



Universitat
de les Illes Balears

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

APROXIMACIÓN REGIONAL A LA INUNDACIÓN Y EROSIÓN DE LAS PLAYAS DE BALEARES EN EL SIGLO XXI

Pau Luque Lozano

Máster Universitario Física Avanzada y Matemática Aplicada

(Especialidad/Itinerario Fluidos Geofísicos)

Centro de Estudios de Postgrado

Año Académico 2019-20

Aproximación regional a la inundación y erosión de las playas de Baleares en el siglo XXI

Pau Luque Lozano

Trabajo de Fin de Máster

Centro de Estudios de Postgrado

Universidad de las Illes Balears

Año Académico 2019-20

Palabras clave del trabajo:

Impacto del cambio climático, subida del nivel medio del mar, ecenarios RCP, playas, propagación del oleaje, inundación costera, erosión costera, aproximación regional.

Nombre Tutor/Tutora del Trabajo **Marta Isabel Marcos Moreno**

Nombre Tutor/Tutora (si procede) **Lluís Gómez Pujol**

Nombre Tutor/Tutora (si procede) **Alejandro Orfila Förster**

Índice

1. Introducción	5
2. Elementos de los análisis	7
2.1. Las playas como objeto de estudio	7
2.2. Parámetros fisiográficos de las playas	7
2.3. Forzamientos físicos regionalizados: nivel del mar, <i>storm surges</i> y oleaje	11
3. Propagación del oleaje de aguas profundas a someras	16
3.1. Propagaciones numéricas con SWAN	18
3.2. Parametrización de los cambios en el oleaje y combinación de fuentes	21
3.3. Cálculo del <i>wave setup</i>	22
3.4. Cálculo de extremos	23
4. Inundación	25
4.1. Cálculo de la inundación permanente	26
4.2. Cálculo de la inundación episódica o extrema	27
4.3. Casos especiales	29
4.3.1. Áreas protegidas de los temporales	29
4.3.2. Áreas semi protegidas de los temporales	29
4.4. Ejemplo de resultados	31
4.4.1. Albufera de Menorca	31
4.4.2. Eivissa	32
4.4.3. Es Trenc	32
4.4.4. Pollença	32

5. Erosión	35
5.1. Modelo de erosión	35
5.2. Ajuste del modelo de erosión	39
5.3. Análisis de la erosión	42
5.4. Ejemplos de resultados	43
6. Conclusiones	49
7. Agradecimientos	50
A. Generación de series sintéticas de forzamientos para el estudio de la erosión	51
B. Acrónimos	55

1. Introducción

Las zonas costeras son de gran relevancia socio-económica ya que concentran gran parte de las actividades humanas, una alta densidad de población y son una de las mayores áreas de biodiversidad del planeta [Neumann et al., 2015]. Las costas sedimentarias, y más concretamente las playas, constituyen alrededor del 30 % del total de la línea de costa global. Además del valor ecosistémico, las playas son elementos de protección naturales de las costas frente a eventos extremos marinos [Vousdoukas et al., 2020].

Las playas se caracterizan por su gran variabilidad dinámica, respondiendo de forma relativamente rápida a los cambios del oleaje y, al mismo tiempo, sujetas a cambios de largo plazo en el que juegan un papel importante las complejas interacciones entre la morfodinámica y los forzamientos. Con el fin de mejorar la comprensión de los procesos físicos en las playas y poder anticiparse a los posibles cambios en su morfología en respuesta a forzamientos externos, es necesaria la monitorización y el análisis del estado de estos sistemas. En última instancia, esta información es relevante para fundamentar las decisiones de gestión costera.

Una de las consecuencias más visibles y potencialmente dañinas del cambio climático derivado de la actividad humana es el aumento paulatino del nivel medio del mar. El nivel del mar aumenta desde principios del siglo XX en respuesta al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y lo seguirá haciendo durante las próximas décadas y siglos [Pörtner et al., 2019]. Además, el cambio climático está ligado a variaciones en los patrones climáticos que controlan los regímenes de tormentas que afectan a las costas. Entre otros factores, cambios en el clima marítimo medio (altura de ola, período o dirección del oleaje) así como en el extremal, afectan a los procesos que gobiernan la dinámica de las playas. Es por ello que para disponer de una estrategia de adaptación de los usos y recursos costeros así como de mitigación de los efectos frente al cambio climático es necesario cuantificar los cambios futuros de estos forzamientos.

El objetivo del presente estudio es anticipar la evolución de las playas frente a forzamientos cambiantes consistentes con escenarios de cambio climático desde el punto de vista físico y desde una perspectiva regional. Concretamente, se presenta una metodología para la estimación de los cambios de las playas de las Islas Baleares durante el presente siglo. Para ello, se han utilizado los escenarios climáticos de evolución de emisiones conocidos como RCP-4.5 y RCP-8.5 (*Representative Concentration Pathways* [van Vuuren et al., 2011]). Los forzamientos considerados incluyen la subida del nivel medio del mar, las ondas de tormenta (*storm surges*) y el oleaje. Estos agentes afectan al estado de la playa mediante la inundación, la erosión y en el caso que haya suficiente espacio de acomodación, mediante el retranqueo del sistema playa-duna, modificando la línea de costa. Su impacto se ha cuantificado usando modelos numéricos de aplicación a escala local (de playa) y forzados a partir de salidas de modelos climáticos globales.

La evolución del nivel medio del mar a lo largo del siglo XXI se ha obtenido siguiendo la metodología de [Kopp et al., 2014]. Los forzamientos de *surges* y oleaje alrededor de las islas se han obtenido de un reanálisis numérico y un conjunto de proyecciones generados por el *Joint Research Centre (JRC)* [Vousdoukas et al., 2020], [Mentaschi et al., 2017]. Dado que el oleaje corresponde a los valores en aguas profundas, es necesario un trabajo previo para propagarlo hacia la costa antes de aplicar estos forzamientos conjuntamente a los modelos de inundación y erosión.

El presente documento se estructura de la forma siguiente. En la Sección 2 se presentan en detalle los datos y forzamientos utilizados en el estudio. En la sección 3 se describe la metodología de propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa, así como el cálculo del *wave setup* asociado a esas olas y la metodología para el cálculo de extremos. En la sección 4 se describe el modelado de la inundación. La sección 5 explica el modelado de la erosión. Finalmente, la sección 6 presenta un breve resumen de las conclusiones obtenidas durante la realización del trabajo. Además, se incluye un apéndice que detalla el método utilizado para generar series temporales sintéticas de oleaje y *surges*.

2. Elementos de los análisis

2.1. Las playas como objeto de estudio

El conjunto de playas analizado en las Islas Baleares consiste en 564 playas, que comprenden unos 124 km de longitud. Las playas se reparten de la siguiente manera: 192 playas en Mallorca, que comprenden 57 km; 132 playas en Menorca, que comprenden 21 km; 102 playas en Ibiza, que comprenden 20 km; y 38 playas en Formentera, que comprenden 26 km [Gómez-Pujol et al., 2019]. La distribución de las playas puede verse en las Figuras 1, 3 y 2. Dada la gran magnitud del conjunto y dado que no es posible realizar un estudio pormenorizado de cada una de las playas, se han aplicado simplificaciones que permiten una aproximación regional.

En el contexto de este trabajo es importante señalar que los métodos y aproximaciones utilizadas están orientadas únicamente a playas arenosas. Por ello, cuando en algún momento se obtengan resultados sobre otro tipo de terrenos, deberá tenerse en cuenta el alcance limitado de éstos. En concreto, en el estudio de inundación, realizamos análisis sobre zonas extensas que contienen las playas bajo estudio. En estos casos, la inundación que ocurre en zonas de la costa que no tienen una playa como interfaz tierra-mar no están bien caracterizados, y no deben tenerse en cuenta para sacar ningún tipo de conclusiones.

2.2. Parámetros fisiográficos de las playas

Las variables que se usan para describir las características de las playas son las siguientes (incluimos un croquis simplificado sobre morfología de playas en la Figura 4):

- Pendiente *foreshore* de las playas (β_f), obtenida a partir de medir la distancia entre la isóbata de 10 m y la línea de costa oficial, usando los datos de las cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina.
- Tamaño promedio del grano que conforma las playas (D_{50}). Para las playas de Menorca se han tomado los datos del estudio de [Gómez-Pujol et al., 2012]. Para el resto de islas, se han utilizado los datos relativos a los informes de calidad de las aguas de baño que realiza anualmente la Direcció General de Salut Pública del Govern Balear (documentos internos).
- Altura de berma de las playas (B), calculada utilizando las nubes de puntos de la primera cobertura LiDAR de 2014 del Instituto Geográfico Nacional. Estos datos tienen una resolución de 2 m, aunque en la malla de puntos bruta pueden encontrarse puntos de cota topográfica cada 20 cm.

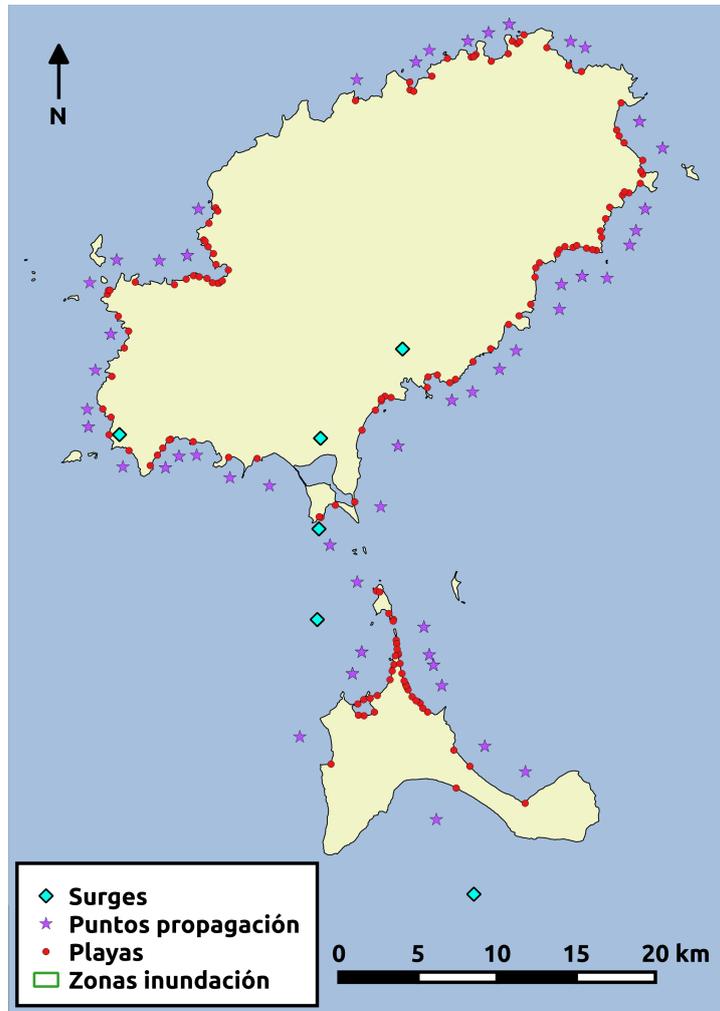


Figura 1: Mapa de las Pitiusas con la localización de las playas bajo (círculos rojos), de los puntos de referencia (estrellas violetas, marcados como “de propagación” en la imagen), de los puntos de datos de *surges* (rombos azules), y zonas de análisis de inundación descritas en la Sección 4 (rectángulos de perímetro verde).

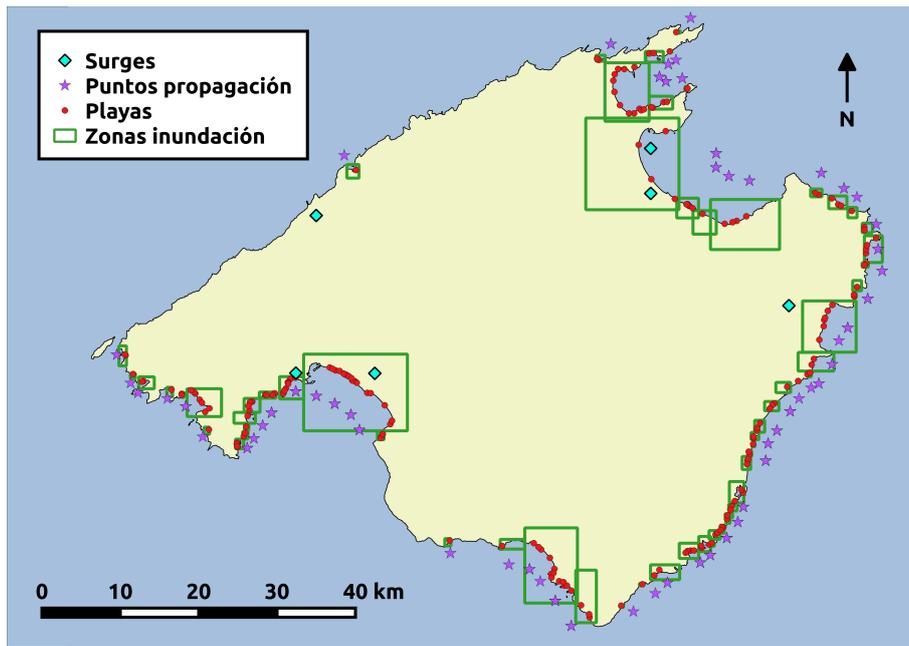


Figura 2: Mapa de Mallorca con la localización de las playas bajo (círculos rojos), de los puntos de referencia (estrellas violetas, marcados como “de propagación” en la imagen), de los puntos de datos de *surges* (rombos azules), y zonas de análisis de inundación descritas en la Sección 4 (rectángulos de perímetro verde).

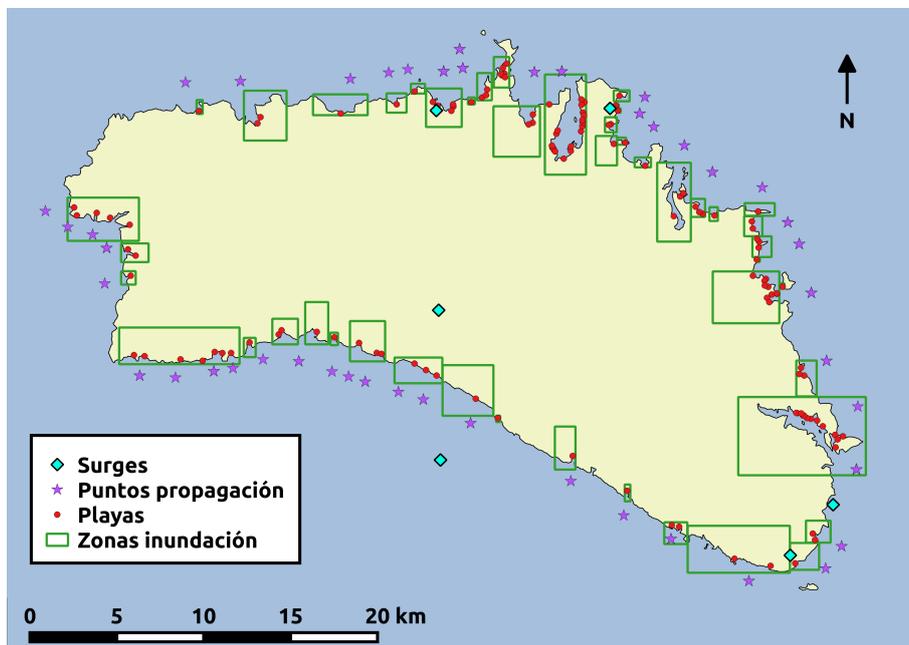


Figura 3: Mapa de Menorca con la localización de las playas bajo (círculos rojos), de los puntos de referencia (estrellas violetas, marcados como “de propagación” en la imagen), de los puntos de datos de *surges* (rombos azules), y zonas de análisis de inundación descritas en la Sección 4 (rectángulos de perímetro verde).

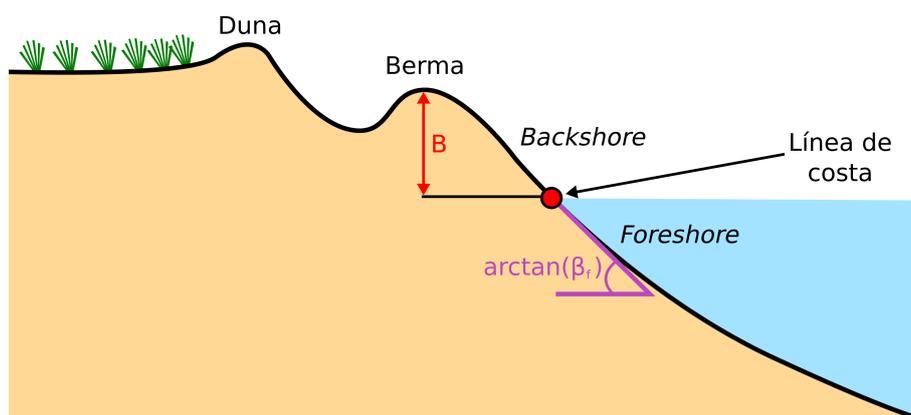


Figura 4: Croquis morfológico simplificado de una playa.

También ha sido necesario contar con información topográfica y batimétrica del archipiélago. Para la topografía, se ha utilizado el Modelo Digital de Superficies (MDS) de Baleares elaborado por SITIBSA ¹. Este MDS se materializa en forma de ráster que cubre la totalidad del archipiélago, con un ancho de píxel de 2 m. Ha sido confeccionado mediante vuelos de aviones equipados con sensores LiDAR (se basa en las mismas nubes de puntos LiDAR que las usadas para el cálculo de la altura de berma de las playas).

Para obtener la batimetría se han combinado tres fuentes de datos. Como fuente principal se han usado las batimetrías de las mallas de cómputo de SAPO (Sistema de Agitación Portuaria de Puertos del Estado y SOCIB, que proporciona las condiciones de oleaje operacional en aguas profundas en las Islas Baleares). Estas batimetrías consisten en tres mallas de alta resolución cerca de las islas y una malla de resolución inferior que cubre, además, la zona entre las islas. Éstas se han complementado con la batimetría del Mediterráneo Noroccidental del ICM-CSIC ², que tiene información para las zonas más alejadas de las islas. La profundidad se ha obtenido mediante interpolación lineal sobre los puntos de las mallas de cómputo que se han utilizado en el estudio, utilizando la función *griddata* de la librería *SciPy* en Python. Con la intención de caracterizar mejor las zonas cerca de la costa, también se han añadido los datos del modelo de elevación del terreno del Instituto Geográfico Nacional (que proporciona datos donde hay tierra emergida con un paso de malla de 200 m). Las características de las distintas fuentes de datos se muestran en la Tabla 1.

¹ https://ideib.caib.es/geoserveis/services/public/GOIB_Altimetria_IB/MapServer/WMSServer?request=GetCapabilities&service=WMS

²<https://gma.icm.csic.es/sites/default/files/geowebs/MCB/CBSmaps.htm>

Nombre	rango $X_{utm}[m]$	rango $Y_{utm}[m]$	paso de malla [m]
Malla Mallorca SAPO	[413794.4, 550294.4]	[4324849.1, 4431849.1]	500
Malla Menorca SAPO	[553131.1, 621081.1]	[4397974.3, 4446124.3]	450
Malla Pitiusas SAPO	[335394.6, 387144.6]	[4272973.8, 4336423.8]	450
Malla Balear SAPO	[286200.0, 630600.0]	[4262600.0, 4447400.0]	1400
Malla ICM	[238584.6, 735457.2]	[4261187.0, 4876242.1]	1000

Tabla 1: Descripción de la geometría de las fuentes de datos de batimetría. “Rango X_{utm} ” y “rango Y_{utm} ” se refiere al rango de *easting* y *northing* para los que las distintas fuentes proporcionan datos, en UTM31.

2.3. Forzamientos físicos regionalizados: nivel del mar, *storm surges* y oleaje

Las variables que se utilizan para caracterizar los forzamientos físicos que actúan sobre las playas son las siguientes:

- Oleaje, incluyendo altura significativa de ola (H_s), periodo de pico (T_p) y dirección de pico a una profundidad somera de referencia en cada playa, que se ha establecido a 30 m. El oleaje genera una sobre-elevación del nivel del mar, conocida como *wave setup* que es importante a efectos de inundación costera.
- *Storm surges* (ondas de tormenta), generadas por variaciones de la presión atmosférica y el viento.
- Marea astronómica. En general, no consideramos los efectos de esta magnitud en nuestro estudio, puesto que trabajamos en una región micromareal. Sin embargo, la hemos tenido en cuenta para calibrar el modelo de erosión, ya que en este proceso se requería ajustar el modelo para replicar de la forma más precisa posible datos reales. En este caso, hemos utilizado datos del mareógrafo más cercano.
- Nivel del mar en la costa, calculado como la suma de *setup*, *surges* y marea astronómica para el clima presente y añadiendo las proyecciones de aumento para el siglo XXI.

Las proyecciones de aumento de nivel del mar regional se han obtenido a partir de la metodología de [Kopp et al., 2014]. Las series, representadas en la figura 5, muestran la evolución bajo los dos escenarios considerados, RCP4.5 y RCP8.5. Las componentes que se incluyen en el aumento de nivel del mar son la expansión térmica del océano por absorción de calor así como la contribución del deshielo de glaciares y capas polares, todo ello regionalizado.

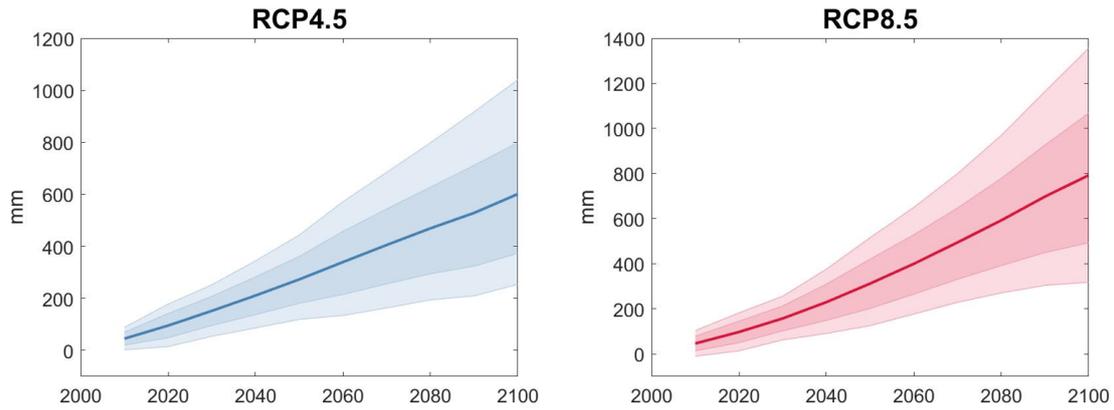


Figura 5: Proyecciones de aumento de nivel del mar bajo los escenarios climáticos RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) calculados según [Kopp et al., 2014]. Las zonas sombreadas representan la dispersión alrededor de la mediana (línea continua) correspondiente a los intervalos 5-95% y 17-83%.

Los datos de *surges* y oleaje en aguas profundas se han obtenido de simulaciones numéricas globales generadas en el JRC, de las cuales se han extraído los puntos de malla alrededor de las islas. El conjunto de simulaciones numéricas comprende un reanálisis del periodo 1979-2014, forzado con campos atmosféricos de la simulación ERA-Interim, y 6 proyecciones a lo largo del siglo XXI correspondientes a 6 modelos climáticos globales distintos [Vousdoukas et al., 2017], [Mentaschi et al., 2017]. Los puntos de malla de las simulaciones se representan en la figura 6. Tienen una resolución de aproximadamente 25 km cerca de las costas. La resolución temporal de las series de *surges* es de 6 horas mientras que la de las series de oleaje es de 3 horas.

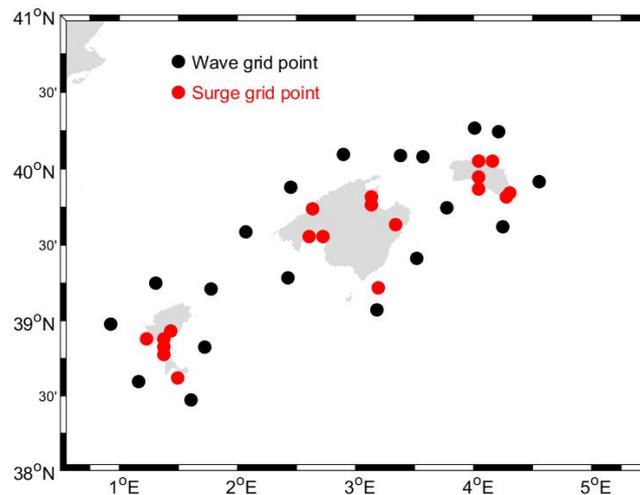


Figura 6: Puntos de malla extraídos de las simulaciones globales de *surges* (en rojo) y oleaje (en negro).

Con el fin de cuantificar los cambios proyectados en estas dos variables, se han comparado los valores extremos de *surges* y de altura significativa de ola (H_s) de finales del siglo (2070-2099) con los de su correspondiente simulación histórica (1970-1999). Las diferencias en los valores correspondientes a un periodo de retorno de 50 años se representan en las figuras 7 y 8 para las *surges* y H_s , respectivamente. Los mapas representan las diferencias promedio entre los 6 modelos y sus desviaciones estándar para cada uno de los puntos de malla. A partir de estos resultados concluimos que la incertidumbre en los cambios proyectados (representada aquí como la dispersión de los 6 modelos) es mayor que los propios cambios (el promedio) en casi todos los casos. Por lo tanto, a lo largo de este trabajo usaremos siempre las salidas de los reanálisis para caracterizar tanto el régimen medio como el extremal de los forzamientos de alta frecuencia.

Es importante señalar que los datos de oleaje se refieren siempre a aguas profundas y por tanto es necesario realizar una propagación hacia la costa para poder cuantificar sus valores en cada una de las playas de estudio. Esta parte de transformación del forzamiento se desarrolla en la siguiente sección.

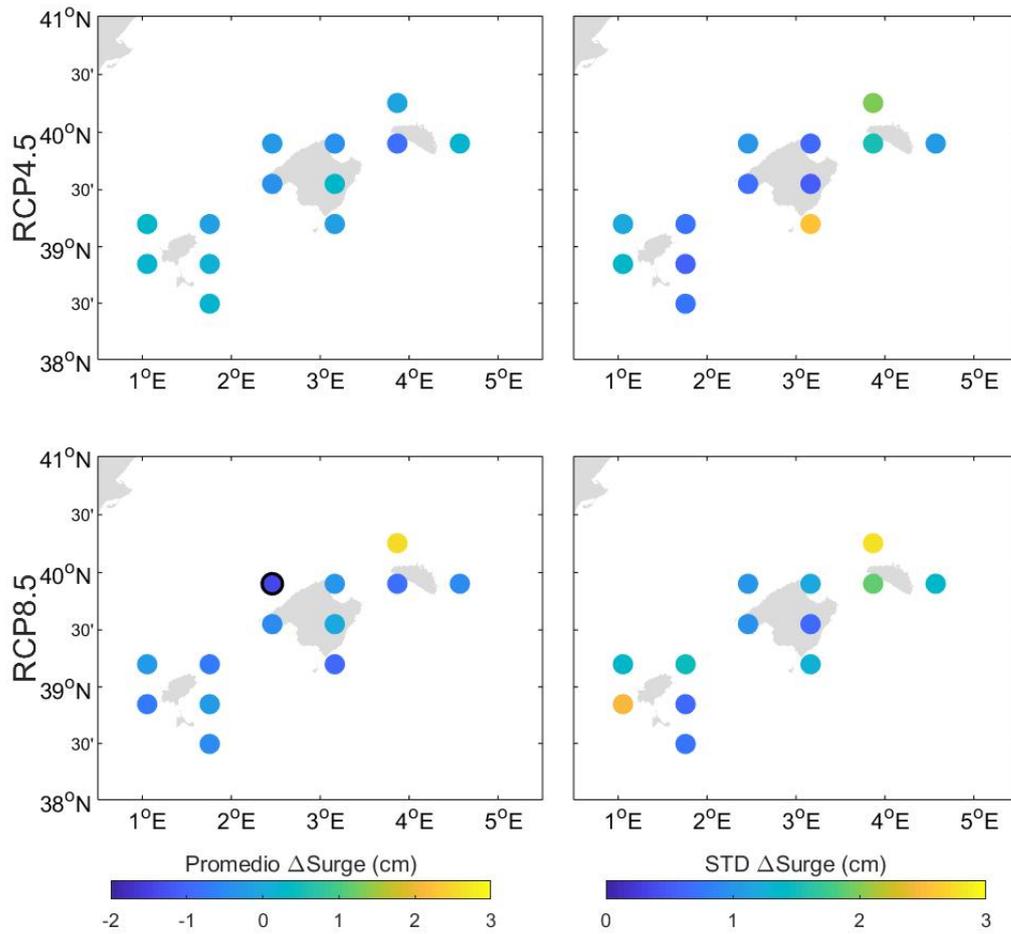


Figura 7: Cambios proyectados en el nivel de retorno de 50 años para las *surges* calculados como la diferencia entre las proyecciones en 2070-2099 y la simulación histórica en 1970-1999. La columna de la izquierda representa el promedio de los cambios en los 6 modelos y la columna de la derecha son las desviaciones estándar correspondientes, para los dos escenarios RCP4.5 (fila superior) y RCP8.5 (fila inferior). Los puntos señalados con un círculo negro indican que el cambio promedio es mayor que la dispersión dada por la desviación estándar.

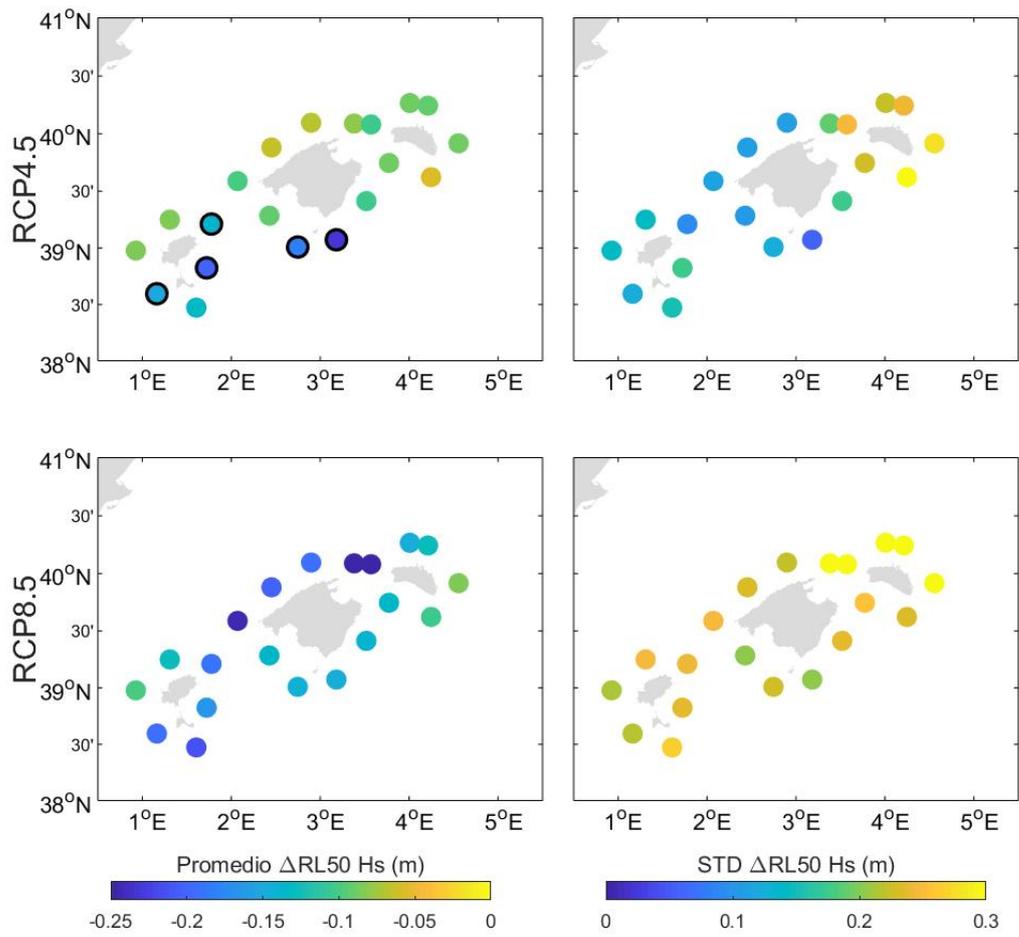


Figura 8: Como en la figura 7 pero para H_s .

3. Propagación del oleaje de aguas profundas a someras

Las series temporales de oleaje en aguas profundas descritas en la sección anterior no son representativas del oleaje que afecta a las playas en la costa. A medida que el oleaje se traslada hacia la costa sufre una serie de procesos físicos debido a la pérdida de profundidad (refracción, difracción y asomeramiento). En consecuencia, hemos usado el modelo espectral SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (<http://swanmodel.sourceforge.net/>) para propagar las series originales del reanálisis del oleaje hasta la costa. Se trata de un modelo del estado del arte y ampliamente utilizado por la comunidad científica.

Se ha definido, para cada playa, un punto de referencia cercano hasta el que se propagan las series de aguas profundas (véanse las Figuras 1, 2 y 3). Asumimos que el oleaje que se calcula para cada punto de referencia es representativo del que llega a la playa a la que se ha asociado, y lo usamos para calcular el *setup* y la altura de ola en el momento de la rotura para la playa asociada. La localización de estos puntos de referencia está determinada por la resolución de las mallas computacionales. Los puntos de malla más cercanos a las playas se han elegido con profundidades de entre 13 m y 60 m. Cuando existen playas cercanas entre sí se utiliza el mismo punto de referencia. En ocasiones las limitaciones computacionales y la resolución de la batimetría, la premisa de un punto de referencia cercano y representativo puede no ser válida. Mostramos un ejemplo en la Figura 9.

Dado que es computacionalmente inviable propagar numéricamente las series de datos de varias décadas del reanálisis, se ha seleccionado un conjunto de casos representativos del clima marítimo que se usarán para parametrizar los cambios en H_s entre mar abierto y costa en cada playa. Hemos asumido que el periodo de la ola queda inalterado por la propagación. Para la parametrización de la función de transferencia de H_s entre los puntos de datos en aguas profundas (descritos en la Sección 2.3) y un punto de referencia cercano a la costa, nos basamos en la conservación de energía. Siguiendo el desarrollo presentado en el apartado 4.8.3 de [Dean and Dalrymple, 1991] se puede escribir la relación entre estas alturas de ola como

$$\frac{H_r}{H_0} = G(h_r, T_p) F(\theta_0) \quad (1)$$

$$G(h_r, T_p) = \frac{g}{2\pi} \frac{T_p}{h_r} \sqrt{\frac{k_r h_r}{1 + \xi_r}} \quad (2)$$

donde H_r es la altura de ola en un punto de referencia cercano a la costa, H_0 es la altura de ola en aguas profundas, θ_0 es el ángulo de incidencia del oleaje en aguas profundas, $F(\theta_0)$ es una función que depende de dicho ángulo (indica cómo se curvan los frentes de onda entrantes debido a la batimetría, según convergen o divergen de los rayos asociados a los frentes de onda), $G(h_r, T_p)$ es

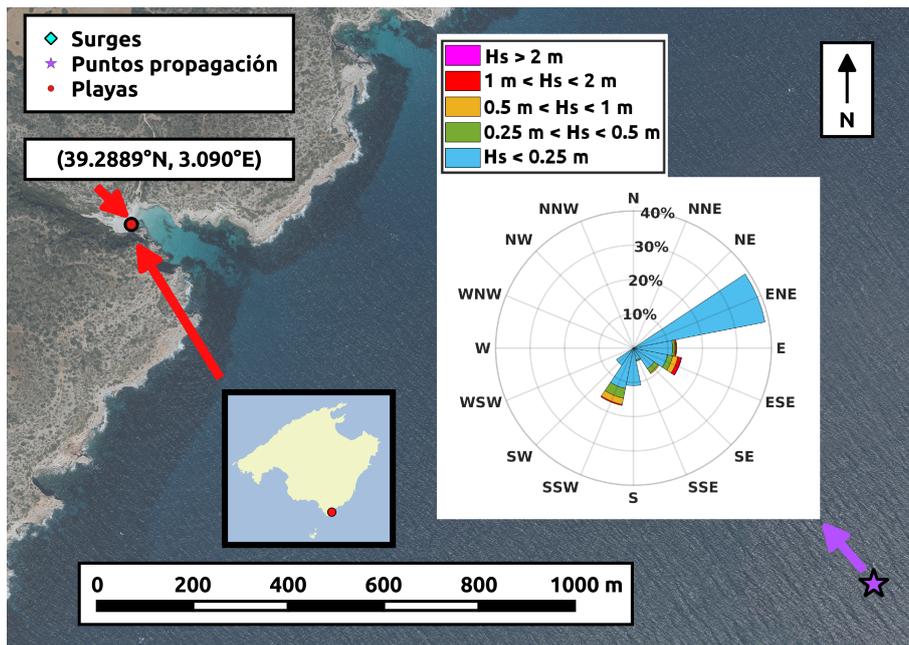


Figura 9: “Caló des Màrmols” (punto rojo) y su punto de referencia (estrella púrpura). El gráfico polar incrustado en la figura muestra la rosa de oleaje asociado al punto de referencia. Nótese que la playa tiene una bocana orientada hacia el sureste, con lo que las direcciones más frecuentes del oleaje presente en el punto de referencia (ENE y SSW) no pueden darse en la playa. Las flechas rojas indican la localización de la playa, dando su latitud y longitud y su posición sobre el mapa de Mallorca.

un factor que viene descrito por la ley de Green, g la aceleración de la gravedad, k_r es el número de onda en el punto de referencia, h_r es la profundidad en el mismo punto cercano a costa y $\xi = 2(k_r h_r) / \sinh(2k_r h_r)$. El factor $G(h_r, T_p)$ depende de la profundidad del punto de referencia cercano a la costa (h_r) y del periodo de la ola (T_p). El número de onda (k_r) es función de la profundidad (h_r) y del período del oleaje (T_p).

Por tanto, es posible calcular la altura de ola en el punto de referencia cercano a la costa si se conocen los parámetros del oleaje en aguas profundas (H_0 , T_p y θ_0), la profundidad del punto de referencia, y el efecto refractivo de la batimetría entre los dos puntos ($F(\theta_0)$). Puesto que el punto de referencia se puede escoger arbitrariamente y la serie de estados del mar en aguas profundas son conocidas, la única limitación para obtener el oleaje en los puntos de referencia de las playas es estimar la forma de $F(\theta_0)$, para lo que se utilizan propagaciones numéricas, como se explicará a continuación.

3.1. Propagaciones numéricas con SWAN

Se han definido 3 mallas computacionales sobre las que se aplica el modelo de propagación SWAN, una para Mallorca, una para Menorca, y otra para las Pitiusas (Figura 10), de tal manera que cada fachada marítima de las islas esté asociada a uno de los lados de las mallas. A su vez, cada lado de la malla está asociado a uno de los puntos de datos del oleaje en aguas profundas presentados en la Figura 6. Ha sido necesario extrapolar la batimetría para la zona al sureste de Formentera (enmarcada en violeta en la Figura 10), debido a la falta de datos sobre esta zona de la malla de las Pitiusas.

Para las propagaciones asumimos que el punto de oleaje es representativo de toda la arista del rectángulo correspondiente. Las coordenadas de los puntos de datos y de las mallas se especifican en las tablas 2 y 3, respectivamente.

A cada playa puede llegar oleaje procedente de distintas direcciones (*i.e.* asociado a más de un punto de datos). Por tanto, consideramos siempre cuatro posibles fuentes de datos; esto implica realizar cuatro grupos de propagaciones por cada malla, propagando en cada uno oleaje desde una arista distinta. Los datos resultantes de dichos grupos de propagaciones se combinarán más tarde para cada una de las playas (véase la Sección 3.2).

Los casos propagados que se utilizan para la parametrización de la función de transferencia de los parámetros del oleaje han sido construidos de la siguiente manera: para cada punto de datos en aguas profundas se dividen los estados de mar de toda la serie temporal original en función de su dirección de pico (θ_0), de forma que queden agrupados por octantes (N, NE, E, SE...). Los casos propagados son los asociados a los máximos mensuales de altura de ola de cada uno de los octantes.

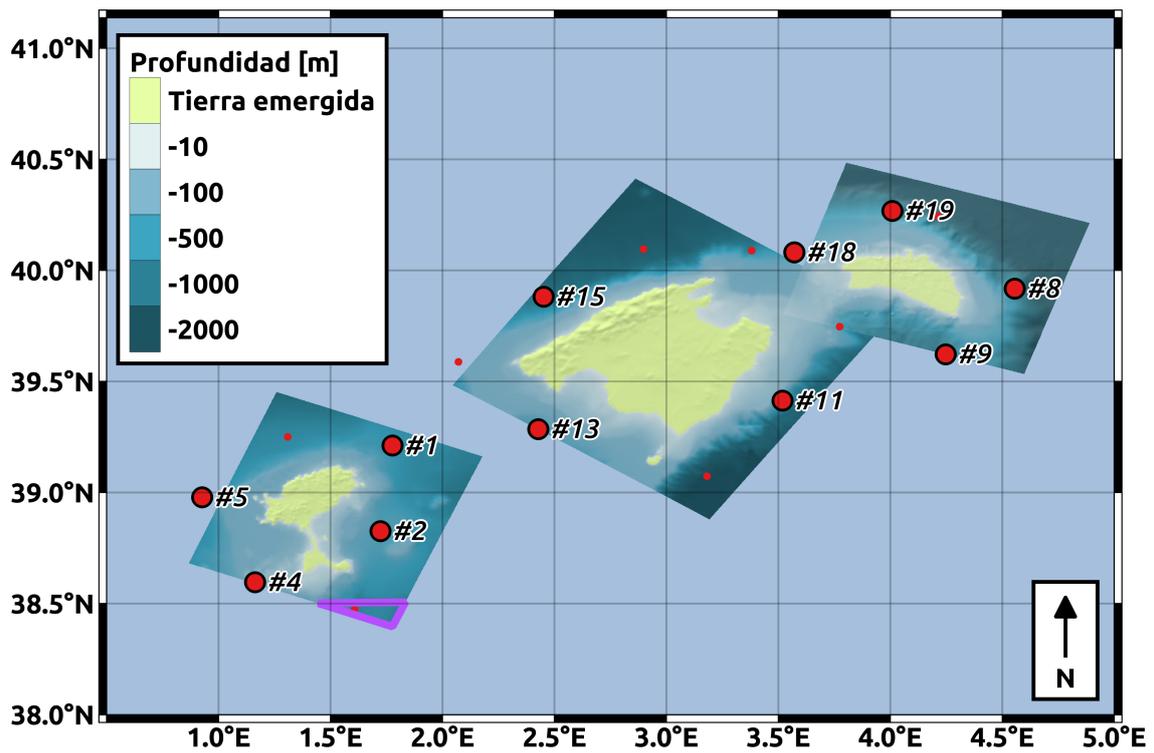


Figura 10: Mallas computacionales para la propagación del oleaje. El mapa de color en las mallas representa la profundidad asociada a cada punto de malla. El conjunto de puntos de datos de oleaje del reanálisis se muestran en rojo, mientras que los puntos utilizados en la propagación se muestran en un tamaño mayor e identificados con un número. El triángulo violeta indica la zona para la que se ha definido la batimetría de forma artificial, extrapolando los datos disponibles.

ID	$X[m]$	$Y[m]$
1	394390	4340922
2	389154	4298176
4	340018	4273497
5	320389	4316389
8	632963	4419755
9	607066	4386503
11	544646	4362774
13	450647	4348525
15	453122	4414704
18	548727	4436896
19	585815	4457921

Tabla 2: Posición (en coordenadas UTM31N) de los puntos de datos del reanálisis de oleaje. La columna ID indica el número que identifica al punto de datos en la Figura 10

Malla	$P_1[m]$	$P_2[m]$	$P_3[m]$	$P_4[m]$	$P_5[^\circ]$	$P_6[m]$
Mallorca	418350.2	4370945.9	119000.0	124000.0	-34.377	500.0
Menorca	544965.3	4406099.0	96500.0	79000.0	-17.189	500.0
Pitiusas	314781.3	4283840.3	85000.0	91500.0	-22.918	500.0

Tabla 3: Definición de las mallas de cálculo: Los parámetros describen un rectángulo rotado de la siguiente manera. P_1 indica la coordenada X de la esquina inferior izquierda del rectángulo antes de ser rotado. P_3 indica la longitud del lado del rectángulo paralelo al eje X antes de ser rotado. P_2 indica la coordenada Y de la esquina inferior izquierda del rectángulo antes de ser rotado. P_4 indica la longitud del lado del rectángulo paralelo al eje Y antes de ser rotado. P_5 indica el giro en grados sexagesimales que se le aplica al rectángulo para definir la orientación de la malla (en el sentido contrario a las agujas del reloj). P_6 indica el paso de malla; éste es uniforme y el mismo en ambas direcciones.

Como se verá en la siguiente sección, estas propagaciones son suficientes para caracterizar el factor $F(\theta_0)$ que aparece en la Ecuación 1.

3.2. Parametrización de los cambios en el oleaje y combinación de fuentes

Para cada par de alturas de ola (en aguas profundas y propagada hasta el punto de referencia) calculamos el factor de Green según la Ecuación 2. También se puede calcular el factor angular $F(\theta_0)$ de la Ecuación 1, usando el factor de Green anterior y los valores de altura de ola en el punto de referencia y en mar abierto. De esta manera, construimos un conjunto de pares “ (θ_0, F) ” que nos permiten estimar la forma del factor angular $F(\theta_0)$. Para obtener el factor direccional asociado a cualquier dirección de entrada, ajustamos el conjunto de pares “ (θ_0, F) ” a una curva definida, tras varios tests de sensibilidad, como:

$$F_{fit}(\theta_0) = p_1 \left(1 - \left(\frac{\theta_0 - p_2}{\pi} \right)^{p_3} \right)^{p_4} \quad (3)$$

donde las cantidades (p_1, p_2, p_3, p_4) son parámetros ajustados mediante mínimos cuadrados. Mostramos los resultados para uno de estos ajustes en la Figura 11.

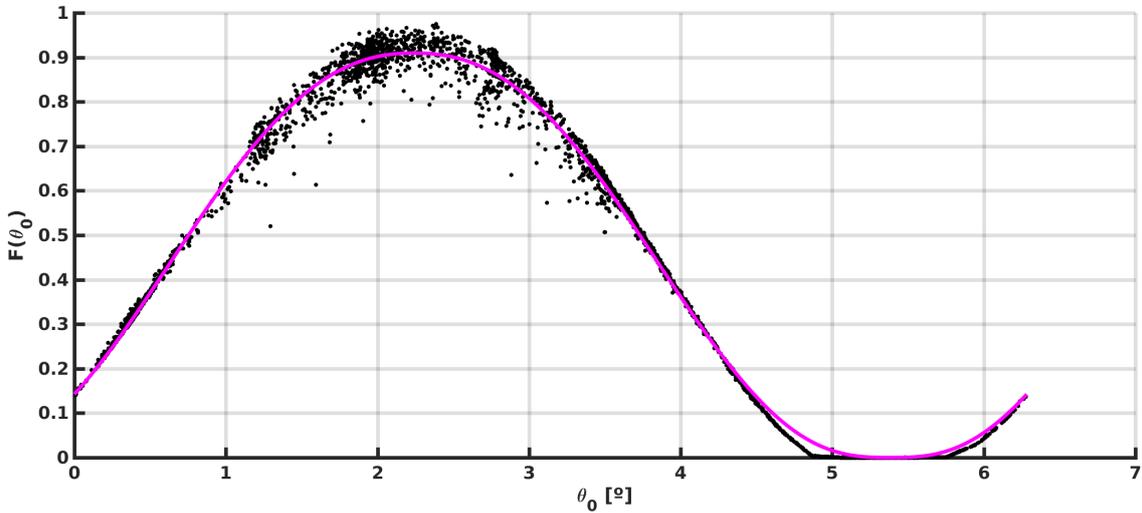


Figura 11: Factor $F(\theta_0)$, calculado utilizando los datos del oleaje propagado numéricamente (puntos negros) y ajustado mediante la curva descrita por la Ecuación 3 (línea violeta). En el eje horizontal se representa la dirección del oleaje en aguas profundas, y en la vertical el valor del factor de ángulo calculado para cada propagación.

Una vez estimado el factor de dirección en cada playa, se calcula la serie temporal completa de oleaje en el punto de referencia usando la ecuación 1, para la cual ya conocemos todos los términos.

Respecto a la dirección del oleaje se han utilizado los pares de dirección de pico en aguas profundas y en el punto de referencia (resultantes de la propagación numérica) para construir una aproximación al cambio de la dirección de pico durante la propagación. Para ello se han dividido las direcciones de pico en aguas profundas en intervalos de 1° y se ha calculado la media circular (ángulo del promedio de exponenciales complejas) de las direcciones de pico en el punto de referencia asociadas. Para evitar el efecto del oleaje de pequeña amplitud, cuya dirección puede quedar mal caracterizada, hemos considerado sólo los datos asociados a una altura significativa mayor que 10 cm. Esta relación se usa para generar cuatro series (una por cada punto de datos en aguas profundas) tri-horarias completas de la dirección de pico del oleaje en cada punto de referencia.

Como se ha mencionado antes, asumimos que las series de periodos de pico en el punto de referencia correspondientes son idénticas a las de periodos de pico en aguas profundas del punto de datos correspondiente. Como resultado de todo el proceso se obtienen 4 tríadas de series temporales (H_s, T_p, θ_p) que se combinan considerando en cada paso de tiempo la que presenta el valor máximo de altura de ola.

3.3. Cálculo del *wave setup*

Usando el oleaje obtenido en los puntos de referencia mediante la propagación del oleaje, calculamos la sobreelevación (*setup*) que éste produce en cada una de las playas. Para ello nos basamos en la parametrización empírica de Stockdon [Stockdon et al., 2006], en la que el *setup* $\langle \eta \rangle$ puede calcularse a partir de la altura significativa de ola en aguas profundas H_0 , la longitud de onda en aguas profundas L_0 y la pendiente de la playa β_f de la forma:

$$\langle \eta \rangle = 0.35 \beta_f \sqrt{H_0 L_0}. \quad (4)$$

El valor 0.35 que aparece en esta ecuación es una constante que proviene de ajustar a una recta un conjunto de medidas experimentales. La longitud de onda en aguas profundas L_0 depende exclusivamente del periodo del oleaje T_p , tal como indica la Ecuación 5:

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T_p^2 \quad (5)$$

Sin embargo, esta parametrización no incluye el cambio en la dirección del oleaje durante su propagación desde aguas profundas hasta la costa; es decir, asume que la ola llega perpendicular. Esta premisa no es realista en nuestro caso y, por ello, hemos modificado la ecuación de Stockdon para utilizar la altura de ola del punto de referencia, e incorporar así la información de la propagación. Por tanto, el *setup* se expresa como:

$$\langle \eta \rangle = \Gamma \beta_f \sqrt{H_r L_0} \quad (6)$$

donde H_r indica la altura significativa de ola en el punto de referencia y Γ un factor constante a determinar. Teniendo en cuenta las dos expresiones, los coeficientes 0.35 y Γ , se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$0.35 \approx \Gamma \sqrt{\frac{H_{ref}}{H_0}} \quad (7)$$

Si aislamos el factor Γ en esta última ecuación podemos estimar su valor para cada punto de referencia utilizando el conjunto de pares de alturas de ola en aguas profundas (H_0) y propagadas (H_r). Puesto que para cada punto de referencia disponemos de cuatro pares de dichas series (una por cada punto de datos en aguas profundas), estimamos cuatro valores para el factor Γ y calculamos cuatro series temporales de *setup* independientes para cada punto de referencia, que luego combinaremos. Para realizar dichas estimaciones del factor Γ , debe de tenerse en cuenta tan sólo el oleaje que llega al punto de referencia. Es decir, deben descartarse los pares de altura de ola que presenten un cociente demasiado pequeño, puesto que no se puede extraer información sobre el factor Γ de éstos (división por un número cercano a cero).

Más detalladamente, el proceso que hemos utilizado para estimar el factor Γ asociado a cada punto de referencia y punto de datos en aguas profundas es el siguiente: en primer lugar, descartamos todos los pares de alturas de ola que presenten un cociente H_r/H_0 inferior a 0.05. En segundo lugar, calculamos la arcotangente asociada a todos los cocientes H_r/H_0 restantes, lo cual indica el ángulo que forma la recta que definen los pares (H_0, H_r) con el eje $H_r = 0$. En tercer lugar, calculamos la media de esos ángulos. Finalmente, asignamos el valor de la tangente de dicho ángulo promedio como estimación del factor Γ .

De esta manera obtenemos cuatro series temporales de *setup* para cada playa, al combinar su pendiente (β_f) junto con los cuatro factores Γ que hemos obtenido para su punto de referencia y con las cuatro series de alturas de ola en dicho punto de referencia, según indica la Ecuación 6. Interpretamos estas cuatro series temporales de *setup* como contribuciones al mismo fenómeno provenientes de las cuatro fachadas marítimas de la isla y, por tanto, para obtener el total sumamos dichas contribuciones resultando en una única serie de *setup* para cada playa.

3.4. Cálculo de extremos

El régimen extremal se determina a partir de la metodología de picos sobre umbral (POT, por sus siglas en inglés) en la que se seleccionan los valores de la serie que superan un cierto valor, definido

en nuestro caso por el percentil 99 de altura de ola significativa combinada que se ha obtenido según explica la Sección 3.2. Para asegurar la independencia entre episodios extremos se requiere una separación de al menos 3 días entre sí. La distribución de picos de altura de ola se ha ajustado a una función de distribución de Pareto Generalizada (GPD) y se han determinado los parámetros de la distribución mediante máxima verosimilitud.

Además de caracterizar la intensidad (o amplitud) de los episodios extremos, se ha usado la serie de excedencias sobre el umbral para determinar las duraciones promedio de los eventos extremos.

4. Inundación

En esta sección distinguiremos dos tipos de inundación. En primer lugar tenemos la inundación permanente, inducida por la subida paulatina del nivel medio del mar (véase la Sección 2.3). El aumento de nivel medio del mar produce un retroceso continuado de la línea de costa que, a su vez, aumenta la exposición y vulnerabilidad ante los efectos de los temporales marinos. El segundo tipo de inundación considerado es la inundación temporal (o extrema) generada por episodios extremos en las componentes de alta frecuencia del nivel del mar, asociados a dichos temporales marinos. En concreto, consideramos la suma de contribuciones del *setup* y las *surges*. No consideramos la marea astronómica, puesto que en nuestra región alcanza magnitudes pequeñas, especialmente al compararla con las del *setup* y las *surges* durante episodios de tormenta.

Muchas de las playas de interés son adyacentes a zonas urbanas y puertos. En estos casos es muy importante poder caracterizar las viviendas y demás obstáculos de pequeña escala que el mar pueda encontrarse durante la inundación extrema, así como los posibles caminos que pueda utilizar para propagarse (como calles y cursos de torrentes). Por ello, en ambos casos, hemos combinado los forzamientos locales con información topográfica de alta resolución.

Cada proyección de aumento de nivel medio del mar bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 está asociada a un intervalo de confianza que caracteriza su incertidumbre (Figura 5). Hemos considerado dos horizontes temporales correspondientes a los años 2050 y 2100. Los valores de los rangos de las proyecciones para ambos escenarios y periodos se indican en la Tabla 4. Dado que las proyecciones son similares para mitad de siglo, se han considerado solamente las del escenario RCP8.5, tal y como se indica en la tabla. La inundación permanente se ha calculado para los 6 valores indicados, con el fin de obtener un rango de los impactos esperados por la sumersión de las zonas de costa. Las nuevas líneas de costa generadas en cada uno de estos casos son la base a partir de la cual se introducen los forzamientos correspondientes a los episodios extremos.

Debido al alto coste computacional que implica generar las inundaciones a alta resolución espacial, ha sido necesario delimitar las zonas de estudio, para lo cual se han agrupado playas cercanas y evaluado los impactos separadamente. Mediante la inspección visual del mapa topográfico descrito con anterioridad y de la línea de costa (por medio de un registro de vídeo de vuelos sobre el perímetro de todas las islas del archipiélago), se han identificado las zonas potencialmente inundables en el entorno de las playas. Calculamos los efectos de la inundación exclusivamente sobre estas zonas.

ESCENARIOS

Sin subida del mar	Con subida del mar					
0 cm	RCP-4.5		RCP-8.5		AÑO	
	Lim. inf.	Lim. sup.	Lim. inf.	Lim. sup.		
	16.3 cm	33.1 cm	18.0 cm	36.1 cm		2050
	32.4 cm	79.9 cm	46.1 cm	103.1 cm		2100

Tabla 4: Proyecciones de aumento de nivel medio del mar para los dos horizontes temporales considerados (años 2050 y 2100). Los casos en rojo no se consideran por la similitud entre ambos escenarios.

4.1. Cálculo de la inundación permanente

La inundación permanente es el resultado de inundar todas las cotas que estén por debajo del nivel medio del mar considerado. Sin embargo, se dan algunas situaciones que requieren un análisis manual más detallado. Éstas incluyen canales que no quedan bien representados por el modelo de elevaciones porque su anchura es inferior a la resolución del mismo, zonas planas cuya cota coincide aproximadamente con el nivel del mar, barreras elevadas pero demasiado estrechas como para ejercer de protección efectiva contra el mar (por ejemplo los muros que separan el jardín de una vivienda de la calle), masas de agua interiores que están mal caracterizadas en el modelo de elevaciones (la elevación de las zonas correspondientes se obtiene por interpolación de las elevaciones del terreno colindante). En todos estos casos se ha asegurado manualmente que la conectividad entre zonas inundables queda bien representada. Además se ha aplicado un algoritmo de *flood fill*³ para eliminar las zonas que no están conectadas con el mar superficialmente.

El resultado del proceso de inundación permanente es una máscara que indica qué píxeles del ráster de elevaciones quedan inundados y cuáles no. Finalmente, se aplica una última corrección que consiste en eliminar de la máscara de inundación las zonas de tierra que son demasiado pequeñas, es decir, las formadas por una cantidad de píxeles menor que cierto umbral. El umbral se ha fijado en 100 píxeles (400 m²) si toda la zona sobresale menos de 10 cm respecto del nivel medio del mar, y 30 píxeles (120 m²) en caso contrario. Mediante esta última corrección se obtiene una máscara de inundación suave, de la que se extrae la nueva línea de costa resultado de la inundación permanente (identificada a partir de los puntos de la máscara que no están inundados pero que tienen un primer

³También conocido como “relleno por difusión”, este tipo de algoritmos detecta todos los píxeles del mismo color que un píxel inicial, que no están separados por píxeles de otro color [Rogers, 1998].

vecino que sí lo está).

4.2. Cálculo de la inundación episódica o extrema

A diferencia de la inundación permanente, la inundación temporal debido a un evento extremo tiene una duración entre unas pocas horas y unos pocos días, durante la cual el nivel del mar aumenta rápidamente y la masa de agua se propaga tierra adentro, para luego retroceder. Para calcular esta inundación transitoria se ha aplicado el modelo numérico LISFLOOD de la Universidad de Bristol [Bates et al., 2010], que implementa las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas para aguas someras (SWE, por sus siglas en inglés), en su versión uno-dimensional (ecuaciones de Saint-Venant). Presentamos dichas ecuaciones en el Cuadro 1.

ecuación de continuidad	$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$
ecuación del momento (componente x)	$\frac{\partial q_x}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{h^{7/3}} q_x q_x = 0$
ecuación del momento (componente y)	$\frac{\partial q_y}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{h^{7/3}} q_y q_y = 0$

Cuadro 1: Ecuaciones de Saint Venant extendidas a dos dimensiones. η indica la altura de la superficie libre del agua, q_x indica el caudal de agua en dirección oeste-este, q_y indica el caudal en dirección sur-norte, h es la profundidad de la columna de agua, n es el parámetro de Manning.

El modelo se implementa sobre la malla del modelo digital de elevaciones considerando la formulación de Manning para calcular la fricción de fondo. La discretización que utiliza el modelo requiere introducir difusión en las ecuaciones de Saint-Venant, controlada por un factor de peso (simbolizado por la variable θ en el modelo), que se ha fijado como 0.9 para todas las simulaciones. El número de Courant se ha fijado a 0.7.

El modelo de inundación requiere como entradas la malla de elevaciones del terreno, los valores del parámetro de Manning (fricción) en cada punto, las condiciones iniciales de la profundidad del agua en cada punto de malla y los forzamientos. Para el parámetro de Manning, utilizamos un valor constante de 0.06, el cual consideramos un valor intermedio dentro del rango de valores posibles. Como forzamiento se ha impuesto la variación del nivel del mar de un episodio extremo tipo, que describimos en el siguiente párrafo. Se impone esta condición sobre la línea de costa externa, sin incluir aquellos puntos que estén tras un camino muy estrecho tales como canales, torrentes, bahías

muy cerradas, etc. La clasificación entre puntos de línea de costa internos y externos se ha decidido de forma manual. La serie de nivel del mar utilizada contiene las contribuciones de la *surge* y del *wave setup*.

La variación del nivel del mar durante un episodio extremo típico se define como un aumento lineal desde el nivel medio del escenario considerado hasta el valor correspondiente a un nivel de retorno de 100 años, seguido de una bajada lineal hasta el nivel medio considerado. Esta aproximación se basa en la observación de que las tormentas definidas como los excesos sobre un umbral siguen una evolución aproximadamente triangular (véanse la Sección 3.4 y la Figura 12). La duración del episodio extremo tipo se ha definido como la mediana de las duraciones de los eventos extremos en la serie temporal de nivel del mar de la playa correspondiente.

En las zonas inundables que contienen más de una playa se ha utilizado un forzamiento común, forzando con la media de las series de nivel del mar de todas las playas contenidas en la zona. Esta media es ponderada, donde el peso que se le da al nivel del mar de cada playa es proporcional a la longitud de ésta.

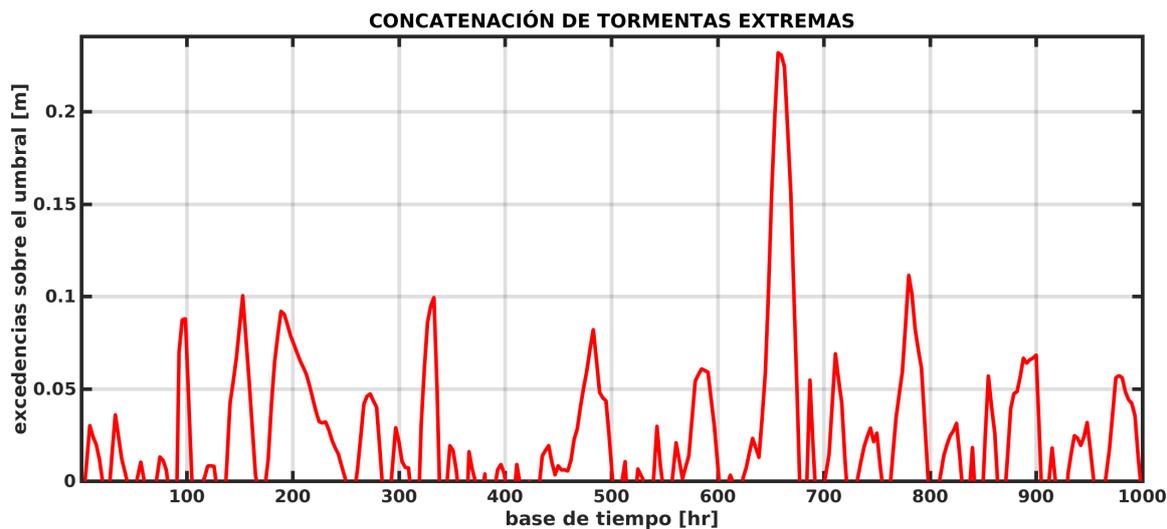


Figura 12: Excedencias (incrementos de nivel del mar respecto del umbral) para las primeras tormentas extremas que se observan en una de las playas del estudio, en metros. Las sucesivas tormentas extremas se han concatenado una detrás de la otra. Así pues, el valor absoluto en el eje horizontal no tiene ninguna relevancia. Tan sólo los intervalos sobre este eje aportan alguna información (en concreto, permiten ver la duración de cada uno de los fragmentos, en horas).

En cada localización se simula la duración de la tormenta más un día, de forma que nos aseguramos que la inundación ha llegado a su máximo. El resultado es una máscara, similar a la del cálculo de inundación permanente, que indica qué puntos del ráster de elevaciones han quedado inundados durante el evento extremo simulado.

4.3. Casos especiales

Dentro del conjunto de zonas de inundación que hemos definido, existen un par de particularidades que deben ser consideradas.

4.3.1. Áreas protegidas de los temporales

Existen zonas que se encuentran resguardadas en su práctica totalidad del oleaje incidente. En estos casos, el único forzamiento marino que puede llegar hasta ellas es el de las *surges*. Por ello, en estos casos no se ha considerado el *setup* del oleaje. Concretamente, esto ocurre:

- En Mallorca en las zonas del puerto de Sóller, el puerto de Manacor, Portocolom, Cala Ferrera, Cala Mondragó, Cala Xinxell y el puerto de Andratx.
- En Menorca en las zonas del Port de Sanitja, Fornells, el Arenal d'en Castell, Montgofra y el puerto de Maó
- En Ibiza en la zona del puerto de Sant Miquel.

4.3.2. Áreas semi protegidas de los temporales

Observamos la existencia de zonas que presentan un comportamiento mixto: parte de su costa queda expuesta al oleaje que llega de alta mar, pero otra parte queda resguardada de éste. Éstas son zonas extensas, con grupos de playas bien diferenciadas y generalmente conteniendo un puerto. Cada caso debe ser analizado por separado, aunque aquí no se ha hecho para todos por limitaciones de tiempo. Como ejemplo metodológico, hemos escogido la zona de la ciudad de Eivissa y el norte de Formentera (puerto de la Savina y estanques) para ilustrar la aplicación.

Primero, hemos clasificado la costa de las zonas de ejemplo en diferentes subzonas. Cada subzona se ha forzado con una tormenta con una evolución temporal triangular y un valor máximo diferente, aunque de la misma duración. Hemos utilizado las pendientes de las playas de la costa expuesta de cada subzona para calcular el *setup* en estas, mientras que en las zonas resguardadas (puertos e interior de "l'Estany des Peix") hemos utilizado sólo las *surges*. En la Figura 13 presentamos los puntos de la línea de costa que se usan para forzar la simulación de inundación extrema en la ciudad de Eivissa representados de distinto color en función de la subzona a la que se han asociado. En la Figura 14 presentamos lo mismo para la zona del norte de Formentera.



Figura 13: Puntos de la línea de costa usados para forzar las simulaciones en la zona de inundación de la ciudad de Eivissa para uno de los casos de análisis. Los distintos colores indican las distintas subzonas que hemos definido. Los círculos rojos indican la posición de las playas consideradas en el proyecto. El número que acompaña cada punto rojo es la pendiente (β_f) de esa playa. Los números de colores indican la pendiente considerada en el cálculo del *setup* en cada subzona.

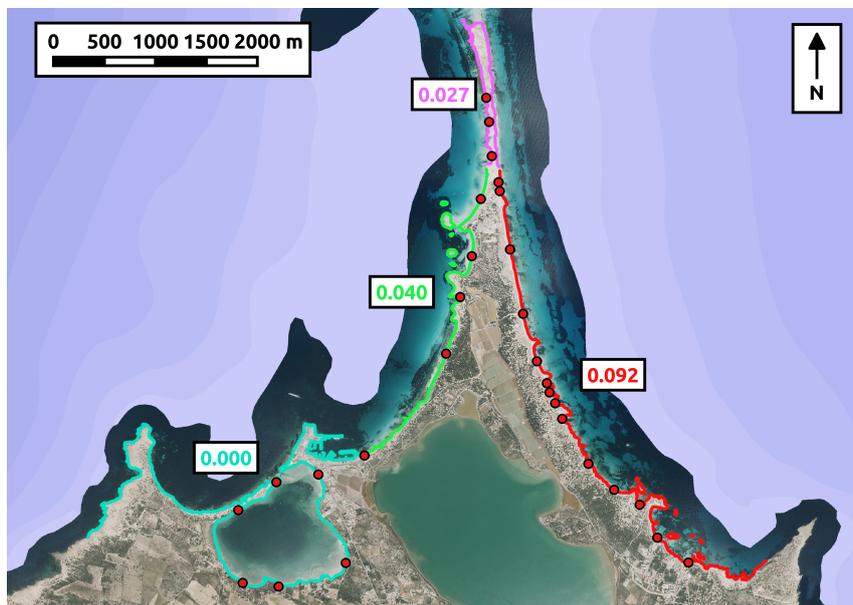


Figura 14: Puntos de la línea de costa usados para forzar las simulaciones en la zona de inundación del norte de Formentera, para uno de los casos de análisis. Los distintos colores indican las distintas subzonas que hemos definido. Los círculos rojos indican la posición de las playas consideradas en el proyecto. Los números de colores indican la pendiente considerada en el cálculo del *setup* en cada subzona.

4.4. Ejemplo de resultados

A continuación presentamos algunos ejemplos de los resultados obtenidos en la inundación, con la intención de mostrar las salidas que hemos descrito en la metodología, así como para destacar algunas problemáticas.

4.4.1. Albufera de Menorca

Los resultados de la inundación permanente se representan en la Figura 15. En este caso la extensión de la inundación extrema es muy pequeña, debido a la protección de la playa de la entrada de la Albufera. Es notable la gran extensión de la inundación permanente para el nivel más bajo (18 cm) debido a que la Albufera presenta terrenos muy planos y con una cota muy baja. Recomendamos interpretar con precaución las zonas extensas de cotas bajas ya que el error del modelo digital de terreno puede ser relativamente mayor (por ejemplo, puede confundirse fácilmente terreno emergido y sumergido, y las zonas con vegetación densa en la interfaz entre tierra y agua pueden dificultar la extracción de datos correctos). La Figura 15 muestra con claridad el aumento de zonas inundadas para subidas del nivel medio del mar más altos (79 cm y 103 cm), que consideramos más fiable.

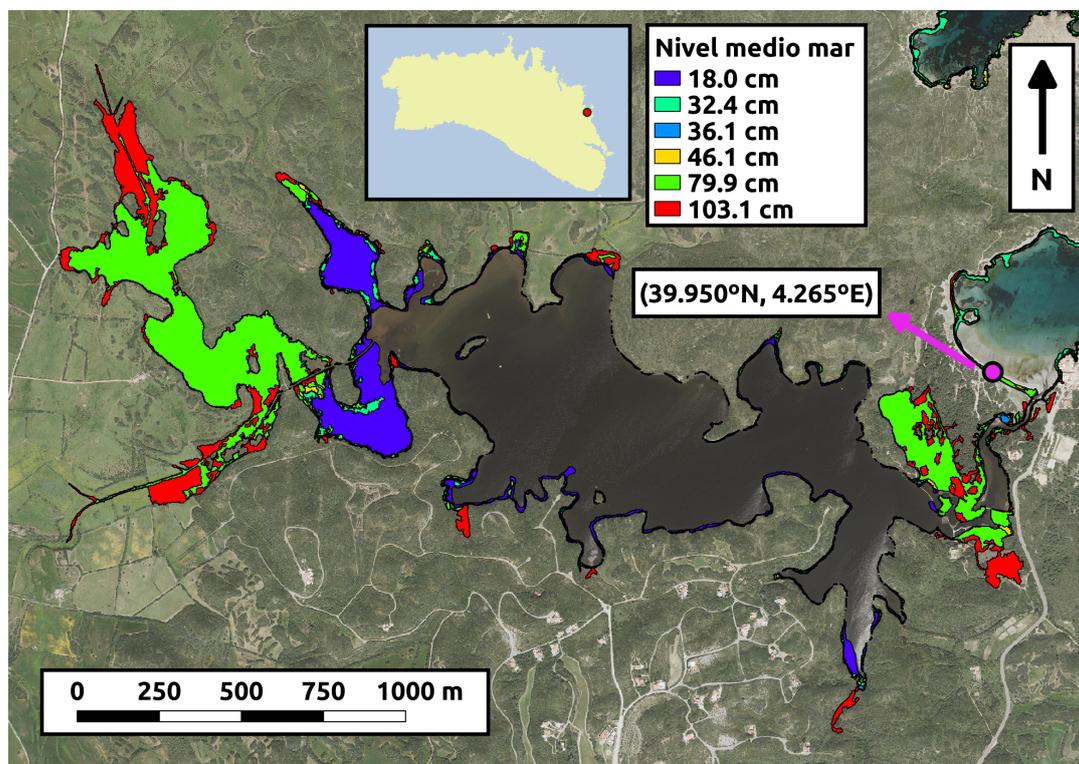


Figura 15: Inundación permanente en la Albufera de Menorca. Los distintos colores identifican el caso de nivel medio del mar al cual se asocian. Se incluye la localización de una playa cuya erosión se presentará más adelante.

4.4.2. Eivissa

La Figura 16 muestra los resultados para la inundación calculada sobre la ciudad de Eivissa y la playa de Talamanca. Como podemos observar en la imagen que muestra la extensión de la inundación permanente, los efectos son poco notorios por debajo de medio metro, pero aumentan drásticamente si el nivel medio del mar sube alrededor de un metro, quedando inundadas las calles más cercanas al mar.

Por otro lado, esta zona ha sido una de las escogidas para utilizar un forzamiento más realista, al subdividir su costa en diferentes subzonas (véase la Figura 13). En concreto, dentro del puerto sólo se ha forzado la sobreelevación que producirían las *surges*. Para los casos asociados a un nivel medio del mar más alto podemos ver como la inundación llena casi por completo la zona entre el puerto y la playa de Talamanca.

4.4.3. Es Trenc

Los resultados de la inundación de esta zona pueden verse en la Figura 17. Destacamos la enorme extensión de la inundación permanente para los casos de subida de nivel medio del mar de 79 cm y 103 cm. Este caso es especialmente interesante porque sirve de ejemplo para zonas que corren el riesgo de quedar inundadas por tener una conexión angosta con el mar (véanse las zonas estrechas que conectan el mar y la gran zona inundada del interior, en la imagen superior de la Figura 17). Por esto es especialmente importante utilizar un MDS de alta resolución y llevar a cabo un proceso de corrección manual de la inundación permanente.

4.4.4. Pollença

Los resultados del estudio de inundación sobre la bahía de Pollença se muestran en las Figuras 18 (mitad norte de la bahía) y 19 (mitad sur de la bahía). Respecto a la inundación permanente, destacamos la inundación de las calles más cercanas al mar, tanto en el Port de Pollença como en la zona de Marina (al sur de la bahía). Volvemos a remarcar la existencia de zonas inundadas por medio de canales angostos (zona de la Albufereta en la mitad sur de la bahía), como pasaba con las salinas que hay tras la playa de Es Trenc.

Volvemos a encontrar una gran extensión de inundación asociada a los niveles más bajos de subida de nivel medio del mar (18 cm). Este efecto es análogo al caso analizado en la Albufera de Menorca. En el caso de la Albufereta, es muy remarcable el aumento de la zona inundada en su límite más septentrional.

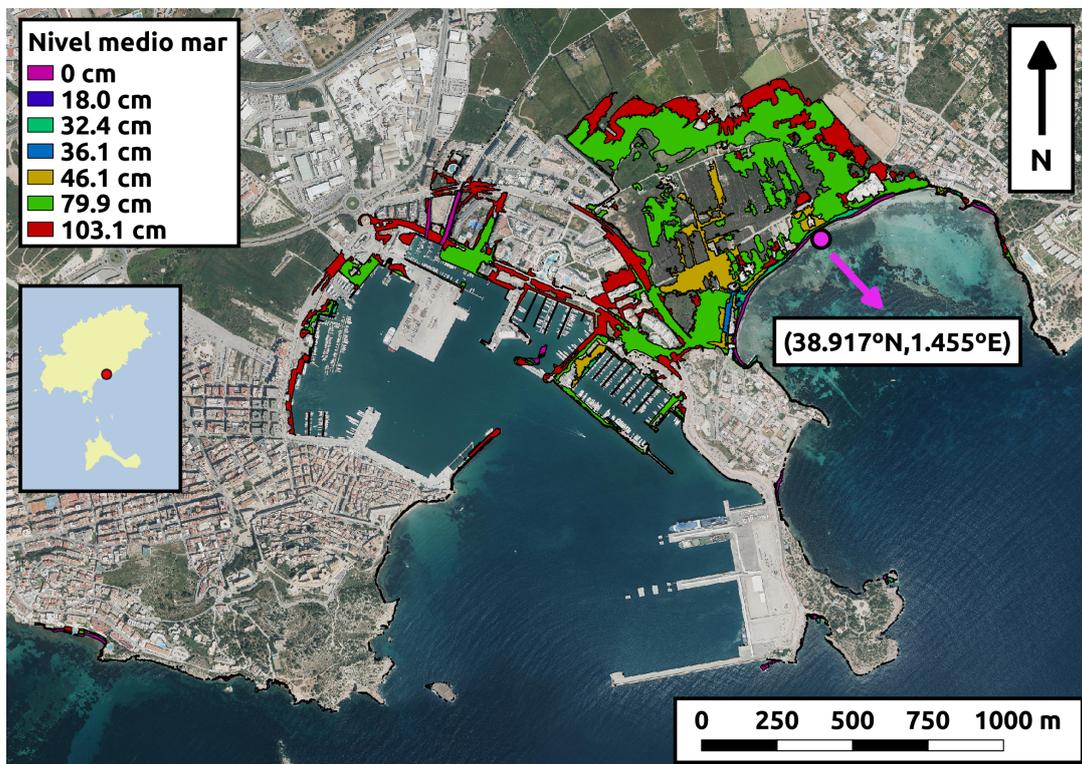
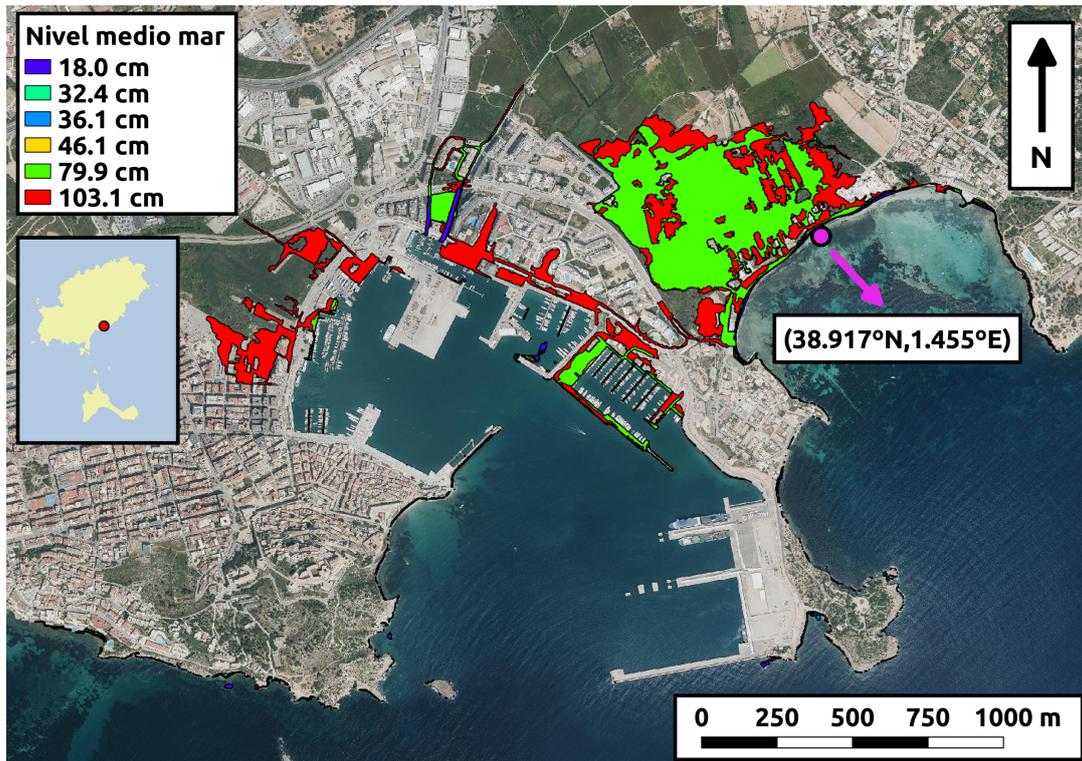


Figura 16: Inundación permanente (imagen superior) y extrema (imagen inferior) en la ciudad de Eivissa. Los distintos colores identifican el caso de nivel medio del mar al cual se asocian. Se incluye la localización de una playa cuya erosión se presentará más adelante.

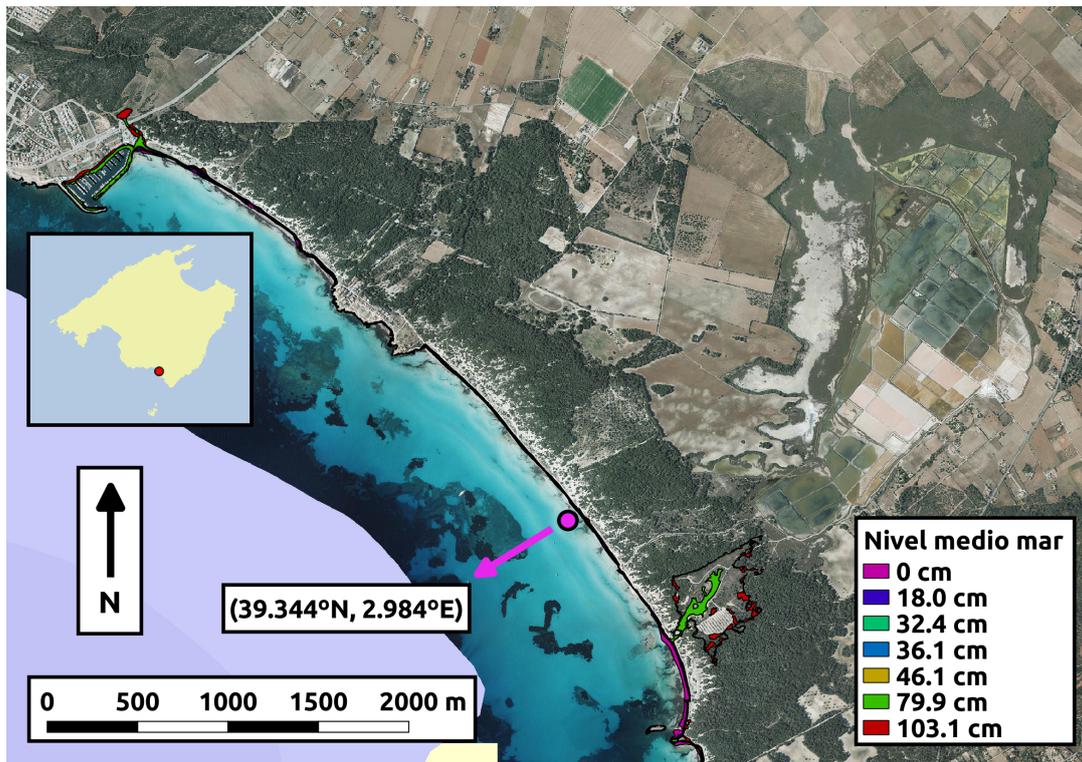
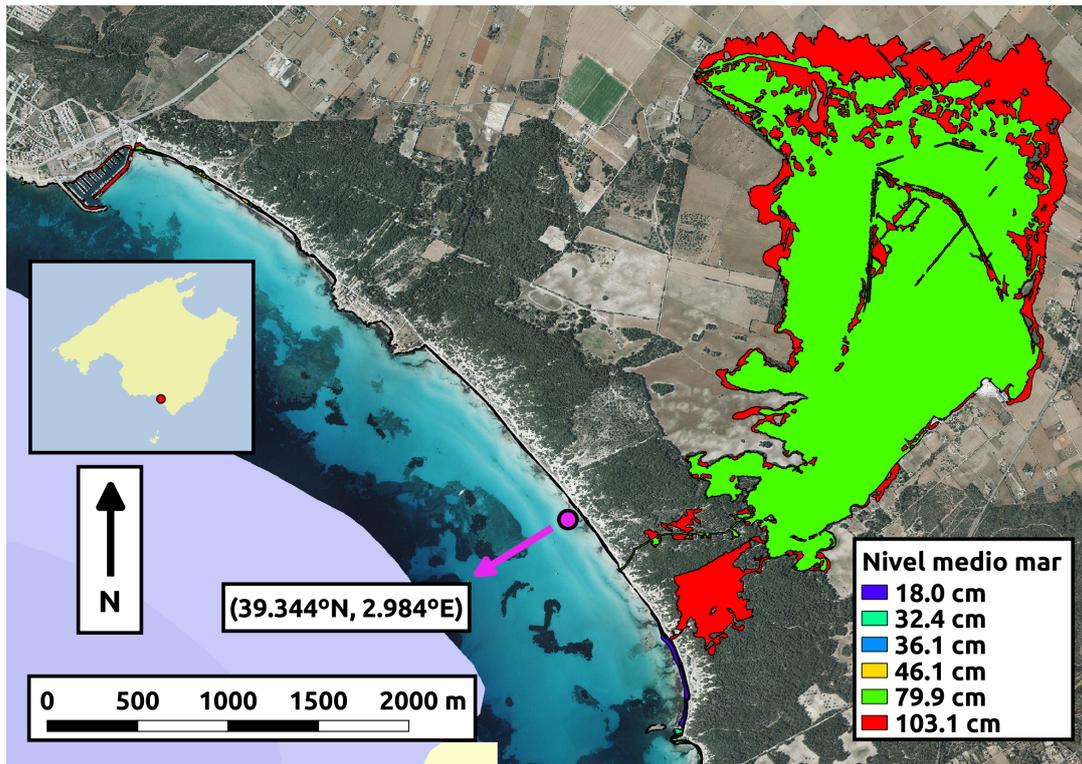


Figura 17: Inundación permanente (imagen superior) y extrema (imagen inferior) en la zona de la playa de es Trenc. Los distintos colores identifican el caso de nivel medio del mar al cual se asocian. Se incluye la localización de una playa cuya erosión se presentará más adelante.

La inundación por eventos extremos tiene un gran impacto en el Port de Pollença, tanto al norte como al sur del puerto. Esta zona, por su geometría y tamaño, sería un caso interesante de estudio detallado. Los puntos de referencia se encuentran a la salida de la bahía (Figura 20), debido a la resolución de la batimetría y la malla de cálculo. Sin embargo, se observa que las playas del sur quedan más expuestas, mientras que las del norte están más resguardadas (por la orientación de la bahía y a la presencia de la Punta de l'Avançada), con lo que los forzamientos en la línea de costa podrían diferir y resultar en impactos distintos a los representados aquí.

5. Erosión

En este estudio, entendemos por erosión el retranqueo de la línea de costa debido a los forzamientos marinos, es decir, el efecto de la subida del nivel medio del mar, así como el efecto de las tormentas mediante *surges* y oleaje. Las playas responden a estas condiciones movilizándolo su sedimento y reconfigurándolo con una nueva distribución espacial. Tradicionalmente, se separa este transporte de sedimentos entre el que discurre a lo largo de la línea de costa (*long-shore*) y el que se mueve de forma perpendicular a la línea de costa (*cross-shore*). Aquí consideraremos sólo el transporte *cross-shore* y sus implicaciones en la evolución temporal de la línea de costa.

5.1. Modelo de erosión

Para el cálculo de la erosión hemos utilizado el modelo de evolución de línea de costa propuesto en [Miller and Dean, 2004]. Se basa en asumir que, dados unos valores concretos para los forzamientos, cada perfil de la batimetría tiende a su configuración de equilibrio. Cuando los forzamientos cambian, el perfil de equilibrio cambia. Se asume que el perfil de equilibrio sigue el modelo de [Dean and Dalrymple, 1991]:

$$h(y) = Ay^{2/3} \tag{8}$$

donde $h(y)$ es la profundidad del perfil, y es la coordenada perpendicular a la línea de costa (el origen de coordenadas está sobre la línea de costa, e y crece en dirección al mar), y A es una constante a determinar que puede obtenerse como:

$$A = 0.067 w_s^{0.44} \tag{9}$$

donde w_s es la velocidad de sedimentación de la arena. Para calcularla, hemos utilizado la relación

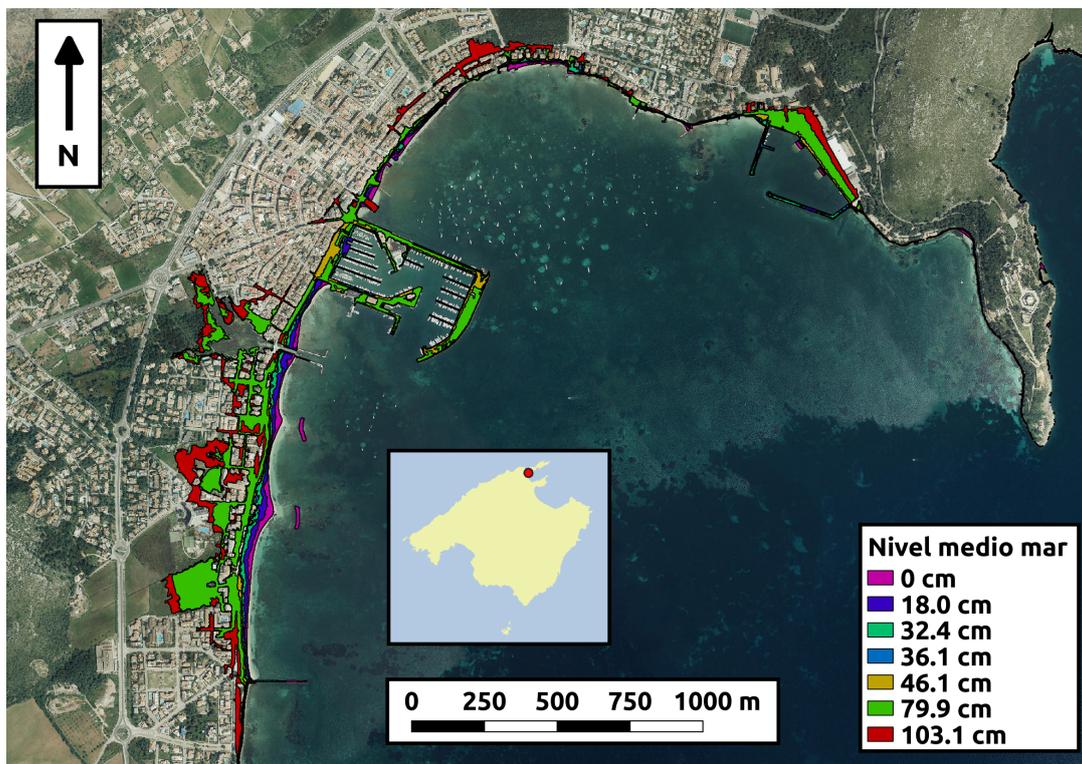
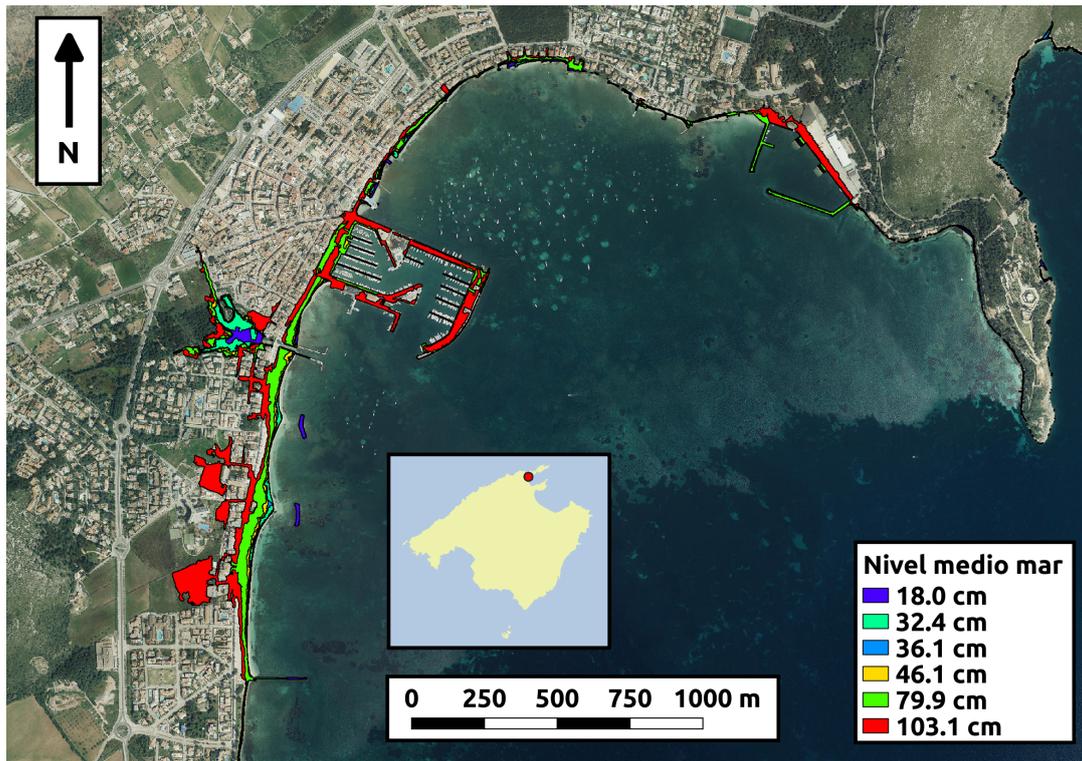


Figura 18: Inundación permanente (imagen superior) y extrema (imagen inferior) en la mitad norte de la bahía de Pollença. Los distintos colores identifican el caso de nivel medio del mar al cual se asocian. Se incluye la localización de una playa cuya erosión se presentará más adelante.

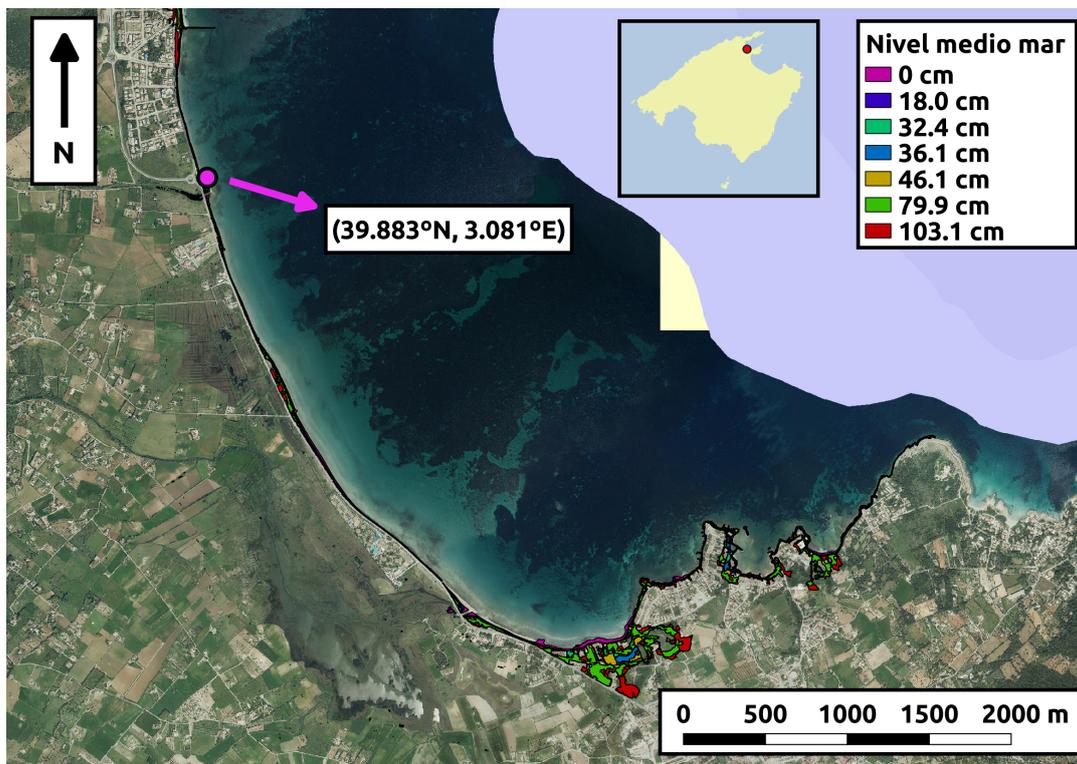
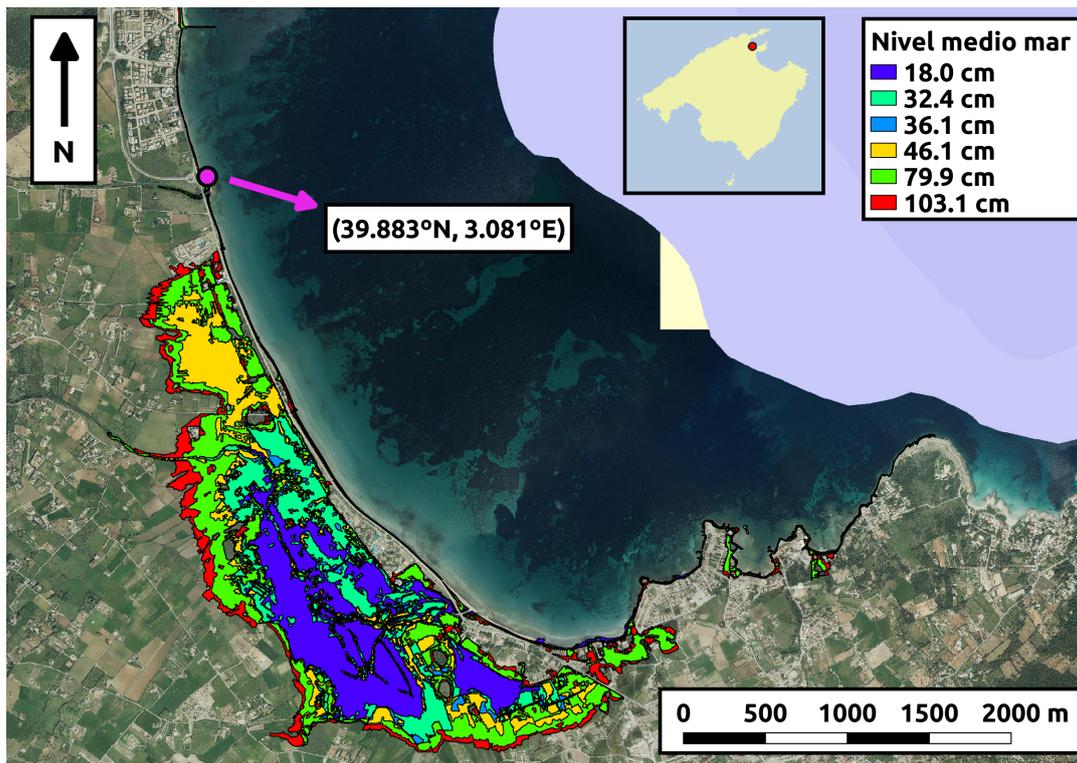


Figura 19: Inundación permanente (imagen superior) y extrema (imagen inferior) en la mitad sur de la bahía de Pollença. Los distintos colores identifican el caso de nivel medio del mar al cual se asocian. Se incluye la localización de una playa cuya erosión se presentará más adelante.

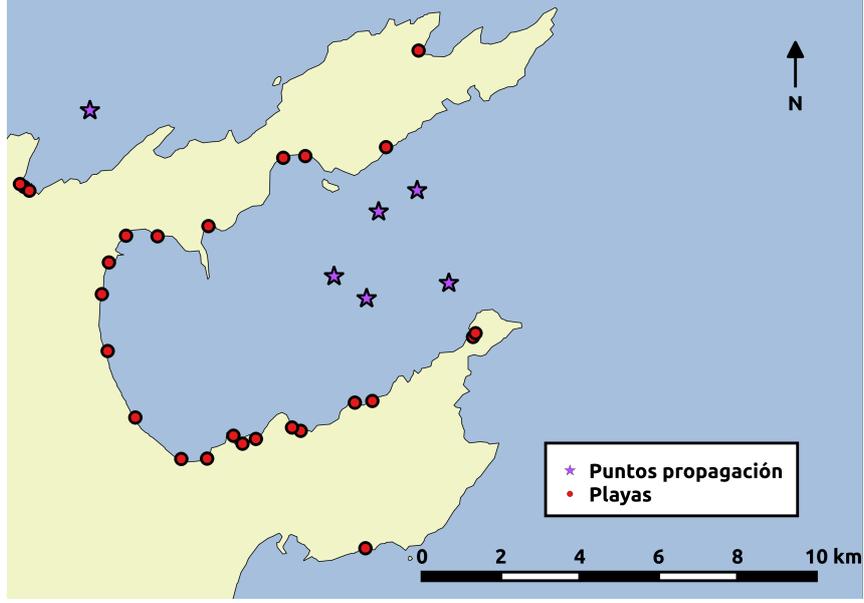


Figura 20: Disposición de las playas (puntos rojos) y puntos de referencia (estrellas violeta) sobre la bahía de Pollença.

de [van Rijn, 1984]:

$$w_s = \begin{cases} \frac{g(s-1)}{18\nu} \left(\frac{D_{50}}{1000} \right)^2, & D_{50} < 0.1 \text{ mm} \\ \frac{10\nu}{D_{50}/1000} \left(\sqrt{1 + 0.01 \frac{g(s-1)}{\nu^2} \left(\frac{D_{50}}{1000} \right)^2} - 1 \right), & 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm} \\ 1.1 \sqrt{g(s-1) \frac{D_{50}}{1000}}, & D_{50} > 1 \text{ mm} \end{cases} \quad (10)$$

donde D_{50} es el calibre mediano del sedimento, g es la aceleración de la gravedad, ν es la viscosidad cinemática del agua, y s es la densidad relativa del sedimento, que se ha tomado constante e igual a 2,65.

Los forzamientos marinos generan cambios en el nivel del mar y el perfil de la playa responde hasta alcanzar de nuevo el perfil de equilibrio. Esto produce un cambio en la anchura de la playa seca que viene determinado por:

$$\Delta y_{eq}(t) = -W^*(t) \frac{0.106H_b(t) + SS(t)}{B + 2H_b(t)} \quad (11)$$

donde H_b es la altura significativa del oleaje en el punto de rotura y SS es el *storm surge*. B es la altura de berma de la playa, y W^* es la anchura del perfil activo, la cual puede calcularse de la siguiente manera:

$$W^* = \left(\frac{h_b}{A} \right)^{3/2} = \left(\frac{H_b}{\gamma A} \right)^{3/2} \quad (12)$$

donde h_b es la profundidad en el punto de rotura y γ es el índice de rotura (proporción entre la altura del oleaje y la profundidad en la zona de rompientes). Asumimos una profundidad de rotura constante característica para cada playa para la cual se cumple la relación de similaridad del índice de rotura.

Recientemente, [Toimil et al., 2017] ha incluido el efecto de la marea astronómica modificando la Ecuación 11 como:

$$\Delta y_{eq}(t) = -W^*(t) \frac{0.106H_b(t) + SS(t) + AT(t)}{B + 2H_b(t)} \quad (13)$$

donde AT indica la marea astronómica. El retroceso de la línea de costa debido a la subida del nivel medio del mar (SLR) según estos autores es:

$$R_{SLR}(t) = -W^*(t) \frac{SLR}{B + h_b} \quad (14)$$

lo que permite calcular la posición de la línea de costa que se corresponde con el perfil de equilibrio como:

$$y_{eq}(t) = y_0 + \Delta y_{eq}(t) + R_{SLR}(t) \quad (15)$$

donde y_0 es una posición de línea de costa de referencia (por ejemplo la que se observa en el caso en que no haya forzamientos marinos). [Miller and Dean, 2004] indican a partir de evidencias observacionales que la evolución de la línea de $y(t)$ se puede describir como:

$$\frac{dy(t)}{dt} = -k \left(y(t) - y_{eq}(t) \right) \quad (16)$$

donde la constante k toma distintos valores en función de si la playa se está erosionando: $y > y_{eq}$ (se usa la constante k_{ero}), o está creciendo: $y < y_{eq}$ (se usa la constante k_{acc}).

Finalmente, podemos discretizar estas ecuaciones para las fases de erosión y de crecimiento (en adelante acreción), respectivamente como:

$$y^{n+1} = \frac{y^n + K_{ero} [(y_{eq}^{n+1} - y_{eq}^n) - y^n]}{1 + K_{ero}}, \quad K_{ero} = \frac{k_{ero} \Delta t}{2} \quad (17)$$

$$y^{n+1} = \frac{y^n + K_{acc} [(y_{eq}^{n+1} - y_{eq}^n) - y^n]}{1 + K_{acc}}, \quad K_{acc} = \frac{k_{acc} \Delta t}{2} \quad (18)$$

5.2. Ajuste del modelo de erosión

La subida de nivel medio del mar ha sido tratada de forma determinista, interpolando las proyecciones a la resolución requerida. Los datos de oleaje y *surges* se han tratado de forma estadística, ajustando un modelo autorregresivo (AR) a cada serie de datos para luego generar series sintéticas

que tengan las mismas propiedades estadísticas que las series originales. La serie temporal de *surges* que se ha usado para cada playa es la misma que para el modelado de la inundación. Para el oleaje, se ha utilizado la ley de Green (Ecuación 2) con un factor de dirección unitario ($F(\theta_0) = 1$) para propagar las cuatro series de datos desde el punto de referencia hasta la profundidad de rotura de la playa, y se ha definido la serie de alturas de ola de rotura como el máximo instantáneo de estas cuatro series propagadas.

El ajuste de la profundidad de rotura y constantes de erosión y acreción se ha realizado a partir de los datos de la posición de la línea de costa en la playa de Son Bou (Menorca), los cuales han sido obtenidos mediante cámaras de vídeo [Enríquez et al., 2019]. Se dispone de puntos de coordenadas UTM que conforman la línea de costa de la playa, en intervalos de 15 días entre los años 2013 y 2016. A partir de las series de oleaje, *surges* y marea astronómica (se toman los datos del mareógrafo de Maó) para esos años se han ajustado la profundidad de rotura, así como las constantes de acreción y erosión para que la línea de costa que predice el modelo de [Miller and Dean, 2004] se asemeje lo máximo posible a la evolución de la línea de costa que describen los datos de las cámaras de vídeo. Minimizamos una función de coste basada en el error cuadrático entre las medidas y la serie modelada interpolada a las mismas fechas, con unos términos extra que añaden un coste muy alto si los parámetros se salen del rango de parámetros posibles. Definimos estos rangos a partir de los que listan [Miller and Dean, 2004] como resultado del análisis de diversas playas. El resultado de la optimización devuelve una constante de erosión de $2.39 \cdot 10^{-2} h^{-1}$, una constante de acreción de $2.25 \cdot 10^{-3} h^{-1}$ y una profundidad de rotura de 63 cm. Los resultados se muestran en la Figura 21.



Figura 21: Evolución de la posición media de la línea de costa en Son Bou respecto a una referencia, según los datos obtenidos de las cámaras de vídeo (verde) y el modelo de [Miller and Dean, 2004] optimizado, con los valores $k_{ero} = 2.39 \cdot 10^{-2} h^{-1}$, $k_{acc} = 2.25 \cdot 10^{-3} h^{-1}$ y $h_b = 63\text{cm}$ (en rojo).

Para definir la profundidad de rotura en cada playa utilizamos un criterio de similaridad del oleaje. En concreto, propagamos el oleaje hasta un conjunto de profundidades candidatas a ser la profundidad de rotura, utilizando la ley de Green con factor de dirección unitario. Seguidamente, calculamos un estadístico (que definimos más adelante) sobre estas serie de oleaje, que devuelvan un valor característico del oleaje a cada una de estas profundidades. Calculamos el índice de rotura γ , como el cociente entre los valores característicos de altura de ola y su profundidad correspondiente. Finalmente, escogemos la profundidad que arroja un índice de rotura lo más cercano al índice de rotura que decidimos como definitorio de la misma. Las dos métricas que hay que definir son, por tanto, el estadístico que represente un valor característico del oleaje y el valor del índice de rotura.

Los valores para el índice de rotura en la literatura (para H_s) oscilan entre 0.5 y 1.15 . El grueso de la bibliografía utiliza un valor dentro del rango 0.71 - 0.78. Sin embargo, algunos autores y el US Corps of Engineers consideran 0.6 [Thornton and Guza, 1983] [Smith, 1993] y el estudio de Asturias que tomamos como guía para la metodología del estudio usa 0.55 [Toimil et al., 2017]. En consecuencia, lo que haremos es proponer una serie de estadísticos, y ver qué valor arrojan para el índice de rotura (γ) utilizando el oleaje de Son Bou y una profundidad de rotura de 63 cm. Se decide utilizar los diversos percentiles de la serie de altura de ola como estadísticos. Después de realizar estos cálculos, se decide utilizar el percentil 70 como estadístico para caracterizar la serie de oleaje, y un valor de 0.71 para el índice de rotura (γ). Presentamos los resultados en la Figura 22.

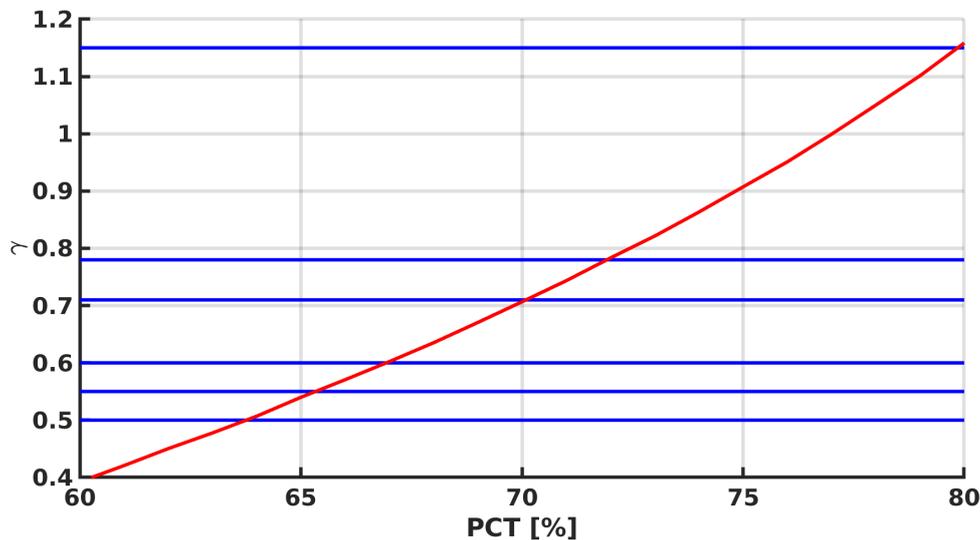


Figura 22: Índice de rotura calculado usando distintos percentiles como estadísticos para definir el valor característico de la serie de oleaje (en rojo). Distintos valores y rangos típicos de γ descritos en la literatura (en negro, véase el texto principal). La serie de oleaje utilizada es la que corresponde a la playa de Son Bou, propagada a una profundidad de 63 cm.

En resumen, para calcular la erosión sobre el conjunto de playas del estudio utilizamos una constante de erosión (k_{ero}) igual a $2.39 \cdot 10^{-2} h^{-1}$ y una constante de acreción (k_{acc}) igual a $2.25 \cdot 10^{-3} h^{-1}$. La profundidad de rotura se calcula en cada playa como la que devuelve un índice de rotura (γ) lo más cercano a 0.71, de entre todos los calculados a distintas profundidades, utilizando el percentil 70 de la serie de datos del oleaje.

5.3. Análisis de la erosión

El cálculo de la erosión se realiza con una aproximación probabilística. Para ello se han generado 500 series sintéticas tanto de oleaje en la zona de rotura como de surges, que son estadísticamente consistentes con las series originales pero que tienen cronologías diferentes. Cada una de las series sintéticas tiene la misma resolución temporal (3 horas) y una duración de 80 años (para poder cubrir el intervalo de tiempo entre los años 2020 y 2100). El método de generación, que se basa en un modelo autorregresivo de orden 4 aplicado estacionalmente, se describe en detalle en el Apéndice A. Es importante recalcar que las series sintéticas obtenidas son perfectamente consistentes con las series originales, de forma que pueden utilizarse junto con la subida del nivel medio del mar para dar una estimación promedio de la erosión de cada playa, utilizando el modelo de erosión descrito.

Asumimos que la posición inicial de la línea de costa es la de referencia (y_0). Suponemos que esta posición de referencia es la que se observa en el MDS de SITIBSA, puesto que según [Gómez-Pujol et al., 2019] la mayoría de playas de Baleares, excepto unos pocos casos particulares, se encuentran en equilibrio (para el periodo estudiado, entre los años 2002 y 2012). Puesto que las 500 series de erosión se obtienen considerando la distribución probabilística de los forzamientos, asumimos que las series de erosión siguen la distribución probabilística de la recesión esperable. Así pues, las utilizamos como una muestra, asumiendo que los estadísticos que se calculen de la muestra son representativos de la evolución esperable en cada playa.

Los escenarios de aumento de nivel del mar considerados han sido cinco, en concordancia con los utilizados en el estudio de inundación: los márgenes inferior y superior del intervalo de la confianza para la subida del nivel medio del mar que plantea el RCP-4.5, los márgenes inferior y superior del intervalo de la confianza para la subida del nivel medio del mar que plantea el RCP-8.5, y un escenario en que el nivel medio del mar no cambia en absoluto.

Para hacer más claros los resultados del análisis, se ha medido el ancho de cada playa mediante transectos entre la línea de costa y el final de la playa. De esta manera, se han guardado los resultados como series temporales de la evolución de los anchos de cada playa, en lugar de utilizar la posición de la línea de costa como descriptor.

5.4. Ejemplos de resultados

Presentamos los resultados del análisis de la erosión para cuatro playas, localizadas dentro de las zonas de inundación cuyos resultados han sido mostrados con anterioridad. En concreto, las playas de es Grau (Figura 23), Talamanca (Figura 24), Es Trenc (Figura 25) y Can Cullerassa (Figuras 26).

Los resultados de la evolución del ancho de la playa debido a la erosión muestran una regresión importante en todos los ejemplos. Las diferencias entre playas provienen de dos elementos: la intensidad del oleaje y las *surges*, que afectan a la intensidad en los cambios eventuales y estacionales en la posición de la línea de costa en las playas, así como a la incertidumbre que tenemos en las predicciones sobre esta posición; y el ancho de cada playa, que condiciona cuánto puede retroceder la línea de costa antes de llegar a terreno consolidado. Nótese como la evolución de todas las playas presenta una posición estacionaria hacia final de siglo, según la evolución descrita por el RCP8.5, excepto para el caso de Es Trenc (Figura 25), que presenta un ancho de playa especialmente grande.

Aunque no se muestra en las figuras debido al suavizado, los resultados de la erosión tienen una alta componente estacional, asociada a la de los forzamientos. Este comportamiento se ilustra en la Figura 27 donde se representa una salida directa del modelo de erosión.

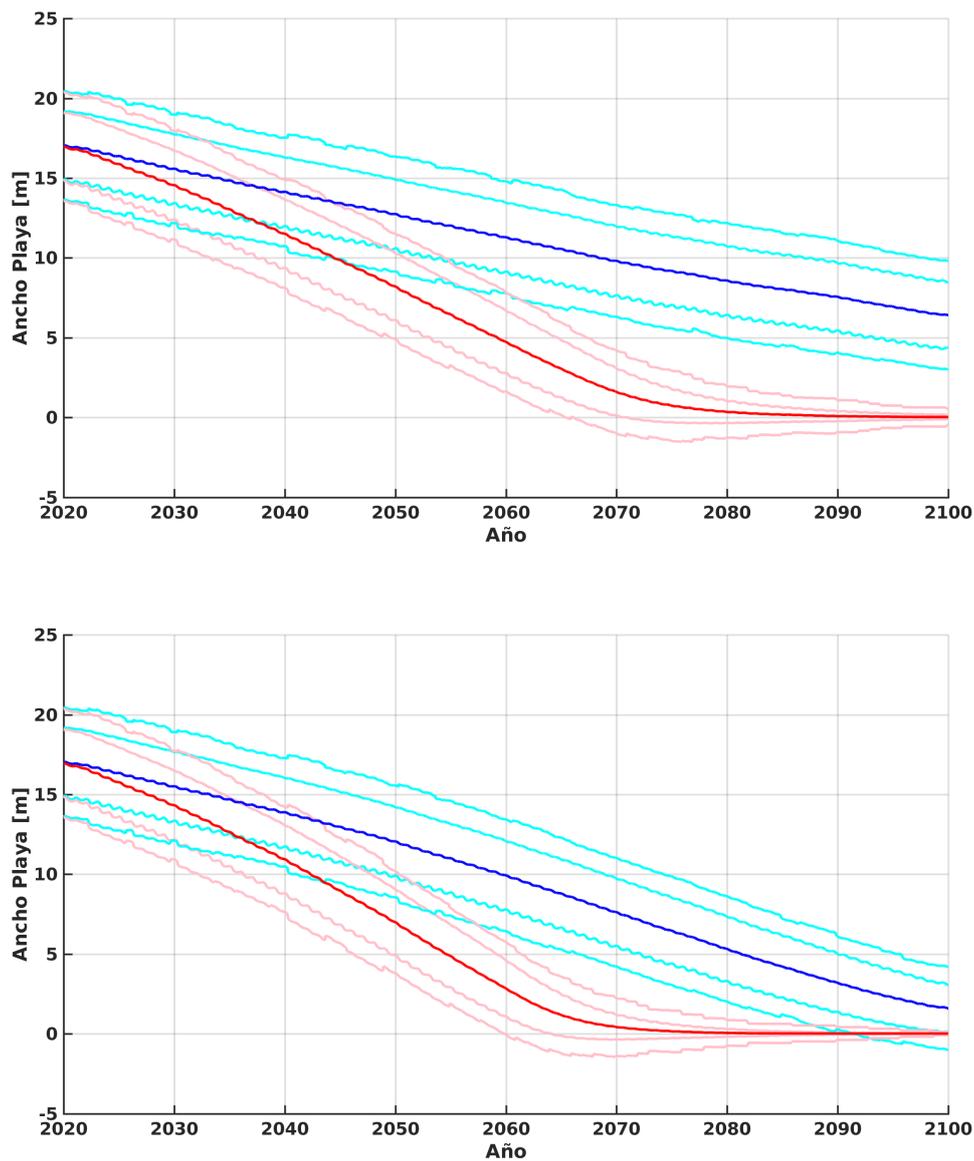


Figura 23: Evolución del ancho de la playa a la entrada de la Albufera de Es Grau (localización marcada con un punto en la Figura 15) a lo largo del siglo XXI para el escenario RCP4.5 (panel superior) y RCP8.5 (panel inferior). En cada panel se muestran: media de las series ancho de playa, suavizada usando una media móvil con ventana de 10 años, siguiendo la evolución del nivel medio del mar del límite inferior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado (línea azul oscuro). También se representa el intervalo de una desviación estándar, promediado usando una media móvil con ventana de 10 años y un máximo móvil con ventana de 10 años (líneas azul claro más cercanas a la media y más lejanas a la media, respectivamente). En rojo y rosa se muestran las mismas variables según la evolución del nivel medio del mar que marca el límite superior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado.

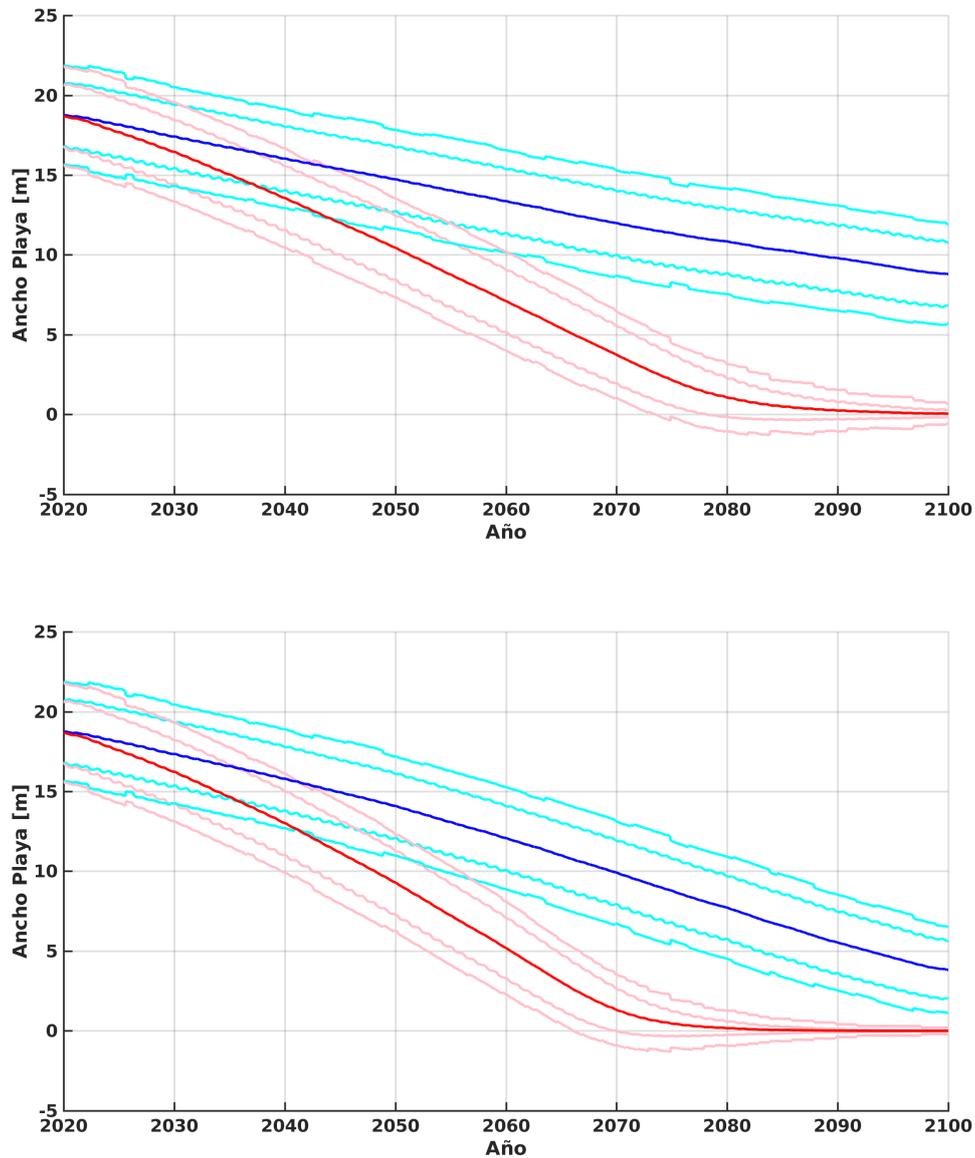


Figura 24: Evolución del ancho de playa en Cala Talamanca (localización marcada con un punto en la Figura 16) a lo largo del siglo XXI para el escenario RCP4.5 (panel superior) y RCP8.5 (panel inferior). En cada panel se muestran: media de las series ancho de playa, suavizada usando una media móvil con ventana de 10 años, siguiendo la evolución del nivel medio del mar del límite inferior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado (línea azul oscuro). También se representa el intervalo de una desviación estándar, promediado usando una media móvil con ventana de 10 años y un máximo móvil con ventana de 10 años (líneas azul claro más cercanas a la media y más lejanas a la media, respectivamente). En rojo y rosa se muestran las mismas variables según la evolución del nivel medio del mar que marca el límite superior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado.

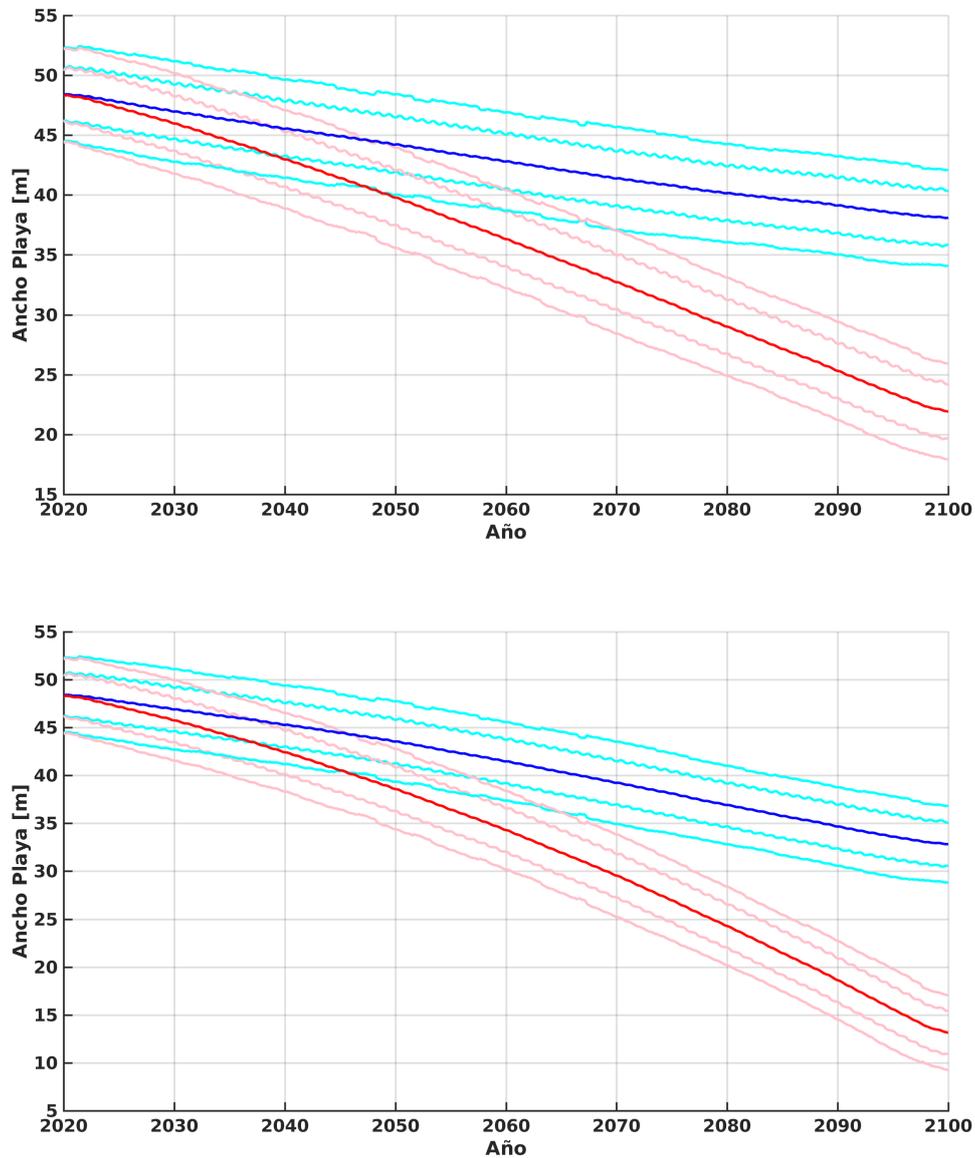


Figura 25: Evolución del ancho de la playa de es Trenc (localización marcada con un punto en las Figuras 17) a lo largo del siglo XXI para el escenario RCP4.5 (panel superior) y RCP8.5 (panel inferior). En cada panel se muestran: media de las series ancho de playa, suavizada usando una media móvil con ventana de 10 años, siguiendo la evolución del nivel medio del mar del límite inferior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado (línea azul oscuro). También se representa el intervalo de una desviación estándar, promediado usando una media móvil con ventana de 10 años y un máximo móvil con ventana de 10 años (líneas azul claro más cercanas a la media y más lejanas a la media, respectivamente). En rojo y rosa se muestran las mismas variables según la evolución del nivel medio del mar que marca el límite superior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado.

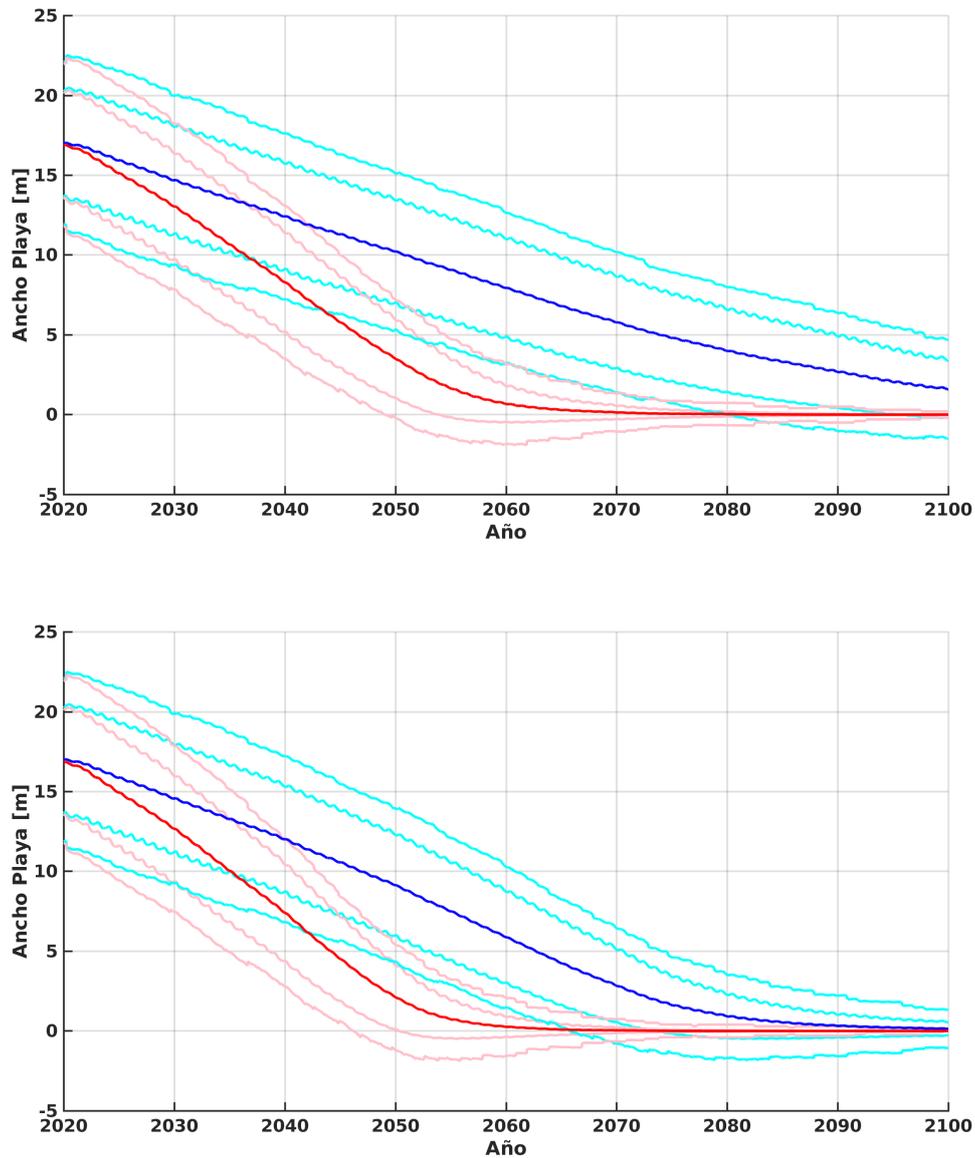


Figura 26: Evolución del ancho de la playa de can Cullerasa (localización marcada con un punto en las Figuras 19) a lo largo del siglo XXI para el escenario RCP4.5 (panel superior) y RCP8.5 (panel inferior). En cada panel se muestran: media de las series ancho de playa, suavizada usando una media móvil con ventana de 10 años, siguiendo la evolución del nivel medio del mar del límite inferior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado (línea azul oscuro). También se representa el intervalo de una desviación estándar, promediado usando una media móvil con ventana de 10 años y un máximo móvil con ventana de 10 años (líneas azul claro más cercanas a la media y más lejanas a la media, respectivamente). En rojo y rosa se muestran las mismas variables según la evolución del nivel medio del mar que marca el límite superior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar considerado.

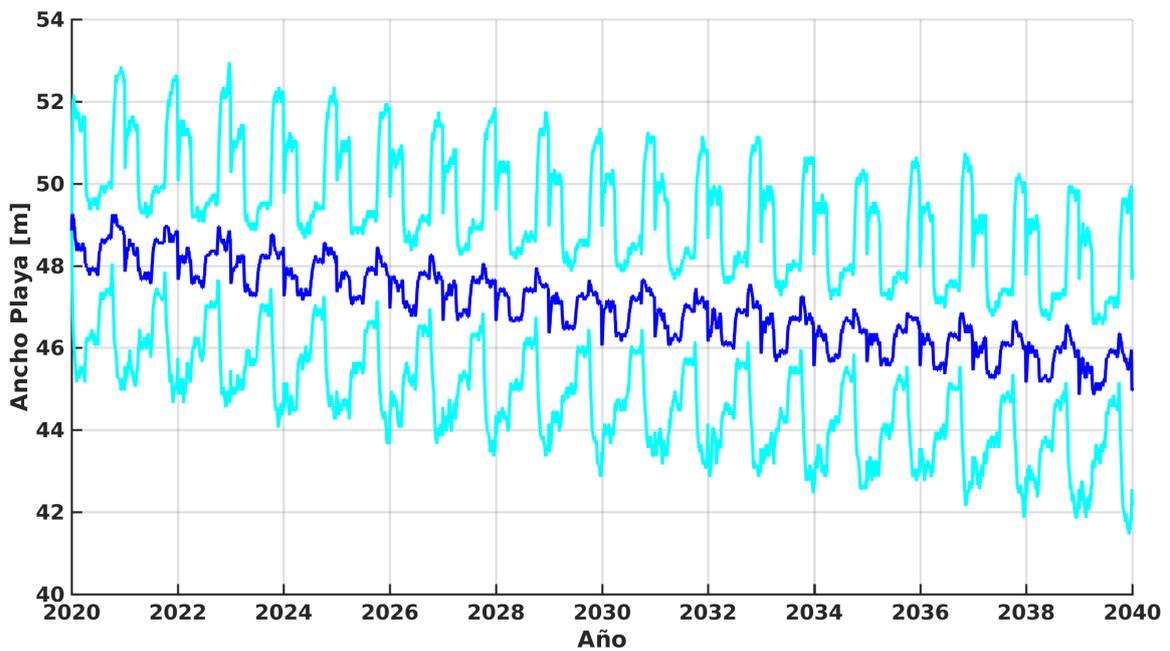


Figura 27: Evolución del ancho de la playa de Es Trenc (localización marcada con un punto en las Figuras 17) entre los años 2020 y 2040. Media de las series ancho de playa siguiendo la evolución del nivel medio del mar del límite inferior del intervalo de confianza del escenario de subida del nivel medio del mar RCP4.5 (línea azul oscuro). También se representa el intervalo de una desviación estándar, (líneas azul claro). En este caso las curvas presentadas no han sido suavizadas temporalmente.

6. Conclusiones

En este trabajo se han evaluado y cuantificado los efectos de la inundación y la erosión sobre el conjunto de playas del archipiélago balear, basándose en las metodologías del estado del arte con un enfoque regional. Para la realización de este análisis ha sido necesario desarrollar nuevas técnicas que nos han permitido generar la información en los casos de estudio. En concreto, hemos desarrollado:

- Un método para la propagación de series temporales de oleaje largas (típicamente de varias décadas) mediante un submuestreo previo de estados de mar representativos. El método se basa en la ley de Green y utiliza un conjunto reducido de propagaciones para estimar el factor de dirección que ésta requiere ($F(\theta_0)$).
- Una mejora en la formulación de [Stockdon et al., 2006] para el cálculo del *setup*, que utiliza el oleaje en un punto de referencia cercano a la playa en lugar del que ocurre en aguas profundas. Esta mejora permite evitar situaciones en la formulación original en las que el oleaje de aguas profundas no llega a propagarse hasta la playa, pero para los que se da un *setup* mayor que cero.
- Un método para calcular las zonas inundadas por la subida permanente del nivel medio del mar, que va más allá de la subida de cota y que considera la conectividad superficial.
- Un método para generar series temporales de oleaje y *surges* sintéticas, mediante modelado autorregresivo, que permite capturar los cambios estacionales en las series originales.

Al tratarse, como se ha mencionado desde el principio, de una aproximación regional, los resultados tienen algunas limitaciones y posibilidad de mejoras. Por ejemplo, respecto a la caracterización del oleaje, es deseable un refinamiento en las propagaciones que permita obtener datos con mayor resolución espacial para poder distinguir lo que pasa en las playas en las que el oleaje del punto de referencia que usamos actualmente no es representativo (como el ejemplo en la Figura 9, y las playas en la mitad norte de la bahía de Pollença). Respecto al análisis de la inundación, sería necesario refinar la resolución de los forzamientos utilizados. A modo de prueba se ha clasificado la costa en distintas subzonas con forzamientos distintos, para dos de las zonas donde se ha analizado el alcance de la inundación. Se podría mejorar esta clasificación de la costa, particularizando los forzamientos playa a playa, así como refinar la descripción geográfica del terreno (rugosidades, densidad de vegetación, etc.) para poder generar simulaciones de inundación más realistas. Respecto al análisis de la erosión, se ha considerado solamente el transporte *cross-shore*, ignorando el transporte de sedimentos a lo largo de la playa, así como otros procesos importantes para caracterizar este fenómeno. Una aproximación 2D podría solucionar esta limitación.

En conjunto, este trabajo presenta una primera aproximación al futuro de las playas de las Islas Baleares a lo largo del presente siglo, si no se toman medidas de adaptación en la costa. Dado que es poco probable que este sea el caso debido a los importantes impactos sociales y económicos, los resultados expuestos sirven de indicación para valorar las zonas más expuestas y vulnerables y donde es más urgente diseñar estrategias de adaptación frente al aumento de nivel del mar.

7. Agradecimientos

Queremos dar las gracias al Ministerio para la Transición Ecológica y a la Conselleria de Transició Energètica i Sectors Productius del Govern Balear. El presente trabajo se ha enmarcado y se ha beneficiado de la financiación del proyecto PIMA ADAPTA COSTAS de dichas entidades.

También queremos dar las gracias a Jeffrey Neal, de la Universidad de Bristol, por proporcionarnos una versión más eficiente del programa LISFLOOD, sin la que habría sido imposible calcular a tiempo todas las inundaciones que requeríamos.

Queremos dar las gracias al SOCIB, y muy especialmente a Àngels Fernández Mora, por proporcionarnos las batimetrías de SAPO, por su ayuda con el uso del programa SWAN, y por los datos de la línea de costa de la playa de Son Bou que han permitido ajustar las constantes del modelo de erosión.

A. Generación de series sintéticas de forzamientos para el estudio de la erosión

Para el estudio de la erosión, además de tener un modelo de erosión calibrado, es necesario disponer de los forzamientos marinos para la ventana temporal a analizar. Los forzamientos son la evolución del nivel medio del mar, del oleaje en el punto de rotura, y de las *surges* que llegan a la playa. Si bien la subida del nivel medio del mar se puede introducir de forma determinista una vez fijado el escenario de cambio climático considerado, es imposible pronosticar la serie temporal de las altura del oleaje y de las *surges* para todo el siglo XXI. Por ello, caracterizamos el oleaje y las *surges* de forma estadística.

Para la caracterización estadística de los forzamientos hay que tener en cuenta la intensidad y la duración de las tormentas, así como su distribución a lo largo del tiempo [Toimil et al., 2017]. Entendemos tormentas como eventos con valores intensos en los forzamientos, sostenidos en el tiempo (entre horas y días). Conocidas sus características estadísticas, incluyendo correlación temporal, es posible generar un conjunto de series sintéticas (del orden de varios miles) consistentes con la original pero con distintas cronologías, para evaluar los cambios en la posición de la línea de costa. Esta metodología permite caracterizar también la incertidumbre. Puesto que se ha mostrado que el oleaje y las *surges* presentan poca correlación en el Mediterráneo Occidental, podemos modelar de forma independiente las series temporales de las dos variables sin que esto comprometa la calidad de la aproximación.

Se observa que las series temporales de los forzamientos presentan una estacionalidad con periodo aproximadamente anual (véase la Figura 28 a modo de ejemplo). Por ello, en lugar de caracterizar conjuntamente la serie completa, clasificamos los datos en función de su posición relativa dentro del periodo estacional, donde el número de grupos que se hacen está fijado por el usuario (nosotros usamos 4). A modo de ejemplo, si el usuario seleccionase 12 subperiodos, como el periodo fundamental de la serie de datos es cercano al año, cada subperiodo contendría los datos de los diferentes meses. El periodo de estacionalidad se calcula de manera precisa como la frecuencia del armónico fundamental de la serie de datos, usando la transformada de Fourier.

La manera de generar las series sintéticas que hemos utilizado es un modelado autorregresivo (AR). Se parte de una realización de ruido blanco y Gaussiano que se filtra linealmente de tal manera que la serie temporal de salida presenta la misma auto-correlación temporal que la serie a modelar. Después se aplica la transformada inversa para que la distribución de los valores en la serie presente una distribución similar a la de la serie a modelar. El orden del filtro es decidido por el usuario, nosotros hemos usado uno de cuarto orden. El método para obtener los filtros y las funciones de distribución de las series originales es similar para el oleaje y las *surges*. Por

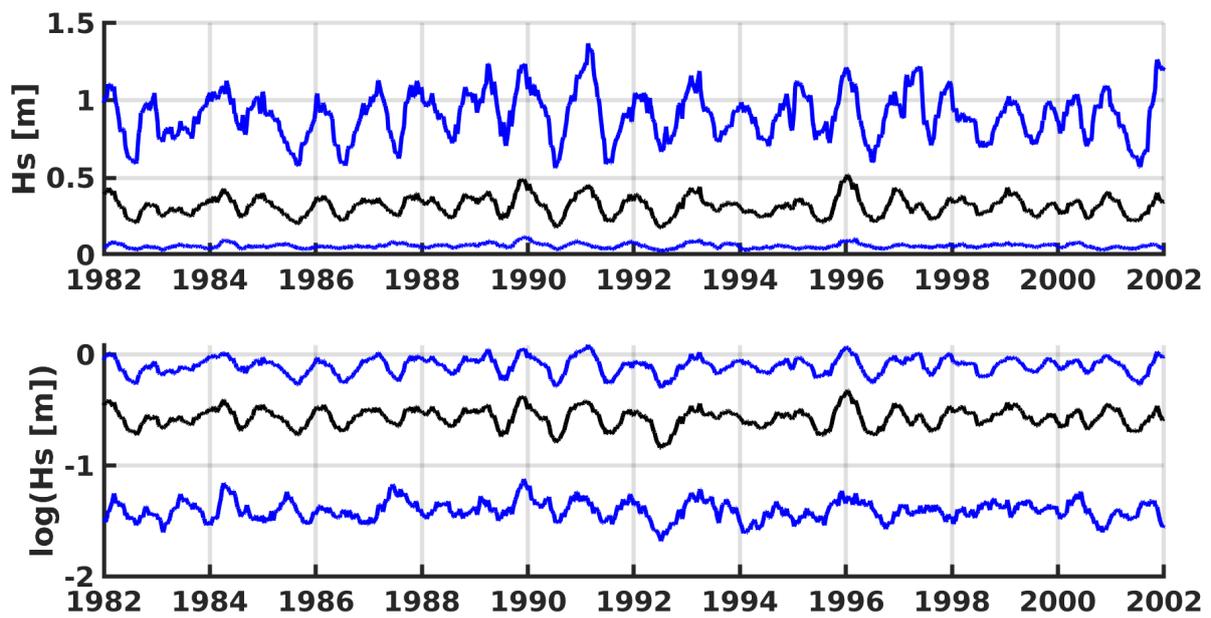


Figura 28: Panel superior: promediado semanal suavizado de la altura de ola significativa en rotura para una de las playas del estudio (negro) y suavizado de los máximos y mínimos semanales de la misma serie de alturas de ola (azul). Panel inferior: promediado semanal suavizado del logaritmo decimal de la altura de ola significativa en rotura para una de las playas del estudio (negro) y suavizado de los máximos y mínimos semanales de la misma serie de logaritmos (azul).

ello, explicaremos primero en detalle el método para la obtención del filtro del oleaje y después listaremos las diferencias en la obtención del de las *surges*.

La caracterización de la serie temporal de la altura significativa del oleaje en rotura es como sigue: en primer lugar descartamos todas las series temporales que tengan demasiados puntos sin datos (25%), o en las que los datos sean demasiado pequeños (25% por debajo de 1 cm o sin datos). Asumimos que en estos casos no hay oleaje, y procedemos a analizar el resto. Como se puede observar en la Figura 28, las variaciones en el rango de datos son más homogéneas si se toma el logaritmo de los datos. Así pues, limitamos inferiormente la serie de datos a 1 cm y calculamos el logaritmo de la serie de altura de ola (de esta manera evitamos valores indeseados o irreales al calcular los logaritmos). Entonces, obtenemos el armónico fundamental de la serie de datos. Con esa información, clasificamos la serie de oleaje original y la de su logaritmo en grupos.

Para cada grupo, estimamos la función distribución de probabilidad acumulada (CDF) de la serie de oleaje, y la usamos para transformar la serie de datos a una que siga una distribución Gaussiana (el filtro AR se calcula y se utiliza sobre datos cuya distribución marginal sea Gaussiana). Para ello, se calcula la CDF empírica de la serie de oleaje. Ésta se suaviza utilizando un núcleo gaussiano. Entonces, se divide el rango de datos en tres partes, utilizando dos umbrales. El umbral inferior se corresponde con 1 cm, el valor utilizado para limitar inferiormente la serie de logaritmos. El umbral superior se define como un percentil de los datos seleccionado por el usuario (nosotros usamos el percentil 99). La CDF del rango de datos por debajo del umbral inferior se aproxima por la CDF suavizada. El rango de datos que se encuentra entre los dos umbrales se ajusta a una distribución *log-epsilon-skew-normal* (log-ESN). La cola superior de los datos se ajusta a una lognormal. Ambos ajustes se llevan a cabo minimizando el error cuadrático entre la CDF inversa de la aproximación y la CDF inversa aproximada usando los datos, en el rango correspondiente. Finalmente, se empalman las CDF de los 3 intervalos de tal manera que la distribución de probabilidad sea continua, y que tenga el mismo valor en los umbrales que la estimada usando los datos.

Utilizamos la CDF empalmada para transformar los grupos de series de logaritmos de altura de ola en Gaussianos, aplicando la CDF sobre los datos y después la CDF inversa de una distribución normal sobre éstos. Ahora los datos siguen una distribución normal, pero presentan correlación a lo largo del tiempo. Entonces, podemos plantear las ecuaciones de Yule-Walker que corresponden a este conjunto de datos y resolverlas para obtener el filtro AR deseado. Recordamos que estos calculos se han llevado a cabo para cada grupo en los que hemos clasificado la serie completa. Así pues, la síntesis debe realizarse aplicando los filtros y las CDF de los distintos grupos de forma periódica, de tal manera que se mimetice el comportamiento de la serie original.

La serie de *surges* se caracteriza y modela de la misma manera, excepto por dos diferencias. En primer lugar, no se utiliza en ningún momento el logaritmo de la serie de datos, sino que utilizamos

siempre la serie de datos original (las *surges* pueden contribuir con una elevación negativa al nivel del mar). En segundo lugar, para la CDF seguimos dividiendo los datos en tres grupos utilizando dos umbrales, que escogemos como el percentil 1 y el percentil 99 del conjunto de datos. La CDF suavizada con núcleos Gaussianos se utiliza en el rango intermedio de datos (que contiene el cero), y las dos colas extremas se aproximan utilizando dos distribuciones t-Student, las cuales se ajustan también por mínimos cuadrados sobre los errores entre la CDF inversa del modelo y de los datos.

B. Acrónimos

AR - Autorregresivo

CSIC - Consejo Superior de Investigaciones Científicas

GPD - Distribución de Pareto Generalizada

ICM - Instituto de Ciencias del Mar

JRC - Joint Research Centre

LISFLOOD - Modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado por la Universidad de Bristol

MDS - Modelo Digital de Superficies

MDT - Modelo Digital de Terreno

POT - *Peaks Over Threshold*

RCP - *Representative Concentration Pathway*

SAPO - Sistema de Agitación Portuaria de Puertos del Estado y SOCIB

SITIBSA - Servei d'Informació Territorial de les Illes Balears

SOCIB - Sistema de Observación y Predicción Costero de las Illes Balears

SWAN - *Simulating Waves Nearshore*

SWE - *Shallow water equations*

UIB - Universitat de les Illes Balears

UTM - *Universal Transverse Mercator*

Referencias

- [Bates et al., 2010] Bates, P. D., Horritt, M. S., and Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. Journal of Hydrology, 387(1):33 – 45.
- [Dean and Dalrymple, 1991] Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1991). Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific, Singapore.
- [Enríquez et al., 2019] Enríquez, A. R., Marcos, M., Falqués, A., and Roelvink, D. (2019). Assessing beach and dune erosion and vulnerability under sea level rise: A case study in the mediterranean sea. Frontiers in Marine Science, 6:4.
- [Gómez-Pujol et al., 2019] Gómez-Pujol, L., Orfila, A., Morales-Márquez, V., Compa, M., Pereda, L., Fornós, J. J., and Tintoré, J. (2019). Beach Systems of Balearic Islands: Nature, Distribution and Processes, pages 269–287. Springer International Publishing, Cham.
- [Gómez-Pujol et al., 2012] Gómez-Pujol, L., Roig-Munar, F. X., Fornós, J. J., Balaguer, P., and Mateu, J. (2012). Provenance-related characteristics of beach sediments around the island of menorca, balearic islands (western mediterranean). Geo-Marine Letters, 33(2-3):195–208.
- [Kopp et al., 2014] Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., Strauss, B. H., and Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. Earth’s Future, 2(8):383–406.
- [Mentaschi et al., 2017] Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Dosio, A., and Feyen, L. (2017). Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. Geophysical Research Letters, 44(5):2416–2426.
- [Miller and Dean, 2004] Miller, J. K. and Dean, R. G. (2004). A simple new shoreline change model. Coastal Engineering, 51(7):531 – 556.
- [Neumann et al., 2015] Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., and Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - a global assessment. PLOS ONE, 10(3):e0118571.
- [Pörtner et al., 2019] Pörtner, H.-O., Roberts, D., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., and (eds.), N. W. (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. IPCC. In press.
- [Rogers, 1998] Rogers, D. (1998). Procedural Elements for Computer Graphics. WCB/McGraw-Hill.

- [Smith, 1993] Smith, J. M. (1993). Nearshore wave breaking and decay. Technical Report CERC-93-11, U.S. Army Corps of Engineers: Waterways Experiment Station.
- [Stockdon et al., 2006] Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., and Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. Coastal Engineering, 53(7):573–588.
- [Thornton and Guza, 1983] Thornton, E. B. and Guza, R. T. (1983). Transformation of wave height distribution. Journal of Geophysical Research, 88(C10):5925.
- [Toimil et al., 2017] Toimil, A., Losada, I. J., Camus, P., and Díaz-Simal, P. (2017). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. Coastal Engineering, 128:106 – 122.
- [van Rijn, 1984] van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part II: Suspended load transport. Journal of Hydraulic Engineering, 110(11):1613–1641.
- [van Vuuren et al., 2011] van Vuuren, D.P., E., J., K., and et al., M. (2011). The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 109:5–31.
- [Vousdoukas et al., 2017] Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., and Feyen, L. (2017). Extreme sea levels on the rise along europe’s coasts. Earth’s Future, 5(3):304–323.
- [Vousdoukas et al., 2020] Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., and Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. Nature Climate Change, 10(3):260–263.