# CAMBIOS EN LOS EVENTOS EXTREMOS DE INUNDACIÓN EN LA COSTA

Melisa MENÉNDEZ GARCÍA, Jorge PÉREZ GARCÍA, Fernando J. MÉNDEZ INCERA, Cristina IZAGUIRRE LASA
*Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria". Universidad de Cantabria*
**menendezm@unican.es, perezgj@unican.es, mendezf@unican.es, izaguirrec@unican.es**

## RESUMEN

El régimen de inundación por acción de la dinámica marina y meteorológica en un tramo de costa específico es un fenómeno complejo, ya que en él intervienen un gran número de elementos. En concreto, el fenómeno de inundación se puede representar por el nivel del mar y, sobre dicho nivel, el oleaje. El nivel del mar está compuesto por el nivel medio, la marea y el residuo meteorológico. El oleaje está afectado por varios procesos durante su propagación hacia la costa y se manifiesta como un ascenso de la masa de agua denominado run-up. Para caracterizar la cota de inundación y estimar posibles cambios, se ha realizado una reconstrucción horaria a partir de la composición de las variables mencionadas durante los últimos 60 años. El análisis de los fenómenos de inundación se ha realizado mediante la caracterización de su régimen extremal. Se ha empleado un modelo estadístico no-estacionario de extremos basado en la distribución Pareto y el proceso de Poisson no-homogéneo. La no-estacionariedad se ha incorporado analizando posibles tendencias. Los resultados muestran las tendencias significativas de incremento obtenidas en los valores asociados a 50 años de periodo de retorno y su distribución espacial a lo largo del litoral español.

**Palabras clave:** Riesgo de Inundación, nivel del mar, modelo estadístico, oleaje, tendencias, valores extremos.

## ABSTRACT

The flooding evaluation in a coastal location due to atmospheric and meteorological factors is a complex issue. The observed sea level can be considered as the combined result of four factors: mean sea level, tidal level, surge level and waves. When ocean waves enter coastal waters, they are affected by the limited water depth, and a water level elevation maxima, measured on the foreshore, with respect to still water level appears (run-up). To characterize the flood elevation and to estimate possible changes, an hourly reconstruction in the last 60 years from the composition of their components has been developed. A time-dependent extreme value analysis based on Pareto and Poisson probability distributions has been modelled. Long-term trends and their statistical significance on the parameters of the distribution were analyzed. Results show the significant positive trends regarding the 50-yr return levels and the spatial distribution in the Spanish coast

**Key words:** Flooding risk, sea level, statistical model, wave, trends, extreme values.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las excepcionales condiciones del litoral para el desarrollo de múltiples actividades humanas han propiciado una continua migración de habitantes, industrias y servicios a las zonas costeras. Según datos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), cerca de un 50% de la población mundial vive en la zona costera (solo en Europa más de 70 millones de habitantes residen en municipios costeros) y el 70% de las playas de arena en el mundo se encuentra en proceso de erosión. Es por ello que, todos los habitantes, bienes materiales y medios naturales en el litoral se encuentran amenazados por la inundación costera, y este riesgo aumenta cada año para infraestructuras urbanas, turísticas e industriales, tierras de cultivo, áreas de recreo y hábitats naturales.

En comparación con las variaciones del nivel del mar medio, los eventos de niveles del mar excepcionalmente elevados (niveles extremos) presentan un efecto en la costa inmediato y obvio. Las inundaciones que han ocurrido en los últimos años, como la producida por el huracán Katrina o, en el Mediterráneo, las producidas por el temporal de San Esteban (Diciembre del 2008) han resaltado el daño que pueden provocar, especialmente cuando se da la acción combinada de un nivel del mar elevado debido a una situación meteorológica sobre una región costera altamente poblada.

El régimen de inundación por acción de la dinámica marina y meteorológica en un tramo de costa específico es un fenómeno complejo, ya que en él intervienen un gran número de elementos. Sin tener en cuenta factores locales procedentes de tierra en dominios semi-cerrados (interior de bahías, riberas de ríos, etc.), el fenómeno de inundación costera se define como la acción de dos agentes: el nivel del mar y, sobre dicho nivel, la acción del oleaje. A su vez, el nivel del mar esta constituido por tres variables: el nivel medio del mar, la marea astronómica y el residuo meteorológico.

El nivel medio del mar se define como el valor promedio de la superficie del océano durante un periodo de tiempo respecto a un nivel de referencia. En la costa peninsular el nivel de referencia establecido es el cero de Alicante, mientras que en los archipiélagos balear y canario el nivel medio está referido al nivel del mar local. El nivel medio del mar está ascendiendo a nivel global. Las causas de este aumento global son el deshielo de los casquetes de hielo y nieve de los glaciares y los intercambios hidrológicos entre tierra-océano (Cazenave A. y Remy F., 2011). Sin embargo, el aumento del nivel del mar no es homogéneo espacialmente, presenta variaciones regionales. Además existen numerosas localizaciones donde el nivel medio del mar (respecto a la línea de costa) está disminuyendo debido a una emersión de la costa.

La marea astronómica es una oscilación del nivel del mar de carácter determinista cuyo período de oscilación varía entre las 12 horas y los 19 años. Las mareas altas, que presentan oscilaciones diarias, equinocciales, interanuales y decadales, contribuyen a la ocurrencia de niveles del mar extremos (Pugh, 1987). Contrariamente a lo que pudiera parecer, la marea astronómica juega un papel de "laminación" de los eventos extraordinarios de inundación costera, puesto que la coincidencia de un evento de oleaje y marea meteorológica extremos con una marea viva equinoccial tiene un período de ocurrencia alto. La magnitud de la marea a lo largo del litoral español es muy variable, alcanzando valores en el Cantábrico y Galicia superiores a 4 metros, mientras que, en el Mediterráneo es de pocos centímetros.

El residuo meteorológico es una oscilación del nivel del mar debido a la acción conjunta de la variación de presión y el arrastre del viento, y su período puede ser desde varios minutos a días. Las bajas presiones atmosféricas asociadas al paso de las borrascas generan un ascenso del nivel del mar asociado a la depresión barométrica de las mismas. Las grandes borrascas extra-tropicales que afectan

al litoral español, generan, de modo habitual, sobreelevaciones superiores a 15 cm, y pueden llegar a generar sobreelevaciones en torno al metro. El viento, por su capacidad de arrastrar agua, es otro factor que puede dar lugar a la sobreelevación del nivel del mar en la costa. Para que la acción del viento genere una elevación del nivel del mar deben darse vientos intensos, determinadas condiciones de geometría de la costa y poco calado. En España se producen eventos de marea meteorológica importantes. Este es el caso del conocido temporal de Noviembre de 2001 que afectó a las costas catalanas, balear y valenciana debido a la acción conjunta del residuo meteorológico y el oleaje. De esta forma los posibles cambios en los patrones de tormenta y del nivel medio del mar debidos al efecto del calentamiento global podrían afectar al residuo meteorológico local modificando los niveles del mar extremos.

El oleaje, generado por la acción del viento sobre la superficie del mar, es una oscilación del mar con períodos entre 3 y 30 segundos. El oleaje es la oscilación del mar más relevante en términos de erosión litoral y está caracterizado por valores de período de retorno de 50 años superiores a los nueve metros de altura de ola significante en las costas atlánticas españolas y los seis en las costas mediterráneas. El oleaje está afectado por varios procesos durante su propagación hacia la costa y se manifiesta como un ascenso de la masa de agua denominado run-up.

De todo lo anterior se deduce que el régimen de inundación por acción de la dinámica marina y meteorológica en un tramo de costa específico es un fenómeno aleatorio complejo. Por consiguiente, la determinación de la cota de inundación es un problema estocástico de extremos. Una de las consecuencias de que sea un problema estocástico es que no existe un límite determinista que se alcanza durante el peor temporal, sino que cada nivel tendrá una probabilidad de ser sobrepasado.

El objetivo general de este trabajo es la estimación regional de los posibles cambios que pueden estar sucediendo en los valores extremos de cota de inundación. Para ello, el primer objetivo secundario que se ha planteado es la recolección y/o generación de las bases de datos de cada variable que aporta al régimen de inundación. La recopilación de esta base de datos a lo largo del litoral español se detalla en la sección 2. La reconstrucción de una serie de cota de inundación en todo el litoral español es el siguiente paso en este estudio (sección 3.1). Debido a la particularidad que implica el análisis de eventos extremos y sus variaciones, en el apartado 3.2 se describe el modelo estadístico de valores extremos empleado. En la sección 4 se describen los resultados obtenidos y, finalmente se resumen las conclusiones principales que se deducen del trabajo realizado.

## 2. DATOS

### 2.1. Datos de Oleaje

La única manera de obtener una base de datos de oleaje continua en el espacio y en el tiempo durante un periodo suficientemente largo que permita analizar tendencias es la generación de un reanálisis de oleaje. El reanálisis de oleaje está condicionado por las limitaciones del modelo numérico a emplear, por la disponibilidad de reanálisis atmosféricos, en concreto vientos en superficie, y por datos de batimetría con suficiente resolución temporal.

Para poder caracterizar el oleaje en aguas costeras en el litoral español, por tanto afectado por la profundidad del fondo marino, se dispone de la base de datos de reanálisis DOW (Downscaled Ocean Waves, más detalles en Camus *et al.*, 2011). Por tanto, se trata de transferir el oleaje hasta la costa mediante el anidamiento de un modelo de propagación del oleaje, en este caso el modelo SWAN. Para ello se han considerado una serie de mallas para poder abarcar todo el litoral español. Además a estas

mallas se le anidan otra serie de mallas de tamaño inferior pero con mayor resolución espacial para poder ofrecer unos resultados con un mayor detalle (Figura 1). La resolución espacial de las series de oleaje en la costa es de: 0.005º de longitud y 0.004º de latitud en el Mar Cantábrico y Galicia (~415 x 325 m); 0.0025º de longitud y 0.002º de latitud en el Canarias (~250 x 200 m); y entre 0.0025º y 0.0035º en longitud y latitud en el Golfo de Cádiz y Mediterráneo (aproximadamente entre 200-300 m). El periodo de tiempo reconstruido va desde 1950 hasta el 2009. La resolución temporal es horaria.

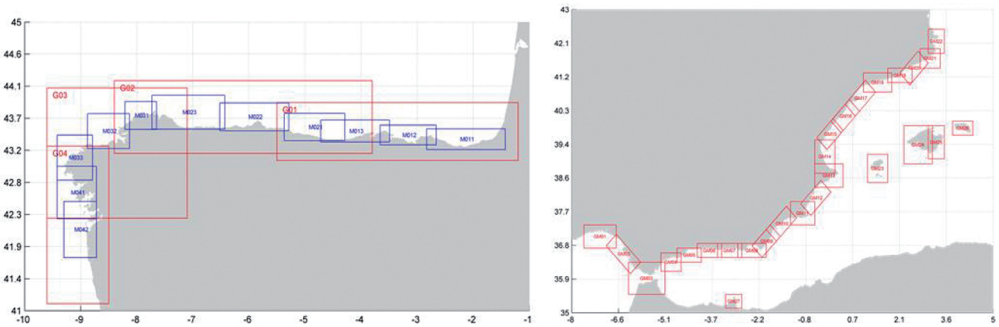

FIG. 1: *Mallas de propagación del oleaje en el Cantábrico y en el Mediterráneo.*

## 2.2. Datos de Nivel Medio del Mar

Para la reconstrucción de la base de datos de nivel medio del mar (NMM) regional, con resolución espacial de 1º en longitud y latitud, se han utilizado registros de mareógrafos y satelitales (satélite sólo desde 1993). El método matemático empleado se describe en Church *et al.* (2004). La reconstrucción cubre el periodo 1950-2009 con resolución mensual. La variable nivel medio del mar procesada presenta las siguientes correcciones: (i) eliminación de la variación estacional media (ENMM); (ii) corrección de barómetro inverso, y (iii) corrección GIA (Glacial Isostatic Adjustment) en la información procedente de mareógrafos.

## 2.3. Datos de Marea Astronómica

Se han reconstruido, a lo largo de todo el litoral, las series temporales de marea astronómica. Para ello se llevó a cabo el análisis armónico de los registros de los mareógrafos de la REDMAR (Puertos del Estado), obteniendo las componentes armónicas en cada uno de ellos. El análisis armónico se ha realizado utilizando un conjunto de programas denominado t_tide (Paulowicz *et al.*, 2002). A partir de estas componentes, y separando el dominio en diferentes cuencas (con características de marea similares), se ha obtenido, para cada punto en costa, sus correspondientes componentes armónicas mediante interpolación de los dos mareógrafos más cercanos, y a partir de ellas, la serie temporal utilizada en el estudio.

## 2.4. Datos de Residuo Meteorológico

La datos utilizados para caracterizar el residuo meteorológico del nivel del mar en la costa proceden de la base de datos GOS (Global Ocean Surge, Abascal *et al.*, 2010). GOS es un reanálisis que reconstruye 60 años (1948-2009) de residuo meteorológico en el sur de Europa, incluyendo el mar Mediterráneo y la costa Atlántica Española. Presenta una resolución temporal horaria y espacial

de 1/8º. Dicho reanálisis ha sido realizado con el modelo tridimensional de circulación ROMS (Regional Ocean Modeling System). En este estudio, dado el carácter barotrópico del fenómeno a resolver, se ha utilizado la versión 2D del modelo. Los resultados del reanálisis de residuo meteorológico GOS han sido validados con datos instrumentales de mareógrafos, localizados tanto en el Atlántico como en el Mediterráneo.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Obtención de la sobrelevación causada por el oleaje

El run-up del oleaje (RU) es la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre un elemento respecto al nivel del mar en reposo. Este fenómeno se produce después de que la ola rompa debido a su iteración con el fondo, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por un talud. Esta variable se suele estimar a partir de dos elementos: run-up y swash.

Debido a su importancia, un gran número de investigadores se han concentrado en tomar medidas del run-up del oleaje (en campo o en laboratorio) y analizar los datos como funciones de las condiciones del oleaje y de la morfología del medio (playas o estructuras). Por eso la existencia de formulaciones o métodos de estimación están limitadas principalmente a aproximaciones semi-empíricas. Algunos resultados de estos estudios son ecuaciones que permiten obtener el valor del run-up a partir de la altura de ola incidente. Una formulación reciente que permite obtener una aproximación del valor se describe en Stockdon et al. (2006).

En el presente trabajo se plantea la estimación del run-up sin tener en cuenta la componente swash, debido a que requiere caracterizar la costa a un nivel de resolución espacial que está fuera del objetivo de este estudio y a que la componente swash contribuye a una sobrelevación de baja frecuencia (escala temporal de segundos). Para obtener el run-up, según la formulación de Stockdon *et al.* (2006), se necesitan los parámetros altura de ola significante y longitud de onda en aguas profundas. Considerando la orientación media de la costa y la profundidad en una determinada localización costera se puede recomponer la altura de ola y la longitud de onda en aguas profundas mediante la teoría del rayo de Snell. De esta forma, a partir de los valores de altura de ola significante y longitud de onda de la base de datos DOW se puede deducir la sobrelevación del nivel del mar causada por el oleaje.

### 3.2. Reconstrucción de la Cota de Inundación.

La inundación costera es un fenómeno aleatorio fruto de la combinación de diferentes procesos de la dinámica marina. A partir de la reconstrucción histórica horaria, desde 1950 hasta 2010, de cada una de sus constituyentes es posible recomponer series temporales de inundación (Figura 2). En particular en este trabajo la reconstrucción temporal de la cota de inundación se ha estimado mediante la siguiente relación:

$$CI = N_{\mathrm{Ref}} + NMM + MA + Ru,$$

donde $CI$ es la cota de inundación; $N_{Ref}$ es el nivel de referencia del nivel medio del mar; $NMM$ es el nivel medio del mar; $MA$ es la marea astronómica; $RM$ es el residuo meteorológico; y $Ru$ el run-up.

Dado que el dominio del trabajo que se presenta cubre todo el litoral español, se han seleccionado 423 localizaciones a lo largo del litoral español, con una distancia de unos 10 Km entre sí.

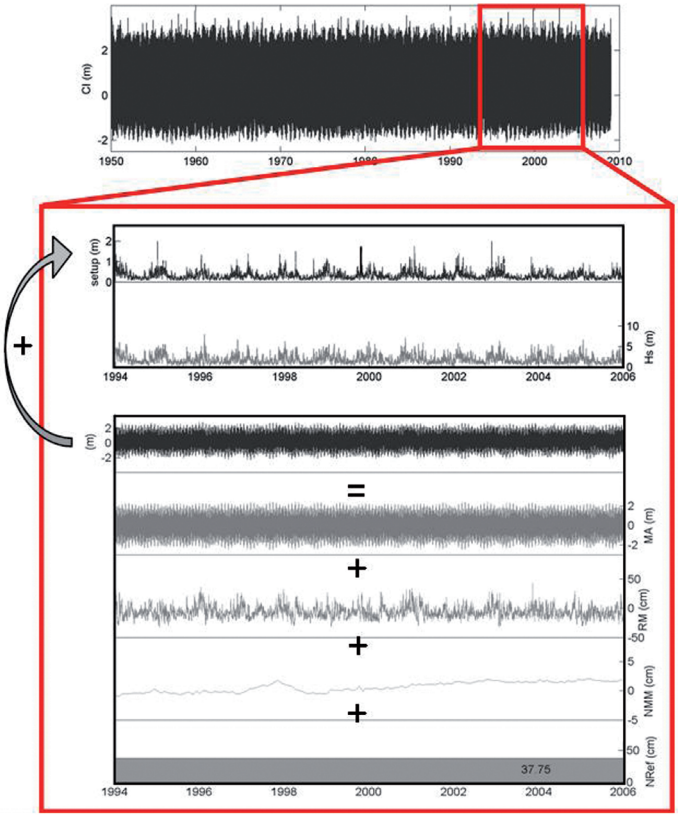


FIG. 2: *Reconstrucción de la cota de inundación en la localización de estudio correspondiente a Santander.*

### 3.3. Modelo Estadístico de Extremos

Para llevar a cabo la caracterización de los valores extremos de cota de inundación, es decir valores inusuales de gran magnitud que presentan una baja presentación, es necesario aplicar alguna de las aproximaciones matemáticas que describe la teoría de los valores extremos. Dado que el objetivo de este trabajo es el análisis de los cambios que están ocurriendo en los eventos extremos de inundación el modelo planteado debe ser no-estacionario.

El enfoque seguido en este estudio es integrado, se analizan los eventos extremos sin considerar la influencia de cada componente a priori para su generación. De esta manera se evita el error al que se induce asumiendo las relaciones no lineales entre las componentes, como puede ser el caso del modelo de Dixon y Tawn (1999).

Para la definición de los eventos extremos se ha considerado la selección más natural con respecto a la variabilidad climática de estos, el método de excedencias sobre un umbral. Este método consiste en estudiar las propiedades estadísticas de los valores que exceden un umbral de corte, en concreto, la magnitud e instante del pico de cada evento extremal. Para su aplicabilidad espacial se ha seleccionado el valor de corte que corresponde con el percentil del 99.5% de cada serie temporal, asumiendo una mínima independencia entre eventos de 3 días en la costa atlántica y 1 día en el Mediterráneo. En la figura 3 se muestra el número de eventos por año y el valor de cota de inundación obtenido mediante este criterio para cada localización analizada.

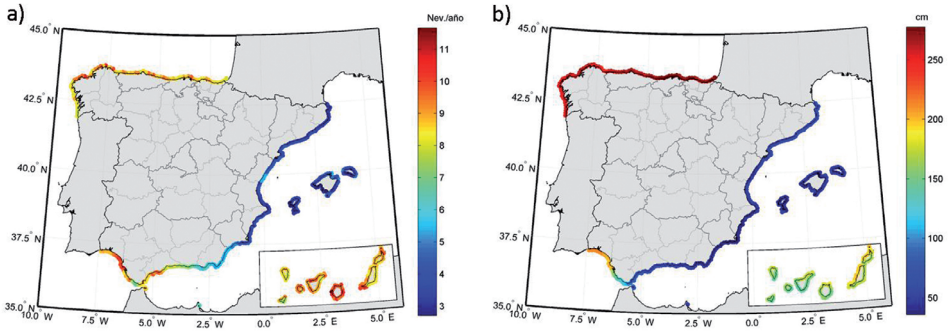


FIG. 3: *a) Número de eventos por año y b) magnitud del umbral seleccionado para el umbral correspondiente al percentil del 99.5%.*

Sobre cada muestra de excedencias se ha aplicado el modelo dependiente del tiempo de Pareto-Poisson. Se asume que la tasa de ocurrencia de los valores extremos de cota de inundación sigue un proceso de Poisson no-homogéneo (Luceño *et al.*, 2006). Este modelo implica una distribución relacionada con el intervalo de tiempo entre eventos consecutivos, de forma que presenta la siguiente distribución:

$$F\left(t_i \middle| t_{i-1}\right) = 1 - \exp\left(-\int_{t_{i-1}}^{t_i} \nu(t)dt\right),$$

donde $\nu(t)$ es la tasa de ocurrencia, que puede variar a lo largo del tiempo mediante la expresión:

$\nu(t) = \beta_0\, \beta_1 t.$

Y se asume que la magnitud de los eventos extremos de cota de inundación sigue una distribución de Pareto tal que:.

$G(x;\sigma_t,\xi) = 1 - (1+\xi\,(x-u)/\sigma_t)^{-1/\xi},$

donde $\sigma_t$ es el parámetro de escala y $\xi$ el parámetro de forma. Se considera que el parámetro de escala puede variar a lo largo del tiempo mediante la expresión: $\sigma(t)=\alpha_0+\alpha_1 t$.

La estimación de los parámetros $\{\beta_0,\beta_1,\alpha_0,\alpha_1,\xi\}$ se realiza mediante ajuste por máxima verosimilitud. La significancia de los parámetros indicativos de tendencia en la frecuencia o magnitud de los eventos extremos de cota de inundación se calcula mediante el perfil de verosimilitud (Coles *et al.*, 2001).

## 4. RESULTADOS

La aplicación del modelo estadístico planteado sobre los valores extremos de las 423 series horarias reconstruidas de cota inundación a lo largo del litoral, permite la descripción de las propiedades estadísticas.

En la figura 4 se muestran los parámetros que resultan del análisis de la intensidad de los eventos extremos mediante el modelo de Pareto. El parámetro $\alpha_0$ indica el valor medio que excede el umbral de corte. Como puede observarse en la figura 4, las mayores magnitudes resultan en el Mar Cantábrico y Galicia, con valores superiores a 18 cm respecto a umbrales en torno a 2.5 m. En el Golfo de Cádiz y Valencia y las costas nor-occidentales de las islas Canarias las excedencias sobre el percentil del

99.5% exceden los 12 cm. El parámetro de forma indica el comportamiento de los valores más extremos, es decir el comportamiento de la cola de la distribución. Valores negativos indican que el valor más extremo que se puede alcanzar está acotado, mientras que valores positivos se dan cuando la cola de la distribución decae como una función de potencia. Los valores menos acotados se localizan en la mitad norte de la costa mediterránea y la costa canaria orientada al nor-oeste.

El análisis de tendencias en la magnitud se representa mediante el parámetro $\alpha_1$. En la figura 4 se muestran las tendencias estimadas con una significancia mayor al 90%. Se han obtenido tendencias de incremento superiores a 0.1 cm/año en la costa cantábrica y costa Sureste de las islas Canarias. También se han obtenido tendencias positivas significativas de menor magnitud, alrededor de 0.05 cm/año en el Golfo de Cádiz y Mar de Alborán.

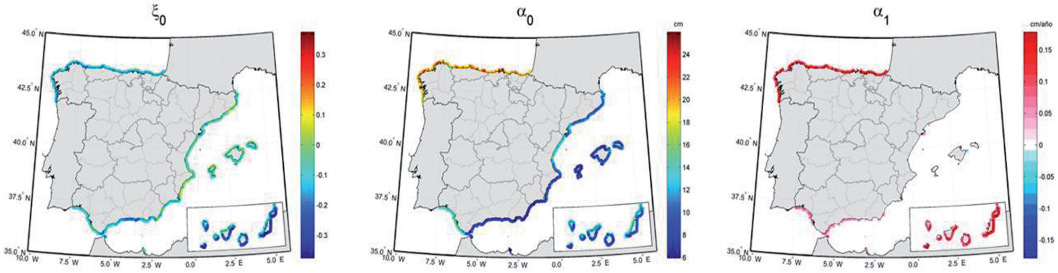


FIG. 4: *(de izquierda a derecha) Parámetro de forma, valor medio estimado del parámetro de escala y tendencia en el parámetro de escala del modelo de Pareto.*

En la figura 5 se muestran los parámetros que resultan del análisis de la frecuencia de presentación de eventos extremos mediante el modelo de Poisson. El parámetro $\beta_1$ indica un incremento generalizado de los eventos que superan el umbral establecido, con mayores tendencias en la costa limítrofe del Mar de Alborán y el archipiélago canario. Este resultado indica la influencia del incremento del nivel medio del mar sobre los eventos extremos (Menéndez y Woodworth, 2010).

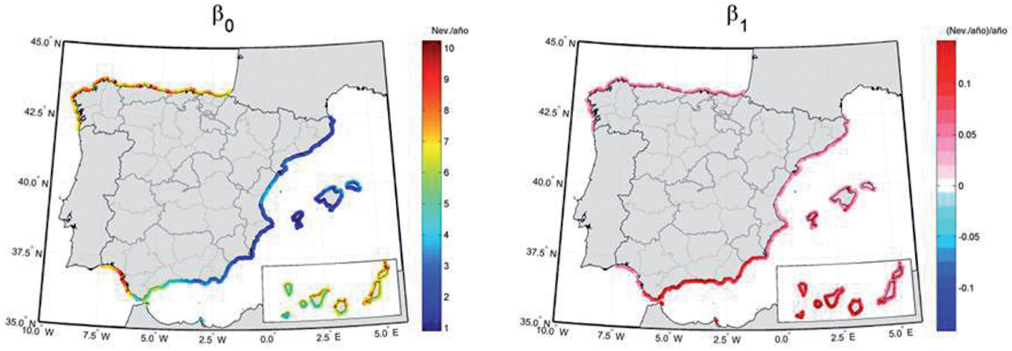


FIG. 5: *Valor medio estimado de la tasa de ocurrencia y su tendencia obtenida a partir del proceso de Poisson no-homogéneo.*

El modelo de extremos de Pareto-Poisson permite la estimación de valores asociados a periodos de retorno. En la figura 6a se muestra el valor medio actual estimado para la cota de inundación de

50 años de periodo de retorno. La magnitud de este evento extremo sigue la distribución espacial conocida a lo largo del litoral español, donde las mayores magnitudes se alcanzan en la cornisa cantábrica y Galicia. Una de las ventajas del modelo no-estacionario propuesto es la posibilidad de extrapolar las tendencias obtenidas a un año horizonte. Considerando la hipótesis de que la inercia en el sistema climático seguirá el patrón establecido durante los últimos 60 años, se ha calculado la cota de inundación de 50 años de periodo de retorno en el año 2040. Los incrementos obtenidos se muestran en la figura 6b. Los resultados indican una variación espacial en las tendencias acorde con los cambios analizados en la magnitud y frecuencia de los eventos extremos de inundación. Los mayores incrementos se predicen para la cornisa cantábrica y Galicia. Con incrementos superiores a 15 cm. El golfo de Cádiz y ciertos tramos de costa en Canarias también muestran aumentos relevantes.

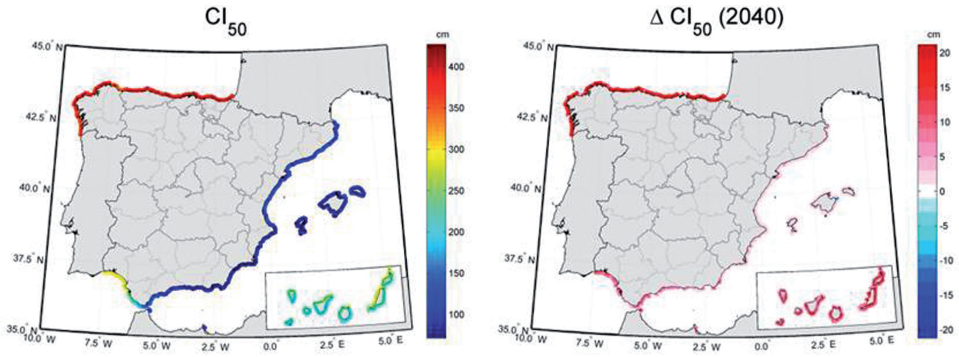


FIG. 6: *Cota de Inudación de periodo de retorno de 50 años actual y su incremento estimado para el año 2040.*

## 5. CONCLUSIONES

Se ha definido una metodología para la reconstrucción histórica de series temporales de la cota de inundación a lo largo del litoral español. La reconstrucción tiene en cuenta todas las variables que influyen en la ocurrencia de un evento extremo. La metodología es aplicable a cualquier otra región.

Se ha definido un modelo no-estacionario de extremos que permite no solo caracterizar el régimen extremal de inundaciones, sino también analizar sus tendencias mediante un método riguroso que tiene en cuenta toda la población de eventos extremos.

Las tendencias positivas obtenidas indican un aumento de los eventos extremos de la cota de inundación, en concordancia con el aumento del nivel medio del mar. Los resultados obtenidos indican mayor incremento en el litoral atlántico. Sin embargo, la deducción del impacto que este aumento en la dinámica de inundación puede causar está condicionada por otros factores, como tipo de costa (las zonas bajas y arenosas son más vulnerables que las costas acantiladas, etc.).

***Agradecimientos***

Este trabajo ha sido financiado parcialmente a través de los proyectos GRACCIE (CSD2007-00067) del programa Consolider-Ingenio 2010, C3E (200800050084091), a través de la Oficina Española de Cambio Climático, y mediante el proyecto del Plan Nacional iMar21 (CTM2010-15009).

## REFERENCIAS

Abascal, A.J., Castanedo, S., y Medina, R., (2010). *GOS, un reanálisis de marea meteorológica de 60 años de alta resolución para el sur de Europa*. I Encuentro Oceanografía Física Española, Barcelona (España).

Camus, P., F. J. Méndez, R. Medina (2011). *A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas*. Coastal Engineering 58, Issue 9, Pages 851-862.

Cazenave A., Remy F. (2011). *Sea level and Climate: observation and causes of changes*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, vol 2, 347-662, 2011.

Church, J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck and J.X. Mitrovica (2004). *Estimates of the Regional Distribution of sea level Rise over the 1950 to 2000 Period*. Journal of Climate, 17, 2609-2625.

Coles, S. G. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer, 208 pp.

Dixon, M. J. y J. A. Tawn (1999) *The effect of non-stationarity on extreme sea-level estimation*. Appl. Stat., 48, 1999, 135-51.

Luceño, A., Menéndez, M., Méndez, F.J. (2006). *The effect of temporal dependence on the estimation of the frequency of extreme ocean climate events*. Proceedings of the Royal Society London Series A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 462, 1683-1697.

Menéndez M., Woodworth, P. L. (2010). *Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge dataset.* Journal of Geophysical Research. 115, C10011.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE*. Computers and Geosciences, 28, 929-937.

Pugh, D.T. (2004). *Changing sea levels. Effects of tides, weather and climate*. Cambridge University Press, 280pp.

Stockdon H. F., Holman R. A., Howd P. A., Asbury H., Sallenger Jr. (2006). *Empirical parameterization of setup, swash, and runup*. Coastal Engineering 53, 573–588.