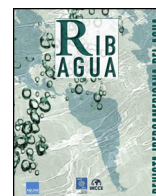




RIBAGUA

www.elsevier.es/ribagua



Jornadas de Puertos y Costas 2015

Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias



A. Toimil*, I.J. Losada y P. Camus

Instituto de Hidráulica Ambiental IH Cantabria, Universidad de Cantabria-Fundación IH, Santander, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 3 de febrero de 2016

Aceptado el 19 de julio de 2016

On-line el 6 de agosto de 2016

Palabras clave:

Cambio climático

Inundación costera

Escala regional

Alta resolución

Proyecciones

Aumento del nivel medio del mar

Defensas costeras

Calibración

R E S U M E N

Una de las principales amenazas para los sistemas costeros y las zonas bajas de todo el mundo es el incremento de los eventos de inundación debido a los efectos del cambio climático, fundamentalmente por el aumento del nivel medio del mar. Se presenta una metodología de análisis del impacto de inundación costera a escala regional —O (100 km)—, que combina bases de datos históricas y proyecciones de dinámicas marinas de alta resolución. La exposición se representa sobre un modelo digital de terreno de alta resolución mejorado a partir de la inclusión de las defensas costeras. La sobreelevación del nivel debida a la rotura del oleaje se calcula mediante la aplicación de una formulación semiempírica calibrada con datos de campo, y se adecua al interior de los puertos. Dicha sobreelevación alimenta un modelo hidrodinámico bidimensional eficiente que permite obtener la inundación en tierra. A través de escenarios que combinan proyecciones locales de aumento del nivel medio del mar, combinadas con eventos extremos, la metodología propuesta se ha aplicado en la costa del Principado de Asturias (España).

© 2016 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Methodology for the analysis of climate change on coastal flooding: Application to Asturias

A B S T R A C T

One of the main threats to coastal systems and low-lying areas around the world is increasing flooding due to the effects of climate change, mainly due to sea-level rise. A regional-scale —O (100 km)— methodology to analyze the impact of coastal flooding is herein presented. The procedure combines high-resolution historical databases and projections of marine dynamics. Exposure is well represented over a high-resolution digital terrain model deeply improved including coastal defences. An empirical parameterization of the run-up that results from wave breaking is calibrated with field data, and further improved to evaluate flooding in ports. Such run-up feeds an efficient two-dimensional hydrodynamic model that allows the characterization of the inundation inland. Using scenarios that combine regional projections of sea-level rise with extreme events, the proposed methodology has been applied to the coast of Asturias (North of Spain).

© 2016 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Muchas veces nos referimos a la inundación costera como a la superación de un determinado nivel del mar al que usualmente

llegan las aguas, generando daños sobre los sistemas socioeconómico y natural. Esto responde a eventos extremos de inundación, que ocurren debido a la interacción de varios factores y tras los cuales el nivel de las aguas vuelve a su situación habitual. Sin embargo, la subida del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático implica la inundación permanente de terrenos, especialmente de zonas bajas de la costa, quedando estas anegadas y perdiéndose así su uso. Debido a esta doble dimensión del problema, el impacto de inundación debe estudiarse considerando la

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: alexandra.toimil@unican.es (A. Toimil).

inundación permanente debida al aumento del nivel medio del mar y la inundación potencial a causa de eventos extremos [1].

La inundación costera depende esencialmente del oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica, además del ya evidente aumento del nivel medio del mar. Dependiendo de la localización de la zona de estudio, no obstante, puede ser necesario tener en cuenta las dinámicas continentales, precipitación y caudal. La forma de abordar la caracterización de este impacto está condicionada por diversos factores: la región de estudio, los datos disponibles, el tipo de análisis requerido, el presupuesto y el tiempo.

- La región de estudio: cada escala espacial requiere un tratamiento distinto. El coste computacional puede variar significativamente si la simulación de eventos debe realizarse a escala global, regional o local.
- Los datos disponibles: la resolución de la topografía y de la batimetría desempeña un papel decisivo tanto en la elección del esquema numérico a emplear como en la calidad de los resultados.
- El tipo de análisis requerido: dependiendo de si se requiere un análisis estadístico del riesgo de inundaciones o, por el contrario, únicamente deben simularse una serie de eventos históricos, el coste computacional conducirá a una estrategia específica para transferir nivel del mar o caudal a tierra.
- Presupuesto y tiempo: los costes y plazos tienen gran influencia en las decisiones de planificación.

Estos factores condicionan la estrategia a seguir para el estudio de la inundación costera, los modelos numéricos a utilizar y su aplicación.

El resto del artículo se estructura del siguiente modo: la sección 2 presenta una revisión de los distintos métodos existentes para el estudio de la inundación costera; la sección 3 introduce la zona en la que se ha realizado el estudio; la sección 4 detalla el análisis del impacto en el contexto del riesgo, partiendo de una caracterización de la peligrosidad y exposición de alta resolución, describiendo el modelado de alta resolución del impacto (mallas de cálculo, calibración y análisis de sensibilidad) y finalmente definiendo los escenarios de cambio climático a ensayar; la sección 5 muestra los resultados obtenidos; y, por último, en la sección 6, se extraen las principales conclusiones y se trazan futuras líneas de investigación.

2. Estrategias metodológicas de inundación costera

Como se ha indicado en la *Introducción*, los principales elementos impulsores de la inundación costera son la marea meteorológica (MM), la marea astronómica (MA), el oleaje en forma de remonte (Ru) y el aumento del nivel medio del mar (ANMM). Estas variables se combinan dando lugar a la llamada cota de inundación (CI), que es el nivel que alcanza el mar cuando se produce un evento de inundación:

$$CI = MM + MA + Ru + ANMM$$

La mayor complejidad viene dada por la contribución del oleaje. Cuando este se propaga hacia la costa genera un aumento del nivel del mar (remonte) del que se distinguen 2 componentes: la sobreelevación del nivel debida a la transferencia de flujo de momento del oleaje a la columna de agua durante el proceso de rotura de las olas (sobreelevación por rotura) y el recorrido vertical de la salpicadura de la ola al romper (ascenso-descenso) debido a la onda corta y a la infragravitatoria. El remonte debido a la rotura del oleaje puede aproximarse mediante formulaciones semiempíricas en función de las condiciones de oleaje, o a través del uso de modelos numéricos

capaces de simular la hidrodinámica de rompientes con elevado coste computacional, limitando la escala espacial de aplicabilidad.

La escala del estudio condiciona en gran medida la estrategia de inundación a seguir. Se pueden distinguir 3 escalas: global/continental, regional —O (10-100 km)— y local —O (10-100 m)—. Paralelamente a la escala espacial, es necesario tener en cuenta la resolución de los datos disponibles, tanto de las dinámicas generadoras de la inundación (peligrosidad) como de los datos de exposición (ligados a las características físicas del entorno). Por tanto, debe existir coherencia y homogeneidad entre las diferentes fuentes de información, la escala de la zona de estudio y el tipo de análisis a realizar.

A escala global/continental se emplean fundamentalmente 2 aproximaciones. La más sencilla está basada en un índice que engloba la peligrosidad y la exposición, y categoriza el impacto de inundación en diferentes niveles de severidad. Este índice puede estar compuesto a su vez por diversos indicadores que contengan información sobre la magnitud de la peligrosidad, la influencia de las diferentes dinámicas y las características topográficas y rugosidad del terreno (pendiente, tipo de costa). La segunda aproximación requiere la disponibilidad de un modelo digital del terreno (MDT) con una resolución mínima deseable del orden de los 30-60 m para la caracterización de la exposición. La inundación se obtiene mediante la intersección de la cota que alcanza el nivel del mar (originado por diferentes dinámicas) con el MDT (método *Bathtub*, el volumen de agua que entra en el dominio es infinito y todo el terreno por debajo de un determinado nivel queda inundado).

El estudio de la inundación a escala tanto regional como local implica una caracterización de la misma a una alta definición, y requiere la disponibilidad de las dinámicas a alta resolución (fig. 1). El MDT debe tener una resolución horizontal del orden de 5 m, aunque en el caso de tratarse de un análisis a escala local lo óptimo es que proporcione un dato de elevación cada 1-2 m, y una resolución vertical inferior al nivel de los eventos extremos característicos. Se pueden diferenciar 3 estrategias distintas (fig. 2). La diferencia entre las estrategias A y B (B1-B2) radica en el modelo numérico utilizado para la estimación de la extensión y cota de inundación. En la estrategia A se utilizan modelos numéricos complejos que resuelven las componentes de la sobreelevación del nivel del mar debido a la rotura del oleaje de forma muy precisa. La inundación se determina a partir de la intersección de la cota de inundación, definido a partir de todos sus componentes, con el MDT. En el caso de las estrategias tipo B, la inundación en tierra se simula mediante un modelo de inundación 2D que puede estar forzado por dinámicas costeras

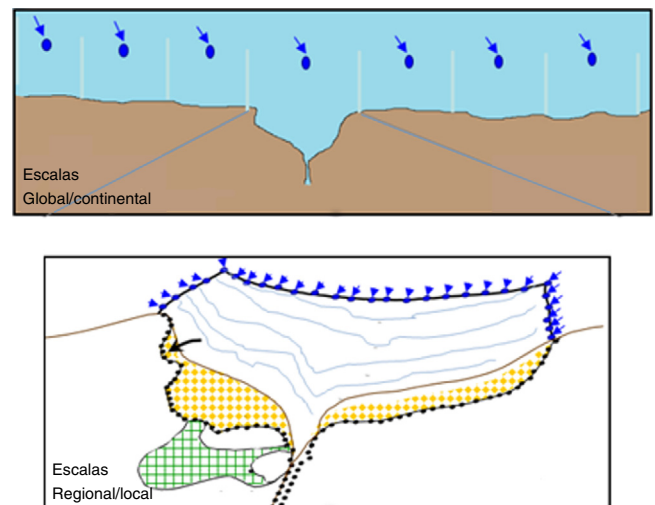


Figura 1. Escala espacial del estudio de inundación. Los puntos azules corresponden a las dinámicas marinas.

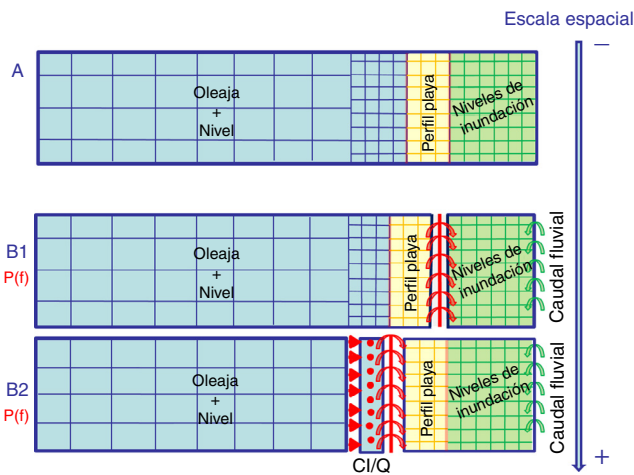


Figura 2. Estrategias numéricas para el estudio de la inundación a escala regional/local.

(nivel del mar total o caudal de rebase) y dinámicas continentales (precipitación, escorrentía o caudal fluvial). El grado de definición de la condición de contorno marina diferencia las 2 versiones de la estrategia B. La estrategia B1 requiere modelos numéricos para la simulación de la sobre-elevación del nivel debido a la rotura del oleaje o del caudal de rebase. En la estrategia B2 se aplican fórmulas semiempíricas para la definición de esta condición de contorno [2,3].

Durante estos últimos años se han desarrollado diferentes tipos de modelos numéricos para la simulación de la zona de rompientes con diferente grado de complejidad según las ecuaciones que resuelven [4–7]. Los más sofisticados requieren un elevado coste computacional, presentan problemas de inestabilidad y su versión 2DV más asequible conlleva cierta incertidumbre en la determinación de la extensión superficial de la inundación. Otros modelos que resuelven las ondas infragravitatorias permiten obtener la parte del remonte asociado a este tipo de ondas con un tiempo de computación aceptable [8,9]. En cuanto a los modelos de inundación en tierra, también existe una gama amplia de modelos que resuelven el fenómeno de inundación con diferente grado de aproximación [10–13], y por tanto, de esfuerzo computacional.

Por otro lado, la estrategia a aplicar está condicionada por el análisis que se quiera realizar, pudiendo distinguir fundamentalmente 2 tipos: forense, limitado a una serie de eventos históricos, o análisis probabilístico. El análisis probabilístico requiere la disponibilidad de datos históricos de las condiciones meteo-océano-hidrológicas que generan la inundación, y admite distintos tipos de caracterización estadística: unidimensional [14] o multidimensional [15] de las condiciones, o de la aplicación de un generador estocástico para aumentar la población de eventos extremos [16]. Además este análisis se puede realizar sobre las condiciones generadoras de la inundación [17], o sobre el impacto teniendo en cuenta la combinación de las diferentes dinámicas [18]. En este último caso, la estrategia numérica elegida debe permitir la simulación de un elevado número de condiciones dinámicas con un tiempo de computación asequible. Por tanto, la estrategia A está limitada a un análisis forense de la inundación, mientras que las estrategias B1 y B2 permiten un análisis probabilístico si los modelos elegidos para resolver la hidrodinámica del oleaje y de la inundación en tierra conllevan un esfuerzo computacional aceptable.

Bajo la perspectiva de la amenaza que supone el cambio climático, y que ya está empezando a materializarse, este artículo presenta una metodología a escala regional que sigue la estrategia de inundación B2. Esta metodología requiere fundamentalmente: a) bases de datos de dinámicas marinas y un MDT de alta

resolución; b) la obtención de la sobre-elevación del nivel debido a la rotura del oleaje mediante la aplicación de una formulación semiempírica debidamente calibrada para la reconstrucción de la condición de contorno marina (CI); y c) la caracterización de la inundación en tierra mediante el empleo de un modelo hidrodinámico bidimensional eficiente que tiene en cuenta la topografía subyacente y es sensible a la rugosidad de Manning.

3. Área de estudio

La aplicación de la metodología propuesta se ha llevado a cabo en la costa del Principado de Asturias, bañada por el Mar Cantábrico y limítrofe al Oeste con Galicia y al Este con Cantabria. El litoral asturiano cuenta con 345 km de costa rectilínea y alargada, con una fuerte pendiente al mar, abundantes acantilados, pocas playas y rías pequeñas. Los oleajes más energéticos que llegan a la franja costera asturiana provienen de una dirección comprendida entre los sectores Noroeste (NO) y Nornoroeste (NNO), y se caracterizan por alturas de ola significante superiores a los 10 m y periodos pico de hasta 20 seg.

Durante los meses de invierno de 2013-2014 una sucesión de fuertes temporales marítimos alcanzó la costa de la cornisa cantábrica causando graves daños. El impacto de estos oleajes tan intensos (de hasta 25 años de periodo de retorno en algunos puntos de la costa asturiana) sobre los distintos elementos del litoral provocó importantes daños estructurales en puertos y en el frente costero, numerosas inundaciones y grandes erosiones en playas debido a su combinación con pleamares importantes y periodos del oleaje excepcionalmente largos. Las localidades asturianas de Luanco y Tazones fueron 2 de las más afectadas, registrando numerosos desperfectos tanto en edificios como en mobiliario urbano. El Puerto de Candás perdió 19 embarcaciones y las inundaciones en playas como Vidiago y Santa Marina, entre otras, ocasionaron perjuicios en viviendas y establecimientos próximos.

En la figura 3 se muestra la situación del Principado de Asturias, así como las localidades a las que se hace referencia a lo largo del artículo.

4. Análisis del impacto en el contexto del riesgo

El análisis del riesgo que se plantea está enmarcado dentro de una metodología más general de riesgo adoptada por el IPCC [1], en la que el riesgo se define como la probabilidad de un evento y sus consecuencias negativas, como resultado de la combinación de *peligrosidad* (P), definida a través de las dinámicas marinas, *exposición*

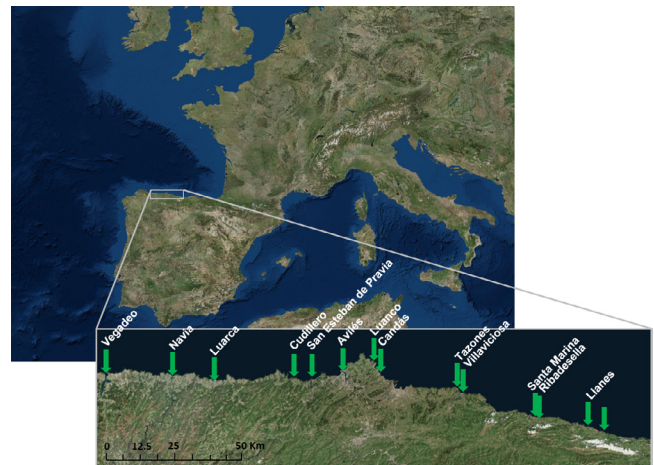


Figura 3. Situación del área de estudio y de las localidades que aparecen a lo largo del artículo.

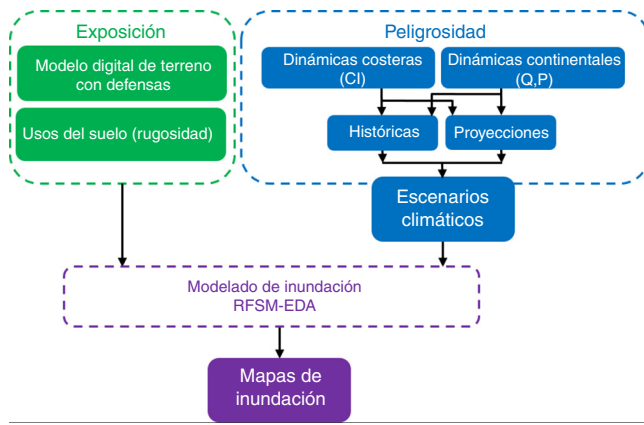


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

(E), asociada al medio físico, y *vulnerabilidad* (V), ligada a las características socioeconómicas de la zona ($R = P \cdot E \cdot V$). De este modo, si alguno de estos factores aumenta, también lo hará el riesgo.

La metodología de análisis de la inundación propuesta (fig. 4) se centra específicamente en el modelado del impacto, a partir de datos de exposición y peligrosidad de alta resolución.

5. Peligrosidad y exposición

5.1. Bases de datos

El primer paso para obtener la cota de inundación es la recopilación de bases de datos de peligrosidad (dinámicas marinas y continentales) y exposición (información topográfica y de usos del suelo) de alta calidad.

En este estudio se ha contado con bases de datos históricas de reanálisis de alta resolución de oleaje en costa (DOW [19]) y marea meteorológica (GOS [20]), la reconstrucción histórica de la marea astronómica (GOT) y los caudales medios anuales registrados en las estaciones de aforo del CEDEX [22].

Para una buena caracterización de la exposición es fundamental definir adecuadamente los elementos que configuran la costa y que ejercen de sistema de protección frente a inundaciones y erosiones, muy especialmente las defensas costeras. Se ha empleado un MDT del Instituto Geográfico Nacional [23] basado en datos LIDAR de $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ de resolución horizontal en el que se ha incluido: a) las defensas costeras, digitalizadas a partir de planos, con el fin de mejorar la definición de las infraestructuras portuarias; b) la cota de los encauzamientos de las principales rías asturianas; y c) una línea de costa de alta resolución que se ajusta perfectamente a la orografía del territorio, y con un criterio homogéneo de bajar para cada una de las playas. Finalmente, se ha hecho uso de la base de datos

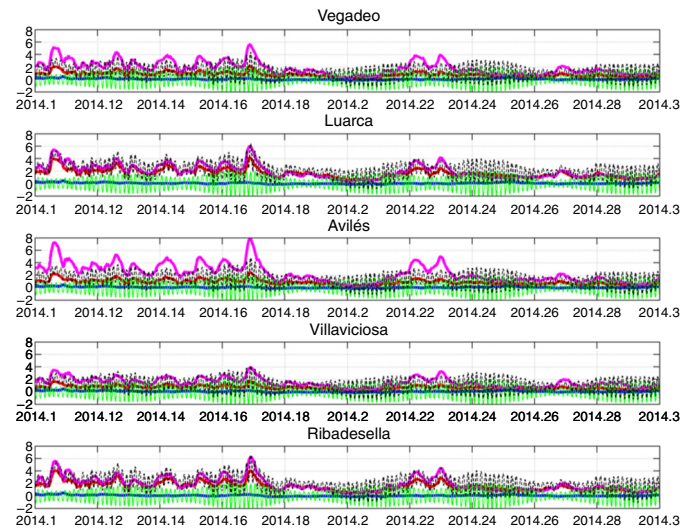


Figura 5. Reconstrucción histórica de la serie temporal de CI en el periodo de enero a marzo de 2014 en puntos cercanos a la costa de Vegadeo, Luear, Avilés, Villaviciosa y Ribadesella. La línea azul corresponde a la MM, la línea verde a la MA, la línea roja a la Ru, la línea magenta al Ru y la línea negra punteada a la CI.

Corine Land Cover [23] de resolución $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ procesada para trabajar con celdas de $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ para inferir el coeficiente de rugosidad de Manning en cada una de las celdas del MDT a través de los usos del suelo.

La tabla 1 muestra una relación de las bases de datos de peligrosidad y exposición empleadas y su descripción.

5.2. Reconstrucción de la cota de inundación

Las bases de datos históricas de alta resolución de oleaje y MM, así como la reconstrucción de la MA, han posibilitado obtener la serie histórica de CI a lo largo de la costa del Principado de Asturias con una resolución de 500 m . La contribución de oleaje (Ru) se ha determinado mediante la formulación de Stockdon et al. [2]. La figura 5 muestra la reconstrucción de la serie de CI, así como de cada uno de sus componentes de forma independiente, en el periodo de enero a marzo de 2014.

La reconstrucción de la serie histórica completa de la CI ha permitido caracterizar sus regímenes medio y extremal, obteniendo estadísticos significativos, como cuantiles de CI de elevado periodo de retorno, causantes de los eventos extremos de inundación. En la figura 6 se muestra la distribución espacial de la CI de 100 años de periodo de retorno, cuyo valor oscila entre 4 y $7,9\text{ m}$, a lo largo del litoral del Principado de Asturias. La alta resolución a la que se ha determinado esta CI muestra una gran variabilidad debida

Tabla 1
Resumen de las bases de datos empleadas

Información	Descripción	Fuente	Resolución
Oleaje	Base de datos <i>Downscaled Ocean Waves</i> (DOW). Registros horarios desde 1948 hasta la actualidad	IHCantabria DOW ¹⁹	$0,01^\circ$ ($\sim 1\text{ km}$)
Marea Meteorológica	Base de datos <i>Global Ocean Surge</i> (GOS) Registros horarios desde 1948 hasta la actualidad	IHCantabria GOS ²⁰	$0,125^\circ$ ($\sim 14\text{ km}$)
Marea astronómica	Base de datos <i>Global Ocean Tides</i> (GOT) Reconstrucción horaria con componentes armónicas del modelo TPXO	IHCantabria GOT ²¹	$0,25^\circ$ ($\sim 28\text{ km}$)
Caudal medio	Estaciones de aforo del CEDEX Caudal medio anual	CEDEX ²²	
Datos de elevación	Modelo digital de terreno basado en datos LIDAR (2012) Defensas portuarias y encauzamientos digitalizados a partir de planos proporcionados por el gobierno del Principado de Asturias Línea de costa digitalizada	IGN ²³	$5\text{ m} \times 5\text{ m}$
Usos del suelo	Base de datos <i>Corine Land Cover</i> (2006)	IGN ²³	$100\text{ m} \times 100\text{ m}$ procesado a $5\text{ m} \times 5\text{ m}$

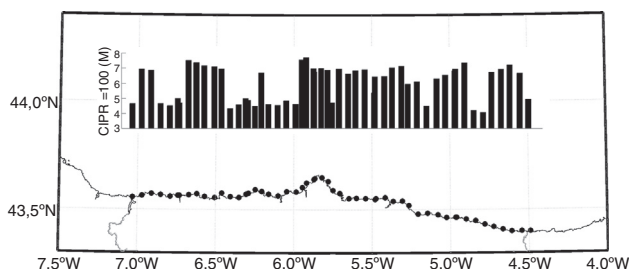


Figura 6. Cota de inundación (m) correspondiente a 100 años de periodo de retorno (para una mejor visualización se ha reducido la densidad de puntos representando uno de cada 10).

fundamentalmente a efectos batimétricos y a la orientación de la costa.

5.3. Caudal fluvial

Por no disponer de datos suficientes para realizar una combinación estadística adecuada del caudal y de la CI, se ha implementado un caudal medio constante en los cauces de las principales rías asturianas obtenido a partir de datos históricos medidos.

6. Modelado de inundación

El uso de modelos hidrodinámicos para el análisis de inundaciones se remonta a los años 60; no obstante, hasta la última década, sus aplicaciones han sido limitadas por la escasez de datos topográficos y los altos recursos computacionales requeridos. Hoy en día existe una amplia gama de modelos de inundación disponibles en la literatura que representan una herramienta fundamental en la gestión de los riesgos de inundación [10–13]. El modelo de inundación utilizado es *Rapid Flood Spreading Method–Explicit Diffusion wave with Acceleration term*, un modelo hidrodinámico bidimensional altamente eficiente [13] que emplea el método de almacenamiento de celdas, y que cuenta con la topografía como subelemento de la malla computacional. Se basa en la aproximación difusiva de las *Shallow Water Equations*, e incorpora el término adicional de la inercia local, lo que proporciona mayor estabilidad y menores tiempos de ejecución [24].

7. Mallas de cálculo

El modelo de inundación escogido permite la implementación de distintas fuentes de descarga (por ejemplo CI, caudal de rebase, precipitación local, caudal fluvial) y es sensible a la rugosidad de Manning.

La malla computacional que utiliza *Rapid Flood Spreading Method–Explicit Diffusion wave with Acceleration term* está formada por *Impact Zones* (IZ), una serie de polígonos irregulares, y tiene como subelemento la propia topografía, por ello la importancia de contar con un MDT de alta calidad. Cada una de las IZ está a su vez compuesta por celdas (llamadas *Impact Cells*) que drenan al mismo punto bajo. Las interfaces entre IZ son crestas topográficas o puntos altos, y la cota más baja de cada interfaz entre IZ corresponde al punto a través del cual el agua fluye entre celdas.

La costa del Principado de Asturias tiene una longitud de casi 350 km, lo cual imposibilita el empleo de una única malla computacional. Para abordar el problema se ha dividido el área de estudio en 6 subzonas de aproximadamente 60 km de longitud cada una, asegurando un solape de 1 km entre ellas.

Se han realizado diversas pruebas hasta obtener mallas adecuadas para lograr un equilibrio entre el coste computacional y la estabilidad en la simulación. Las IZ obtenidas tienen una superficie media de 3.500 m².

8. Calibración del modelo y efectos locales en puertos

Con el objetivo de minimizar la incertidumbre asociada a la contribución del oleaje al valor de la CI se ha realizado un ejercicio de calibración con datos de campo obtenidos por IHCantabria tras el temporal del 2 de febrero de 2014. Por otro lado, el proceso para determinar la contribución del oleaje al valor de la CI en puertos ha sido algo más complejo. Pese a que la base de datos de oleaje en costa que se ha manejado (DOW) es de alta resolución, no contempla los efectos locales sobre el oleaje debido a la presencia de estructuras de defensa portuarias (difracción).

8.1. Calibración de la formulación semiempírica con datos de campo

IHCantabria realizó una campaña de campo para evaluar los daños causados por el temporal en el Principado de Asturias. Con este objetivo, se discretizó la costa asturiana en 4 zonas y se dispuso un equipo de trabajo en cada una de ellas. Se visitaron playas, puertos y estuarios para evaluar su grado de afección, se midió la extensión aproximada de la inundación con base en marcas de agua y testigos oculares. Tras finalizar los trabajos se creó una base de datos en un sistema de información geográfica, con información espacial sobre el alcance de los eventos y se realizaron diversos inventarios.

Dado que la formulación de Stockdon et al.² utilizada para determinar el remonte del oleaje es función de un parámetro de ajuste que depende de la tipología de la costa, en este análisis se ha discernido entre los distintos elementos que conforman el litoral cantábrico: playas y acantilados. De este modo, y tras simular el evento extremo acontecido el 2 de febrero de 2014 para un rango de valores de dicho parámetro entre 0,04 y 0,09, se ha determinado un coeficiente para playas de 0,04 y otro distinto para contornos verticales de 0,08.

8.2. Efectos locales sobre el oleaje debido a la presencia de puertos

Conforme el oleaje se aproxima y propaga hacia la costa, este sufre una transformación energética debida principalmente a la influencia de los contornos batimétricos, es decir, experimenta los efectos propios de la refracción, difracción, asomeramiento y disipación de energía debida a la fricción con el fondo. Cuando el oleaje se encuentra con estructuras de protección costera la difracción hace que este se vea alterado significativamente. Para capturar este fenómeno se ha empleado un modelo numérico basado en la aproximación elíptica de la ecuación de la pendiente suave, que permite resolver los patrones estacionarios de propagación de oleaje y onda larga, reflexión y agitación dentro de puertos [25]. La figura 7 muestra el efecto de la difracción dentro del Puerto de Luanco. Este efecto viene representado por el llamado coeficiente de difracción, que resulta del cociente entre la altura de ola significativa en cualquier punto en el interior del puerto y la altura de ola significativa en la bocana (proporcionado por la base de datos DOW).

Esta aproximación se realizó para todos los puertos del Principado de Asturias.

9. Análisis de sensibilidad en rías y estuarios

Con el objetivo de demostrar la importancia de introducir fuentes continentales en la inundación de rías y estuarios, y dado que el modelo de inundación seleccionado admite la simultaneidad de diversas descargas en la llanura de inundación, se ha realizado un análisis de sensibilidad para analizar la inundación producida por la combinación de dinámicas costeras y continentales: MA, caudal medio y precipitación local.

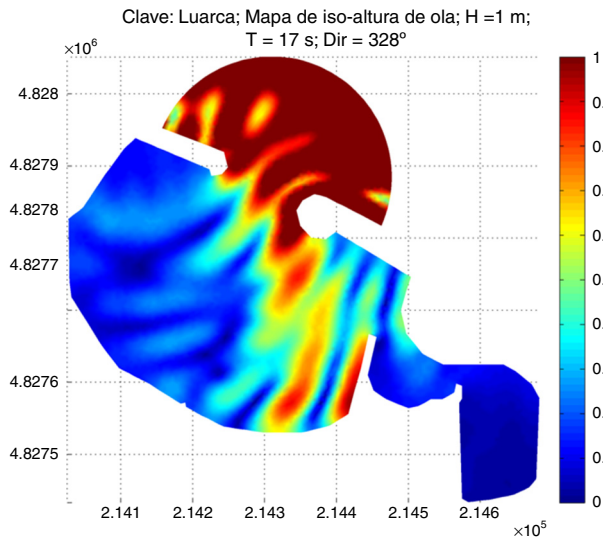


Figura 7. Variación de los coeficientes de difracción de la altura de ola dentro del Puerto de Luarca.

La marea seleccionada corresponde a la pleamar viva equinoccial y se ha utilizado como escenario base para validar el modelo. Se ha implementado un caudal medio y una lluvia torrencial de 25 mm/h durante 6 h.

La figura 8 muestra la comparación de los resultados de inundación máxima obtenidos tras la simulación de MA y de MA combinada con caudal medio y precipitación local en la ría de Luarca.

Se puede observar cómo el agua de precipitación se acumula en puntos bajos y cómo se producen desbordamientos puntuales de caudal en la ría. Esta aproximación se realizó en todos los estuarios del Principado de Asturias y se validó con información histórica.

10. Escenarios de cambio climático

La adaptación al cambio climático requiere la evaluación del riesgo bajo distintos escenarios con el objetivo de valorar los futuros cambios y proponer medidas o estrategias de adaptación que permitan lograr unos objetivos de riesgo (mantener el riesgo presente, disminuirlo, etc.). Por tanto, es necesario proyectar la CI a futuro. Esta proyección se ha realizado para los escenarios del

IPCC basados en Rutas Representativas de Concentraciones (RCP) de Gases de efecto invernadero [26].

10.1. Nivel medio del mar local

Dado que el nivel medio del mar no está subiendo igual en todas las partes del mundo, en los estudios regionales y locales de riesgo, como es este caso, los valores necesarios de aumento de nivel del mar son los del nivel del mar local. Las proyecciones de nivel del mar global para los escenarios RCP4.5 (escenario de emisiones moderado) y RCP8.5 (escenarios de emisiones pesimista) han sido regionalizadas para las cuencas de todo el mundo por Slangen et al. [27]. Esta regionalización se ha hecho combinando los procesos de cambios en la circulación oceánica y aumento de absorción de calor y presión atmosférica incluidos en los modelos climáticos de la fase 5 del proyecto WRCMP Coupled Model Intercomparison Project CMIP5 [28], con los resultados de modelos y observaciones regionales de contribución de hielo, disminución de aguas subterráneas y reajuste por isostasia glacial, incluyendo efectos gravitacionales debidos a la redistribución de masa. Los resultados obtenidos en la costa del Principado de Asturias oscilan entre 45 y 47 cm para el RCP4.5 y entre 63 y 65 para el RCP8.5.

10.2. Oleaje y marea meteorológica

Las proyecciones de oleaje y MM para los RCP4.5 y RCP8.5 se han realizado mediante la aplicación de una metodología estadística de aumento de la resolución espacial basada en tipos de tiempo. La naturaleza de estas dinámicas hace que su generación se derive de la situación de la atmósfera, de manera que, estudiando los estados de esta y sus cambios, podemos inferir los cambios en el oleaje y la MM. De este modo, se establece una relación estadística entre el predictor (campos de presiones a nivel del mar) y el predictando (oleaje o MM). Una vez conocida esa relación, mediante el uso y entrenamiento del modelo en el período histórico, se pueden obtener las proyecciones del predictando a partir de los cambios en las probabilidades del predictor, ya que la relación estadística de cada tipo de tiempo se asume constante. Una descripción más completa de la metodología se puede encontrar en Camus et al. [29].

10.3. Precipitación

La Agencia Estatal de Meteorología ha realizado proyecciones de cambio de la precipitación anual acumulada media para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 empleando técnicas de regionalización



Figura 8. Análisis de sensibilidad en Luarca: inundación por MA (panel izquierdo) vs. Inundación por MA, caudal medio y precipitación (panel derecho).

estadística basados en métodos de análogos y de regresión [30]. De acuerdo a esas proyecciones, y para todos los escenarios considerados, los cambios en el litoral asturiano son inferiores a ± 10 mm. Por ello, y como primera aproximación, se ha mantenido en los principales cauces el caudal medio anual.

10.4. Descripción de los escenarios

Tras realizar las proyecciones, se ha observado que los cambios en el oleaje y en la MM son, independientemente del escenario considerado, inferiores a ± 10 cm, por lo que se han despreciado al no ser significativos frente al efecto que tiene el aumento del nivel medio del mar en los horizontes considerados.

Los horizontes temporales considerados son el clima actual, el año 2050, con el fin de analizar los posibles cambios a medio plazo, y el año 2100, para evaluar las consecuencias a largo plazo. Con base en estos horizontes temporales, se han planteado 9 escenarios que combinan eventos extremos de 100 y 500 años de periodo de retorno, de acuerdo con la Directiva Europea de Inundaciones, y aumentos del nivel del medio del mar de +0,24 m, +0,45 m (valor medio del RCP4.5 en la costa asturiana), +0,65 m (valor medio del RCP8.5 en la costa asturiana) y +1 m de subida del nivel del mar, este último para un escenario más pesimista para el análisis de riesgos [31].

La **tabla 2** muestra una descripción de los escenarios de cambio climático propuestos.

11. Resultados

Los resultados sugieren inundaciones características de una costa acantilada, donde las zonas bajas de las rías y playas son las que sufren mayor impacto. Las inundaciones que se muestran no tienen en cuenta medidas de adaptación, por lo que deben entenderse como el resultado de la inacción en una situación que considera el mantenimiento de las condiciones actuales de defensa costera y encauzamientos. Estas inundaciones combinan oleaje, MM, MA y aumento del nivel medio del mar en lo que se ha denominado CI, y se ha mantenido el caudal medio en los cauces de las principales rías asturianas. Solo se muestran escenarios en los que el caudal no es dinámica dominante en la inundación.

Tabla 2
Escenarios de cambio climático

Identificador	Horizonte temporal	Escenarios climáticos	
		Periodo de retorno del evento extremo (inundación temporal) ^a	Aumento del nivel medio del mar (inundación permanente) ^b
E1	Actualidad	100 años	
E2	Actualizad	500 años	
E3	2050	100 años	0,24 m
E4	2050	500 años	0,24 m
E5	2100		1 m
E6	2100	100 años	0,45 m
E7	2100	500 años	0,45 m
E8	2100	100 años	0,65 m
E9	2100	500 años	0,65 m

^a Basado en datos históricos.

^b Valor medio en el Principado de Asturias modificado localmente con Slangen et al.²⁷.

La **figura 9** muestra los resultados en la ría de Navia. Se puede observar para los distintos escenarios cómo evoluciona la pérdida de terrenos en zonas bajas, fundamentalmente debido a la contribución del aumento del nivel medio del mar. Para periodos de retorno de 100 y 500 años, y con un aumento del nivel medio del mar de 66,2 cm (E8 y E9), el agua alcanza ya una parte importante de la ciudad por lo que, si no se actúa al respecto, será necesaria la protección de personas y activos con consecuencias importantes sobre la economía de la región.

A diferencia de lo que ocurre en Navia, donde solo por la subida del nivel medio del mar ya se observan daños significativos, en Luarca (**fig. 10**) es la combinación del evento extremo de 100 años de periodo de retorno y el aumento del nivel medio del mar, lo que hace que se produzca rebase en las dársenas y el desbordamiento del río cerca de la desembocadura. En el caso del evento de 500 años de periodo de retorno (E9) las consecuencias se ven claramente intensificadas.

En la ría de Avilés (**fig. 11**), el MDT inicial no representaba adecuadamente el encauzamiento de la ría. Por ello, se ha redefinido con base en las cotas topográficas de las que se ha podido disponer. Asumiendo estas modificaciones, los resultados demuestran que es la combinación de periodos de retorno de 100 y 500 años

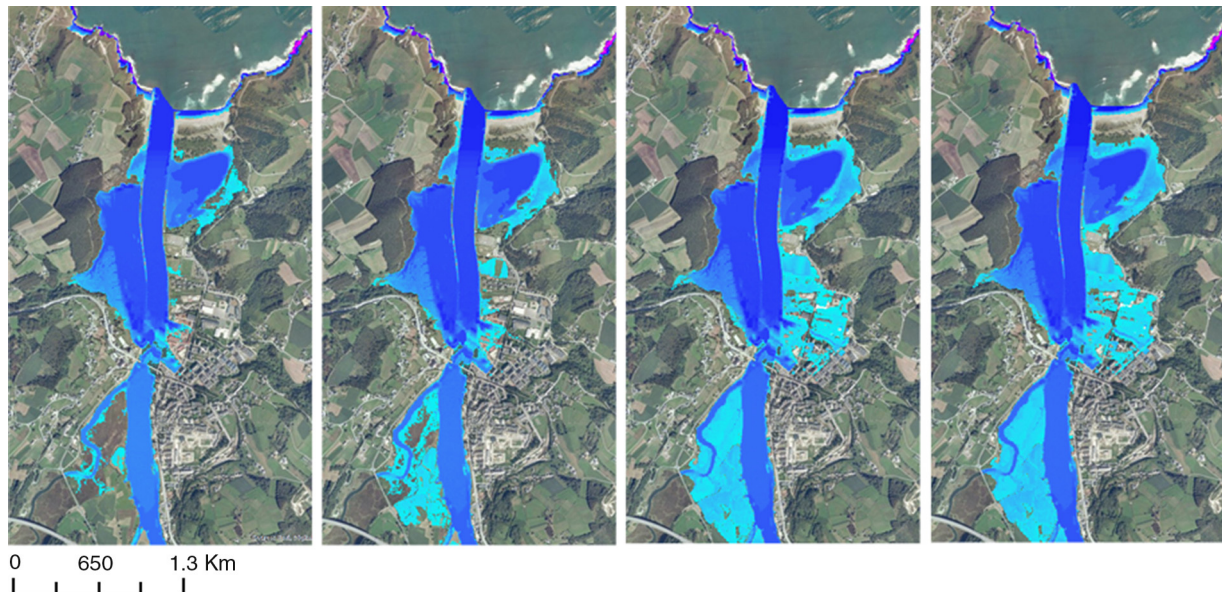


Figura 9. Inundación en Navia para los escenarios E1 (panel izquierdo), E3 (panel en centro-izquierda), E8 (panel en centro-derecha) y E9 (panel derecho).

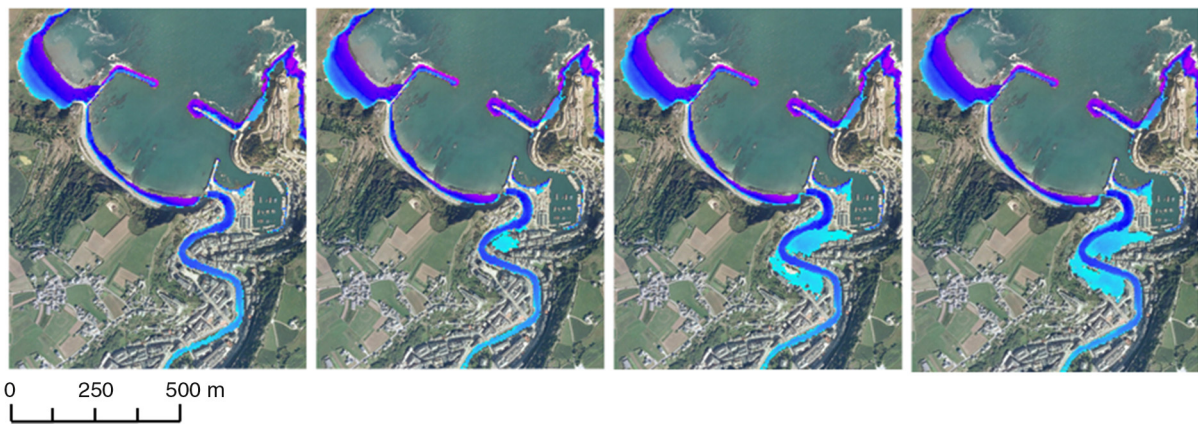


Figura 10. Inundación en Lueca para los escenarios E1 (panel izquierdo), E3 (panel en centro-izquierda), E8 (panel en centro-derecha) y E9 (panel derecho).

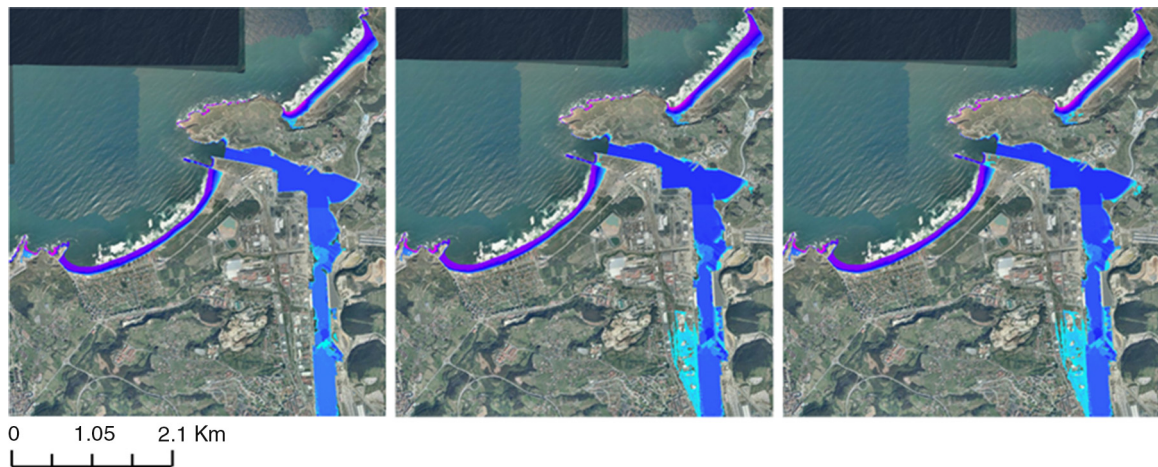


Figura 11. Inundación en Avilés para los escenarios E1 (panel izquierdo), E8 (panel central) y E9 (panel derecho).

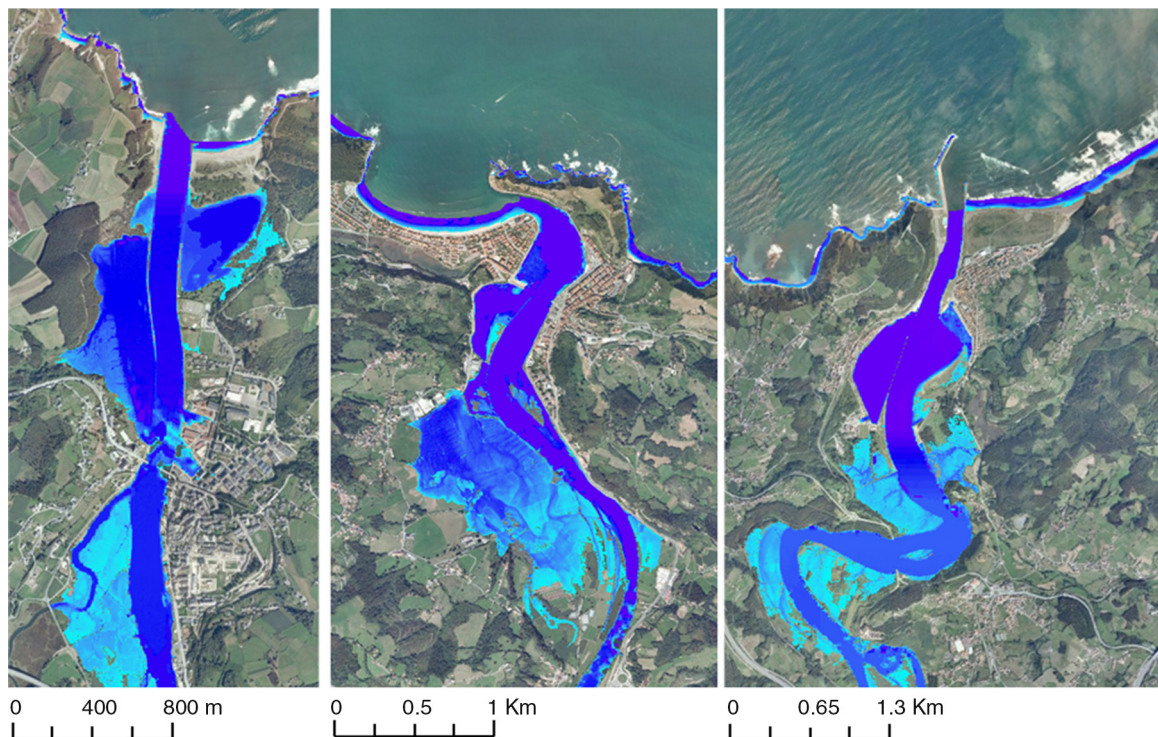


Figura 12. Inundación permanente de 1 m de aumento del nivel medio del mar (E5) en Navia (panel izquierdo), Ribadesella (panel central) y San Esteban de Pravia (panel derecho).

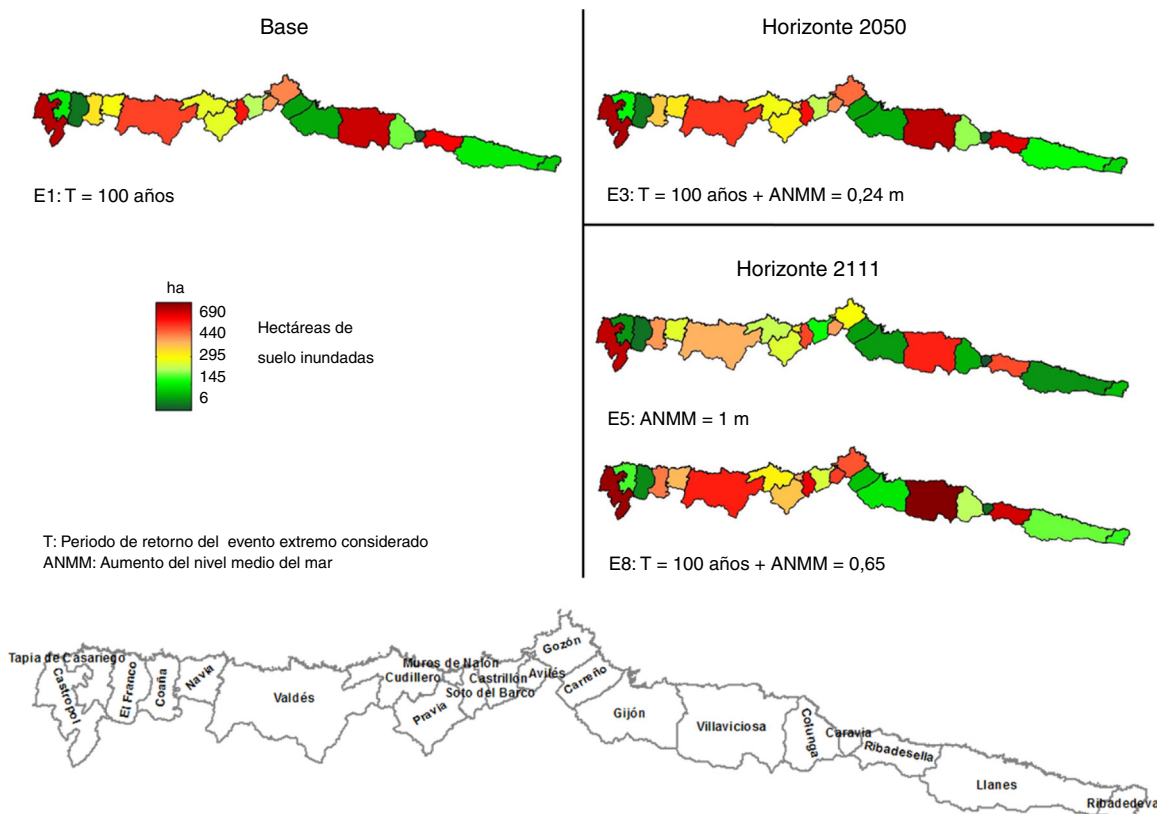


Figura 13. Distribución espacial de las hectáreas de suelo inundadas para los escenarios E1 (base), E3 (horizonte 2050), E5 y E8 (horizonte 2100).

con aumentos considerables del nivel medio del mar y un caudal medio lo que provocará el desbordamiento de la ría en caso de no implementar medidas de adaptación. Gran parte de los activos industriales alojados a orillas de la ría, y en consecuencia gran parte de la producción, se verán seriamente afectados.

En las zonas de Navia, Ribadesella y San Esteban de Pravia (fig. 12) se puede observar la magnitud de la inundación de zonas bajas de la costa debida exclusivamente al aumento del nivel medio del mar (E5), donde algunas zonas quedarían anegadas de forma permanente.

Una vez obtenidos los mapas de inundación para toda la región, las hectáreas de suelo inundadas se han agregado a nivel municipal (fig. 13). La distribución espacial de los resultados es una herramienta fundamental de planificación territorial, ya que permite identificar aquellas unidades administrativas críticas que hay que mirar con más detalle para la implementación de medidas de adaptación concretas. Castropol y Villaviciosa son los más afectados, llegando a alcanzar este último 680 ha de área inundada a final de siglo.

Con el objetivo de evaluar en qué medida el aumento del nivel medio del mar contribuye a las inundaciones observadas, se ha determinado para cada concejo la diferencia entre el área afectada con los climas actual y futuro. Los efectos de la subida de nivel son especialmente significativos en la ría de Avilés, donde se estima la necesidad de tomar medidas de adaptación para evitar impactos en el tejido económico que se encuentra en sus márgenes. A fin de siglo, con una subida del nivel medio del mar de 63,2 cm, y ante un evento extremo de 100 años de periodo de retorno, equivalente a los ocurridos durante el invierno de 2013-2014, la zona inundada se incrementará en 40 ha. Muros de Nalón, Soto del Barco y el resto de municipios que albergan rías también sufrirán de manera importante los efectos del cambio climático si no se actúa al respecto. Sin embargo, en otras localizaciones costeras con puertos o encauzamientos como El Franco, Valdés y Llanes el efecto de la

subida del nivel medio del mar en la extensión de la inundación será menor. Esta situación se mantendrá siempre y cuando la cota del francobordo de la defensa sea superior a la cota de inundación alcanzada.

12. Conclusiones

Se ha elaborado una metodología novedosa que permite analizar el impacto de inundación costera por cambio climático a escala regional, de forma eficiente y con una alta resolución. Permite no solo resolver inundación teniendo en cuenta diversas fuentes de descarga (por ejemplo dinámicas marinas, caudal fluvial y precipitación), sino también disponer flexibilidad a la hora de escoger la estrategia numérica a aplicar, pudiendo elegir desde formulaciones semiempíricas hasta modelos numéricos de distinta complejidad adecuada a la escala de trabajo, para calcular la condición de contorno del modelo de inundación, como es la sobre-elevación del nivel debido a la rotura del oleaje o del caudal de rebase. En cualquier caso, cabe resaltar la importancia de realizar ensayos de sensibilidad y, muy especialmente, ejercicios de calibración. En el caso del Principado de Asturias, la campaña de campo realizada ha resultado fundamental para reducir incertidumbres.

Otro aspecto a destacar es el uso de bases de datos de dinámicas de alta calidad, validadas con medidas instrumentales procedentes de boyas marinas, algo que ha permitido reconstruir históricamente la cota de inundación con gran resolución, captando toda su variabilidad a lo largo del litoral asturiano. La disposición de estas bases de datos, junto con la aplicación de sofisticadas técnicas estadísticas de aumento de resolución espacial basadas en tipos de tiempo, ha permitido obtener predicciones de oleaje y marea meteorológica de alta resolución.

En lo que respecta a las limitaciones del análisis, que por otro lado abren importantes líneas de investigación y desarrollo futuras, cabe destacar fundamentalmente la necesidad de analizar posibles

combinaciones estadísticas entre las dinámicas marinas, el caudal fluvial y/o la precipitación, de modo que puedan abordarse nuevos escenarios posibles y la importancia de estudiar en detalle el modelado de inundación en playas urbanas. Las playas urbanas, a diferencia del resto de playas sin influencia antropogénica, no permiten el retranqueo de la línea de costa, por lo que muchas de ellas acabarán desapareciendo a causa del aumento del nivel medio del mar. Dada su casuística, es necesario realizar un estudio de detalle muy específico para cada una de ellas, y modelar con muy alta resolución la interacción entre el flujo y la estructura, algo que queda fuera del alcance de este trabajo.

El desarrollo y la aplicación de la metodología presentada en este artículo supone dar un paso más en la caracterización del impacto de inundación, una parte fundamental en la evaluación de los riesgos que el cambio climático conlleva para la costa, por lo que sienta bases más sólidas para el planteamiento de estrategias y medidas de adaptación.

Financiación

El trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) en el marco del proyecto Asistencia técnica a la elaboración de un estudio sobre la adaptación al cambio climático de la costa del Principado de Asturias.

Agradecimientos

Los autores del artículo agradecen, además de la financiación proporcionada por el MAGRAMA, el apoyo técnico recibido por el Gobierno del Principado de Asturias.

Bibliografía

- [1] Wong PP, Losada IJ, Gattuso J-P, Hinkel J, Khattabi A, McInnes KL, et al. Coastal systems and low-lying areas. En: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, et al., editores. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014. p. 361–409.
- [2] Stockdon HF, Holman RA, Howd PA, Sallenger AH. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coast Eng* 2006;53:573–88.
- [3] Pullen T, Allsop NWH, Bruce T, Kortenhaus A, Schüttrumpf H, Van der Meer JW. *Eurotop – Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual*. En: Pullen T, Allsop NWH, Bruce T, Kortenhaus A, Schüttrumpf H, Van der Meer JW, editores. Hamburg. Germany: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen; 2007.
- [4] Liu PL-F, Losada IJ. Wave propagation modeling in coastal engineering. *J Hydraul Res* 2002;40:229–40.
- [5] Losada IJ, Lara JL, Guanche R, Gonzalez-Ondina JM. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coast Eng* 2008;55:47–62.
- [6] Lara JL, Ruju A, Losada IJ. RANS modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proc Roy Soc A Math Phys* 2011;467(2129):1215–42.
- [7] Zijlema M, Stelling G, Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast Eng* 2011;58:992–1012.
- [8] Roelvink D, Reniers A, van Dongeren A, van Thiel de Vries J, McCall R, Lescinski J. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coast Eng* 2009;56:1133–52.
- [9] McCall RT, Masselink G, Poate TG, Roelvink JA, Almeida LP, Davidson M, et al. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coast Eng* 2014;91:231–50.
- [10] Bates PD, de Roo APJ. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *J Hydrol* 2000;236:54–77.
- [11] Gouldby B, Sayers P, Mulet-Martí J, Hassan M, Benwell D. A methodology for regional-scale flood risk assessment. *Wat Man* 2008;161:169–82.
- [12] L'homme J, Gutierrez-Andres J, Weisgerber A, Davison M, Mulet-Martí J, Cooper A, et al. Testing a new two-dimensional flood modelling system: Analytical tests and application to a flood event. *J Flood Risk Man* 2010;3:33–51.
- [13] Jamieson S, L'homme J, Wright G, Gouldby B. Highly efficient 2D inundation modelling with enhanced diffusion-wave and sub-element topography. *Proc Inst Wat Man* 2012;165:581–95.
- [14] Batstone C, Lawless M, Tawn J, Horsburgh K, Blackman D, McMillan A, et al. A UK best-practice approach for extreme sea-level analysis along complex topographic coastlines. *Ocean Eng* 2013;71:28–39.
- [15] Serafin K, Ruggiero P. Simulating extreme total water levels using a time-dependent, extreme value approach. *J Geophys Res: Oceans* 2014;119:6305–29.
- [16] Gouldby B, Méndez FJ, Guanche Y, Rueda A, Mínguez R. A methodology for deriving extreme nearshore sea conditions for structural design and flood risk analysis. *Coast Eng* 2014;88:15–26.
- [17] McMillan A, Batstone C, Worth D, Tawn J, Horsburgh K, Lawless M. *Coastal flood boundary conditions for UK mainland and islands*. Copenhagen, Denmark: Environment Agency; 2011.
- [18] Leonard M, Westra S, Phatak A, Lambert M, van den Hurk B, McInnes K, et al. A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Clim Change* 2014;5:113–28.
- [19] Camus P, Méndez FJ, Medina R, Tomas A, Izaguirre C. High resolution down-scaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coast Eng* 2013;72:56–68.
- [20] Cid A, Castanedo S, Abascal AJ, Menéndez M, Medina R. A high resolution hind-cast of the meteorological sea level component for Southern Europe: The GOS dataset. *Clim Dyn* 2014;43:2167–84.
- [21] Egbert GD, Bennett AF, Foreman MGG. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *J Geophys Res* 1994;99:24821–52.
- [22] CEDEX [consultado Mar 2015]. Disponible en: <http://www.hercules.cedex.es>.
- [23] Instituto Geográfico Nacional (IGN) [consultado May 2015]. Disponible en: <http://www.ign.es>.
- [24] Bates PD, Horritt MS, Fewtrell TJ. A simple inertial formulation of the shallow-water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *J Hydrol* 2010;387:33–4.
- [25] GIOC, Grupo de ingeniería oceanográfica y de costas. Documentación del programa MSP-Espectral. Universidad de Cantabria, Santander, España; 1999.
- [26] Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, et al. Sea level change. En: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, et al., editores. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2013.
- [27] Slangen ABA, Carson M, Katsman CA, van de Wal RSW, Köhl A, Vermeersen LLA, et al. Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Clim Change* 2014;124:317–32.
- [28] Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Amer Meteor Soc* 2012;93:485–98.
- [29] Camus P, Menéndez M, Méndez FJ, Izaguirre C, Espejo A, Cánovas V, et al. A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate. *J Geophys Res: Oceans* 2014;119, <http://dx.doi.org/10.1002/2014JC010141>.
- [30] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) [consultado Jul 2015]. Disponible en: <http://www.aemet.es>.
- [31] Hinkel J, Lincke D, Vafeidis AT, Perrette M, Nicholls RJ, Tol RSJ, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proc Natl Acad Sci USA* 2014;111:3292–7.