



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **Estudio del efecto del cambio climático en la inundación del tramo costero de la playa de la misericordia (Málaga): Análisis de los factores que contribuyen a la incertidumbre en la cota de inundación**

Trabajo realizado por:

*Matthieu Bompoil*

Dirigido:

*Melisa Menéndez García*

*Alexandra Toimil Silva*

Titulación:

**Máster Universitario en Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2022

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**



## **Estudio del efecto del cambio climático en la inundación del tramo costero de la playa de la misericordia (Málaga): Análisis de los factores que contribuyen a la incertidumbre en la cota de inundación**

---

**Autor:** Matthieu Bompoil

**Directoras:** Melisa Menéndez García y Alexandra Toimil Silva

**Convocatoria:** septiembre 2022

**Palabras clave:** Cota de inundación, Análisis extremal, Incertidumbres, Cambio climático, Málaga,

---

### **RESUMEN**

Los efectos del cambio climático sobre la elevación del agua se estudian por la mayoría a partir de la cota de inundación (CI). Este parámetro es muy utilizado porque se puede emplear como forzamiento de modelos de inundación para luego analizar cualquier daño debido a un evento de inundación específico. La cota de inundación se desarrolla principalmente con enfoques descendentes, que consisten en emprender una secuencia de pasos, como la selección de un modelo climático, de un escenario de proyecciones climáticas, de formulaciones para obtener su predicción en el futuro.

La mayoría de los estudios en los que se calcula la cota de inundación en el contexto del cambio climático combinan datos de oleaje y marea meteorológica históricos con el aumento del nivel medio del mar (ANMM). Además, muy pocos de ellos analizan la incertidumbre asociada al enfoque descendente, es decir a los datos y a la cadena de modelos empleados para transferir la información desde los escenarios hasta los resultados de cota de inundación.

En este trabajo elaboramos proyecciones de cambio climático de cota de inundación a corto/medio (2026-2045) y largo plazo (2081-2100) considerando proyecciones de oleaje, marea meteorológica y aumento del nivel medio del mar y la reconstrucción de la marea astronómica. La contribución del oleaje a la cota de inundación se ha determinado en forma de setup mediante formulación semi-empíricas y se han obtenido eventos extremos de 20 y 50 años de periodo de retorno. Para caracterizar la incertidumbre asociada a los datos y a la cadena de modelado aplicada se han considerado 6 modelos climáticos regionales (RCMs) y 3 percentiles de ANMM para el escenario SSP5-8.5, dos formulaciones semi-empíricas de setup y 4 modelos estadísticos de extremos.

En total 400 CI sobre los periodos históricos, de corto y largo plazo, han sido analizado mediante resultados estadísticos, tal que grafico de cajas o análisis de la varianza. La variable que aporta mas de incertidumbre en la cadena de pasos es el ANMM al largo plazo, debido a su rango de valores y su incertidumbre misma que aumentan en el futuro. El estudio presenta también la importancia del análisis de la formula escogida para calcular ciertas variables tal que la formula del setup aquí, que representa 98% de la incertidumbre total para un modelo climático y un periodo temporal dados. En cuanto a la



elección de los RCMs, su incertidumbre relativa es mucho menor, pero una cierta variabilidad intermodelos se nota en el análisis de la varianza. Finalmente, las interacciones entre los diferentes parámetros, aunque sean bastante débil en relación con los otros parámetros, cuentan por una parte de incertidumbre en los resultados finales, lo que representa la dependencia de las fuentes de incertidumbre entre ellas.

Se concluye en la importancia de tener en cuenta las dinámicas del oleaje sobre los estudios de aumentación de nivel del mar en el futuro y de la importancia del análisis y de la comparación de los diferentes métodos empleados para evaluar el efecto de cada uno de los pasos seguidos en el cálculo de la CI extremal.

# The effect of climate change on the coastal flooding of the Misericordia beach (Malaga – Spain): Analysis of the contributing factors to the uncertainty of the extreme water levels

---

**Author:** Matthieu Bompoil

**Directors:** Melisa Menéndez García y Alexandra Toimil Silva

**Call:** September 2022

**Key words:** Total water level, Extreme analysis, Uncertainty, Climatic change, Málaga,

---

## ABSTRACT

The effects of climate change on water elevation are mostly studied on the basis of the total water level (TWL). This parameter is widely used because it can be applied as forcing for inundation models to analyze any damage due to a specific inundation event. Flood elevation is mainly developed with top-down approaches, which consist in undertaking a sequence of steps, such as the selection of a climate model, of a climate projection scenario, of formulations to obtain its prediction in the future.

Most of the studies estimating the total water level in the context of climate change combine historical meteorological wave and tide data with mean sea level rise (MSLR). Moreover, very few of them analyze the uncertainty associated with the top-down approach, i.e., the data and model chain used to transfer the information from scenarios to flood elevation results.

In this work we elaborate climate change projections of short/mid (2026-2045) and long term (2081-2100) total water level considering wave, meteorological tide and mean sea level rise projections and astronomical tidal reconstruction. The contribution of the wave breaking surge to the TWL has been determined as a setup by semi-empirical formulation to further obtain extreme flooding events of 20- and 50-years return. To characterize the uncertainty associated with the data and the applied modeling chain, 6 regional climate models (RCMs) and 3 percentiles of MSLR for the SSP5-8.5 scenario, two semi-empirical setup formulations and 4 statistical models of extremes were considered.

In total 400 TWL over the historical periods, short and long term, have been analyzed by statistical results, such as box plots or analysis of variance. The variable that contributes the most uncertainty in the chain of steps is the MSLR in the long-term period, due to its range of values and its uncertainty that increase in the future. The study also presents the importance of the analysis of the formula chosen to calculate variables, such as the setup formula here, which represents 98% of the total uncertainty for a specific climate model and a period of time. As for the choice of RCMs, their relative uncertainty is much smaller, but some inter-model variability is noted in the variance analysis. Finally, the interactions between the different parameters, although rather weak in relation to the other parameters, account for



a part of uncertainty in the final results, which represents the dependence of the sources of uncertainty between them.

We conclude on the importance of taking into account the wave dynamics on sea level rise studies in the future and the importance of the analysis and comparison of the different methods used to evaluate the effect of each of the steps followed in the calculation of the extreme TWL.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Indice de figuras .....	VII
Indice de tablas .....	VIII
1. Introducción .....	1
1.1. Motivo del trabajo .....	1
1.2. Área de estudio .....	1
2. Base de datos .....	2
2.1. Escenarios de proyecciones climaticas .....	2
2.2. Aumento del nivel del mar .....	2
2.2. Datos de oleaje y marea meteorológica .....	3
2.2.1. Proyecciones de oleaje y marea meteorologica .....	3
2.2.2. Base de datos histórico .....	4
2.3. Marea astronómica .....	5
3. Metodología .....	7
3.1. Procedimiento de los cálculos de CI .....	7
3.2. Propagación de olas y cálculo del setup $\eta$ .....	9
3.2.1. Propagacion de las olas .....	9
3.2.2. Determinacion de la pendiente de la playa .....	9
3.2.3. Calculo del Setup por formula de stockdon .....	10
3.2.4. Calculo del Setup por Metodo del Shore protection Manual (1984) .....	10
3.3. Cálculo de la cota de inundación .....	11
3.4. Modelos estadísticos de extremos .....	11
3.4.1. Distribucion generalizada de valores extremos (GEV) .....	12
3.4.2. Distribucion generalizada de Pareto (GPD) .....	12
4. Resultados .....	13
4.1. Propagación del oleaje .....	13
4.2. Setup .....	14
4.3. Cotas de inundación extremales .....	14
4.4. Análisis de las incertidumbres .....	16
4.1.1. Formato de los graficos de caja .....	16
4.1.2. Incertidumbre de las formulaciones de setup .....	16
4.1.3. Incertidumbre de los modelos estadisticos .....	17
4.1.4. Incertidumbre de los RCMs .....	17
4.1.5. Incertidumbre del ANMM .....	19
4.3. Fracción de la incertidumbre total .....	20
4.4. Explotación de los resultados .....	22
5. Conclusion .....	22
Bibliografia .....	23
Anexos .....	24

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zona de estudio (en el cuadro rojo) del proyecto. ....	1
Figura 2: Series temporales de forzamiento radiactivo ( $W m^{-2}$ ) para datos históricos (1765-2004), y para escenarios futuros de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP;2005-2100) y su continuación como RCPs ampliadas (2100-2500) y como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP; 2005-2100).....	2
Figura 3: Aumentación del nivel medio del mar en la costa de Málaga y percentiles asociados para el periodo 2025 - 2100. El rango de valores cubre el ensemble de los datos de ANMM. Se estudiará en este trabajo los percentiles P5%, P50% y P95%.....	3
Figura 4: Mallas de cálculo de WW3 que componen el dominio mediterráneo (IH Cantabria, 2020) .....	3
Figura 5: (a) Altura de ola significativa ( $H_s$ ) en función del tiempo (1985-2006) (b) Periodo de pico en función del tiempo (1985-2006) (c) Rosa de ola de ERA5 sobre el periodo histórico. (d) Marea meteorológica en función del tiempo (1985-2006). Todos los gráficos tienen por referencia el nivel medio del mar (NMM) local. (e) Marea astronómica para el periodo 1985 – 2100. ....	6
Figura 6: Método completo de obtención de las cotas de inundación. Las diferentes cajas de colores representan las diferentes fuentes de incertidumbres. Los números por la derecha del gráfico suman la repartición de casos obtenidos a partir de las diferentes fuentes de incertidumbres.....	8
Figura 7: Perfiles de playa (en rojo) analizados para el cálculo de la pendiente media de la zona intermareal .....	10
Figura 8: Descripción de los diferentes parámetros utilizados en el cálculo del setup por el método del SPM. El parámetro que deseamos encontrar (setup neto) es el SW. ....	11
Figura 9: Matrices de propagación del coeficiente $k_f$ para los datos de hindcast ERA5 (a) y del ángulo de propagación del oleaje (b) de -37m hasta -15m de profundidad asumiendo una batimetría recta y paralela y aplicando la ley de Snell.....	13
Figura 10: Rosa de ola propagada para el hindcast ERA5 .....	14
Figura 11: Setup para el periodo histórico (1985 – 2006) calculados por la formulación de Stockdon et al. (2006) (a) y por el método del shore protection manual (1984) (b). Los setup han sido calculados para los 6 modelos climáticos corregidos así que para el hindcast ERA5. ....	15
Figura 12 : Gráfico de cajas por las formulaciones de setup para cada periodo temporal. ....	16
Figura 13: Gráfico de cajas de los modelos estadísticos para cada periodo temporal.....	17
Figura 14 : Gráficos de caja de los RCM. Se presentan los mismos resultados en las dos imágenes: (a) ordenadas por periodo temporal para cada RCM (b) ordenadas por RCM para cada periodo temporal.....	18
Figura 15: Gráficos de caja representando el aumento del nivel del mar. ....	19
Figura 16: Resultados de análisis de varianza hecho para 3 experimentos distintos. El experimento E1 representa el análisis de la CI para el hindcast ERA5. El E2 representa el análisis de la varianza para los valores de CI calculados a partir de los RCM sobre los periodos temporales. Finalmente, el tercer experimento E3 representa este mismo análisis, pero teniendo en cuenta el aumento del nivel del mar sobre el periodo de corto y de largo plazo.....	20

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de ANMM para los diferentes percentiles a corto y largo plazo .....	3
Tabla 2 : Modelos climáticos globales (GCM) utilizados como forzamiento de los modelos climáticos regionales (RCM).La segunda y la tercera columna describen a donde han sido desarrollados y sus resoluciones espaciales. ....	3
Tabla 3: Perfiles medidos para el cálculo de la pendiente intermareal de la playa. El perfil 6 no ha sido tomado en cuenta debido a su irregularidad con los otros (anomalía).....	10
Tabla 4: Ejemplo de resultados de la función “anovan” en Matlab. ....	20
Tabla 5 : Resultados del análisis de varianza de los experimentos E1, E2, E3 presentando las fracciones de incertidumbre para cada grupo analizado.....	21

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivo del trabajo

Desde su creación en los años 1990, el IPCC ha publicado 6 conjuntos de informes integrados, destinados en informar los políticos y los responsables de la toma de decisiones sobre el cambio climático. Hoy, en la actualidad, es inequívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra. Se han producido cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera. Como el IPCC cita en su último informe AR6: “El cambio climático ya está afectando a todas las regiones habitadas del planeta, y la influencia humana contribuye a muchos de los cambios observados en el tiempo y los extremos climáticos” (IPCC, 2022).

Las diferentes dinámicas oceánicas (oleaje, corriente, marea meteorológica...) pueden verse afectadas por el cambio climático debido a que este mismo produce cambios en las variables que las generan. Esto puede también afectar a las diferentes infraestructuras o a los ecosistemas presentes en las costas por la inundación o la erosión producidas por estos cambios. Muchos estudios tratan de describir el efecto del cambio climático en los eventos de inundación en el futuro a corto y largo plazo, pero la mayoría analizan solamente la subida del mar sin tener en cuenta estos cambios en las dinámicas costeras (Pérez, Menéndez García, Camus Braña, & Losada Rodríguez, 2019). Además, muchos de los estudios utilizan un planteamiento descendente que consiste en realizar una secuencia de pasos en los cuales se escoge por ejemplo un cierto modelo numérico y los resultados de sus simulaciones climáticas, un modelo estadístico de análisis extremal, una fórmula especial en un cálculo etc. Lo que conduce inevitablemente en una cascada de información alimentado las incertidumbres en el cálculo final de la variable escogida, cuyas incertidumbres no se analizan en la mayoría de los estudios sobre el efecto del cambio climático en el futuro (Toimil, Camus, Losada, & Alvarez-Cuesta, 2021).

El objetivo del presente trabajo es el estudio del efecto del cambio climático en la cota de inundación en un punto frente a la playa de la Misericordia (Málaga) y el análisis de la incertidumbre de cada parámetro en secuencia de paso del enfoque descendente.

En la parte 2. *Base de datos*, se analizará los diferentes datos de partida a disposición para el cálculo del de la cota de inundación (CI). Se presentará también el escenario

de proyecciones climáticas elegido y su influencia sobre los eventos de oleaje y de aumento del nivel medio del mar (ANMM). Luego, en la parte 3. *Metodología*, se presentará los diferentes métodos utilizados para alcanzar a la CI teniendo en cuenta las dinámicas del mar. Posteriormente, en la parte 4. *Resultados*, se analizará los diferentes resultados, y, sobre todo, las incertidumbres debidas a cada uno de los pasos permitiendo de calcular la CI. Finalmente, en la última parte 5 *Conclusión* se concluye sobre el trabajo realizado.

## 1.2. Área de estudio

El área de estudio es la playa de la Misericordia de Málaga en la costa sur de España, que se ubica en la provincia de Málaga, en la Comunidad autonomía de Andalucía. Esta playa es una playa urbana turística con puestos de salvavidas, duchas y también alquiler de sombrillas y hamacas. Tiene una longitud de 1,2km y una anchura media de 30m, con un grano fino de arena, y está delimitada por el espigón de La Térmica al sur y el puerto de Málaga en el norte. La playa entera se compone en realidad de dos playas distintas: La playa de Huelin al norte y la playa de la misericordia al sur. Es una playa con una frecuencia relativamente media con un paseo marítimo por detrás.

El régimen de marea es micro mareal (rango de marea máximo de 0.70m) con una periodicidad semi-diurnal. Las olas provienen principalmente:

- Un “swell” (olas de 0.5m hasta 2m principalmente y que pueden llegar a 4m y con periodo de picos hasta los 10s), desarrollándose por el efecto del viento en el Mar Mediterráneo y que llega casi perpendicular a la playa de Málaga.
- Un “sea” (olas hasta 1m), que proviene de la entrada de las olas del Océano Atlántico en el Mar Mediterráneo y que llegan en la costa casi paralelamente.



Figura 1: Zona de estudio (en el cuadro rojo) del proyecto.

La playa tiene un ángulo medio en respecto al norte 30.5°. El clima de Málaga es un clima mediterráneo típico con pocos días de lluvia al año (43) concentrados en invierno.

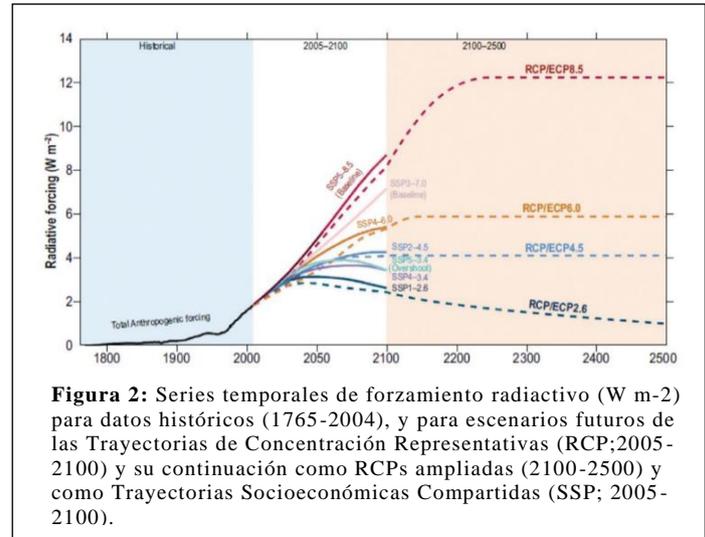
## 2. BASE DE DATOS

A continuación, se describe la información y bases de datos de partida utilizadas en este trabajo.

### 2.1. Escenarios de proyecciones climáticas

La misión del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) es evaluar y sintetizar el estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos disponibles, de manera neutral y objetiva, en relación con el tema del calentamiento global. Desde 1990, el IPCC ha publicado 6 informes. En el último (AR6), se describen nuevas proyecciones correspondientes a un conjunto de escenarios en los que se integran los forzamientos radiativos (FR) que oscilan entre 2.6 y 8.5 W/m<sup>2</sup> (ver *Figura 2*) con diferentes Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés) a los que se asocian las proyecciones climáticas de la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Este informe evalúa la respuesta climática a cinco escenarios ilustrativos que cubren la gama de posibles desarrollos futuros de los impulsores antropogénicos del cambio climático encontrados en la literatura. Comienzan en 2015 e incluyen escenarios con emisiones de GEI altas y muy altas (SSP3-7,0 y SSP5-8,5) y emisiones de CO<sub>2</sub> que se duplican aproximadamente con respecto a los niveles actuales para 2100 y 2050, respectivamente, escenarios con emisiones de GEI intermedias (SSP2-4,5) y emisiones de CO<sub>2</sub> que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo, y escenarios con emisiones de GEI muy bajas y bajas y emisiones de CO<sub>2</sub> que disminuyen hasta llegar a ser nulas en torno a 2050 o después de esa fecha, seguidas de niveles variables de emisiones netas negativas de CO<sub>2</sub> (SSP1-1,9 y SSP1-2,6).

En este estudio, se han seleccionado dos periodos de análisis futuros: un periodo de corto plazo (2026-2045) y un periodo de largo plazo (2081-2100) y el escenario de proyecciones SSP5 - 8.5.



### 2.2 Aumento del nivel del mar

El aumento del nivel medio del mar (ANMM) es una de las consecuencias más conocidas del cambio climático que afecta a las zonas y comunidades costeras de todo el mundo. Tanto las variaciones del nivel del mar en el pasado como las proyectadas a futuro se modelan y analizan con frecuencia utilizando los datos de los modelos de circulación general atmósfera-océano (AO-GCMs) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP). El AR6 utiliza simulaciones actualizadas del conjunto de modelos climáticos del CMIP6 para producir proyecciones actualizadas del nivel medio del mar a nivel global (GMSL) y regional (RMSL) hasta 2150 (con confianza media).

Se ha escogido para el análisis del aumento del nivel medio del mar un punto de nivel regional cerca de la playa de la misericordia para el escenario SSP5-8.5.

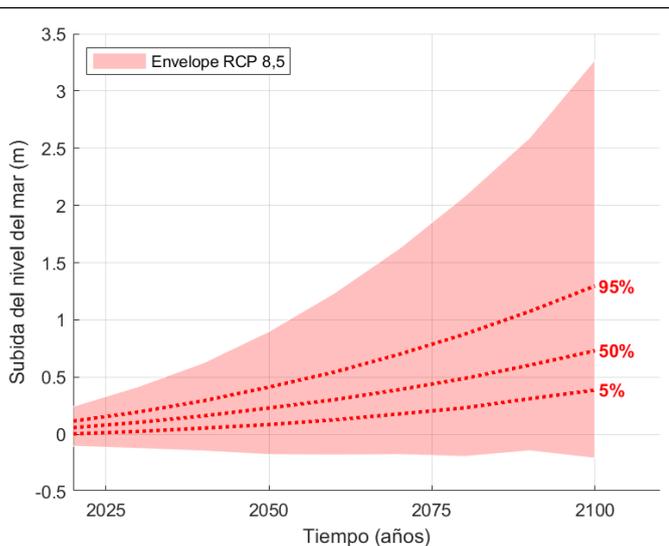
Punto	Lat	Lon	Esc.
0746	36.6780 °	-4.4393°	SSP5 8.5

Se usará para cada proyección un valor medio de ANMM por su periodo (corto o largo plazo). Para el corto plazo, utilizaremos el valor de 2035 y para el largo plazo, el valor de 2090. Con el fin de evaluar la incertidumbre debido a la ANMM, para cada proyección, se evaluará la cota de inundación para los percentiles 5%, 50% y 95%. Se puede ver en la *Figura 3* las curvas representativas del ANMM en función del percentil escogido así que como el rango inferior y superior de todos los valores del ANMM que proporciona el ensemble de datos utilizado, para el punto de malla de esta base datos localizado en frente de Málaga.

En la tabla siguiente se resumen los valores estimados para los periodos futuros seleccionados y los percentiles ecogidos.

Año	Percentile	ANMM (m)
2035 (corto plazo)	5%	0,04
	50%	0,132
	95%	0,244
2090 (largo plazo)	5%	0,311
	50%	0,604
	95%	1,074

**Tabla 1:** Valores de ANMM para los diferentes percentiles a corto y largo plazo



**Figura 3:** Aumentación del nivel medio del mar en la costa de Málaga y percentiles asociados para el periodo 2025 - 2100. El rango de valores cubre el ensemble de los datos de ANMM. Se estudiará en este trabajo los percentiles P5%, P50% y P95%.

## 2.2. Datos de oleaje y marea meteorológica

En 2020, el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHCantabria) ha generado proyecciones de condición de oleaje y de marea meteorológica a partir de un ensemble de modelos climáticos. Este ensemble de modelos es basado en 6 modelos climáticos globales descritos en la *tabla 2*. Estos modelos utilizan una malla tridimensional global, con una resolución horizontal que generalmente varía entre los 200 y 500 km y cuentan con entre 10 y 20 capas verticales en la atmósfera y, a veces, hasta 30 capas sobre los océanos (IH Cantabria, 2020).

Todos estos modelos tienen datos sobre el periodo histórico: 1985-2005, así que proyecciones de corto plazo: 2026-2045 y de largo plazo: 2081-2100 con los dos escenarios de proyecciones RCP 4.5 y 8.5 (ver 2.1 escenarios de proyecciones).

Nombre (GCM)	Institución	Resolución espacial
CNRM -CM5	Centre National des Recherches Météorologiques	1.40°x1.40°
HadGEM2 - ES	Met-office Hadley Centre	1.25°x1.90°
EC-EARTH	EC-EARTH consortium	1.25°x1.90°
IPSL -CM5A	Institut Pierre Simon Laplace	1.25°x1.25°
MIROC5	MIROC	1.40°x1.40°
GDFL - ESM2	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Lab	2.0°x2.0°

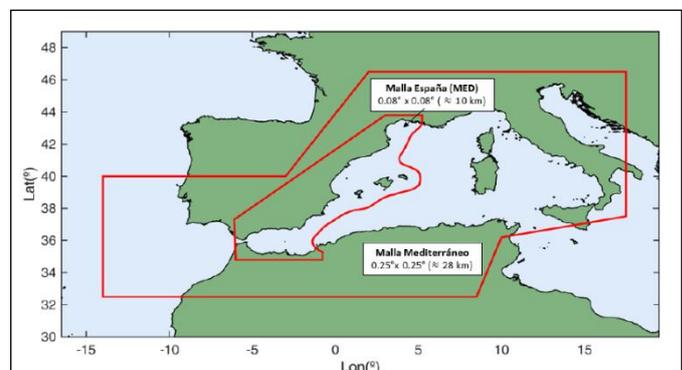
**Tabla 2 :** Modelos climáticos globales (GCM) utilizados como forzamiento de los modelos climáticos regionales (RCM). La segunda y la tercera columna describen a donde han sido desarrollados y sus resoluciones espaciales.

### 2.2.1 PROYECCIONES DE OLEAJE Y MAREA METEOROLOGICA

#### *Proyecciones de oleaje*

Los datos utilizados en el presente trabajo son datos desarrollados por el IH. Se utilizó como forzamiento de esos datos, modelos climáticos regionalizados (RCMs), los cuyos han sido regionalizados. Estos datos tienen buena resolución en la costa de España y permiten generar dinámicas marinas que no están en los RCMs. (Pérez, Menéndez García, Camus Braña, & Losada Rodríguez, 2019).

El proceso de regionalización ha sido realizado a partir del modelo WaveWatchIII (WW3; versión 4.18 (Tolman, 2002)) sobre el periodo histórico, de corto plazo y de largo plazo. WW3 es un modelo espectral de tercera generación que permite simular la generación y propagación del oleaje que resuelva la ecuación de balance de energía teniendo en cuenta, en aguas someras, el efecto de la profundidad, la refracción, la fricción con corrientes y fondo, el crecimiento y decaimiento de la energía del oleaje y las interacciones no lineales entre ellas. El dominio de cálculo tiene una resolución de 0.08°x0.08° (~100m).



**Figura 4:** Mallas de cálculo de WW3 que componen el dominio mediterráneo (IH Cantabria, 2020)

Como salidas del modelo WW3 se han obtenido los campos de oleaje, es decir la altura de ola significativa ( $H_s$ ), el periodo de pico ( $T_p$ ), su dirección media y el periodo medio ( $T_m$ ), en cada una de las mallas a resolución horaria. Luego, se ha validado la metodología de regionalización dinámica aplicada a partir de resultados obtenidos de las variables atmosféricas procedentes de la base de datos de reanálisis ERA-5 como forzamiento del modelo WW3 durante el periodo histórico de referencia 1985-2005 y boyas cerca de la costa española.

### *Proyecciones de marea meteorológica*

De la misma manera que para las proyecciones de oleaje, se ha regionalizado los datos de marea meteorológica de los GCMs. Para eso, se ha utilizado el modelo ROMS, versión 3.5 (Regional Ocean Modeling System, (Alexander F. Shchepetkin, 2005)). ROMS es un modelo hidrodinámico tridimensional de superficie libre con coordenada vertical adaptable al terreno. Este modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes con promediado de Reynolds, asumiendo la hipótesis de presión hidrostática y la aproximación de Boussinesq. El dominio de cálculo tenía una resolución de  $0.8^\circ \times 0.6^\circ$ .

Las proyecciones climáticas de marea meteorológica se han validado mediante el uso de medidas in situ procedentes de los mareógrafos de Puertos del Estado. En concreto, la validación se ha hecho para el periodo de control 1985-2005, utilizando los resultados de las proyecciones dinámicas a partir de las variables atmosféricas de la reanálisis de ERA-5.

Como salidas del modelo se han obtenido datos horarios de marea meteorológica a una resolución espacial inferior a 10 km. Estos datos utilizan como nivel de referencia el nivel del mar a una presión atmosférica (SLP) de 1.013 hp.

Finalmente, las series temporales de oleaje y de marea meteorológica se encuentran en el punto siguiente:

Punto	Lat	Lon	Modelo
0046	36.6667 °	-4.4167 °	WW3

## 2.2.2 BASE DE DATOS HISTÓRICO

### *Base de datos ERA5*

La base de datos del reanálisis ERA-5 ha sido generado por El Centro Europeo de Predicciones Climáticas a Medio Plazo (Dee, et al., 2011). Esta base cubre un periodo de 1979 hasta la actualidad y tiene una resolución espacial de

$0.25^\circ \times 0.25^\circ$  y una resolución temporal horaria. ERA-5 combina datos de observaciones con modelos acoplados de los subsistemas climáticos mediante el proceso de asimilación de datos. Contiene informaciones sobre una multitud de variables atmosféricas y oceanográficas. A partir de este producto europeo de reanálisis, IHCantabria ha desarrollado dos productos de hindcast regionalizados de igual manera que las proyecciones de oleaje y marea meteorológica descritas. Se ha utilizado también esta base de datos para evaluar la marea meteorológica.

Las variables climáticas que resultan de los modelos climáticos pueden presentar errores sistemáticos importantes debido a la falta de resolución espacial, simplificaciones de los procesos físicos y termodinámicos, esquemas numéricos, errores en las condiciones iniciales y de contorno, complejidad de los procesos climáticos. El hindcast desarrollados a partir de los forzamientos atmosféricos de ERA5 ha sido utilizado para corregir el sesgo de las simulaciones climáticas utilizadas en este estudio a partir del método del Empirical Quantile Mapping (EQM). Por eso se ha comparado los resultados de modelos climáticos y esta base de datos sobre el periodo 1985-2005. Los datos históricos de marea meteorológica y de oleaje se corresponden con la misma ubicación que la ubicación analizada de las simulaciones climáticas analizadas, es decir:

Punto	Lat	Lon
0046	36.6667 °	-4.4167 °

### *Régimen de oleaje en el periodo histórico*

A partir de la base de datos del hindcast del oleaje ERA5, se puede sacar las primeras informaciones históricas sobre el régimen de las olas que llegan a la playa de Málaga. Primeramente, la altura de ola significativa (*ver Erreur ! Source du renvoi introuvable. (a)*) tiene por valor mínimo 0.002m y puede alcanzar 3.55m (03 de marzo 1990). El periodo de pico (*ver Erreur ! Source du renvoi introuvable. (b)*) de las olas registrado varia de 1.5s hasta 11.2s (11 de enero 1986). Finalmente, la dirección de ola (*ver Erreur ! Source du renvoi introuvable. (d)*), como descrito en la parte 1.2. Área de estudio, esta debida por dos efectos principales:

1. El oleaje generado por el viento en el Mar mediterráneo se representa aquí en la *Erreur ! Source du renvoi introuvable. (d)* y esta caracterizado por las olas que provienen entre  $90^\circ$  y

150°. Representa el 70% de del oleaje (El 25% de este llegan con un ángulo entre 105° y 115°.

2. El oleaje del Océano Atlántico que entra por el estrecho de Gibraltar y que llega a la costa con un ángulo de 150° hasta 240°. Representan el 30% del oleaje que llega hasta la playa de la Misericordia.

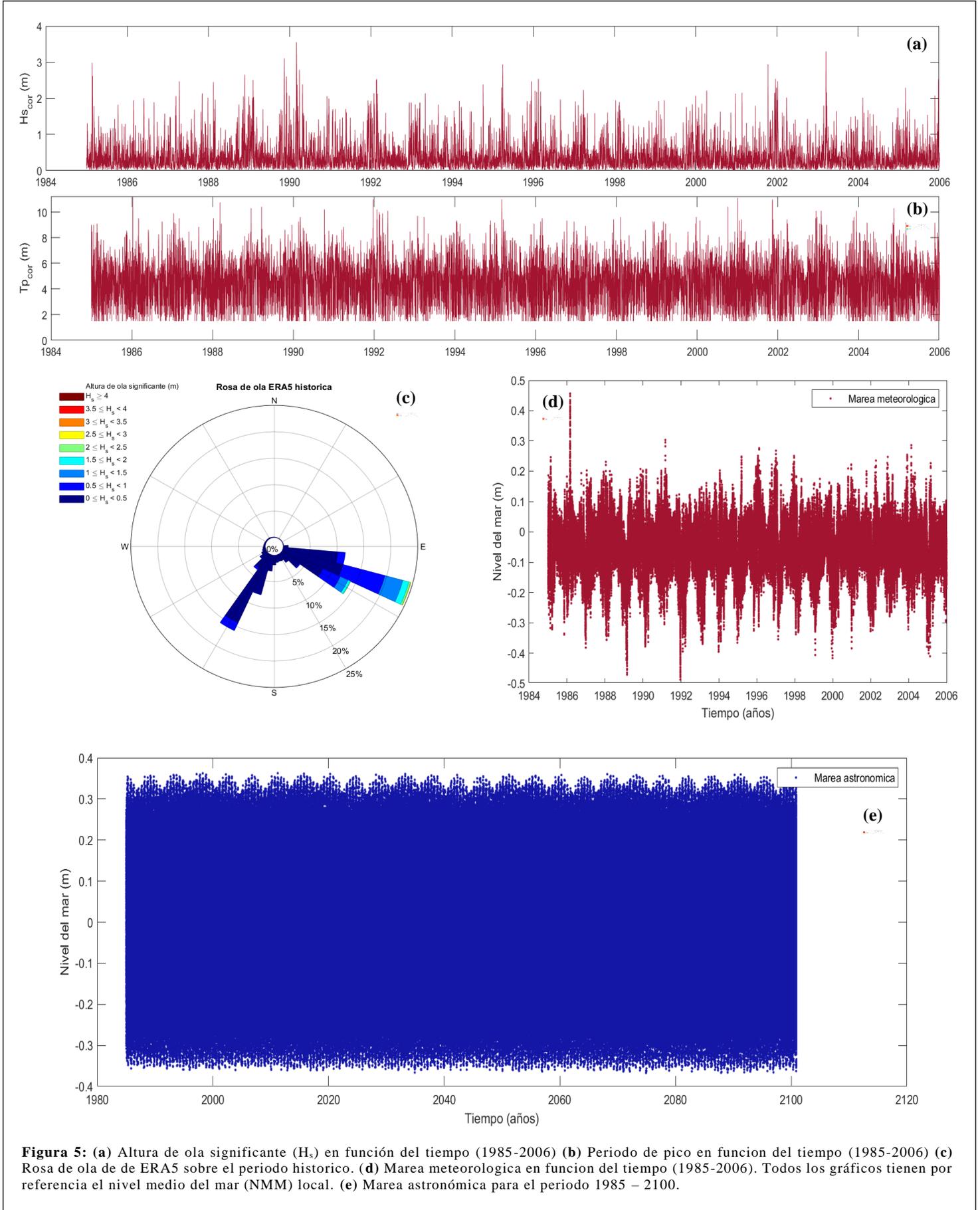
### *Régimen de marea meteorológica*

La marea meteorológica (MM) se define como la respuesta del nivel del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento y campos de presiones. Estas mareas pueden generar sobreelevaciones considerables del nivel medio del mar. En el caso de la playa de la Misericordia de Málaga, el nivel del mar (*ver Erreur ! Source du renvoi introuvable. (d)*) ha alcanzado un valor de 0.457m el 28 de febrero 1986 y de -0.488m el 21 de diciembre 1991.

## 2.3. Marea astronómica

Las series temporales horarias de las elevaciones de las mareas astronómicas se calcularon a partir de los constituyentes armónicos proporcionados por los modelos de mareas globales y locales de TPXO desarrollados por la Universidad Estatal de Oregón (OSU) (Egbert & Erofeeva, 2002). Estos modelos representan un ajuste óptimo por mínimos cuadrados de la ecuación de marea de Laplace a los datos de altimetría por satélite. En este estudio se utilizó la soluciónTPXO9-atlas, que proporciona los componentes armónicos M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, M4, MS4, MN4 y 2N2 con una resolución de 1/30° y los componentes Mm, Mf y S1 con una resolución de 1/6°. La máxima pleamar según el modelo es de 0.363m en relación con el nivel medio del mar (NMM) local y la máxima bajamar es de -0.367m. La serie temporal de la marea astronómica se puede ver en la *Erreur ! Source du renvoi introuvable. (e)*. El punto de reconstrucción global de la marea oceánica (GOT) se encuentra en:

Punto	Lat	Lon	Modelo
242	36.7133 °	-4.4033 °	TPXO9



**Figura 5:** (a) Altura de ola significativa ( $H_s$ ) en función del tiempo (1985-2006) (b) Periodo de pico en función del tiempo (1985-2006) (c) Rosa de ola de de ERA5 sobre el periodo historico. (d) Marea meteorologica en función del tiempo (1985-2006). Todos los gráficos tienen por referencia el nivel medio del mar (NMM) local. (e) Marea astronomica para el periodo 1985 – 2100.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Procedimiento de los cálculos de CI

Como se ha mencionado en la introducción, el objetivo del trabajo es el cálculo de la cota de inundación en la costa ante condiciones extremas (i.e. para diferentes periodos de retorno). Se desea luego, analizar la incertidumbre debido a cada una de su fuente. La cadena de fuente de incertidumbre se describe en la *Figura 6* y en los puntos siguientes:

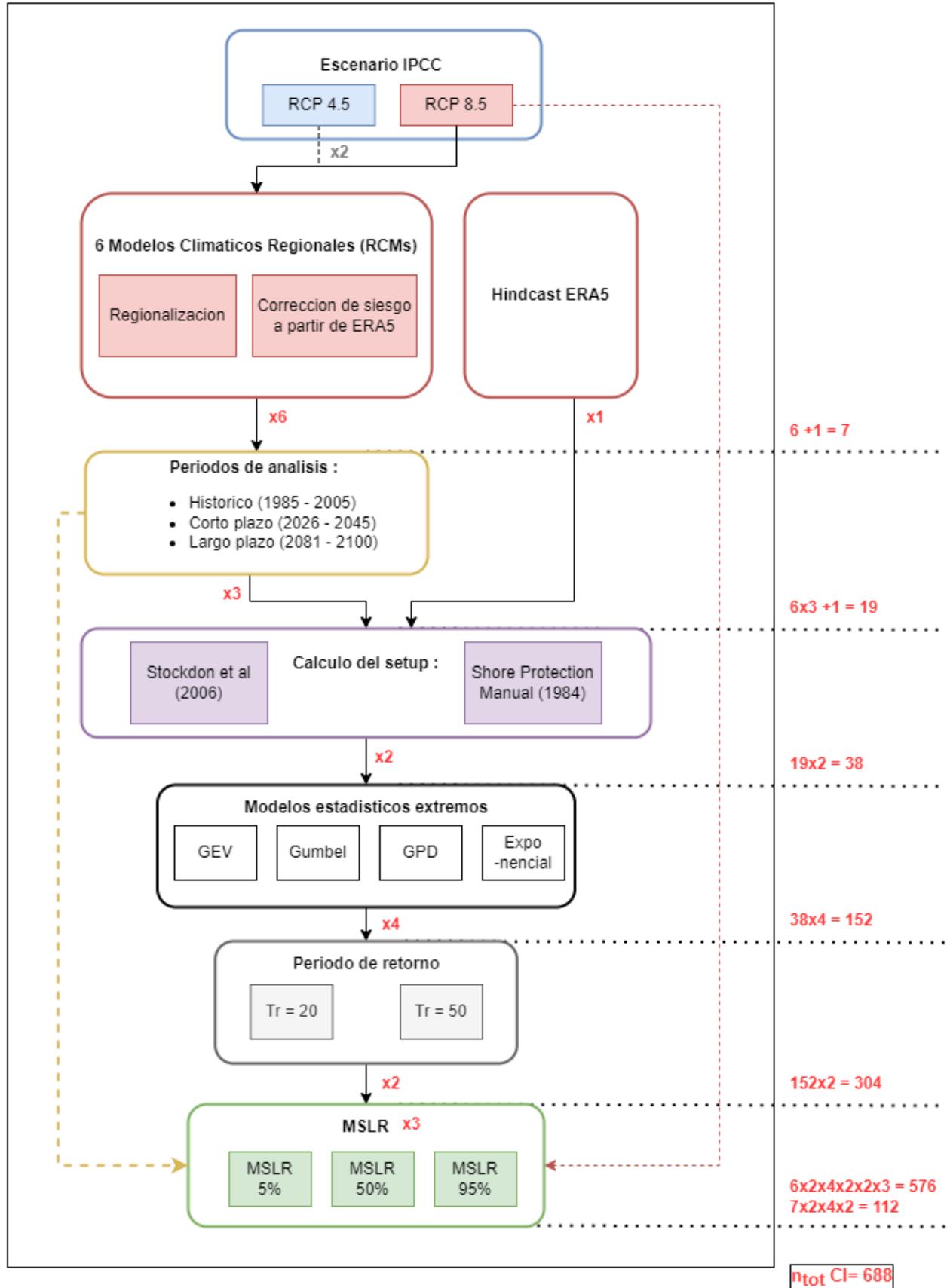
1. **Escenario de proyecciones del IPCC:** Al principio del estudio dos escenarios de proyecciones climáticas han sido escogidos. El escenario de emisiones de GEI intermedio SSP2-RCP4.5 y el escenario de emisiones de GEI alto SSP5-RCP8.5. Por falta de tiempo, solo hemos podido analizar el escenario de alta emisiones SSP5-RCP8.5.
2. **Modelos climáticos RCMs y Hindcast:** 6 RCMs han sido elegidos para el análisis de la CI. Cada uno tiene como datos horarios de marea meteorológica y de oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ , dir) necesarios al calculo de la CI (ver parte 3.3. *Cálculo de la cota de inundación*). El Hindcast ERA5 se utilizó como referencia para comparar los datos de los hindcast y así comparar los resultados entre el periodo histórico y las proyecciones a corto y largo plazo. Así, evaluamos las 6 proyecciones climáticas y el hindcast ERA5. **(7)**
3. **Periodo de analisis:** El periodo historico (1985 – 2006), el periodo de corto/medio plazo (2026 – 2045), el periodo de largo plazo (1981 – 2100). Las 6 proyecciones han sido evaluadas sobre los 3 periodos de analisis y esto corresponde a 19 casos diferentes. **(19)**
4. **Calculo del set up:** Se ha elegido 2 formulaciones diferentes para el calculo del set up que permite luego de obtener la cota de inundacion. La primera formula (luego escrita como formula de Stockdon) ha sido desarrollado por Hilary F. Stockdon en 2006 en su articulo “Empirical parameterization of setup, swash, and runup” (Hilary F. Stockdon, 2006). La segunda viene del Shore Protection Manual (U.S Army, 1984), publicado en 1984 por la U.S. army en lo cual se ha desarrollado varios metodos de analisis de los procesos costeros para la ingenieria costera y

portuaria. Se describen las formulaciones y el calculo del setup en la parte 3.2. *Propagación de olas y cálculo del setup*  $\eta$ . **(38)**

5. **Modelos estadísticos de analisis extremal:** En vez de obtener la CI para un periodo de retorno de 20 y 50 años, se ha calculado el setup de los mismos periodos de retorno a partir de 4 modelos estadísticos extremales diferentes:
  - a. **Distribucion generalizada de valores extremos (GEV)**
  - b. **Distribucion de Gumbel**
  - c. **Distribucion generalizada de Pareto (GPD)**
  - d. **Distribucion exponencial**

Los modelos b. y d. son distribuciones simplificadas de las funciones de distribuciones generalizadas descritas en a. y c. respectivamente que no tienen en cuenta el parametro de forma de la distribucion. Se cuenta mas de estas distribuciones en la parte 3.4. *Modelos estadísticos de extremos*. Entonces se puede multiplicar el nombre de casos total por cuatro lo que nos da en esta etapa 152 casos. **(152)**

6. **Periodos de retorno:** A partir del analisis extremal, dos periodos de retorno han sido escogidos. El de 20 y de 50 años. Duplicamos aquí el numero de casos. **(304)**
7. **Aumento del nivel medio del mar (ANMM):** Para cada periodo de proyecciones (corto/medio y largo plazo), se ha añadido valores de subida del nivel medio del mar, datos producidos por el IPCC para los escenarios de RCP4.5 y RCP8.5. Se ha escogido, como descrito antes, los percentiles 5%, 50%, 95% de manera a evaluar el impacto del ANMM en el futuro. El ANMM no se aplica en el periodo historico asi que los casos no se multiplican por 3. Solamente las 6 proyecciones sobre los periodos de corto/medio y largo plazo **(2)** multiplicadas por las 2 formulas, los 4 modelos estadísticos, los 2 periodos de retorno cubrieron los 3 percentiles de ANMM **(576)**. Para el periodo historico **(1)**, 6 modelos climaticos y el hindcast **(7 en total)** siguieron los pasos originales sin los niveles de ANMM **(7x2x4x2 = 112)**. **(688)**



**Figura 6:** Método completo de obtención de las cotas de inundación. Las diferentes cajas de colores representan las diferentes fuentes de incertidumbres. Los números por la derecha del gráfico suman la repartición de casos obtenidos a partir de las diferentes fuentes de incertidumbres.

## 3.2. Propagación de olas y cálculo del setup $\eta$

El Setup es una de las componentes de la cota de inundación. Se define como la sobrelevación del nivel medio del mar, generado por el gradiente transversal de la tensión de radiación que resulta de la ruptura de las olas (Longuet Higgins & Stewart, 1963)

Se desea calcular el setup a partir de dos métodos principales. La primera desarrollada en el Shore Protection Manual (SPM) por la US Army en su última versión (Volumen IV) de 1984. La segunda es la formulación del setup desarrollada por Stockdon (Stockdon et al. 2006) y una de las más usadas hasta ahora,

### 3.2.1. PROPAGACION DE LAS OLAS

Se han usado las formulaciones generales para la propagación del oleaje de los diferentes modelos climáticos para los diferentes periodos de tiempo así que para el hindcast ERA5. Debido a la batimetría de la playa de Málaga recta y homogénea (ver batimetría *Figura 7*), se asume una batimetría recta y paralela y por eso se usa la ley de Snell para la propagación. La normal a la playa se estima con un ángulo de  $120,5^\circ$  con el Norte. Además, las olas que vienen con un ángulo superior a  $90^\circ$  de la normal de la playa (es decir olas que llegan a la playa con un ángulo inferior a  $30,5^\circ$  o superior a  $210,5^\circ$  con el norte) están consideradas nulas.

El objetivo es de propagar la ola hasta 15 metros de profundidad porque se ha medido la altura de ola significativa a esa profundidad en el estudio de Stockdon para sacar las formulaciones empíricas de setup.

El efecto de asomeramiento combinado a la refracción generada por la playa se puede definir por la formulación:

$$H_2 = K_s K_r H_1 \quad (1.1)$$

Con:

$H_2$ : La altura de ola significativa en la profundidad objetiva

$H_1$ : La altura de ola significativa medida o del RCM.

$K_s$ : El coeficiente de asomeramiento

$K_r$ : El coeficiente de refracción

$$K_s = \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \quad (1.2)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)}} \quad (1.3)$$

Con:

$C_{g2}$ : La celeridad de grupo del oleaje en el punto objetivo

$C_{g1}$ : La celeridad de grupo del oleaje en el punto de medidas o RCM

$\theta_2$ : El ángulo con la normal de la playa del oleaje en el punto objetivo

$\theta_1$ : El ángulo con la normal de la playa del oleaje en el punto de medidas o RCM

Así, a partir de la Ley de Snell, se puede calcular el ángulo con la normal de las olas en frente de la playa con la relación:

$$\theta_2 = \text{asin}\left(\frac{C_2}{C_1} \sin(\theta_1)\right) \quad (1.4)$$

Debido al número importante de datos se utiliza la formulación aproximada de Fenton y Mckee (Fenton & Mckee, 1990) para la longitud de onda en la profundidad objetiva (-15m) en la que el error es estimado a menos 1.7%:

$$L_2 = \frac{gT^2}{2\pi} \left( \tanh^3 \left( \frac{2\pi \sqrt{\frac{h_{obj}}{g}}}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1.5)$$

Con:

$L_2$ : La longitud de onda en el punto objetivo

$T$ : El periodo del oleaje

$h_{obj}$ : La profundidad en el punto objetivo

$g$ : Aceleración de la gravedad

### 3.2.2. DETERMINACION DE LA PENDIENTE DE LA PLAYA

El cálculo del setup por la fórmula de Stockdon o por el método del SPM necesita la pendiente intermareal de la playa. Esta característica ha sido calculada a partir de un modelo topo-batimétrico de Andalucía. Este proviene del sitio web del Gobierno de España y ha sido generado a partir de un Modelo Digital del Terreno (MDT), la digitalización de la línea de costa del IGN (Instituto Geográfico Nacional) y de eco-cartografías del litoral español (Almería, Granada, Málaga, Cádiz). El sistema de proyección de la capa SIG es ETRS89 UTM30N EPSG 25830 y tiene por referencia el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA). El modelo topo-batimétrico tiene una resolución de 5x5m.

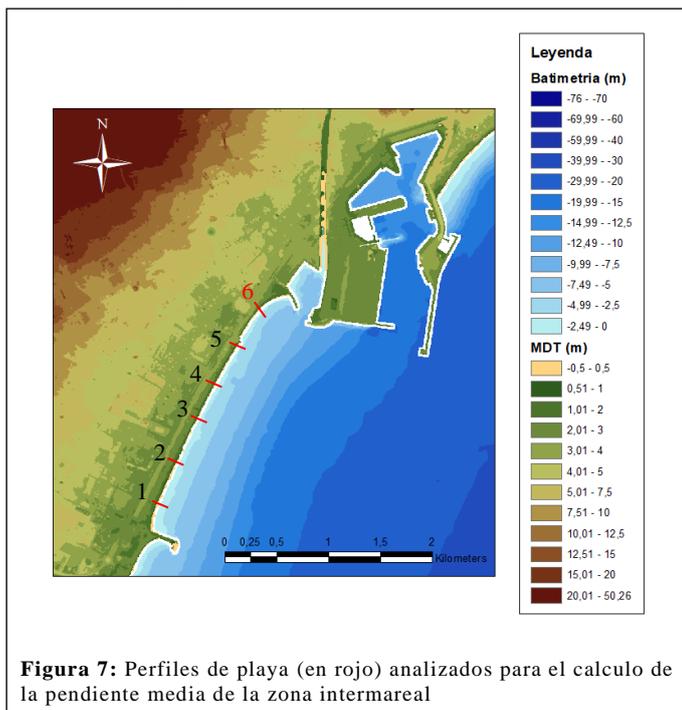
A partir del dibujo explicativo de los niveles de referencias (*ver en anexo: Niveles de referencias en Málaga*), se sabe que el PMVE es 0.35m en referencia a NMMA y la BMVE -0.44m. Entonces se ha determinado en GIS la zona que se sitúa entre estos dos valores. Luego, se puede hacer 6 perfiles para obtener la pendiente media de la playa.

La *Tabla 3* muestra los diferentes valores de la elevación de la playa y su distancia lineal de cada perfil para obtener la pendiente media intermareal. Casi todos han sido elegidos con una elevación entre -0.6m y 0.6m o 0.8m. Sin embargo, el perfil 6, que se sitúa en al noreste de la playa (*ver Figura 7*) tiene una pendiente mucho más elevada que los otros perfiles. Queremos hacer el cálculo del setup con el perfil lo más representativo de la playa y este valor es una anomalía debido a la resolución del MDT. Así, se ha quitado este perfil de nuestro análisis y se pudo encontrar a la media de la pendiente intermareal. Se pueden ver los perfiles medidos en anexos *B.Perfiles medidos en ArcGIS*.

$$\beta_{med} = 0.072 \text{ m/m}$$

	x1	x2	z1	z2	$\beta$
Perfil 1	75	90	-0,6	0,8	0,093
Perfil 2	71	92	-0,6	0,6	0,057
Perfil 3	60	78	-0,6	0,8	0,078
Perfil 4	93	112	-0,6	0,6	0,063
Perfil 5	82	100	-0,6	0,6	0,067
Perfil 6	78	83	-0,6	0,6	0,240

**Tabla 3:** Perfiles medidos para el cálculo de la pendiente intermareal de la playa. El perfil 6 no ha sido tomado en cuenta debido a su irregularidad con los otros (anomalía).



**Figura 7:** Perfiles de playa (en rojo) analizados para el cálculo de la pendiente media de la zona intermareal

### 3.2.3. CALCULO DEL SETUP POR FORMULA DE STOCKDON

En su artículo “Empirical parameterization of setup, swash, and runup” parecido en 2006, Stockdon y su equipo han desarrollado métodos y experimentaciones para sacar formulaciones empíricas de los principales parámetros de elevación del nivel del agua producidos por rotura de la ola. Han encontrado que la mejor forma de parametrizar la configuración en la línea de costa fue utilizando una forma dimensional del número de Iribarren que incluye la pendiente de la playa, la altura de las olas y la longitud de onda de las aguas profundas (Hilary F. Stockdon, 2006). El número de Iribarren se define por:

$$\xi = \frac{\beta}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.1.1)$$

Las formulaciones han sido parametrizadas a partir de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) medida en 15 metros de profundidad en varias playas con una pendiente entre 0.01 m/m y 0.11 m/m.

Para estimar  $H_0$  durante cada serie temporal del nivel del agua, las mediciones de  $H_s$  con las boyas locales y los conjuntos de instrumentos fueron trasladadas a aguas profundas utilizando la teoría lineal de las olas asumiendo una aproximación normal a la costa.

Así también, se ha calculado las alturas de ola en aguas profundas por las olas propagadas de las diferentes proyecciones de los modelos climáticos. La formulación del setup general es la siguiente:

$$\eta = \beta_f 0.35 (H_0 L_0)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.2)$$

Con:

$\beta_f$ : La pendiente de la playa

$H_0$ : La altura de ola en profundidades indefinidas

$L_0$ : La longitud de onda en profundidades indefinidas

### 3.2.4. CALCULO DEL SETUP POR METODO DEL SHORE PROTECTION MANUAL (1984)

Se desea comparar la formulación de cálculo del setup de Stockdon et al. (2006) con el método desarrollado por el U.S. Army en el Shore Protection Manual (SPM) en 1984. La definición de los términos usados en el SPM se puede encontrar en la *Erreur! Source du renvoi introuvable.* Se desea calcular el setup neto, es decir:

$$S_w = \Delta S - S_b \quad (3.2.1)$$

Con:

$S_w$ : Set-up neto de la ola

$\Delta S$ : La subida total debido a la rotura de la ola

$S_b$ : Set-down de la ola

La mayoría de las formulaciones usados en el SPM son las que han sido desarrollado por Longuet Higgins y Stewart en el papel "Note on wave setup" en 1963. Han demostrado en primer lugar:

$$S_b = -\frac{g^{\frac{1}{2}} H_0^2 T_m}{64 \pi d_b^{\frac{3}{2}}} \quad (3.2.2)$$

Con:

$T_m$ : El periodo medio de la ola

$H_0$ : La altura de ola significativa en profundidades indefinidas

$d_b$ : La profundidad de la ola en el punto de rotura

La profundidad de la ola en el punto de rotura luego se escribe

$$d_b = \frac{H_b}{b - \left(a \frac{H_b}{g T_m^2}\right)} \quad (3.2.3)$$

Con:

$H_b$ : La altura de ola de rotura

$$a = 43.75 (1 - e^{-19\beta}) \quad (3.2.4)$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5\beta})} \quad (3.2.5)$$

Con:

$\beta$ : La pendiente intermareal de la playa

El Shore Protection Manual propone la formulación de (Munk, 1949) para el cálculo de la altura de ola de rotura:

$$H_b = \frac{H_0}{3.3 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (3.2.6)$$

En el papel "Note on wave setup" (Longuet Higgins & Stewart, 1963) han demostrado:

$$\Delta S = 0.15 d_b \quad (3.2.7)$$

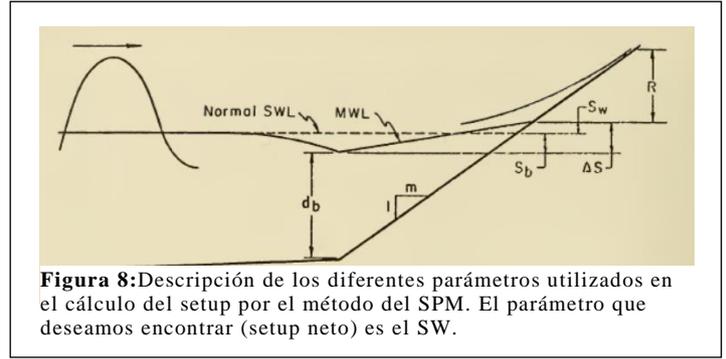


Figura 8: Descripción de los diferentes parámetros utilizados en el cálculo del setup por el método del SPM. El parámetro que deseamos encontrar (setup neto) es el  $S_w$ .

Así finalmente:

$$\eta = S_w = 0.15 \frac{H_b}{b - \left(a \frac{H_b}{g T_m^2}\right)} - \frac{g^{\frac{1}{2}} H_0^2 T_m}{64 \pi \left(\frac{H_b}{b - \left(a \frac{H_b}{g T_m^2}\right)}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.2.8)$$

### 3.3. Cálculo de la cota de inundación

A partir de los estudios ya hecho, se puede determinar la cota de inundación que luego analizaremos. Se define tal que:

$$CI = MA + MM + \eta + NMMA \quad (3.3)$$

Con:

**MA**: Marea astronómica

**MM**: Marea meteorológica

**NMMA**: Referencia del nivel medio del mar. En este caso, se han referenciado todos los puntos al Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA).

### 3.4. Modelos estadísticos de extremos

La teoría de valores extremos analiza y desarrolla el estudio de las probabilidades relacionadas con las colas de las funciones de distribución y engloba diferentes tipos de modelos que parten de distintos planteamientos estadísticos. Cada modelo de extremos se basa en el tipo de función de distribución de extremos utilizada (Coles, 2001).

Se desea sacar, a través del análisis extremal, las CI para periodos de retorno de 20 y 50 años. El periodo de retorno es un intervalo medio de tiempo, al cabo de lo cual se igualará o superará un suceso de una determinada magnitud. En nuestro caso, por ejemplo, si el periodo de retorno del evento "la cota de inundación alcanza el valor 1,2m" es de 100 años, su probabilidad de ocurrencia en un año es de 1%.

2 modelos estadísticos distintos han sido utilizados para la generación de las CI extrémales de periodo de retorno de 20 y 50 años. Estos modelos son descritos en las partes siguientes.

### 3.4.1. DISTRIBUCION GENERALIZADA DE VALORES EXTREMOS (GEV)

La función de distribución puede describirse mediante la expresión:

$$G(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x + \mu}{\psi}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} & \xi \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]\right\} & \xi = 0 \end{cases} \quad (3.4.1)$$

La función de densidad se define mediante:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{\psi} \left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]^{-\left(1 + \frac{1}{\xi}\right)} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x + \mu}{\psi}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} & \xi \neq 0 \\ \frac{1}{\psi} \exp\left(-\frac{x - \mu}{\psi}\right) \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right] & \xi = 0 \end{cases} \quad (3.4.2)$$

Con:

$-\infty < \mu < \infty$ : El parámetro de localización.

$\psi > 0$ : El parámetro de escala.

$-\infty < \xi < \infty$ : El parámetro de forma.

El parámetro de localización representa  $\mu$  los valores medios de la variable aleatoria  $x$ . El parámetro de escala controla la dispersión de la unidad de medida dentro del rango de la distribución de forma que cambiando el mismo se logra contraer o expandir la distribución a lo largo del eje horizontal.

El parámetro de forma condiciona un tipo diferente de distribución, la expresión para  $\xi \neq 0$  engloba dos familias de distribución: Fréchet para el caso de  $\xi > 0$  y Weibull para el caso de  $\xi < 0$ , mientras que el caso para  $\xi = 0$  se obtiene a partir del límite de la ecuación definida para Fréchet/Weibull cuando  $\xi \rightarrow 0$ , definiendo la familia de distribuciones tipo Gumbel.

El ajuste se realiza por máxima verosimilitud. La estimación de los cuantiles asociados al periodo de retorno es estima mediante la ecuación:

$$X_R = \begin{cases} \mu - \frac{\psi}{\xi} \left[1 - \left(-\log\left(\exp\left(-\frac{1}{R}\right)\right)\right)^{-\xi}\right] & \text{para } \xi \neq 0 \\ \mu - \psi \log\left(-\log\left(\exp\left(-\frac{1}{R}\right)\right)\right) & \text{para } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.4.3)$$

En nuestro caso de estudio, se pondrá en primer lugar el parámetro de forma  $\xi \neq 0$  y luego se analizará la CI extremal con un parámetro de forma  $\xi = 0$  (**Distribución de Gumbel**) para periodos de retorno de 20 y 50 años.

### 3.4.2. DISTRIBUCION GENERALIZADA DE PARETO (GPD)

Los modelos de extremos basados en máximos en un bloque de tiempo presentan ciertas desventajas, especialmente cuando se utiliza el método del máximo anual. La principal debilidad es la escasez de valores extremos que resultan a la hora de aplicar el modelo, lo que puede dar lugar a aplicaciones no prácticas debido a que se requiere una muestra de datos muy grande para obtener unos pocos máximos.

Una alternativa al modelo de máximos es definir los valores extremos como aquellos que exceden un determinado valor umbral. Este método suele llamarse el método POT (Peak Over Threshold). Tras la selección del umbral de corte se estudian los excesos que resultan por encima de él, y se definen los valores extremos de estudio como el valor máximo de los picos de mayor magnitud que caracterizan cada episodio. El umbral se puede definir como un valor dado o también un percentil de valor. Se ha definido el umbral a partir del percentil 99.5% con una interdependencia temporal de 3 días. Las muestras de los picos de excedencia sobre este umbral resultantes presentan un tamaño que varía entre 20 y 50 valores según cada caso, dependiendo del modelo climático, de la fórmula de setup, y del periodo de estudio.

Se puede analizar los datos escogidos a partir del método POT con un modelo de Pareto-Poisson (Generalized Pareto Distribution GPD). Su función de distribución se define así:

$$G(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi\frac{x}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{si } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right) & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.4.4)$$

Consideramos un proceso de Poisson con una media  $\lambda$  tal que:

$$P(n; \lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^n}{n!} \quad (3.4.5)$$

Este modelo se aproxima al método de la GEV. Se puede determinar la cota de inundación de periodo de retorno  $R$  siguiendo las ecuaciones (3.4.3) y utilizando las siguientes

transformaciones para obtener los parámetros característicos de la GPD  $\sigma$  y  $\lambda$ .

$$\begin{cases} \sigma = \psi + \xi(u - \mu) \\ \lambda = \left\{ 1 + \left( \frac{\xi}{\psi} (u - \mu) \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{\xi}} \end{cases} \quad (3.4.6)$$

De la misma manera que para la GEV, se estudiara el modelo de Pareto Poisson para periodos de retorno 20 y 50 años **con y sin** parámetro de forma ( $\xi \neq 0$  y  $\xi = 0$ ). El caso especial sin parámetro de forma se llamará **distribución exponencial**.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Propagación del oleaje

Se ha propagado el oleaje para cada modelo y para cada periodo hasta 15 m de profundidad en vez de aplicar la fórmula de setup empírica de Stockdon que se ha desarrollado a partir de datos de oleaje (sobre todo con  $H_s$ ) de una boya a 15 m de profundidad.

Se ha sacado matrices de propagación del coeficiente de asomeramiento del ángulo de propagación del oleaje para cada conjunto de datos. En la *Figura 9*, se puede ver los resultados para el hindcast ERA5. Se ha calculado para cada trozo de  $10^\circ$  y cada segundo la media del coeficiente de propagación o el ángulo de propagación de las olas. Se ha luego dibujado las matrices resultadas e interpolado los colores. La primera matriz expone el coeficiente de propagación  $k_f$  definido por:

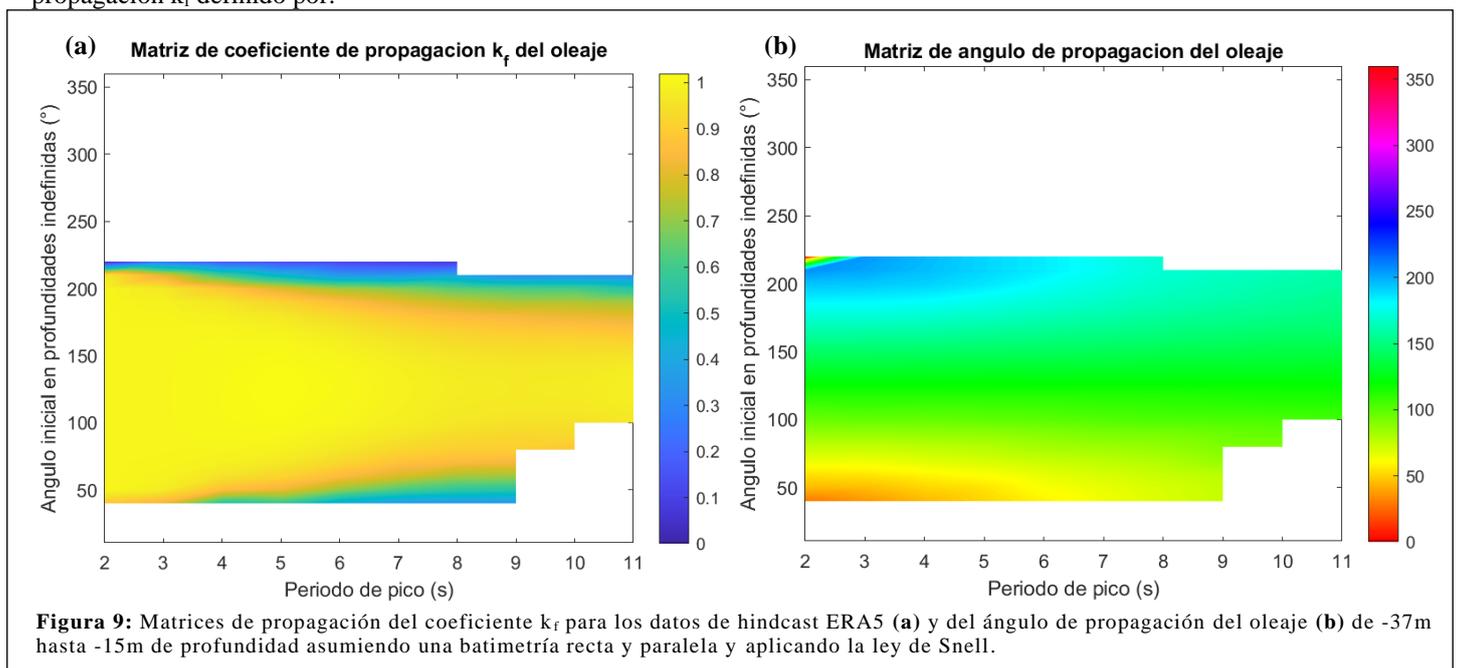
$$k_f = k_s k_r \quad (4.1)$$

Este coeficiente representa el aumento ( $k_f > 1$ ) o el descenso ( $k_f < 1$ ) de la ola ( $H_s$ ). Este coeficiente se representa en la *Figura 9 a*) en función del periodo de pico del oleaje así que de su dirección inicial. No se representan los valores antes de  $T_p=2s$  porque por debajo de este periodo se define el periodo límite de profundidades indefinidas.

$$T_l = \sqrt{4\pi \frac{h_{obj}}{g}} \quad (4.2)$$

Se puede ver en la *Figura 9 (a)* que el coeficiente de propagación no cambia mucho a lo largo de la propagación salvo en los ángulos extremales de la playa  $\pm 80^\circ$  en relación con la normal de la playa. Se nota también que solo llegan olas con grandes periodos de pico en frente de la playa, lo que corrobora lo que se dijo en la parte 2.2.2 *Base de datos histórico* con el SEA y el SWELL.

En la *Figura 9 (b)*, se puede ver la transformación del ángulo de la ola a lo largo de la propagación. Se ve que las olas sufren un poco de la refracción y que tienden a llegar en frente de la playa con un ángulo de  $120^\circ$  en relación con el norte, es decir perpendicularmente a la playa. Pero este efecto es bastante débil, debido a la profundidad en la cual se ha propagado el oleaje. Se nota un artefacto en la figura también arriba por la izquierda debido a la interpolación de los colores de las matrices por Matlab.



**Figura 9:** Matrices de propagación del coeficiente  $k_f$  para los datos de hindcast ERA5 (a) y del ángulo de propagación del oleaje (b) de -37m hasta -15m de profundidad asumiendo una batimetría recta y paralela y aplicando la ley de Snell.

En la *Figura 10*, se puede ver la rosa de ola propagada, de la misma manera que en la *Erreur ! Source du renvoi introuvable. (c)*. Se puede ver que no hay olas que lleguen con un ángulo  $\pm 90^\circ$  en relación con la normal de la playa. Casi 40% de las olas tienen una dirección entre  $95^\circ$  y  $125^\circ$ . Las olas que provienen de la entrada de las olas del Atlántico en el mar mediterráneo se ven también en este gráfico y representan aproximadamente 22% de las olas que llegan a la playa y tienen una altura de ola inferior 0.5m.

Los mismos gráficos han sido dibujados para cada periodo de cada RCM desde -37m hasta -15m también en vez de verificar la propagación. Los resultados son muy parecidos para el ensemble de modelos.

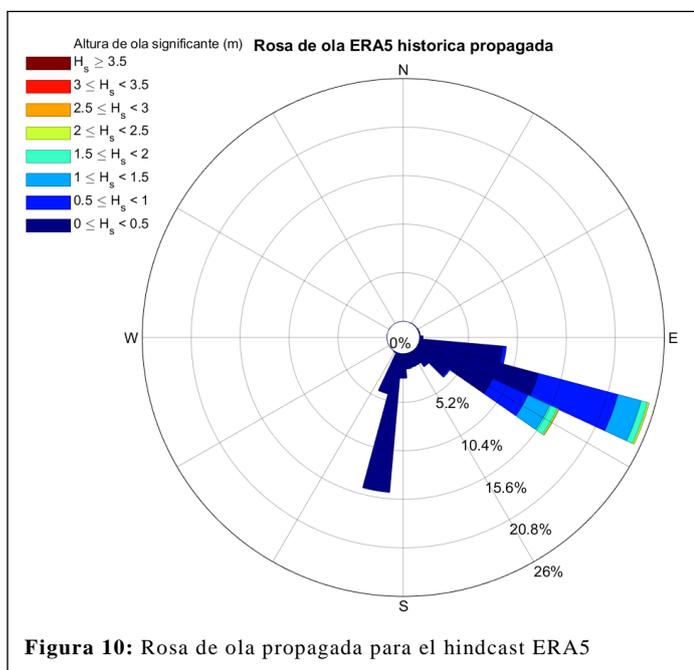


Figura 10: Rosa de ola propagada para el hindcast ERA5

## 4.2. Setup

Se ha calculado el set up para cada RCM a partir de las dos formulaciones de Stockdon y del Shore Protection Manual sobre el periodo histórico (1985 – 2006), el corto plazo (2026 – 2045) y el largo plazo (2081 – 2100).

Primeramente, como se puede ver en la *Figura 11*, aunque se ha escogido solamente un mes para comparar los datos, los resultados de setup son bastante parecidos para las 2 formulaciones. No obstante, se puede notar que la formulación del SPM sale setup un poco más pequeño que la fórmula de Stockdon. Esto se confirmará en la siguiente presentación de los datos.

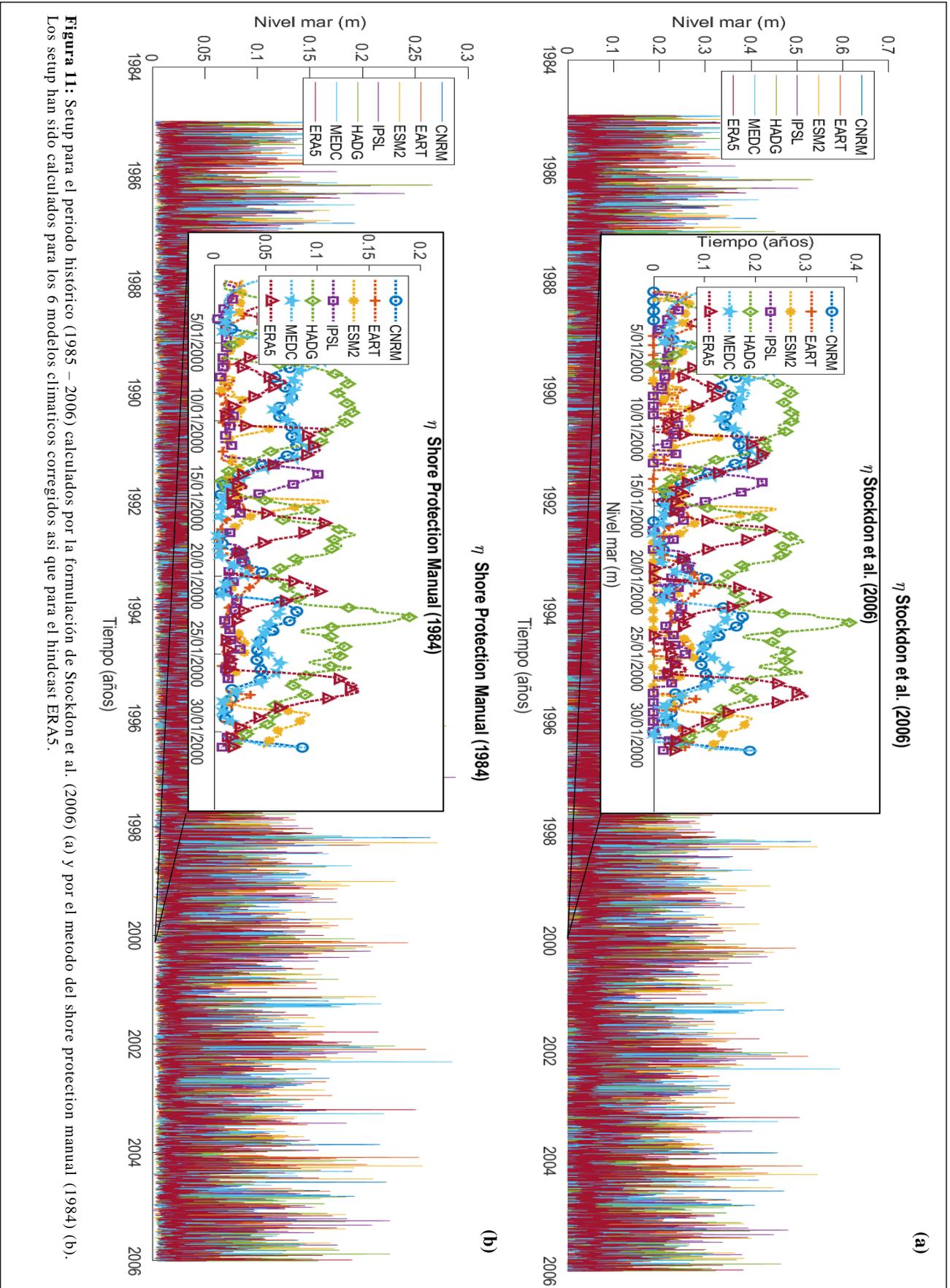
## 4.3 Cotas de inundación extremas

A continuación de los setup calculados para las dos formulaciones, se presenta las cotas de inundación extremas calculados por los diferentes modelos estadísticos. Se recuerda que 4 modelos estadísticos han sido utilizados:

1. GEV con parámetro de forma
2. GEV sin parámetro de forma (Modelo Gumbel)
3. GPD con parámetro de forma
4. GPD sin parámetro de forma (Modelo Exponencial)

Entonces se ha calculado las CI extremas para cada RCM, cada periodo, cada formulación de setup, y los periodos de retorno de 20 y 50 años.

Luego se ha añadido los diferentes percentiles de ANMM. Finalmente, 688 resultados de CI extremas han sido calculado. (ver en anexo: *Cálculo de la cota de inundación*)



**Figura 11:** Setup para el periodo histórico (1985 – 2006) calculados por la formulación de Stockdon et al. (2006) (a) y por el metodo del shore protection manual (1984) (b). Los setup han sido calculados para los 6 modelos climaticos corregidos asi que para el hindcast ERA5.

## 4.4 Análisis de las incertidumbres

Se tratará de analizar las incertidumbres a través de diferentes resultados estadísticos. Se intentará en un primer lugar de analizar gráficos de caja factorizados en función de la formulación o del modelo estadístico usados, en función del periodo de tiempo o en función del RCM, y luego se tratará de analizar el peso de cada fuente de incertidumbre en los resultados por un análisis de la varianza. Los resultados han sido estudiados solamente para el periodo de retorno 50 años.

### 4.1.1 FORMATO DE LOS GRAFICOS DE CAJA

Para analizar la incertidumbre en la CI asociada a cada fuente, se han utilizado gráficos de cajas que tienen el formato siguiente:

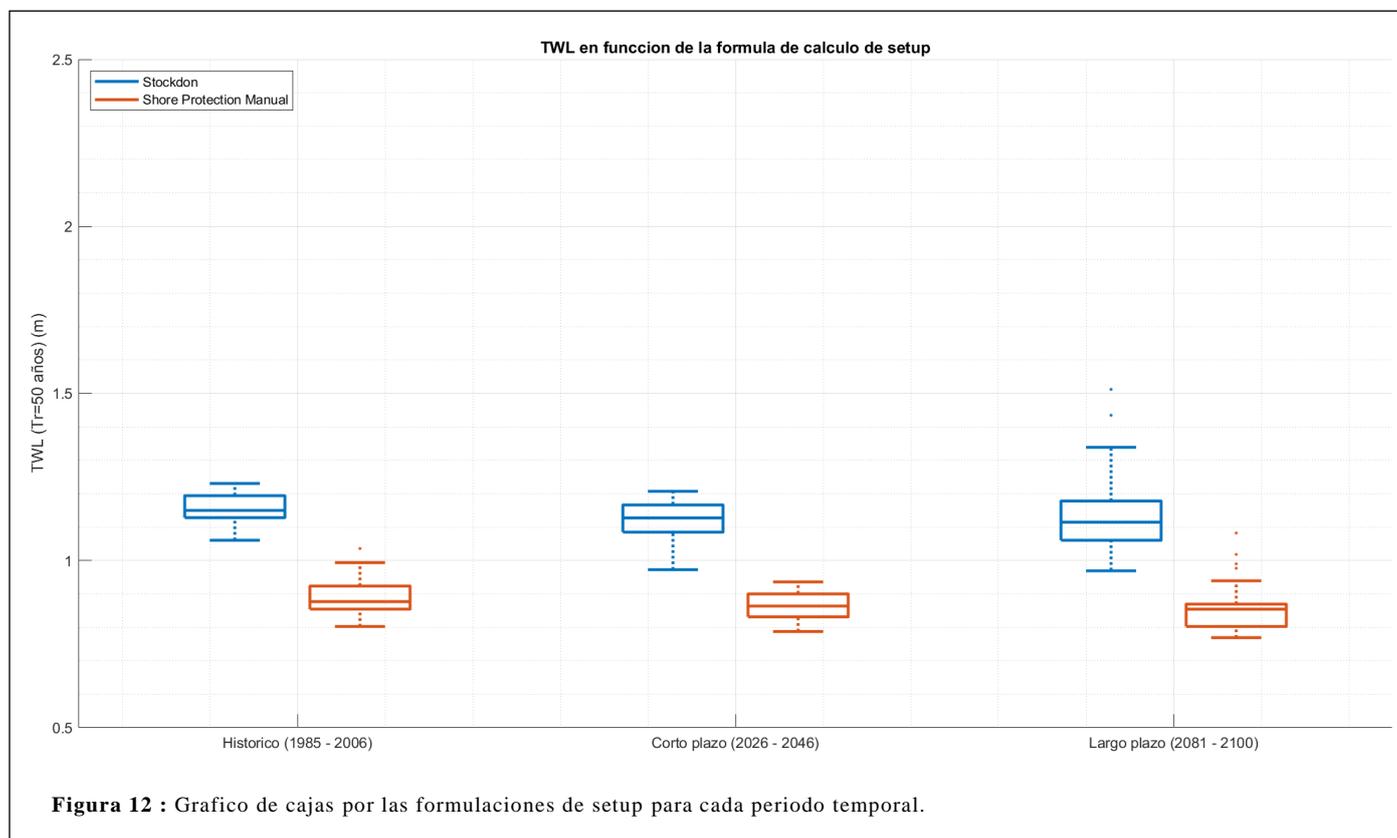
- La línea dentro de la caja representa la mediana de los datos.
- Las líneas inferiores y superiores de las cajas representan los percentiles de 25% y 75% respectivamente de los datos analizados. La diferencia entre el cuartil 75% y el 25% es el intervalo inter-cuartil.

- Las límites por arriba y abajo representadas por líneas las líneas discontinuadas son los límites de Whisker que representan cualquiera de los dos:
  - 1.5 el inter-cuartil si los datos se expenden hasta estos valores o:
  - El valor mínimo/máximo de la serie de datos.
- Si hay puntos por abajo o por encima de los whiskers, estos representan valores consideradas como valores anormales de la serie.

### 4.1.2. INCERTIDUMBRE DE LAS FORMULACIONES DE SETUP

En vez de analizar la dispersión debida a cada formula, se ha quitado el valor de ANMM en los resultados de CI.

El análisis se hace sobre los datos de los 6 modelos climáticos sobre el periodo histórico (1985 – 2006), el periodo de corto plazo (2026 – 2046) y el periodo de largo plazo (2081 – 2100). Un total de 144 CI de periodo de retorno 50 años, es decir 24 CI (6 por cada RCM x 4 por modelo de análisis extremal) para cada formula de setup han sido analizados.



Se nota primeramente en la Figura 12, que la formulación de Stockdon proporciona CI mayores que la formulación de SPM para el periodo histórico (mediana de 1.15m para Stockdon y 0.87m para el SPM) y el periodo de corto plazo (media de 1.14m para Stockdon y 0.86m para el SPM) con cajas de mismo tamaño 0.08m para Stockdon y 0.07m para SPM sobre el periodo histórico y 0.08m para las dos fórmulas para el corto plazo. No obstante, los resultados son muy parecidos para los dos periodos.

Aunque las medianas de las CI casi no cambian para el periodo de largo plazo, la dispersión de las CI aumenta mucho, con 4 valores por encima del intervalo intercuartil, para formulaciones de setup de SPM y 2 para Stockdon. Así, las incertidumbres factorizadas por fórmula de setup aumentan ligeramente a largo plazo. Se confirma aquí que la fórmula de Stockdon proporciona setup mayores que la fórmula del SPM como visto en la parte 4.2. Setup.

### 4.1.3. INCERTIDUMBRE DE LOS MODELOS ESTADÍSTICOS

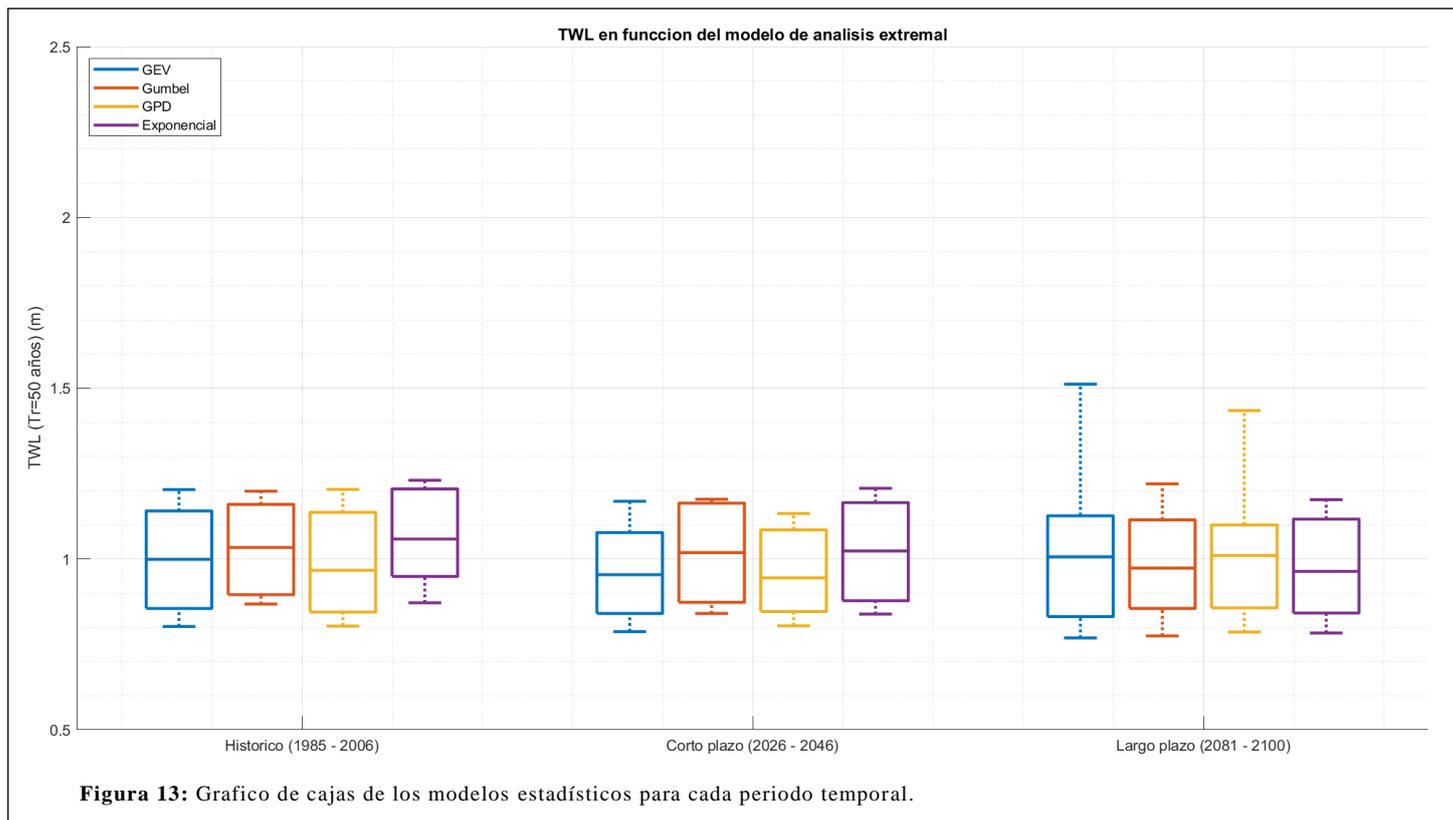
El análisis se hace sobre los datos de los 6 modelos climáticos sobre el periodo histórico (1985 – 2006), el periodo de corto plazo (2026 – 2046) y el periodo de largo plazo (2081 – 2100). Un total de 144 valores de CI de periodo de retorno 50 años, es decir 12 CI (6 por cada RCM x 2 por cada fórmula de setup) para cada modelo estadístico han sido

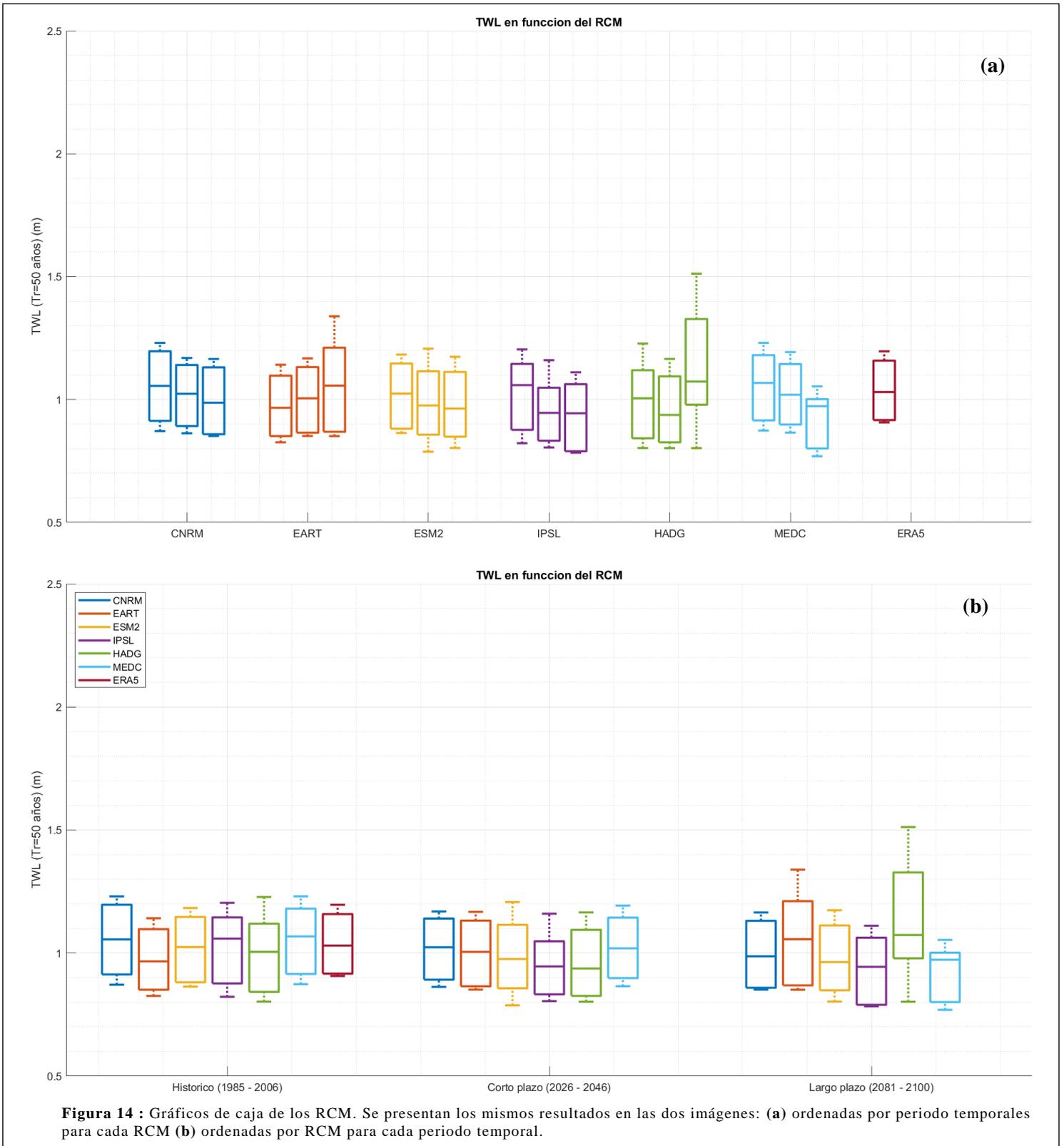
analizados. Aquí también se ha quitado los valores de ANMM.

Se nota aquí que los datos son bastante simétricos (mediana en la mitad de la caja) con una mediana acercándose del valor de 1 para cada modelo. Los modelos de Gumbel y Exponencial se encuentran con valores ligeramente más grande para los periodos históricos y de corto plazo en comparación a los modelos GEV y GPD con parámetro de forma. Esto se puede explicar en parte por los parámetros de forma por la mayoría negativos para esos dos periodos. No obstante, para los periodos futuros, los modelos de GEV y GPD alcanzan valores mucho más grandes y tienen una dispersión mayor. De manera general, los modelos estadísticos presentan una dispersión mayor para el periodo de largo plazo, salvo el modelo exponencial.

### 4.1.4. INCERTIDUMBRE DE LOS RCMS

El análisis se hace sobre los datos de los 6 modelos climáticos sobre el periodo histórico (1985 – 2006) y también en el hindcast ERA5, el periodo de corto plazo (2026 – 2046) y el periodo de largo plazo (2081 – 2100). Un total de 152 valores de CI de periodo de retorno 50 años, es decir 8 CI (4 por cada modelo estadístico x 2 por cada fórmula de setup) para cada RCM han sido analizados. Aquí también se ha quitado los valores de aumento del ANMM.





La *Figura 14* expone los resultados obtenidos. En la primera figura (**a**), las cajas están ordenadas por periodo temporal para cada RCM, y al revés para la segunda figura (**b**). Se nota en la *Figura 14 (a)*, que los RCM no siguen la misma dinámica a lo largo del tiempo. Efectivamente los RCM: CNRM, IPSL, y MEDC tienen una tendencia en la disminución de las CI hacia el largo plazo, mientras que los modelos EART y HADG ven los valores de CI calculados a partir de sus proyecciones aumentar. El RCM ESM2 por su parte ve sus valores de CI bastante constante. Se ha puesto también en este gráfico la caja de las CI del hindcast ERA5 para comparar con los RCM.

En la *Figura 14 (b)*, se nota que la variabilidad intermodelos es muy baja: las medianas oscilan entre 0.97 (EART) y 1.08m (MEDC) y estos valores corresponden al valor mediano de los valores de CI para ERA5 (1.02m). Al corto plazo, las medianas bajan débilmente para alcanzar entre 0.95m (IPSL) y 1.01m (CNRM y MEDC). El tamaño de las cajas y de los whiskers reducen también muy débilmente, pero quedan bastante parecidos al periodo histórico. Al largo plazo en cambio, los comportamientos son muy diferentes. Podemos notar una dispersión mucho más grande en los modelos EART y HADG. Sus medianas han aumentado ligeramente también para pasar (de corto plazo) de 1.00m y 0.93m hasta 1.03m y 1.04m respectivamente (crecimiento de 12.8% para HADG. En términos de dispersión también, la caja de RCM al largo plazo alcanza valores de 1.51m contra

1.18m al corto plazo. Se nota también para el modelo MEDC una caja muy disimétrica revelador de muchos más valores concentrados en el cuantil alto que en el cuantil bajo.

#### 4.1.5. INCERTIDUMBRE DEL ANMM

El análisis se hace sobre los datos de los 6 modelos climáticos sobre el periodo de corto plazo (2026 – 2046) y el periodo de largo plazo (2081 – 2100). Un total de 576 valores de CI de periodo de retorno 50 años, es decir 48 CI (4 por cada modelo estadístico x 2 por cada fórmula de setup x 6 para cada RCM) para cada percentil de ANMM han sido analizados.

Los resultados se pueden ver en la *Figura 15*. Lo que se nota es que las cajas entre los diferentes periodos temporales son las mismas. Es normal porque el percentil de ANMM se ha añadido después de la CI. Así, en términos estadísticos, los grupos evaluados tienen la misma dispersión, pero con una mediana que ha subido una translación. Las cajas tienen una anchura de 0.28m y 0.23m para el corto y el largo plazo respectivamente con una dispersión un poco más grandes para los valores alto en el largo plazo. Se puede ver también un valor anormal, que corresponde al valor de la CI evaluado con el RCM HADG por la fórmula de Stockdon por un modelo POT. Se puede esperar aquí que el ANMM juega un papel importante en las incertidumbres debido a que los valores alcanzan 2.5m con el P95% de ANMM al largo plazo.

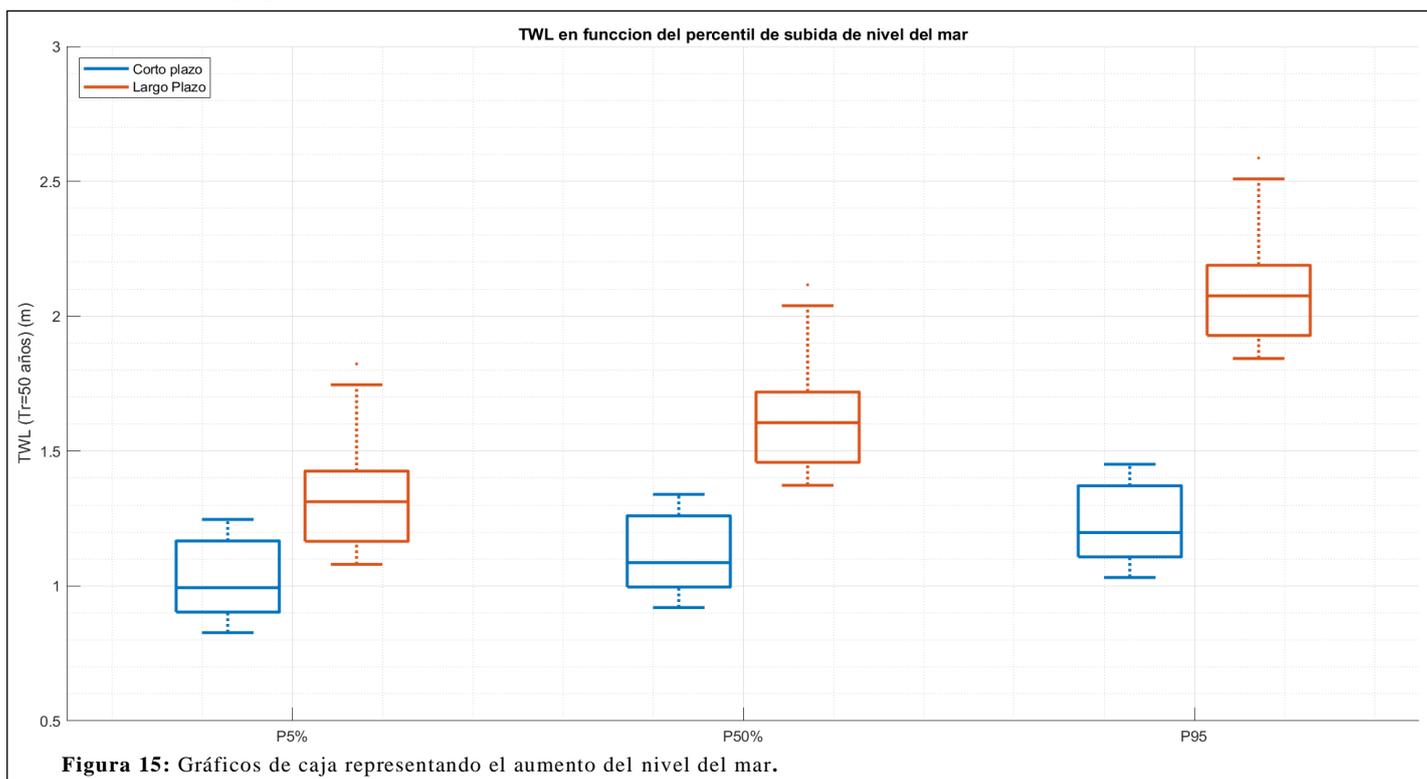


Figura 15: Gráficos de caja representando el aumento del nivel del mar.

### 4.3 Fracción de la incertidumbre total

Ahora que se ha mostrado las diferentes fuentes de incertidumbre en el cálculo de la CI de periodo de retorno 50 años, se desea cuantificar la contribución de cada fuente en estos resultados. Para eso se ha hecho un análisis de la varianza (ANOVA) basada en cuatro factores determinantes:

- Los modelos climáticos regionalizados (RCM)
- El aumento del nivel del mar (ANMM)
- Las fórmulas de setup
- Los modelos estadísticos de análisis extremal

En Matlab, la función ANOVAN devuelve una tabla con los diferentes grupos analizados así que grupos de interacciones inter grupos (por ejemplo, en la Tabla 4, corresponden a las líneas 4 -8). Para cada grupo, se calcula la suma del error cuadrático frente a su media (columna 2), la

Analysis of Variance					
Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
RCM	0.03983	5	0.00797	Inf	NaN
Formula	0.82498	1	0.82498	Inf	NaN
Modelo estadístico	0.0494	3	0.01647	Inf	NaN
RCM*Formula	0.00238	5	0.00048	Inf	NaN
RCM*Modelo estadístico	0.01505	15	0.001	Inf	NaN
Formula*Modelo estadístico	0.0048	3	0.0016	Inf	NaN
RCM*Formula*Modelo estadístico	0.02686	15	0.00179	Inf	NaN
Error	-0	0	-0		
Total	0.9633	47			

Tabla 4: Ejemplo de resultados de la función “anovan” en Matlab.

columna 3 expone los grados de libertad. El grado de libertad total es el número total de observaciones menos uno, en el ejemplo de la tabla 4,  $48-1=47$ . Los grados de libertad dentro de los grupos son los números de subgrupos dentro de los grupos, menos uno. Por ejemplo, en la Tabla 4, los grupos son los RCM, la fórmula de setup y los modelos estadísticos. El grado de libertad del grupo RCM corresponde al número de modelos climáticos menos uno, es decir  $6-1 = 5$ . En el grupo formula (*de setup*), hay solamente 2 formulaciones diferentes, así el grado de libertad es de  $2-1=1$ . En la cuarta columna, se puede ver el error medio cuadrático, que es la suma de los errores cuadráticos dividido por el grado de libertad de cada grupo. La función “anovan” permite también el estudio de las interacciones dobles, triples, cuádruples entre los diferentes grupos analizados. La tabla de cada análisis se puede encontrar en anexos

El análisis se centrará principalmente en el estudio de las incertidumbres de cada grupo, y de las interacciones inter grupos. 3 experimentos han sido analizados. El primero experimento **E1** consiste en el análisis de las CI sacadas del hindcast ERA5 y se basa solamente en los factores del setup y de los modelos estadísticos. Esto representa solamente 8 valores de CI analizados la Figura 16 representa la partición en porcentaje de las incertidumbres calculados en el análisis de la varianza.

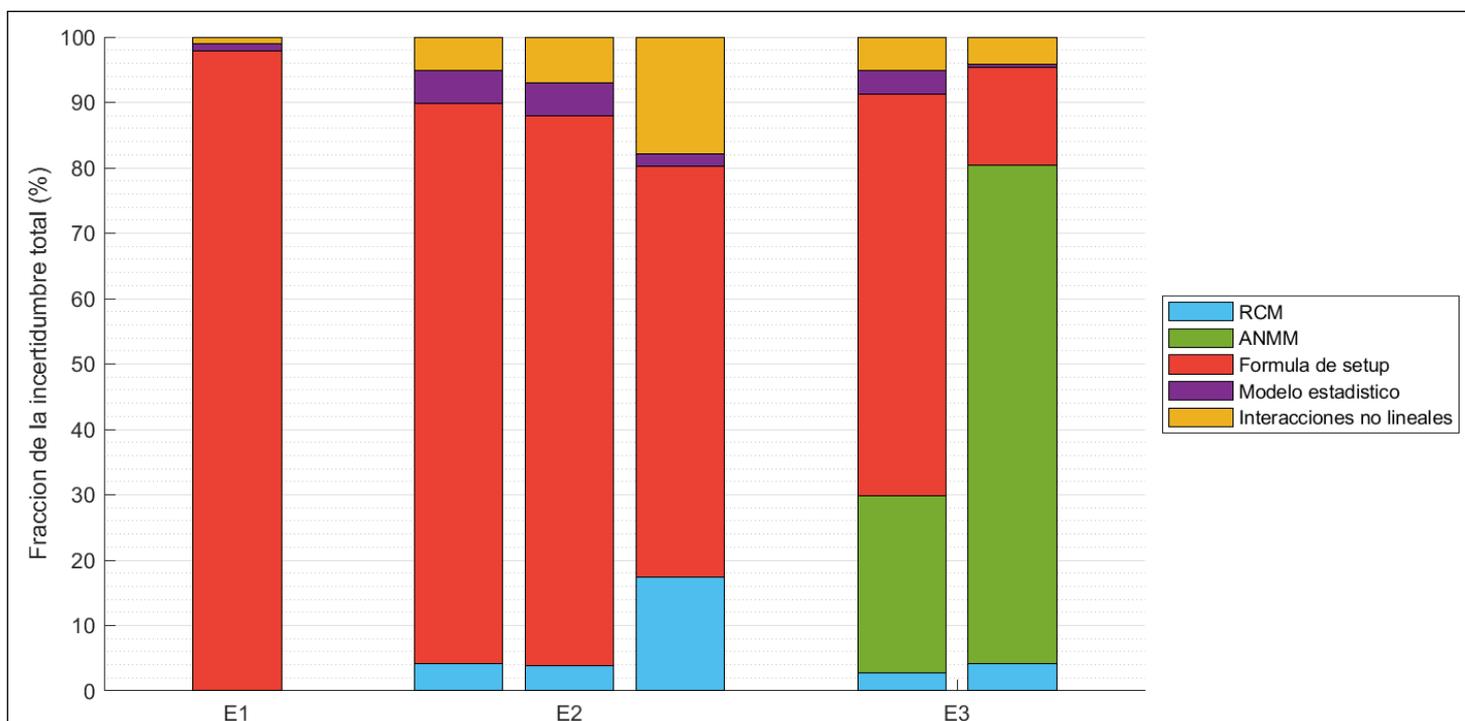


Figura 16: Resultados de análisis de varianza hecho para 3 experimentos distintos. El experimento **E1** representa el análisis de la CI para el hindcast ERA5. El **E2** representa el análisis de la varianza para los valores de CI calculados a partir de los RCM sobre los periodos temporales. Finalmente, el tercer experimento **E3** representa este mismo análisis, pero teniendo en cuenta el aumento del nivel del mar sobre el periodo de corto y de largo plazo.

	E1		E2		E3	
	ERA5	HIST	CORTO P.	LARGO P.	CORTO P.	LARGO P.
<b>RCM</b>	0 %	4.2 %	3.8 %	17.4 %	2.8 %	4.1 %
<b>FORMULA SETUP</b>	97.8 %	85.6%	84.1 %	62.7 %	61.4 %	14.9 %
<b>MODELO EST.</b>	1.2 %	5.1 %	5.00 %	1.90 %	3.6 %	0.4 %
<b>ANMM</b>	0 %	0 %	0 %	0 %	27.1 %	76.3 %
<b>INTERACCIONES</b>	1.0 %	5.1 %	7.0 %	17.9 %	5.1 %	4.2 %

**Tabla 5 :** Resultados del análisis de varianza de los experimentos E1, E2, E3 presentando las fracciones de incertidumbre para cada grupo analizado

En el experimento **E2**, se trata del mismo análisis, pero sobre los diferentes modelos climáticos en vez del hindcast ERA5, lo que añade una fuente de incertidumbre (los RCM), y sobre cada uno de los diferentes periodos temporales analizados sin tener en cuenta del ANMM. La primera barra representa el periodo histórico, la segunda barra representa el corto plazo, y la tercera barra representa el largo plazo. Para este experimento, cada barra representa 48 valores de CI.

Finalmente, el tercer experimento **E3** representa 288 CI analizadas en total (144 para cada barra) y representa la fracción de incertidumbre para los RCM, las fórmulas de setup, los modelos estadísticos, pero también el ANMM teniendo en cuenta los 3 percentiles anteriormente estudiados, es decir: 5%, 50% y 95%. La barra por la izquierda representa los datos de corto plazo y la barra por la derecha de largo plazo.

El experimento **E1**, aunque que la muestra de datos es bastante pequeña, se puede ver claramente que los modelos estadísticos salen resultados parecidos con una varianza muy pequeña (1.2% de la fracción total de incertidumbre), mientras que la fórmula de setup es responsable de la dispersión de los datos. Como lo hemos visto antes, la formula del SPM proporciona valores de setup más pequeños que la fórmula de Stockdon. Y esto se repercute en los valores de CI extrémas. El grupo de las fórmulas de setup representa la casi totalidad de la incertidumbre con 97.8% de su fracción total.

El objetivo del segundo experimento es de ver en qué proporción los modelos climáticos participan en la incertidumbre final de las CI. En los periodos históricos y de corto plazo, los resultados son muy parecidos. Así como el experimento **E1**, la formula del setup tiene mucha responsabilidad en las incertidumbres de la CI (~85%). No obstante, los modelos estadísticos de análisis extremal ven sus fracciones de incertidumbre aumentar ligeramente (5%) y los RCM representan entre 5% y 7% de la incertidumbre total para cada periodo. Esto es relevante con los gráficos de cajas para los RCM, que presentan una dispersión parecida para los

dos primeros periodos temporales. Lo que corresponde también, con el análisis hecho de los gráficos de caja sobre los RCM, es la aumentación de la fracción de incertidumbre al largo plazo (7% CP →17% LP) debida particularmente a la aumentación de la dispersión de los modelos HADG y EART. La parte de incertidumbre debida a la fórmula de setup reduce mucho y se nota también una aumentación de las interacciones. La interacción entre los RCM y los modelos estadísticos representa 67% de las cuatro interacciones presentas en las interacciones totales es decir 12% de la fracción de incertidumbre total. Así, la variación debida al acoplamiento de los RCM y de los modelos estadísticos es mucho más importante en el periodo de largo plazo. Eso se puede verificar también a partir de los diferentes gráficos de cajas de los RCM y de los modelos, en los que vemos que la dispersión de las CI para el largo plazo es mucho más grande que para el corto plazo.

El experimento **E3** trata de exponer la influencia del ANMM sobre los periodos futuros. Se nota aquí, a partir del corto plazo ya, que la fracción de incertidumbre de cada fuente, y en particular de la formula del setup se ve disminuir para introducir la fracción de incertidumbre el ANMM. En el corto plazo su fracción cuenta para 27%. Finalmente, en el largo la parte de incertidumbre del ANMM queda por 76% y vuelve la mayor fuente de incertidumbre.

Esto es totalmente compatible con por un lado la *Figura 3*, que presenta los valores de ANMM en función del tiempo y sobre todo el rango de valores, que aumenta de manera exponencial con el tiempo, y también con el grafico de caja de los valores de CI (*Figura 15*) en función del ANMM, que exponen para el largo una diferencia mayor entre los percentiles 5% y 95% que para el corto plazo. En este último experimento, la interacción predominante es también la interacción doble RCM - Modelo estadístico (67% del total de las interacciones). Las otras interacciones doble o triple son bastante débil. No hay interacción cuádruple.

## 4.4 Explotación de los resultados

Con el fin de ver los diferentes impactos generados por los niveles de mar extrémale así que de comparar esos daños en el presente y en el futuro, se deseaba generar algunos mapas de inundaciones a partir de las cotas de inundación calculadas con el modelo LISFLOOD-FP.

No obstante, se ha faltado un poco de tiempo para llevar a cabo mapas de inundación a partir de los resultados encontrados. En anexo, en el apartado *C. Modelo LISFLOOD*, se pone el seguimiento de los pasos hechos para ejecutar las simulaciones en el modelo así que las dificultades encontradas.

## 5. CONCLUSION

El análisis de las incertidumbres en las proyecciones de cambio climático es muy importante en la toma de decisión sobre los métodos de adaptación y de mitigación. Permite de encontrar al origen y los efectos de acumulación de los errores entre los diferentes factores claves de la cascada de incertidumbre.

Aquí, se ha analizado los diferentes niveles del agua en la costa objeto de estudio, considerando las diferentes componentes del nivel del mar y el efecto de oleaje. Para ello se ha calculado el setup del oleaje calculados a partir de 2 fórmulas de Stockdon y del SPM, se han evaluado 6 simulaciones climáticas procedentes de 6 modelos regionalizados (RCMs) diferentes, y 3 periodos temporales, 3 valores de aumento del nivel del mar para el corto y el largo plazo (6 en total), 4 modelos de extremos (GEV y GPD con y sin parámetro de forma) y finalmente el análisis se ha centrado en el periodo de retorno de 50 años.

El cálculo del setup nos ha permitido ver que la formula del SPM proporciona setup más pequeños que la fórmula de Stockdon. Eso tiene una importancia mayor en el cálculo de la CI porque representa la casi totalidad de la incertidumbre para un modelo climático y un periodo temporal dado.

Los diferentes RCM representan una incertidumbre bastante débil en la cascada de incertidumbre en respeto a los otros parámetros, No obstante, en el periodo 2081-2100, los modelos climáticos aportan una incertidumbre mayor que en

los periodos históricos y a corto plazo. Se nota también que puede haber una cierta variabilidad inter modelos.

Los modelos estadísticos representan una variabilidad bastante homogénea, salvo para el largo plazo en lo cual la dispersión de los cálculos de CI es más grande que para los otros dos periodos. Esto puede venir de la interacción entre la variabilidad de la formula, y de los RCM.

Finalmente, el ANMM, aporta mucha incertidumbre en los cálculos de CI debido a que su cálculo mismo depende de varios factores que representan también una cascada de incertidumbre y su dispersión natural entre los percentiles 5% y 95%. En el largo plazo, el ANMM representa la mayor fuente de incertidumbre, y es muy importante de tener esto en cuenta en la hora del análisis de proyecciones climáticas.

El trabajo se limita aquí al análisis de una cascada de incertidumbre bastante pequeña, pero se podría tener en cuenta otros parámetros como el escenario SSP de proyecciones climáticas del IPCC o también otros periodos de retorno. Las interacciones entre las diferentes fuentes merecen una atención particular, porque las proyecciones de los modelos climáticos son muy relacionadas por ejemplo con los SSP así que el ANMM con el SSP.

La ampliación de este trabajo con modelos de inundación en la costa de estudio podría aportar información de mapas de inundación para diferentes CI representativos, que podrían haber permitido una mejor evaluación de los impactos debidos a los niveles del mar extremos.

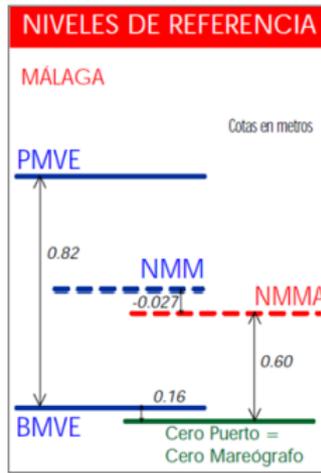
## BIBLIOGRAFIA

- Alexander F. Shchepetkin, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, Volume 9, Issue 4, Pages 347-404,.
- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient. *Journal of Hydrology* 387, 33-45.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical mode*. Bristol, Uk: University of Bristol.
- Dee, D., Uppala, S., Simons, A., Berrisford, P., Poli, P., & Kobayashi, S. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the dataassimilation system. *Meteorol. Soc.*137 , 553 – 597.
- Egbert, G., & Erofeeva, S. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 183–204.
- Fenton, J., & Mckee, W. (1990). On the calculating lengths of water waves. *Coastal Engineering*, 499 - 513.
- Hilary F. Stockdon, R. A. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, Pages 573 - 588.
- IH Cantabria. (2020). High-Resolution Projections of Waves and Water Levels. *Spanish Ministry for the Ecological Transition*, 60
- IPCC. (2022). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press,.
- Longuet Higgins, & Stewart. (1963). A Note on Wave Set-up. *Journal of Marine reasearch*.
- Munk, W. (1949). The solitary wave theory and its application to surf problems. *Ocean Surface Waves*, 376 - 424.
- Pérez, M. R., Menéndez García, M., Camus Braña, P., & Losada Rodríguez, I. (2019). *Elaboración De La Metodología Y Bases De Datos Para La Proyección De Impactos De Cambio Climático A Lo Largo De La Costa Española*. Santander: IH Cantabria.
- Toimil, A., Camus, P., Losada, I., & Alvarez-Cuesta, M. (2021). Visualising the Uncertainty Cascade in Multi-Ensemble Probabilistic Coastal Erosion Projections. *Frontiers in Marine Science*.
- Tolman, H. L. (2002). Alleviating the Garden Sprinkler Effect in wind wave models,. *Ocean Modelling*, Volume 4, Issues 3–4,,Pages 269-289,.
- U.S Army. (1984). *Shore Protection Manual, Volume I, 4th Edition*. Vicksburg, Missipi 39180.

# ANEXOS

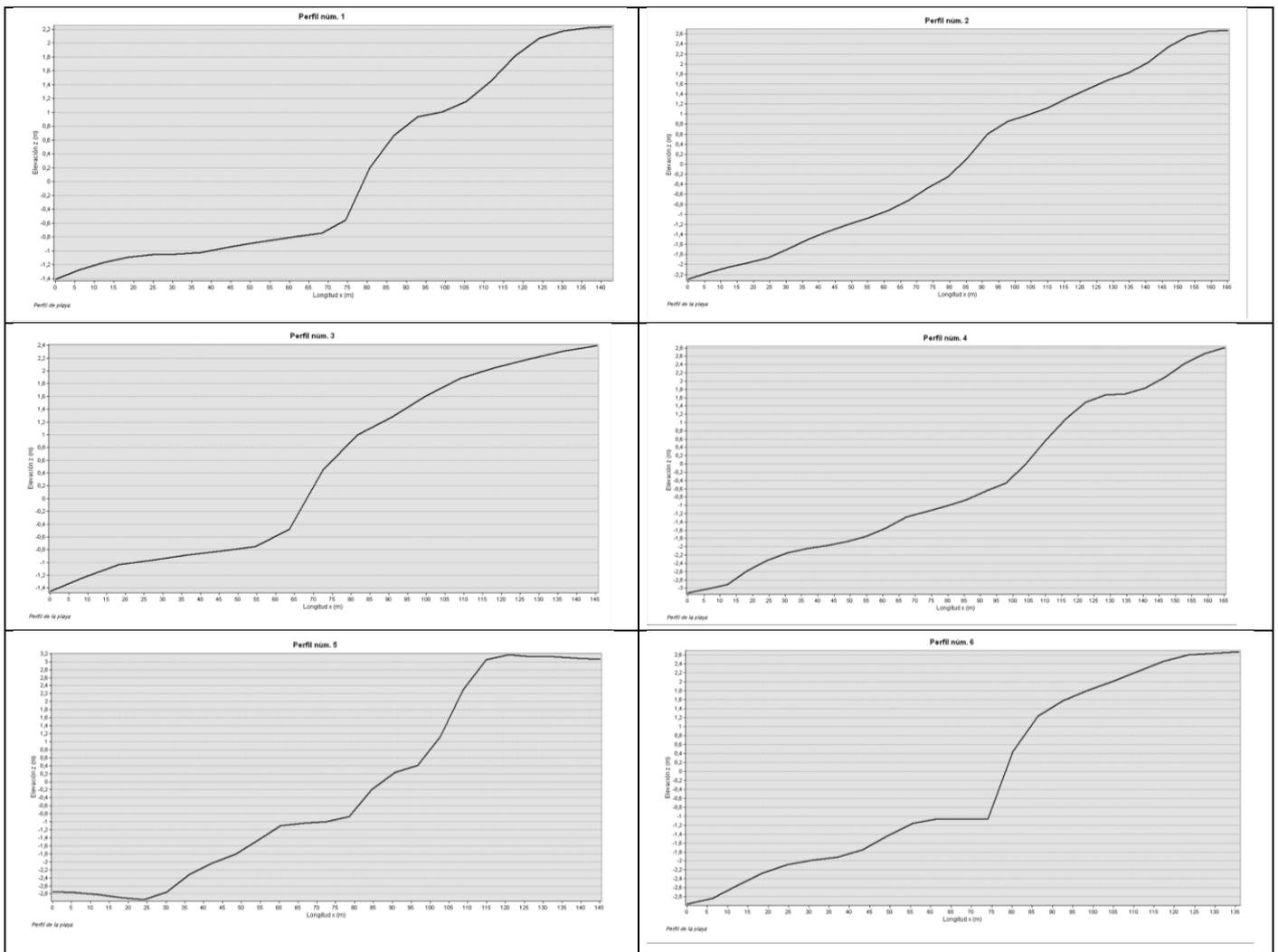
## A. Niveles de referencias en Málaga

Fuente: Puertos del estado. Cotas en metros



## B. Perfiles medidos en ArcGIS

Se representa en esta tabla los 6 perfiles usados para el cálculo de la pendiente intermareal en QGIS



### *C. Modelo LISFLOOD*

LISFLOOD es un modelo hidrodinámico bidimensional diseñado específicamente para simular la inundación de llanuras de inundación y zonas costeras sobre topografía compleja. Ha sido desarrollado en 1997 por la universidad de Bristol en colaboración con EU Joint Research Centre y está actualmente en código libre.

El modelo predice la profundidad del agua en cada celda de la cuadrícula en cada paso de tiempo y, por lo tanto, puede simular la propagación dinámica del agua mediante un proceso de llenado de volúmenes basados en principios hidráulicos de conservación de la masa y conductividad hidráulica (Bates, Horritt, & Fewtrell, 2010).

#### *E.1. Utilización del modelo*

Para realizar estas simulaciones de inundación, el modelo LISFLOOD FP necesita 3 ficheros de entradas:

- Un modelo de elevación digital (MDT) presentado en el la parte 3.2.2. *Determinacion de la pendiente de la playa*
- Un fichero de posición de puntos de condiciones de contorno
- Un fichero de condiciones de contorno.
- Un fichero de configuración describiendo los parámetros de la simulación.

#### *E.2. Generación del MDT*

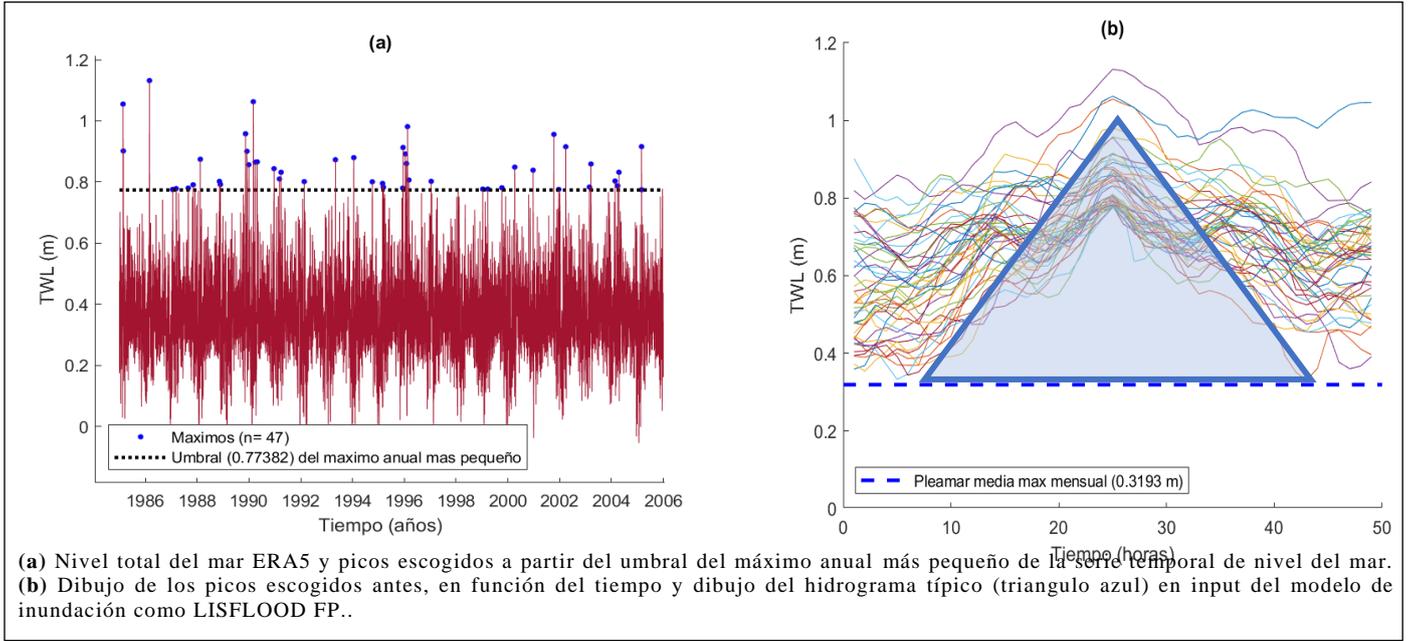
El MDT ha sido corregido, en particular en la zona del río (ver *Figura 7*) al norte en lo cual había puente que se habrían reconocidas en cajas cerradas por el modelo. Los puentes han sido sustituidos por una interpolación de la topografía del fondo del río usando la herramienta IDW (Inverse distance weighted) en arcGIS.

Luego, se ha quitado todas las celdas del ráster por debajo -0.5m y se ha creado las zonas ‘condiciones de contorno’ poniendo todas las células entre 0 y -0.5m en la cota -2m. Se ha hecho algunas pruebas con este MDT “preparado” pero la resolución era demasiado alta, y las simulaciones tardaban en los alrededores de 75h/80h. Se decidió, de bajar la resolución del MDT para ejecutar las simulaciones, y por eso se ha utilizado una herramienta de “resampling” interpolando los valores de las celdas con las más cercanas, permitiendo de aumentar el tamaño de celda de 5m a 20m.

#### *E.3. Condiciones de contorno*

Se necesitaba crear también los ficheros de condiciones de contorno. Estas condiciones se pueden escribir a partir del nivel del agua en un instante t. Se decidió de crear un hidrograma típico de subida del nivel mar.

Para eso se ha hecho un análisis de los comportamientos de subida de nivel del mar puntuales sobre el hindcast ERA5. Se ha buscado los máximos anuales de la serie temporal de la CI entre 1985 y 2006. Luego se ha buscado todos los picos que sobran el máximo anual más pequeño evaluado a partir de este umbral ( $u=0.774\text{m}$ ) con una interdependencia temporal de 3 días. Los 47 picos encontrados, que se pueden ver en la *figura abajo(a)*, han sido analizados sobre un periodo de 50h para buscar finalmente al hidrograma típico de ‘input’ en el modelo LISFLOOD. Se desea ejecutar el modelo a partir de un valor de nivel del mar que es la pleamar media máxima mensual para estar en un caso sensiblemente malo. Se puede ver en la *figura abajo (b)* que los picos tienen toda una forma de triángulo con una base de ~40 horas.



#### E.4. Configuración del modelo

En el fichero de configuración se puede definir los parámetros siguientes:

- El tiempo de simulación total: Como ha sido escrito antes, a partir del hidrograma típico, el tiempo de simulación es de 40 horas (144000 s)
- El incremento de tiempo de simulación: se ha hecho variar este parámetro para ver su influencia sobre el tiempo de ejecución del modelo, pero sin resultados
- El coeficiente de fricción: Puede ser fijo o definido a partir de un fichero. ascii representando una matriz de mismo tamaño que el MDT, dando el coeficiente de Manning para cada celda. Se ha probado las simulaciones con un coeficiente fijo de Manning de 0.1.
- El tipo de simulación: Para los casos de inundación 2D como las inundaciones costeras, 2 tipos de simulaciones están disponibles. La “Roe” que permite de resolver las ecuaciones de aguas poco profundas, o “acceleration” que permite de negligir el termino de aceleración convectiva.
- Varios parámetros suplementarios dependiendo de la simulación.

#### E.5. Ecuaciones resueltas por LISFLOOD FP

La ecuación de momento y continuidad se describen como:

$$Q_{i+\frac{1}{2}}^{t+\Delta t} = \frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^t - gA_{flow}^t \Delta t S_{i+\frac{1}{2}}^t}{1 + \frac{g \Delta t n \left| Q_{i+\frac{1}{2}}^t \right|}{\left[ (R_{flow}^t)^{\frac{4}{3}} A_{flow}^t \right]}} \quad (C1)$$

$$V_{i,j}^{t+\Delta t} = V_{i,j}^t + \Delta t \left( Q_{i-\frac{1}{2},j}^{t+\Delta t} - Q_{i+\frac{1}{2},j}^{t+\Delta t} + Q_{i,j-\frac{1}{2}}^{t+\Delta t} - Q_{i,j+\frac{1}{2}}^{t+\Delta t} \right) \quad (C2)$$

Con:

- $Q_{i+\frac{1}{2}}^{t+\Delta t}$ : flujo entre las celdas  $i$  e  $i + 1$  que será aplicado entre los instantes  $t$  y  $t + \Delta t$ .
- $A_{flow}^t$ : área entre las celdas.
- $R_{flow}^t$ : radio hidráulico.
- $S_{i+\frac{1}{2}}^t$ : pendiente de la superficie de agua entre las celdas.
- $n$ : rugosidad de Manning.
- $g$ : es la gravedad.
- $V_{i,j}^{t+\Delta t}$  es el volumen de la celda en la cual la superficie de agua es calculada, donde los coeficientes  $i$  y  $j$  son los índices de la malla cartesiana.

### D. Cálculo de la cota de inundación

Se presenta en este apartado los valores de cota de inundación para cada RCM y también el hindcast ERA5.

- La primera columna representa el modelo
- La segunda el periodo temporal
- La tercera el percentil de ANMM usado (en el caso del periodo histórico, ninguno valor de ANMM ha sido usado).
- La cuarta enseña la fórmula de setup usada
- La quinta el valor de periodo de retorno (Tr)
- La sexta el modelo de extremos usado
- La séptima el valor de cota de inundación.

#### C.1. CNRM

Modelo	Periodo	ANMM	Formula setup	Tr	Modelo est	CI
CNRM	Hist	NULL	Stockdon	20	GEV	1,109
					Gumbel	1,102
					POT	1,089
					exponencial	1,139
			50	GEV	1,203	
				Gumbel	1,189	
				POT	1,148	
				exponencial	1,230	
			SPM	20	GEV	0,855
					Gumbel	0,838
					POT	0,839
					exponencial	0,896
	50	GEV	0,931			
		Gumbel	0,895			
		POT	0,871			
		exponencial	0,963			
	2026-2045 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	GEV	1,130
					Gumbel	1,127
					POT	1,370
					exponencial	1,089
			50	GEV	1,209	
				Gumbel	1,202	
				POT	1,515	
				exponencial	1,158	
SPM			20	GEV	0,895	
				Gumbel	0,866	
				POT	0,880	
				exponencial	0,853	
50	GEV	0,975				
	Gumbel	0,914				
	POT	0,948				
	exponencial	0,902				
50%	Stockdon	20	GEV	1,223		
			Gumbel	1,220		

				50	POT	1,463		
					exponencial	1,182		
					SPM	20	GEV	1,302
							Gumbel	1,295
							POT	1,608
						exponencial	1,251	
				50	GEV	0,988		
					Gumbel	0,959		
					POT	0,973		
					exponencial	0,946		
				95%	Stockdon	20	GEV	1,335
							Gumbel	1,331
		POT	1,574					
		exponencial	1,294					
		50	GEV			1,413		
			Gumbel			1,406		
			POT		1,719			
		SPM	20		exponencial	1,363		
					GEV	1,099		
					Gumbel	1,071		
			50		POT	1,084		
					exponencial	1,058		
				GEV	1,180			
		2081-2100 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	Gumbel	1,119	
POT	1,153							
exponencial	1,106							
SPM	20				GEV	1,372		
					Gumbel	1,357		
					POT	1,367		
	50			exponencial	1,395			
				GEV	1,455			
				Gumbel	1,424			
50%	Stockdon			20	POT	1,428		
					exponencial	1,476		
					GEV	1,120		
	SPM	20	Gumbel	1,120				
			POT	1,115				
			exponencial	1,119				
50	20	GEV	1,171					
		Gumbel	1,171					
		POT	1,162					
					exponencial	1,168		
					GEV	1,665		

				50	Gumbel	1,650
					POT	1,660
					exponencial	1,688
					GEV	1,748
					Gumbel	1,717
					POT	1,721
				exponencial	1,769	
				20	GEV	1,413
					Gumbel	1,413
					POT	1,408
					exponencial	1,412
					50	GEV
		Gumbel	1,464			
		POT	1,455			
		exponencial	1,461			
		95%	Stockdon	20	GEV	2,135
					Gumbel	2,120
					POT	2,130
				exponencial	2,158	
				50	GEV	2,218
					Gumbel	2,187
			POT		2,191	
			exponencial	2,239		
			SPM	20	GEV	1,883
Gumbel	1,883					
POT	1,878					
exponencial	1,882					
50	GEV	1,934				
	Gumbel	1,934				
	POT	1,925				
exponencial	1,931					

### C.2 EART

Modelo	Periodo	ANMM	Formula setup	Tr	Modelo est	CI
EART	Hist	NULL	Stockdon	20	GEV	1,022
					Gumbel	1,054
					POT	1,019
				exponencial	1,068	
				50	GEV	1,067
					Gumbel	1,127
			POT		1,061	
			exponencial	1,141		
			SPM	20	GEV	0,796
					Gumbel	0,814
					POT	0,792
					exponencial	0,820



2026-2045 RCP 8.5	5%	Stockdon	50	GEV	0,834
				Gumbel	0,868
				POT	0,826
				exponencial	0,872
	5%	Stockdon	20	GEV	1,090
				Gumbel	1,093
				POT	1,105
				exponencial	1,125
			50	GEV	1,164
				Gumbel	1,170
				POT	1,173
				exponencial	1,207
		SPM	20	GEV	0,846
				Gumbel	0,853
			50	POT	0,861
				exponencial	0,841
	50%	Stockdon	20	GEV	1,183
				Gumbel	1,186
				POT	1,198
				exponencial	1,218
			50	GEV	1,257
				Gumbel	1,263
				POT	1,266
				exponencial	1,300
		SPM	20	GEV	0,939
				Gumbel	0,946
			50	POT	0,954
				exponencial	0,934
	95%	Stockdon	20	GEV	1,294
				Gumbel	1,297
				POT	1,309
				exponencial	1,329
50			GEV	1,369	
			Gumbel	1,374	
			POT	1,377	
			exponencial	1,412	
SPM		20	GEV	1,050	
			Gumbel	1,058	
		20	POT	1,065	

2081-2100 RCP 8.5	5%	Stockdon	50	exponencial	1,046
				GEV	1,102
				Gumbel	1,116
				POT	1,129
		exponencial	1,095		
		20	GEV	1,479	
			Gumbel	1,408	
			POT	1,420	
			exponencial	1,355	
			50	GEV	1,650
				Gumbel	1,493
				POT	1,551
	exponencial			1,434	
	SPM	20	GEV	1,171	
			Gumbel	1,112	
			POT	1,118	
			exponencial	1,125	
		50	GEV	1,301	
			Gumbel	1,162	
			POT	1,174	
			exponencial	1,186	
	50%	Stockdon	20	GEV	1,772
				Gumbel	1,701
				POT	1,713
				exponencial	1,648
			50	GEV	1,943
				Gumbel	1,786
				POT	1,844
				exponencial	1,727
		SPM	20	GEV	1,464
				Gumbel	1,405
				POT	1,411
exponencial				1,418	
50	GEV		1,594		
	Gumbel		1,455		
	POT		1,467		
	exponencial		1,479		
95%	Stockdon	20	GEV	2,242	
			Gumbel	2,171	
			POT	2,183	
			exponencial	2,118	
		50	GEV	2,413	
			Gumbel	2,256	
			POT	2,314	
			exponencial	2,197	
	SPM	20	GEV	1,934	
			Gumbel	1,875	

					POT	1,881
					exponencial	1,888
				50	GEV	2,064
					Gumbel	1,925
					POT	1,937
					exponencial	1,949

**C.3. ESM2**

Modelo	Periodo	ANMM	Formula setup	Tr	Modelo est	CI
ESM2	Hist	NULL	Stockdon	20	GEV	1,079
					Gumbel	1,074
					POT	1,074
					exponencial	1,104
				50	GEV	1,152
					Gumbel	1,142
			POT		1,132	
			exponencial		1,183	
			SPM	20	GEV	0,828
					Gumbel	0,845
					POT	0,826
					exponencial	0,858
	50	GEV		0,865		
		Gumbel		0,897		
		POT	0,864			
		exponencial	0,916			
	2026-2045 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	GEV	1,069
					Gumbel	1,138
					POT	1,072
					exponencial	1,166
				50	GEV	1,085
					Gumbel	1,209
			POT		1,099	
			exponencial		1,247	
SPM			20	GEV	0,824	
				Gumbel	0,891	
				POT	0,836	
				exponencial	0,882	
	50	GEV	0,827			
		Gumbel	0,946			
POT		0,859				
exponencial		0,933				
50%	Stockdon	20	GEV	1,162		
			Gumbel	1,231		

				50	POT	1,165
					exponencial	1,259
					GEV	1,178
					Gumbel	1,302
					POT	1,192
					exponencial	1,340
				20	GEV	0,917
					Gumbel	0,984
					POT	0,929
					exponencial	0,975
					GEV	0,920
					Gumbel	1,039
		50	POT	0,952		
			exponencial	1,026		
			20	GEV	1,274	
				Gumbel	1,342	
				POT	1,277	
				exponencial	1,370	
		50	GEV	1,289		
			Gumbel	1,414		
			POT	1,304		
			exponencial	1,451		
		95%	20	GEV	1,029	
				Gumbel	1,096	
				POT	1,040	
				exponencial	1,086	
			50	GEV	1,031	
				Gumbel	1,150	
POT	1,064					
exponencial	1,138					
2081-2100 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	GEV	1,352	
				Gumbel	1,356	
				POT	1,334	
			exponencial	1,404		
			50	GEV	1,420	
				Gumbel	1,427	
		POT		1,373		
		SPM	20	exponencial	1,485	
				GEV	1,092	
				Gumbel	1,124	
			POT	1,108		
			exponencial	1,119		
50	GEV		1,114			
	Gumbel	1,175				
	POT	1,150				
50%	Stockdon	20	exponencial	1,169		
			GEV	1,645		

				50	Gumbel	1,649
					POT	1,627
					exponencial	1,697
					GEV	1,713
					Gumbel	1,720
					POT	1,666
				exponencial	1,778	
				20	GEV	1,385
					Gumbel	1,417
					POT	1,401
					exponencial	1,412
					50	GEV
		Gumbel	1,468			
		POT	1,443			
		95%	Stockdon	20	GEV	2,115
					Gumbel	2,119
					POT	2,097
				exponencial	2,167	
				50	GEV	2,183
					Gumbel	2,190
			POT		2,136	
			SPM	20	exponencial	2,248
					GEV	1,855
					Gumbel	1,887
50	POT			1,871		
	exponencial			1,882		
	GEV	1,877				
50	Gumbel	1,938				
	POT	1,913				
	exponencial	1,932				

#### C.4. IPSL

Modelo	Periodo	ANMM	Formula setup	Tr	Modelo est	CI
IPSL	Hist	NULL	Stockdon	20	GEV	1,056
					Gumbel	1,072
					POT	1,079
				exponencial	1,012	
				50	GEV	1,130
					Gumbel	1,160
			POT		1,204	
			SPM	20	exponencial	1,081
					GEV	0,806
					Gumbel	0,838
				50	POT	0,798
					exponencial	0,936
					GEV	0,845

2026-2045 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	Gumbel	0,908	
				POT	0,822	
				exponencial	1,036	
			50	GEV	0,996	
				Gumbel	1,077	
				POT	0,996	
			20	exponencial	1,111	
				GEV	1,012	
				Gumbel	1,154	
			50	POT	1,021	
				exponencial	1,200	
				SPM	20	GEV
		Gumbel	0,825			
		POT	0,810			
		50	exponencial		0,881	
			GEV		0,863	
			Gumbel		0,880	
		20	POT	0,844		
			exponencial	0,958		
			Stockdon	20	GEV	1,089
		Gumbel			1,170	
		POT			1,089	
		50		exponencial	1,204	
				GEV	1,105	
				Gumbel	1,247	
		20		POT	1,114	
				exponencial	1,293	
				SPM	20	GEV
		Gumbel				0,918
		POT				0,903
50	exponencial	0,974				
	GEV	0,956				
	Gumbel	0,973				
20	POT	0,937				
	exponencial	1,051				
	Stockdon	20	GEV	1,200		
Gumbel			1,282			
POT			1,201			
50		exponencial	1,315			
		GEV	1,217			
		Gumbel	1,358			
20		POT	1,225			
		exponencial	1,404			
		SPM	20	GEV	1,021	
Gumbel				1,030		
POT				1,015		
exponencial				1,086		

2081-2100 RCP 8.5	5%	Stockdon	50	GEV	1,068
				Gumbel	1,085
				POT	1,049
				exponencial	1,163
		Stockdon	20	GEV	1,311
				Gumbel	1,314
				POT	1,308
				exponencial	1,348
			50	GEV	1,370
				Gumbel	1,376
				POT	1,355
				exponencial	1,422
	SPM	20	GEV	1,067	
			Gumbel	1,097	
			POT	1,055	
			exponencial	1,054	
		50	GEV	1,104	
			Gumbel	1,155	
			POT	1,097	
			exponencial	1,095	
	50%	Stockdon	20	GEV	1,604
				Gumbel	1,607
				POT	1,601
				exponencial	1,641
			50	GEV	1,663
				Gumbel	1,669
				POT	1,648
				exponencial	1,715
		SPM	20	GEV	1,360
				Gumbel	1,390
				POT	1,348
				exponencial	1,347
50	GEV	1,397			
	Gumbel	1,448			
	POT	1,390			
	exponencial	1,388			
95%	Stockdon	20	GEV	2,074	
			Gumbel	2,077	
			POT	2,071	
			exponencial	2,111	
		50	GEV	2,133	
			Gumbel	2,139	
			POT	2,118	
			exponencial	2,185	
	SPM	20	GEV	1,830	
			Gumbel	1,860	
POT	1,818				



					exponencial	1,817
				50	GEV	1,867
					Gumbel	1,918
					POT	1,860
					exponencial	1,858

**C.5 HADG**

Modelo	Periodo	ANMM	Formula setup	Tr	Modelo est	CI
HADG	Hist	NULL	Stockdon	20	GEV	1,038
					Gumbel	1,085
					POT	1,046
					exponencial	1,140
				50	GEV	1,075
					Gumbel	1,160
					POT	1,079
					exponencial	1,228
			SPM	20	GEV	0,784
					Gumbel	0,828
					POT	0,788
					exponencial	0,873
				50	GEV	0,803
					Gumbel	0,881
					POT	0,804
					exponencial	0,935
	2026-2045 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	GEV	1,032
					Gumbel	1,118
					POT	1,034
					exponencial	1,121
				50	GEV	1,053
					Gumbel	1,205
					POT	1,065
					exponencial	1,202
			SPM	20	GEV	0,813
					Gumbel	0,845
					POT	0,816
					exponencial	0,831
				50	GEV	0,842
					Gumbel	0,901
					POT	0,853
					exponencial	0,878
		50%	Stockdon	20	GEV	1,125
					Gumbel	1,211
					POT	1,127
					exponencial	1,214
50	GEV			1,146		
	Gumbel			1,298		



		95%	SPM	20	POT	1,158	
					exponencial	1,295	
					GEV	0,906	
				Gumbel	0,938		
				POT	0,909		
				exponencial	0,924		
			50	GEV	0,935		
				Gumbel	0,994		
				POT	0,946		
				exponencial	0,971		
				Stockdon	20	GEV	1,236
						Gumbel	1,322
		POT	1,239				
		exponencial	1,325				
		50	GEV	1,257			
				Gumbel	1,409		
			POT	1,270			
			exponencial	1,407			
		SPM	20	GEV	1,018		
				Gumbel	1,050		
				POT	1,020		
				exponencial	1,036		
			50	GEV	1,046		
				Gumbel	1,105		
				POT	1,057		
				exponencial	1,083		
		2081-2100 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	GEV	1,552
						Gumbel	1,426
POT	1,496						
exponencial	1,307						
50	GEV				1,823		
	Gumbel				1,531		
	POT			1,746			
	exponencial			1,375			
SPM	20			GEV	1,210		
				Gumbel	1,173		
				POT	1,208		
	exponencial			1,067			
	50		GEV	1,329			
			Gumbel	1,250			
POT			1,393				
50%	Stockdon		20	GEV	1,845		
				Gumbel	1,719		
				POT	1,789		
	50	GEV	1,600				
			2,116				

		95%	SPM	20	Gumbel	1,824
					POT	2,039
					exponencial	1,668
				GEV	1,503	
				Gumbel	1,466	
				POT	1,501	
			exponencial	1,360		
			50	GEV	1,622	
				Gumbel	1,543	
				POT	1,686	
			Stockdon	20	exponencial	1,406
					GEV	2,315
		Gumbel			2,189	
		50		POT	2,259	
				exponencial	2,070	
				GEV	2,586	
		SPM	20	Gumbel	2,294	
				POT	2,509	
				exponencial	2,138	
			50	GEV	1,973	
				Gumbel	1,936	
POT	1,971					
50	exponencial	1,830				
	GEV	2,092				
	Gumbel	2,013				
50	POT	2,156				
	exponencial	1,876				

C.6 MEDC

Modelo	Periodo	ANMM	Formula setup	Tr	Modelo est	CI
MEDC	Hist	NULL	Stockdon	20	GEV	1,094
					Gumbel	1,113
					POT	1,087
				exponencial	1,142	
				50	GEV	1,163
					Gumbel	1,199
			POT		1,141	
			SPM	20	exponencial	1,231
					GEV	0,852
					Gumbel	0,879
				50	POT	0,846
					exponencial	0,922
	GEV	0,889				
	5%	Stockdon	20	Gumbel	0,941	
POT				0,873		
					exponencial	0,994
					GEV	1,101

2026-2045 RCP 8.5	50%	SPM	50	Gumbel	1,136
				POT	1,103
				exponencial	1,152
			GEV	1,150	
			Gumbel	1,215	
			POT	1,153	
		exponencial	1,232		
		SPM	20	GEV	0,870
				Gumbel	0,903
				POT	0,874
			exponencial	0,908	
			50	GEV	0,905
	Gumbel			0,963	
	POT	0,912			
	Stockdon	20	GEV	1,194	
			Gumbel	1,229	
			POT	1,196	
		exponencial	1,245		
		50	GEV	1,243	
			Gumbel	1,308	
	POT		1,246		
	SPM	20	GEV	0,963	
			Gumbel	0,996	
			POT	0,967	
		exponencial	1,001		
		50	GEV	0,998	
			Gumbel	1,056	
	POT		1,005		
	Stockdon	20	GEV	1,305	
			Gumbel	1,341	
POT			1,308		
exponencial		1,357			
50		GEV	1,354		
		Gumbel	1,419		
	POT	1,357			
SPM	20	GEV	1,074		
		Gumbel	1,107		
		POT	1,079		
	exponencial	1,113			
	50	GEV	1,109		
		Gumbel	1,168		
POT		1,117			
exponencial	1,173				

2081-2100 RCP 8.5	5%	Stockdon	20	GEV	1,267
				Gumbel	1,274
				POT	1,256
				exponencial	1,309
			50	GEV	1,306
				Gumbel	1,319
				POT	1,280
				exponencial	1,364
		SPM	20	GEV	1,051
				Gumbel	1,054
				POT	1,054
				exponencial	1,093
	50		GEV	1,080	
			Gumbel	1,086	
			POT	1,074	
			exponencial	1,137	
	50%	Stockdon	20	GEV	1,560
				Gumbel	1,567
				POT	1,549
				exponencial	1,602
			50	GEV	1,599
				Gumbel	1,612
				POT	1,573
				exponencial	1,657
		SPM	20	GEV	1,344
				Gumbel	1,347
				POT	1,347
				exponencial	1,386
50	GEV		1,373		
	Gumbel		1,379		
	POT		1,367		
	exponencial		1,430		
95%	Stockdon	20	GEV	2,030	
			Gumbel	2,037	
			POT	2,019	
			exponencial	2,072	
		50	GEV	2,069	
			Gumbel	2,082	
			POT	2,043	
			exponencial	2,127	
	SPM	20	GEV	1,814	
			Gumbel	1,817	
			POT	1,817	
			exponencial	1,856	
50		GEV	1,843		
		Gumbel	1,849		
		POT	1,837		

					exponencial	1,900
--	--	--	--	--	-------------	-------

**C.7 ERA5**

Modelo	Periodo	ANMM	Formula setup	Tr	Modelo est	CI
ERA5	Hist	NULL	Stockdon	20	GEV	1,098
					Gumbel	1,071
					POT	1,090
					exponencial	1,068
				50	GEV	1,196
					Gumbel	1,138
					POT	1,178
					exponencial	1,139
			SPM	20	GEV	0,864
					Gumbel	0,858
					POT	0,856
					exponencial	0,864
				50	GEV	0,923
					Gumbel	0,911
					POT	0,907
					exponencial	0,922

### E. Resultados Anova

Se pone aquí los resultados brutos de la función “anovan” en Matlab (n-way multi análisis of variance). Aquí SLR = Sea Level Rise = ANMM

#### Experimento E1

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.
Formula Setup	0,122126413	1	0,122126413
Modelo estadístico	0,001436361	3	0,000478787
Formula Setup*Modelo estadístico	0,0012895	3	0,000429833
Error	-1,38778E-17	0	0
Total	0,124852274	7	

#### Experimento E2

Histórico

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.
RCM	0,039834269	5	0,007966854
Formula	0,824976941	1	0,824976941
Modelo estadístico	0,049396507	3	0,016465502
RCM*Formula	0,002383374	5	0,000476675
RCM*Modelo estadístico	0,015049369	15	0,001003291
Formula*Modelo estadístico	0,004796405	3	0,001598802
RCM*Formula*Modelo estadístico	0,026862317	15	0,001790821
Error	-1,11022E-16	0	0
Total	0,963299181	47	

Corto plazo

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.
RCM	0,034764774	5	0,006952955
Formula	0,759026072	1	0,759026072
Modelo estadístico	0,045059785	3	0,015019928
RCM*Formula	0,005240863	5	0,001048173
RCM*Modelo estadístico	0,042729351	15	0,002848623
Formula*Modelo estadístico	0,009711458	3	0,003237153
RCM*Formula*Modelo estadístico	0,005492865	15	0,000366191
Error	-2,22045E-16	0	0
Total	0,902025167	47	

Largo plazo

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.
RCM	0,256084788	5	0,051216958
Formula	0,921947917	1	0,921947917
Modelo estadístico	0,027964941	3	0,009321647
RCM*Formula	0,0380285	5	0,0076057
RCM*Modelo estadístico	0,176694674	15	0,011779645
Formula*Modelo estadístico	0,009663311	3	0,003221104
RCM*Formula*Modelo estadístico	0,039091866	15	0,002606124
Error	-4,44089E-16	0	0
Total	1,469475997	47	

Experimento E3

Corto plazo

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.
<b>RCM</b>	0,104294322	5	0,020858864
<b>SLR</b>	1,006424	2	0,503212
<b>Formula</b>	2,277078215	1	2,277078215
<b>Modelo estadístico</b>	0,135179355	3	0,045059785
<b>RCM*SLR</b>	8,88178E-16	10	8,88178E-17
<b>RCM*Formula</b>	0,015722588	5	0,003144518
<b>RCM*Modelo estadístico</b>	0,128188052	15	0,00854587
<b>SLR*Formula</b>	8,88178E-16	2	4,44089E-16
<b>SLR*Modelo estadístico</b>	0	6	0
<b>Formula*Modelo estadístico</b>	0,029134375	3	0,009711458
<b>RCM*SLR*Formula</b>	8,88178E-16	10	8,88178E-17
<b>RCM*SLR*Modelo estadístico</b>	0	30	0
<b>RCM*Formula*Modelo estadístico</b>	0,016478594	15	0,001098573
<b>SLR*Formula*Modelo estadístico</b>	0	6	0
<b>RCM*SLR*Formula*Modelo estadístico</b>	0	30	0
<b>Error</b>	-8,88178E-16	0	0
<b>Total</b>	3,712499501	143	

Largo plazo

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.
<b>RCM</b>	0,768254364	5	0,153650873
<b>SLR</b>	14,222688	2	7,111344
<b>Formula</b>	2,765843751	1	2,765843751
<b>Modelo estadístico</b>	0,083894823	3	0,027964941
<b>RCM*SLR</b>	0	10	0
<b>RCM*Formula</b>	0,114085499	5	0,0228171
<b>RCM*Modelo estadístico</b>	0,530084021	15	0,035338935
<b>SLR*Formula</b>	7,10543E-15	2	3,55271E-15
<b>SLR*Modelo estadístico</b>	0	6	0
<b>Formula*Modelo estadístico</b>	0,028989933	3	0,009663311
<b>RCM*SLR*Formula</b>	0	10	0
<b>RCM*SLR*Modelo estadístico</b>	7,10543E-15	30	2,36848E-16
<b>RCM*Formula*Modelo estadístico</b>	0,117275599	15	0,007818373
<b>SLR*Formula*Modelo estadístico</b>	0	6	0
<b>RCM*SLR*Formula*Modelo estadístico</b>	7,10543E-15	30	2,36848E-16
<b>Error</b>	-3,55271E-15	0	0
<b>Total</b>	18,63111599	143	