

# Determinación de la inundación en tramos de ríos afectados por marea basada en la simulación continua de nivel.

Sopelana, J.<sup>a</sup>, Cea, L.<sup>b</sup> y Ruano, S.<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Aquática Ingeniería Civil S.L. Areal 42 2 d, 36201 Vigo. [jsopelana@aquaticaingenieria.com](mailto:jsopelana@aquaticaingenieria.com)

<sup>b</sup>Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña. [luis.cea@udc.es](mailto:luis.cea@udc.es)

<sup>c</sup>Universidade da Coruña. Alumna de International Master in Water Engineering. Curso 2015-2016. [silda.ruano@gmail.com](mailto:silda.ruano@gmail.com)

Línea temática | Tema A. Dinámica fluvial, de embalses, estuarios y humedales

---

## RESUMEN

Las desembocaduras, estuarios y tramos de ríos costeros son elementos hidrodinámicamente complejos debido a la interacción de varias dinámicas generadoras de inundación como la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje y el caudal del río, entre otras. La marea astronómica es una onda larga que se propaga aguas arriba llegando a afectar a tramos de río situados a decenas de kilómetros de la costa. En estos tramos de río, el mismo nivel del agua puede ser el resultado de la diferente combinación de una o varias de las dinámicas mencionadas. La Directiva 2007/60/CE de inundaciones, define la peligrosidad y el riesgo de inundación asociado a ciertos periodos de retorno (10, 100 y 500 años). Además, algún organismo de cuenca define el DHP cartográfico asociado a la máxima crecida ordinaria a partir de un periodo de retorno (2.33, 3 años). Los estudios de peligrosidad y riesgo de inundación en tramos de ríos afectados por la marea se han basado hasta ahora en la aplicación de una condición de contorno de nivel de marea fijada de forma más o menos arbitraria. En España la “Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables”, consciente de la complejidad de los procesos y en aras de simplificar, aconseja aplicar una condición de contorno de nivel correspondiente al mismo periodo de retorno que el de la avenida que se esté modelizando. Esta forma de proceder no tiene en cuenta de forma correcta la probabilidad de ocurrencia de varios eventos extremos al mismo tiempo.

En este artículo se propone una metodología híbrida de simulación continua que combina la generación de series sintéticas a largo plazo de las variables implicadas, un modelado hidrodinámico bidimensional de alta resolución espacial de la zona de estudio, y técnicas estadísticas de muestreo de datos e interpolación de resultados. La metodología propuesta se ha aplicado a la ciudad costera de Betanzos (noroeste de España), localizada en la confluencia de dos ríos en la cola de un estuario, y que históricamente ha tenido problemas de inundación por lo que está catalogada como ARPSI fluvial y costera. Los resultados se han comparado con los obtenidos aplicando la propuesta de la Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, observándose que estos últimos sobreestiman de forma considerable los niveles de inundación asociados a un determinado período de retorno.

---

## INTRODUCCION

Las inundaciones en los ríos costeros son el resultado de la interacción de diferentes eventos extremos, como caudales del río, oleaje, marea astronómica, marea meteorológica y aguaceros intensos de carácter local. La ocurrencia simultanea de dos o más de estos sucesos es a menudo la causante de las inundaciones en ciudades costeras, haciéndolas particularmente vulnerables a las inundaciones. En este artículo se estudia el caso específico en el que un tramo de río está afectado por la variación del nivel del mar en zonas como estuarios y desembocaduras meso y macro mareales, donde la inundación viene definida fundamentalmente por la combinación de dos variables independientes, el caudal del río y la marea.

El hecho de considerar que la inundación en estuarios y tramos de río afectados por el nivel del mar puede estar asociado a distintas dinámicas implica que el mismo nivel puede ser el resultado de la diferente combinación de las dinámicas

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

involucradas, por lo que la probabilidad de ocurrencia de nivel debe ser determinada teniendo en cuenta la probabilidad de todas las posibles combinaciones [9] [1] [41].

La escala temporal también puede llegar a ser relevante en el caso de análisis de eventos extremos. Teniendo en cuenta la escala temporal, [18] distingue tres tipos de correlación temporal que podrían ser consideradas, auto correlación a corto plazo [1], correlación a corto plazo o estacional y correlación a largo plazo, esta última relacionada con las tendencias de cambio climático.

El análisis conjunto de diversas causas de inundación en áreas costeras ha sido objeto de diferentes estudios desde los años 90. La mayoría de estos centrados en la probabilidad conjunta de ocurrencia de nivel del mar y oleaje [18] [17] [23] [37] [41] [1]. Otros autores como De Bruijn et al. 2014 se centran en el estudio del riesgo de inundación en deltas considerando la acción conjunta del surge o marea meteorológica y el caudal del río mediante el empleo de simulaciones de Monte Carlo. Algunos autores como [30] [31] realizaron un análisis en la costa sur y oeste de Gran Bretaña sobre un total de 19 mareógrafos y 72 estaciones de aforo para relacionar el surge y el caudal de los ríos, concluyendo que existe cierta dependencia entre ambas variables en estuarios y ríos afectados por marea con cuencas expuestas a vientos del sur-oeste, cuando los caudales elevados y los eventos de surge tienen lugar de forma simultánea. También concluyeron que la dependencia entre las variables es a menudo mayor cuando se producen el mismo día, aunque también es fuerte cuando se desfasa un día el caudal.

En relación a la acción conjunta de nivel del mar y caudal del río, objetivo del presente artículo, los estudios publicados más relevantes son los de [38] [1] [26] [16] [30] [31] [41] [25]. La mayoría de los estudios de riesgo de inundación en áreas costeras no tienen en cuenta de forma correcta la probabilidad de ocurrencia de varios eventos extremos al mismo tiempo [2]. Eventos extremos se llegan a asumir como independientes o se usa algún tipo de combinación arbitraria de periodos de retorno [33] [39].

El denominado método de reconstrucción de la serie histórica, [1], determina la serie histórica de nivel de agua en un punto conocido en base a registros históricos simultáneos de las variables, mediante el empleo de las conocidas como funciones estructurales (structure functions) o la simulación numérica en continuo. Una vez la serie de nivel es determinada, se realiza el pertinente análisis estadístico extremal de una única variable.

La gran ventaja de este método es que no es necesario realizar un análisis de dependencia específico entre las variables. Sin embargo, este método no se emplea a menudo debido a la carencia de series históricas coetáneas suficientemente largas de las variables involucradas. Además, el hecho de simular series temporales extensas puede llegar a ser inviable debido al elevado consumo computacional en caso de emplear modelos numéricos complejos.

En este artículo se plantea una nueva metodología para definir la peligrosidad por riesgo de inundación en estuarios y tramos de río afectados por marea. La metodología propuesta, descrita en el apartado 2, se basa conceptualmente en la descrita por [1] de simulación en continuo, pero aplicando mejoras como es el empleo de un modelo hidrodinámico bidimensional de alta resolución espacial y de series de datos sintéticas de 500 años de duración. Para poder definir la serie histórica de nivel con tiempos de cálculo computacional razonables se ha adaptado la metodología híbrida de [6], según la cual se reconstruye una serie histórica de una variable objetivo (predictando) en base a los resultados del modelado numérico de unos casos característicos previamente seleccionados combinación de la variable de partida (predictores). Así, la metodología propuesta se puede resumir en los siguientes pasos: 1) Definición de los predictores y la escala temporal; 2) Generación sintética de las series temporales históricas; 3) Selección de casos característicos combinación de los predictores elegidos; 4) Downscaling de los predictores en los casos seleccionados; 5) Simulación numérica mediante modelo bidimensional [3] de los casos seleccionados; 6) Reconstrucción de la serie temporal del nivel de agua en base a los resultados del modelo numérico. Con esta metodología se puede implementar fácilmente el efecto del aumento del nivel medio del mar debido al cambio climático, así como estudiar posibles escenarios futuros.

La metodología propuesta se aplica al caso real de Betanzos (ARPSI costera ES014-CO-12-01-03-C, ARPSI fluvial ES014-CO-12-01-01), dentro del apartado 3. Betanzos es una ciudad histórica, ubicada en la unión de río Mendo con el Mandeo, en la cola del estuario de Betanzos, la cual ha sufrido inundaciones de forma frecuente la mayoría asociadas a situación de mareas vivas.

Dentro del apartado 4, de discusión de resultados, se exponen los resultados obtenidos, se analizan los mismos y se comparan los resultados con los obtenidos mediante la metodología tradicional definida por la guía metodológica. Por último, el apartado 5 de conclusiones, en el cual se enmarcan las conclusiones obtenidas en el presente artículo.

## METODOLOGIA

La metodología propuesta en el presente artículo se basa en la reconstrucción de la serie histórica de nivel del mar (predictando) en base a series históricas coetáneas de las principales variables o dinámicas involucradas en los procesos de inundación (predictores). En ríos costeros y estuarios con meso y macro mareas, los predictores más comunes son el caudal del río, el nivel del mar, compuesto por la suma de la marea astronómica y meteorológica. Además, en pequeñas cuencas, con tiempos de concentración rápidos, la variación diaria del nivel del mar y del caudal debe ser tener en cuenta con el objetivo de caracterizar correctamente la probabilidad de ocurrencia simultánea del pico del hidrograma y de la pleamar o marea alta [19].

Por todo ello, a la hora de definir los predictores de inundación en zonas sometidas a diferentes dinámicas, es determinante conocer la escala temporal de las dinámicas y entender los procesos que dan lugar al desbordamiento del río y la consecuente inundación. En el norte de España con mareas vivas que pueden alcanzar los 4.50 metros, la dinámica asociada a la marea astronómica es mucho más determinante que la marea meteorológica, con valores máximos de 0.50 m, sin embargo en el litoral mediterráneo puede ocurrir lo contrario.

La metodología propuesta se puede estructurar en los siguientes puntos, ver figura 1:

- 1) Definición de los predictores a escala diaria. El caudal del río y el nivel del mar son dinámicas no estacionarias a lo largo del tiempo que pueden tener diferentes escalas temporales. El ciclo de marea astronómica en la mayoría de las zonas costeras es diurna o semidiurna, mientras que la duración del hidrograma de un río puede variar desde horas hasta varios días en función del tiempo de concentración de la cuenca vertiente del río. La metodología propuesta se ha planteado para escala temporal diaria, de tal forma que las series de datos de los diferentes predictores se definan de forma diaria. Así, el caudal de río se puede definir como el caudal medio, coincidiendo con la forma de medir en los aforos de forma tradicional, o máximo diario. El nivel del mar se puede caracterizar mediante la carrera de marea astronómica, desestimando la variación diaria de carrera de marea. En cuanto al surge se puede suponer constante a lo largo del día e incorporarlo como el máximo o medio diario. En cuanto al desfase temporal entre el caudal pico y la pleamar, dado que son independientes, se puede suponer un valor diario determinado de forma aleatoria.
- 2) Generación de serie de largo plazo de los predictores. El modelador debe encontrar el método más apropiado para generar las series sintéticas diarias de caudal y carrera de marea en la zona de estudio. Es conveniente el empleo de metodologías capaces de reproducir el marcado carácter estacional de cada una de las dinámicas. Destacar que pueden existir relaciones de dependencia entre alguna de las variables, las cuales deberán ser tenidas en cuenta a la hora de definir las series sintéticas. Se aconseja realizar de forma previa un análisis de dependencia de las diferentes variables. Aunque el análisis del efecto del aumento del nivel medio del mar debido al cambio climático no se considera en el presente artículo, comentar que su implementación resulta sencilla, bastaría con generar una serie sintética de nivel medio del mar en base a las predicciones del IPCC 2014.
- 3) Selección de casos característicos. En base a la serie sintética coetánea de los predictores generados en el apartado anterior, se seleccionan un reducido número de casos capaces de caracterizar de forma significativa la totalidad de las combinaciones posibles de predictores. Empleando técnicas de minería de datos, se escogen un número de casos que son capaces de extraer la máxima información de las series de predictores. En la actualidad existen diferentes técnicas o algoritmos de selección de datos como el K-means, los mapas auto-organizados (SOM) o el algoritmo de máxima disimilitud (MDA). Estos algoritmos están descritos en detalle por [6].
- 4) Downscaling de los predictores de los casos característicos. Teniendo en cuenta que tanto el hidrograma del río como el nivel del mar varían a lo largo del día, para ser capaces de determinar el nivel máximo del agua en la zona de estudio, se hace necesario realizar un modelo numérico no estacionario con valores minutas, Una resolución temporal de 10

minutos es suficiente para ser capaces de modelar la variabilidad temporal de las dinámicas de nivel del mar y caudal del río. En el caso de la carrera de marea es sencillo establecer una serie de nivel del mar en base al análisis armónico de la marea. Un hidrograma comúnmente empleado por su sencillez es el propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS), el cual únicamente depende de dos parámetros, el caudal pico ( $Q_p$ ) y el tiempo al tipo ( $T_p$ ). Existen en la literatura científica diversas formulaciones para determinar el tiempo al pico en función de diversos parámetros de cuenca, así como el cálculo del caudal pico en base al caudal medio diario [14], [11], [9].

- 5) Modelado numérico de los casos seleccionados. Los casos característicos definidos en el punto 3 son simulados con un modelo numérico hidrodinámico de alta resolución imponiendo como condiciones de contorno las variables en el punto 4. Es importante la elección de un modelo hidrodinámico capaz de simular de forma correcta la propagación de la onda de marea a lo largo del estuario y/o tramos de río. El predictando es el nivel de las aguas en cada uno de los puntos de control. La metodología puede ser empleada para definir otro tipo de predictandos como puede ser la velocidad del agua, necesaria para definir riesgos de inundación, para dimensionar estructuras o estudios de erosión. Comentar que, en el caso de la velocidad el punto de marea más desfavorable es la media-marea bajando, cuando el caudal de río se une con el vaciado del estuario, y además este momento se retrasa aguas arriba. Sin embargo, desde el punto de vista de nivel, el momento crítico es la pleamar. Esta puede ser otra razón para el empleo del desfase temporal como predictor.
- 6) Reconstrucción de las series de largo plazo del predictando. En base a los resultados de nivel de los casos característicos ejecutados con un modelo numérico de alta precisión, y las series de largo plazo de los predictores, mediante técnicas de interpolación multiparamétricas se reconstruye la totalidad de la serie temporal del predictando (nivel del agua en este caso). En el presente artículo se ha empleado la técnica de funciones de base radial (*Radial Basis Function, RBF*). Las funciones de base radial pueden presentar diferentes expresiones. Algunas de estas funciones radiales contienen un parámetro de forma que juega un papel muy importante en la precisión de la técnica [10]. El valor óptimo de este parámetro se obtiene a partir del algoritmo de propuesto por [27], ha sido empleado por [6] en oceanografía para reconstruir series de estados de mar en base a 5 predictores con resultados satisfactorios. Este mismo algoritmo es el empleado en el presente artículo.

---

## CASO DE ESTUDIO

### Descripción de la zona.

La metodología propuesta se ha aplicado a la ciudad costera de Betanzos, provincial de A Coruña (ver figura 2). Esta ciudad histórica está ubicada en la confluencia de los ríos Mandeo y Mendo, justo en la cola del estuario de Betanzos. El río Mandeo tiene una longitud aproximada de 55 Km y un área de cuenca de unos 456.9 Km<sup>2</sup>. El principal tributario o afluente de este río es el Mendo, con una longitud de 32.8 Km y un área de cuenca vertiente de 90.2 Km<sup>2</sup>. El estuario de Betanzos tiene una longitud aproximada de 7 Km y un ancho medio en torno a 1 Km, y se trata de un estuario meso y macreo mareal, con carreras de marea que varían en magnitud desde 1.50 m en mareas muertas hasta los 4.50 metros en mareas vivas. Esto supone un prisma de marea medio de 6.75 Km<sup>3</sup>, llegando a alcanzar valores de 12.25 Hm<sup>3</sup> en mareas vivas. El nivel del agua en la confluencia de los dos ríos está influenciado por la marea.

La ciudad de Betanzos ha sufrido problemas de inundaciones desde 1584 (PEPC 2002). La parte más baja del pueblo linda con las llanuras de inundación del río Mandeo sufre eventos de desbordamiento del cauce casi todos los años, en épocas de mareas vivas. Este riesgo de inundación debido a la elevada exposición ha sido potenciado durante el siglo XX debido a la canalización artificial del río aguas abajo de la unión, la construcción de la vía de tren que atraviesa de forma transversal la marisma y la ocupación de las marismas del río Mendo y su transformación en área industrial (ver figura 3). Todas estas presiones sobre la desembocadura de los ríos Mendo y Mandeo ha propiciado un aumento de la vulnerabilidad así como su peligrosidad, expresada en términos de probabilidad de inundación. Así, combinando la elevada exposición natural de la zona, con el aumento antrópico de la vulnerabilidad y la peligrosidad, hacen que se trate de una zona con un elevado riesgo de

inundación, además de una zona especialmente sensible a la elevación de nivel medio del mar debido a los efectos del cambio climático.

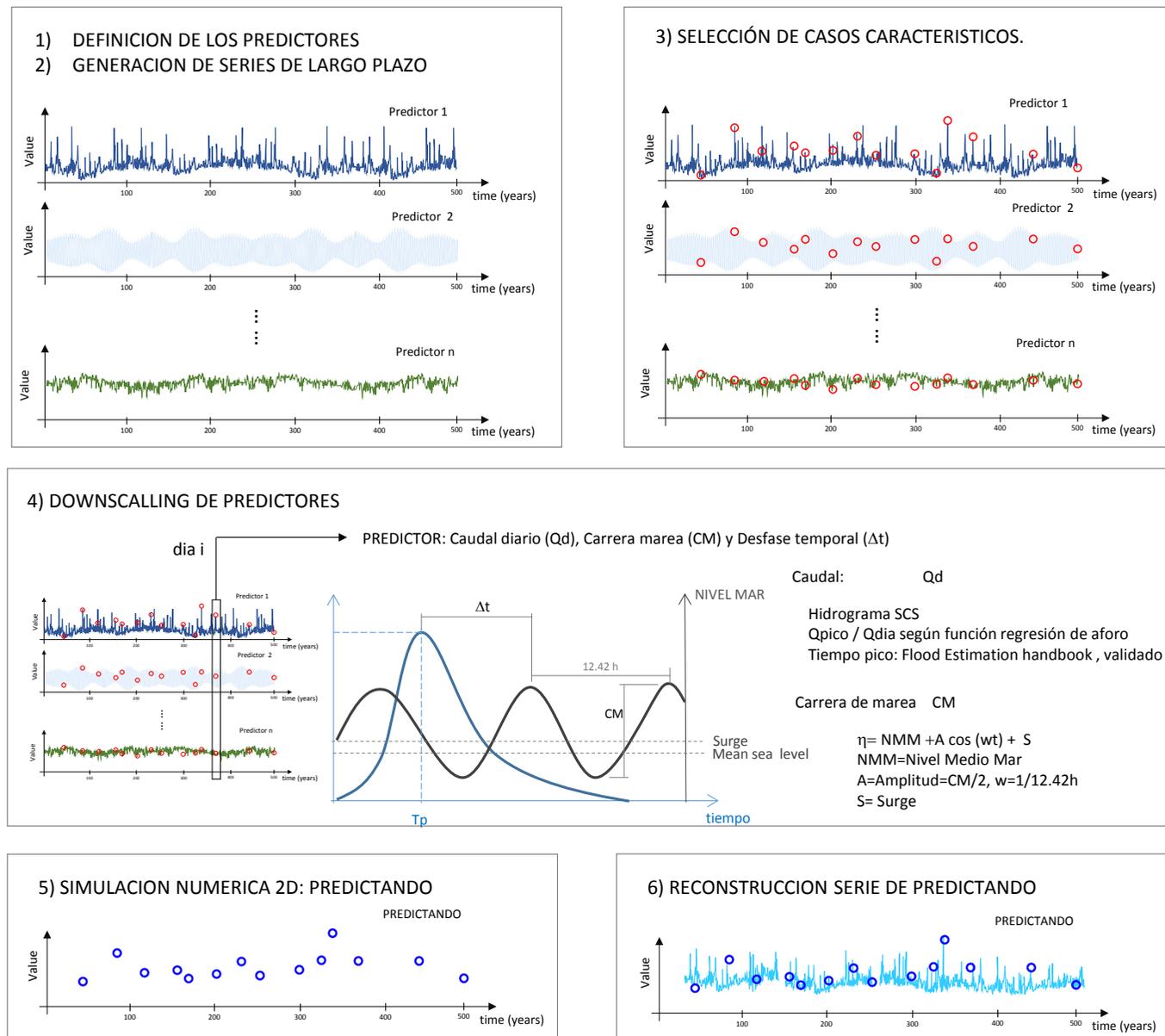


Figura 1 | Esquema conceptual de la metodología propuesta.

## Datos disponibles

El Puerto de A Coruña, ubicado cerca de la ciudad de Betanzos, dispone de un mareógrafo que registra datos de nivel del mar desde el año 1992. Dicho mareógrafo pertenece a la red REDMAR del Ente Público Puertos del Estado (OPPE). En el presente artículo se ha empleado las componentes armónicas de la marea astronómica, así como el residuo de nivel como marea meteorológica o surge extraído de un análisis llevado a cabo por [24].

En cuando a los caudales de los ríos, existen 2 estaciones de aforo. La primera se localiza en el río Mandeo, a unos 30 Km de la ciudad de Betanzos con una superficie de cuenca de 248.2 Km<sup>2</sup>, y una longitud de registro de caudal diario de 31 años, de los cuales, los últimos 8 años con valores de caudal instantáneo. Además, el río Mendo dispone de una estación de aforo, a escasos 10 Km de la ciudad de Betanzos, con un área de cuenca de 83.33 Km<sup>2</sup>. En este caso solo se dispone de una longitud de registro de 8 años, pero de caudal instantáneo.

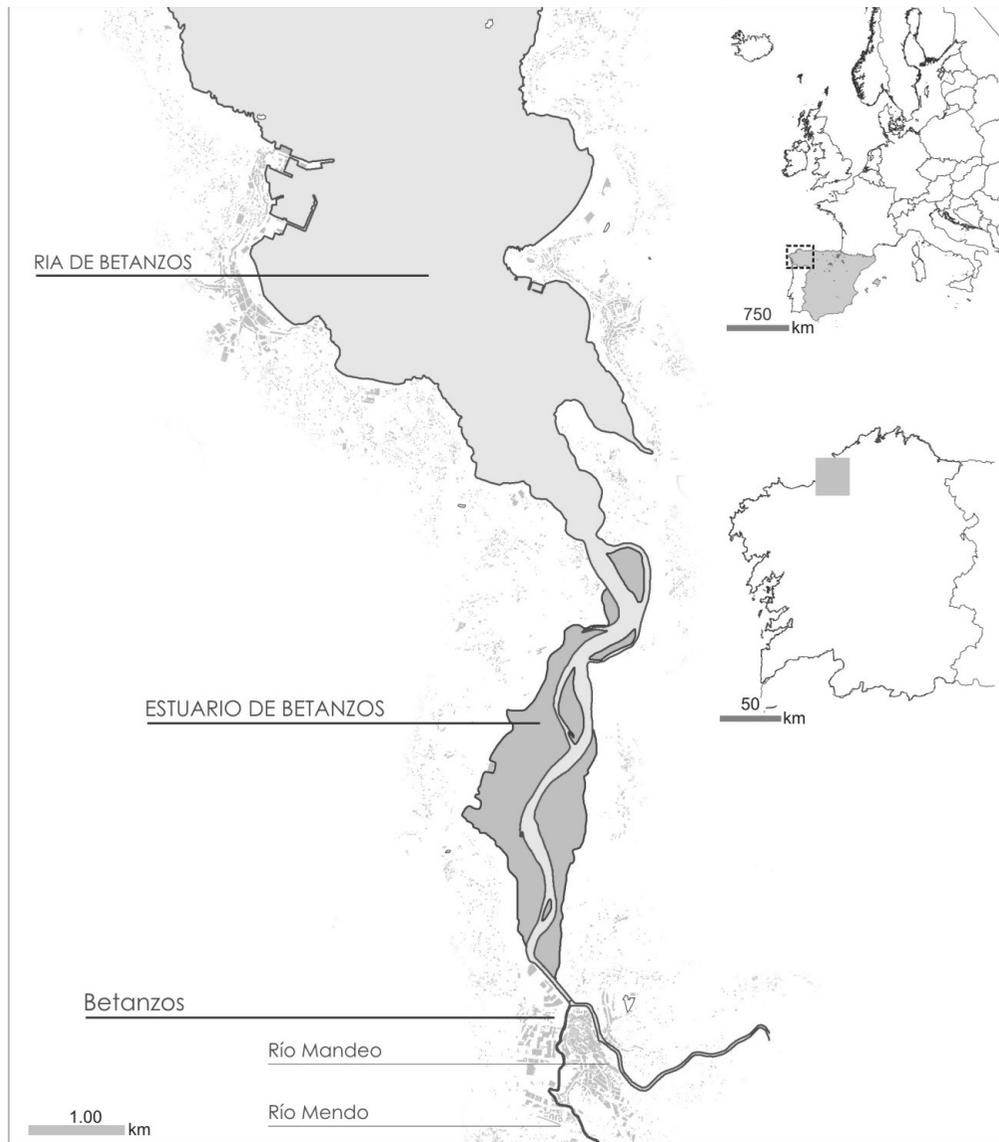


Figura 2 | Localización de la zona de estudio.

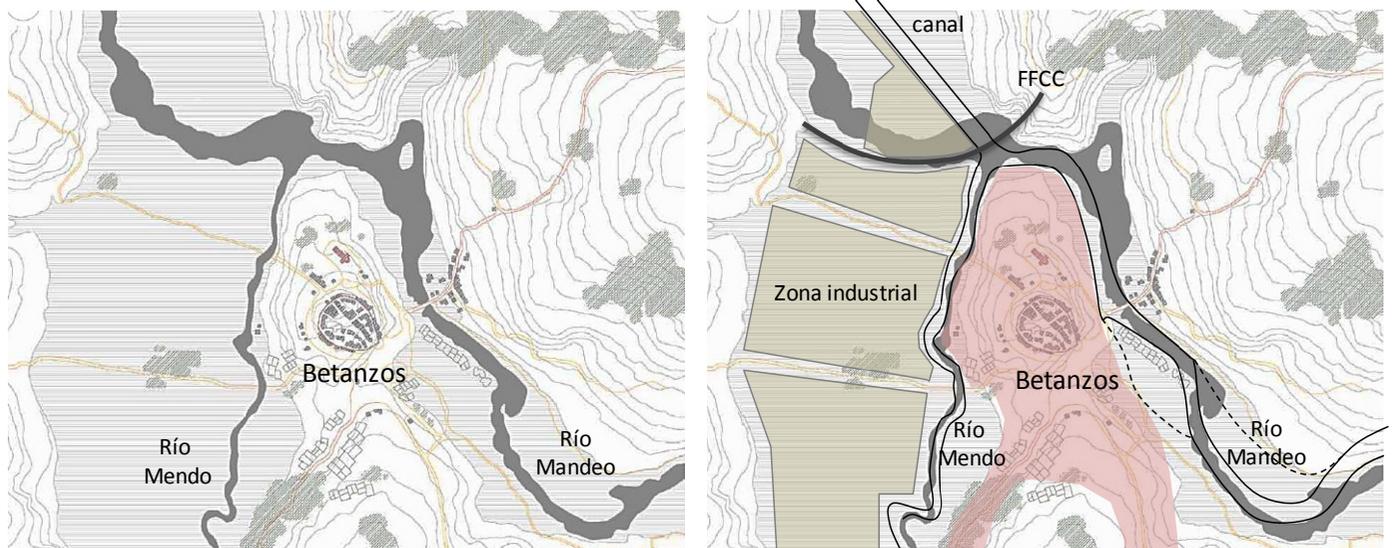


Figura 3 | Ciudad de Betanzos en el Siglo XIV, Colón (2012) y esquema conceptual de la situación actual en 2017.

## Generación de series de largo plazo.

Una de las principales limitaciones de la metodología de simulación continua de nivel, tal y como se explicó en la introducción, es la disponibilidad de series de datos lo suficientemente largas para que respondan una población estadísticamente representativa para poder hacer un correcto análisis de extremos. Por ello, para el presente trabajo se han generado series sintéticas de largo plazo, 500 años, con el objetivo de poder realizar un adecuado análisis extremal.

En este contexto, la marea astronómica se trata de una dinámica independiente y además tiene un carácter determinista, de tal forma que la serie se puede determinar en base a sus componentes armónicos. Así, la serie de marea astronómica se ha generado en base a las componentes armónicas del mareógrafo de A Coruña. con una resolución temporal de 10 minutos. En base a dicha serie, se ha determinado la serie diaria del predictor empleado, carrera de marea, restando de cada día el valor máximo y mínimo de nivel.

En cuanto a la marea meteorológica o “surge”, se puede afirmar que es independiente de la marea astronómica, sin embargo, puede tener cierta dependencia con el caudal del río si se tiene en cuenta que ambos tienen el mismo forzador, las bajas presiones. Por ello, se ha realizado un análisis de los valores diarios coetáneos de marea meteorológica y caudal del río entre los años 1993 y 2014. Entre las conclusiones obtenidas, se puede observar cierta estacionalidad tanto en el valor medio del surge, como en su variabilidad y en los caudales. Además, se ha observado que los máximos caudales anuales siempre tienen asociados valores de surge positivo e incluso mayor de 20 cm. Este efecto se comparó con los valores de caudal teniendo en cuenta un retraso del día entre el surge y al caudal máximo por efecto de los procesos de transformación lluvia - escorrentía. Se encontró que la dependencia entre el caudal máximo anual y el surge asociado es mayor cuando ambos ocurren el mismo día, coincidiendo con las conclusiones de [31].

Para realizar la serie sintética de surge se ha decidido tener en cuenta la comentada estacionalidad, de tal forma que se ha generado una serie de aleatoria de 500 años, en base a la distribución media gaussiana de los 21 años de datos disponibles, pero diferenciando por meses. Además, se le ha incluido una condición entre los caudales máximos anuales y el surge mediante una función de ajuste obtenida en base a los datos históricos. Para realizar un análisis más profundo de la acción surge caudal se puede emplear como predictor el forzador de ambas dinámicas, esto es, la situación sinóptica, como plantea [29]

La serie de caudal de los ríos se ha definido de forma sintética. El modelo empleado es capaz de reproducir series diarias sintéticas de caudal en los ríos de Galicia Costa en base a parámetros de lluvia y de cuenca. El modelo completo ha sido desarrollado por [20] y aplicado en los trabajos de Riesgo de Inundación e Galicia Costa siguiendo la directiva europea 2007/60/CE. El modelo se ha validado con 18 estaciones de aforos, con series de más de 10 años de duración, distribuidas a lo largo de todo Galicia Costa. Los parámetros que definen el modelo dependen de descriptores físicos de la cuenca: Precipitación media anual, área de cuenca, pendiente media y número de curva.

Para generar una serie de caudal coetánea entre el río Mendo y Mandeo, hay que tener en cuenta que las cuencas de ambos ríos son vecinas, sometidas a aguaceros similares, y por tanto no se pueden considerar independientes. De hecho, se puede considerar el Mendo con un afluente el Mandeo, justo antes de la desembocadura en el estuario.

Por otro lado la serie sintética de caudal no tiene la misma semilla, lo que impide generar series coetáneas. Por todo ello, en base a los 8 años de series históricas de caudal se ha establecido una relación según una función de ajuste. De esta forma la serie sintética de caudal del río mendo,  $Q_{Mendo}$ , se determina aplicando esta función de transferencia a la serie sintética del río Mandeo,  $Q_{Mandeo}$ , además se ha considerado oportuno añadir una función aleatoria de ruido,  $\xi$ , para suavizar la fuerte dependencia.

$$Q_{Mendo} = 0.4695 \cdot Q_{Mandeo}^{0.7148} + \xi$$

Teniendo en cuenta la escala espacial y temporal de las dinámicas, otro parámetro que puede influir en la probabilidad de inundación de este tipo de tramos de ría es el desfase entre el pico del hidrograma y el momento en el que se produce la pleamar. En este contexto, se ha decidido realizar un análisis de sensibilidad sobre la importancia relativa de este desfase temporal, para ello, con el modelo hidrodinámico construido se ha ejecutado varios casos para un mismo evento de caudal -

marea. Se han encontrado en los resultados diferencias de nivel superiores a 0.50 m para un caso de caudal extremo con mareas vivas. Para definir la serie sintética de este predictor, se ha generado una serie aleatoria entre 0 y 12.42 horas, frecuencia del armónico principal de la marea.

### **Selección de casos característicos.**

Para seleccionar los casos característicos se ha empleado al algoritmo de máxima disimilitud o MaxDiss (Maximum Dissimilarity selection algorithm) que permite la identificación de aquel subconjunto M con la mayor diversidad posible del total de la base de N datos [6]. Se puede decir que, el algoritmo es capaz de seleccionar los “N” casos, combinación de los predictores, más diferentes entre ellos. El algoritmo se ha aplicado a las series diarias de predictores seleccionados: Caudal diario del río, carrera de marea y desfase entre caudal pico y pleamar. Cada uno de los casos seleccionados se corresponde con un caso real, un día de la serie de los 500 años, combinación de los tres predictores empleados.

### **Downscaling de los predictores.**

Una vez seleccionados los casos característicos, el siguiente paso es modelizar numéricamente esos casos. Sin embargo, los valores diarios extraídos de las series sintéticas resultan insuficientes para definir de forma apropiada las inundaciones costeras dado que tiene una escala temporal mucho menor. Por ello, se realiza un “downscaling” a la hora de realizar el modelo numérico de inundación, de tal forma que, para definir las condiciones de contorno del modelo hidrodinámico 2D de alta resolución se pasa de la escala temporal diaria a escala minuter. De esta forma se consigue modelizar los 40 casos con una alta resolución espacial y temporal.

En el caso del caudal, se ha pasado de caudal diario a caudal máximo diario y aplicado en hidrograma unitario del SCS. La relación entre caudal diario y el máximo diario se ha obtenido de una función de regresión exponencial obtenida en base al registro de 8 años en el aforo. Para definir el hidrograma sintético del SCS es necesario disponer del caudal pico y del tiempo al pico. Para la obtención del tiempo al pico se ha realizado una comparativa de las formulaciones de [30], empleada en el Flood Stimulation Handbook, la de [34] y la [22], con datos de eventos reales obtenidos en la estación de aforo.

El hidrograma sintético ha sido comparado con eventos reales extraídos de la estación de aforo mostrando un buen ajuste, especialmente en la curva de ascenso.

En el caso del nivel del mar, bajar la escala temporal a minutos es más sencillo, se ha generado en base a la amplitud de la carrera de marea serie de nivel teniendo en cuenta la naturaleza armónica, con una amplitud igual a la mitad de la carrera de marea y una frecuencia de 12.42 horas correspondiente a la componente armónica M2. A esta serie se la ha sumado el nivel correspondiente a la marea meteorológica del caso seleccionado.

La figura 5 muestra el downscaling de un ejemplo de caso característico, definido por un caudal diario del río Mandeo y Mendo 189 y 19 m<sup>3</sup>/s respectivamente, lo que supone caudales pico de 351 y 33 m<sup>3</sup>/s, una carrera de marea de 1.28 metros y un desfase entre pico de hidrograma y pleamar de 11 horas.

### **Modelado numérico**

Los casos seleccionados han sido modelado con el software Iber [3], que resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales, también conocidas como ecuaciones de St. Venant 2D, usando un esquema no estructurado de volúmenes finitos. Los algoritmos implementados en el modelo han sido validados y aplicados por diversos autores en diferentes estudios hidrodinámicos y de inundación de ríos y estuarios [3], [4] y [8]

En la figura 4, se puede observar el dominio computacional empleado. Aunque el tramo de río objeto de estudio es de 1.3 Km de longitud, con el objeto de reproducir correctamente la propagación de la onda de marea y la totalidad del prisma de marea, ha sido necesario construir un modelo numérico de 10 Km de extensión, sacando la condición de contorno de nivel

hasta una profundidad suficiente. El dominio está formado por un total de 126.266 elementos con un tamaño medio de 11.5 metros, con un mallado en detalle de la zona urbana, llegando a tamaños de elemento menores de 1.0 m.

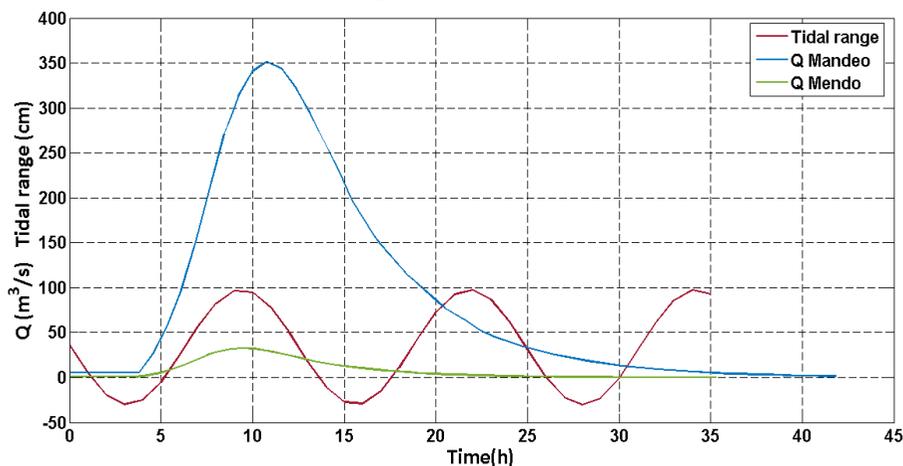


Figura 4 | Ejemplo de downscaling del caso característico ID30

Un modelo digital del terreno (MDT) de detalle ha sido empleado, resultado de la integración del LIDAR con trabajos de topo-batimetría de los ríos y del estuario. En cuanto a la rugosidad, seis valores de manning se han empleado en función del uso, desde 0.025 en el río hasta 0.15 en zonas residenciales.

El modelo ha sido ejecutado con los 40 casos característicos, teniendo en cuenta como condiciones de contorno aguas abajo el nivel del mar, extraído del downscaling, y aguas arriba los hidrogramas de los ríos Mendo y Mandeo. Se ha aplicado en cada caso el desfase temporal entre el pico del hidrograma y la pleamar correspondiente. Se ha empleado una ejecución en caliente para lo cual se calienta el modelo con 2 días de marea.

### Reconstrucción de la serie de nivel.

Una vez ejecutados los casos característicos, se extraen los resultados de nivel en cada uno de los puntos de control definidos a lo largo de la traza del río (ver Figura 5).

La reconstrucción de la serie de nivel máximo diario en cada punto de control se realiza mediante técnicas de interpolación en base a los resultados del modelo hidrodinámico de los casos seleccionados. En este caso, la técnica de interpolación empleada es la técnica basada en funciones de base radial (*Radial Basis Function - RBF*), muy adecuada para datos con una alta dimensionalidad y no distribuidos uniformemente [13].

Con la serie de nivel de largo plazo reconstruida es fácil realizar un análisis estadístico de extremos y determinar el nivel para diferentes periodos de retorno.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos con la metodología propuesta han sido comparados con la metodología que tradicionalmente se viene empleando en la ingeniería fluvial y recomendada por la “Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables”. Esta metodología, que denominamos “tradicional” o “estándar”, aconseja aplicar una condición de contorno de nivel correspondiente al mismo periodo de retorno que el de la avenida que se esté modelizando. Sin el empleo de una distribución conjunta no es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de estos escenarios tan conservadores.

En este contexto, para ser capaces de cuantificar el efecto de esta metodología, se han determinado los valores de nivel de inundación para tres periodos de retorno (2.33 años, 100 años y 500 años), siguiendo la metodología estándar y el mismo

modelo numérico. Como era de esperar, para un determinado periodo de retorno los niveles alcanzados son mayores con la metodología estándar respecto a la metodología propuesta (ver figura 6).

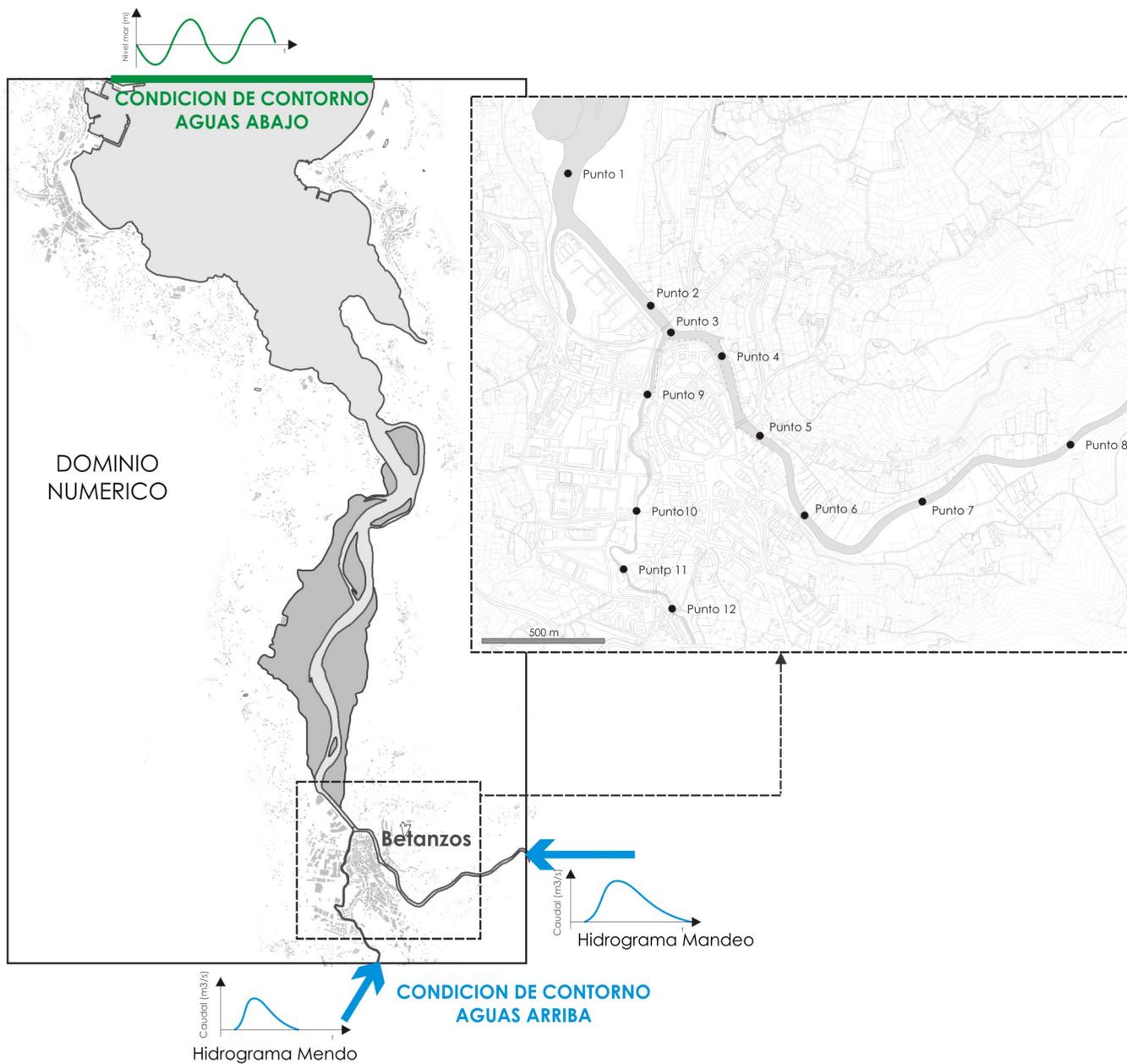
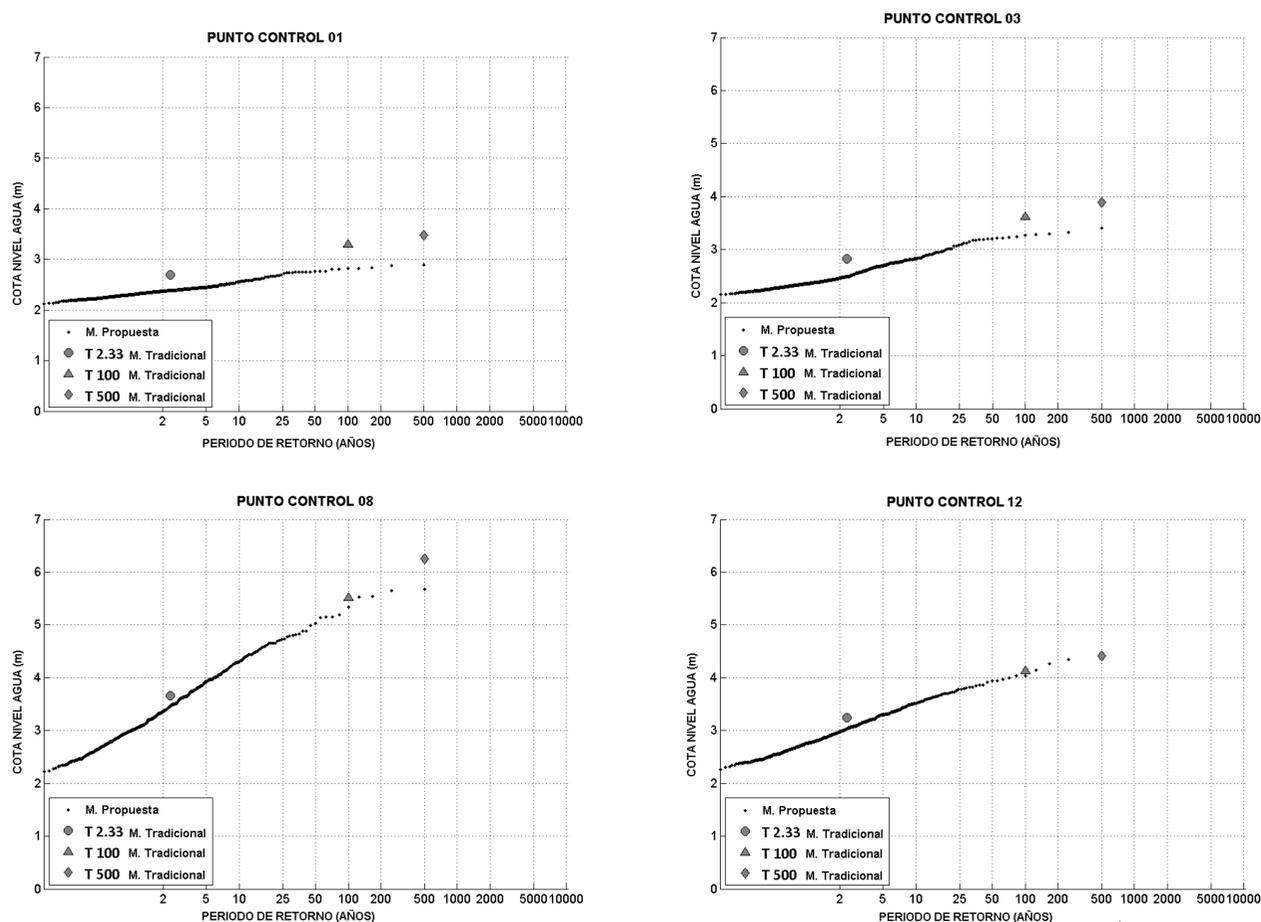


Figura 5 | Dominio Numérico y condiciones de contorno (izquierda). Puntos de control (derecha).

En la siguiente imagen se muestran los resultados en 4 puntos de control, el 1, el 3, el 8 y el 12. En base a estos resultados se han realizado dos comparativas. 1) Se han comparado los resultados de nivel para el mismo periodo de retorno, y 2) Se han contrastado los periodos de retorno para el mismo resultado de nivel, el resultado de la metodología estándar. De esta forma se puede establecer el periodo de retorno equivalente.



**Figura 6** | Resultados de nivel de agua para diferentes periodos de retorno en los puntos de control 1,3, 8 y 12 con la metodología propuesta. Comparativa con los periodos de retorno de 2.33, 100 y 500 años determinados con la metodología tradicional.

En la tabla 1, se muestran las diferencias de nivel encontradas a lo largo de todos los puntos de control para cada uno de los periodos de retorno. Se observa como los punto 1 y 2 tienen mayores diferencias que el resto y, además, esta diferencia disminuye aguas arriba. Esto se debe a que la influencia de la marea disminuye según los alejamos del mar. Según va desapareciendo la influencia de la marea, el nivel del agua se vuelve dependiente únicamente del caudal del río, y por tanto la metodología estándar y la tradicional convergen (ver Figura 7).

**Tabla 1** | Resultados de comparativa de nivel entre la metodología tradicional y la propuesta.

Metodología estandar (años)	Diferencia nivel metodología propuesta (m)											
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12
	Canal		Y	Río Mandeo					Río Mendo			
2.33	0.317	0.332	0.368	0.353	0.297	0.288	0.285	0.295	0.365	0.351	0.342	0.264
100	0.478	0.385	0.301	0.368	0.321	0.254	0.193	0.175	0.335	0.232	0.111	0.136
500	0.586	0.439	0.481	0.592	0.715	0.771	0.732	0.586	0.476	0.381	0.283	0.076

En el punto de control 1, el nivel del agua para el periodo de retorno de 2.33 años es de 2.70 metros (ver Figura 6), mientras que este mismo nivel aplicando la metodología propuesta tiene un periodo de retorno de 25 años. Se puede decir por tanto, que en el punto 1, el periodo de retorno equivalente al nivel de 2.33 años de la metodología tradicional es de 25 años. La V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

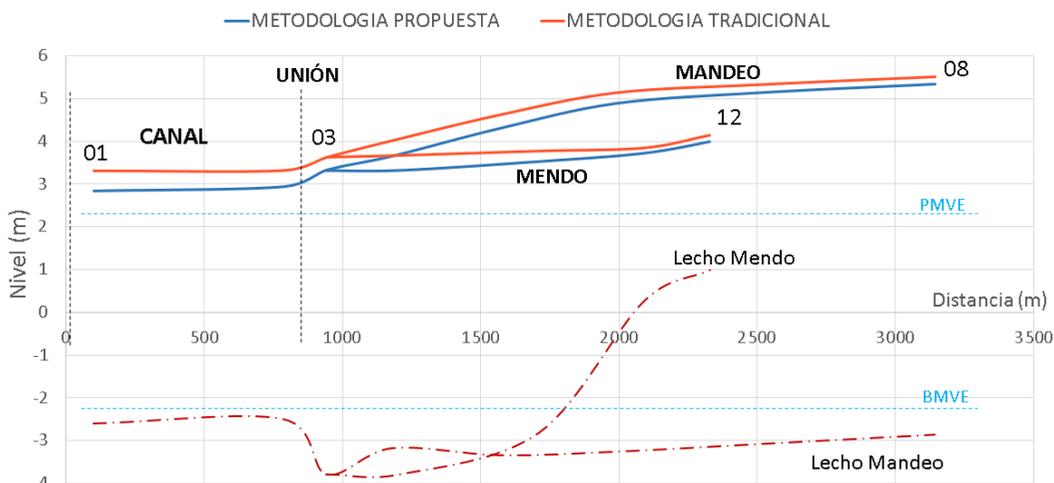
Tabla 2 muestra los resultados de este periodo de retorno equivalente en cada punto de control. Se observa que, como es lógico es diferente en cada punto y que disminuye aguas arriba de los ríos, debido a la disminución de la influencia de la marea tal y como se apuntó anteriormente. Además se observa que el periodo de retorno equivalente se dispara para valores de periodo de retorno alto, 100 y 500 años, debido a que la probabilidad de ocurrencia de dos o tres eventos extremos simultáneos, caudal de 100 años con mareas vivas y que coincida el pico del hidrograma con la pleamar, es altamente improbable.

**Tabla 2 |** Relación entre los periodos de retorno de la metodología estándar aplicando la metodología propuesta.

Metodología estándar (años)	Metodología propuesta (años)											
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12
	Canal		Y	Río Mandeo					Río Mendo			
2.33	25	15	10	6	4	3.5	3.5	3.5	10	6	6	4
100	>10000	>10000	5000	1500	700	500	300	200	6000	1000	400	120
500	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000	10000	3000	>10000	>10000	6000	600

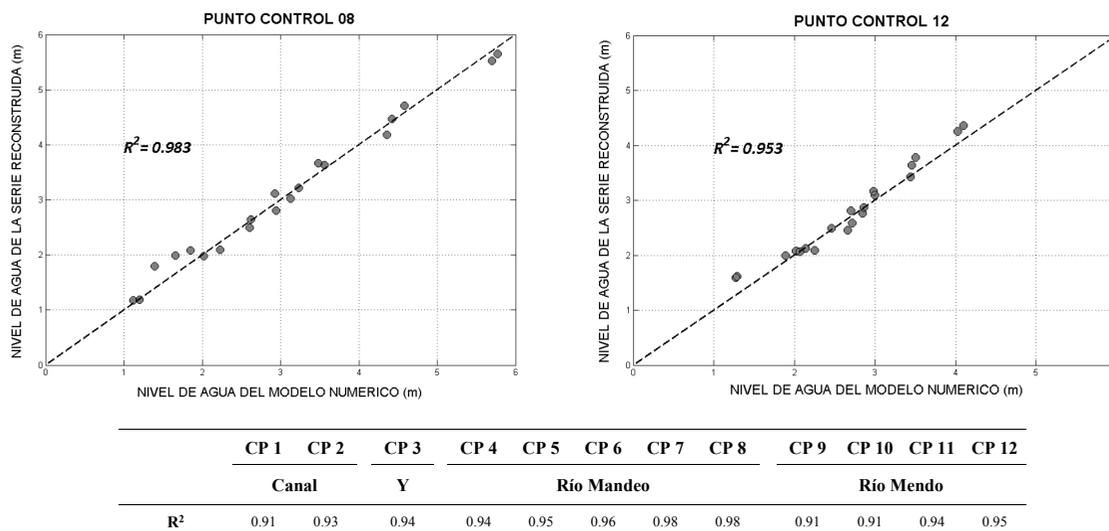
Un fenómeno interesante que se ha detectado con la metodología propuesta es que, empleando un modelo hidrodinámico de alta precisión, es capaz de detectar automáticamente la extensión de la influencia de la propagación de la onda de marea, y por tanto la importancia de la interacción entre el nivel del mar y el caudal del río en los niveles de inundación. La figura 9 muestra un perfil longitudinal de los resultados de nivel determinados con ambas metodologías. Se observa, además del efecto comentado de pérdida de la influencia de la marea aguas arriba, que la metodología propuesta es capaz de detectar fenómenos locales como la pérdida de carga en el estrechamiento del río, cuando los dos ríos se unen en el canal.

Sin la técnica de interpolación o reconstrucción de series, ejecutar el modelo numérico 2D en continuo durante 500 años (4.38 millones de horas), a día de hoy resulta inviable desde el punto de vista computacional. Por ello, la metodología propuesta se denomina también metodología híbrida porque, para reconstruir series de nivel de largo plazo, combina técnicas estadísticas de interpolación multiparamétricas, como la RBF, con modelado hidrodinámico de alta resolución (tamaños menores del orden de 1.0 metro en dominios de 10 Km) de un reducido número de casos. Por tanto, se puede decir que, los resultados están influenciados por la calidad del modelado numérico y de la técnica de reconstrucción de la serie.



**Figura 7 |** Perfil longitudinal de resultados de nivel para os 100 años de periodo de retorno determinados con la metodología tradicional y la metodología propuesta.

En este contexto, con el objetivo de validar la técnica de reconstrucción, se han seleccionado al azar 20 casos o días de las series de partida, y se ha realizado una comparativa entre los resultados de modelizar numéricamente estos casos y los resultados de la serie reconstruida esos mismos días. Los resultados obtenidos muestran un buen ajuste, con valores de  $R^2$  que varían entre 0.91 y 0.98 (ver Figura 8).



**Figura 8** Resultados de la comparación entre los valores de nivel de la serie reconstruida usando RBFy del modelo numérico en los puntos 8 (izquierda) y 12 (derecha)

## CONCLUSIONES

En el presente artículo se presenta una metodología para determinar inundaciones extremas en estuarios y tramos de río afectados por meso y macro mareas que combina por un lado, el modelado numérico no estacionario y bidimensional de alta resolución para ser capaces de reproducir con la mayor fidelidad posible los complejos procesos hidrodinámicos que se producen como combinación de las variables seleccionadas (predictores), con técnicas estadísticas de interpolación multivariable para ser capaces de reconstruir la totalidad de la serie de largo plazo de nivel de agua (predictando) en función de un reducido de casos característicos seleccionados de las series de largo plazo coetáneas de los predictores. Esta metodología es aplicable a tamaños de cuenca medio-bajos con tiempos de concentración de orden de horas, dado que la escala temporal definida es la diaria. En el caso de tamaños de cuencas mayores o menores (cuencas torrenciales) la escala temporal de las variables implicadas deben ser adaptadas de forma adecuada.

Aunque el método puede ser empleado con series de registros reales, una de las principales virtudes es su aplicación en series muy extensas. Por ello, esta metodología depende en gran medida en la capacidad del modelador de crear series sintéticas de los predictores lo más realistas posibles. También tienen relevancia la capacidad escoger correctamente los predictores así como realizar un correcto *downscaling*.

El empleo de un modelo bidimensional resulta un aspecto fundamental para ser capaces de reproducir de forma fidedigna la interacción entre las diferentes causas de inundación, en nuestro caso caudal del río y nivel de marea, así como los procesos de desbordamiento. No obstante, el coste computacional requerido por este tipo de modelos hace necesario el empleo de técnicas de reconstrucción en base a algoritmos de interpolación, para determinar la serie de largo plazo de nivel.

La metodología propuesta se ha aplicado a un caso real, la ciudad de Betanzos, ubicada en la cola de un estuario macromareal coincidiendo con la desembocadura de dos ríos, el Mandeo y el Mendo, catalogado como ARPSI fluvial ES014-CO-12-01 y ARPSI costera ES014-CO-12-01-03-C. Los predictores empleados han sido el caudal, la carrera de marea y el desfase temporal entre el pico el hidrograma y la pleamar. En este caso, se ha empleado la técnica de reconstrucción RBF y comprobado que reproduce correctamente una serie de 500 años diarios en base a 40 casos característicos. Para ello se han

comparado 20 datos de nivel de la serie reconstruida con el modelado numérico de dichos 20 casos, mostrando resultados satisfactorios (ajustes entre 0.91 y 0.98).

Los resultados obtenidos han sido comparados con la metodología que tradicionalmente se viene empleando en la ingeniería fluvial y recomendada por la “Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables”, que consiste en aplicar una condición de contorno de nivel correspondiente al mismo periodo de retorno que el de la avenida que se esté modelizando. Esta metodología ha servido de base a los organismos de cuenca para definir los Mapas de peligrosidad y riesgo de inundación para adaptarse a la Directiva 2007/60/CE relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.

La comparación muestra que la metodología tradicional tiende a sobreestimar, como era de esperar, el nivel de inundación, detectando que dicho efecto disminuye aguas arriba, debido a que se reduce la influencia de la marea. Se han comparado los niveles para los periodos de retorno de 2.33, 100 y 500 años estableciendo valores cuantitativos en cada punto a lo largo del tramo de río. Además, al resultado de nivel de la metodología tradicional, asociado a un periodo de retorno, se le ha asignado el periodo de retorno real, entendiendo como tal el resultante de aplicar la metodología tradicional a dicho nivel. Se observa que el periodo de retorno de 500 años definido según la metodología tradicional equivale a periodo de retorno superior a 10.000 años empleando la distribución conjunta.

Por todo ello, se puede afirmar que, como otros tipos de distribuciones conjuntas y aproximación de simulación continuas de nivel, la metodología propuesta produce resultados coherentes y más realistas que las metodología que se han usado de forma tradicional en los estudio de riesgo de inundación que consideran la ocurrencia simultanea de nivel del marea y caudal asociados a periodos de retorno asignados de forma arbitraria.

---

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su gratitud al departamento de Planificación Hidráulica de Aguas de Galicia, perteneciente a la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Xunta de Galicia, por los datos suministrados de los aforos, MDT y así como la serie sintética de caudales de la ARPSI fluvial ES014-CO-12-01. Además, agradecer al área de medio físico del Ente Público de Puertos del Estado, por los datos del mareógrafo del puerto de A Coruña.

---

## REFERENCIAS

- [1] Acreman, M. C. 1994. Assessing the joint probability of fluvial and tidal floods in the river-roding, *Journal Institution Water Environmental Manage.*, 8, 490–496. DOI: 10.1111/j.1747-6593.1994.tb01140.x
- [2] Archetti R, Bolognesi A, Casadio A and Maglionico, M. 2011. Development of flood probability charts for urban drainage network in coastal areas through a simplified joint assessment approach. *Hydrology Earth System Science.*, 15, 3115–3122. DOI: 10.5194/hess-15-3115-2011.
- [3] Bladé E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón E., Dolz J., Coll A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1) 1-10. DOI: 10.1016/j.rimni.2012.07.004.
- [4] Bodoque J- M, Amérigo M, Díez-Herrero A, García, J-A, Cortés B, Ballesteros-Cánovas J-A, Olcina J. 2016. Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology*, 541, 665-676. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.005.
- [5] Cai Y, Gouldby B, Hawkes P, Dunning P. 2008. Statistical simulation of flood variables: Incorporating short - term sequencing. *Journal of Flood Risk Management*, 1(1), 3-12. DOI: 10.1111/j.1753-318X.2008.00002.x

- [6] Camus P, Mendez F-J, Medina R. 2011a. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, Volume 58, Issue 9 (851-862). DOI 10.1016/j.coastaleng.2011.05.007
- [7] Camus P, Mendez F-J, Medina R, Cofiño A-S. 2011b. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*. 58, 453-462. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.02.003.
- [8] Cea L, Blade E. 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7), 5464–5486. DOI: 10.1002/2014WR016547.
- [9] Dastorani M-T, Afkhami H, Sharifidarani H, Dastorani M. 2010. Application of ANN and ANFIS Models on Dryland Precipitation Prediction (Case Study: Yazd in Central Iran). *Journal of Applied Sciences*, 10: 2387-2394. DOI: 10.3923/jas.2010.2387.2394
- [10] Duarte P, Alvarez-Salgado X-A, Fernández-Reiriz M-J, Piedra S, Labarta U. 2014. A modeling study on the hydrodynamics of a coastal embayment occupied by mussel farms (Ria de Ares-Betanzos, NW Iberian Peninsula). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 147, 42–55. DOI: 10.1016/j.ecss.2014.05.021
- [11] Ellis W-H, Gray D-M. 1966. Interrelationships between the peak instantaneous and average daily discharges of small prairie streams. *Canadian Agricultural Engineering*
- [12] Fasshauer G-E, Zhang J-G. 2007. *Numer Algor* 45: 345. DOI:10.1007/s11075-007-9072-8
- [13] Franke R. 1982. Scattered data interpolation: tests of some methods. *Math. of Comp.* 38, pp. 181–200. DOI: 10.1090/S0025-5718-1982-0637296-4
- [14] Fuller W-E. 1914. Flood Flows. *Trans. American Society of Civil Engineers* 77: 564- 617.
- [15] Gregory E. Fasshauer, Jack G. Zhang. “On choosing “optimal” shape parameters for RBF approximation”. *Numerical Algorithms*. August 2007, Volume 45, Issue 1, pp 345-368
- [16] Hawkes, P. J. & Tawn, J. A. (2000). Joint probability of waves and water levels: JOIN-SEA: A rigorous but practical new approach. *Internal Document No. SR 537, HR Wallingford with Lancaster University, UK*
- [17] Hawkes P-J, Gouldby B-P, Tawn J-A, Owen M-W. 2002. The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design, *Journal Hydraulic Research*, 40, 241–251. DOI: 10.1080/00221680209499940
- [18] Hawkes P-J. 2008. Joint probability analysis for estimation of extremes, *Journal of Hydraulic Research*, 46:S2, 246-256. DOI: 10.1080/00221686.2008.9521958.
- [19] Hughes, T.G. and Gorji-Bandpy, M ., (2001), "A new Joint Probability appraisal of flood risk", Proc. Instn. Civ. Engrs. Water, Maritime and Energy, Discussion, 148, pp.215-216.
- [20] IH Cantabria. 2014. Caracterización de hidrogramas asociados a eventos extremos en di versos puntos de la red fluvial de Galicia Costa. Departamento de planificación hidrológico de Aguas de Galicia. Xunta de Galicia.
- [21] Kennard R-W, Stone L-A. 1966. Computer aided design of experiments. *Technometrics* 11(1): 137-148. DOI: 10.2307/1266770.
- [22] Kirpich Z-P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering* 10 (6), 362.
- [23] Larson M, Hanson H. 2008. Implications of extreme waves and water levels in the southern Baltic Sea. *Journal of Hydraulic Research*, 46 (SUPPL. 2), pp. 292-302. DOI: 10.1080/00221686.2008.9521962.
- [24] Perez Gomez B. 2014. Design and implementation of an operational sea level monitoring and forecasting system for the Spanish coast. PhD Thesis, *University of Cantabria*.

- [25] Petroliaqkis T-I, Voukouvalas E, Disperati J, Bildot J. 2016. Joint Probabilities of Storm Surge, Significant Wave Height and River Discharge Components of Coastal Flooding Events. EUR 27824 EN. DOI:10.2788/677778.
- [26] Reed, D. W. (1999). Flood Estimation Handbook, Vol. 1: Overview. *Institute of Hydrology, Wallingford, UK*.
- [27] Shmuel Rippa, 1999. An algorithm for selecting a good value for the parameter  $c$  in radial basis function interpolation. *Advances in Computational Mathematics*. Volume 11, Issue 2–3, pp 193–210
- [28] Robson A, Reed R. 1999. Flood Estimation Handbook, vol. 3, Statistical Procedures for Flood Frequency Estimation, *Wallingford HydroSolutions, Wallingford, UK*.
- [29] Rueda, A., P. Camus, F. J. Mendez, A. Tomas, and A. Luceno (2016), An extreme value model for maximum wave heights based on weather types, *Journal. Geophys. Research. Oceans*, 121, doi:10.1002/2015JC010952.
- [30] Svensson C, Jones D-A, 2002. Dependence between extreme sea surge, river flow and precipitation in eastern Britain. *International Journal Climatology*, 22, 1149-1168. DOI: 10.1002/joc.794
- [31] Svensson, C. and Jones, D. A. 2004a. Dependence between sea surge, river flow & precipitation in south & west Britain. *Hydrology and Earth System Sciences.*, 8, 973–992.
- [32] Taguas E-V., Ayuso J-L, Pena A, Yuan Y, Sanchez M-C, Giraldez J-V, Perez R. 2008. Testing the Relationship between Instantaneous Peak Flow and Mean Daily Flow in a Mediterranean Area Southeast Spain. *Catena*, 75, 129–137. DOI: 10.1016/j.catena.2008.04.015
- [33] Teakle I, Gildas C. Khondker R, Breen M, McGarry D. 2005. Boundary conditions for estuarine flood modelling using joint probability analysis, *Proc. of Coasts and Ports: Coastal Living – Living Coast*, Australasian Conference, 613–619.
- [34] Temez J-R. 1991. Extended and improved Rational Method. *Proc. XXIV Congress of IAHR, Madrid, España*. Vol. A. pp 33-40.
- [35] Thieken A, Merz B, Kreibich H, Apel H. 2006. Methods for flood risk assessment: Concepts and challenges. *International Workshop on Flash Floods in Urban Areas. Muscat – Sultanate of Oman*.
- [36] Tomás, A., Méndez, F.J., Medina, R., Jaime, F.F., Higuera, P., Lara, J.L., Ortiz, M.D. and Álvarez de Eulate, M.F. (2015), A methodology to estimate wave-induced coastal flooding hazard maps in Spain. *Journal of Flood Risk Management*. doi: 10.1111/jfr3.12198
- [37] Van Gelder P-H-A-J-M, Vrijling J-K, Van Haarden D-H. 2004. Joint probability distribution for wave height, wind setup and wind speed. *29th Int. Coastal Engineering*, Lisbon, 1032-1046.
- [38] Van der Made, J-W. 1969. Design levels in the transition zone between the tidal reach and the river regime reach, *Hydrology of Deltas, Vol. 2 of Proceedings of the Bucharest Symposium*, May, 1969, 246–257.
- [39] Webster T, McGuigan K, Collins K, MacDonald C. 2014. Integrated River and Coastal Hydrodynamic Flood Risk Mapping of the LaHave River Estuary and Town of Bridgewater, Nova Scotia, Canada. *Water* 2014, 6, 517-546. DOI:10.3390/w6030517
- [40] While C-J. 2007. The use of joint probability analysis to predict flood frequency in estuaries and tidal rivers. *University of Southampton, School of Civil Engineering and the Environment*, Doctoral Thesis , 357pp
- [41] Zhong H, Van Overloop P-J, Van Gelder P.H.A.J.M. 2013. A joint probability approach using a 1-D hydrodynamic model for estimating high water level frequencies in the Lower Rhine Delta. *Natural Hazards Earth System Science*, 13, 1841–1852. DOI: 10.5194/nhess-13-1841-2013.