METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA EN ESPAÑA (iOLE)

A. Tomas[1], R. Medina[1], F.J. Méndez[1], F.F. Jaime[1], O.F. Castellanos[1], P. Higuera[1], F. Fernandez[1], R. Minguez[1], G. Diaz-Hernandez[1], J.L. Lara[1], M.D. Ortiz[2]

[1] Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria". Universidad de Cantabria, C/ Isabel Torres nº 15. Santander, 39011, España; (+34) 942-201616; E-mail: medinar@unican.es

[2] Dirección General para la Sostenibilidad de la Costa y el Mar. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Plaza San Juan de la Cruz s/n. Madrid 28071, España; E-mail: DOrtiz@magrama.es

INTRODUCCIÓN

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 la Dirección General del Agua y la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar en los ámbitos competencia de la Administración General del Estado. En la actualidad sólo se ha elaborado la primera fase que exigía la Directiva de Inundaciones: la Evaluación Preliminar de los Riesgos de Inundación, definiendo unas Áreas Potenciales de Riesgos de Inundación. La Directiva prevé dos fases más para su implementación. En primer lugar está la fase dos 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 tercera fase consiste en la redacción de los Planes de Gestión de estas zonas y tiene que estar finalizada para finales del 2015.

En lo que compete a la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar, para la implementación de la fase dos en el litoral español, se han licitado nueve lotes por demarcaciones hidrográficas para que los consultores adjudicatarios realicen los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación. Para la redacción de estos mapas se cuenta con el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (en adelante IH Cantabria), que desarrolla 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).

En este sentido, el Proyecto C3E ha sido realizado por el IH Cantabria en el marco de un proyecto del Pan Nacional de I+D+i y financiado por la Secretaría de Estado de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Uno de sus resultados ha sido 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 beneficio para las administraciones públicas y la sociedad en general.

Objetivos

La determinación de las zonas inundables requiere de la realización de rigurosos estudios y modelados matemáticos, así como de la disponibilidad de extensas y fiables bases de datos referentes a las variables meteo-oceanográficas que generan esas inundaciones.

Es por ello que el objetivo del presente trabajo es el desarrollo de las metodologías y herramientas que permitan la elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación costera requeridos por el Real Decreto 903/2010, a partir del uso de las bases de datos resultado del proyecto C3E, anteriormente citado.

La realización de este objetivo se estructura en base a las siguientes actividades principales, que dan estructura al presente artículo:

- Desarrollo de una metodología que permita estimar la extensión previsible de la inundación costera (mapas de peligrosidad).
- Desarrollo de un software para el cálculo de la peligrosidad de la inundación costera (iOLE.exe).
- Desarrollo de una metodología que permita, a partir de la peligrosidad y la vulnerabilidad, estimar el riesgo de inundación costera (mapas de riesgo).

METODOLOGÍA MAPAS DE PELIGROSIDAD

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, figura 1: 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.

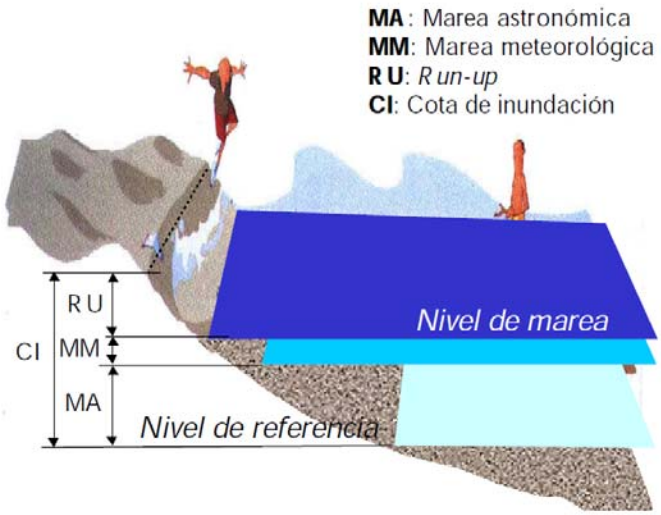


Figura 1. Factores que afectan a la cota de inundación.

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 el tiempo medio en años que tardan en repetirse dichos eventos extremos.

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 Ref) generadas en el marco del Proyecto C3E (Cambio Climático en la Costa Española, Ref 20080050084091, www.c3e.ihcantabria.es). 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 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 si mismo, el tratamiento de toda la información disponible es un complicado problema a resolver.

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 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 frente a la otra opción de estudio, que sería la realización de ensayos físicos, debido a su menor coste de ejecución. 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, centradas 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 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 cada 200 m para resolver numéricamente con el modelo IH2VOF la inundación, perfil a perfil, incorporando el efecto combinado del oleaje y del nivel del mar.

A continuación, se desarrollan las dos aproximaciones o fases de dicha metodología.

Aproximación metodológica con nivel del mar (1ª).

En la figura 2 se presenta un esquema de la metodología de esta primera fase para la inundación con nivel del mar. En ella hay 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); calculándose la cota de inundación asociada a distintos periodos de retorno (CI Tr). En segundo lugar, y una vez calculadas en todos los puntos la CI Tr, se corta el Modelo Digital del Terreno (MDT) con las CI Tr de cada periodo de retorno, obteniéndose la extensión de la inundación y finalmente generándose los mapas de inundación asociados a cada periodo de retorno. Esta segunda parte se realiza íntegramente con un software SIG (Sistema de Información Geográfico).

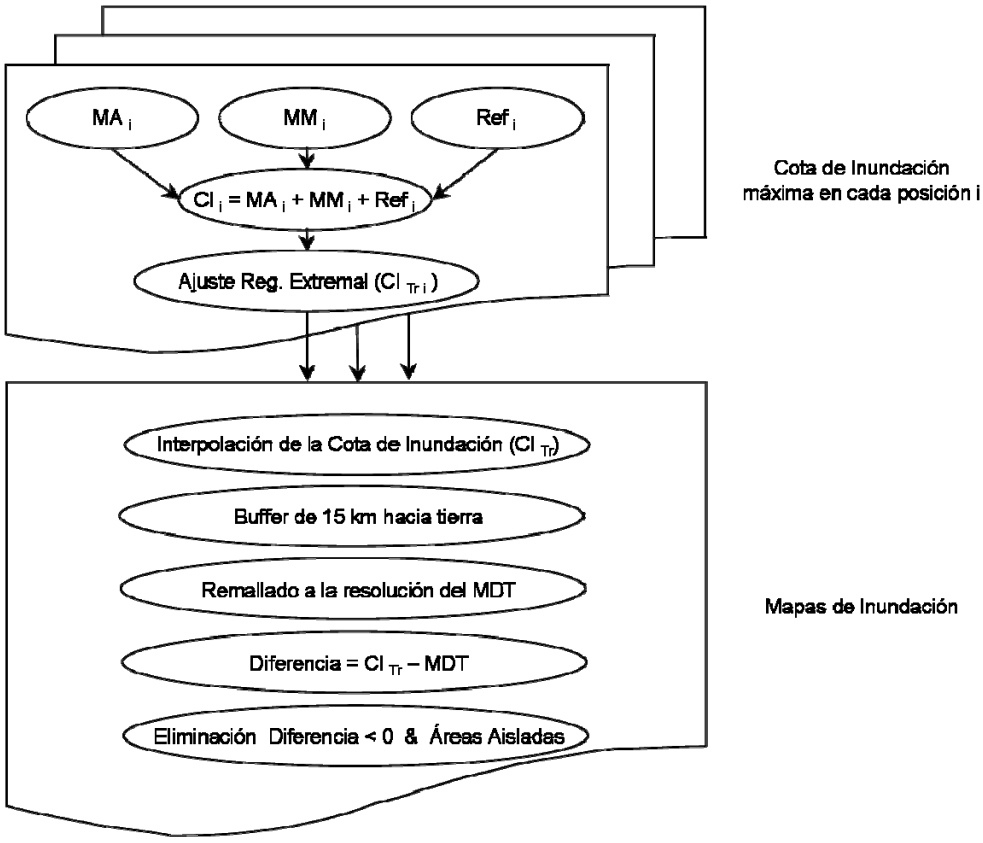


Figura 2. Esquema de la metodología con nivel del mar (sin oleaje).

Como ya se ha mencionado anteriormente, se obtienen los datos de nivel del mar 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 la Cota de Inundación (CI i) se define a partir de series de datos horarios desde el año 1948 hasta el 2008, a lo largo del litoral español.

Posteriormente se ajusta el régimen extremal a cada serie, compuesta por más de 60 años de datos. De dicha serie se utilizan los eventos extremos independientes que superan un cierto umbral de forma que se obtengan de media 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 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. Para obtener más referencias del software utilizado en el ajuste del régimen extremal, consultar en www.ihameva.ihcantabria.com.

Una vez realizado el ajuste se calculan los valores de Cota de Inundación para los distintos periodos de retorno (CI Tr); se ha obtenido los valores para Tr = 10, 50, 100 y 500 años.

Posteriormente se generan los mapas de inundación (segunda parte de la metodología). Para cada periodo de retorno se repite un procedimiento en el que se solapa la Cota de Inundación (CI) con el Modelo Digital de Terreno (MDT) y se seleccionan aquellas zonas donde el valor de la CI sea superior al MDT. Este resultado no representa estrictamente la inundación. Las zonas inundadas por nivel de marea son además aquellas conectadas físicamente desde el mar, eliminando aquellas otras áreas aisladas.

Aproximación metodológica con nivel del mar y oleaje (2ª).

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 sacan 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 (Torres-Freyermuth et al., 2007). 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 los las zonas expuestas al oleaje de 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.

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. Dicha línea de costa ha sido segmentada en puntos cada aproximadamente 200 m. Esta resolución espacial está condicionada por la resolución espacial de las base de datos de oleaje (DOW, Camus et al., 2013), pero es suficiente para representar correctamente el comportamiento de la inundación por oleaje a lo largo del litoral español.

Posteriormente, 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.

Después se define, para cada punto, varios parámetros o características del oleaje asociados a dicha posición. Estos parámetros sirven para definir el perfil del terreno correspondiente a cada punto. 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 (θFE), 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 simula bidimensionalmente los procesos de inundación lo más correctamente posible. Se asume que la posición del inicio de cada perfil tiene la profundidad de cierre definida para playas (h*). Para el cálculo tanto de θFE como de h* se hace en función de la altura de ola significante que es superada 12 horas al año (Hs12).

Corte de los perfiles del terreno.

Una vez realizada la segmentación de la línea de costa, con la que se determina el inicio y la dirección de cada perfil, se procede a realizar los cortes del Modelo Digital del Terreno (MDT) para calcular el "Perfil Emergido" o topográfico (~1000 m de longitud). El "Perfil Sumergido" o batimétrico se define usando el perfil teórico de Dean (1991) desde la profundidad de cierre (h*). En la figura 3 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 ambos.

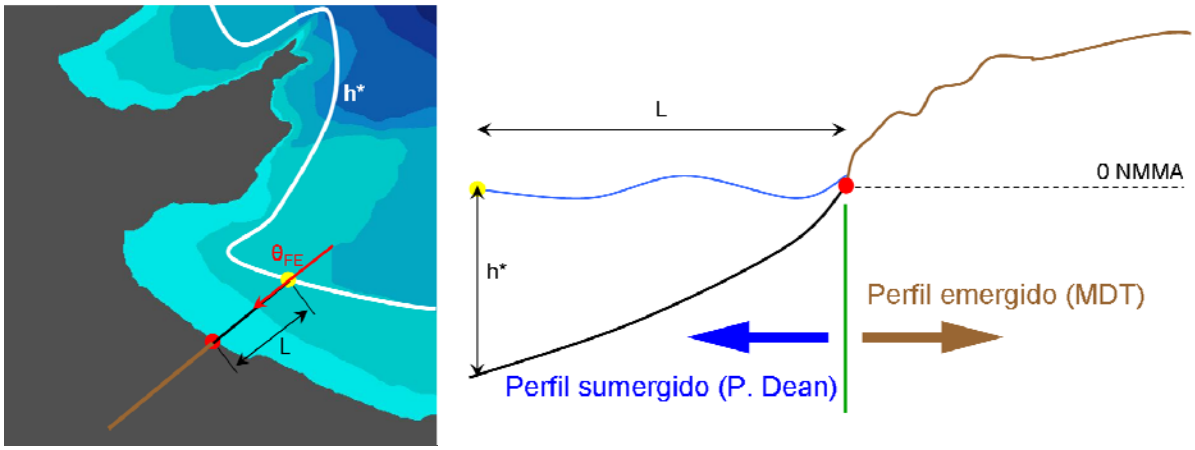


Figura 3. Esquema para determinar el perfil emergido y sumergido.

Siguiendo este procedimiento, se determinan todos los perfiles del terreno, (Emergidos y Sumergidos) a lo largo del litoral español. En total se obtienen unos 30000 perfiles.

Definición de las dinámicas en cada perfil.

Como se ha expuesto anteriormente, del proyecto C3E se tienen unas bases de datos de oleaje y nivel del mar a lo largo de todo el litoral español. Por lo que en el punto de inicio de cada perfil se puede extraer 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).

Cálculo de las series de Ru2% e I2% en cada perfil.

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 30000 perfiles, por lo tanto, la simulación de todos los temporales en cada perfil conllevaría ejecutar numéricamente un número de estados de mar inviable, por el tiempo de cómputo que ello supondría.

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

Previamente a la clasificación, se incorpora la información de la dinámica actuante de cada estado de mar horario (Hs, 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, pueden tener un mismo run-up o inundación.

Una vez seleccionados los estados de mar y los perfiles a simular con el modelo numérico IH-2VOF se ejecutan y se obtiene el remonte o Run-Up asociado al 2% de las olas (Ru2%) y también el alcance de la inundación asociado al 2% de las olas (I2%). Posteriormente se agrupan los resultados de Ru2% y de I2% de cada "clúster" o tipo de perfil adimensional y finalmente se ajustan leyes o fórmulas que rijan el comportamiento del Ru2% y el I2% en cada clúster.

De esta forma se puede usar la colección de formulas ajustadas para I2% y Ru2%, en cada clúster, de forma predictiva para otros estados de mar no simulados con el modelo numérico, sin tener que ejecutar el modelo.

En resumen, una vez obtenida la colección de fórmulas del IH-2VOF, para realizar el cálculo de los valores de I2% y Ru2% en cada perfil (a un determinado nivel de confianza): primero se identifica cada temporal (oleaje y nivel del mar) de cada perfil; posteriormente se aplica la adimensionalización del perfil para determinar cuál es el clúster que le corresponde; y finalmente se utilizan las fórmulas ajustadas de dicho clúster para calcular los valores de Ru2% y de I2%.

Ajuste de los regímenes extremales de inundación en cada perfil.

A partir de los valores extremos de I2% y Ru2%, calculados en cada perfil, se ajustan sendos regímenes extremales con la técnica POT (Peaks Over Threshold). Para obtener más referencias del software utilizado en el ajuste del régimen extremal, consultar en www.ihameva.ihcantabria.com.

Antes de realizar el ajuste de los regímenes extremales hay que 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). 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 figura 4 se muestra un esquema de ello. 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 figura 4 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).

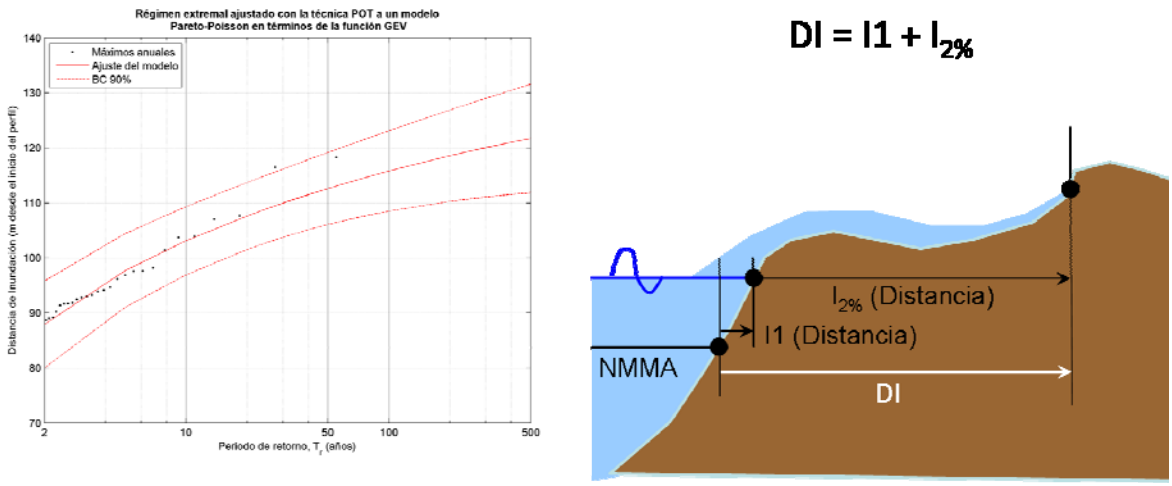


Figura 4. Ejemplo de ajuste del régimen extremal de distancia de inundación con nivel del mar y oleaje.

Una vez realizados los ajustes de los regímenes extremales se calculan los valores asociados a distintos periodos de retorno (CI Tr y DI Tr).

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.

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).

Generación de los mapas de inundación.

El último paso de la segunda fase de la metodología consiste en generar los mapas de inundación, este proceso ha sido desarrollado completamente en GIS. Los mapas de inundación por oleaje y nivel en la costa se generan a partir de los valores de la extensión de la inundación calculados en el apartado anterior, que reflejan hasta donde llega la inundación, cada aproximadamente 200 m, para los distintos periodos de retorno calculados.

Finalmente, la obtención de la zona de inundación definitiva se determina como la máxima entre los mapas de inundación por nivel del mar de la fase uno y los mapas de inundación por nivel del mar y oleaje en la costa. Dichos mapas se obtienen de la fusión de ambos mapas para los distintos periodos de retorno. En la figura 5 se presenta el ejemplo final de la una zona de la Manga del Mar Menor en Murcia.

Figura 5. Mapa definitivo de inundación por nivel del mar y oleaje (fase 1º y 2º), para los periodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años en la Manga del Mar Menor.

Resumen.

A continuación, en la figura 6 se presenta un esquema del procedimiento completo para aplicar la metodología con la que se estima la extensión de la inundación debida a la acción conjunta del nivel del mar y oleaje. Con ella se resume la segunda fase de la metodología, en la que se corrigen los resultados de la primera fase y se obtienen los mapas definitivos de inundación.

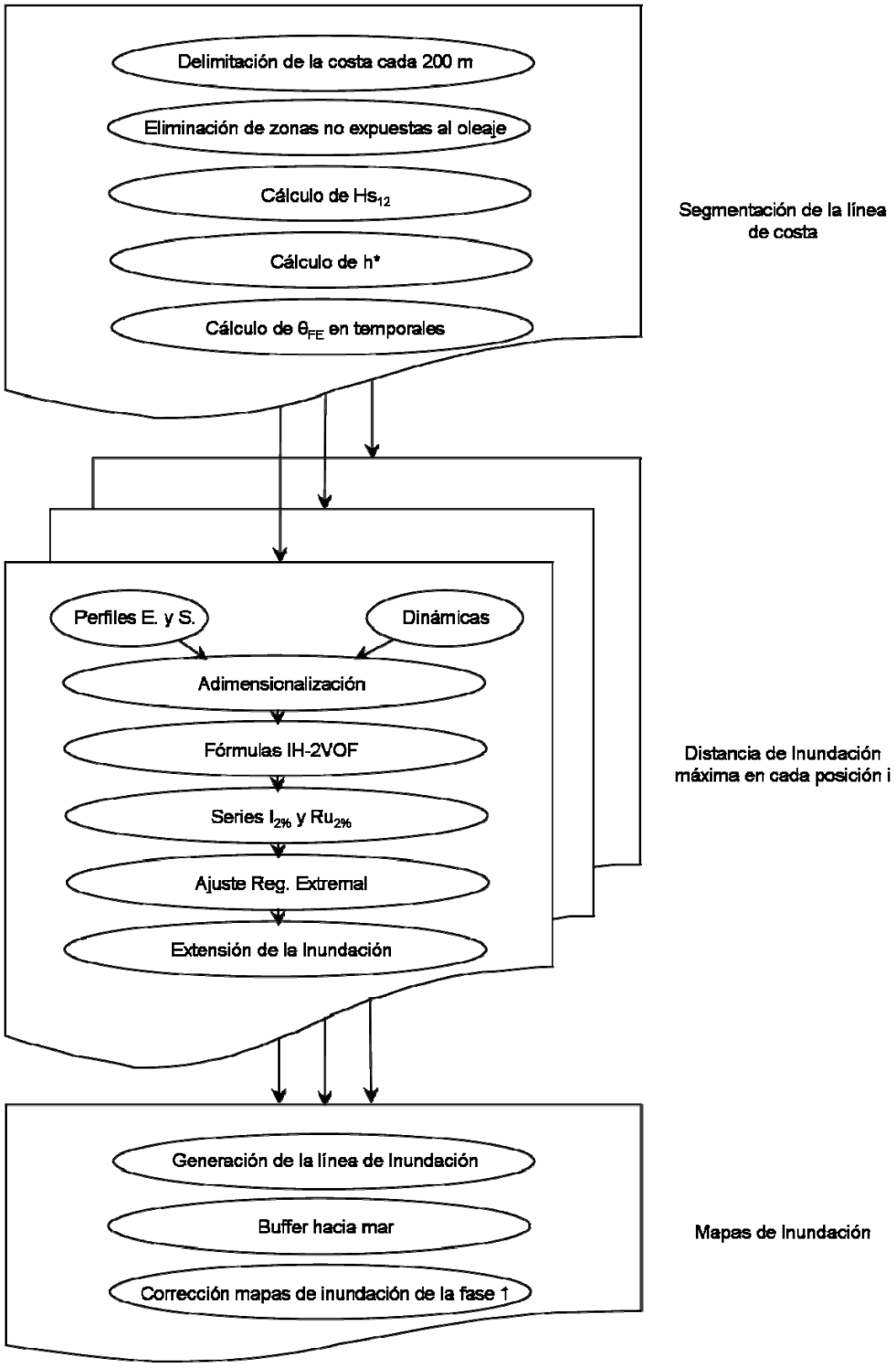


Figura 6. Esquema de la aplicación de la metodología con nivel del mar y oleaje.

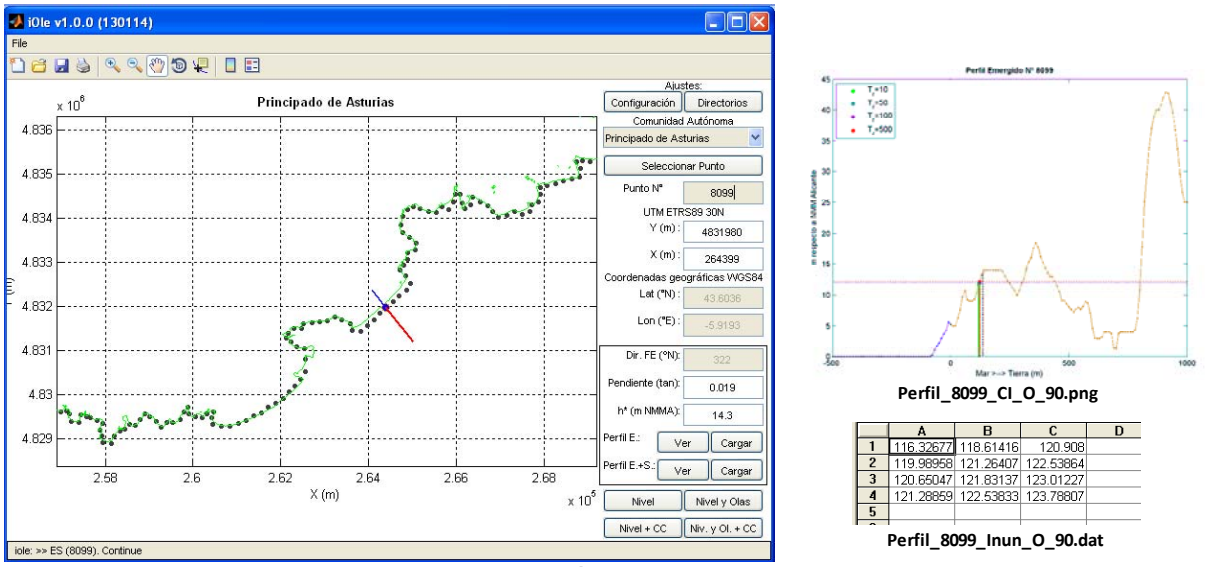
SOFTWARE IOLE.EXE

Se ha generado un software que incorpora el cálculo y la aplicación de la metodología descrita en el apartado anterior. De forma que se facilita y sistematiza el cálculo de la extensión de la inundación en cada posición a lo largo de la línea de costa (cada 200 m). Se incorpora tanto la primera como la segunda fase de la metodología (nivel y nivel y olas respectivamente); sin incluir la generación de los mapas de inundación, que se realizaría posteriormente con herramientas GIS.

Cabe señalar que dicha metodología permite incorporar los efectos del cambio climático en las dinámicas actuantes, tanto del nivel del mar como del oleaje, así como la evolución de la línea de costa; lo que permite estimar la influencia de dichos cambios en los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación.

El software incorpora internamente todas las dinámicas del proyecto C3E y perfiles de la costa española, si bien es suficientemente versátil como para incorporar otras geometrías. Así mismo, los resultados que genera (archivos de datos y figuras), facilita su explotación y compatibilidad con otros programas.

En la figura 7 se muestra un ejemplo de la interfaz principal de la aplicación y de alguno de los resultados que se obtienen en el análisis de un perfil cualquiera.



	A	B	C	D
1	116.32677	118.61416	120.908	
2	119.98958	121.26407	122.53864	
3	120.65047	121.83137	123.01227	
4	121.28859	122.53833	123.78807	
5				

Figura 7. Interfaz principal de la aplicación (izquierda). Ejemplo de ficheros de resultados, inundación de nivel y oleaje para la banda de confianza del 90%, salida gráfica (derecha - arriba) y salida numérica (derecha – abajo).

En la parte central-izquierda de la interfaz principal se encuentran los paneles de edición de imagen e información visual. En la parte derecha de la interfaz principal se encuentran los paneles de trabajo (ajustes, localización, parámetros y resultados) que nos muestra la información del punto seleccionado y nos guía por la rutina de trabajo para el cálculo de la extensión de la inundación en cada perfil.

En el panel de resultados se muestran cuatro botones que identifican los cuatro modos de uso del software: Nivel (fase 1º), Nivel + CC (fase 1º y Cambio Climático), Nivel y Olas (fase 2º) y Niv. y Ol. + CC (fase 2º y Cambio Climático).

METODOLOGÍA MAPAS DE RIESGO

La metodología para generar los mapas de riesgo consiste en intersectar las zonas delimitadas por los mapas de peligrosidad con las bases de datos de vulnerabilidad. Ya que para cada periodo de retorno se tiene un mapa de peligrosidad, también se obtiene un mapa de riesgo para cada periodo de retorno.

Dicha metodología se define para poder realizarse completamente en GIS, a partir de los mapas de peligrosidad y las bases de datos de vulnerabilidad, de forma que si se

actualizasen las bases de datos de vulnerabilidad, la generación de los nuevos mapas de riesgo se realizaría con facilidad. Cabe señalar que las bases de datos de vulnerabilidad utilizadas tienen valores asociados a superficies: densidad de población y usos del suelo.

A modo de ejemplo, si se utiliza la base de datos de población, se utilizaría únicamente la información de densidad de población que va asociada a cada polígono de la misma. Dicha información se intersecta con el mapa de peligrosidad asociado a un determinado periodo de retorno y se calcula el área inundada de cada polígono. En la figura 8 se presenta un ejemplo de mapa de riesgo de inundación de densidad de población para el periodo de retorno de 500 años, para una zona de Cantabria. Posteriormente, multiplicando el área inundada de cada polígono por su densidad de población se obtiene el número de habitantes afectados por la inundación. Finalmente, para estudiar una determinada zona, se agregan los resultados de los polígonos que resultan inundados en dicha zona.

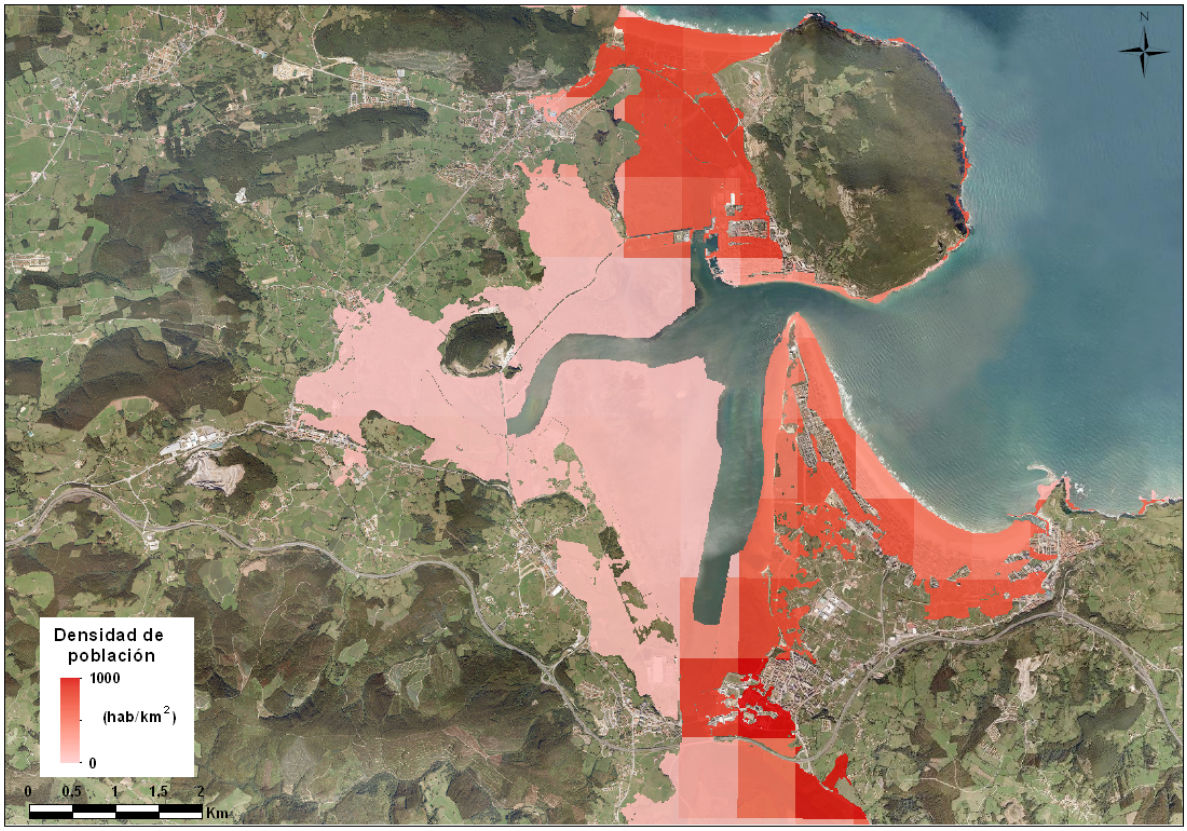


Figura 8. Mapa de riesgo de inundación para Tr = 500 años de población con los datos del Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), para la zona de Santoña-Laredo.

Como se ha mencionado anteriormente, las dos bases de datos de vulnerabilidad que se analizan son población y usos de suelo. Para el caso de población es muy sencilla la aplicación de la metodología (como se ha explicado en el párrafo anterior), pues en cada polígono únicamente existe una categoría: densidad de población. En cambio, para la base de datos de usos de suelo, que se ha obtenido del Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España, SIOSE, 2011), en cada polígono existen distintos porcentajes de uso del suelo o categorías.

Los polígonos con los que se genera la base de datos de usos de suelo del SIOSE consideran distintos porcentajes de uso de coberturas. De forma muy simplificada, si de los distintos usos de suelo que hay en cada polígono no se considerasen los usos minoritarios y únicamente se utilizase el uso dominante (el que tenga un mayor porcentaje), podríamos aplicar directamente la metodología descrita para población. En la figura 9 se presenta un ejemplo del mapa de riesgo de inundación del uso dominante en una zona de Cantabria, intersectado con el mapa de peligrosidad para el periodo de retorno de 500 años.

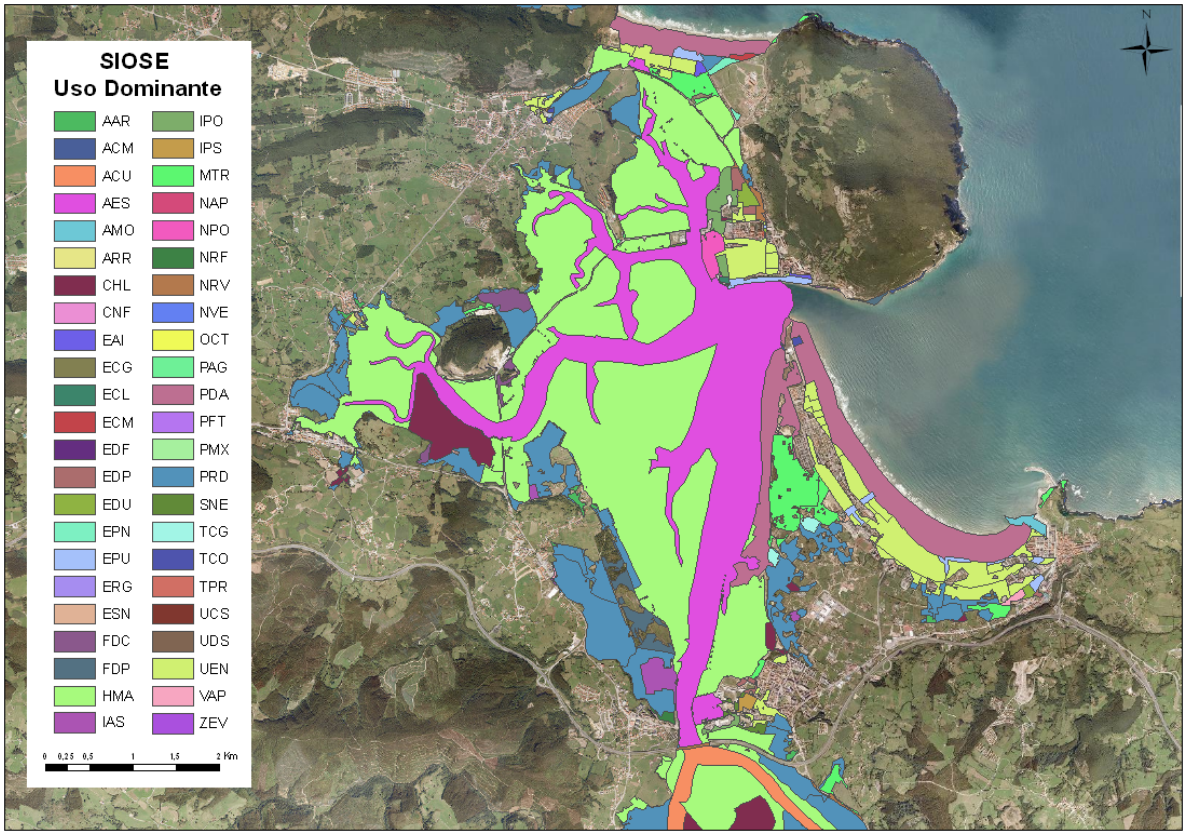


Figura 9. Mapa de riesgo de inundación para Tr = 500 años del SIOSE, para la zona de Santoña-Laredo.

Con este ejemplo simplificado de aplicación no se están teniendo en cuenta los usos minoritarios en cada polígono, que pueden ser muy relevantes para los planes de gestión. Por ejemplo, podría darse el caso que dentro de un polígono el porcentaje de suelo de parque urbano (EPU) fuese mayor que el de casco urbano (UCS), siendo parque urbano el uso dominante; en este caso, si no se tuviese en cuenta el porcentaje de cobertura de casco urbano (pues tiene un uso minoritario en porcentaje de terreno ocupado dentro del polígono) en el cálculo del daño producido por la inundación, se estaría subestimando mucho dicho valor, pues el impacto de la inundación sobre este tipo de cobertura es mucho mayor que el que sufre el parque urbano. Por este motivo se desarrolla una metodología que considera todas las coberturas que contiene cada polígono, sea cual sea su porcentaje de ocupación.

Se genera un mapa de riesgo para cada uso de suelo con el porcentaje de terreno, en cada polígono, que tiene dicho uso. Como el SIOSE define muchos usos de suelo o coberturas, para simplificar el problema, se agregan a las coberturas del SIOSE a un número reducido de usos o actividades económicas que ha definido de forma preliminar la Comisión Europea.

Finalmente, a partir de los mapas de riesgo de inundación se podría cuantificar fácilmente el riesgo en una zona concreta, integrando los resultados en ese área de estudio. Por ejemplo, para población tendríamos el número de habitantes afectados; para usos de suelo, se obtendría la extensión de los terrenos inundados de cada uso económico (en hectáreas). Posteriormente, si se define el daño medio de la inundación para cada uso económico (€/ha) se podría calcular el daño económico de la inundación en dicha zona. Así mismo, como se tienen los valores de daño (Di) para cada periodo de retorno (Tri), se podría calcular el daño esperado anual (Expected Annual Damage) como:

$$EAD = \sum_i \frac{1}{Tr_i} D_i$$

CONCLUSIONES

Se ha generado una novedosa metodología para elaborar los mapas de peligrosidad, de forma eficiente y con suficiente precisión a lo largo del litoral español.

La existencia y la calidad de las bases de datos generadas en el marco del proyecto C3E ha permitido definir la metodología rápidamente y de forma homogénea.

Los complicados procesos de inundación costeros se han simulado con el modelo numérico IH2VOF, uno de los más avanzados en su clase.

Con base a los resultados del IH2VOF se han realizado un catálogo de fórmulas para el cálculo del Ru2% e I2%, válidas para todo el rango de dinámicas y geometrías de las costas españolas.

La gran cantidad de información utilizada se administra eficientemente mediante técnicas estadísticas de clasificación y selección de variables de alta dimensionalidad.

Se ha desarrollado una herramienta que permite aplicar de forma fácil y cómoda la metodología expuesta.

Se integran los resultados mediante Sistemas de Información Geográfica, generándose los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación. De esta forma se favorece la gestión coordinada de toda la información, por parte de las administraciones públicas y de la sociedad en general.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente la financiación por el proyecto iOLE (Asistencia Técnica a la Elaboración de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación Costera).

REFERENCIAS

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

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

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

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

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

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/)

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

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