, a lo largo del litoral español, de una resolución espacial de entre 10 km y 15 km.

Posteriormente se ajusta el régimen extremal a cada serie De dicha serie se utilizan los eventos extremos independientes que superan un cierto umbral de forma que se obtengan entre 2 y 3 temporales al año. Usualmente se denomina a esta técnica, que utiliza sólo los datos que superan un cierto umbral para estimar el régimen extremal, POT ("*Peaks Over Threshold*").

Asumiendo que la tasa de ocurrencia de eventos se distribuye según un proceso de Poisson y que las excedencias siguen la GPD *("Distribución Generalizada de Pareto")* distribución generalizada de Pareto (GPD), se tiene que el modelo GPD-Poisson es idéntico al modelo GEV) ("*Generalized Extreme Value*"), expresando el resultado del ajuste en términos del máximo anual y del período de retorno.

En la Figure 3 se presentan dos ejemplos de ajustes del régimen extremal, con su intervalo de confianza del 90%. Se representa el valor de la cota de Inundación (respecto al Nivel Medio del Mar en Alicante, NMMA) frente al periodo de retorno en años (Tr).

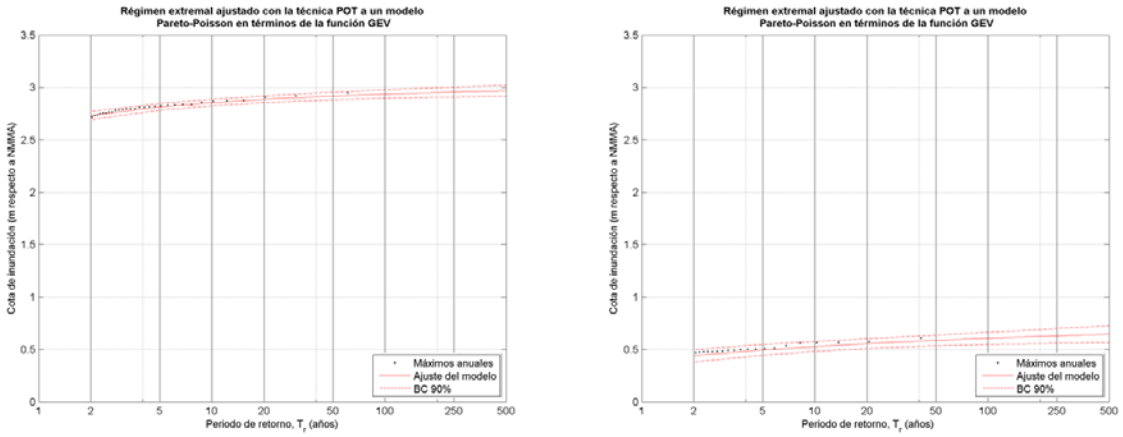


**Figure 3. Ajuste del régimen extremal de cota de inundación en una posición del Mar Cantábrico (izquierda) y en una posición del Mar Mediterráneo (derecha).**

Una vez realizado el ajuste se calculan los valores de Cota de Inundación para los distintos periodos de retorno (CI Tr), dando cumplimiento a lo requerido por el artículo 8 del Real Decreto 903/2010.

Se han obtenido los valores para los periodos de retorno de 100 años y 500 años, en donde Tr = 100 años corresponde a una media probabilidad de inundación y Tr = 500 años corresponde a una baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos.

## 2.3.- APROXIMACIÓN METODOLÓGICA CON NIVEL DEL MAR Y OLEAJE (2ª)

### 2.3.1.- <u>Introducción</u>

En este apartado se desarrolla la segunda de las dos aproximaciones o fases de la metodología general para el cálculo de la extensión de la inundación a lo largo del litoral español. Así, una vez realizada la primera fase en la que se inunda únicamente con la dinámica nivel del mar (sin oleaje), en esta segunda fase se corregirán las zonas del litoral donde el oleaje incide directamente, es decir, en las zonas costeras que no están al abrigo del oleaje. Por lo tanto, se incorpora el efecto combinado del oleaje y nivel del mar en el cálculo de la extensión de la inundación; sin embargo la inundación se resuelve de forma bidimensional en cada perfil del terreno a lo largo del litoral español.

Como se ha puesto de manifiesto, en esta segunda fase se da solución a un complejo problema. Para ello se desarrolla una eficiente y novedosa metodología que combina los cuatro aspectos siguientes:

- En el marco del proyecto C3E se han generado unas bases de datos de oleaje y nivel del mar de altísima calidad (ver Apéndice I). Series horarias, homogéneas y continuas de más de 60 años de duración, calibradas y/o validadas con información instrumental. En concreto, la base de datos de oleaje DOW (*"Downscaled Ocean Waves"*), permite caracterizar correctamente el oleaje propagado hasta el litoral español con una resolución espacial de, al menos, 200 m.

- El modelo numérico bidimensional IH-2VOF (ver Apéndice II), que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, es uno de los más avanzados en su clase, debido fundamentalmente a su versatilidad, robustez y su extensa validación tanto para el cálculo de la estabilidad y funcionalidad de todo tipo estructuras costeras, como para reproducir la hidrodinámica en la zona de rompientes (Torres *et al*., 2007). Debido a esto, se utiliza para simular los procesos de inundación costeros provocados por el oleaje.

- La gran cantidad de información utilizada se administra mediante técnicas estadísticas de clasificación y selección de variables de alta dimensionalidad (Camus *el at*., 2011a), de forma que se elige el número óptimo de estados de mar y perfiles del terreno representativos de todo el litoral español, para ser simulados numéricamente con el modelo IH-2VOF.

A continuación se explica dicha metodología.

### 2.3.2.- <u>Metodología</u>

La metodología desarrollada para esta segunda fase bidimensional de inundación, con oleaje y nivel del mar, está basada en el uso del modelo numérico IH-2VOF y se aplica a perfiles del terreno tomados a lo largo del litoral español. Para ello se obtienen perfiles del terreno en la línea de costa expuesta directamente al oleaje, sin entrar en rías, estuarios, interior de puertos, etc. pues estas zonas están correctamente calculadas en la primera fase de la metodología (sólo con nivel del mar).

Los perfiles reales del terreno se simulan con el modelo IH-2VOF, resolviendo con precisión la hidrodinámica en la zona de rompientes debida al oleaje y nivel del mar. Una vez resuelto el ascenso-descenso del oleaje en la playa, se asume, para cada estado de mar, que la zona inundada del perfil es la que es alcanzada por más del 2% de las olas. Éste es un valor usual para este tipo de trabajos (Holman, 1986).

Una vez calculadas las distancias máximas hasta donde llega la inundación en cada perfil, se corrigen las zonas expuestas al oleaje de los mapas de inundación calculados en la primera fase de la metodología general (sin oleaje).

A continuación se explican los pasos en los que se desglosa la metodología de esta segunda fase:

- Segmentación de la línea de costa.
- Corte de los perfiles del terreno.
- Definición de las dinámicas en cada perfil.
- Selección de las simulaciones a realizar con el modelo IH-2VOF.
- Ajuste de las fórmulas basadas en los resultados del modelo IH-2VOF.
- Cálculo de las series de $Ru_{2\%}$ e $I_{2\%}$ en cada perfil.
- Ajuste de los regímenes extremales de inundación en cada perfil.
- Cálculo de la extensión de la inundación en cada perfil.
- Generación de los mapas de inundación.

#### 2.3.2.1.- Segmentación de la línea de costa

En este primer paso de la metodología se define como línea de costa aquella que tiene cota 0 respecto al Nivel Medio del Mar de Alicante, con una sinuosidad adecuada a la escala de

trabajo. En la Figure 4 se representa un tramo de dicha línea de costa, que ha sido segmentada en puntos con una separación nominal de 200 m. Esta resolución espacial está condicionada por la resolución espacial de las base de datos de oleaje (DOW, ver Anejo I), pero se considera suficiente para representar correctamente el comportamiento de la inundación por oleaje a lo largo del litoral español.

**Figure 4. Ejemplo de la segmentación realizada en la línea de costa. Puntos rojos cada 200 m.**

A continuación, se eliminan los puntos de dicha segmentación de la línea de costa al abrigo del oleaje exterior, es decir los que están en el interior de rías, estuarios, bahías, etc. o al abrigo de infraestructuras portuarias (como se puede apreciar en la Figure 4).

Para cada uno de dichos puntos se definen varios parámetros o características del oleaje asociados a dicha posición. Estos parámetros sirven para definir el perfil del terreno correspondiente a cada punto. En la Figure 5 se presenta un esquema de cómo sería el perfil en un determinado punto de la costa (punto rojo). Uno de los parámetros que se calcula para cada punto es la dirección del flujo medio de energía de los temporales en el inicio del perfil ($\theta_{FE}$), ésta es la dirección predominante con la que los temporales inundan la costa, por lo que los perfiles del terreno se cortarán siguiendo esa dirección; de esta forma

se simulan bidimensionalmente los procesos de inundación lo más correctamente posible. En la figura se señala dicha dirección como una flecha roja sobre un punto amarillo; dicho punto representa la posición del inicio del perfil. Se asume que la posición del inicio de cada perfil tiene la profundidad de cierre definida para playas (h*). El cálculo tanto de $\theta_{FE}$ como de h* se hace en función de la altura de ola significante que es superada 12 horas al año ($Hs_{12}$). $Hs_{12}$ es el umbral a partir del cual se definen los temporales con los que se calcula $\theta_{FE}$; y, en la costa española, se asume que h* es 1.57 veces el valor de $Hs_{12}$ (GIOC, 2000).

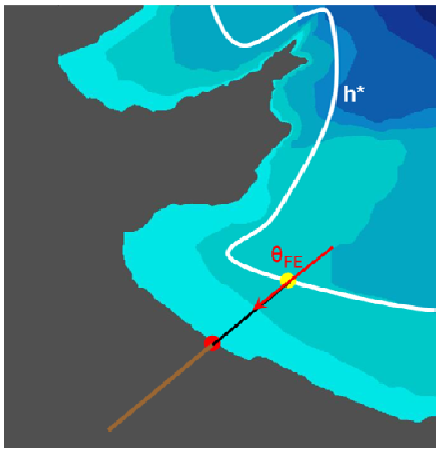


**Figure 5. Esquema para determinar el perfil asociado a cada punto de la costa.**

Finalmente, a partir de la base de datos DOW ("*Downscaled Ocean Waves*"), primeramente se calcula la $Hs_{12}$ a lo largo de todo el litoral. En la Figure 6 se muestra un ejemplo de la distribución de $Hs_{12}$ en un tramo de la costa Cantábrica. Posteriormente se busca la línea del inicio de los perfiles (línea blanca de la Figure 5), como intersección de la batimetría con la profundidad de cierre (h* = 1.57 $Hs_{12}$). Y finalmente se calcula la $\theta_{FE}$ en el inicio de cada perfil, dirección con la que se determinan los perfiles del terreno.

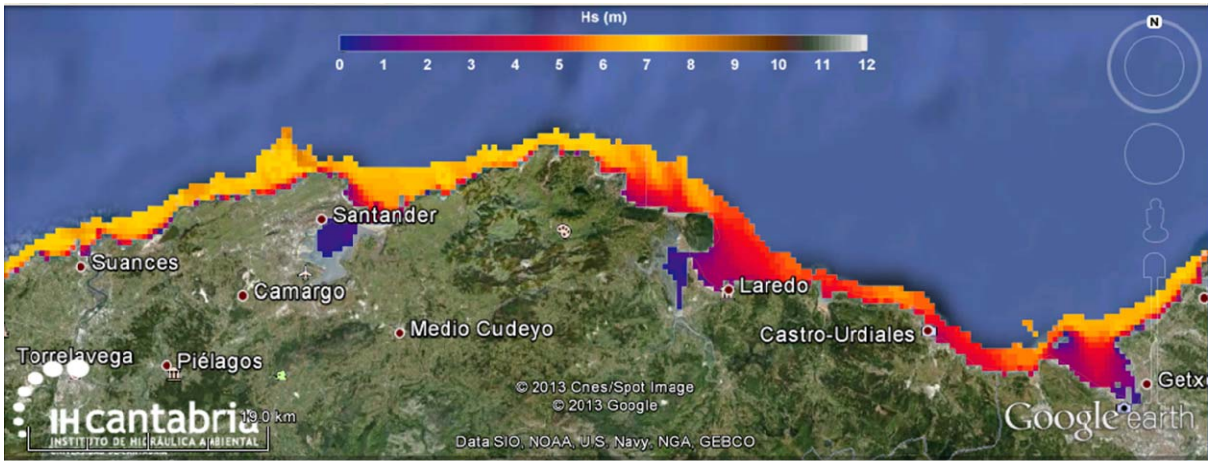


**Figure 6. Representación de la altura de ola significante superada 12 horas al año ($Hs_{12}$) hasta los 50 m de profundidad.**

La Figure 7 muestra, a modo de ejemplo, los perfiles obtenidos a partir de la $\theta_{FE}$ para la isla de Formentera. Se observa cómo dichos perfiles se adecúan a las condiciones de la isla.

**Figure 7. Ejemplo de la segmentación realizada en la isla de Formentera. En rojo, los puntos de la línea de costa cada 200 m. En blanco, perfiles del terreno según la dirección del flujo medio de energía de los temporales.**

### 2.3.2.2.- Corte de los perfiles del terreno

Una vez realizada la segmentación de la línea de costa y determinada la dirección del perfil (dirección del flujo medio de energía de los temporales, $\theta_{FE}$) se procede a realizar los cortes del terreno.

Cada perfil tiene una longitud de 1500 m (1000 en tierra y 500 hacia mar) y la dirección del flujo medio de energía de los temporales correspondiente a dicho perfil. Con dichos perfiles se corta el MDT del IGN (MDT05: Modelo Digital del Terreno con paso de malla 5m) extrayendo las cotas a lo largo del perfil. El MDT únicamente contiene información de la topografía o cotas positivas del terreno respecto al Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA), por eso a esta parte del perfil se le denomina "Perfil Emergido".

Como el MDT no tiene incorporada la batimetría y la disponible de las cartas náuticas no tiene suficiente resolución, no se determina el perfil sumergido haciendo un corte de la batimetría, sino que se ajusta dicha parte del perfil a uno teórico.

El "Perfil Sumergido" se ajusta a un perfil teórico de Dean (1991), ampliamente utilizado por su simplicidad matemática, $h = A\ x^{2/3}$. Así, en cada perfil se ajusta el parámetro A, utilizando para ello la distancia entre el inicio del perfil y la costa (x = L) y la profundidad de la batimetría al inicio del perfil (h = h*). En la Figure 8 se puede ver un esquema de los elementos con los que se determina el perfil emergido y el perfil sumergido. De esta forma se obtiene una transición coherente y suave entre el perfil sumergido y el emergido.

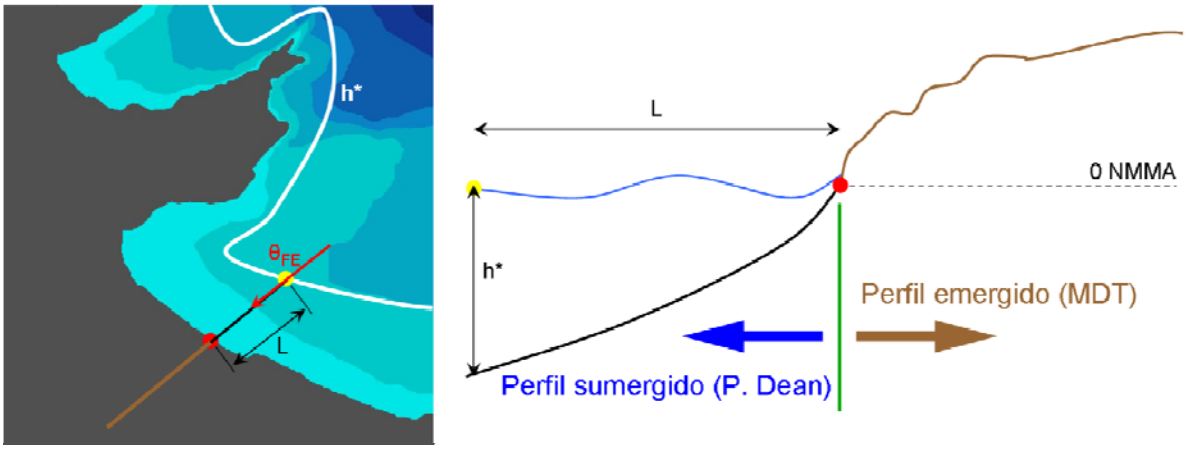


**Figure 8. Esquema para determinar el perfil emergido y sumergido**

Siguiendo este procedimiento, se determinan todos los perfiles del terreno, (emergidos y sumergidos) a lo largo del litoral español. En total, como la separación entre perfiles es de 200 m, se obtienen unos 30 000 perfiles.

#### 2.3.2.3.- Definición de las dinámicas en cada perfil

Para definir las dinámicas en los distintos perfiles en los que se ha segmentado la costa española se utilizan las bases de datos de oleaje y nivel del mar que proporciona el proyecto C3E. En la Figure 9 se representan ejemplos de caracterización de ambas dinámicas. Estas bases de datos permiten extraer, en el punto inicial de cada perfil, las series horarias de más de 60 años de nivel del mar (marea meteorológica y marea astronómica) y oleaje (altura de ola significante y periodo de pico).

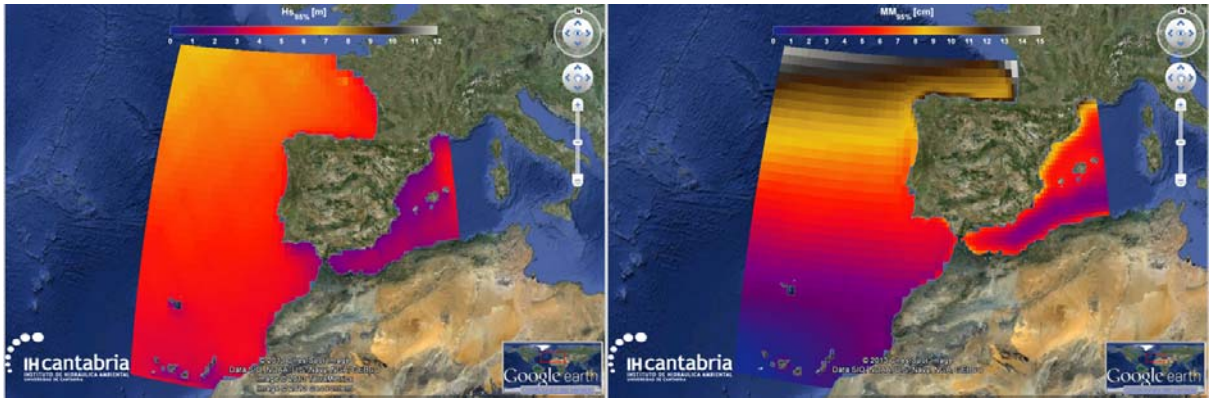


**Figure 9. Cuantil del 95% de la altura de ola significante (izquierda) y cuantil del 95% de marea meteorológica. (tomadas de www.c3e.ihcantabria.com)**

Cada serie de cada variable tiene más de 500 000 datos horarios de los cuales se utilizarán los que mayores inundaciones produzcan. Ya que posteriormente se van a ajustar los regímenes extremales de inundación mediante la técnica POT, únicamente se usarán para el ajuste los 2 o 3 estados de mar extremos de cada año. Esto reduce el número de estados de mar necesarios en cada posición a un total de 61 x 3 = 183 temporales Dichos eventos extremos se consideran en términos de inundación, por lo que, en cada posición, se eligen los 183 estados de mar horarios que mayor run-up produzcan sobre el perfil. Se utiliza la fórmula de Stockdon *et al*. (2006) para estimar el valor del run-up a partir de las series de nivel del mar, altura de ola significante y periodo de pico, teniendo en cuenta la pendiente del perfil sumergido.

Cabe señalar que la utilización de la fórmula de Stockdon para el cálculo del run-up únicamente sirve para seleccionar los estados de mar que mayores inundaciones potenciales producen, es decir como un indicador. Posteriormente se calculará de forma precisa la inundación producida por todos ellos a través del modelo IH-2VOF.

#### 2.3.2.4.- Selección de las simulaciones a realizar con el modelo IH-2VOF

El cálculo de la inundación en cada perfil se realiza a través de simulaciones numéricas con el modelo IH-2VOF. A lo largo del litoral español se han obtenido del orden de 30 000 perfiles, por lo tanto, la simulación de todos los temporales seleccionados en cada perfil (183), conlleva ejecutar numéricamente más de cinco millones de estados de mar (30 000 x 183). Teniendo en cuenta que cada ejecución de un estado de mar horario con el modelo IH-2VOF tarda del orden de 4 días, resulta inviable la ejecución de los cinco millones de estados de mar, por tiempo de cómputo.

Para solucionar este problema, el IH de Cantabria ha desarrollado un método de clasificación con el que se selecciona un número factible de ejecuciones (del orden de 1000) que sean representativas del total (500 0000). Para ello se utilizan algoritmos de selección y clasificación para variables de alta dimensionalidad (Camus *et al*. 2011a).

Previamente a la clasificación, se incorpora la información de la dinámica actuante de cada estado de mar horario ([1]Hs, [2]Tp y Nivel) en la geometría real de cada perfil, de forma que se definen unos "perfiles adimensionales" para cada temporal y para cada posición de cada perfil. Con esta adimensionalización se busca tener en cuenta que distintas combinaciones de oleajes actuando sobre diferentes perfiles con pendientes distintas, pueden tener un mismo run-up o inundación, si se cumplen ciertas relaciones. De esta forma, si se encuentran dichas relaciones se puede reducir el número de ejecuciones a realizar, pues conjuntos de distintas geometrías con distintas dinámicas proporcionarían los mismos resultados.

A modo de ejemplo, en la Figure 10 se presenta la configuración de dos playas muy distintas en las que se obtiene el mismo valor de inundación (run-up adimensional = 1.1).

[1] Hs: altura significante

[2] Tp: periodo de pico

El perfil de playa de la izquierda tiene un perfil más tendido que el de la derecha, en cambio el oleaje de la derecha está más peraltado que el de la izquierda. Como resultado, la inundación, medida en términos de run-up adimensional (Ru/Hs) es la misma. Esto es debido a que el run-up sobre una playa se rige o está relacionado por el número de Iribarren (Ir), ya que dos playas con el mismo número de Iribarren teóricamente tendrán la misma inundación.

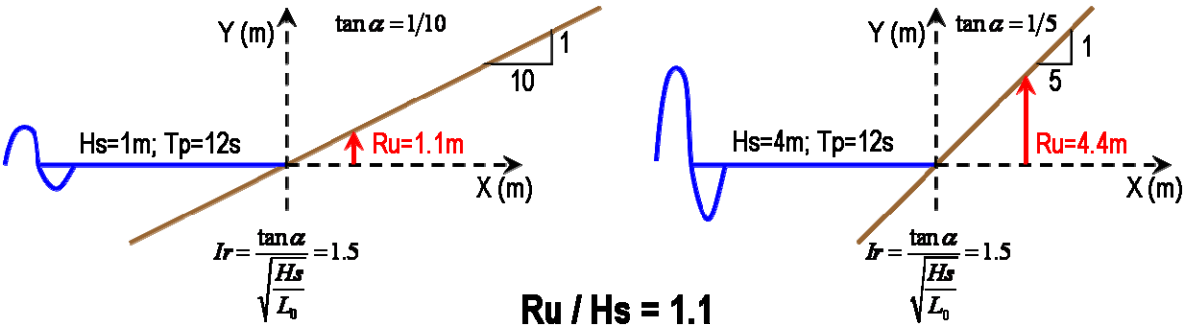


**Figure 10. Ejemplo de dos perfiles con el mismo número de Iribarren (Ir) y run-up adimensional (Ru/Hs). Perfil izquierda: Pendiente 1/10, Ru = 1.1 m, Hs = 1 m, Tp = 12 s. Perfil derecha: Pendiente 1/5, Ru = 4.4 m, Hs = 4 m, Tp = 12 s**

En la literatura existen multitud de formulaciones semi-empíricas que estiman el valor del run-up (Stockdon *et al.*, 2006; EurOtop, 2007,…), pero siempre dependen de una u otra manera del número de Iribarren. El número de Iribarren (Ir) es un parámetro que relaciona la pendiente de la playa con el peralte del oleaje. Así, si Ru/Hs es proporcional a Ir y la pendiente de la playa la expresamos como y/x, se tiene:

siendo Hs, la altura de ola significante y $L_0$ la longitud de onda en profundidades indefinidas definida a partir del periodo de pico.

Con esta transformación de las coordenadas del perfil se consigue lo que se denomina "perfil adimensional", que tiene una pendiente que coincide con el número de Iribarren y cuyos nuevos ejes o coordenadas ($Y/Hs - X/\sqrt{(HsL_0)}$) son adimensionales. En la Figure 11

se muestra la adimensionalización de los dos perfiles mostrados en la Figure 10. Se verifica que ambos perfiles que tienen geometrías y dinámicas distintas, convergen en un mismo perfil adimensional, pues tienen el mismo número de Iribarren.

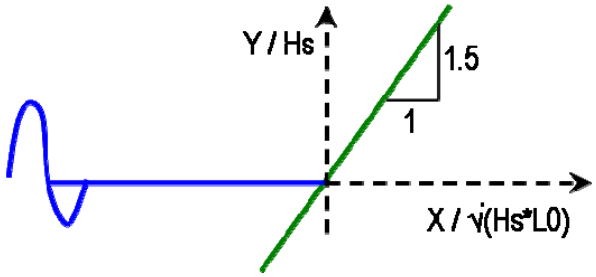


**Figure 11. Ejemplo de perfil adimensional con un número de Iribarren, Ir = 1.5**

Todo este análisis para determinar el "perfil adimensional" se basa en un estudio teórico basado en el comportamiento de playas que tienen perfiles con pendientes uniformes. Pero los perfiles de las playas reales tienen cambios de pendiente, dunas, barras, etc. lo que complica la definición de la pendiente característica de una playa y por lo tanto la definición del número de Iribarren para un determinado estado de mar. Usualmente se adopta un criterio, bajo ciertas hipótesis, para definir la pendiente con la que se utilizan las formulaciones semi-empíricas. Con la adimensionalización propuesta no es necesario definir una pendiente característica del perfil de playa, lo que evita tener que realizar hipótesis simplificativas y facilita la sistematización del procedimiento para todo tipo de perfiles de playa reales. En la Figure 12 se muestra un ejemplo de perfil real (izquierda) y perfil adimensionalizado (perfil derecha) realizado directamente a partir de un sencillo cambio de sistema de coordenadas Y □ Y/Hs; X □ X/√(HsL0). Se comprueba que el perfil adimensional mantiene la forma de la geometría original, pero al ser adimensional permite la comparación directa con otros perfiles adimensionales generados a partir de perfiles y dinámicas distintas.

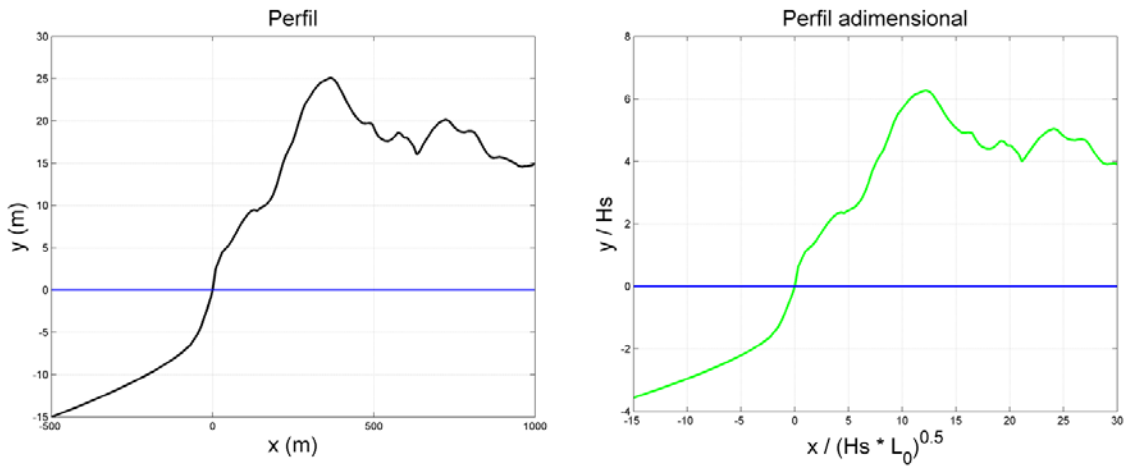


**Figure 12. Ejemplo de adimensionalización de un perfil real (Emergido + Sumergido) con un estado de mar de Hs = 4 m y Tp = 12 s.**

Una ventaja añadida de la adimensionalización de perfiles reales es que, al mantener la forma de los perfiles (cambios de pendiente, dunas, etc.), se aprovecharán al máximo las capacidades del modelo numérico IH-2VOF, que permite reproducir la hidrodinámica en la zona de rompientes para cualquier geometría, sin ningún tipo de simplificación.

En resumen, el sencillo método de adimensionalización propuesto permite comparar directamente todos los perfiles adimensionales e incorpora la información necesaria para resolver los procesos de inundación; tanto la geometría del perfil del terreno emergido y sumergido, como la dinámica de los temporales que actúan sobre el perfil (oleaje y nivel). Gracias a ello se realiza la selección de los casos a ejecutar con el modelo IH-2VOF a partir de la muestra completa de perfiles adimensionalizados. En base a dicha muestra se realiza una clasificación para obtener los tipos o clústers que mejor representen la variabilidad en España. Se utiliza una combinación de algoritmos de clasificación y selección para variables de alta dimensionalidad (Camus *et al*., 2011a) en tres etapas.

Inicialmente se aplica la técnica de selección Max-Diss[3]. Con dicha técnica se busca, dentro de la muestra de datos, aquellos que son más distintos entre sí, por lo que siempre se seleccionan los datos más extremos. En su aplicación a la presente metodología, se reduce la dimensión del problema sin perder la información de la variabilidad de los perfiles adimensionales. Por lo que se realiza una selección Max-Diss de 25 perfiles de los 183 que

[3] Max-Diss: Máxima disimilitud en español, permite localizar los datos de una muestra que son más distintos entre sí.

se tienen en cada posición. En esta etapa se eliminan los acantilados por ser zonas de la costa no susceptibles de inundación; únicamente se analizan perfiles costeros no acantilados. Se consideran perfiles acantilados los que, al inicio del perfil emergido, tienen pendientes continuadas superiores al 50% o desniveles superiores a los 30 m.

Posteriormente se utiliza la técnica de clasificación K-Mean[4]. Con dicha técnica se obtienen los perfiles adimensionales más representativos de la muestra. En ella se realiza un ajuste de componentes principales (PCs), de los cuales se utilizan únicamente los que explican al menos el 99% de la varianza. Se obtuvo una clasificación con 121 tipos de perfiles adimensionalizados, de los cuales se eliminaron los menos representativos (con menos del 0.01% de los perfiles). En la Figure 13 están representados los perfiles adimensionales característicos ("centroides") de cada uno de los 81 clústers de perfiles adimensionales más representativos. En azul se dibuja el perfil sumergido y en rojo el emergido. Se puede comprobar que con la clasificación realizada se contemplan distintos formas y tipos de perfil, cambios de pendientes, formas de dunas, etc.

[4] K-mean: K-medias en español, es una herramienta de análisis cluster diseñada para asignar casos a un número fijo de grupos cuyas características no se conocen aún pero que se basan en un conjunto de variables especificadas

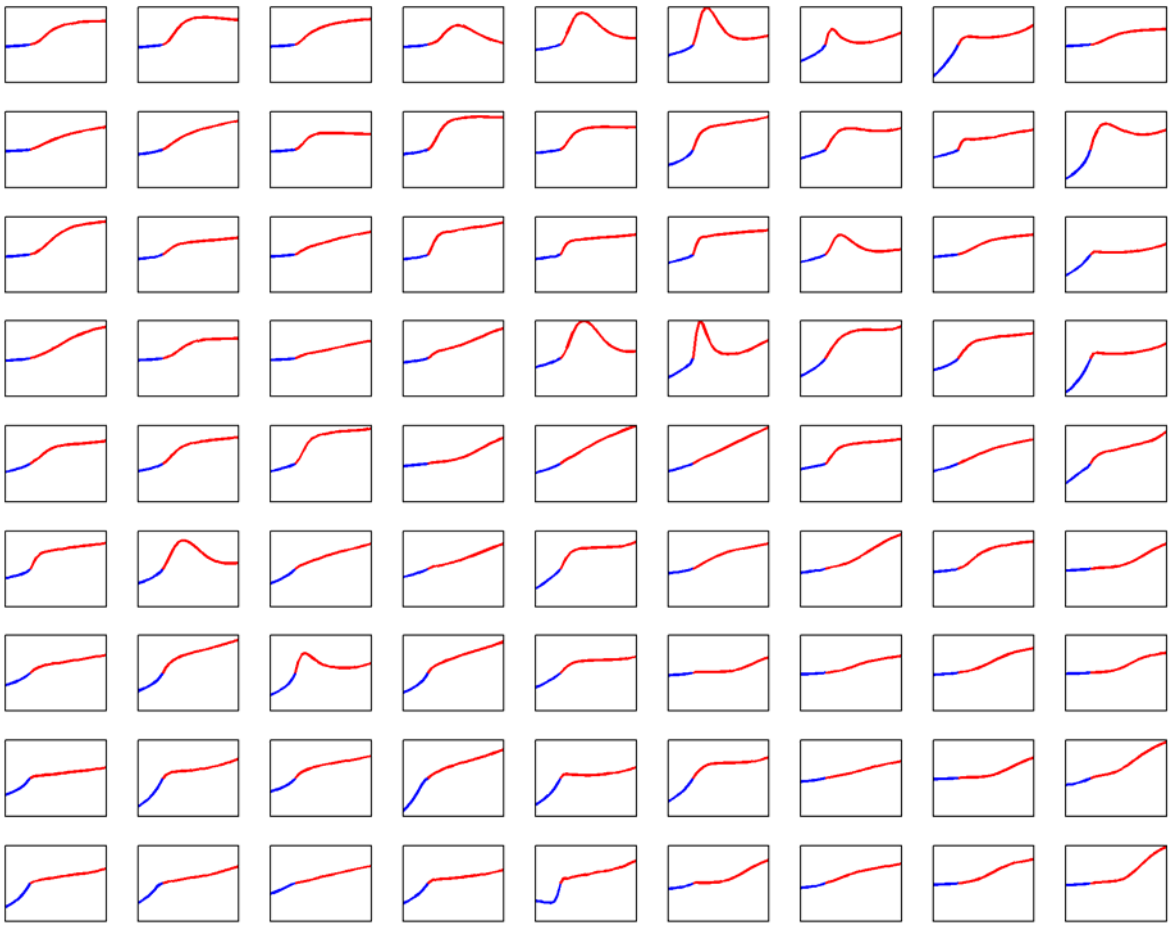

**Figure 13. Clasificación K-Mean de perfiles adimensionalizados con los 81 clústers más representativos**

En la Figure 14 se representan los centroides de cuatro clústers y las banda de confianza del 95 % realizadas con los perfiles adimensionalizados que le corresponden a cada clúster. Se puede ver que dentro de cada clúster existe una cierta variabilidad entre los perfiles, pero todos tienen formas similares. Por ejemplo el clúster Nº 119 tiene una forma de duna muy pronunciada; los clústers Nº 51 y Nº 78 tienen una pendiente poco pronunciada en la parte del perfil sumergido, siendo la pendiente del perfil emergido mayor en el clúster Nº 78 que en el Nº 51, que permanece prácticamente plana; el clúster Nº 11 tiene una mayor pendiente en la parte del perfil sumergido.

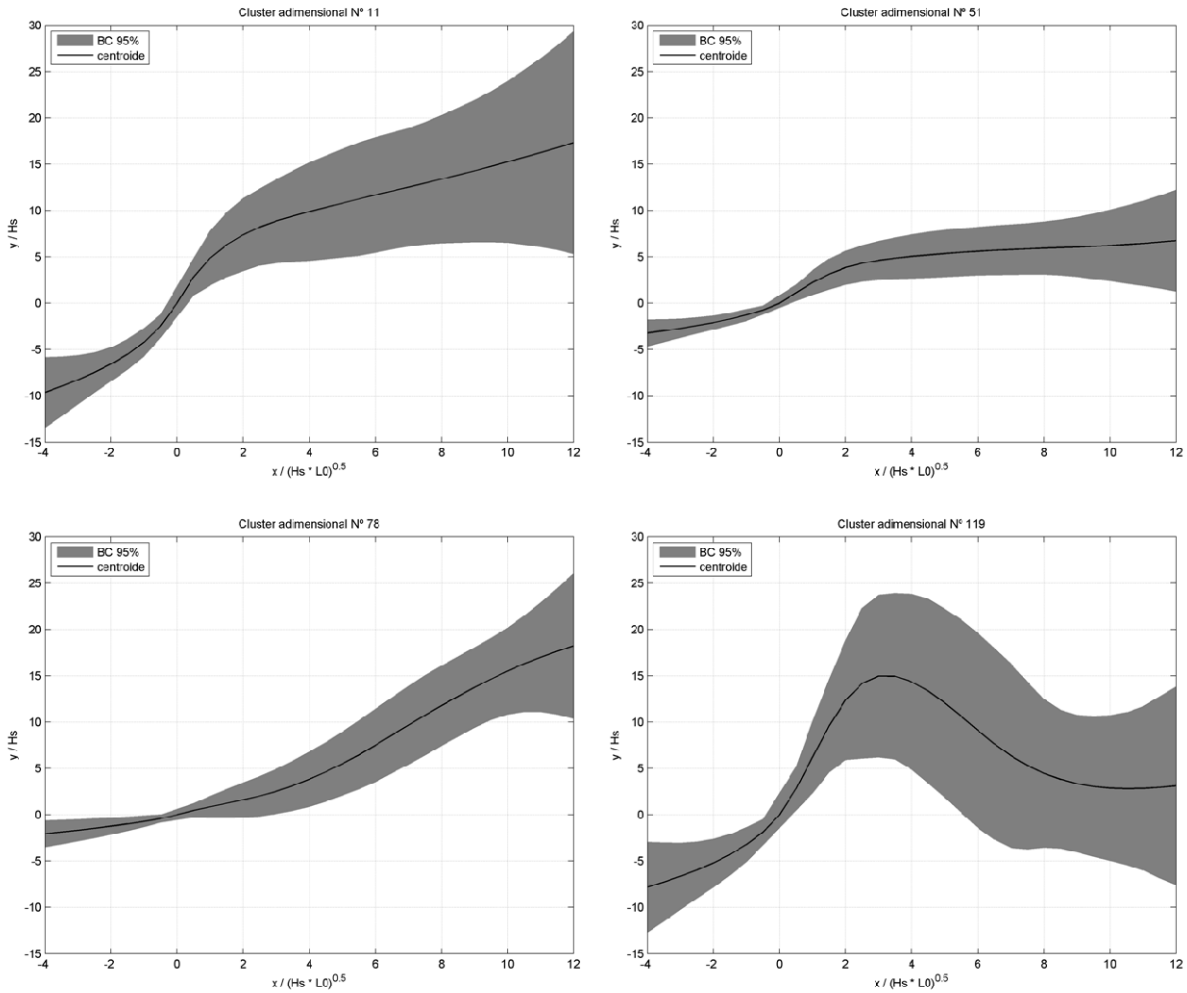


**Figure 14. Ejemplo de 4 clústers (Nº 11, 51, 78 y 119) de perfiles adimensionalizados clasificados con K-Mean (121 clústers). Se representa en cada uno de ellos el centroide (línea negra) y la banda de confianza del 95 % (zona gris).**

Una vez realizada la clasificación con la técnica K-Mean, se aplica de nuevo la técnica Max-Diss para seleccionar los casos que deben ejecutarse con el modelo IH-2VOF. El modelo numérico necesita tener definido tanto el estado de mar (Hs, Tp y nivel) como el perfil real, para poder ejecutarse. Así, para cada clúster se seleccionan los 10 estados de mar (en términos de altura de ola significante y periodo de pico) con la técnica Max-Diss; asegurando así una selección de casos con la mayor variabilidad posible. Posteriormente se determina el perfil real y el nivel del mar de cada estado de mar seleccionado.

Una vez seleccionados los estados de mar y los perfiles a simular con el modelo numérico IH-2VOF, las ejecuciones se realizan siguiendo la metodología que se presenta en el Apéndice II. De esta forma, para cada ejecución de cada clúster se obtiene el remonte o run-up asociado al 2% de las olas ($Ru_{2\%}$) y también el alcance de la inundación asociado al 2% de las olas ($I_{2\%}$). Posteriormente se agrupan los resultados de $Ru_{2\%}$ y de $I_{2\%}$ de cada clúster.

### 2.3.2.5.- Ajuste de las fórmulas basadas en los resultados del modelo IH-2VOF

Tras la ejecución de los casi 1 000 estados de mar horarios realizados con el modelo numérico IH-2VOF, se procesan los resultados y se determina el $Ru_{2\%}$ y el $I_{2\%}$ en todos los casos simulados. Posteriormente se agrupan los resultados por clústers y se ajustan a leyes o fórmulas que rijan el comportamiento del $Ru_{2\%}$ y el $I_{2\%}$ en cada clúster, de forma que puedan usarse de forma predictiva para otros estados de mar no simulados con el modelo numérico.

Para mayor generalidad de los resultados, se busca siempre expresar las fórmulas de forma adimensional. Por ejemplo, frecuentemente los valores de run-up se dividen entre los valores de Hs para definir el run-up adimensional (de la misma forma que se hace la adimensionalización de la coordenada Y del perfil). Teniendo esto en cuenta, se representan los valores de run-up adimensional ($Ru_{2\%}/Hs$) frente a la raíz cuadrada de la inversa del peralte del oleaje ($\sqrt{(L_0/Hs)}$). Con esta dependencia se destaca, para cada clúster, si existe independencia o no del run-up adimensional frente a la forma del perfil. De forma teórica, si $Ru_{2\%}/Hs$ no dependiese de la pendiente del perfil (como pasa en las playas disipativas), entonces sería proporcional a $\sqrt{(L0/Hs)}$. Por otro lado, si los perfiles pertenecientes a un clúster determinado no tuviesen cambios de pendiente y tuviesen el mismo número de Iribarren, entonces el $Ru_{2\%}/Hs$ tendría un valor constante e independiente de $\sqrt{(L0/Hs)}$.

En la Figure 15 se muestran los ajustes realizados para el run-up adimensional en los 4 clústers mostrados en la Figure 14. Se puede comprobar que los clústers en los que la pendiente permanece aproximadamente constante (Nº 51 y Nº78), los ajustes salen horizontales, es decir independientes de $\sqrt{(L0/Hs)}$. En cambio, los clústers en los que los perfiles tienen cambios bruscos de pendientes (Nº 11 y Nº 119), los ajustes las líneas de ajuste son dependientes de $\sqrt{(L0/Hs)}$. Así mismo también se puede comprobar que los clústers con menores pendientes (perfiles más disipativos) tienen valores más pequeños de

$Ru_{2\%}$/Hs. Cabe señalar que la hipótesis de dependencia de $Ru_{2\%}$/Hs con la covariable √(L0/Hs) se ha contrastado a un nivel de significancia del 95%.

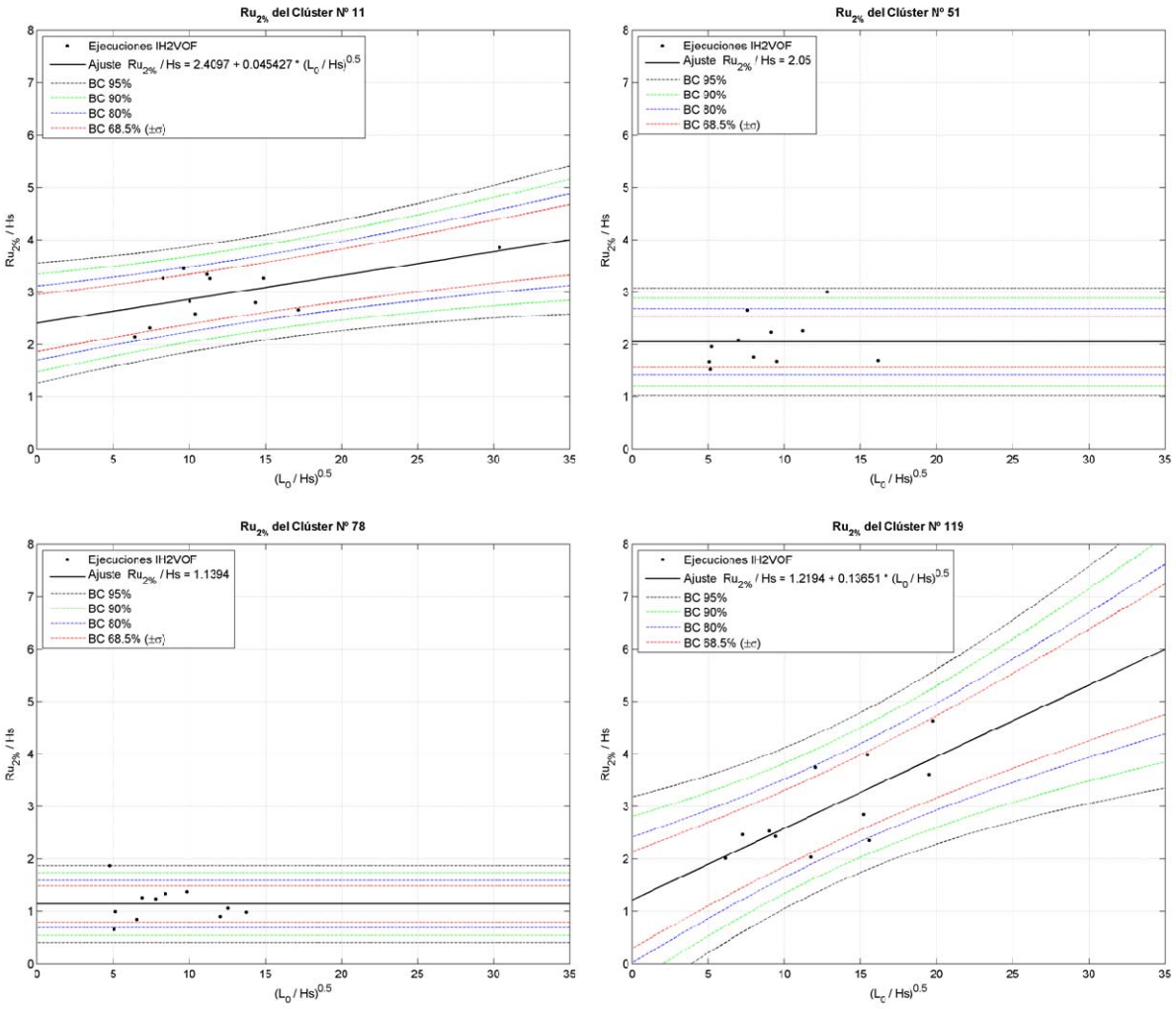


**Figure 15. Ajustes lineales del run-up adimensional ($Ru_{2\%}$/Hs) en 4 clústers (Nº 11, 51, 78 y 119). Los puntos negros son los resultados de las ejecuciones del modelo IH2VOF, la línea negra es el ajuste de los datos a una recta y las líneas discontinuas son distintas bandas de confianza al 95%, 90%, 80% y 68.5% respectivamente.**

De forma análoga a como se han ajustado los valores de run-up adimensional en cada clúster, se realiza el ajuste de los valores del alcance de la inundación adimensional. También en este caso se representan los valores obtenidos frente a la raíz cuadrada de la inversa del peralte del oleaje (√(L0/Hs)). La adimensionalización del alcance de la inundación ($I_{2\%}$) se realiza con la misma variable con la que se adimensionaliza la

coordenada X del perfil, siendo la inundación adimensional igual a $I_{2\%}/\sqrt{(L0Hs)}$. Con la definición de estas variables adimensionales se destaca la dependencia del alcance de la inundación frente a la forma del perfil, si bien la interpretación de los resultados es más complicada de explicar que en el caso del run-up.

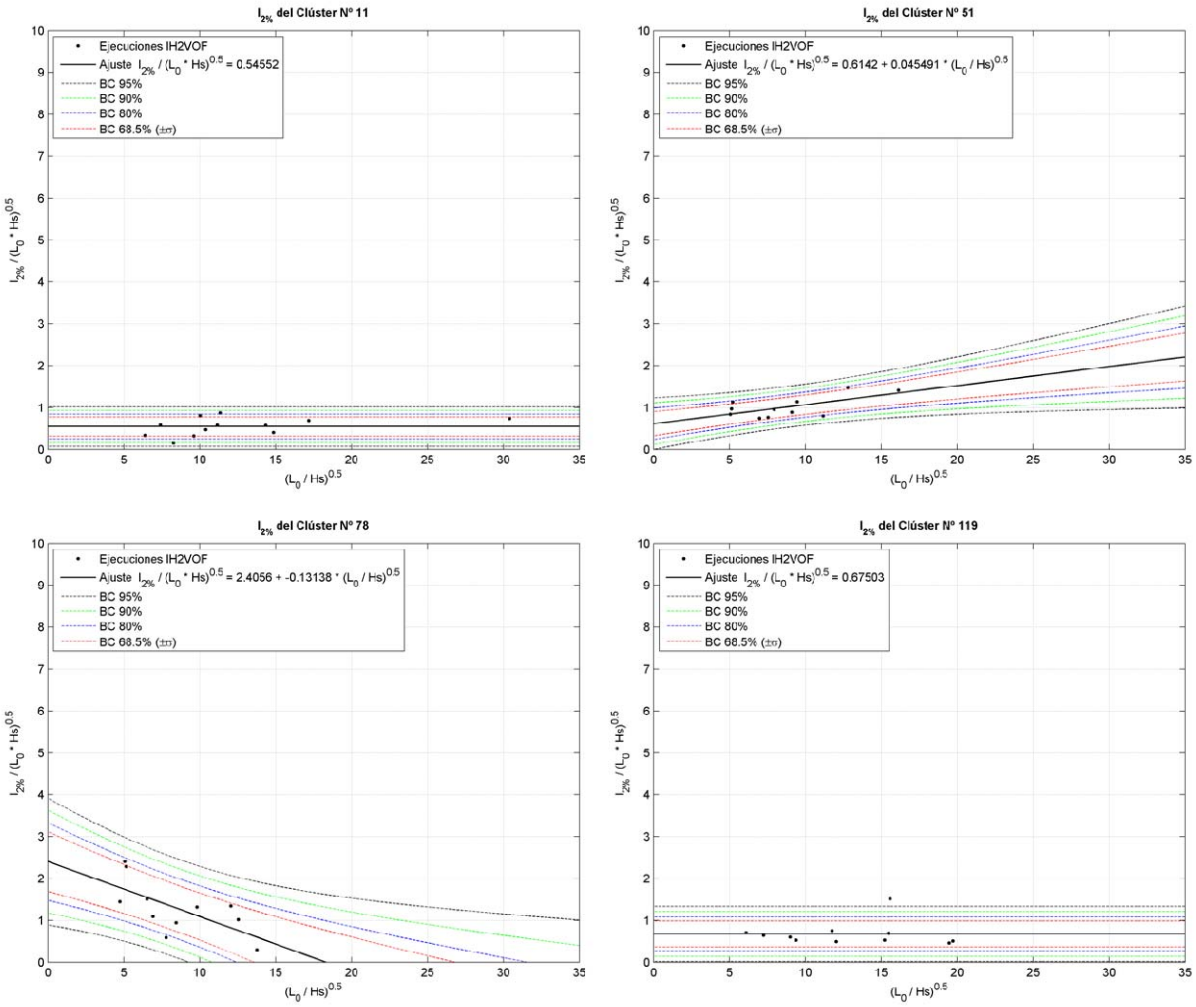


**Figure 16. Ajustes lineales del alcance de la inundación adimensional (I2%/√L0Hs) en 4 clústers (Nº 11, 51, 78 y 119). Los puntos negros son los resultados de las ejecuciones del modelo IH-2VOF, la línea negra es el ajuste de los datos a una recta y las líneas discontinuas son distintas bandas de confianza al 95%, 90%, 80% y 68.5% respectivamente.**

En la Figure 16 se muestran los ajustes realizados para el alcance adimensional en los 4 clústers mostrados en la Figure 14. Se puede comprobar que los clústers en los que las

rectas de ajuste permanecen horizontales, son los mismos que en la Figure 15 tienen pendiente (Nº 11 y Nº 119). En cambio los que en la Figure 16 tienen pendiente, en la Figure 15 son horizontales (Nº 51 y Nº78). Esto es debido a la relación geométrica intrínseca existente entre el $Ru_{2\%}$, el $I_{2\%}$ y la forma de cada clúster. Cabe señalar que se han hecho también contrastes de hipótesis con un nivel de significancia del 95% para aceptar la dependencia de la inundación adimensional frente a la covariable √(L0/Hs).

Finalmente, con los ajustes adimensionales del $Ru_{2\%}$ y del $I_{2\%}$ en cada clúster, se tiene una colección de fórmulas con las que se puede determinar el $Ru_{2\%}$ y el $I_{2\%}$ de un estado de mar cualquiera. Pero no se utiliza la estima central de los ajustes, sino que se utiliza un determinado intervalo superior de confianza. Para el presente trabajo se utiliza la banda de confianza del 90%.

### 2.3.2.6.- Cálculo de las series de $Ru_{2\%}$ e $I_{2\%}$ en cada perfil

Con las fórmulas anteriormente determinadas, para cada estado de mar y perfil, se calculan los valores de $Ru_{2\%}$ y del $I_{2\%}$, con un suficiente margen de seguridad o intervalo de confianza. De esta forma es sencillo reconstruir la estadística extrema de los más de 60 años de dinámicas en cada perfil.

Así, para un determinado estado de mar (oleaje y nivel del mar) y un determinado perfil (compuesto por el perfil emergido y sumergido), aplicando la adimensionalización del perfil, se puede determinar cuál es el clúster que le corresponde. En la adimensionalización del perfil no solo interviene el cambio de sistema de coordenadas Y □ Y/Hs; X □ X/√(HsL0), sino que también previamente el origen del perfil se referencia a la posición del nivel del mar. Posteriormente, una vez conocido el número de clúster, se utilizan las fórmulas ajustadas de dicho clúster para calcular los valores de $Ru_{2\%}$ y de $I_{2\%}$. Las fórmulas del IH-2VOF utilizan únicamente el valor de la altura de ola significante (Hs) y de la longitud de onda en profundidades indefinidas ($L_0$) para estimar los valores de run-up ($Ru_{2\%}$) y de alcance de la inundación ($I_{2\%}$).

El uso de las fórmulas determinadas con el ajuste de los resultados del modelo IH-2VOF se plantea utilizándose para un determinado intervalo superior de confianza. Como ya se ha comentado, para el presente trabajo se utiliza la banda de confianza del 90%.

### 2.3.2.7.- Ajuste de los regímenes extremales de inundación en cada perfil

A partir de los valores extremos de $I_{2\%}$ y $Ru_{2\%}$, calculados para los 183 temporales de cada perfil, se ajustan los regímenes extremales con la técnica POT ("*Peaks Over Threshold*"). Asumiendo que la tasa de ocurrencia de eventos se distribuye según un proceso de Poisson y que las excedencias siguen la (GPD) ("*Distribución Generalizada de Pareto*"), se tiene que el modelo GPD-Poisson es idéntico al modelo GEV ("*Generalized Extreme Value*"), expresando el resultado del ajuste en términos del máximo anual y del período de retorno.

Antes de realizar el ajuste de los regímenes extremales es necesario referenciar las variables al mismo sistema de referencia u origen, de forma que se pueda agregar espacialmente los resultados finales. Por ejemplo, el ajuste del régimen extremal de cota de inundación se obtiene como resultado de la superposición del run-up, el nivel del mar (MA y MM) y la referencia del nivel medio del mar respecto al nivel medio del mar en Alicante (Ref). En la parte derecha de la Figure 17 se muestra un esquema, en el cual se toma como origen el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA), el mismo que se ha tomado en los ajustes de la fase 1 (solo nivel del mar sin oleaje). Aquí, la Cota de Inundación (CI) se define como la superposición de la referencia del nivel medio del mar respecto al nivel medio del mar en Alicante (Ref), la Marea Astronómica (MA), la Marea Meteorológica (MM) y el $Ru_{2\%}$ obtenido con las fórmulas del IH2-VOF (que está referenciado al nivel del mar).

En la parte izquierda de la Figure 17 se presenta un ejemplo de ajuste del régimen extremal, con su intervalo de confianza del 90%. Se representa el valor de la cota de Inundación (respecto al Nivel Medio del Mar en Alicante, NMMA) frente al periodo de retorno en años (Tr).

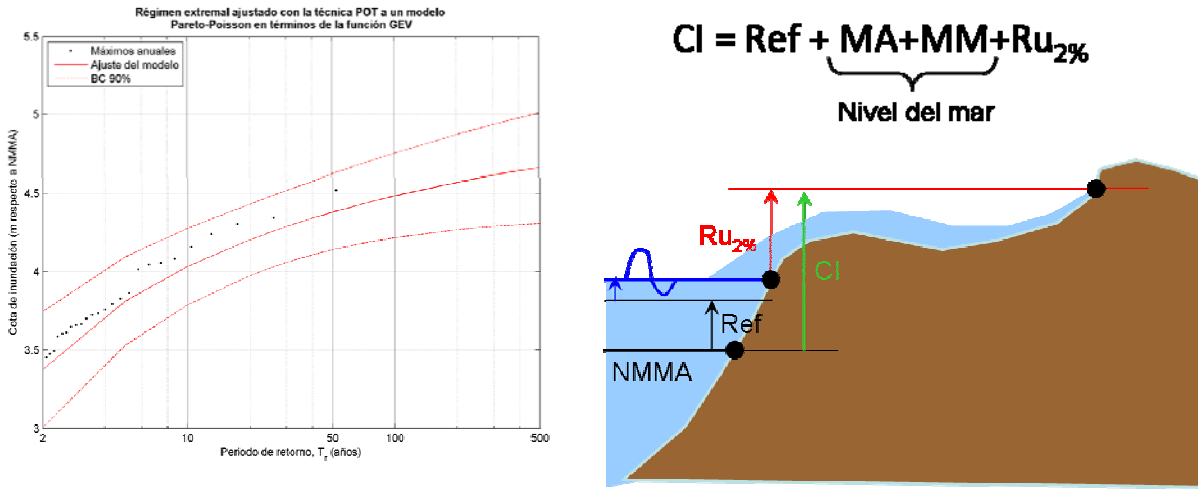


**Figure 17. Ejemplo de ajuste del régimen extremal de cota de inundación con nivel del mar y oleaje.**

De forma análoga a como se referencia la cota de inundación, también se referencia la distancia o alcance de la inundación respecto al corte del terreno con el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA). En la parte derecha de la Figure 18 se muestra el esquema correspondiente. La Distancia de Inundación (DI) se define como la superposición de la distancia desde el inicio del perfil emergido (corte con el NMMA) hasta el corte con el nivel del mar (I1) y el I2% obtenido con las fórmulas del IH2-VOF (que está referenciado al nivel del mar). En la parte izquierda de la Figure 18 se presenta un ejemplo de ajuste del régimen extremal, con su intervalo de confianza del 90%. Se representa el valor de la distancia de inundación frente al periodo de retorno en años (Tr).

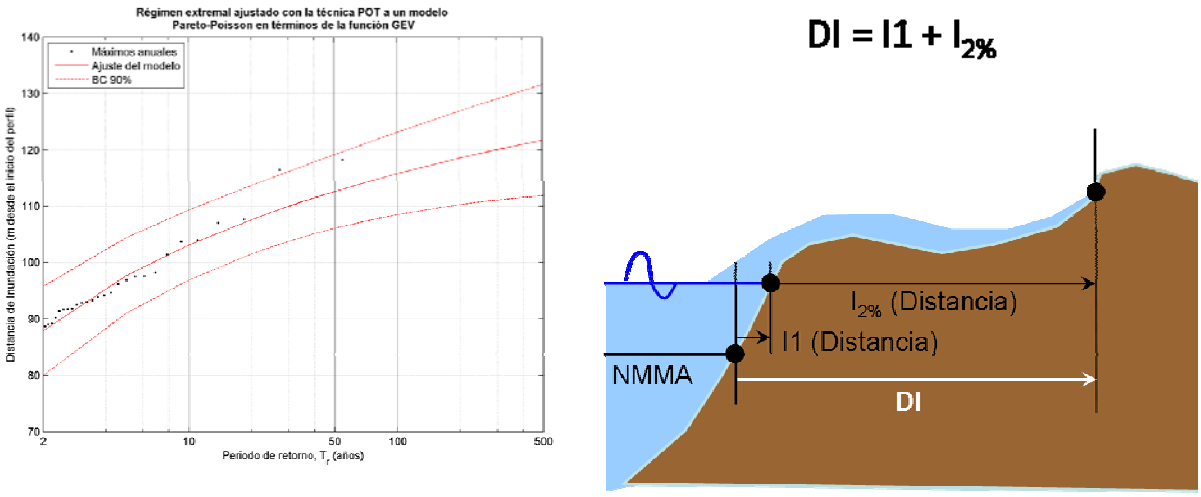


**Figure 18. Ejemplo de ajuste del régimen extremal de distancia de inundación con nivel del mar y oleaje.**

Una vez realizados los ajustes de los regímenes extremales se calculan los valores asociados a distintos los periodos de retorno de 100 años y 500 años. (los mismos que los de la fase 1, con sólo nivel del mar).

### 2.3.2.8.- Cálculo de la extensión de la inundación en cada perfil

El resultado final que se busca en cada perfil es el cálculo de la extensión máxima de la inundación a lo largo del corte transversal del terreno, asociada a unos periodos de retorno concretos. Para ello se cuenta con los valores de cota de inundación (CI Tr), medida en vertical y distancia de inundación (DI Tr), medida en horizontal, para cada periodo de retorno. A partir cada una de ellas se puede calcular la extensión de la inundación (medida en horizontal), pues la forma del perfil liga las distancias en vertical y en horizontal de la inundación. Pero al ser variables distintas y haberse tratado de forma independiente, no se obtienen los mismos resultados en función de si se calcula la extensión de la inundación a partir de unos u otros valores. Sólo coincidirían si el perfil fuese monótono creciente.

Esto es debido a que se están extrapolando los resultados. En primera instancia, al realizar el ajuste de los regímenes extremales basándose en 60 años de datos y caracterizar periodos de retorno de 100 y 500 años, se extrapolan los resultados; pero también al incorporar un cierto intervalo de confianza en la utilización de las formulas del IH-2VOF, pues se obtienen valores de inundación mayores.

Inicialmente se podría considerar que las distancias de inundación (DI Tr) son directamente el resultado buscado de extensión de la inundación, y efectivamente en una primera aproximación se considera así. En la Figure 19 se representa con líneas continuas la distancia de inundación (DI Tr) y con líneas discontinuas la cota de inundación (CI Tr). Se puede verificar que se trata de un perfil con una duna o similar, de forma que la inundación rebasa la cota máxima de dicha duna; los valores de DI Tr representan correctamente dicho fenómeno, pero los de CI Tr no tienen en cuenta que la cota del terreno disminuye tras la duna, obteniéndose valores de la extensión de la inundación cercanos a los 1 000 m, que no son correctos. Por ello, se utilizan los valores de distancia de inundación para representar la extensión de la inundación en dicho perfil.

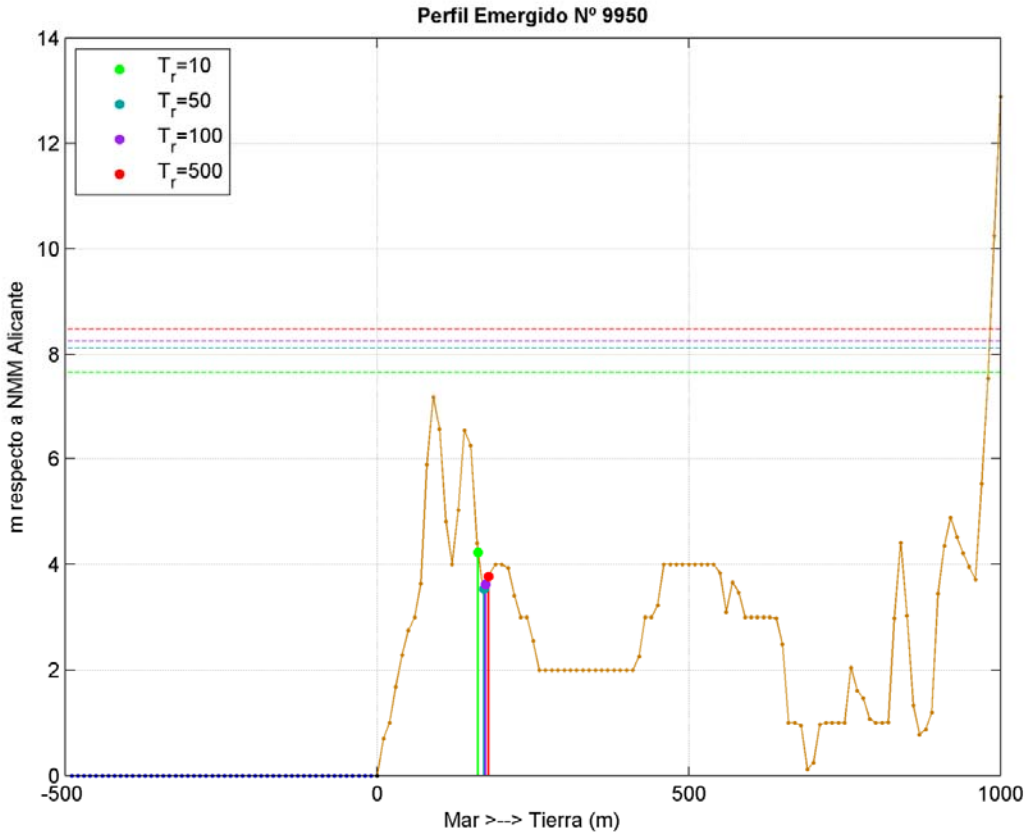


**Figure 19. Ejemplo de la extensión de la inundación a partir de la cota de inundación (líneas discontinuas horizontales) y distancia de inundación (líneas continuas verticales) para Tr=10, 50, 100 y 500 años en el perfil Nº 9950 (perfil emergido) calculado con nivel del mar y oleaje**

En la Figure 20 se muestra otro ejemplo en el que con los valores de DI Tr se obtienen valores de cota de inundación excesivos, en cambio los de CI Tr representan correctamente la inundación en este caso. Por ello, se utilizan los valores de cota de inundación para representar la extensión de la inundación en dicho perfil.

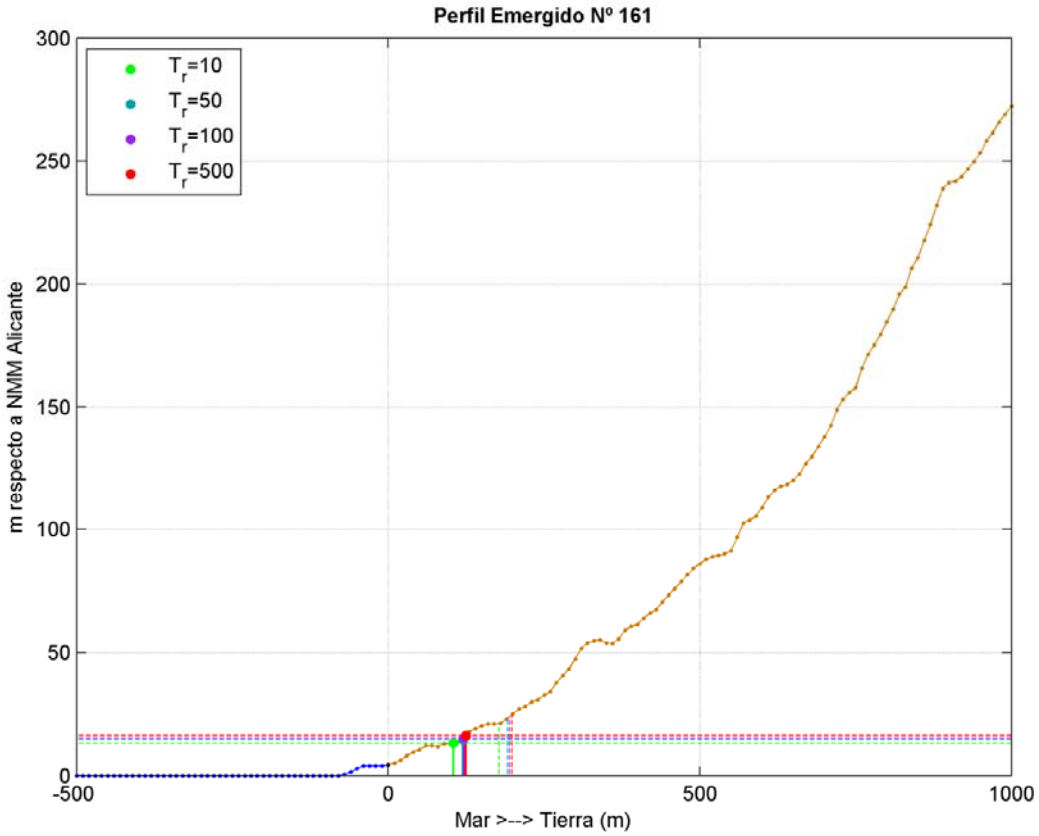


**Figure 20. Ejemplo de la extensión de la inundación (líneas continuas verticales) a partir de la cota de inundación (líneas discontinuas horizontales) y distancia de inundación (líneas discontinuas verticales) para Tr=10, 50, 100 y 500 años en el perfil Nº 161 (perfil emergido) calculado con nivel del mar y oleaje.**

Como criterio general se utilizarán los valores de la extensión de la inundación que sean menores de entre las dos alternativas de cálculo, los obtenidos a partir de la cota de inundación (CI Tr) o los de distancia de inundación (DI Tr). También se tendrá en cuenta la coherencia entre los distintos periodos de retorno: $I_{Tr}=100 < I_{Tr}=500$.

Finalmente, para cada periodo de retorno de cada perfil, se determinan las coordenadas hasta donde llega la extensión de la inundación. Dichas coordenadas se referencian al sistema UTM ETRS89 UTM30N.

## 3.- ACTUALIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL RIESGO

### 3.1.- INTRODUCCIÓN

Como se ha comentado en el apartado 1.-INTRODUCCIÓN, de las tres fases exigidas por la normativa de Inundaciones 2007/60, ya se ha elaborado la primera fase: la Evaluación Preliminar de los Riesgos de Inundación (en adelante EPRI), en la que el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX) ha definido unas Áreas Potenciales de Riesgos de Inundación. El presente trabajo forma parte de la segunda fase de implantación de dicha Directiva, en la que se simulan numéricamente los procesos de inundación y se utilizan datos de mayor calidad (con mayor resolución espacial y temporal) que en el EPRI.

En este capítulo se define una metodología de verificación y contraste de la EPRI para que de forma rápida y eficiente se contraste si las zonas obtenidas en la primera fase de la Directiva (EPRI) son consistentes con las que se van a estudiar en esta segunda fase. Para la aplicación de dicha metodología se ha usado el ráster de la extensión máxima de la inundación proporcionada por el IH Cantabria para un periodo de retorno de 50 años, con una resolución espacial de 200 m a lo largo de la costa española.

### 3.2.- METODOLOGÍA

La metodología de verificación de la EPRI se basa en la metodología explicada en el apartado 2.-METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA EXTENSIÓN DE LA INUNDACIÓN, que consta de dos fases o aproximaciones. Con la primera aproximación se determinan los mapas de inundación teniendo en cuenta únicamente la dinámica nivel del mar. Posteriormente, con la segunda aproximación, se incorpora el efecto combinado del oleaje y nivel del mar en las zonas del litoral donde el oleaje incide directamente, es decir, en la línea de costa propiamente dicha que no está al abrigo del oleaje.

Para la verificación de la EPRI, el IH de Cantabria ha proporcionado para todo el litoral español las capas en formato ráster de la extensión de la inundación (calculada de forma simplificada) para un periodo de retorno de 50 años.

Esta información ha permitido una verificación preliminar de las ARPSIs (Áreas Potenciales de Riesgos de Inundación) definidas por la EPRI. Una vez identificadas las zonas susceptibles de riesgo de inundación (ya definidas por la EPRI o nuevas) se ha calculado con precisión la extensión de la inundación en dichas zonas.

### 3.3.- RESULTADOS

En el anejo correspondiente a cada una de las Demarcaciones Hidrográficas se recogen los resultados obtenidos de dicha actualización.

## 4.- METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE PELIGROSIDAD DE INUNDACIÓN

### 4.1.- INTRODUCCIÓN

La estimación de la extensión de la inundación costera, como ya se ha comentado, se realiza siguiendo una metodología en dos fases cada una de las cuales genera una serie de datos. Toda esta información se integra mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para poder obtener el producto final, los mapas de peligrosidad.

Con las herramientas del SIG se rectifican los mapas de inundación generados en la fase 1ª (válidos para las zonas del litoral no directamente expuestas al oleaje), con los resultados de los perfiles del terreno de esta fase 2ª (inundación bidimensional con oleaje).

## 4.2.- METODOLOGÍA

### 4.2.1.- Inundación por nivel

Como resultado de la aplicación de la Fase 1 de la metodología (apartado 2.2.-Aproximación metodológica con nivel del mar (1ª)) se obtiene para cada perfil considerado la cota de inundación asociada a nivel del mar (Marea Astronómica, Marea Meteorológica y Referencia al NMMA) para cada uno de los periodos de retorno. Esta información queda recogida en archivos en formato ASCII.

Esta información se trata para poder ser incorporada a un Sistema de Información Geográfica (SIG) y poder hacer uso de las herramientas del mismo.

Para cada ARPSI se interpola la Cota de Inundación obtenida para cada periodo de retorno obteniendo un MDT de Cotas de Inundación que posteriormente se corta con el MDT Topográfico del IGN (MDT05: Modelo Digital del Terreno con paso de malla 5m) para obtener la zona inundable por nivel.

### 4.2.2.- Inundación por nivel y oleaje

Mediante la metodología explicada en el apartado 2.3.-Aproximación metodológica con nivel del mar y oleaje (2ª) se obtienen los datos de extensión de la inundación por oleaje y nivel en la costa. Con dichos datos se generan unos archivos en formato ASCII con los valores longitudinales y latitudinales en UTM que reflejan hasta donde llega la inundación, cada aproximadamente 200 m, para los distintos periodos de retorno calculados.

Esta información se trata para poder ser incorporada a un Sistema de Información Geográfica (SIG) y poder hacer uso de las herramientas del mismo.

Para cada ARPSI, a partir de los valores obtenidos durante la modelización, se obtiene la línea límite de inundación. Esta información se trata con herramientas del SIG para obtener un formato que permita operar con los resultados de inundación obtenidos en la Fase 1 (sólo nivel).

### 4.2.3.- Mapas de peligrosidad

La obtención de la zona de inundación definitiva se determina como la máxima entre la inundación por nivel del mar de la Fase 1 y la inundación por nivel del mar y oleaje de la Fase 2.

La zona de inundación definitiva proporciona los mapas de peligrosidad, que se calculan para cada uno de los periodos de retorno considerados. Al ser de tipo raster, tal como lo solicita la Directiva de Inundaciones, se ha incluido el oleaje como zona de calado 0 de forma que se pueda reflejar su extensión en el mapa de peligrosidad.

Los mapas finales obtenidos, para cada periodo de retorno, están referenciados en coordenadas UTM ETRS89 UTM30N y se acompañarán de hojas en formato MS Excel con los metadatos de su generación.

### 4.2.4.- Consideraciones a la metodología aplicada

#### 4.2.4.1.- Consideraciones sobre la modelización

La metodología usada para calcular la zona de inundación potencial por fenómenos costeros permite, como se ha comentado, la simplificación de un problema altamente complejo, sobre todo teniendo en cuenta la versatilidad de morfologías de la costa española. Es un método que puede aplicarse a todo el litoral español de manera eficiente asegurando unos resultados homogéneos, sobret odo en lo que a criterios empleados se refiere. El método permite la replicabilidad en futuras revisiones asegurando que los resultados sean comparables.

En cualquier caso, conviene no perder de vista que se trata de la aplicación de un modelo sofisticado, pero que necesariamente aplica simplificaciones y por lo tanto presenta limitaciones en su capacidad de simulación y predicción. Como todo modelo, hay varios factores que influyen en los resultados obtenidos: datos de partida, hipótesis admitidas, resolución de trabajo, etc.

Una de las hipótesis de partida es que la inundación que se va a evaluar es la producida por oleaje extremal. La dirección de los perfiles “sensiblemente transversales” con los que se

discretiza la costa, con separaciones nominales de 200 m, se establece a partir de la dirección media del flujo de energía del régimen extremal (máximos temporales). Dicha dirección no tiene por qué coincidir con la dirección media del flujo de energía del régimen medio de oleaje en la zona. Como consecuencia habrá zonas que no se verán afectadas por el oleaje de dichos temporales al estar abrigadas, por su situación, de la dirección de procedencia de los mismos. Esto no quiere decir que temporales de otras intensidades y/o direcciones de procedencia no puedan arribar a dicha zona.

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de una zona protegida por la orografía de los temporales máximos procedentes del NE. Las líneas en rojo y azul (perfil emergido y perfil sumergido) indican la dirección del flujo medio de energía del régimen extremal usado en la modelización. En azul y blanco se ha representado la inundación por nivel (azul) y por oleaje (blanco). Se ha mantenido un buffer hacia mar para ilustrar el ejemplo.

Como consecuencia, las zonas de peligrosidad quedan definidas tal y como se muestra en la Figura 22. Se han representado las zonas inundables derivadas de la modelización efectuada para los periodos de retorno de 100 años y 500 años.

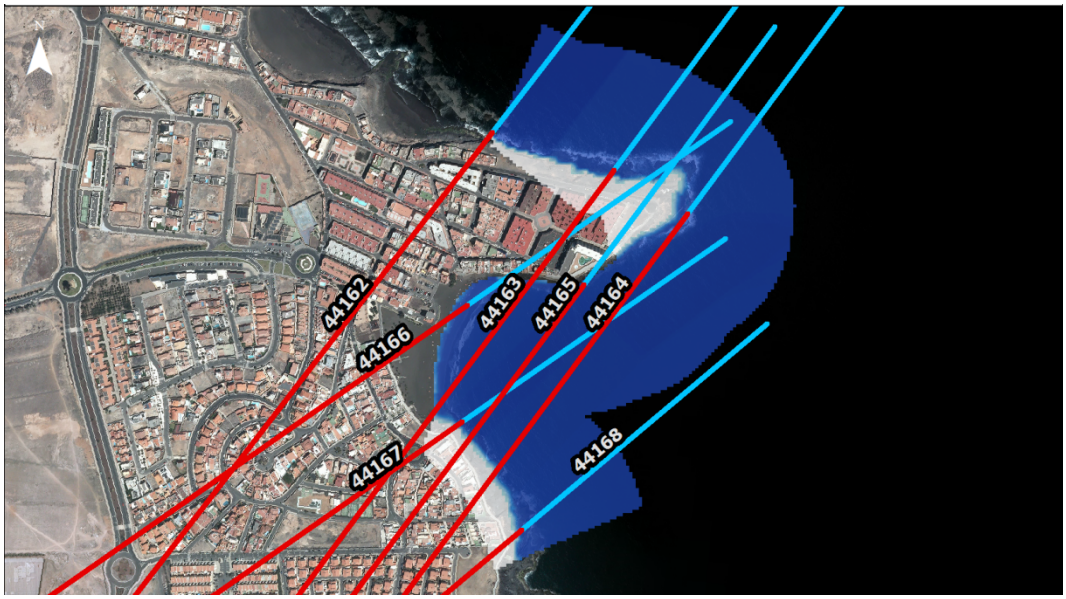


**Figure 21. Zona protegida al abrigo de los temporales extremos de componente NE.**

**Figure 22. Zona inundable para los periodos de retorno de 100 años (naranja) y 500 años (amarillo).**

Por otro lado, la discretización que se ha utilizado es de 200 m nominales. Esto quiere decir que la resolución de los resultados será también de 200 m no pudiendo describir el comportamiento de la inundación por oleaje para distancias inferiores debidas, por ejemplo, a accidentes del terreno de menores dimensiones que la resolución de trabajo. Esta resolución de trabajo, adecuada para el alcance del presente documento consistente en elaborar los mapas de peligrosidad y riesgo por inundación por fenómenos costeros, permite definir las zonas con riesgo de inundación con suficiente precisión e identificar y delimitar aquellas zonas que pudieran ser objeto de un estudio de detalle.

En la Figura 23 se muestra un ejemplo de lo expuesto. Se ha utilizado el modelo digital de elevaciones como base para la figura (resolución 5 m), intensificando la escala de colores para poder identificar mejor las irregularidades del terreno. Las líneas rojas indican la posición de los perfiles de trabajo, con separación nominal de 200 m. La línea negra punteada enmarca la zona inundable obtenida como resultado de la inundación conjunta por nivel y oleaje. Las flechas naranjas marcan la dimensión aproximada, en la dirección longitudinal, de dos accidentes del terreno con menor cota que el terreno circundante. Aunque con la resolución de 200 m la influencia en la inundación debida al oleaje de estos accidentes geográficos no se verá reflejada, la zona de riesgo ha quedado identificada y delimitada. Definida la zona de riesgo de inundación, en las siguientes fases, se podría

llevar a cabo un estudio de detalle en caso necesario, que tuviera en cuenta estas irregularidades del terreno aumentando, por ejemplo, la resolución del modelo.

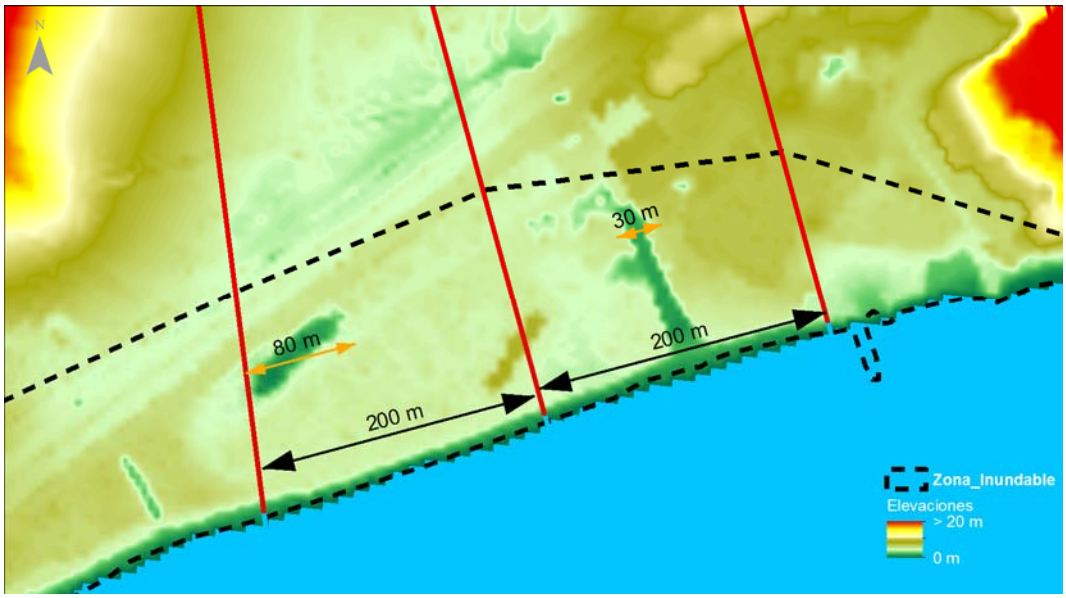


**Figure 23. Resolución de trabajo frente a verdad terreno**

### 4.2.4.2.- Consideraciones sobre el límite marino de las zonas inundables

La línea de orilla del litoral se caracteriza por su gran variabilidad temporal, los distintos procesos costeros pueden dar lugar a diferencias en su posición diarias (mareas), estacionales (perfil de invierno y perfil de verano), anuales (procesos erosivos o de acreción) y a largo plazo (subida del nivel del mar junto a los procesos erosivos o de acreción).

Establecer una delimitación para el límite marino de las zonas inundables requiere de un criterio único, homogéneo y que sea extrapolable fácilmente a todo el litoral español en estudio. Ninguna de las opciones posibles se ajusta a la realidad del terreno dada su naturaleza variable. Algunas de las razones pueden ser, por ejemplo, que la curva de nivel "cero" no estén actualizadas, no tengan una escala adecuada o estén referidas a distintos ceros o que los límites administrativos no siempre se correspondan con la realidad orográfica.

Para el presente trabajo se ha escogido para establecer dicho límite el perímetro del SIOSE 2009. Dicho límite es homogéneo para toda el litoral español, se ajusta a uno de los

elementos evaluables por el presente trabajo (riesgo económico), es un límite oficial y fácilmente disponible para las siguientes revisiones establecidas por el *Real Decreto 903/210, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación*.

Como puede ocurrir con otros límites, puede darse el caso de que la línea de orilla mostrada por las ortofotos utilizadas como base de los mapas de peligrosidad y riesgo no coincida con el límite del SIOSE 2009. A continuación se muestran unos ejemplos.

En la Figura 24 se muestra un ejemplo en el que el límite del SIOSE 2009 (línea negra discontinua) excede la zona de playa seca mostrada por la ortofoto (PNOA 2012).

**Figure 24. Ejemplo en el que el límite del SIOSE 2009 excede la zona de playa seca mostrada por la ortofoto (PNOA 2012)**

En la Figura 25 se muestra el caso contrario. En este caso el límite del SIOSE 2009 (línea negra discontinua) limita el área inundable sin cubrir toda la zona de playa seca mostrada por la ortofoto (PNOA 2012) en su borde marino. Esto no implica que el área por debajo de la línea del SIOSE 2009 no se inunde. Lo que en realidad ocurre es que la lámina de agua procedente de la costa inunda toda la zona tal y como se muestra en la Figura 26 con el patrón de cuadrícula pero esto no queda reflejado al delimitar la zona inundable con una "línea cero". Esta diferencia puede deberse a estados de mareas diferentes, procesos de acreción en la zona, etc.

En la Figura 27 se muestra el mismo ejemplo pero con la ortofoto del PNOA de 2006. Puede verse como la diferencia con la línea del SIOSE 2009 es menor que al comparar con la ortofoto del PNOA del 2012.

**Figure 25. Ejemplo en el que el límite del SIOSE 2009 no alcanza a cubrir toda la zona de playa seca mostrada por la ortofoto (PNOA 2012)**

**Figure 26. Ejemplo con la zona inundable delimitada por el SIOSE 2009 y la lámina de agua hasta el mismo**

**Figure 27. Ejemplo en el que el límite del SIOSE 2009 no alcanza a cubrir toda la zona de playa seca mostrada por la ortofoto (PNOA 2006)**

Finalmente en la Figura 28 se recoge un ejemplo en el que el límite marino de la zona inundable se ajusta a la línea de orilla mostrada por la ortofoto del PNOA 2012.

**Figure 28. Ejemplo en el que el límite del SIOSE 2009 y la ortofoto (PNOA 2012) tienen límites coincidentes**

#### 4.2.4.3.- Consideraciones sobre el límite lateral de las zonas inundables

Para establecer el límite lateral de las ARPSIs se ha utilizado como criterio el final de la afección producida por la inundación, es decir, la dimensión longitudinal de las ARPSIs se restringe a las zonas en donde hay afección a la población, la actividad económica. el medio ambiente o el patrimonio cultural.

En la Figura 29 se recoge un ejemplo para ilustrar el criterio mencionado. El ARPSI definida corresponde a la zona de color amarillo sin trama y cuyo borde marino tiene la línea discontinua negra. La inundación prosigue a ambos lados del ARPSI (zona de trama rayada en amarillo), sin embargo la afección a zona urbana, población o actividad económica no es significativa, por lo que se limita la longitud del ARPSI a la zona de riesgo. Como puede verse, la zona adyacente también se inunda, pero no conlleva una afección significativa.

**Figure 29. Ejemplo de aplicación del criterio utilizado para delimitar lateralmente las ARPSIs**

### 4.2.5.- <u>Representación de líneas legales</u>

Si bien el RD 903/2010 indica la necesidad de representar en los mapas de peligrosidad la delimitación de la zona de dominio público marítimo-terrestre, la ribera del mar y la zona de servidumbre de protección en zonas costeras, es importante destacar que **estos mapas, así obtenidos, no tienen por objeto cuestionar las limitaciones anteriormente**

**citadas sino obtener unos mapas que sirvan como instrumento adecuado para la posterior Gestión de las Zonas Inundables**.

Por esta razón, la delimitación de las Zonas Inundables no guarda relación con los límites del DPMT. Esto se debe a que los criterios empleados en la definición de las líneas legales incluyen más factores además de los puramente inundables (dunas, marjales, esteros, fincas públicas que se incorporan al DPMT…).

**Figure 30. Ejemplo de representación de DPMT (línea verde) sobre zona inundable de T=500 años de período de retorno.**

### 4.3.- RESULTADOS

En el anejo correspondiente a cada una de las Demarcaciones Hidrográficas se analizan los resultados obtenidos.

## 5.- METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN

### 5.1.- INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de los mapas de riesgo es aportar la información fundamental para la elaboración de los futuros planes de gestión del riesgo. Estos mapas, generados en base a los mapas de peligrosidad, incorporan la información de los posibles daños asociados a las inundaciones tanto en lo concerniente a salud humana como en lo relativo a la actividad económica, el medio ambiente y el patrimonio cultural.

La metodología empleada es la reflejada en la "PROPUESTA DE MÍNIMOS PARA LA METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN DE LOS MAPAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN" elaborada por la Dirección General del Agua expresamente para dar cumplimiento a la Directiva de inundaciones de la Unión Europea.

### 5.2.- METODOLOGÍA

#### 5.2.1.- Afección a la población

En el artículo 6 de la Directiva 2007/60/ce, en su punto 5, se indica que deberá incluirse un "*número indicativo de habitantes que pueden verse afectados*".

La Guía metodológica propone como información de base el empleo de la información de densidad poblacional proporcionada por la EEA (Agencia Europea de Medio Ambiente), sin embargo, en función de la calidad de los resultados obtenidos en cada demarcación, se han empleado otras fuentes, tales como los datos catastrales.

En el anejo correspondiente a cada una de las Demarcaciones Hidrográficas se detalla la metodología y las fuentes empleadas para el cálculo de población afectada por la inundación de manera que la estimación obtenida sea coherente con las particularidades de cada zona y por términos municipales.

### 5.2.2.- Afección a la actividad económica

En el artículo 6 de la Directiva 2007/60/ce, en su punto 5, también se indica que uno de los parámetros a mostrar será el "*tipo de actividad económica de la zona que puede verse afectada*".

La información relativa a la actividad económica se ha clasificado en base a las categorías generales del mapa de riesgo nacional que establece 20 categorías de actividad económica (ver Tabla 2).

**Tabla 2.** Categorías en Mapa de riesgo nacional

| Categoría en Mapa de riesgo nacional |
|---|
| Urbano concentrado |
| Urbano disperso |
| Asociado a urbano |
| Infraestructura social |
| Terciario |
| Industrial concentrado |
| Industrial disperso |
| Agrícola-Secano |
| Agrícola-Regadío |
| Otros usos rurales |
| Forestal |
| Infraestructuras: carreteras |
| Infraestructuras: ferrocarriles |
| Infraestructuras aeroportuarias |
| Infraestructuras: energía |
| Infraestructuras: Comunicaciones |
| Infraestructuras hidráulico-sanitarias |
| Infraestructuras: Residuos |
| Masas de agua |
| Otras áreas sin riesgo |

Para obtener las actividades económicas de las zonas inundables la Guía Metodológica propone emplear la cobertura proporcionada por el proyecto SIOSE 2009 (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España). Ésta ha sido la fuente principal empleada de forma general, si bien en algunas demarcaciones que disponían de información cartográfica de usos del suelo de buena calidad, se ha empleado ésta para de forma que se cuente con la debida coherencia de resultados con los mapas de riesgo fluviales

En el caso general de empleo del SIOSE, el primer paso ha consistido en calcular las equivalencias entre las categorías de usos del suelo del SIOSE y las actividades económicas Tabla 2 para las zonas inundables. Una vez calculadas las equivalencias se ha asignado a cada polígono una actividad económica en base al uso mayoritario del polígono.

El resultado obtenido se ha cotejado con la capa BTN-25 y las ortofotografías 2012 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del IGN. Esta revisión es necesaria porque aunque un polígono puede presentar mayoría de ocupación de un uso puede ocurrir que sólo se encuentre en zona inundable una pequeña porción de ese polígono y que dicha porción se corresponda con uno de los porcentajes minoritarios.

**Tabla 3.** Correspondencias de las etiquetas de SIOSE con las categorías para los mapas de riesgo. Coberturas simples

| CORRESPONDENCIA DE LAS ETIQUETAS DE SIOSE CON LAS CATEGORÍAS PARA LOS MAPAS DE RIESGO EN LA CATEGORÍA DE ACTIVIDAD ECONÓMICA | | |
|---|---|---|
| SIOSE | | Mapas de riesgo |
| 1. COBERTURAS SIMPLES | | ACTIVIDAD ECONÓMICA |
| Cobertura artificial | | |
| Edificación | EDF | Urbano |
| Zona verde artificial y arbolado urbano | ZAU | Asociado a urbano |
| Lámina de agua artificial | LAA | Masas de agua |
| Vial, aparcamiento o zona peatonal sin vege | VAP | Asociado a urbano |
| Otras construcciones | OCT | Asociado a urbano |
| Suelo no edificado | SNE | Asociado a urbano |
| Zonas de extracción o vertido | ZEV | Otros usos rurales |
| Cultivos | | |
| Cultivos herbáceos | | |
| Arroz | CHA | Agrícola |
| Cultivos Herbáceos distintos de Arroz | CHL | Agrícola |
| Cultivos leñosos | | |
| Frutales | | |
| Frutales cítricos | LFC | Agrícola |
| Frutales no cítricos | LFN | Agrícola |
| Viñedo | LVI | Agrícola |
| Olivar | LOL | Agrícola |
| Otros cultivos leñosos | LOC | Agrícola |
| Prados | PRD | Agrícola |
| Pastizal | PST | Otros usos rurales |
| Arbolado forestal | | |
| Frondosas | | |
| Frondosas caducifolias | FDC | Forestal |
| Frondosas perennifolias | FDP | Forestal |
| Coníferas | CNF | Forestal |
| Matorral | MTR | Forestal |
| Terrenos sin vegetación | | |
| Playas, dunas y arenales | PDA | Otras áreas sin riesgo |
| Suelo desnudo | SDN | Otras áreas sin riesgo |
| Zonas quemadas | ZQM | Otras áreas sin riesgo |
| Glaciares y nieves permanentes | GNP | Masas de agua |
| Ramblas | RMB | Masas de agua |
| Roquedo | | |
| Acantilados marinos | ACM | Otras áreas sin riesgo |
| Afloramientos rocosos y roquedos | ARR | Otras áreas sin riesgo |
| Canchales | CCH | Otras áreas sin riesgo |
| Coladas lávicas cuaternarias | CLC | Otras áreas sin riesgo |
| Coberturas húmedas | | |
| Humedales continentales | | |
| Zonas pantanosas | HPA | Masas de agua |
| Turberas | HTU | Masas de agua |
| Salinas continentales | HSA | Masas de agua |
| Humedales marinos | | |
| Marismas | HMA | Masas de agua |
| Salinas marinas | HSM | Masas de agua |
| Cobertura de agua | | |
| Aguas continentales | | |
| Cursos de agua | ACU | Masas de agua |
| Láminas de agua | | |
| Lagos y lagunas | ALG | Masas de agua |
| Embalses | AEM | Masas de agua |
| Aguas marinas | | |
| Lagunas costeras | ALC | Masas de agua |
| Estuarios | AES | Masas de agua |
| Mares y océanos | AMO | Masas de agua |

**Tabla 4.** Correspondencias de las etiquetas de SIOSE con las categorías para los mapas de riesgo. Coberturas compuestas predefinidas

| CORRESPONDENCIA DE LAS ETIQUETAS DE SIOSE CON LAS CATEGORÍAS PARA LOS MAPAS DE RIESGO EN LA CATEGORÍA DE ACTIVIDAD ECONÓMICA | | |
|---|---|---|
| SIOSE | | Mapas de riesgo |
| 2. COBERTURAS COMPUESTAS PREDEFINIDAS | | ACTIVIDAD ECONÓMICA |
| Dehesa | DHS | Otros usos rurales |
| Olivar viñedo | OVD | Agrícola |
| Asentamiento agrícola residencial | AAR | Agrícola o urbano / comprobar con PNOA |
| Huertas familiares | UER | Agrícola o urbano / comprobar con PNOA |
| Artifical compuesto | | |
| Urbano mixto | | |
| Casco | UCS | Urbano concentrado |
| Ensanche | UEN | Urbano concentrado |
| Discontinuo | UDS | Urbano disperso |
| Industrial | | |
| Polígono industrial ordenado | IPO | Industrial concentrado |
| Polígono industrial sin ordenar | IPS | Industrial concentrado |
| Industria aislada | IAS | Industrial disperso |
| Primario | | |
| Agrícola/Ganadero | PAG | Agrícola u Otros usos rurales / comprobar con PNOA |
| Forestal | PFT | Otros usos rurales |
| Minero extractivo | PMX | Otros usos rurales |
| Piscifactoría | PPS | Otros usos rurales |
| Terciario | | |
| Comercial y oficinas | TCO | Terciario |
| Complejo hotelero | TCH | Terciario |
| Parque recreativo | TPR | Terciario |
| Camping | TCG | Terciario |
| Equipamiento/Dotacional | | |
| Administrativo institucional | EAI | Infraestructura social |
| Sanitario | ESN | Infraestructura social |
| Cementerio | ECM | Infraestructura social |
| Educación | EDU | Infraestructura social |
| Penitenciario | EPN | Infraestructura social |
| Religioso | ERG | Infraestructura social |
| Cultural | ECL | Infraestructura social |
| Deportivo | EDP | Infraestructura social |
| Campo de golf | ECG | Infraestructura social |
| Parque urbano | EPU | Infraestructura social |
| Infraestructuras | | |
| Transporte | | |
| Red viaria | NRV | Infraestructuras: carreteras |
| Red ferroviaria | NRF | Infraestructuras: ferrocarriles |
| Portuario | NPO | Infraestructuras: aeroportuarias |
| Aeroportuario | NAP | Infraestructuras: aeroportuarias |
| Energía | | |
| Eólica | NEO | Infraestructuras: energía |
| Solar | NSL | Infraestructuras: energía |
| Nuclea | NCL | Infraestructuras: energía |
| Eléctrica | NEL | Infraestructuras: energía |
| Térmica | NTM | Infraestructuras: energía |
| Hidroeléctrica | NHD | Infraestructuras: energía |
| Gaseoducto/Oleoducto | NGO | Infraestructuras: energía |
| Telecomunicaciones | NTC | Infraestructuras: Comunicaciones |
| Suministro de agua | | |
| Depuradoras y potabilizadoras | NDP | Infraestructuras hidráulico-sanitarias |
| Desalinizadoras | NDS | Infraestructuras hidráulico-sanitarias |
| Conducciones y canales | NCC | Infraestructuras hidráulico-sanitarias |
| Residuos | | |
| Vertederos y escombreras | NVE | Infraestructuras: Resíduos |
| Plantas de tratamiento | NPT | Infraestructuras: Resíduos |

### 5.2.3.- Afección a puntos de especial importancia y áreas protegidas ambientalmente

Para el cumplimiento del R.D. 903/2010, de 9 de Julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, los mapas de riesgo deben incluir, además de los puntos anteriormente descritos, una serie de elementos recogidos en el art. 9:

*"c) Instalaciones industriales a que se refiere el anejo I de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrado de la Contaminación que puedan ocasionar contaminación accidental en caso de inundación así como las estaciones depuradoras de aguas residuales*

*d) Zonas protegidas para la captación de aguas destinadas al consumo humano, masas de agua de uso recreativo y zonas para la protección de hábitats o especies que pueden resultar afectas"*

Por otra parte, también se hace referencia a las consecuencias sobre el patrimonio cultural y el medio ambiente en el art. 1 tanto de la Directiva 2007/60/CE como de su transposición al derecho español mediante el R.D. 903/2010.

Por esta razón se ha recopilado la información siguiente:

- Instalaciones industriales a que se refiere el anejo I de la Ley 16/2002 ya mencionada.
- Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR)
- Patrimonio cultural
- Afecciones de importancia para las labores de protección civil
- Zonas protegidas para la captación de agua
- Masas de agua de uso recreativo
- Zonas para la protección de hábitats o especies (LIC, ZEPA de forma obligatoria, y en algunas demarcaciones específicas, otros hábitat de interés)
- Masas de agua de la Directiva Marco del Agua

La información recopilada proviene de las diferentes administraciones públicas implicadas en cada una de las Demarcaciones Hidrográficas en las que se divide el presente estudio.

## 5.3.- RESULTADOS

En el anejo correspondiente a cada una de las Demarcaciones Hidrográficas se analizan los resultados obtenidos.

## 6.- REFERENCIAS

Abascal, A.J.; Castanedo, S.; Cid, A.; Medina, R. (2012) A high resolution storm surge hindcast in Southern Europe: a useful database for coastal applications. 33rd International Conference on Coastal Engineering. Santander (Spain).

Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. Journal of Geophysical Research, 104(C4). pp 7649-7666. doi: 10.1029/98JC026222.

Bruun, P. (1954). Coastal Erosion and Development of Beach Profiles. U.S. Army Beach Erosion Board Technical Memorandum Nº. 44. U.S. Army Corps of Engr. Waterways Exp. Station, Vicksburg, Mississipi.

Bruun, P. (1962). Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 88, Nº 117.

Bruun, P. (1966). Tidal inlets and littoral drift. Stability of tidal inlets, Vol. 2. Noruega, 1966.

Bruun, P. (1978). Stability of Tidal Inlets, Elsevier, New York.

Bruun, P. (1990). Port Engineering. Gulf Publishing Co. Houston, USA.

Callaghan D.P., Nielsen P, Short A., Ranasinghe R. (2007). Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion, Coastal Engineering, Volume 55, Issue 5, May 2008, Pages 375-390

Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R.; Cofiño, A.S. (2011a). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. Coastal Engineering, Vol. 58 (6), pp 453-462. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003

Camus, P.; Méndez, F.J.; Medina, R. (2011b). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. Coastal Engineering, 58, 851-862. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.05.007

Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R.; Tomas, A.; Izaguirre, C. (2013). High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas, Coastal Engineering, Vol. 72, pp 56-68. doi:10.1016/j.coastaleng.2012.09.002

Cooper, J.A. and Pilkey, O.H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. Global and Planetary Change, 43, pp. 157-171.

Dean, R.G. (1991). Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. Journal of Coastal Research, Vol. 7, pp 53-84.

EurOtop (2007). Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual. (Disponible en http://www.overtopping-manual.com/manual.html)

Fita, L.; Fernandez, J.; Gutiérrez, J.M.; Cofiño, A.S. (2009). SeaWind project: Analysing the sensitivity on horizontal and vertical resolution on WRF simulations. II JMCMO, Valencia.

Franke, R. (1982). Scattered data interpolation: test of some methods. Math. Comp., 38, 181-200.

GIOC, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (2000). Documento Temático. Vol. 1. Regeneración de Playas. Universidad de Cantabria.

Goerlich, F.J; Cantarino, I. (2012). Una grid de densidad de población para España. Fundación BBVA. pp 140. ISBN: 978-84-92937-39-4

Holman, R.A. (1986). Extreme Value Statistics for Wave Runup on a Natural Beach. Coastal Engineering, Vol 9, No 6, March, pp.527-544.

Kennard, R.W.; Stone, L.A. (1969). Computer aided design experiments. Technometrics, 11, 137-148.

Lara J.L.; Ruju, A.; Loasada I.J. (2011) Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a Beach. Proceedings of the Royal Society of Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 467: 1215-1242

Miller J.K, Livermont E. (2008), An index for predicting storm erosion due to increased waves and water levels, Solutions to coastal Disaster Congress, pp 561- 572

Minguez, R.; Espejo, A.; Tomas, A.; Méndez, F.J.; Losada, I.J. (2011a) Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 28, 1466-1485. doi: 10.1175/JTECH-D-11-00008.1

Minguez, R.; Reguero, B.G.; Luceño, A.; Méndez, F.J. (2011b) Regression Models for Outlier Identification (Hurricanes and Typhoons) in Wave Hindcast Databases. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 29, 267-285. doi: 10.1175/JTECH-D-11-00059.1

Nielsen, P.; Hanslow, D.J. (1991). Wave runup distributions on natural beaches. Journal of Coastal Research Vol. 7 (4), pp 1139–1152

Reguero, B.G.; Menéndez, M.; Méndez, F.J.; Minguez, R.; Losada, I.J. (2012) A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. Coastal Engineering, 65, 38-55. doi:10.1016/j.coastaleng.2012.03.003

Ruju, A.; Lara J.L.; Losada, I.J. (2012) Radiation stress and low-frequency energy balance within the surf zone: A numerical approach. Coastal Engineering. Vol. 68, pp. 44-55

Shchepetkin, A.F.; McWilliams, J.C. (2005). Regional Ocean Model System: a split-explicit ocean model with a freesurface and topography-following vertical coordinate. Ocean Modelling 9, 347–404.

SIOSE, 2011. Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España, Anexo I - Descripción del Modelo de Datos y Rótulo SIOSE2005, Versión 2, Documento que describe las características básicas del Modelo de Datos Conceptual y la estructura y significado del Rótulo SIOSE2005. 1 de febrero de 2011. (Disponible en: http://www.siose.es/siose/)

Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J.; Gill, D.O.; Baker, D.M.; Duda, M.G.; Huang, X.Y.; Wang, W.; Powers, J.G. (2008) A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech., NCAR/TN-475+STR.

Stockdon, H.F.; Holman, R.A.; Howd, P.A.; Sallenger, A.H. (2006) Empirical parameterization of setup, swash, and runup. Coastal Enginineering, Vol 53, pp 573-588

Tolman, H.L.; 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 139 pp. (Available at: http://polar.wwb.noaa.gov/mmab/papers/tn222/MMAB_222.pdf).

Torres-Freyermuth, A.; Losada, I.J.; Lara, J.L. (2007). Modeling of surf zone processes on a natural beach using Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, Journal of Geophysical Research. Oceans. AGU. (American Geophysical Union) VOL 112, C09014. doi: 10.1029/2006JC004050.

Torres-Freyermuth, A.; Lara, J.L.; Losada, I.J. (2010). Numerical modelling of short- and long- wave transformation on a barred Beach. Coastal Engineering. Vol. 57(3), pp. 317-330. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.10.013.

Zhang, K., Douglas C., Leatherman S.P., (2001), Beach erosion potential for severe Nor´easters, Journal of Coastal Research, 17-2, pp 309-321.

# APÉNDICE I

# BASES DE DATOS DEL PROYECTO C3E

# ÍNDICE

**1.- INTRODUCCIÓN ..... 1**

**2.- MAREA ASTRONÓMICA ..... 1**

**3.- MAREA METEOROLÓGICA ..... 1**

**4.- NIVEL DE REFERENCIA ..... 4**

**5.- OLEAJE ..... 4**

**6.- BATIMETRÍA ..... 7**

**7.- TOPOGRAFÍA ..... 8**

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Dominio GOS 1.1 (la escala de colores indica la profundidad en metros) ... 2

**Figura 2.** Validación del reanálisis GOS 1.1 (Elevación de la marea meteorológica en metros) con mareógrafos de la red REDMAR del Organismo Público Puertos del Estado. ... 3

**Figura 3.** Referencia del nivel del mar respecto al nivel medio del mar en Alicante (1998). ... 4

**Figura 4.** Validación de las series de oleaje en el año 2007 del DOW 1.1 con la boya costera del OPPE A Coruña (Altura de ola significante, Hs; Periodo de pico, Tp y Dirección media, θm). ... 6

**Figura 5.** Validación del comportamiento agregado del DOW 1.1 con la boya costera del OPPE Cost-Bilbao (Altura de ola significante, Hs; Periodo de pico, Tp y Dirección media, θm). ... 7

## 1.- INTRODUCCIÓN

El objeto de este Apéndice I es la descripción de las bases de datos de nivel del mar y oleaje generadas en el marco del proyecto C3E (Marea Astronómica, Marea Meteorológica, Nivel de Referencia y Oleaje), así como la batimetría y topografía utilizadas.

## 2.- MAREA ASTRONÓMICA

Para describir, en cada posición, la variación del nivel medio del mar debido a la marea astronómica, se ha utilizado el análisis armónico de tal forma que se reconstruye la marea astronómica a partir de las constantes armónicas ajustadas con los datos de los mareógrafos del Organismo Público Puertos del Estado (OPPE). En las posiciones de la costa española en que no se dispone de datos de mareógrafos, se interpolan las constantes armónicas a partir de las determinadas en las posiciones de los mareógrafos más cercanos y posteriormente se reconstruyen las series de marea astronómica a partir de dichas constantes armónicas interpoladas.

Finalmente se obtienen series de datos horarios desde el año 1948 hasta el año 2008, a lo largo de la costa española, cada aproximadamente 10-15 km.

## 3.- MAREA METEOROLÓGICA

Se denomina marea meteorológica ("*storm surge*") a la sobreelevación del nivel del mar debida a la tensión tangencial que ejerce el viento sobre una masa de agua y a los gradientes de presión atmosférica. Esta sobreelevación es uno de los sumandos que intervienen en el cálculo del nivel del mar y su importancia relativa, respecto a la marea astronómica y otros factores, depende de la zona geográfica analizada.

La base de datos GOS 1.1 (Global Ocean Surges) desarrollada por IH Cantabria (Abascal *et al*. 2012), comprende el reanálisis de marea meteorológica de un periodo de 60 años (1948-2009), de alta resolución realizado en el sur de Europa. El reanálisis proporciona datos de marea meteorológica calculados con una resolución espacial de 1/8º y una resolución temporal horaria. El área de estudio engloba el sur de Europa, desde 20ºW a 37ºW en

longitud y desde 25ºN a 46ºN en latitud, incluyendo el mar Mediterráneo y la costa Atlántica Española (ver Figura 1).

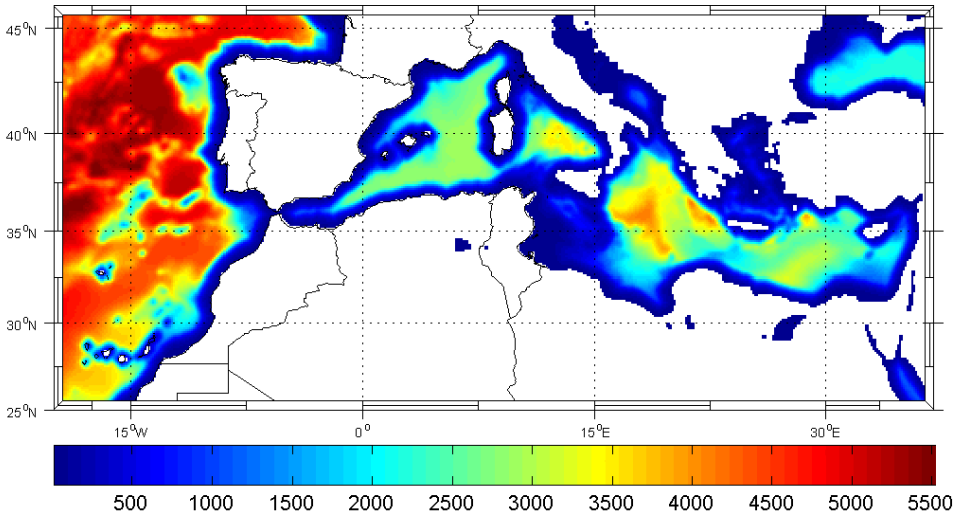


**Figura 1.** Dominio GOS 1.1 (la escala de colores indica la profundidad en metros)

Dicho reanálisis ha sido realizado con el modelo tridimensional de circulación ROMS (Regional Ocean Modeling System) desarrollado por el Ocean Modeling Group de Rutgers (Shchepetkin y McWilliams, 2005). Debido a que el modelo incluye algoritmos físicos y numéricos altamente eficientes y precisos, en la actualidad está siendo ampliamente utilizado por la comunidad científica.

El modelo ROMS resuelve de forma numérica las ecuaciones conocidas como ecuaciones primitivas, en las que se asume que la presión sigue una ley hidrostática. Las ecuaciones primitivas engloban la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, la de conservación de la masa, la de transporte de distintas sustancias como la temperatura y la salinidad, y la ecuación de estado para el cómputo de la densidad del agua. En este estudio, dado el carácter barotrópico del fenómeno a resolver, se ha utilizado la versión 2D del modelo.

El modelo ha sido forzado con datos de viento y presión atmosférica de alta resolución (~ 30 km) procedentes del downscaling dinámico realizado en el marco del proyecto SEAWIND (Fita *et al.*, 2009). Dicho reanálisis utiliza un modelo de área limitada denominado WRF

(Weather Research and Forecasting, Skamarock *et al.*, 2008), forzado con datos del reanálisis NCEP (1948-2009).

Los resultados del reanálisis de marea meteorológica GOS 1.1 han sido validados con 20 mareógrafos de la red REDMAR del Organismo Público Puertos del Estado (OPPE). A través de la página WEB www.maruca.ihcantabria.com se pueden descargar todas las validaciones realizadas (Dinámicas Aguas Abiertas → Fichas). En la Figura 2 se muestra la comparación del GOS 1.1 con algunos de dichos mareógrafos; se comprueba la precisión de las simulaciones por medio de unos parámetros estadísticos como el coeficiente de correlación ρ, el sesgo (BIAS) o el error cuadrático medio (RMS). Se verifica un buen ajuste entre los mediciones instrumentales y lo modelado numéricamente, viendo la capacidad del modelo para simular con exactitud la sobreelevación del nivel del mar en condiciones de temporal.

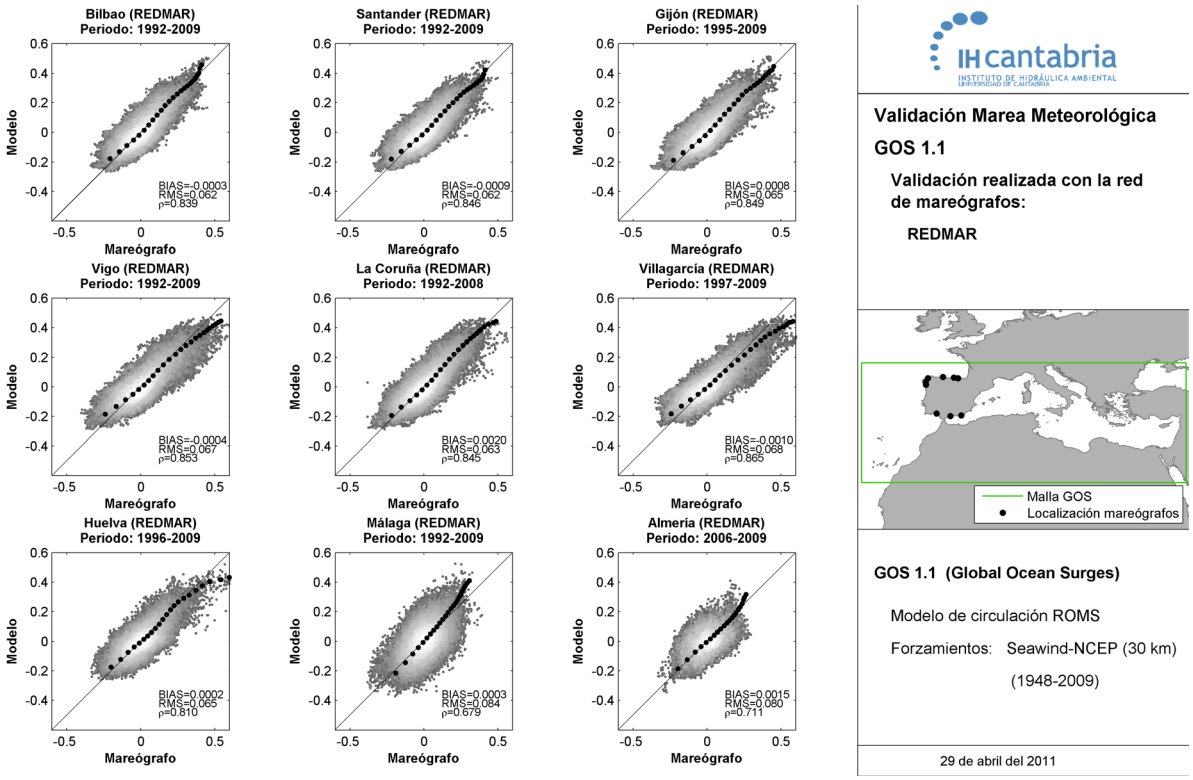


**Figura 2.** Validación del reanálisis GOS 1.1 (Elevación de la marea meteorológica en metros) con mareógrafos de la red REDMAR del Organismo Público Puertos del Estado.

## 4.- NIVEL DE REFERENCIA

Para obtener de forma homogénea el nivel del mar a lo largo del litoral español, siempre se ha referido éste (Marea Astronómica y Marea Meteorológica) respecto al nivel medio del mar en Alicante tras la nivelación del año 1998. En la Figura 3 se representa el nivel de referencia interpolado a lo largo del litoral español.

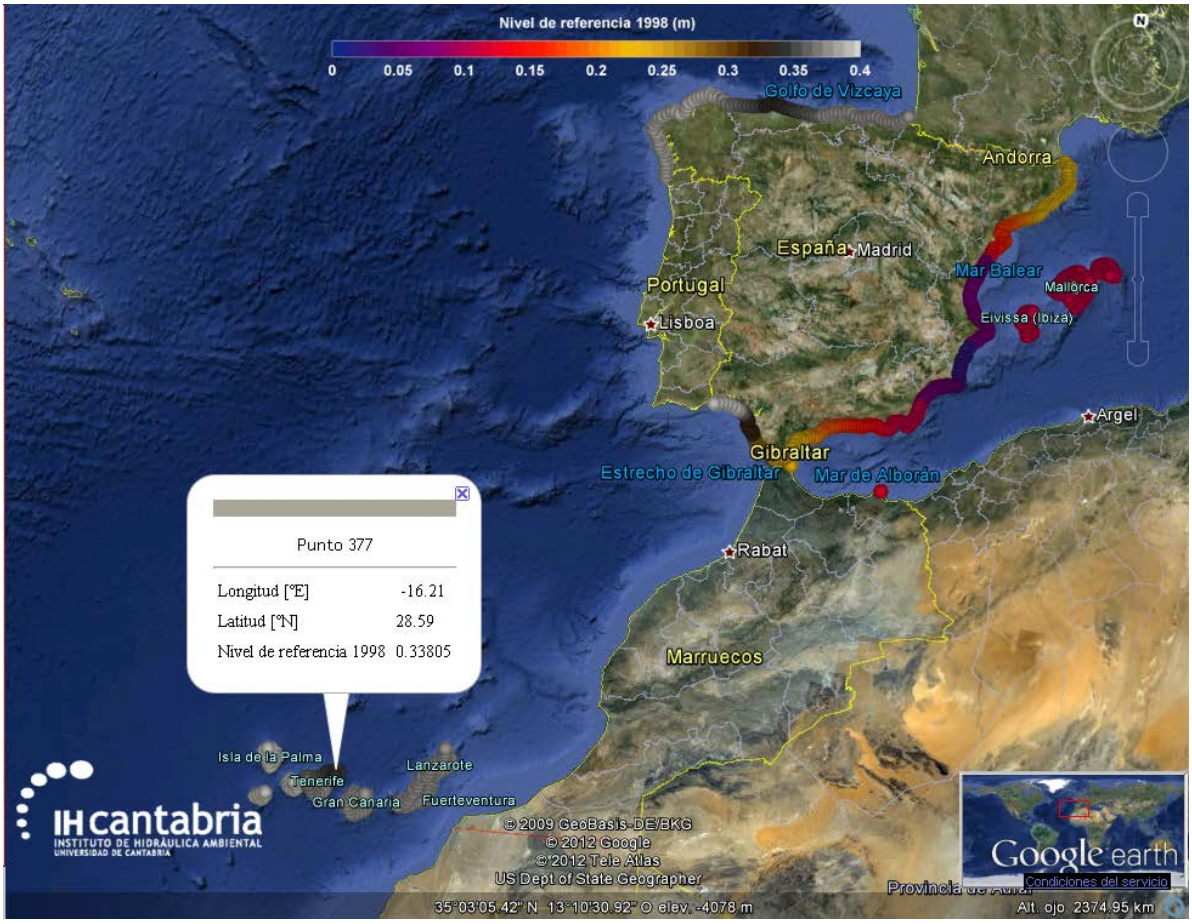


**Figura 3.** Referencia del nivel del mar respecto al nivel medio del mar en Alicante (1998).

## 5.- OLEAJE

IH Cantabria ha generado una base de datos de oleaje propagado hasta la costa denominada DOW 1.1 (Downscaled Ocean Waves, Camus *et al*. 2013), de más de 60 años

de duración (1948-2008), con una resolución temporal horaria y espacial de entre 50 m y 200 m.

Para la generación de dicha base de datos se ha desarrollado una metodología híbrida (Camus *et al*., 2011b) que combina la generación y propagación numérica del oleaje, con técnicas estadísticas avanzadas de selección (MaxDiss, Kennard y Stone, 1969) e interpolación (RBF, Franke, 1982) de variables de alta dimensionalidad. La propagación se realiza mediante la ejecución del modelo numérico SWAN (Booij, 1999) forzado con los vientos del reanálisis SeaWind-NCEP (los mismos que se han utilizado para generar el GOS 1.1) y con los espectros de oleaje del reanálisis en aguas abiertas GOW 1.1 (Global Ocean Waves, Reguero *et al*., 2012) calibrados con datos de satélites (Mínguez *et al*., 2011a y b).

La base de datos GOW 1.1 tiene una resolución espacial de aproximadamente 10 km en el litoral español. Dicha base de datos ha sido simulada con el modelo numérico WaveWatch III (Tolman, 2002) que está forzado con el reanálisis de vientos SeaWind-NCEP.

Tanto los datos GOW 1.1 (oleaje en aguas abiertas) como los datos del DOW 1.1 (oleaje propagado a las costas) han sido exhaustivamente validados con datos de 16 boyas en profundidades indefinidas (OPPE) y 32 boyas costeras (OPPE y XIOM, Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics) a lo largo del litoral español. A través de la página WEB www.maruca.ihcantabria.com se pueden descargar todas las validaciones realizadas (Dinámicas Aguas Abiertas → Fichas), obteniéndose unos resultados muy satisfactorios para todas las variables comparadas. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se representa un ejemplo de los resultados obtenidos en el año 2007 para la posición de la boya A Coruña (OPPE).

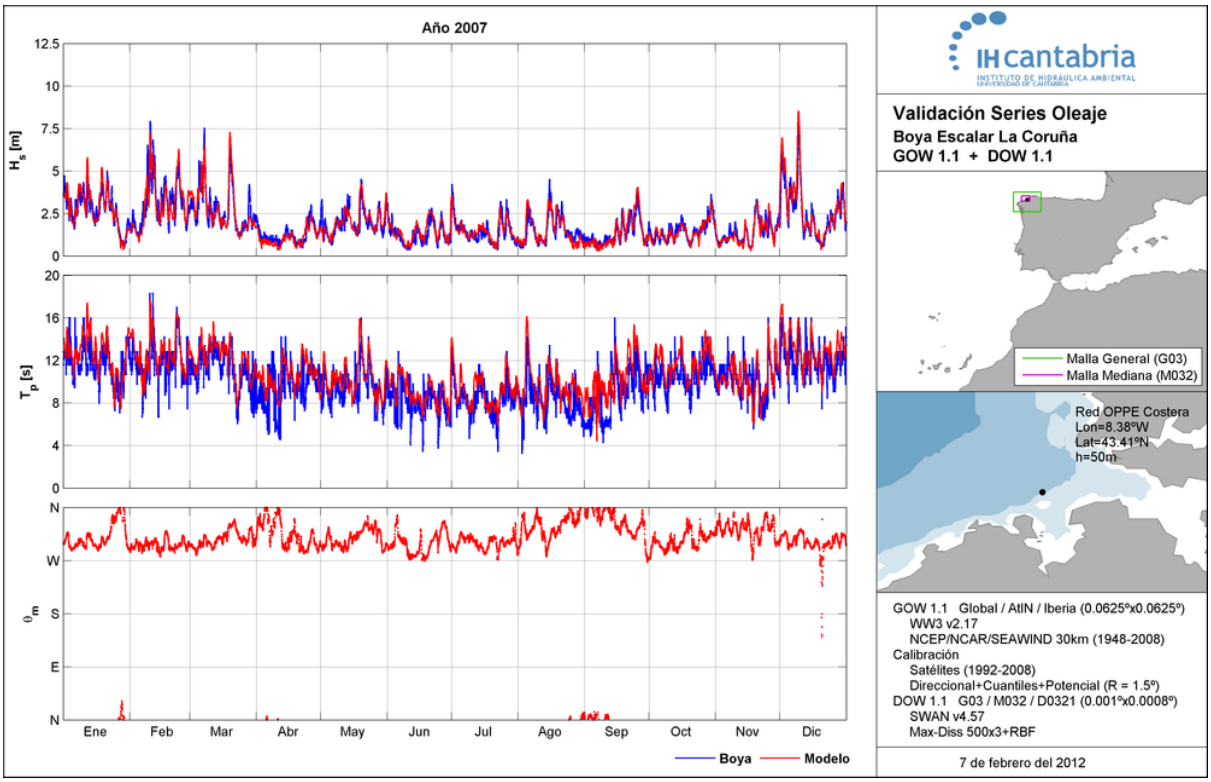


**Figura 4.** Validación de las series de oleaje en el año 2007 del DOW 1.1 con la boya costera del OPPE A Coruña (Altura de ola significante, Hs; Periodo de pico, Tp y Dirección media, θm).

Además de realizar validaciones en las que se compara la evolución temporal de las series de parámetros de oleaje para un año determinado, también se valida agregando toda la información disponible en la posición de las boyas. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de validación en la posición de la boya Cost-Bilbao (OPPE) mediante diagramas de dispersión, comparación de rosas de oleaje, etc. Se comprueba, que pese a la dispersión natural en los datos instrumentales, el régimen medio del oleaje determinado a partir de los datos de la boya coincide con el calculado a partir de los datos simultáneos del DOW.

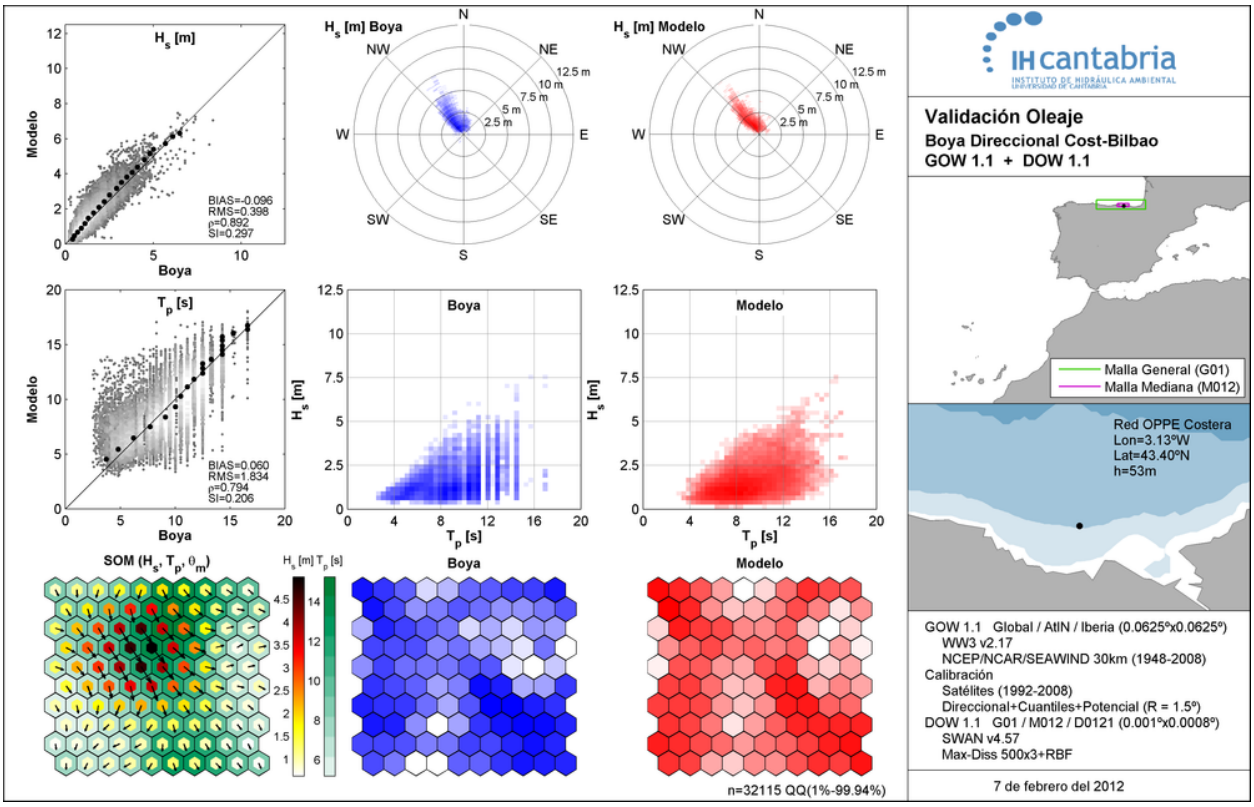


**Figura 5.** Validación del comportamiento agregado del DOW 1.1 con la boya costera del OPPE Cost-Bilbao (Altura de ola significante, Hs; Periodo de pico, Tp y Dirección media, θm).

## 6.- BATIMETRÍA

Se han utilizado dos bases de datos de batimetría. Por un lado la batimetría global GEBCO ("*General Bathymetric Chart of the Oceans*") del British Oceanographic Data Centre (BDOC) que tiene un control de calidad de los datos a 1 minuto de resolución; dicha base de datos ha sido producida a partir de información de altimetría satelital y sondas batimétricas instaladas en barcos.

Por otro lado, en las zonas costeras, se ha remplazado la información del GEBCO por las batimetrías digitalizadas de las cartas náuticas disponibles en el BACO del Sistema Modelado Costero (SMC, www.smc.ihcantabria.com).

## 7.- TOPOGRAFÍA

Se han utilizado dos Modelos Digitales del Terreno (MDT), ambos proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional. Uno de ellos cubre la costa peninsular junto con Ceuta, Melilla y Baleares en el sistema de coordenadas ETRS89 UTM-30N; tiene una resolución espacial de 10 metros y una exactitud en cota con un error cuadrático medio menor de 1 metro. El otro Modelo Digital del Terreno cubre las Islas Canarias en el sistema de coordenadas ETRS89 UTM28N y tiene una resolución espacial de 5 metros.

# APÉNDICE II

# MODELO NUMÉRICO IH-2VOF

# ÍNDICE

**1.- OBJETO DEL ANEJO ..... 1**

**2.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO ..... 1**

**3.- OBJETIVO ESPECÍFICO DE USO. ..... 4**

**4.- METODOLOGÍA. ..... 6**

# ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Comparación de la elevación de la superficie libre a lo largo de diferentes puntos del perfil transversal de una playa real. Línea roja: Modelo IH-2VOF. Línea azul: medidas de campo. ..... 3

**Figura 2.** Evolución de la lámina de agua durante el proceso de run-up en una playa. Línea continua: Modelo IH-2VOF. Puntos: medidas de laboratorio ..... 4

**Figura 3.** Factores que afectan a la cota de inundación. ..... 5

**Figura 4.** Esquema de la definición de las proyecciones X (distancia horizontal) y Z (distancia vertical) del ascenso-descenso del oleaje sobre un perfil de playa. ..... 5

**Figura 5.** Esquema de la metodología para el cálculo del Run-Up y Alcance de la inundación, mediante el uso del modelo IH-2VOF. ..... 6

**Figura 6.** Esquema de las zonas generales y de detalle en una malla de cálculo del IH-2VOF. ..... 7

**Figura 7.** Esquema de las resoluciones obtenidas en las zonas generales y de detalle en una malla de cálculo del IH-2VOF. ..... 8

**Figura 8.** Ejemplo de serie de oleaje generado con el modelo IH-2VOF. Panel superior: Evolución de la superficie libre de un estado de mar horario. Paneles centrales: histogramas de altura de ola (izquierda) y periodo de ola (derecha). Paneles inferiores: espectro de oleaje (izquierda) y diagrama de dispersión altura – periodo (derecha). ..... 9

**Figura 9.** Representación de la posición de la superficie libre, ascenso – descenso sobre una playa, en cuatro instantes de tiempo (t=90, 94, 98 y 102 s). ..10

**Figura 10.** Evolución temporal de la distancia en horizontal del ascenso - descenso sobre una playa, X (m). .....11

**Figura 11.** Evolución temporal de la distancia en vertical del ascenso - descenso sobre una playa, Z (m). .....12

**Figura 12.** Definición del Alcance (I) y Run-Up (Ru) a partir de la evolución temporal de la distancia en horizontal (X) y vertical (Z) del ascenso - descenso sobre una playa. .....12

**Figura 13.** Función de distribución empírica del Alcance, I (izquierda) y del Run-Up o remonte, Ru (derecha) con los valores del 2% respectivamente I2% y Ru2%, en rojo. .....13

## 1.- OBJETO DEL ANEJO

A continuación se describe modelo IH-2VOF desarrollado en el IH Cantabria y utilizado para el cálculo de la inundación por oleaje y nivel en el presente estudio.

## 2.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo numérico IH-2VOF, www.ih2vof.ihcantabria.com, es un modelo desarrollado en el IH Cantabria orientado al estudio de la interacción flujo-estructura, es decir, al estudio de la acción del oleaje sobre estructuras marítimas y la hidrodinámica en la zona de rompientes. El modelo IH-2VOF corresponde a un desarrollo posterior del modelo Mar-IFE.

IH-2VOF es un modelo en plena expansión y el más avanzado entre los de su categoría para el estudio de la interacción onda-estructura. Entre sus principales características destacan su capacidad para la simulación de todo tipo de estructuras marítimas a escala de prototipo o laboratorio; proporciona el campo de velocidades, presiones y turbulencia en un dominio bidimensional; y es capaz de simular todo tipo de oleajes: oleaje regular, irregular, onda solitaria, etc. Todo ello proporciona al modelo IH-2VOF gran versatilidad, siendo capaz de simular dominios a escala de prototipo de hasta un kilómetro. El IH Cantabria ha calibrado y validado el modelo para el caso de diques en talud de materiales sueltos mediante numerosos ensayos de laboratorio, además de haber sido aplicado al diseño de obras marítimas.

IH-2VOF resuelve las ecuaciones bidimensionales en dos fases de Navier-Stokes, con el promediado de Reynolds, para tener en cuenta el papel de los procesos turbulentos del flujo. Dentro de los medios porosos, como son los mantos de las estructuras de materiales sueltos, se realiza un promediado a lo largo de un volumen de control. Por tanto el modelo resuelve las llamadas ecuaciones VARANS ("*Volume-Averaged/Reynolds-Averaged Navier-Stokes*"). El seguimiento de la superficie libre se resuelve mediante la técnica "*Volume of Fluid*" (VOF) y la turbulencia se modela mediante un modelo k-ε.

En el desarrollo del modelo IH-2VOF, se ha prestado una especial atención a los procesos de generación/absorción del oleaje. Para ello se ha incorporado un algoritmo matemático, basado en contornos móviles (*moving boundaries*), que permite simular el movimiento de la

pala generadora del oleaje (pala dinámica) junto con un proceso de absorción del oleaje reflejado en las estructuras.

Además, el número de publicaciones científicas asociadas al uso de este modelo y de su validación a partir de ensayos de laboratorio y de medidas en campo, centradas en los procesos no lineales de transformación del oleaje en la zona de rompientes, reducen la incertidumbre en su uso. Dentro de estas publicaciones destacan los trabajos de Torres *et al*. (2007) y Torres *et al*. (2010), donde se presenta por primera vez el uso de un modelo RANS, en este caso el modelo IH-2VOF, para el estudio de los procesos de transformación del oleaje en playas combinando el efecto conjunto de la modelización de la banda gravitatoria e infra-gravitatoria del oleaje.

En Torres *et al*. (2007) se realizó un análisis prestando especial atención a los procesos de transformación de las ondas infra-gravitatorias en una playa natural disipativa, como efecto forzador del run-up en la playa. Los resultados numéricos se corroboraron con medidas en campo de la evolución temporal de la superficie libre y de velocidades dentro de la zona de rompientes, encontrando un error en la predicción del modelo inferior al 10%.

En Torres *et al*. (2010), se desarrolla una metodología de trabajo, que posteriormente se perfecciona por Lara *et al*. (2011), que permite asegurar una adecuada representación de las características del oleaje, en ambas bandas: gravitatoria e infra-gravitatoria. Uno de los aspectos señalados por Torres *et al*. (2010) era la falta de uniformidad en las condiciones de contorno usadas en el modelado numérico para el tratamiento de la energía reflejada en la playa por efecto de la radiación de la ondas largas liberadas en rotura. Torres *et al*. (2010) y posteriormente Lara *et al*. (2011), mejoran los procesos de generación y absorción numérica para una adecuada caracterización de los procesos que se desencadenan en la zona de rompientes y swash. Lara *et al*. (2011) aplican esta metodología para el estudio de la amplificación de la onda larga y el run-up en playas con un bajo muy largo en su perfil transversal.

A partir de estos trabajos, Ruju *et al*. (2012) utilizan el modelo IH-2VOF para demostrar la existencia de un proceso de disipación de onda larga en la zona de swash que condiciona el run-up en la playa. A partir de los algoritmos desarrollados y de los resultados del modelo numérico Ruju *et al*. (2012) demuestran numéricamente aspectos de la transferencia de energía entre las bandas gravitatoria e infra-gravitatoria en la zona de rompientes y swash que solo había sido predicha a partir de medidas en campo.

En resumen, la calidad y precisión de los resultados de validación del modelo IH-2VOF ha sido avalada por la comunidad científica internacional. Esto permite reproducir numéricamente los procesos no lineales que tienen lugar en la zona de rompientes y en la zona de ascenso y descenso del oleaje sobre una playa. Además el modelo considera los procesos de transferencia de energía entre las ondas infragravitatorias y el oleaje, que condicionan el run-up en playas. A modo de ejemplo se presentan dos figuras con resultados de validación del modelo, en la Figura 1 la evolución del oleaje en la zona de rompientes y swash presentados por Torres *et al*. (2010) y en la Figura 2una simulación de detalle del run-up en una playa.

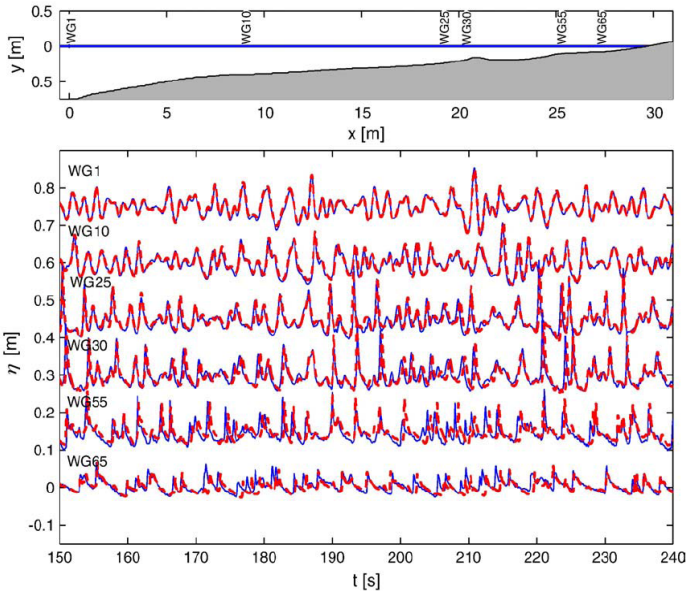


**Figura 1.** Comparación de la elevación de la superficie libre a lo largo de diferentes puntos del perfil transversal de una playa real. Línea roja: Modelo IH-2VOF. Línea azul: medidas de campo.

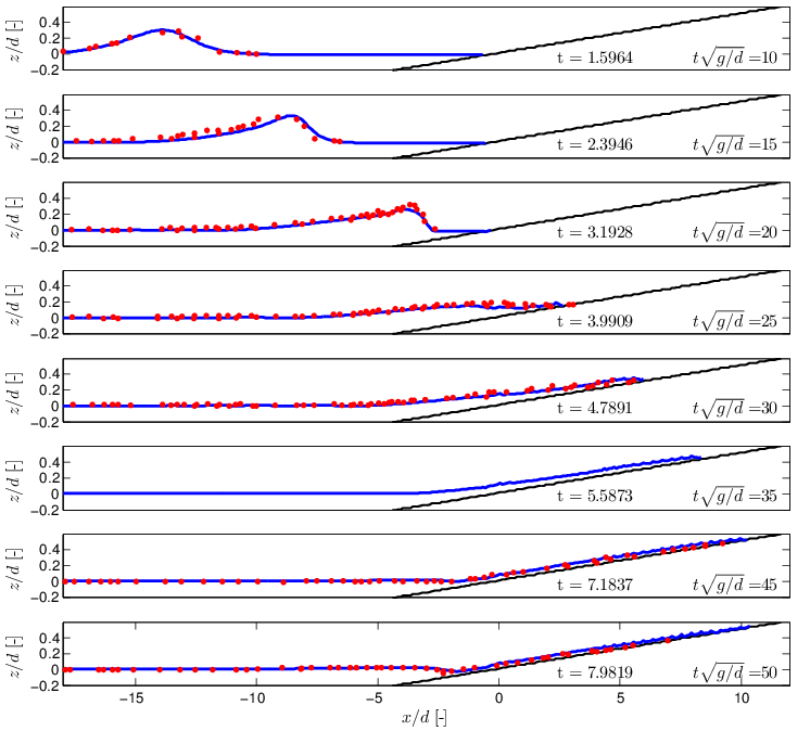


**Figura 2.** Evolución de la lámina de agua durante el proceso de run-up en una playa. Línea continua: Modelo IH-2VOF. Puntos: medidas de laboratorio

## 3.- OBJETIVO ESPECÍFICO DE USO

El objetivo del uso del modelo IH-2VOF en este proyecto es la determinación de la evolución temporal de ascenso y descenso del oleaje en playas y la estadística de este a partir de simulaciones de estados de mar completos, en concreto el Run-Up del 2% de las olas de cada estado de mar.

De esta forma se caracterizan todas las variables que conforman la cota de inundación (MA, MM y RU, ver la Figura 3), pues las variables del nivel del mar (MA y MM) se caracterizan adecuadamente a partir de las bases de datos explicadas en el Apéndice I.

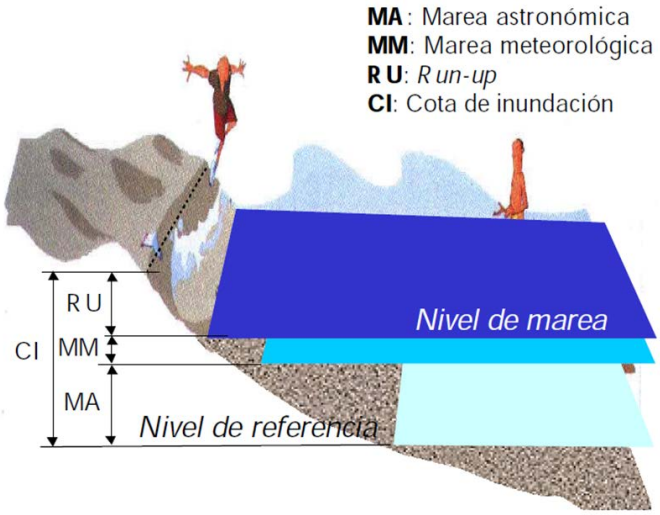


**Figura 3.** Factores que afectan a la cota de inundación.

Como se verá más adelante, para caracterizar la inundación debida al oleaje no sólo se calcula el Run-Up del 2% ($Ru_{2\%}$) a partir de la evolución temporal de la distancia en vertical del ascenso-descenso sobre la playa (Z); sino que también, a partir de la evolución temporal de la distancia en horizontal del ascenso-descenso sobre la playa (X), se calcula el valor del 2% del alcance de la inundación ($I_{2\%}$). En la Figura 4 se muestra un esquema de la definición de las distancias X y Z (horizontal y vertical respectivamente), que son las proyecciones del ascenso-descenso sobre la playa, tomando como origen el corte del perfil de playa con el nivel del mar.

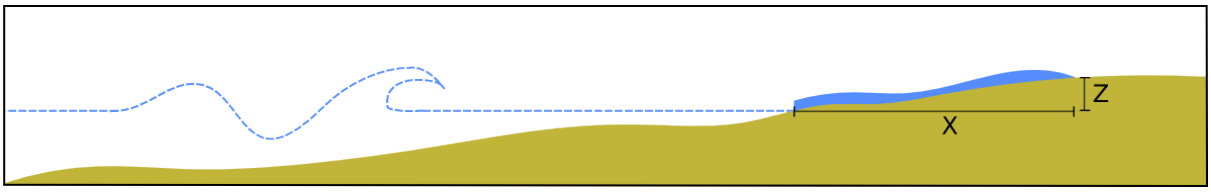


**Figura 4.** Esquema de la definición de las proyecciones X (distancia horizontal) y Z (distancia vertical) del ascenso-descenso del oleaje sobre un perfil de playa.

Así, el objetivo final de uso del modelo IH-2VOF es el cálculo de los valores de $I_{2\%}$ (alcance del 2%) y $Ru_{2\%}$ (Run-up o remonte del 2%) para distintas geometrías o perfiles de playa y distintas condiciones de dinámicas actuantes (nivel del mar y oleaje).

## 4.- METODOLOGÍA

A continuación se detalla la metodología para realizar las simulaciones numéricas con el modelo IH-2VOF, así como el pre-proceso y post-proceso para el cálculo del $I_{2\%}$ (alcance del 2%) y del $Ru_{2\%}$ (Run-up o remonte del 2%), en función de los distintos datos de partida (geometrías y dinámicas). En la Figura 5 se presenta un esquema de dicha metodología.

El proceso para la generación de los casos de IH-2VOF comienza con el mallado del dominio de estudio, en el que se incluye el nivel del agua y la batimetría.

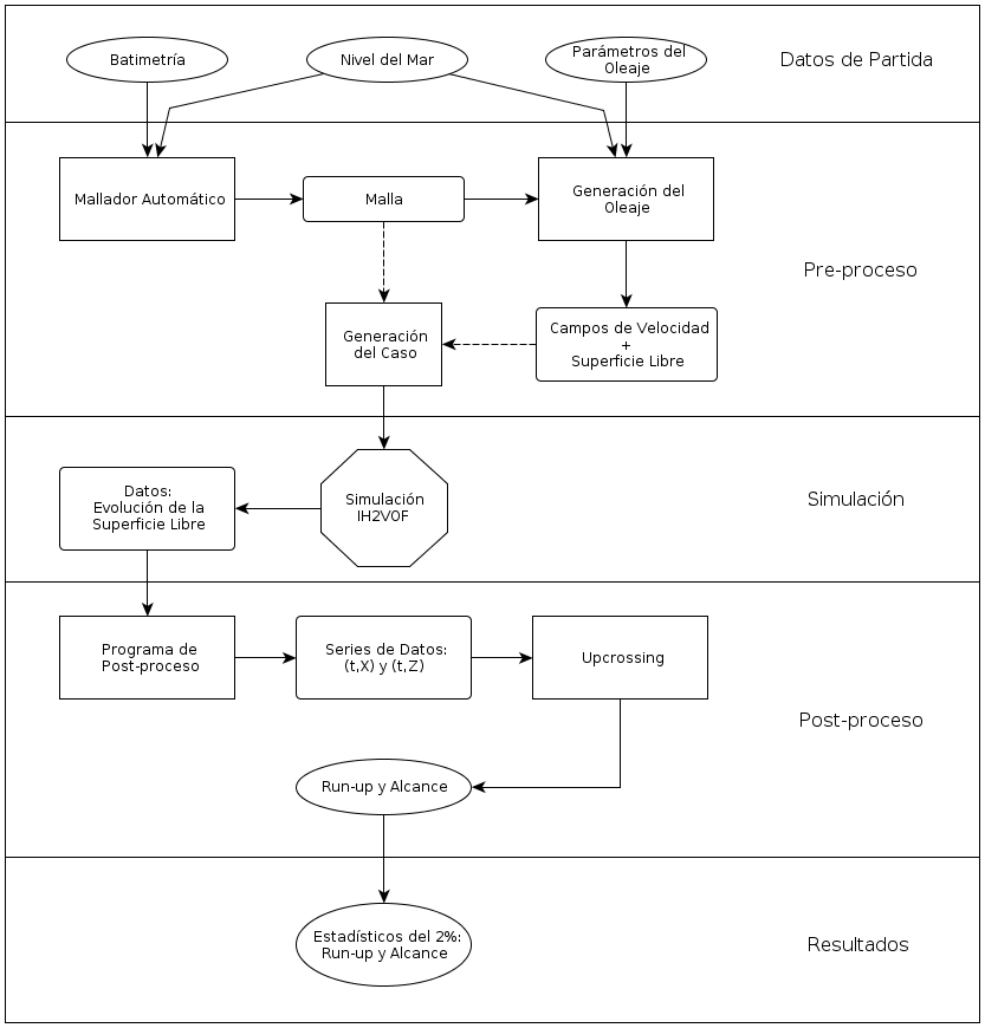


**Figura 5.** Esquema de la metodología para el cálculo del Run-Up y Alcance de la inundación, mediante el uso del modelo IH-2VOF.

Las mallas para IH-2VOF se generan con un mallador nominado Coral. Éste genera mallas con celdas rectangulares, totalmente ortogonales y conformes. Asimismo permite definir obstáculos en forma de polilíneas, haciendo que las celdas interiores a él sean totalmente impermeables al flujo.

Como convención se establece como contorno generador de oleaje el izquierdo, mientras que el derecho se fija como capaz de absorber el agua que llega. El mallado sigue un proceso automático siguiendo un número de normas generales. Estas permiten conseguir mallas de calidad, y a la vez reducir el número de celdas en zonas donde una menor discretización sigue representando correctamente los procesos físicos. Para ello se establecen dos zonas diferenciadas en la dirección horizontal, y otras dos en la vertical (ver Figura 6).

- Zonas horizontales: zona de generación o general y zona de run-up o de detalle. La línea de división entre ambas se define como la vertical en la que el agua intersecta con la batimetría, retranqueada un 10% de la longitud del dominio hacia la zona de generación. En la zona de generación las celdas varían su longitud en el eje X de 50 cm a 25 cm. En la zona de run-up (zona de detalle), la discretización horizontal se mantiene constante igual a 25 cm. De esta forma se ahorra en número de celdas donde no son necesarias (en generación), mientras que se obtiene una muy buena resolución en la zona de run-up.

- Zonas verticales: zona de profundidad o general y zona de run-up o de detalle. La línea de división entre ambas es el nivel del mar. La parte superior mantiene una discretización igual a 10 cm, ya que cubre la zona en la que se desarrolla el run-up. La porción inferior no necesita tanto detalle en las zonas adyacentes al fondo de la malla, por lo que la discretización vertical varía desde 25 cm en el fondo, hasta 10 cm en la superficie del mar.

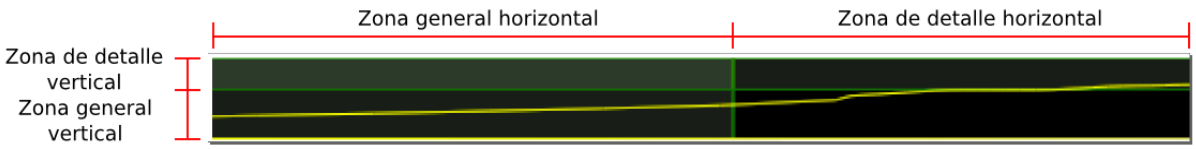


**Figura 6.** Esquema de las zonas generales y de detalle en una malla de cálculo del IH-2VOF.

La discretización empleada ha sido elegida de forma que la longitud de onda esté definida por al menos 100 celdas; y la altura de ola (en vertical) por un mínimo de 5, lo cual permite tener definidos los procesos de ascenso y descenso con una resolución muy fina. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la zonificación horizontal y vertical, con sus respectivas resoluciones; en la zona de detalle se consigue 10 cm en vertical y 25 cm en horizontal.

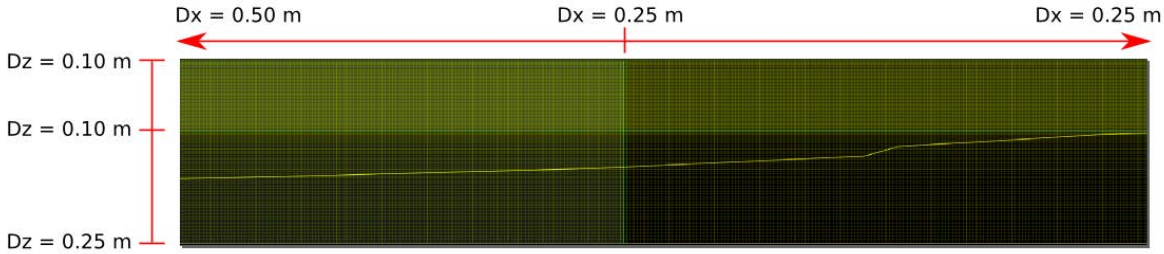


**Figura 7.** Esquema de las resoluciones obtenidas en las zonas generales y de detalle en una malla de cálculo del IH-2VOF.

La etapa de pre-proceso se completa mediante la generación del oleaje. Este paso también está totalmente automatizado. Para cada perfil/malla se considera un determinado nivel del mar y oleaje; éste último caracterizado por unos parámetros estadísticos: altura de ola significante, período de pico y dispersión frecuencial γ de JONSWAP. Todos los oleajes se han generado usando la forma espectral JONSWAP, para una duración de 1 hora de estado de mar, para un número de componentes espectrales igual a 512 y para un γ = 3.3, que son adecuados para definir este tipo de oleajes.

El modo de obtención del oleaje se basa en la suma lineal de las 512 componentes aleatorias, recomponiendo la serie de elevación de la superficie libre en el punto de generación. Esta serie de superficie libre es analizada de forma que si los parámetros estadísticos obtenidos no coinciden con los parámetros objetivo, dentro de una tolerancia, se generan de nuevo aleatoriamente las componentes espectrales de una nueva superficie libre. Adicionalmente se descartan los oleajes en los que la altura de ola máxima sea menor a 1.8 veces la altura de ola significante, ya que se considera que no son suficientemente energéticos. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario hasta obtener los parámetros objetivo.

El resultado final es una serie sintética de oleaje, con un informe como el que se detalla a continuación en la Figura 8.

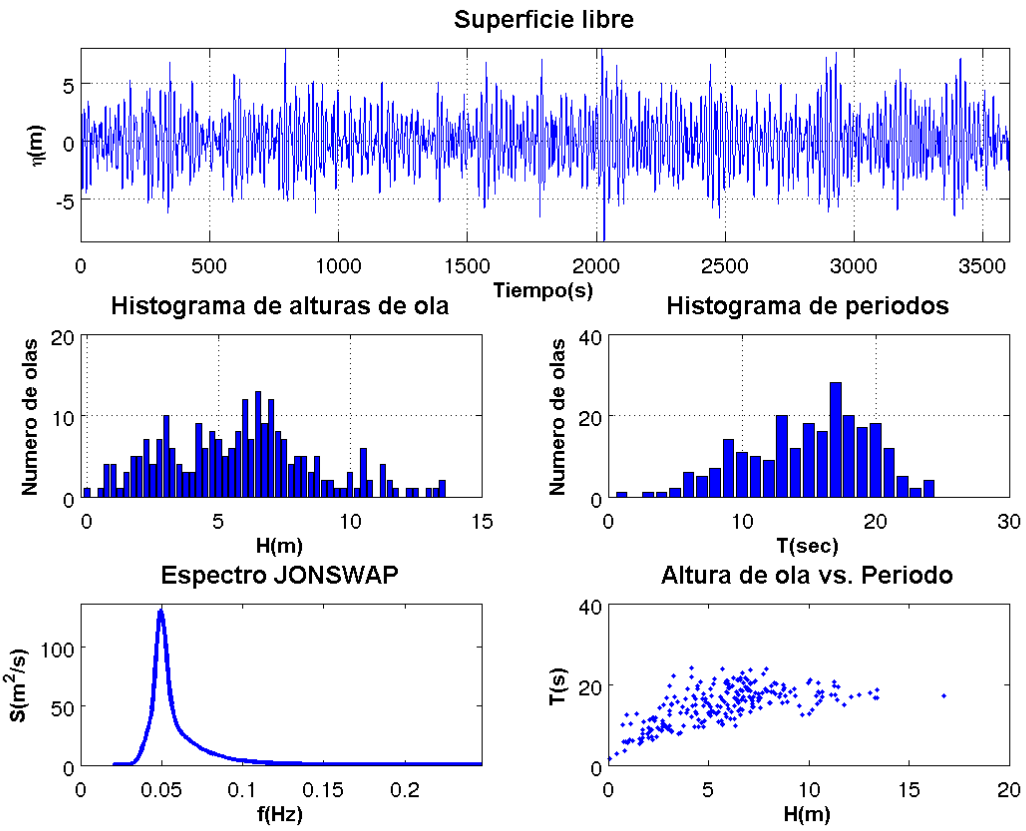


**Figura 8.** Ejemplo de serie de oleaje generado con el modelo IH-2VOF. Panel superior: Evolución de la superficie libre de un estado de mar horario. Paneles centrales: histogramas de altura de ola (izquierda) y periodo de ola (derecha). Paneles inferiores: espectro de oleaje (izquierda) y diagrama de dispersión altura – periodo (derecha).

Como paso previo a la simulación se generan las series temporales de superficie libre y velocidades en el formato de entrada del modelo. Para ello se obtienen ambas variables como suma de las expresiones para componentes lineales. La superficie libre se guarda como un nivel, mientras que las componentes de la velocidad se calculan y guardan para cada celda del contorno izquierdo en la dirección vertical.

Una vez realizadas todas las etapas del pre-proceso, se realiza la simulación propiamente dicha, en la plataforma de computación. Únicamente se requiere la evolución de la superficie libre para el post-proceso de los datos, por lo que se guardan únicamente dichos datos. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de resultados obtenidos, la superficie libre en cuatro instantes de tiempo. A partir de los resultados de la superficie libre en todos los instantes de tiempo, en el post-proceso, se obtiene la evolución del ascenso-descenso sobre el perfil de playa.

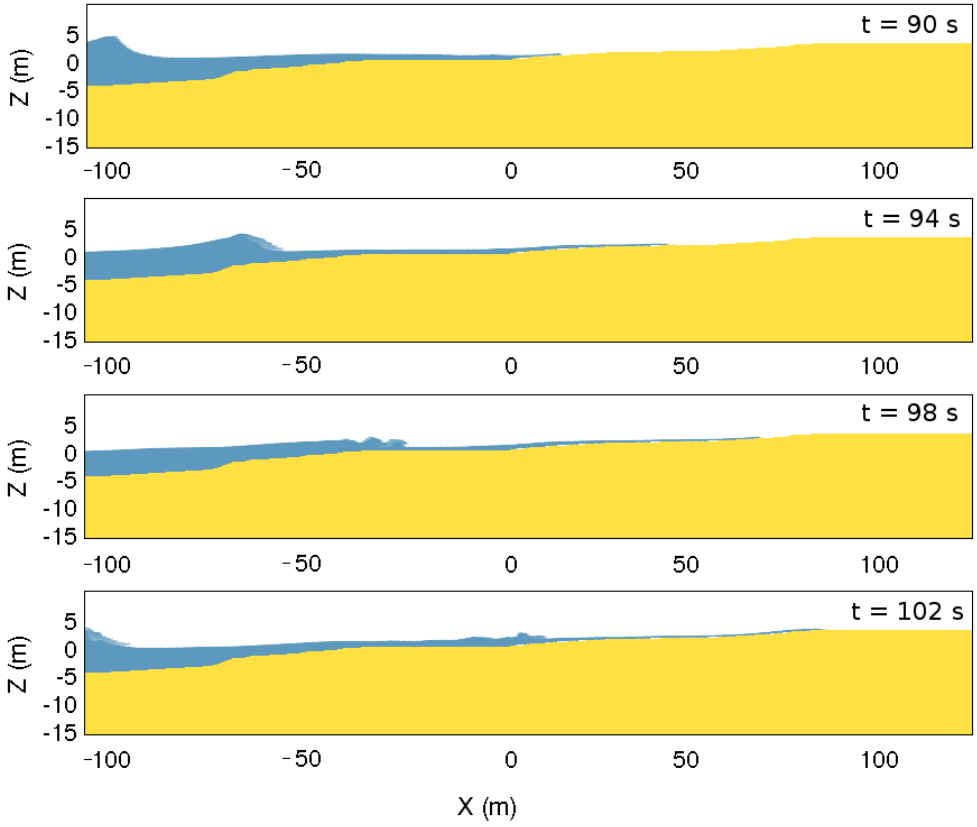


**Figura 9.** Representación de la posición de la superficie libre, ascenso – descenso sobre una playa, en cuatro instantes de tiempo (t=90, 94, 98 y 102 s).

El post-proceso del modelo numérico IH-2VOF está diseñado para identificar automáticamente las celdas inmediatamente adyacentes a las que constituyen la batimetría. Para evitar un excesivo número de datos, se delimita una zona en la que se monitorizan dichas celdas y con las que, posteriormente, se calculará el run-up.

Para cada paso de tiempo se guarda el valor de la cantidad de fluido en cada celda del grupo seleccionado de celdas. Los valores adimensionales posibles son los siguientes: 0 = celda vacía, 1 = celda llena de agua, 0-1 = celda parcialmente llena. Previamente se han obtenido las coordenadas centrales de cada celda, posibilitando la obtención del ascenso - descenso tanto en la coordenada horizontal (Alcance de la inundación) como en vertical (Run-Up o remonte). Así para cada instante se obtiene el índice de la celda más alejada que presenta un valor de cantidad de fluido adimensional mayor de 0.5 (límite establecido para el cálculo de la superficie libre), y con ella la cota y alcances máximos de la lámina de agua.

A continuación se presenta un ejemplo de ello; en la Figura 10 se muestra la evolución temporal de la distancia en horizontal del ascenso-descenso sobre la playa (X) y en la Figura 11 se muestra la evolución temporal de la distancia en vertical del ascenso-descenso sobre la playa (Z). Los resultados son muy similares, y están ligados por las pendientes del perfil real. Es por ello que en ambas figuras se aprecia un gran pico en la parte central de la señal. Su magnitud relativa es mucho más grande en la componente X que en la Z; esto quiere decir que se trata de una zona bastante plana al final del perfil.

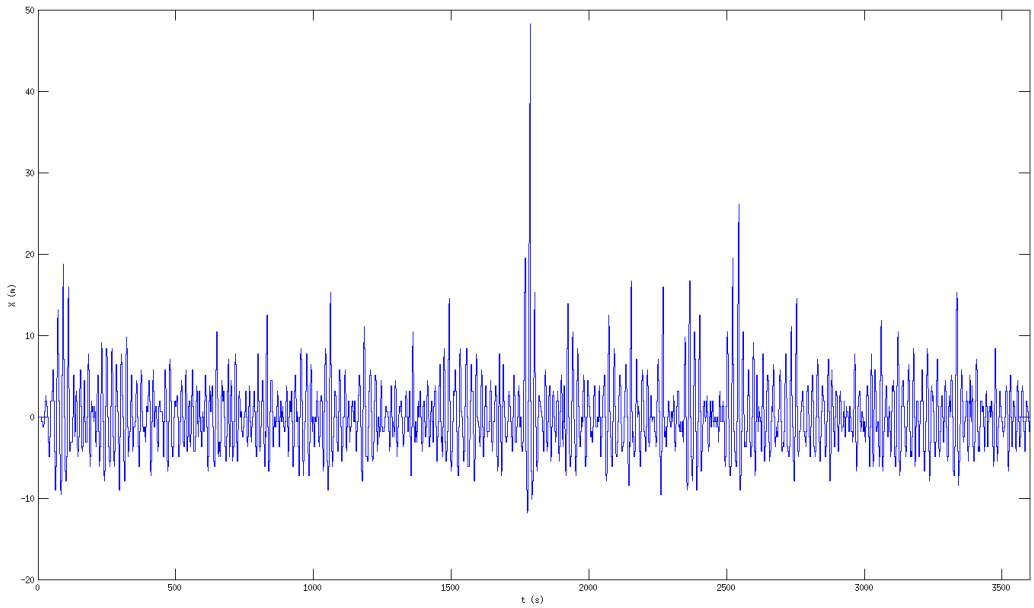


**Figura 10.** Evolución temporal de la distancia en horizontal del ascenso - descenso sobre una playa, X (m).

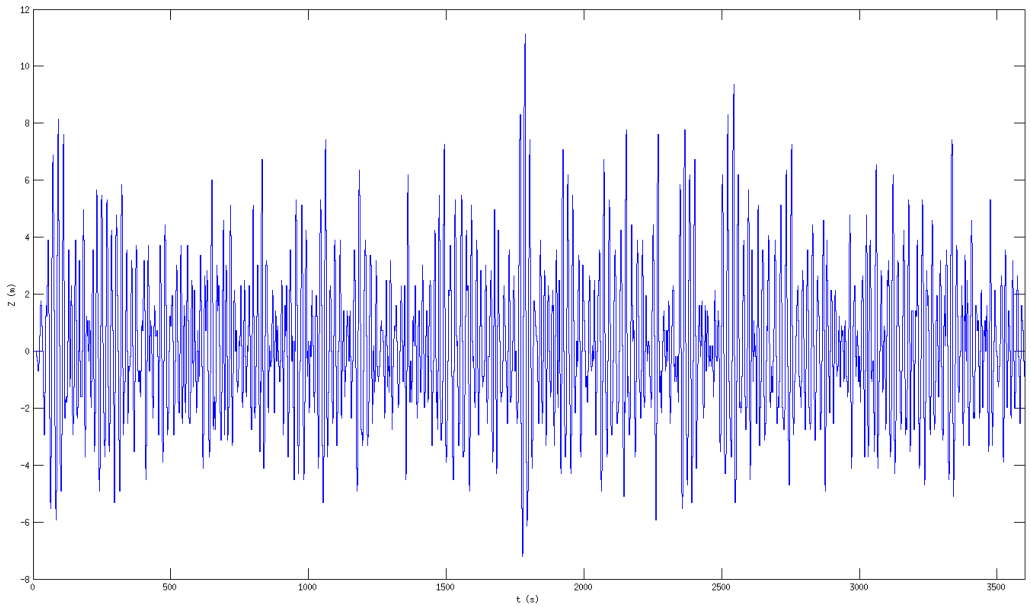


**Figura 11.** Evolución temporal de la distancia en vertical del ascenso - descenso sobre una playa, Z (m).

Basándose en la evolución instantánea de las proyecciones horizontales y verticales del ascenso-descenso (X y Z) se calcula la máxima inundación producida por cada ola o evento individual. La identificación de la inundación de cada ola y el cálculo de su máximo, se lleva a cabo mediante un análisis de up-crossing o pasos ascendentes por cero, en cada serie. En la Figura 12 se muestra un ejemplo de ello. Se obtienen así los valores de Alcance (I) y Run-Up (Ru) de todas las olas del estado de mar horario.

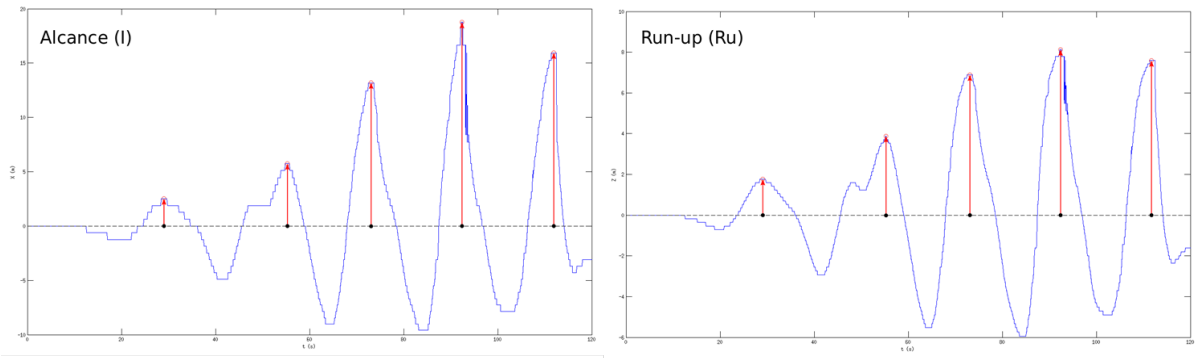


**Figura 12.** Definición del Alcance (I) y Run-Up (Ru) a partir de la evolución temporal de la distancia en horizontal (X) y vertical (Z) del ascenso - descenso sobre una playa.

Es en este momento cuando los eventos individuales de Alcance y Run-up se ordenan de menor a mayor, calculándose el valor del 2% mediante interpolación lineal a partir de las curvas de distribución empírica. En la Figura 13 se muestran las funciones de distribución empíricas del Alcance y del Run-Up, situándose los valores del 2% con un círculo rojo.

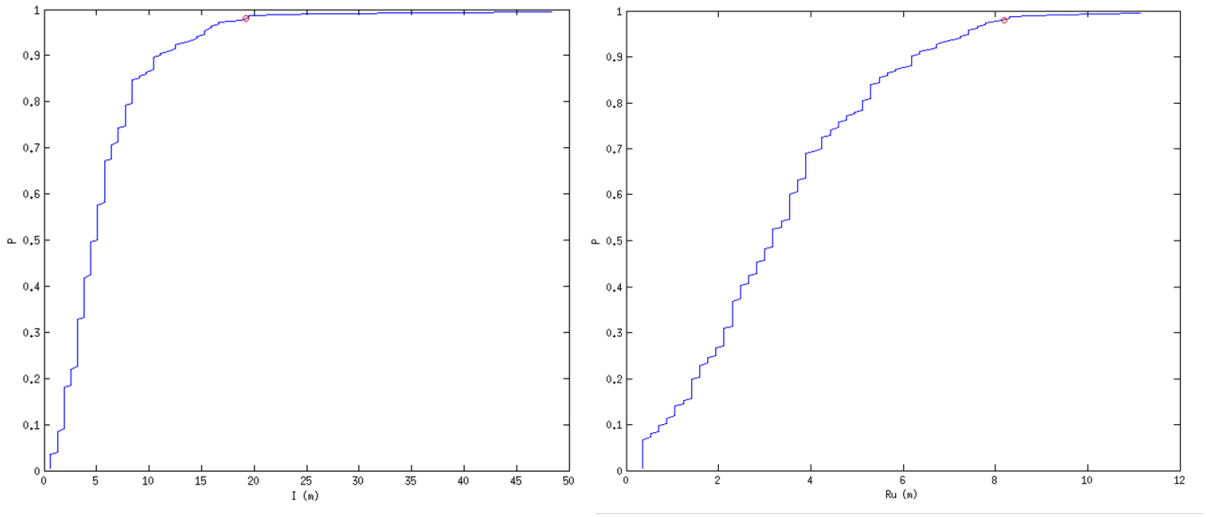


**Figura 13.** Función de distribución empírica del Alcance, I (izquierda) y del Run-Up o remonte, Ru (derecha) con los valores del 2% respectivamente I2% y Ru2%, en rojo.

Cabe señalar que como se ejecutan estados de mar de una hora de duración, los valores de Alcance y Run-Up del 2% se definen con suficiente precisión. Se verifica siempre que se obtengan más de 100 eventos de inundación para realizar la estadística (más de 100 olas disponibles).

# APÉNDICE III

# GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

# GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

| GLOSARIO DE ACRÓNIMOS | |
|---|---|
| ARPSI | Área con Riesgo Potencial Significativo de Inundación |
| BIC | Bien de Interés Cultural |
| DMA | Directiva Marco del Agua |
| DPMT | Dominio Público Marítimo-Terrestre |
| EBAR | Estación de Bombeo de Aguas residuales |
| EDAM | Estación Desaladora de Agua Marina |
| EDAR | Estación Depuradora de Aguas Residuales |
| EDAS | Estación Desaladora de Agua Salobre |
| EPRI | Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación |
| ETAR | Estación de Tratamiento de Aguas Residuales |
| IPPC | Integrated, Prevention, Pollution and Control (Prevención y Control Integrado de la Contaminación) |
| LIC | Lugar de Importancia Comunitaria |
| NMMA | Nivel Medio del Mar en Alicante |
| PRTR | Pollutant Release and Transfer Register (Registro de Emisiones y Transferencias contaminantes) |
| SNCZI | Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables |
| ZEPA | Zona de Especial Protección para las Aves |