



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española (28-5316)

Tareas 1 y 3

Guía Metodológica

16 de Noviembre de 2020

ANTECEDENTES

Este documento describe uno de los productos derivados del “*Contrato de servicios para la elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española*”, Contrato nº 28-5316, adjudicado por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar a la Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

La *Guía Metodológica* es uno de los productos identificados en el Contrato de Servicios y es el resultado principal de las Tareas 1 y 3 recogidas en el mismo:

- Tarea 1: Elaboración de una metodología para el análisis probabilístico de impactos en la costa. Aplicación a la erosión e inundación.
- Tarea 3. Validación de la metodología y casos de estudio

La integración de ambas tareas en la Guía y su estructura organizativa, favorece que exista un documento integrado en el que la descripción del estado del arte, la metodología, su validación y aplicación a un caso piloto estén a disposición de diferentes usuarios que quieran plantear nuevas aplicaciones en la costa española, para así analizar el efecto del cambio climático en la inundación, la evolución de la línea de costa, su interacción o el efecto en las obras de protección.

Para su desarrollo se ha hecho uso de la información climática resultado de la Tarea 2 de este Contrato de Servicios.

- Tarea 2. Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española.

Los trabajos incluidos en esta Guía han sido elaborados y redactados por:

- Inundación, erosión e inundación-erosión:
Alexandra Toimil Silva, Moisés Álvarez e Iñigo J. Losada Rodríguez
- Obras de protección:
David Lucio Fernández, Antonio Tomás Sampedro, Iñigo J. Losada Rodríguez, Javier López Lara

Todos los trabajos se han elaborado bajo la coordinación de Iñigo J. Losada Rodríguez



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española (28-5316)

Inundación

16 de Noviembre de 2020



IHcantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS.....	2
2. REVISIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES.....	4
3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	6
3.1. Tratamiento y regionalización de las dinámicas	8
3.1.1. Generación sintética de eventos extremos.....	9
3.1.2. Regionalización de las dinámicas y cálculo de la cota de inundación	12
3.2. Modelado hidráulico de la inundación costera.....	14
3.3. Resultados potenciales.....	16
4. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN.....	18
4.1. Descripción general de la zona de estudio.....	18
4.2. Tratamiento probabilístico y regionalización de las dinámicas	19
4.2.1. Generación sintética de eventos extremos.....	20
4.2.2. Generación sintética.....	27
4.2.3. Regionalización de las dinámicas y cálculo de la cota de inundación	29
4.3. Modelado hidráulico de la inundación costera.....	42
4.4. Resultados	44
5. APROXIMACIÓN SIMPLIFICADA.....	52
6. CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS	55
ANEXO I. TRATAMIENTO DE LAS DINÁMICAS	57
ANEXO II. DESCRIPCIÓN DEL MODELO <i>XBEACH</i>	66
ANEXO III. DESCRIPCIÓN DEL MODELO RFSM-EDA.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el modelado de las proyecciones de inundación costera.....	6
Figura 2. Diagrama de flujo de entradas y resultados de cada etapa de cálculo de las proyecciones de inundación.....	7
Figura 3. Representación de las distintas componentes que contribuyen a la CI.....	8
Figura 4. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para el tratamiento y regionalización de las dinámicas.....	9
Figura 5. Esquema del emulador multivariado de eventos de tormenta.	11
Figura 6. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para modelar la erosión costera.....	15
Figura 7. Modelo digital del terreno en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto.....	19
Figura 8. Topo-batimetría de la zona de estudio sobre el contorno de las mallas de cómputo (G11, M1101, M1102, M1103 y M1104). Los puntos wi rojos son los puntos de forzamiento de oleaje, los cuadrados son los puntos de la malla global de proyecciones. El punto w5 coincide con el forzamiento de nivel.	20
Figura 9. Análisis de correlaciones de las variables meteo-oceanográficas que maximizan el CI criterio en los puntos de forzamiento del dominio, caso del modelo CNRM en el periodo histórico 1985-2005. En el panel superior derecho se muestra la matriz de correlaciones de las 31 variables en los diferentes puntos del contorno. Los paneles inferiores representan las correlaciones intra-variable Hs, Tm y Dir en los puntos de forzamiento del contorno.....	21
Figura 10. Clustering para la selección de los puntos de forzamiento a emular (directores) aplicado, de manera independiente, a las variables Hs, Tm y Dir en cada una de las diferentes combinaciones RCM-RCP-periodo.....	22
Figura 11. Matrices de correlación cruzada de los meses de julio y noviembre en los puntos directores.	23
Figura 12. Matriz de correlaciones mes a mes del modelo multivariado gaussiano. Se representan las correlaciones cruzadas de todas las posibles combinaciones de variables modeladas mediante cópulas gaussianas.	24
Figura 13. Rosa de oleaje, modelo CNRM en el periodo histórico.....	25
Figura 14. Clasificación en componentes direccionales.....	26
Figura 15. Representación bivariada y marginales de la función de densidad modelo multivariado de direcciones. Los puntos rojos representan las observaciones.	27
Figura 16. Representación "intra-variable" de la emulación sintética del modelo CNRM en el periodo histórico. En el panel izquierdo se muestran los gráficos de dispersión mensuales de la emulación (puntos negros) y las observaciones (puntos rojos) representados en el espacio los periodos medios 3 y 6. En el panel a la derecha se muestra las funciones de densidad empíricas anuales de la emulación (trazo negro continuo) y de las observaciones (trazo azul discontinuo).	28
Figura 17. Representación "intra-variable" de la emulación sintética del modelo CNRM en el periodo histórico. En los paneles izquierdos se muestran los gráficos de dispersión mensuales de la emulación (puntos negros) y las observaciones (puntos rojos) representados en el espacio de las direcciones de los puntos 3 y 9. En los paneles a la derecha se muestra las funciones de densidad empíricas anuales de la emulación (trazo negro continuo) y de las observaciones (trazo azul discontinuo).	29
Figura 18. Representación de los gráficos de dispersión y funciones de densidad "intra-punto" altura de ola-dirección en el punto 3. En los paneles izquierdos se muestra los gráficos de dispersión	

mensuales de la emulación (puntos negros) y las observaciones (puntos rojos). En los paneles a la derecha se representa las funciones de densidad empíricas anuales de la emulación (trazo negro continuo) y de las observaciones (trazo azul discontinuo). 29

Figura 19. Topo-batimetría de la zona de estudio sobre el contorno de las mallas de cómputo (G11, M1101, M1102, M1103 y M1104). Los puntos wi rojos son los puntos de forzamiento de oleaje, los cuadrados son los puntos de la malla global de proyecciones WWII. El punto w5 coincide con el forzamiento de nivel MM5..... 30

Figura 20. Discretización en perfiles de la zona de estudio. 31

Figura 21. Casos seleccionados (puntos rojos) del total (puntos negros) de estados de mar horarios del modelo CNRM en el escenario histórico, proyectados en el espacio de las alturas de ola de los tres puntos directores. 31

Figura 22. Dos de las 500 propagaciones SWAN realizadas. El mapa de color representa la altura de ola, las flechas azules la dirección simulada y las negras la dirección de forzamiento en el contorno. Los puntos rojos son los puntos de forzamiento del modelo y los marcados con una cruz son los puntos directores. 32

Figura 23. Simulación XBeach de uno de los temporales sintéticos seleccionados en el perfil 1. En el panel superior se muestra el momento en el que se produce el máximo remonte. En el panel inferior se representa la serie de remontes infragravitatorios o surfbeat. 33

Figura 24. Régimen extremal agregado (SA) y desagregado (SD) de la CI calculado en el perfil 10 para las 1000 series sintéticas de 100 años del modelo CNRM en el periodo histórico. La línea discontinua gris corresponde al ajuste conjunto de las 1000 series. La línea continua gris representa el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series, la banda gris representa el intervalo de confianza (IC) del 95% y las líneas negras la envolvente (valores máximos y mínimos). Los puntos grises representan el valor medio de las 1000 CIs de 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno y los símbolos suma representan la desviación típica..... 34

Figura 25. Ajuste extremal de CI en cuatro perfiles representativos, en los años horizonte 2050 (paneles a y c) y 2100 (paneles b y d) y para los escenarios RCP4.5 (paneles a y b) y RCP8.5 (paneles c y d). Se muestra el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series de CI. Los resultados de cada RCM se muestran con diferentes símbolos mientras que los colores diferencian entre trayectorias de ANMM. 35

Figura 26. Ajuste extremal de la CI en el perfil 200 de la playa de Llosa en el año 2050 para el escenario RCP4.5. Se muestra el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series de CI. Los resultados de cada RCM se muestran con diferentes símbolos mientras que los colores diferencian entre trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART. 36

Figura 27. Ajuste extremal de la CI en el perfil 200 de la playa de Llosa en el año 2100 para el escenario RCP8.5. Se muestra el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series de CI. Los resultados de cada RCM se muestran con diferentes símbolos mientras que los colores diferencian entre trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART. 36

Figura 28. CI de 100 y 500 años de periodo de retorno. El panel a) corresponde al año 2050 en el escenario RCP8.5, el panel b) muestra el año 2100 en el escenario RCP4.5 y el panel c) hace referencia al año 2100 en el escenario RCP8.5. En las figuras, la línea de puntos más próxima a tierra se

corresponde con el P5% de ANMM, la intermedia con el P50% de ANMM y la más lejana con el P95% de ANMM.	38
Figura 29. CI de 100 y 500 años de periodo de retorno en 2005, considerado como el presente.	39
Figura 30. CI de 100 años de periodo de retorno para los diferentes RCMs y el escenario RCP8.5 en el año 2050. En la figura, la línea de puntos más próxima a tierra se corresponde con el P5% de ANMM, la intermedia con el P50% de ANMM y la más lejana con el P95% de ANMM.....	39
Figura 31. Cota de inundación de 100 años de periodo de retorno para los diferentes RCMs y el escenario RCP8.5 en el año 2100. En la figura, la línea de puntos más próxima a tierra se corresponde con el P5% de ANMM, la intermedia con el P50% de ANMM y la más lejana con el P95% de ANMM.40	40
Figura 32. En el panel a) se muestra la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno en 2005. El panel b) representa, para los distintos modelos y el escenario RCP8.5 en el año 2050, los periodos de retorno asociados a la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno presente. El panel c) representa, para los distintos modelos para el escenario RCP8.5 en el año 2100, los periodos de retorno asociados a la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno en el presente.....	41
Figura 33. Periodos de retorno futuros de la magnitud de la CI de 100 años de periodo de retorno presente para el escenario RCP8.5 en el 2050.....	42
Figura 34. Periodos de retorno futuros de la magnitud de la CI de 100 años de periodo de retorno presente para el escenario RCP8.5 en el 2100.....	42
Figura 35. Mallas de cómputo del modelo de inundación RFSM-EDA.....	43
Figura 36. Detalle de las mallas en las principales playas del tramo de estudio.	44
Figura 37. Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP4.5 en el año 2050, correspondientes a la envolvente de RCMs en diferentes playas del tramo de estudio.....	45
Figura 38. Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100, correspondientes a la envolvente de RCMs en diferentes playas del tramo de estudio.....	45
Figura 39. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 en las playas de Torre (panel superior) y Moncófar (panel inferior).	47
Figura 40. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 en la zona sur de Moncófar.	48
Figura 41. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 en la playa de Torre.	48
Figura 42. Mapas extensión de la inundación y cota de la lámina de agua asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno de los cinco RCMs para el escenario RCP8.5 en el año 2100 considerando el percentil 95% de ANMM en las playas de Burriana (panel superior) y Chilches (panel inferior).	49
Figura 43. Mapas extensión de la inundación y cota de la lámina de agua asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno de los RCMs EART y CNRM para el escenario RCP8.5 en el año 2100 considerando el percentil 95% de ANMM (0,76 cm) en Burriana.	50
Figura 44. Mapas extensión de la inundación y cota de la lámina de agua asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno de los RCMs EART y CNRM para el escenario RCP8.5 en el año 2100 considerando el percentil 95% de ANMM (0,76 cm) en Chilches.....	50
Figura 45. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI 100 años de periodo de retorno, envolvente de los cinco RCMs para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 considerando el P95% de ANMM.....	51

Figura 46. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI 100 años de periodo de retorno, para los diferentes RCMs y para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 considerando el P95% de ANMM.....	51
Figura 47. Relación heterocedástica entre el periodo medio y el periodo pico.	64
Figura 48. División en subconjuntos para el ajuste del modelo heterocedástico.....	64
Figura 49. Esquema del emulador multivariado de eventos de tormenta.	65
Figura 50. Envoltorio de onda corta y ondas largas ligadas en la zona de rompientes. Fuente: XBeach manual.....	66
Figura 51. Representación conceptual de las Impact Zones (Gouldby et al., 2008).	70
Figura 52. Representación conceptual de los Puntos de Acumulación y Comunicación en una IZ (Gouldby et al., 2008).....	71
Figura 53. Representación conceptual de dos IZs adyacentes (Jamieson et al., 2012).	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los resultados potenciales de la aplicación de la metodología.	17
---	----

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- ANMM: Incremento del Nivel Medio del Mar como consecuencia del cambio climático, en metros.
- CI: Cota de Inundación, en metros.
- EMODnet: Batimetría de la red de datos y observaciones marinas europeas, (del inglés European Marine Observation and Data Network).
- GCM: Modelo Climático General (del inglés, “Global Climate Model”), simulando las interacciones atmósfera-océano a escala planetaria.
- GEIs: Gases de Efecto Invernadero, contribuyendo al calentamiento global por la emisión a la atmósfera resultado de la acción antropogénica.
- GEV: Función de distribución Generalizada de Extremos (del inglés, “Generalized Extreme Value function”).
- GOT: base de datos de marea, (del inglés, “Global Ocean Tides”).
- IC: Intervalo de Confianza.
- IGN: Instituto Geográfico Nacional
- IPCC: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (del inglés, “Intergovernmental Panel on Climate Change”), conformado por un grupo de expertos que evalúan periódicamente el estado del conocimiento científico-técnico, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.
- MAXDISS: Algoritmo de selección de Máxima Disimilitud.
- MA: Marea Astronómica, en metros.
- MCMC: Métodos de generación sintética basados en las técnicas de cadenas de Markov y Monte-Carlo (del inglés, “Markov Chain Monte Carlo methods”).
- MDT: Modelo Digital del Terreno
- MM: Marea Meteorológica, en metros.
- MME: Modelo Multivariado Extremal
- MMD: Modelo Multivariado de Direcciones
- NMR: Nivel del Mar en Reposo. En el periodo de referencia suma de la marea astronómica y meteorológica. En los periodos futuros suma de la marea astronómica, meteorológica y aumento del nivel medio del mar. En metros.
- RBFs: Funciones de Base Radial, (del inglés “Radial Basis Functions”).
- SA: Simulaciones Agregadas.
- SD: Simulaciones Desagregadas.
- RCM: Modelo Climático Regional (del inglés, “Regional Climate Model”), simulando los procesos atmósfera-océano a escala regional considerando los resultados de los modelos GCM como condiciones de contorno para el aumento de resolución espacio-temporal.
- RCP: Trayectorias de Concentración Representativas, (del inglés, “Representative Concentration Pathway”). Constituyen los escenarios futuros de cambio climático función de los escenarios de

emisiones GEIs, caracterizadas por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m².

- RCP4.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de los GEIs con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 4.5 W/m².
- RCP8.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de los GEIs con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 8.5 W/m².
- RFSM-EDA: Modelo hidráulico de inundación (del inglés, Rapid Flood Spreading Method with Explicit Diffusion Acceleration term).
- SWAN: Modelo numérico de propagación del oleaje (del inglés, "Simulating Waves Nearshore").
- XBeach: Modelo numérico que resuelve la hidrodinámica en la zona de rompientes, (del inglés, "eXtreme Beach").

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

- β_f : Pendiente intermareal o del frente de la playa.
- $C(F_{x_1}(x_1), F_{x_2}(x_2))$: Función cópula de las variables x_1 y x_2 .
- Dir: Dirección del oleaje, en grados sexagesimales.
- dM: Distancia al mar desde la línea de referencia que define el perfil.
- dT: Distancia a tierra desde la línea de referencia que define el perfil.
- $f_x(x)$: Función de distribución mensual de la variable aleatoria escalar x o del vector aleatorio x .
- $F_x(x)$: Función de distribución mensual de la variable aleatoria escalar x o del vector aleatorio x .
- G_i : Malla general de cómputo para la regionalización híbrida.
- H_0 : Altura de ola en indefinidas, en metros.
- H_s : Altura de ola significativa, en metros.
- H_{s10} : Altura de ola significativa en la batimétrica de 10 metros.
- iw: Punto de forzamiento de oleaje.
- iss: Punto de forzamiento de nivel.
- k : Número de componentes direccionales de mezcla en la distribución de von Mises multivariada.
- L : Longitud de onda del oleaje, en metros.
- L_0 : Longitud de onda del oleaje en profundidades indefinidas, en metros.
- M_i : Malla de detalle de cómputo para la regionalización híbrida.
- \bar{x} : Media de la variable x .
- Φ^{-1} : Función normal inversa.
- N_i : es el número de elementos clasificados en el clúster i .
- N_t es el número de elementos totales a clasificar.
- \vec{n} : Dirección normal a una línea.
- nt: Número de puntos de forzamiento de oleaje en el contorno.
- η_{XB} : Serie temporal de remontes calculada con el modelo XBeach, incluye el NMR, el set-up estático y la componente infragravitatoria.
- p_j : Probabilidad de ocurrencia de cada componente direccional.
- σ : Desviación estándar de una variable.
- S_{IG} : Componente infragravitatoria del remonte.
- Σ : Matriz de correlaciones de las variables proyectadas en el espacio normal.
- Θ : Vector de direcciones, en grados sexagesimales.
- T_m : Periodo medio, en segundos.
- T_p : Periodo de pico, en segundos.
- $T_\theta(\Theta)$: Función de distribución multivariada de von Mises.

RESUMEN EJECUTIVO

En esta parte metodológica se propone una metodología para analizar los impactos del cambio climático sobre la inundación costera futura considerando la incertidumbre asociada. La metodología desarrollada combina el modelado estadístico de los forzamientos, el modelado hidrodinámico de las componentes del nivel del mar total que dan lugar a la cota de inundación y el modelado hidráulico de la inundación en tierra.

La metodología se ha implementado en un tramo costero del Mediterráneo, situado entre el Puerto de Castellón y el Puerto de Sagunto, de alta complejidad, debido a su nivel de antropización. La metodología se ha implementado a la escala de unidad de gestión, sin embargo, es aplicable a cualquier escala espacial.

A partir de las proyecciones dinámicas multi-modelo de oleaje y marea meteorológica elaboradas en la Tarea 2 del presente trabajo, se ha construido un modelo estadístico capaz de capturar las dependencias espacio-temporales entre las variables meteo-oceanográficas relevantes para la inundación costera. Este modelo permite generar series suficientemente largas de estados de mar y niveles extremos susceptibles de inundar el frente costero. A continuación, se ha llevado a cabo una regionalización estadística y dinámica de las series de eventos extremos generadas. Para ello, se ha empleado un método híbrido que combina técnicas estadísticas y modelos numéricos que permiten propagar el oleaje, resolver la hidrodinámica de la zona de rompientes con mucha precisión y determinar la contribución del oleaje a la cota de inundación. Una vez se ha reconstruido la cota de inundación en la costa, se ha utilizado un modelo hidráulico bidimensional para el cálculo de la inundación. Como resultado, para los escenarios y horizontes temporales considerados, se han obtenido mapas de inundación correspondientes a cotas de inundación de diferentes periodos de retorno estadísticamente significativas y originadas por la combinación de eventos extremos multi-modelo y el aumento del nivel medio del mar con su incertidumbre.

El informe se estructura de la siguiente forma. En primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte relativo a las metodologías empleadas hoy día para elaborar proyecciones de inundación costera, y así poner de manifiesto los avances que este trabajo supone frente al conocimiento presente y su adecuación a la costa española. En segundo lugar, se describe la metodología, que ha sido estructurada en dos bloques principales: (1) tratamiento probabilístico y regionalización de las dinámicas y (2) modelado hidráulico de la inundación costera. A continuación, se detalla la implementación de la metodología a la zona de estudio seleccionada y se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, se proporcionan recomendaciones para simplificar algunos de los elementos propuestos en la metodología y se discuten las implicaciones que tendrían sobre los resultados y su incertidumbre. Con ello se pretende facilitar la aplicación de la metodología a diferentes niveles de exigencia en la toma de decisiones poniendo de manifiesto las implicaciones que pueden suponer las simplificaciones propuestas.

1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS

La inundación costera es el resultado de la interacción de un conjunto de procesos geológicos e hidrodinámicos, con un cierto grado de interrelación entre ellos, a los que hay que agregar la intervención humana. El clima es un factor determinante en estas interrelaciones y, por tanto, obtener proyecciones fiables sobre la inundación futura es una de las bases esenciales para planificar la adaptación de la costa a los efectos derivados del cambio climático, reduciendo sus riesgos y aprovechando sus oportunidades.

Mediante la metodología aquí expuesta se pretende:

1. Dotar a los responsables de la gestión de la costa de diversas metodologías y herramientas para evaluar el riesgo de inundación costera derivado del cambio, considerando su incertidumbre.
2. Facilitar la incorporación de estrategias de adaptación flexible a la gestión de la costa española.
3. Analizar, evaluar y priorizar diferentes medidas de adaptación a lo largo de la costa española que sean eficaces y coste-eficientes.
4. Promocionar la integración de herramientas avanzadas de modelado para conseguir una más eficiente toma de decisiones y un mejor uso de los recursos disponibles.
5. Identificar qué aspectos será necesario desarrollar en el corto y medio plazo para mejorar las capacidades disponibles para gestionar la costa ante un marco de incertidumbre.

Para ello, la metodología propuesta pretende responder a cuestiones tales como:

- Para diferentes escenarios de cambio climático, ¿cómo cambiará el periodo de retorno de la cota de inundación de 100 y 500 años actual?, ¿cuál será la intensidad de la cota de inundación de 100 y 500 años en 2050 y 2100?, ¿cómo puede afectar este cambio al Dominio Público Marítimo Terrestre y a los riesgos sobre la población, activos y actividad en la costa?
- ¿Cuál será la extensión de la inundación costera para un horizonte temporal y un escenario de emisiones determinado?, ¿y la cota de la lámina de agua sobre el terreno asociada a esa inundación?
- ¿Cuáles son las estrategias de adaptación posibles ante diferentes escenarios y cuál sería la respuesta de la costa en caso de ser implementadas?
- ¿Cuáles son las incertidumbres asociadas a las evaluaciones anteriores y cómo es posible integrarlas en la toma de decisiones?
- Otras

En cuanto a las premisas se refiere, es necesario hacer constar las siguientes:

- La metodología propuesta y las herramientas derivadas pretenden incorporar el mejor conocimiento científico-técnico disponible.
- La metodología presentada se formula sobre un marco conceptual común, siendo modular, en cuanto al conjunto de procesos que incluye, y multinivel en su grado de aplicación. Esto permite adaptar su aplicación a diferentes niveles de exigencia y complejidad, y a los recursos, datos y capacidades disponibles. Esta aproximación al problema dota de una enorme flexibilidad a la metodología para aplicaciones diversas y por diferentes usuarios.
- Sobre la base del punto anterior, la metodología es válida para cualquier tramo de la costa española con diferentes niveles de aplicación y, por tanto, de la calidad de los resultados esperables.
- Aunque la metodología propuesta se ha enfocado al análisis de proyecciones futuras, es perfectamente aplicable para analizar inundaciones históricas.
- Dado su objetivo principal, analizar la evolución futura ante diferentes escenarios de cambio climático y horizontes temporales, se ha primado como uno de los elementos esenciales, la incorporación de las incertidumbres de las proyecciones climáticas en el modelado y en la comunicación del resultado.

2. REVISIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES

Si bien existen estudios en la literatura en los que se analiza el riesgo de inundación costera a escala regional y bajo escenarios de cambio climático, su alcance es reducido, bien sea debido a la falta de proyecciones futuras de dinámicas marinas, a su tratamiento o al modelado de la inundación.

El modelado de la inundación costera, es esencial para cuantificar el riesgo asociado. Para ello, es necesario 1) definir el conjunto de posibles eventos susceptibles de generar inundación y 2) calcular el impacto asociado. En la literatura existen estudios de detalle de cada etapa del análisis, sin embargo, muy pocos los abordan con el mismo nivel de detalle. Unos autores se centran más en la detección y/o generación de eventos y otros en el propio modelado del impacto dado el evento.

A escala regional, el modelado de la inundación costera se ha abordado de diversas formas. Gouldby et al. (2008) presentaron una metodología para evaluar el riesgo de inundación costera y fluvial a orillas del río Támesis centrándose en el modelado de la propagación de la inundación en tierra. De forma más sencilla, utilizando mapas de inundación existentes, Mokrech et al. (2008) exploraron estándares de protección de defensas costeras y fluviales ante escenarios de aumento del nivel medio del mar (ANMM). En 2009, Dawson et al. (2009) presentaron un análisis más detallado del riesgo de inundación costera considerando cambios en los parámetros del oleaje y escenarios de ANMM, y aplicando un modelo de inundación bidimensional. En 2011, (Heberger et al., 2011) optaron por obtener mapas de inundación para diferentes escenarios de ANMM en la costa de California utilizando una aproximación basada en sistemas de información geográfica. Más recientemente, Toimil et al. (2017) analizaron las consecuencias del riesgo de inundación en la costa del Principado de Asturias. En este caso, los autores consideraron proyecciones estadísticas de oleaje y marea meteorológica y escenarios de ANMM, y utilizaron un modelo bidimensional para calcular la inundación. En 2018, el centro de investigación americano USGS presentó una metodología (CoSMoS) para el análisis de los impactos del cambio climático en la costa californiana. Los autores emplearon proyecciones dinámicas de oleaje considerando un único modelo climático (O'Neill et al., 2018). La regionalización de estas proyecciones se realizó combinando dos modelos numéricos, uno de propagación y otro para resolver la hidrodinámica de la zona de rompientes y calcular a su vez la cota de inundación. La extensión de la inundación se determinó de forma simplificada a través del método de la bañera, que consiste en cortar el modelo digital de terreno (MDT) para una cota determinada. De entre los trabajos revisados, sólo Toimil et al. (2017) y O'Neill et al. (2018) consideran proyecciones, estadísticas y dinámicas respectivamente, de oleaje y marea meteorológica para el cálculo de la inundación y sólo el segundo realiza el modelado hidrodinámico de la cota de inundación en costa. No obstante, O'Neill et al. (2018) calculan la extensión de la inundación a través de la interpolación del MDT y no mediante modelado hidráulico como en Toimil et al. (2017).

Por otro lado, dada la duración reducida de las observaciones simultáneas de niveles y dinámicas extremos, se han propuesto modelos estadísticos capaces de repoblar el rango físico y estadísticamente posible de eventos de tormenta que puedan generar inundaciones importantes. Así, no es necesario recurrir a la hipótesis simplificadora de que ya se han observado las máximas realizaciones de las variables individuales o de las posibles combinaciones extremas de las mismas. A día de hoy, la literatura a este respecto no es muy amplia. Rueda, et al. (2016) emplearon el método de probabilidades conjuntas (JPM, de sus siglas en inglés) para generar sintéticamente eventos extremos multivariados. Los autores combinaron técnicas estadísticas y un modelo de propagación de oleaje para regionalizar los eventos sintéticos generados y calcular el caudal de rebase con el que forzar un modelo hidráulico de inundación en la playa del Sardinero (Cantabria). Por otro lado, Wahl et al. (2016) propusieron un modelo multivariado de extremos y lo aplicaron en aguas indefinidas en el cálculo de un indicador de la cota de inundación en un punto localizado en el Golfo de México. Recientemente, Sayol y Marcos (2018) usaron proyecciones regionalizadas de oleaje, marea meteorológica y ANMM con las que ajustaron un modelo de extremos en el Delta del Ebro. Tras generar un conjunto de eventos extremos sintéticos, calcularon la cota de inundación con formulaciones semiempíricas y determinaron la extensión de la inundación resultante mediante la técnica de la bañera. En todos los estudios revisados en los que se emplean técnicas de generación sintética, ésta se aplica en un único punto, es decir, sin considerar la variabilidad ni dependencia espacial de los eventos y el cálculo de la cota de inundación se realiza con formulaciones empíricas.

En este trabajo se desarrolla una metodología para la elaboración de proyecciones de inundación que aúna, por primera vez en la literatura, los siguientes elementos: a) proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológicas considerando 5 modelos climáticos (RCMs); b) el tratamiento estadístico de las dinámicas en indefinidas para determinar todas las combinaciones de oleaje y nivel del mar extremos que podrían provocar inundación en la costa considerando su variabilidad y dependencia espacial; c) la regionalización híbrida de las dinámicas a costa; d) el cálculo hidrodinámico de la contribución del oleaje a la cota de inundación; y e) el modelado hidráulico de la inundación costera. Además, la metodología es aplicable a escala regional.

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología se ha estructurado en dos grandes bloques. El primero consiste la generación sintética de las dinámicas en indefinidas a partir de 5 RCMs regionalizados dinámicamente en la Tarea 2 de este proyecto. A continuación, los eventos generados se propagan a costa y, mediante modelado hidrodinámico, se obtiene la contribución del oleaje a la cota de inundación. La necesidad de generar sintéticamente y propagar de forma dinámica eventos extremos multivariados a escala regional, ha determinado el desarrollo de un modelo estadístico capaz de captar la interdependencia espacial entre los diferentes forzamientos. De esta manera, es posible generar miles de series de eventos extremos consistentes estadística, física y espacialmente en diferentes puntos de una región. El segundo bloque contiene la descripción del modelo hidráulico de inundación costera empleado.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de la metodología en el contexto del trabajo realizado en otras tareas de este informe. El bloque inicial, descrito con detalle en la Tarea 2, consiste en la elaboración y preparación de las proyecciones dinámicas de las variables marinas causantes de la inundación. Los bloques 1 y 2 corresponden a la parte metodológica que se describe en esta sección. Finalmente, en el bloque 3 se indica el tipo de resultados que se derivan de la implementación de la metodología propuesta y que se analizan con detalle en la sección 4 de este documento.

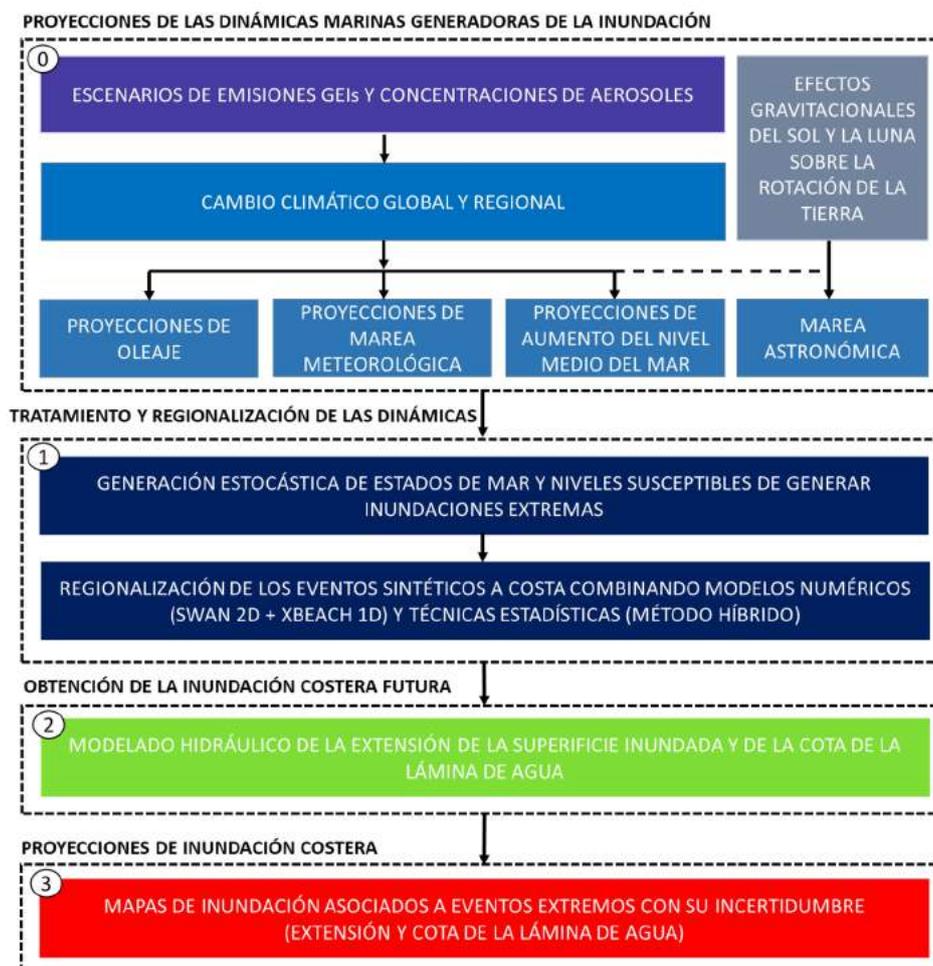


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el modelado de las proyecciones de inundación costera.

La Figura 2 relaciona el conjunto de datos de partida necesarios para desarrollar las proyecciones de inundación costera (dinámicas marinas, datos topo-batimétricos y usos del suelo), las etapas de la metodología en las que intervienen (tratamiento y regionalización de las dinámicas y cálculo de la inundación) y los resultados, parciales y finales, que se derivan de las mismas (eventos extremos multivariados sintéticos, cotas de inundación y sus periodos de retorno y mapas de inundación asociados). La etapa de regionalización de las dinámicas tiene como principales datos de partida las series proyectadas de las dinámicas. En primera instancia, a través de la generación estocástica, se emulan miles eventos extremos multivariados sintéticos que podrían ocasionar la inundación del frente costero. Mediante el proceso de regionalización, estos eventos extremos se transfieren a costa y se utilizan para calcular contribución del oleaje a la CI, considerando los efectos del nivel del mar. Con estos datos se reconstruyen las series completas de CI y se ajustan a una función de extremos. De esta primera etapa se obtienen CI asociadas a distintos periodos de retorno con toda la estadística del emulador subyacente. Estas CIs se emplean como datos de entrada del modelo de inundación, que, además, tienen en cuenta la topografía y los usos del suelo. Como resultados finales, se obtienen mapas de inundación que proporcionan información de la extensión de la lámina de agua y calado.

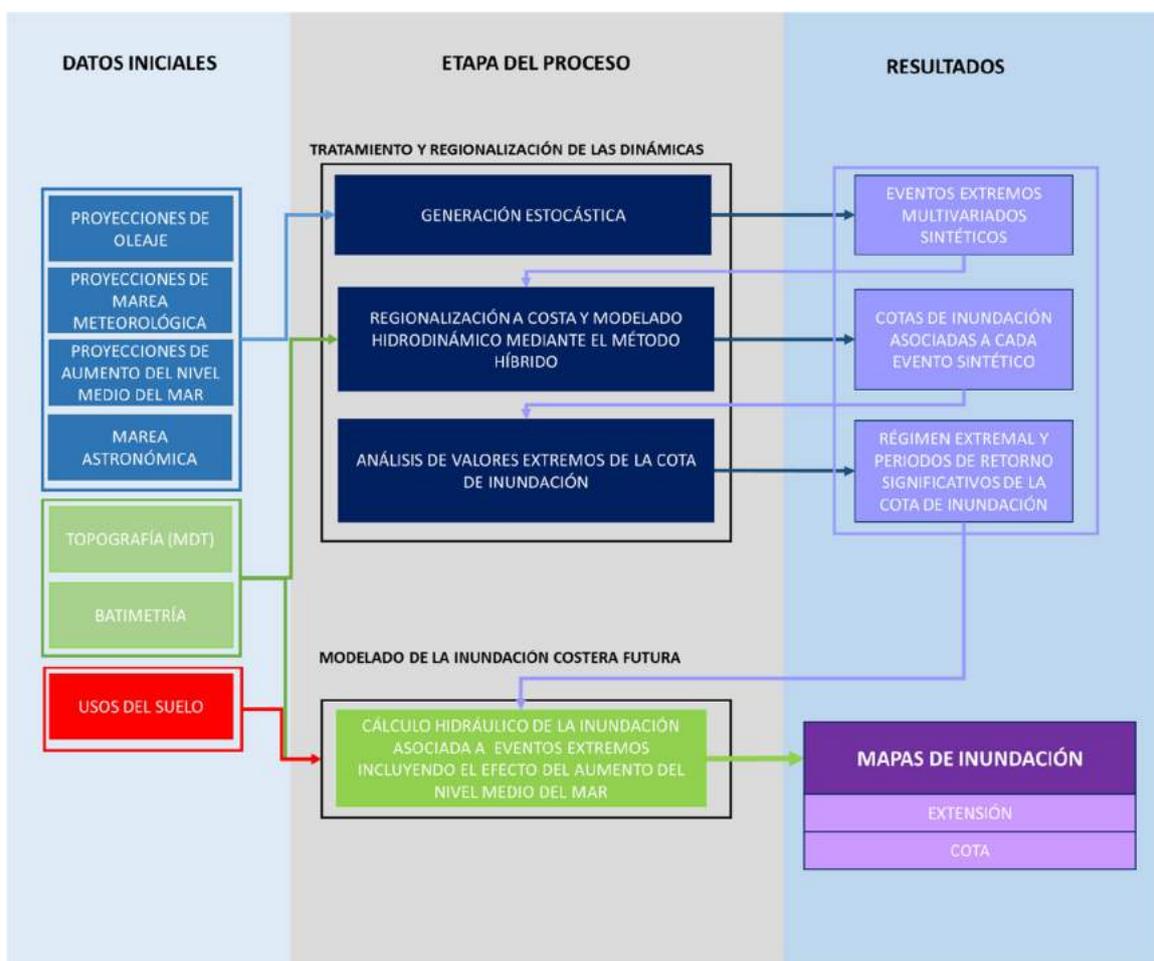


Figura 2. Diagrama de flujo de entradas y resultados de cada etapa de cálculo de las proyecciones de inundación.

3.1. Tratamiento y regionalización de las dinámicas

La inundación costera depende del oleaje, la marea meteorológica (*MM*) y la marea astronómica (*MA*), tal y como muestra la Figura 3. Estas variables se combinan en un índice del nivel del mar total denominado cota de inundación (*CI*). La *CI* futura, además de las proyecciones de estas variables, debe incorporar el ANMM:

$$CI = Setup + MM + MA + ANMM \quad (1)$$

Donde, en este caso, la contribución del oleaje se introduce en forma de set-up, que es la sobrelevación del nivel del mar debido a la rotura del oleaje que puede generar inundación.

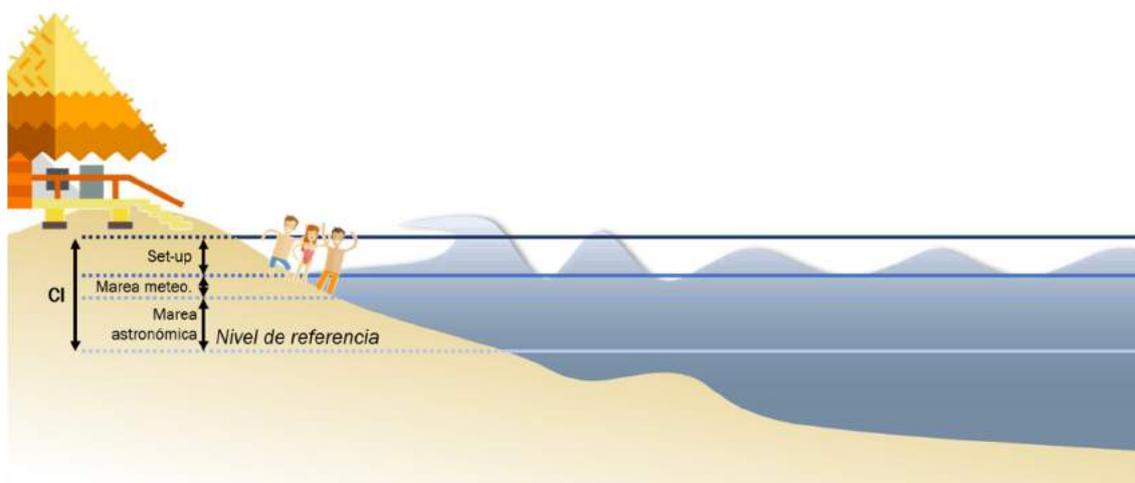


Figura 3. Representación de las distintas componentes que contribuyen a la *CI*.

La *CI* con la que se fuerza el modelo hidráulico se calcula probabilísticamente a partir de la generación sintética de 1000 realizaciones de 100 años de tormentas mensuales física y estadísticamente consistentes. El método probabilista permite considerar toda la casuística de combinaciones de variables climáticas causantes de la inundación de la costa. Esto es muy relevante porque las proyecciones dinámicas no tienen por qué contener la mayor realización de las variables individuales ni de las combinaciones de éstas que maximizan la *CI*.

La elección del modelo estadístico capaz de generar eventos sintéticos de tormenta está condicionada por la posterior regionalización de las dinámicas que conducen al cálculo hidrodinámico del set-up. Con este fin se ha desarrollado el primer modelo estadístico capaz de captar espacialmente las dependencias entre múltiples variables meteo-oceanográficas y generar estados de mar y niveles sintéticos consistentes en varios puntos del espacio.

A continuación, mediante técnicas de regionalización híbrida (Camus et al., 2011), se ha calculado el set-up generado por las 1000 series de 100 años de tormentas mensuales para cada una de las 25 combinaciones de RCMs, escenarios y horizontes temporales. Para ello, se han seleccionado estados de mar y niveles extremos y se han propagado numéricamente hasta la batimétrica -10 m empleando el modelo de generación de oleaje SWAN (Booij et al., 1996) acoplado unidireccionalmente con el modelo hidrodinámico XBeach (Roelvink et al., 2009) ejecutado en perfiles.

El análisis extremal de la CI permite obtener diferentes periodos de retorno, que este caso son estadísticamente significativos porque tienen subyacente toda la estadística de las realizaciones sintéticas. Las CI de periodo de retorno 100 y 500 años para los RCMs, escenarios y horizontes considerados se han utilizado como forzamiento para el modelo hidráulico de inundación. Un esquema de la metodología propuesta para el tratamiento y regionalización de las dinámicas se muestra en la Figura 4.

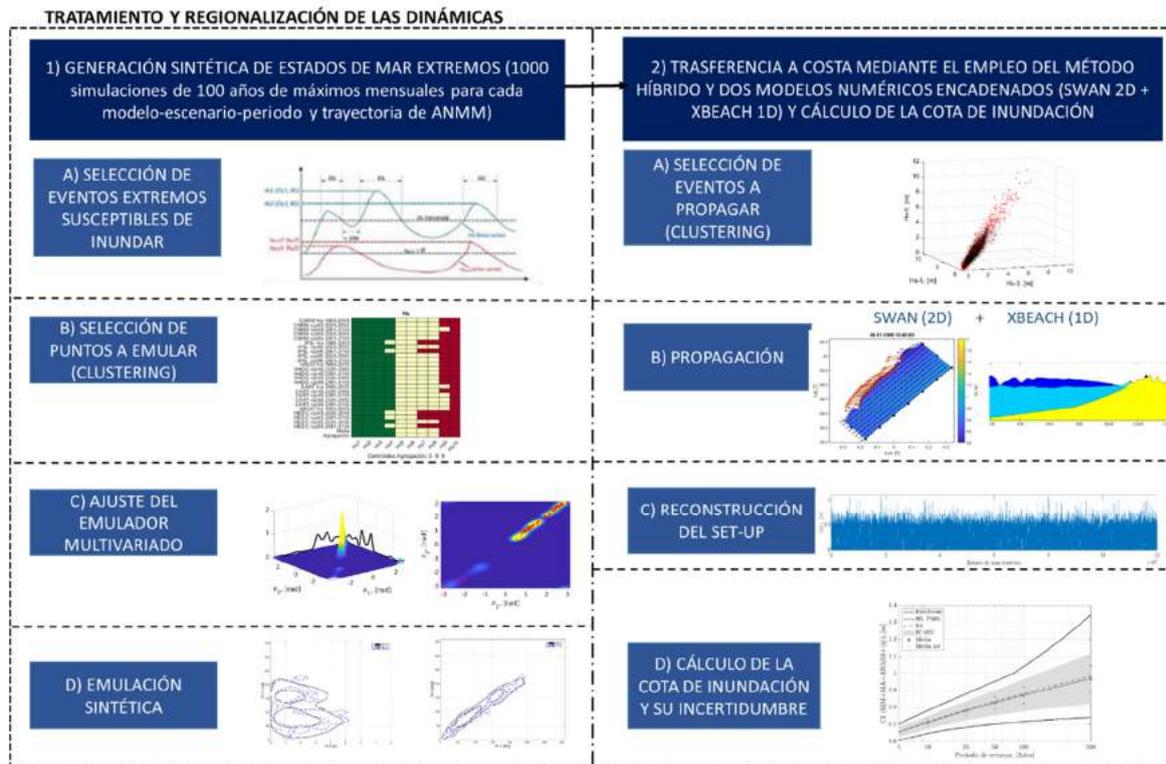


Figura 4. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para el tratamiento y regionalización de las dinámicas.

3.1.1. Generación sintética de eventos extremos

El primer paso antes de proceder con la generación sintética de eventos extremos multivariados y su regionalización híbrida combinando modelado numérico y técnicas estadísticas (Camus et al., 2011) es definir el dominio espacial de cálculo. Éste estará limitado por los puntos que disponen de información de las dinámicas que se pretende propagar desde profundidades indefinidas (borde exterior de la malla general) y que asimismo contendrá los puntos en la batimetría de 10 metros (incluidos en las mallas de detalle) en los que se quiere extraer las propiedades del oleaje propagado.

Una primera aproximación para emular eventos extremos multivariados teniendo en cuenta su interdependencia es la generalización de trabajos ya realizados (p. ej., Sayol & Marcos, 2018; Rueda et al., 2016; Wahl et al., 2016; Lucio et al., 2020) sobre un único punto de forzamiento a varios puntos de forzamiento. Sin embargo, estos modelos no permiten captar las relaciones de interdependencia entre variables circulares como la dirección del oleaje (Dir, Dir_2, \dots, Dir_n) y su generalización a n puntos de forzamiento y, por tanto, su aplicación a escala regional, son directas.

Para resolver el problema, se ha propuesto un modelo estadístico que consta de dos componentes entrelazadas. Por un lado, un modelo multivariado extremal (MME) a escala mensual (l), y, por otro, un modelo multivariado de direcciones (MMD) según muestra la ecuación (2):

$$f_{Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_{iw}, MM_{iss}} l(Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_j, MM_{iss}) = \underbrace{f(Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_j, MM_{iss})}_{\text{MME Cópula gaussiana}} \underbrace{f(Dir_{iw \neq j} | Dir_j)}_{\text{MMD}} \quad (2)$$

Donde:

$iw \in [1, 2, \dots, n]$ son los puntos de forzamiento del oleaje; n es el total de puntos emulados; iss es el punto de forzamiento de nivel; y j es el punto de vínculo entre el modelo basado en cópulas gaussianas y el modelo direccional.

El modelo que se propone es una generalización a varios puntos de forzamiento de la relación condicional entre variables lineales y direccionales propuesta en (Wahl et al., 2016) y que se define como:

$$f_{Hs, Tm, Dir, SS}(Hs, Tm, Dir, MM) = f(Hs, Tm, MM) f(Dir | Hs) \quad (3)$$

Por un lado, la ecuación (2) modela la correlación entre las variables lineales y una variable circular vínculo (j) mediante cópulas gaussianas; por otro, la correlación entre variables circulares se evalúa mediante un modelo multivariado de direcciones específico (Mardia et al., 2008). El acoplamiento se realiza gracias a la variable circular de vínculo (j), y a partir de ésta se extraen las direcciones de los puntos directores ($iw \neq j$) restantes. Esta modelización es válida siempre y cuando exista una alta correlación entre direcciones, que permita reducir la dependencia condicional únicamente a la dirección modelada en la cópula gaussiana.

El acoplamiento entre estas dos componentes supone una solución de compromiso compatible con el clima marítimo de la zona. Un enfoque más simplista consideraría independientes las variables lineales y circulares, lo que despreciaría el hecho de que los temporales asociados a alturas de ola grandes tienen una direccionalidad marcada por mayores *fetch* o distancias de generación de oleaje. Por otro lado, la modelización más rigurosa implicaría la evaluación conjunta de la interdependencia de todas las direcciones con el resto de variables, lo que es extremadamente complejo, (Carnicero et al., 2013).

El modelo estadístico propuesto permite obtener realizaciones de variables de oleaje y nivel del mar. Sin embargo, para caracterizar un evento de tormenta en indefinidas y poder propagarlo numéricamente a costa, es necesario conocer el periodo de pico (T_p) la *MA* y el *ANMM*. Para ello, T_p se extrae mediante una regresión heterocedástica con *Tm* y *MA* mediante una extracción aleatoria de la base de datos de reanálisis. La aplicación del emulador multivariado en cada una de las combinaciones de modelo, escenario y periodo con las diferentes trayectorias de nivel del mar consideradas da lugar a eventos de tormenta sintéticos.

El emulador multivariado desarrollado es capaz de captar la estacionalidad (mes a mes) de las tormentas a través del ajuste mensual del modelo basado en cópulas gaussianas. Pese a que la inferencia del modelo direccional y del T_p se hace escala anual, la estacionalidad se conserva en ambos

casos. Por un lado, las direcciones se calculan mediante una relación condicional con la dirección de vínculo, modelada en la cópula gaussiana, y, por lo tanto, estacional. Del mismo modo, el periodo de pico se obtiene a partir del periodo medio. La Figura 5 presenta un diagrama de flujo que describe las diferentes componentes del emulador multivariado propuesto.

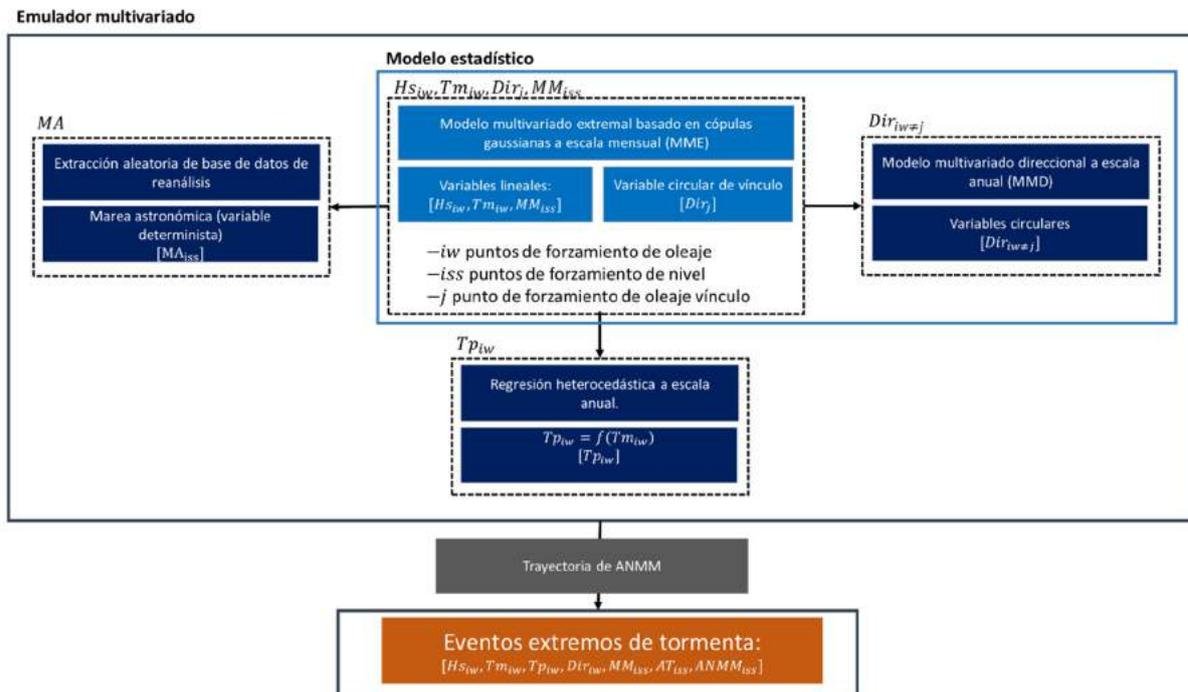


Figura 5. Esquema del emulador multivariado de eventos de tormenta.

Teniendo en cuenta que el modelado de la inundación combina modelado estadístico y numérico, el tratamiento estadístico de las dinámicas debe ser consistente con el modelado numérico posterior. Es por ello por lo que un primer paso consiste en la recolección de las dinámicas (oleaje y nivel) en los puntos del contorno de la malla general del modelo de propagación. Tras aplicar una corrección de sesgo climático (Subtarea 2.4 del presente informe), se realiza el tratamiento estadístico de las dinámicas en cuatro etapas:

1. La primera etapa consiste en el diseño y aplicación de un criterio de selección de estados de mar extremos que nos permite detectar, en las series de oleaje y MM proyectadas, eventos extremos susceptibles de producir inundaciones en la costa.

$$\overline{CI}_{indicador} = \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{nt} (MA_i + MM_i + 0.106 \sqrt{H_0 L_0}) \quad (4)$$

Dónde nt es el número de puntos de forzamiento en el contorno; H_0 es la altura de ola en indefinidas; y L_0 es la longitud de onda en indefinidas.

$\overline{CI}_{indicador}$ es un indicador del nivel del mar total promedio en el contorno del dominio espacial de cálculo. En este caso, la contribución del oleaje se determina mediante la formulación semiempírica de Stockdon et al. (2006). Una vez calculada la serie temporal del indicador, se detectan los máximos niveles del mar totales mensuales y sus dinámicas correspondientes ($H_s, T_m, T_p, Dir, MM, MA$) en todos los puntos del contorno. Como resultado, se obtienen series de dinámicas que originan la $\overline{CI}_{indicador}$ máxima mensual

2. La segunda etapa es selección mediante *clustering* de los puntos directores, es decir, de los puntos de forzamiento en los que se va a aplicar el emulador. Dadas las características de la batimetría y del clima marítimo, las dinámicas en puntos cercanos del borde de malla son similares estadísticamente. Por lo tanto, no es necesario emular dinámicas sintéticamente en todos los puntos del contorno, sino que basta con seleccionar los puntos directores (centros de clúster) y el área de influencia (puntos del clúster) cuyas dinámicas son representativas del conjunto de puntos de forzamiento. Una vez emuladas las dinámicas en los puntos directores, centros de clúster, basta con calcular las dinámicas en los otros puntos del clúster a través de técnicas de interpolación multivariada o mediante propagación basada en la conservación del flujo de energía y ley de Snell.
3. En la cuarta etapa se lleva a cabo la inferencia del emulador multivariado. Se calculan los parámetros del modelo estadístico multivariado extremal que acopla los modelos MME y MMV, así como los parámetros de la regresión heterocedástica entre el periodo medio y el periodo pico.
4. La cuarta etapa consiste en la generación sintética de series de dinámicas susceptibles de inundar la zona de estudio. Para ello, se emplean técnicas de simulación de Monte-Carlo y, como resultado, se obtienen realizaciones de las variables meteo-oceanográficas que siguen la función de densidad dictada por el modelo estadístico. A continuación, se obtiene el periodo pico a partir del periodo medio emulado y la marea astronómica.

Las diferentes etapas del proceso de tratamiento de las dinámicas se describen, de manera más detallada y para facilitar su reproducción, en el Anexo I.

3.1.2. Regionalización de las dinámicas y cálculo de la cota de inundación

El valor del set-up puede determinarse mediante fórmulas semiempíricas o modelado numérico. Sin embargo, pese a los esfuerzos volcados en el desarrollo de fórmulas semiempíricas (Gomes da Silva et al., 2020), las complejas interacciones entre la hidrodinámica y la morfología del terreno, que condicionan su valor, sólo pueden ser consideradas mediante el modelado numérico.

Para obtener el set-up asociado a las tormentas sintéticas generadas, se ha aplicado una metodología híbrida que combina el modelado numérico y técnicas estadísticas (Camus et al., 2011). Para resolver la hidrodinámica en la zona de rompientes con precisión, se han encadenado unidireccionalmente los modelos SWAN y XBeach.

Una vez definido el dominio de cálculo, la aplicación del método híbrido consta de tres pasos (ver Figura 4):

1. El primer paso consiste en seleccionar, de entre las tormentas sintéticas simuladas, el conjunto de las mismas que se va a propagar dinámicamente, es decir, usando modelos de procesos. Estos casos deben ser suficientemente representativos para, en el último paso del método híbrido, poder reconstruir la serie temporal completa una vez propagada. La selección de los casos a propagar se realiza con el algoritmo de máxima disimilitud que busca, de entre el conjunto de datos disponibles, aquellos que son más diferentes entre sí.
2. El segundo paso consiste en propagar numéricamente los casos seleccionados con el modelo SWAN (Booij et al., 1996). SWAN permite modelar los procesos de asomeramiento, refracción debida a batimetría y corrientes, disipación por rotura, *whitecapping* y fricción con el fondo. Como resultado, se obtiene, para los casos seleccionados, las propiedades del oleaje en los puntos objetivo a 10 m de profundidad.
3. El tercer paso consiste en anidar, en los puntos objetivo, el modelo XBeach (Roelvink et al., 2009) ejecutado en perfiles espaciados cada 200 m a lo largo de la costa objeto de estudio. El modelo XBeach, ejecutado en modo *surfbeat*, resuelve las variaciones de onda corta en el grupo de ondas, así como las ondas infragravatorias asociadas. El modelo permite colocar un sensor de nivel y generar la serie temporal de remotes infragravitorios o *surfbeat* en costa asociada a cada tormenta sintética sobre el nivel medio en reposo (NMR):

$$\eta_{XB}(t) = NMR(ANMM + MA + MM) + Surfbeat(set - up + S_{IG}(t)/2) \quad (5)$$

Donde S_{IG} es el swash infragravatorio (oscilación de largo periodo). El set-up se obtiene, promediando en el tiempo la serie de nivel ($\eta_{XB}(t)$) a la que se le ha sustraído el NMR:

$$Set - up = \overline{\eta_{XB}(t) - NMR} \quad (6)$$

4. El último paso aborda la reconstrucción de las series temporales de set-up completas en la costa a partir de los casos propagados. Para ello, se utiliza una técnica de interpolación multivariada basada en funciones de base radial.

Una vez aplicado el método híbrido, la ecuación (1) permite calcular la CI a partir de la suma lineal de las diferentes componentes calculadas. Para cada una de las 1000 simulaciones de 100 años asociadas a los escenario-modelo-periodo considerados, se calcula su serie de CI correspondiente, según lo descrito. El ajuste de una función generalizada de extremos (*GEV* por sus siglas en inglés) a esas series de CI permite obtener valores de CI de distintos periodos de retorno que son significativos porque heredan toda la estadística del emulador.

A partir de esos valores de CI extremos asociados a los periodos de retorno de cálculo, se construyen hidrogramas representativos de tormentas en la zona de estudio con los que forzar el modelo de inundación.

3.2. Modelado hidráulico de la inundación costera

El modelo propuesto para caracterizar el impacto de inundación costera se enmarca en una estrategia de modelado en la que se usan como forzamiento las proyecciones de las dinámicas marinas desarrolladas en la Tarea 2 de este trabajo, aunque podrían aplicarse otras. Esta estrategia se describe en la Figura 6. El modelo se alimenta con series temporales (o hidrogramas) de CI. La CI combina dinámicas de corto plazo en forma de eventos extremos y el efecto del ANMM (de largo plazo). Las dinámicas de corto plazo incluyen el oleaje, la marea meteorológica y la marea astronómica. Previo paso a la regionalización, y mediante una emulación sintética, se generan miles de series de eventos multivariados de oleaje y nivel del mar que podrían producir la inundación de la costa. Estas series necesitan ser transferidas de aguas indefinidas a la costa. Para ello, se aplica un método de regionalización híbrida a través del cual se acopla un modelo de propagación de oleaje con otro que resuelve la hidrodinámica de la zona de rompientes. Éste último permite obtener la sobreelevación del oleaje por rotura con mucha precisión, componente esencial de la CI. Una vez calculada la CI con todas sus componentes, se ajusta una función de extremos y se obtienen CIs asociadas a diferentes periodos de retorno que son significativas porque contienen toda la estadística del emulador. El número de escenarios, modelos climáticos, percentiles de ANMM puede ser cualquiera, aunque en este trabajo, como se verá más adelante, se han considerado 2 RCPs, 5 RCMs y 3 percentiles de la distribución de ANMM. Con estos datos se ha alimentado el modelo de inundación, que es muy dependiente de la topografía y tiene en cuenta la rugosidad del terreno. Como resultado, se han obtenido mapas de inundación para combinaciones de escenarios, modelos climáticos y trayectorias de evolución de ANMM. Para más detalle sobre el uso e interpretación de los resultados, ir a la Tabla 1 del apartado 4 de este informe.

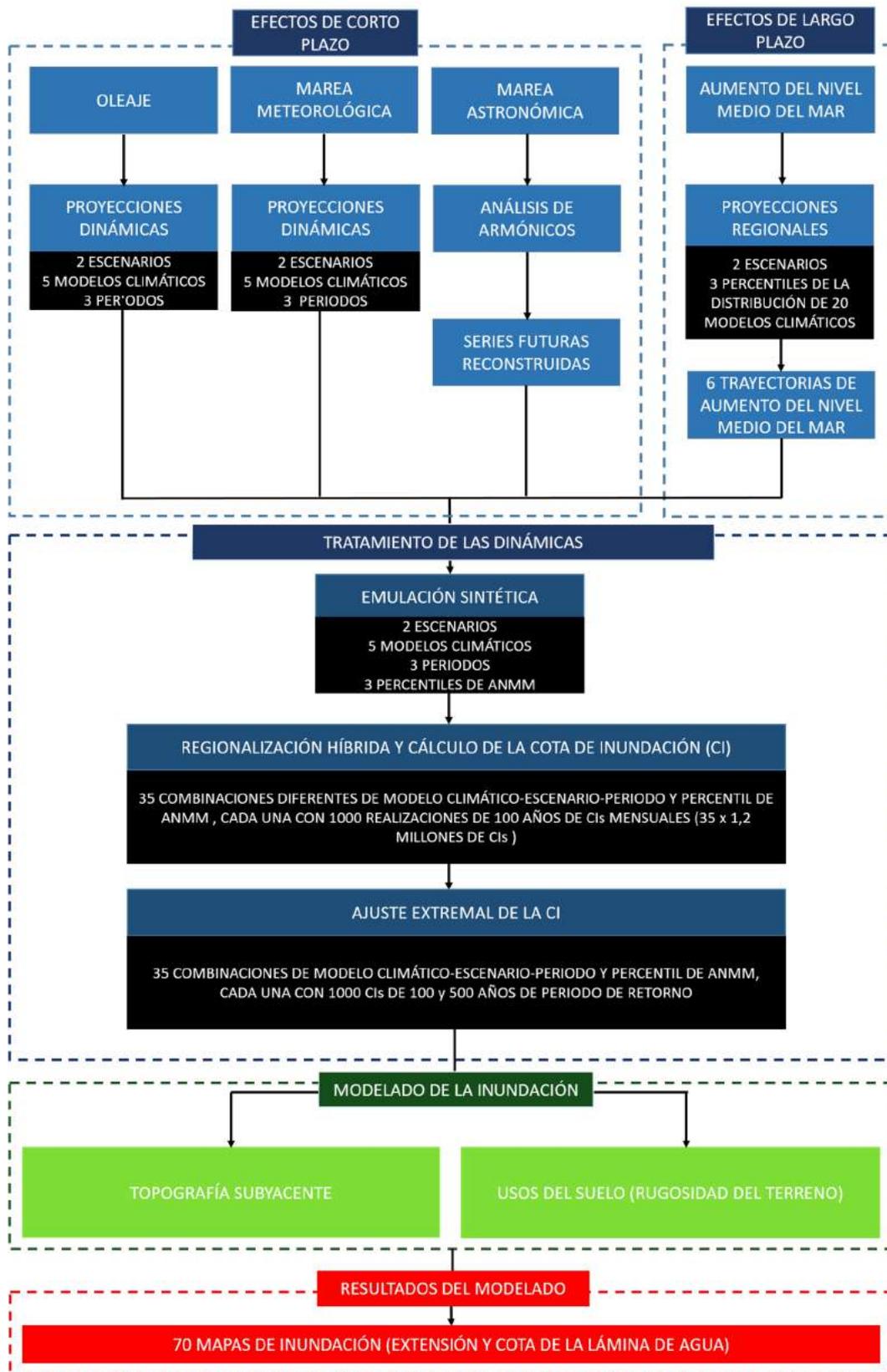


Figura 6. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para modelar la erosión costera.

Para simular la inundación costera se ha empleado el modelo RFSM-EDA (del inglés, *Rapid Flood Spreading Method – Explicit Diffusion wave with Acceleration term*) (Jamieson et al., 2012), un modelo hidráulico bidimensional eficiente que proporciona profundidades de agua sobre el terreno. Su algoritmo permite tener en cuenta rasgos característicos de la topografía, como crestas y puntos bajos, derivados de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta resolución y es sensible a la rugosidad de Manning.

Para su total comprensión, las ecuaciones de gobierno de RFSM-EDA y sus hipótesis de partida se describen en el Anexo II.

3.3. Resultados potenciales

De la aplicación de la metodología propuesta, pueden obtenerse diferentes resultados con los que dar respuesta al conjunto de cuestiones que han motivado este estudio. En primer lugar, pueden obtenerse las CIs asociadas a diferentes periodos de retorno a lo largo de toda la costa y de forma probabilística, para las combinaciones de RCM, RCP y trayectoria de ANMM consideradas. Con las CIs calculadas y la topo-batimetría presente, pueden obtenerse mediante modelado hidráulico los mapas de inundación asociados. Estos mapas proporcionan información sobre la extensión de la superficie inundada y la cota de la lámina de agua. Los resultados incorporan la incertidumbre asociada a dos RCPs, cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM correspondientes a tres percentiles de la distribución de ANMM.

La obtención y análisis de las proyecciones de inundación costera permiten conocer los efectos de la inundación futura sobre el Dominio Público Marítimo Terrestre y sentar las bases de estudios posteriores de riesgos y adaptación en la acosta.

La Tabla 1 muestra un resumen de los diferentes resultados que pueden derivarse de la aplicación de la metodología propuesta y de su proceso de obtención.

Resultado	Proceso de obtención
<i>Cotas de inundación de diferentes periodos de retorno para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los años objetivo</i>	Se obtienen mediante un ajuste estacionario de los máximos anuales de las de series de cota de inundación a una función generalizada de extremos. Estas series son las 1000 series sintéticas de 100 años de eventos extremos de oleaje y nivel del mar obtenidos a partir de las series de proyecciones dinámicas de oleaje y nivel del mar para los diferentes RCMs y RCPs combinadas con trayectorias de ANMM para esos mismos escenarios.
<i>Cambios en los periodos de retorno de las cotas de inundación obtenidas para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los años objetivo</i>	Se obtienen de la comparación de los periodos de retorno de cotas de inundación de una intensidad determinada para los años objetivo.
<i>Mapas de inundación (extensión y cota de la lámina de agua) asociados a cotas de inundación de diferentes periodos de retorno para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los años objetivo</i>	Se obtienen forzando un modelo hidráulico con hidrogramas generados a partir de las cotas de inundación calculadas y la duración característica de las tormentas de la zona. Para ello, se emplea la topo-batimetría presente.

Tabla 1. Resumen de los resultados potenciales de la aplicación de la metodología.

4. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN

La metodología para modelar las proyecciones de inundación desarrollada se ha aplicado en un tramo de costa de aproximadamente 40 kilómetros situado en el litoral Mediterráneo español. En concreto, la zona piloto se encuentra entre los puertos de Castellón y Sagunto constituyendo una unidad de gestión litoral.

A lo largo de esta sección, se proporciona una descripción de la zona de estudio, se detallan los datos necesarios para la realización de los diferentes pasos de la metodología. Finalmente, se proporciona un resumen de los resultados obtenidos.

4.1. Descripción general de la zona de estudio

La morfología costera actual en el tramo de estudio está muy condicionada por las sucesivas actuaciones antrópicas que se han realizado a lo largo del tiempo en una costa inicialmente continua. La construcción de los puertos de Sagunto, Castellón y Burriana a principios del siglo XX bloqueó el aporte norte de sedimentos a sotamar de las estructuras. De este modo, se pasó de una zona en equilibrio dinámico con un transporte longitudinal intenso y un aporte sedimentario continuo, a una zona alterada que mantiene la misma intensidad en el transporte de sedimentos, pero sin aportaciones. El resultado de las actuaciones ha producido erosiones crónicas en playas abrigadas por las estructuras y acumulaciones en playas a su trasdós. Por otro lado, la explosión inmobiliaria que tuvo lugar en la segunda mitad del siglo XX pasó por alto el desequilibrio en el que se encontraba el litoral, dando lugar a construcciones a pie de playas en retroceso crónico. Para intentar solucionarlo, se llevaron a cabo actuaciones locales que, al no considerar una visión global del problema, han acabado agravando el problema en tramos de costa adyacentes.

Al margen del fuerte dinamismo de la línea de costa, el terreno en el tramo es llano y bajo (Figura 7), siendo las playas y los paseos marítimos la principal defensa frente a inundaciones. Tal es así, que la mayoría de los cursos de agua vertientes en la zona deben ser bombeados para facilitar su desembocadura al mar. Sin embargo, la vulnerabilidad ante inundaciones costeras no genera, a día de hoy, un riesgo extremo pues las dinámicas marinas son moderadas. Los eventos compuestos de oleaje y precipitación sí suponen, actualmente, un riesgo importante de inundación en la zona, aunque su evaluación excede el alcance de este estudio.

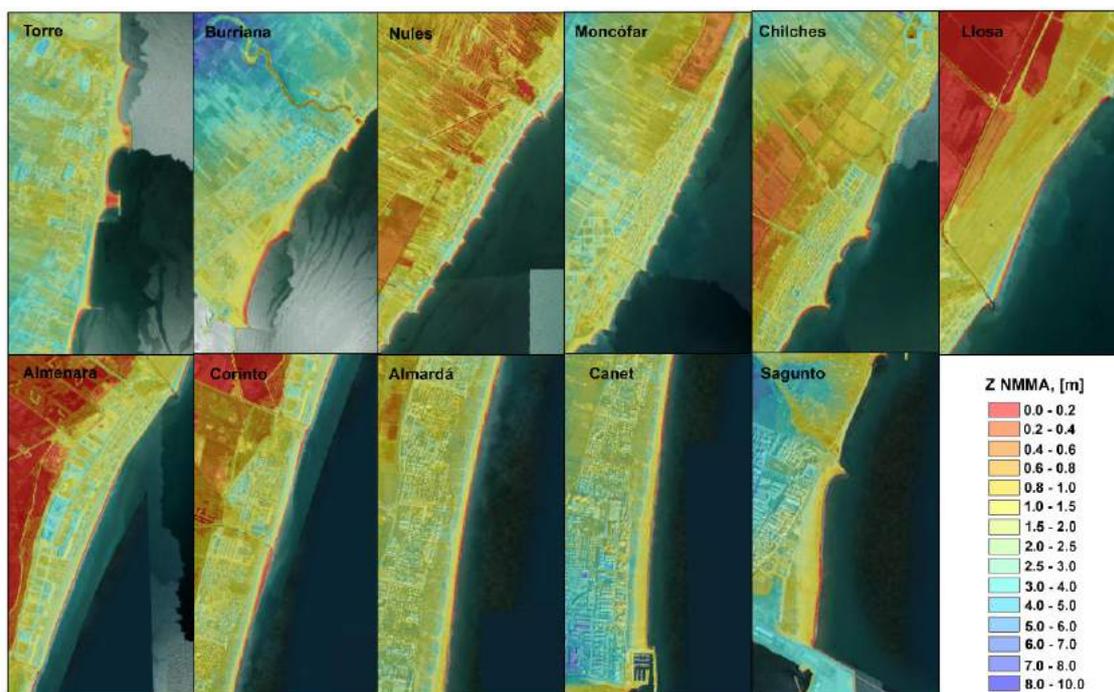


Figura 7. Modelo digital del terreno en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto.

4.2. Tratamiento probabilístico y regionalización de las dinámicas

La regionalización del oleaje requiere la elaboración de una malla de cómputo, que, a su vez, debe adaptarse a los puntos en los que se dispone información del modelo global de oleaje. El tratamiento probabilístico previo a la regionalización debe, por tanto, realizarse en los puntos del contorno de la malla empleada en el modelo de propagación.

En la Figura 8 se muestra el dominio de cálculo empleado para la regionalización de las dinámicas, se aprecia que los 10 puntos de forzamiento en el contorno coincidan con puntos de la malla del modelo global de proyecciones. El dominio de cálculo está formado por el anidamiento unidireccional de la malla general G11 de 500 metros de resolución y las mallas de detalle M1101, M1102, M1103 y M1104 de 50 metros de resolución.

El tratamiento probabilístico busca, a partir de las dinámicas en el contorno de la malla de cómputo, generar toda la casuística posible de eventos extremos que potencialmente puedan generar inundaciones. Para ello, de todos los puntos del contorno de la malla, se seleccionarán los puntos directores para así reducir la dimensión del problema. Tras el ajuste del modelo matemático a los puntos directores, se emularán sintéticamente 1000 realizaciones de 100 años de tormentas mensuales en cada combinación de modelo-escenario-periodo.

El siguiente paso consiste en el cálculo de la CI asociada a cada evento extremo, lo que implica la transferencia a costa de las tormentas mediante un modelo bidimensional de propagación del oleaje y un modelo hidrodinámico en perfiles. El alto coste computacional de la regionalización dinámica de los eventos sintéticos se reduce mediante el empleo del método híbrido, que combina técnicas estadísticas y numéricas.

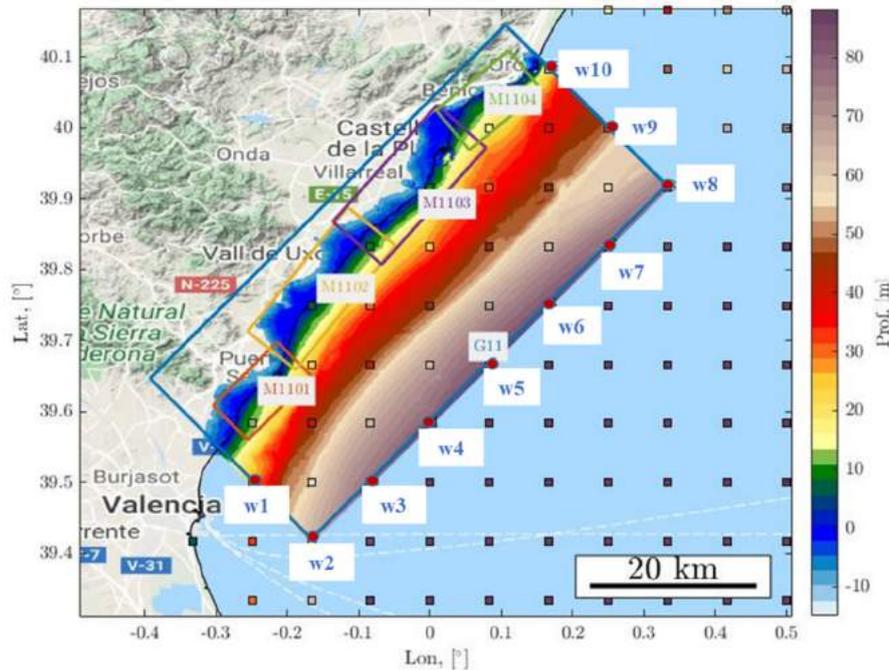


Figura 8. Topo-batimetría de la zona de estudio sobre el contorno de las mallas de cómputo (G11, M1101, M1102, M1103 y M1104). Los puntos w_i rojos son los puntos de forzamiento de oleaje, los cuadrados son los puntos de la malla global de proyecciones. El punto w_5 coincide con el forzamiento de nivel.

4.2.1. Generación sintética de eventos extremos

Aplicación del criterio de extremos y selección de puntos directores

El primer paso consiste en recopilar, en los puntos del contorno exterior de la malla general diseñada para la regionalización, la información del oleaje (H_s, T_m, T_p, Dir) en profundidades indefinidas y nivel (MM y MA). Las series temporales de oleaje y marea meteorológica proyectadas en esos puntos deben ser sometidas a un proceso de corrección del sesgo introducido por los modelos climáticos.

La aplicación del criterio de extremos definido en la ecuación (4), permite detectar los estados de mar y niveles mensuales ($H_s, T_m, T_p, Dir, MM, MA$), en los puntos del contorno de la malla general, susceptibles de generar las mayores inundaciones. Una vez seleccionados los eventos extremos mensuales en cada modelo, escenario y periodo, la visualización de la matriz de correlaciones de las distintas variables permite detectar visualmente posibles conjuntos de agregación o *clústers*.

En la Figura 9 se muestra el análisis de correlación entre los estados de mar horarios que conducen a los máximos niveles de agua totales promediados mensuales. Del examen de la figura se aprecia la alta correlación intra-variable entre los distintos puntos del dominio (diagonal de la matriz global), siempre superior a 0.8. Sin embargo, el análisis en detalle de las correlaciones intra-variable (paneles inferiores de la figura), pone de manifiesto la presencia de ciertos grupos diferenciados por una correlación más alta. Las mayores diferencias se producen entre los puntos de los contornos laterales (1-2 y 8-9-10), lo que concuerda con los cambios en la batimetría. El análisis visual de las correlaciones pone de manifiesto la presencia de *clústers* en los que las dinámicas son similares en cuanto al coeficiente de Pearson.

Una vez el estudio de correlaciones evidencia la posibilidad de agrupamiento, el siguiente paso consiste en la selección de los puntos directores mediante técnicas de clasificación o *clustering*. El algoritmo empleado ha sido el K-medias, que en oposición a otras técnicas de clasificación como la ascendente jerárquica, requiere la definición *a priori*, del número de *clústers*. La elección del número de *clústers* debe basarse en el clima marítimo de la zona y en la batimetría. Si no existen grandes diferencias en el clima ni en la batimetría, deben escogerse al menos tres *clústers*, uno por cada borde de malla.

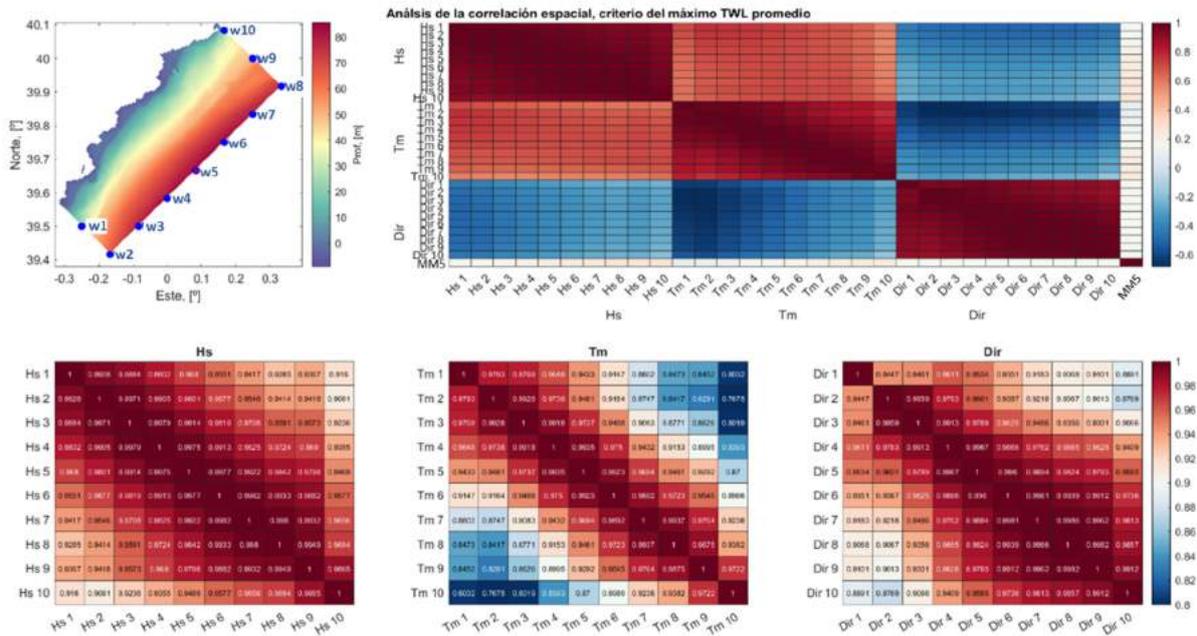


Figura 9. Análisis de correlaciones de las variables meteo-oceanográficas que maximizan el $\overline{CI}_{criterio}$ en los puntos de forzamiento del dominio, caso del modelo CNRM en el periodo histórico 1985-2005. En el panel superior derecho se muestra la matriz de correlaciones de las 31 variables en los diferentes puntos del contorno. Los paneles inferiores representan las correlaciones intra-variable Hs, Tm y Dir en los puntos de forzamiento del contorno.

A continuación, aplicamos el algoritmo de clasificación K-medias a las variables *Hs*, *Tm* y *Dir* del conjunto de puntos de forzamiento, a cada modelo, escenario y periodo, tal y como se muestra en la Figura 10. Pese a las ligeras diferencias en la clasificación en cada combinación de modelo-escenario-periodo, la clasificación converge en las tres variables. Los puntos directores o centroides de agregación de la clasificación han resultado ser los puntos 3, 6 y 9, representativos de cada borde de malla.

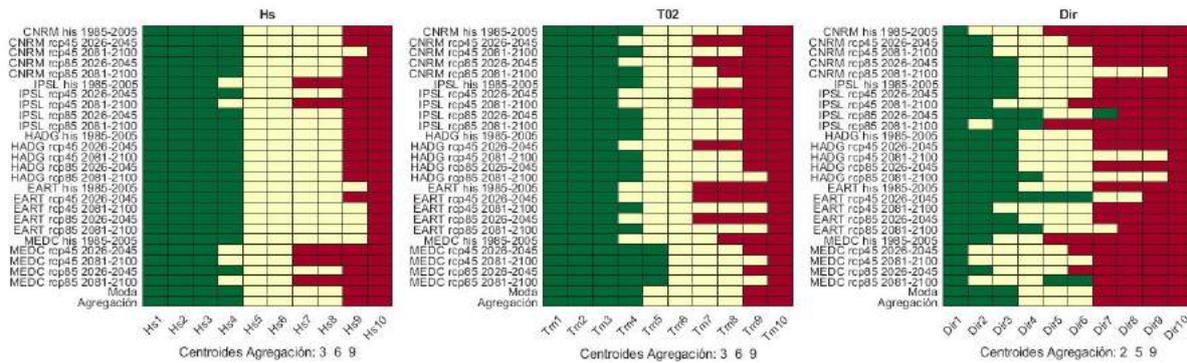


Figura 10. Clustering para la selección de los puntos de forzamiento a emular (directores) aplicado, de manera independiente, a las variables Hs, Tm y Dir en cada una de las diferentes combinaciones RCM-RCP-periodo.

Inferencia del emulador multivariado

La inferencia consiste en el cálculo de los parámetros de ajuste del emulador de tal forma que reproduzca, de la mejor manera posible, las relaciones estadísticas y de interdependencia de las proyecciones dinámicas.

El emulador multivariado consta de tres componentes cuya inferencia se realiza de manera independiente:

- El emulador de marea astronómica no requiere inferencia. Debido al carácter determinista de la variable, se ha optado generar su valor a partir de la extracción sintética de la serie de reanálisis de armónicos GOT.
- El periodo de pico se obtiene, a partir del periodo medio, mediante una regresión heterocedástica.
- El modelo estadístico requiere la inferencia de los parámetros del MME basado en cópulas gaussianas y del MMD.

Inferencia del modelo estadístico.

Para poder aplicar el modelo, se debe verificar que existe una alta correlación entre las variables direccionales. La Figura 11 muestra la matriz de correlación mensual en un mes de verano (panel izquierdo) y un mes de invierno (panel derecho). En ella se aprecia la alta correlación entre las variables circulares (Dir-3, Dir-6 y Dir-9), lo que justifica la hipótesis de la ecuación (2). En este caso, podríamos simplificar ligeramente el modelo considerando independiente la marea meteorológica, dada su baja correlación con el resto de variables. Sin embargo, el asumir una variable independiente en el modelo de partida, es equivalente a considerar un coeficiente de correlación bajo en la matriz de correlaciones con la que se infiere el MME basado en cópulas gaussianas.

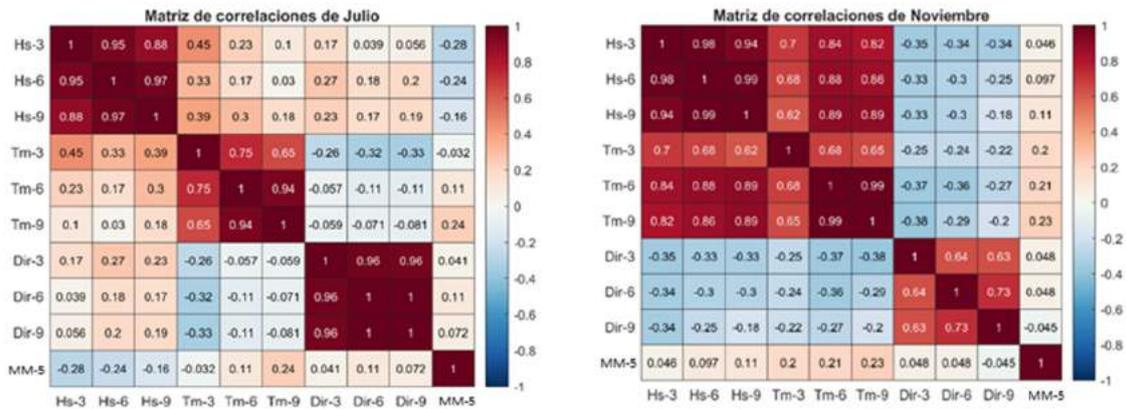


Figura 11. Matrices de correlación cruzada de los meses de julio y noviembre en los puntos directores.

El primer paso para la inferencia del modelo estadístico consiste en ajustar el MME basado en cópulas gaussianas. Para ello, tras calcular las funciones de distribución de cada variable de manera independiente, se calcula la matriz de correlaciones de las variables transformadas en el espacio de probabilidades. Seleccionados los puntos directores de oleaje (W3, W6 y W9) y de nivel (MM5 coincidente con W5), la función de distribución del mes l es:

$$\begin{aligned}
 & F_{Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_j, MM_{issl}}(Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_j, MM_{iss}) \\
 &= C(F(Hs_{iw}), F(Tm_{iw}), F(Dir_j), F(MM_{iss}); \Sigma) = \\
 &= C_{\Sigma}(\Phi^{-1}(F(Hs_{iw})), \Phi^{-1}(F(Tm_{iw})), \Phi^{-1}(F(Dir_j)), \Phi^{-1}(F(MM_{iss})))
 \end{aligned} \tag{7}$$

En la Figura 12 se muestra, en el panel superior, la matriz de correlaciones cruzadas mes a mes de las 8 variables que intervienen el modelo gaussiano ($Hs3$, $Hs6$, $Hs9$, $Tm3$, $Tm6$, $Tm9$, $Dir6$, $MM5$), transformadas al espacio de probabilidades por medio de su función de distribución marginal $F(-)$. Se generan, por tanto, 28 combinaciones de correlaciones cruzadas entre variables distintas por cada mes. Se aprecian mayores correlaciones intra-variable, es decir, entre las mismas variables y distintos puntos de forzamiento. Asimismo, en los meses de verano, las alturas de ola y periodos presentan una menor correlación.

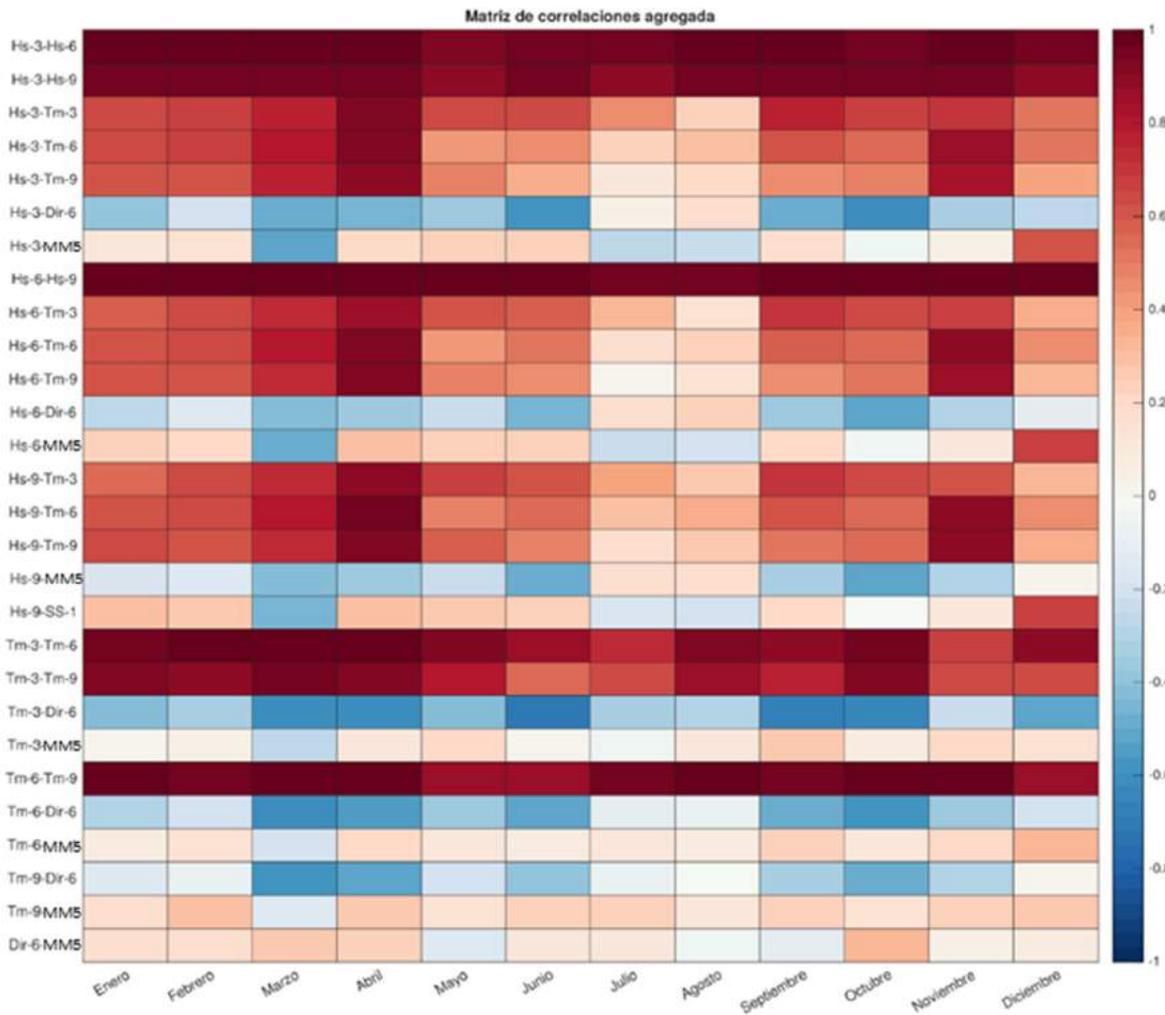


Figura 12. Matriz de correlaciones mes a mes del modelo multivariado gaussiano. Se representan las correlaciones cruzadas de todas las posibles combinaciones de variables modeladas mediante cópulas gaussianas.

A continuación, se infieren los parámetros del modelo multivariado de direcciones. El modelo se basa en la distribución multivariada de von Mises. Esta distribución es monomodal, con lo que es imposible representar un clima marítimo con dos o más direcciones medias predominantes. Para solucionar este inconveniente, se recurre a una distribución de mezcla de varias von Mises multivariadas (ver ecuación 9).

$$f_{\theta}(\theta) = \sum_{i=1}^k p_i T_{\theta_i}(\theta) \quad (8)$$

Dónde:

- $\theta = [\text{Dir}_1, \text{Dir}_2, \dots, \text{Dir}_n]$
- k es el número de componentes direccionales de mezcla
- p_i es la probabilidad de ocurrencia de cada componente direccional
- $T_{\theta_i}(\theta)$ es la distribución de von Mises multivariada monomodal

La estrategia empleada para la inferencia del modelo consiste en clasificar las direcciones en tantos *clústers* como componentes de mezcla y ajustar a cada uno de los *clústers* la distribución de von Mises multivariada.

El número de componentes de mezcla, o número de distribuciones de von Mises que se combinan, se establece en función de las direcciones predominantes en el clima marítimo, (Figura 13).

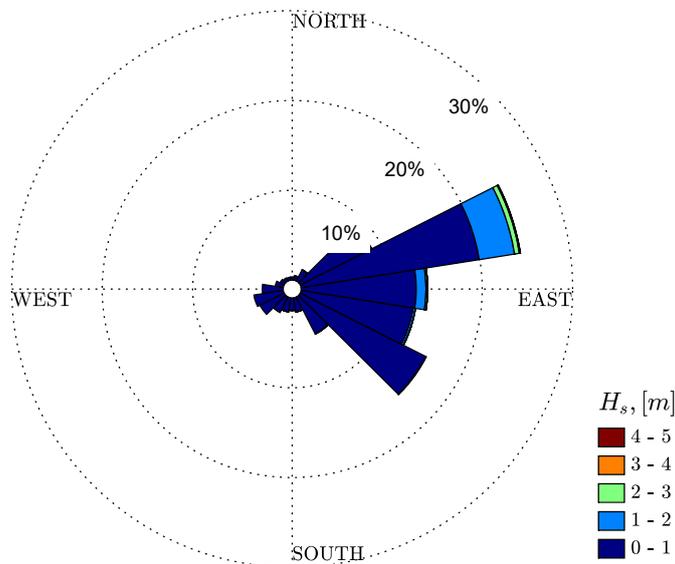


Figura 13. Rosa de oleaje, modelo CNRM en el periodo histórico.

Una vez se han fijado el número de componentes, se realiza una clasificación empleando el algoritmo K-medias y la métrica para variables circulares definida en la ecuación (17). En la Figura 14 se muestra la clasificación en tres componentes o *clústers* en el espacio $[-\pi, \pi)^3$ de las direcciones de los eventos extremos del modelo CNRM en el periodo histórico.

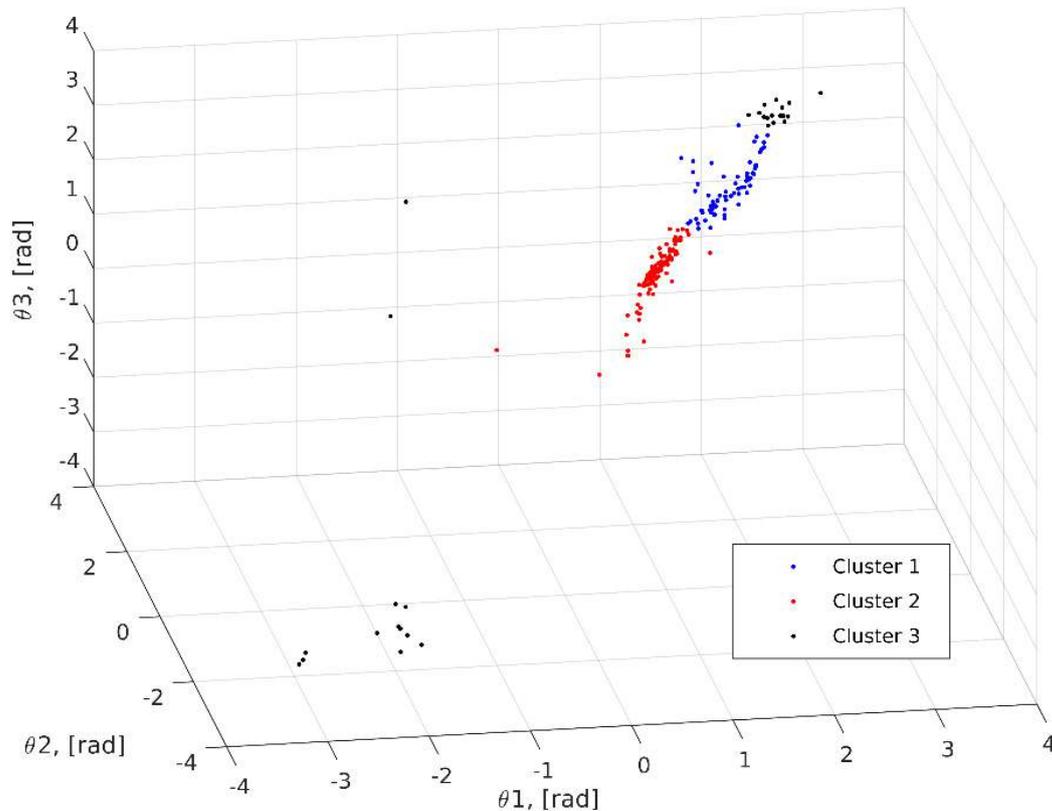


Figura 14. Clasificación en componentes direccionales.

Tras la clasificación, la probabilidad de ocurrencia de cada componente direccional se calcula a partir del recuento del número de elementos en cada clúster de acuerdo con la ecuación (9)

$$p_i = \frac{N_i}{N_t} \tag{9}$$

Dónde:

N_i es el número de elementos clasificados en el clúster i ; y N_t es el número de elementos totales (20 años x 12 meses)

A continuación, la distribución de von Mises multivariada se ajusta en cada clúster de forma independiente según el procedimiento detallado en el Anexo I. La Figura 15 representa la función de densidad del modelo de direcciones ajustado. En los paneles de la diagonal superior derecha se muestran las observaciones discretas sobre la función de densidad ajustada. La diagonal muestra las marginales de la función de densidad, apreciándose claramente la contribución de las tres componentes de mezcla. En la diagonal inferior, se representan espacialmente las funciones de densidad bivariadas y sus marginales.

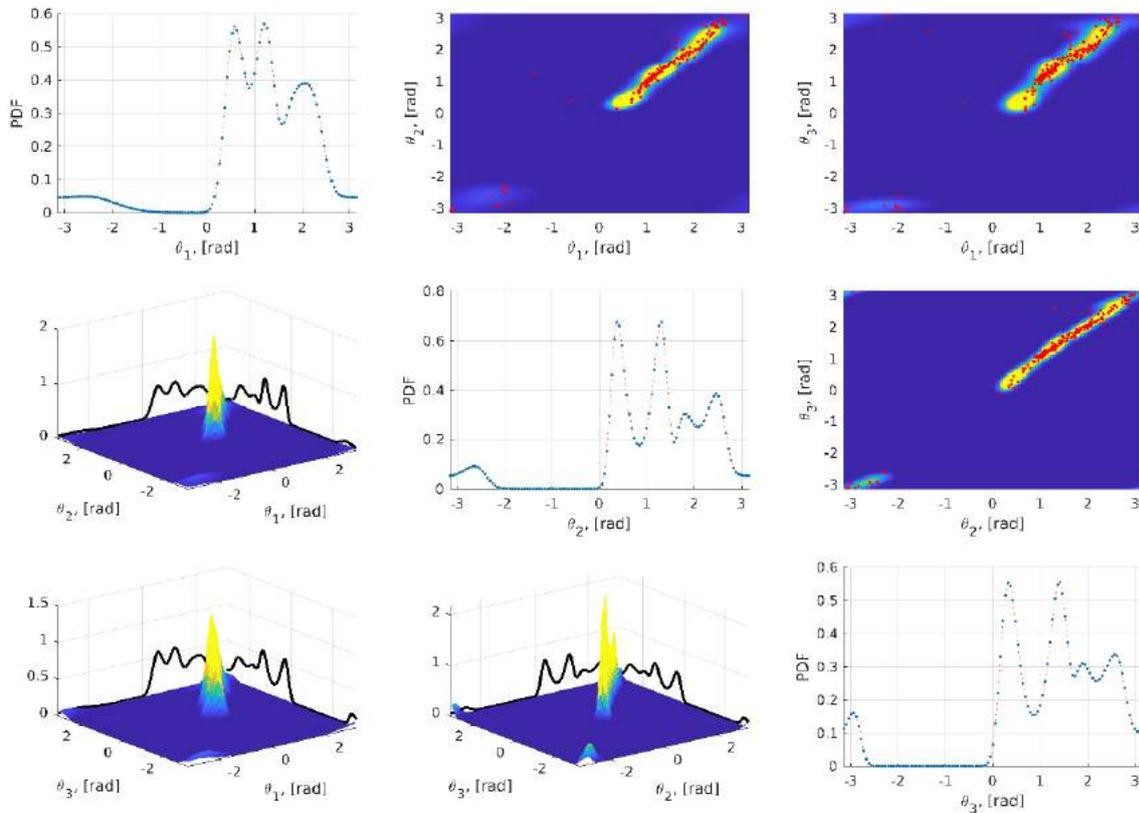


Figura 15. Representación bivariada y marginales de la función de densidad modelo multivariado de direcciones. Los puntos rojos representan las observaciones.

4.2.2. Generación sintética

La generación sintética de eventos extremos mensuales se realiza en varios pasos. En la primera fase se extrae un vector aleatorio de la distribución normal multivariada $N_m(0, \Sigma_m)$, donde Σ_m es la matriz de correlaciones del mes m . Entrando de forma inversa en las marginales de cada variable con el vector aleatorio normal se extrae una realización aleatoria k del vector $[H_{S3}, H_{S6}, H_{S9}, T_{m3}, T_{m6}, T_{m9}, Dir_6, MM_5]_k$.

A continuación, el vínculo condicional con el modelo multivariado de direcciones se realiza mediante la variable Dir_6 . Las direcciones Dir_3 y Dir_9 se obtienen a partir del modelo multivariado de direcciones extrayendo aleatoriamente una realización de la función de densidad condicional $f_{Dir_3, Dir_9 | Dir_6}(Dir_3, Dir_9 | Dir_6)$. La función de densidad condicionada a Dir_6 se obtiene a partir de la función de densidad trivariada $f_{Dir_3, Dir_9, Dir_6}(Dir_3, Dir_9, Dir_6)$ según (10). El procedimiento es idéntico al muestreo de Gibbs, perteneciente a la familiar de métodos basados en cadenas de Markov y Montecarlo (MCMC).

(10)

El último paso en la emulación consiste en obtener el periodo de pico a partir del modelo heterocedástico calibrado mediante las observaciones del periodo medio y periodo de pico. La marea astronómica no se modela estadísticamente debido a su carácter determinista. Para obtenerla, se extrae un valor aleatorio del mes y año de la base de datos GOT, reconstruida a partir de armónicos.

Siguiendo este proceso, se han emulado sintéticamente 1000 simulaciones de 100 años de tormentas mensuales para cada uno de los RCMs (CNRM, EART, HADG, IPSL y MEDC), escenarios futuros de emisiones (RCP4.5 y RCP8.5) y periodos (1985-2005, 2025-2045 y 2081-2100), dando lugar a 25 combinaciones de modelo-escenario-periodo. Las tormentas mensuales, 1,2M de realizaciones por cada combinación de modelo-escenario-periodo, están parametrizadas por el vector de 14 componentes $\left[H_{s3}, H_{s6}, H_{s9}, T_{m3}, T_{m6}, T_{m9}, T_{p3}, T_{p6}, T_{p9}, Dir_3, Dir_6, Dir_9, MM_5, MA_5 \right]_k$.

En las figuras 15, 16 y 17 se muestran tres representaciones bivariadas de las 91 posibles. En la Figura 16 se aprecia la alta correlación entre periodos en diferentes puntos del contorno de la malla. La bondad del ajuste del MME basado en cópulas gaussianas se valida cuantitativamente gracias a la comparación entre las funciones de densidad empíricas de la emulación y de las observaciones que se muestran en el panel derecho. Del mismo modo, el modelo direccional se comporta adecuadamente, tal y como se aprecia en la Figura 17, dónde se representan los gráficos de dispersión y funciones de densidad empíricas de direcciones en los puntos 3 y 9 modeladas mediante el MMD. La validación entre el acoplamiento entre modelos se pone de manifiesto en la Figura 18, en la que se representan alturas de ola (modeladas mediante el MME basado en cópulas gaussianas) y direcciones (modeladas mediante el MMD) en el punto 3. El encaje de las funciones de densidad empíricas simuladas y observadas demuestra la adecuación del acoplamiento condicional entre la cópula gaussiana y el modelo direccional. El modelo estadístico es, por tanto, capaz de captar la física de la generación del oleaje, respetando las relaciones de interdependencia entre las diferentes variables.

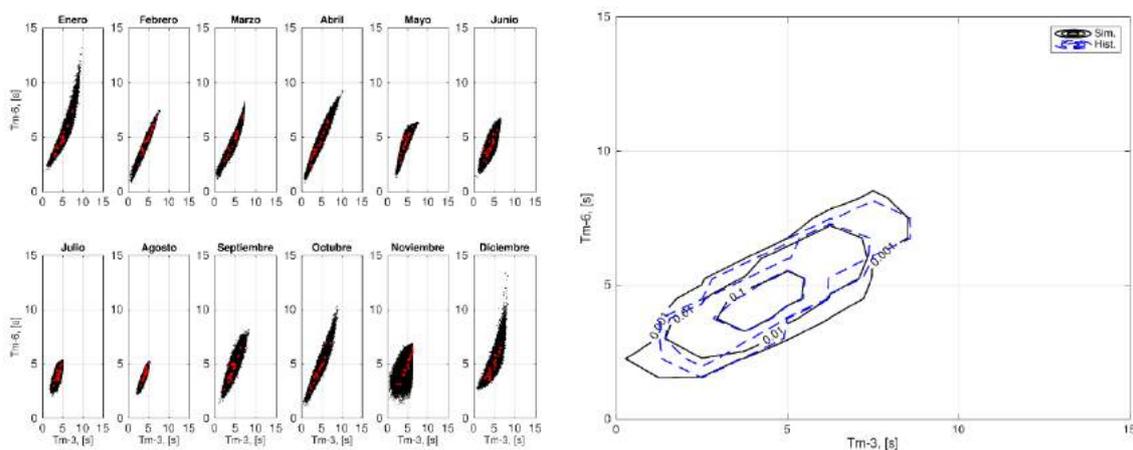


Figura 16. Representación “intra-variable” de la emulación sintética del modelo CNRM en el periodo histórico. En el panel izquierdo se muestran los gráficos de dispersión mensuales de la emulación (puntos negros) y las observaciones (puntos rojos) representados en el espacio los periodos medios 3 y 6. En el panel a la derecha se muestra las funciones de densidad empíricas anuales de la emulación (trazo negro continuo) y de las observaciones (trazo azul discontinuo).

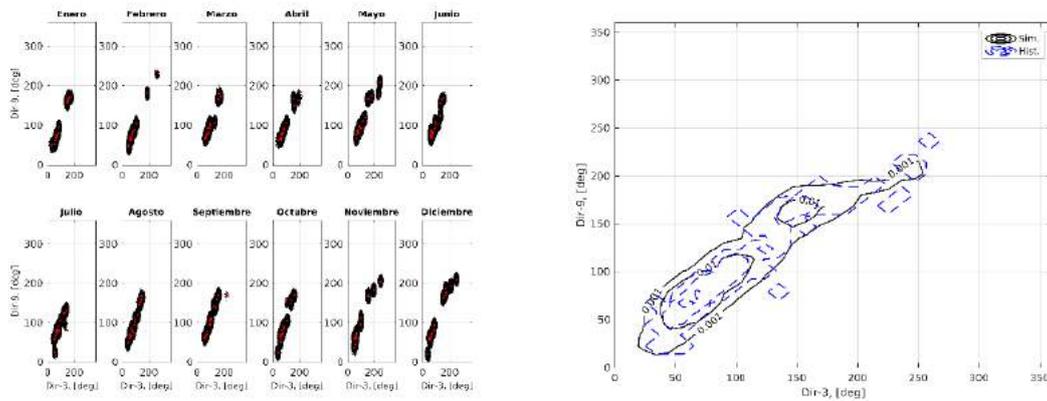


Figura 17. Representación "intra-variable" de la emulación sintética del modelo CNRM en el periodo histórico. En los paneles izquierdos se muestran los gráficos de dispersión mensuales de la emulación (puntos negros) y las observaciones (puntos rojos) representados en el espacio de las direcciones de los puntos 3 y 9. En los paneles a la derecha se muestra las funciones de densidad empíricas anuales de la emulación (trazo negro continuo) y de las observaciones (trazo azul discontinuo).

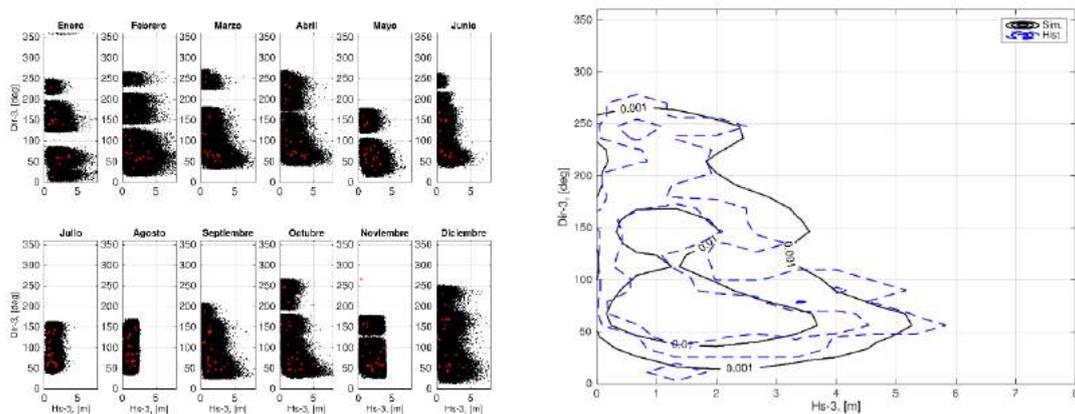


Figura 18. Representación de los gráficos de dispersión y funciones de densidad "intra-punto" altura de ola-dirección en el punto 3. En los paneles izquierdos se muestra los gráficos de dispersión mensuales de la emulación (puntos negros) y las observaciones (puntos rojos). En los paneles a la derecha se representa las funciones de densidad empíricas anuales de la emulación (trazo negro continuo) y de las observaciones (trazo azul discontinuo).

4.2.3. Regionalización de las dinámicas y cálculo de la cota de inundación

Para la regionalización de los eventos extremos y el cálculo de la CI en costa asociada, se ha generado una topo-batimetría de detalle (Figura 19) combinando tres bases de datos: el modelo digital de terreno (MDT) del IGN, las eco-cartografías de Castellón y Valencia del MITERD y la batimetría de la red de datos y observaciones marinas europeas (por sus siglas en inglés, EMODnet).

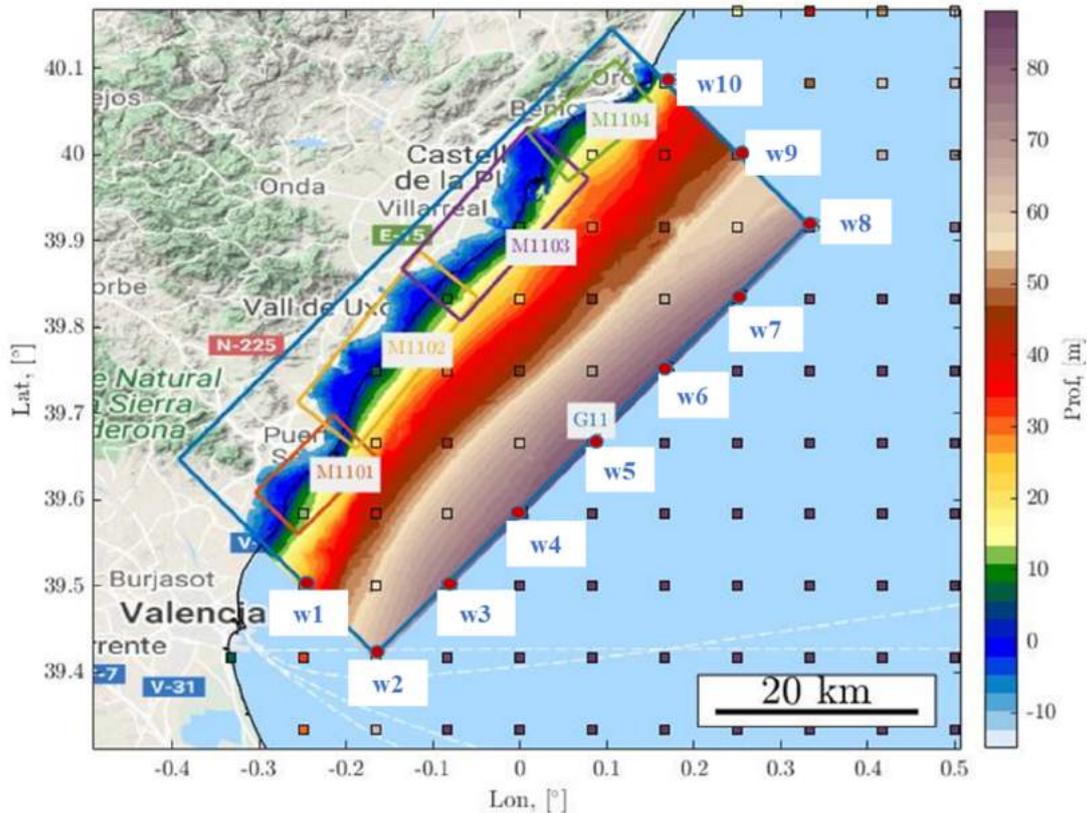


Figura 19. Topo-batimetría de la zona de estudio sobre el contorno de las mallas de cómputo (G11, M1101, M1102, M1103 y M1104). Los puntos w_i rojos son los puntos de forzamiento de oleaje, los cuadrados son los puntos de la malla global de proyecciones WWII. El punto w_5 coincide con el forzamiento de nivel MM5.

Con estos datos se ha llevado a cabo la transferencia a costa del oleaje aplicando el método híbrido descrito en el apartado 4.1. Para realizar la propagación mediante el modelo SWAN, se ha generado una malla general anidada unidireccionalmente a cuatro mallas de detalle de 500 y 50 m de resolución, respectivamente. Asimismo, se han empleado los perfiles generados para el modelado de la erosión, espaciados aproximadamente 200 m, en los que se ejecuta el modelo XBeach forzado con los resultados de la propagación SWAN precedente. Los perfiles, normales a la costa, se extienden 500 m hacia tierra y hasta la batimétrica -10m (Figura 20).

Para generar los perfiles, el primer paso es la definición de la línea de costa de referencia, que puede ser, por ejemplo, la línea de costa presente. El perfil de base i se define por la normal a la línea de costa de referencia, \vec{n}_i , un espaciamiento con el perfil siguiente e_i , la distancia a tierra dT_i (1000 m) y la distancia hacia el mar dM_i (hasta la batimétrica de 10 m). Los perfiles se han generado automáticamente, a partir de la directriz, el espaciamiento y las distancias a tierra y hacia el mar. Posteriormente, se deben editar, adaptando el espaciamiento a la presencia de elementos o estructuras que afecten a la dinámica costera.



Figura 20. Discretización en perfiles de la zona de estudio.

En lo que se refiere a la parte estadística, para reducir la dimensión de las variables de partida, se han escogido las componentes principales tales que explican el 99% de la varianza total. Los casos representativos seleccionados con el algoritmo de máxima disimilitud para propagar numéricamente ascienden a 500.

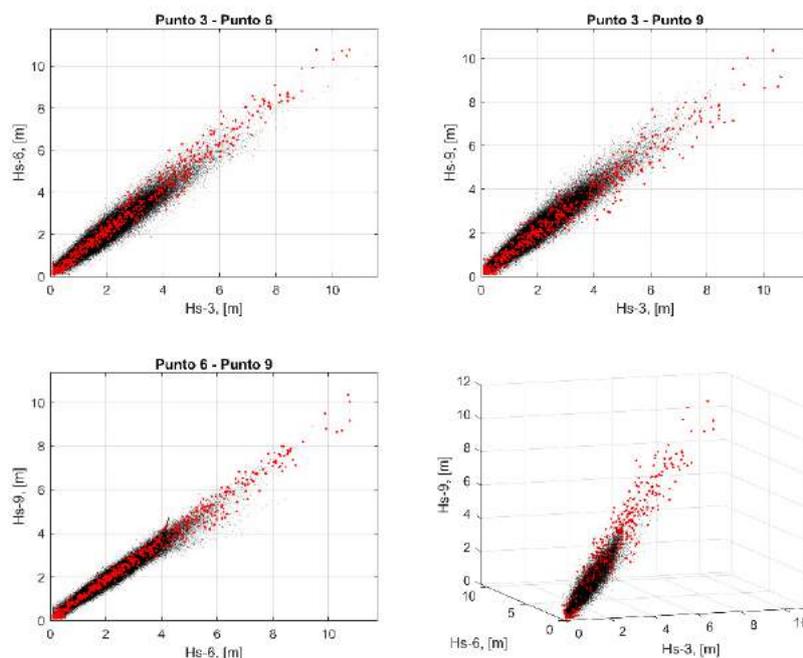


Figura 21. Casos seleccionados (puntos rojos) del total (puntos negros) de estados de mar horarios del modelo CNRM en el escenario histórico, proyectados en el espacio de las alturas de ola de los tres puntos directores.

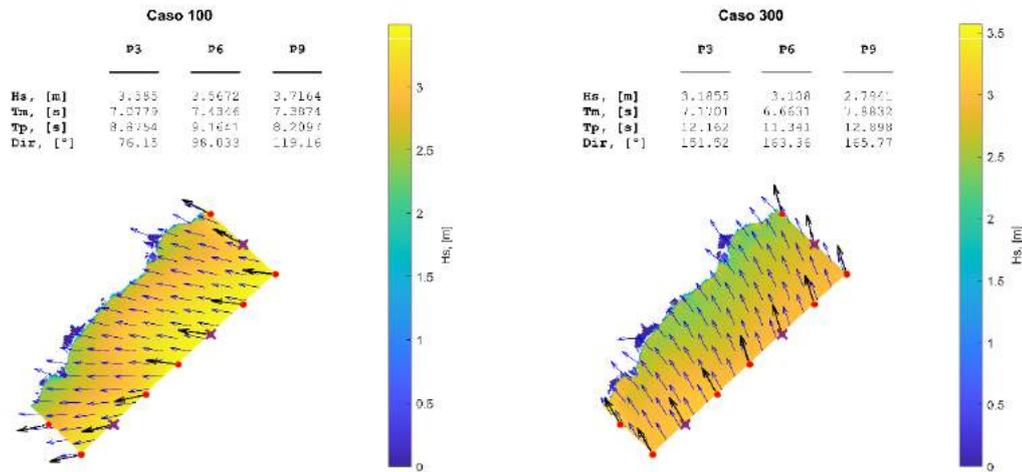


Figura 22. Dos de las 500 propagaciones SWAN realizadas. El mapa de color representa la altura de ola, las flechas azules la dirección simulada y las negras la dirección de forzamiento en el contorno. Los puntos rojos son los puntos de forzamiento del modelo y los marcados con una cruz son los puntos directores.

La selección de 500 eventos extremos, se han transferido a la batimétrica de 10 metros empleando el modelo bidimensional SWAN. A continuación, se extraen las dinámicas propagadas en el extremo offshore de los perfiles y se emplean para forzar el modelo hidrodinámico XBeach en los transectos generados.

El resultado obtenido del modelado numérico es el *set-up*, calculado a partir de la serie temporal de remotes resultado de XBeach aplicando la ecuación (6). En la Figura 23 se muestra los resultados de la simulación en un perfil. El panel superior representa la envolvente del grupo de ondas en color azul oscuro sobre la onda larga asociada, que se propaga sobre el nivel del mar en reposo (color azul cian). En el panel inferior se muestra la serie de remotes infragravitatorios, $\eta_{XB}(t)$. Asimismo, se muestran los parámetros de la simulación:

- H_s0 corresponde con la altura de ola en indefinidas, en el punto de forzamiento más cercano de la malla general de SWAN.
- H_s10 es la altura de ola en la batimétrica -10m, obtenida de la malla de detalle SWAN, con la que se fuerza XBeach en el perfil.
- T_p es el periodo de pico.
- SWL es el nivel del mar en ausencia del oleaje ($ANMM+MA+MM$).
- β_f es la pendiente del frente de playa (*foreshore*, del inglés). Es la pendiente que se emplea en las formulaciones empíricas para el cálculo de remotes.

El conocimiento de estos parámetros permite comparar los resultados del *set-up* calculado a partir de la simulación XBeach con las fórmulas empíricas. Los resultados muestran que el *set-up* modelado, está acotado por las formulaciones de (Stockdon et al., 2006) y (Guza & Thornton, 1981), lo que permite verificar el orden de magnitud del *set-up* obtenido mediante modelado numérico.

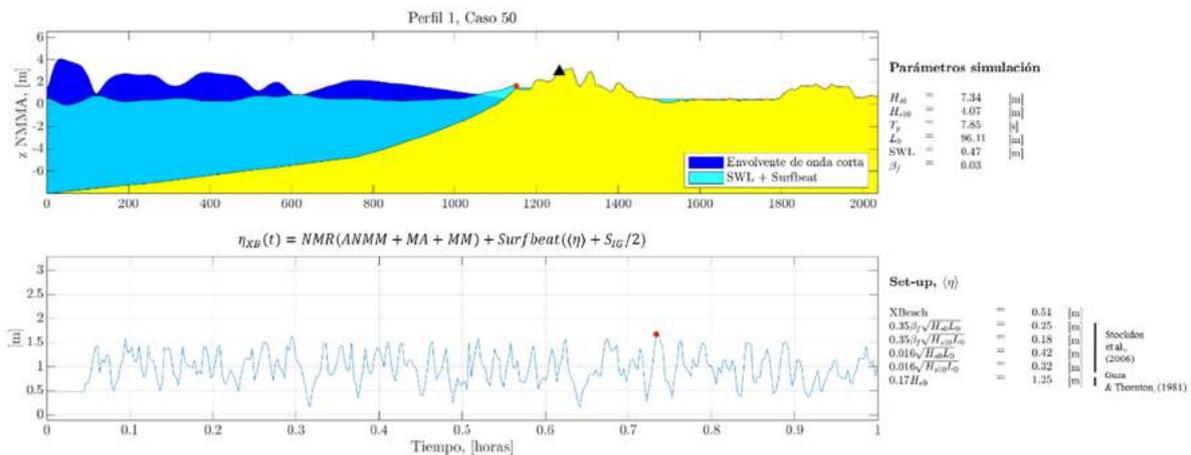


Figura 23. Simulación XBeach de uno de los temporales sintéticos seleccionados en el perfil 1. En el panel superior se muestra el momento en el que se produce el máximo remonte. En el panel inferior se representa la serie de remonte infragravitatorios o surfbeat.

Tras la reconstrucción del set-up en cada una de las 1000 simulaciones de 100 años de cada RCM, escenario, horizonte temporal y percentil de ANMM, CI se calcula sumando las diferentes componentes según la ecuación [1].

El modelo hidráulico de inundación se ha forzado con CI de 100 y 500 años de periodo de retorno. Para ello, se ha ajustado una función de extremos a las series de CI asociadas a cada perfil, RCM, escenario, periodo de tiempo y percentil de ANMM. El enfoque probabilista que se ha empleado en esta metodología permite calcular periodos de retorno significativos y su incertidumbre asociada. La Figura 23 muestra el ajuste de extremos obtenido en el perfil 10 para un RCM en el periodo histórico. Se observa que la CI asociada a un determinado periodo de retorno no tiene un único valor, sino que está caracterizada por los percentiles 2.5, 50 y 97.5 de la distribución, el valor medio y la desviación típica.

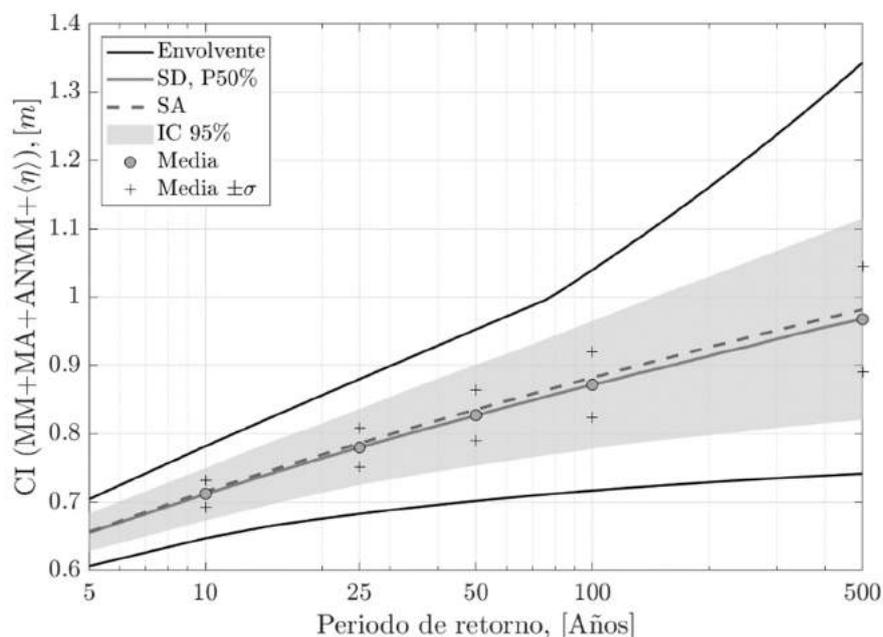


Figura 24. Régimen extremal agregado (SA) y desagregado (SD) de la CI calculado en el perfil 10 para las 1000 series sintéticas de 100 años del modelo CNRM en el periodo histórico. La línea discontinua gris corresponde al ajuste conjunto de las 1000 series. La línea continua gris representa el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series, la banda gris representa el intervalo de confianza (IC) del 95% y las líneas negras la envolvente (valores máximos y mínimos). Los puntos grises representan el valor medio de las 1000 CIs de 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno y los símbolos suma representan la desviación típica.

A partir de los valores de la CI asociada a los periodos de retorno de cálculo, se reconstruye un hidrograma sintético triangular, representativo de las tormentas de la zona, con el que se fuerza el modelo hidráulico bidimensional.

En la Figura 25 se muestra el ajuste extremal (percentil 50 de las 1000 simulaciones sintéticas) de todas las combinaciones de modelo (HADG, CNRM, EART, IPSL, MEDC), escenario (RCP4.5 y RCP8.5), periodo (2050 y 2100) y trayectoria de ANMM (percentiles del 5, 50 y 95%) en cuatro perfiles repartidos en la zona de estudio. Se aprecia que las diferencias en el año 2050 entre los RCPs4.5 y 8.5 son mínimas, y contribución a la incertidumbre introducida por el modelo climático es superior a la incertidumbre asociada al ANMM. Por otro lado, en el año 2100 el peso del ANMM es más importante que la dispersión introducida por el modelo climático, lo que hace que en la figura se aprecien paquetes de colores (igual percentil de ANMM) claramente diferenciados. En general, los modelos EART y HADG predicen cotas de inundación superiores a los modelos CNRM e IPSL en todos los perfiles.

Para facilitar la interpretación de los resultados, las Figuras 25 y 26 resaltan, de manera independiente, la variabilidad entre RCMs y trayectorias de ANMM de las CIs extremas en el perfil 200 de la playa de Llosa. La 25 muestra el ajuste extremal en el año 2050 para el RCP4.5, mientras que la 26 corresponde con el año 2100 para el RCP8.5. De la comparación de resultados entre ambas figuras se evidencia que no sólo las CIs son mayores al progresar en el tiempo y ante escenarios de emisiones más severos, sino que la contribución relativa del ANMM a la incertidumbre en la estimación, también aumenta significativamente.

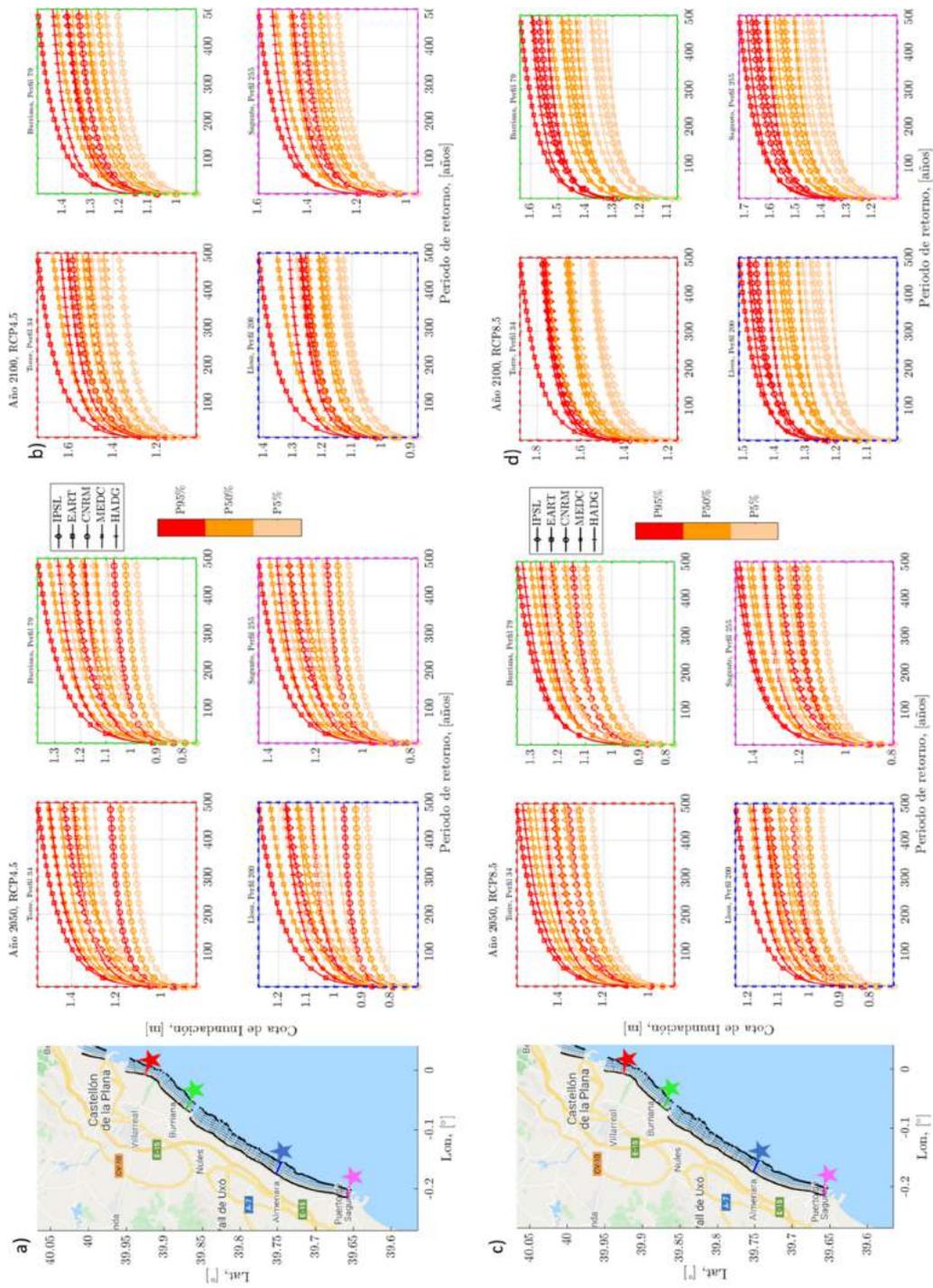


Figura 25. Ajuste extremo de CI en cuatro perfiles representativos, en los años horizonte 2050 (paneles a y c) y 2100 (paneles b y d) y para los escenarios RCP4.5 (paneles a y b) y RCP8.5 (paneles c y d). Se muestra el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series de CI. Los resultados de cada RCM se muestran con diferentes símbolos mientras que los colores diferencian entre trayectorias de ANMM.

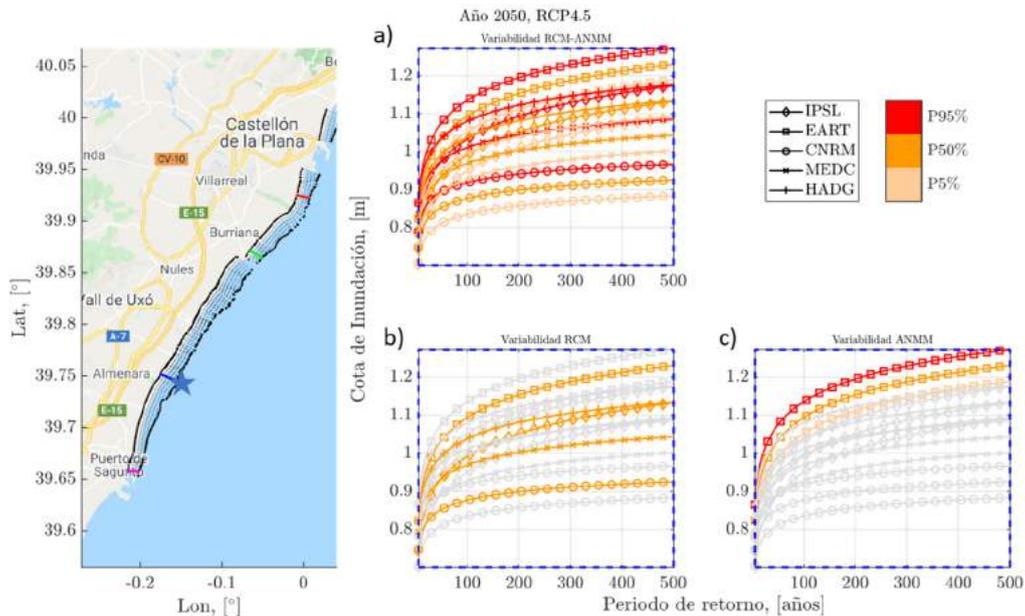


Figura 26. Ajuste extremal de la CI en el perfil 200 de la playa de Llosa en el año 2050 para el escenario RCP4.5. Se muestra el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series de CI. Los resultados de cada RCM se muestran con diferentes símbolos mientras que los colores diferencian entre trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART.

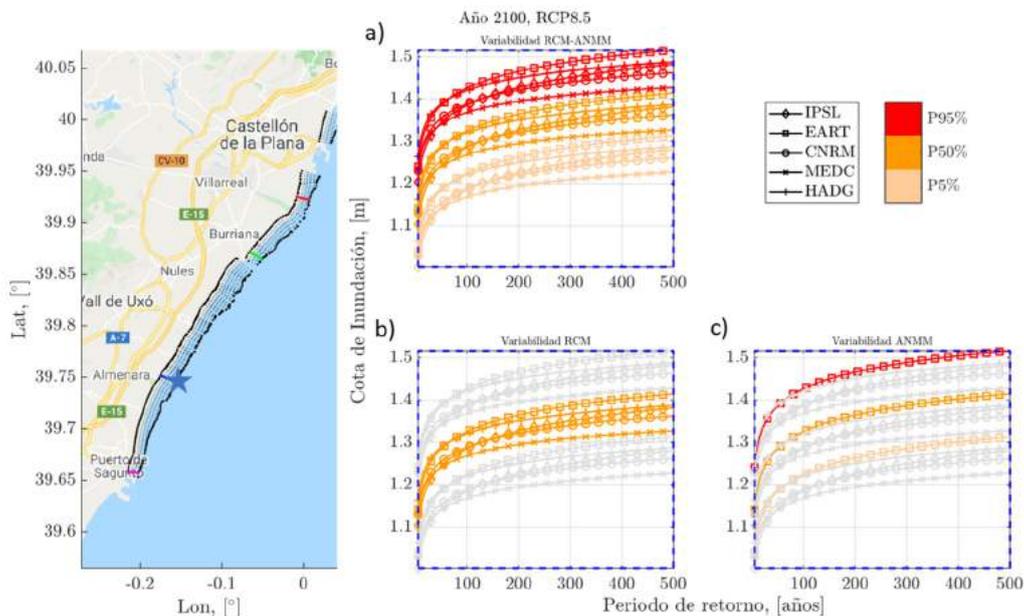


Figura 27. Ajuste extremal de la CI en el perfil 200 de la playa de Llosa en el año 2100 para el escenario RCP8.5. Se muestra el valor del percentil 50 de los ajustes individuales de las 1000 series de CI. Los resultados de cada RCM se muestran con diferentes símbolos mientras que los colores diferencian entre trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART.

En la Figura 28 se muestra, para cada modelo, la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno correspondiente a los escenarios-periodos 2050-RCP8.5, 2100-RCP4.5 y 2100-RCP8.5, distinguiendo entre los percentiles del 5, 50 y 95% de ANMM. En las subfiguras, los percentiles del 5, 50 y 95% se corresponden con las filas primera, segunda y tercera más próximas a tierra. Se aprecia que los modelos EART y HADG pronostican cotas de inundación futuras superiores al resto de modelos, en el entorno de 2 metros para el periodo de retorno de 500 años en el peor escenario. La representación espacial de la CI permite identificar que el tramo al sur del puerto de Castellón, en la zona de la playa de Torre y la desembocadura del río Mijares, las cotas de inundación son superiores, pues la costa está más expuesta a los temporales entrantes del nordeste. Del mismo modo, la zona norte del puerto de Canet sufre una reorientación que hace que las playas de Almenara y Canet se vean más expuestas a la acción del oleaje. Pese a ello, la tendencia acumulativa de la costa por el bloqueo de sedimentos ejercido por el puerto aminora la exposición potencial, reduciendo el riesgo de inundación.

A modo de comparación con los escenarios futuros, en la Figura 29 se muestra la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno el presente. En las Figuras 29 y 30 se muestra el detalle de la CI de 100 años de periodo de retorno de cada RCM para el escenario RCP8.5 en los horizontes temporales 2050 y 2100 respectivamente. Del análisis de la variación espacial de la CI, se aprecian mayores valores en tramos de costa orientados al Oriente, véase la playa de Torre y la zona norte del puerto de Sagunto. Los modelos EART y HADG predicen mayores valores en la CI que el resto y el efecto del ANMM aumenta significativamente las CIs extremas a fin de siglo con respecto al año 2050 en toda la costa.

La Figura 32 muestra los cambios en el periodo de retorno futuro, de la CI presente de 100 y 500 años de periodo de retorno. Los cambios en el periodo de retorno se muestran, para cada modelo, en los escenarios-periodos 2050-RCP8.5 y 2100-RCP8.5 distinguiendo las trayectorias de los percentiles del 5, 50 y 95% de ANMM. En el caso 2050-RCP8.5 se aprecia claramente que los modelos que pronostican una menor CI son el IPSL y el CNRM (ver Figura 33). Pese a ello, la CI de 100 años de periodo actual será, al menos, el doble de frecuente en el año 2050. En lo que se refiere al 2100, el alto peso del ANMM en la inundación frente al resto de componentes, hace que la CI asociada a 100 años de periodo de retorno presente, vaya asociada a un periodo de retorno futuro prácticamente anual (ver Figura 34). Esto es debido a que el nivel de excedencia de 100 años de periodo de retorno presente es del orden del ANMM en el año 2100.

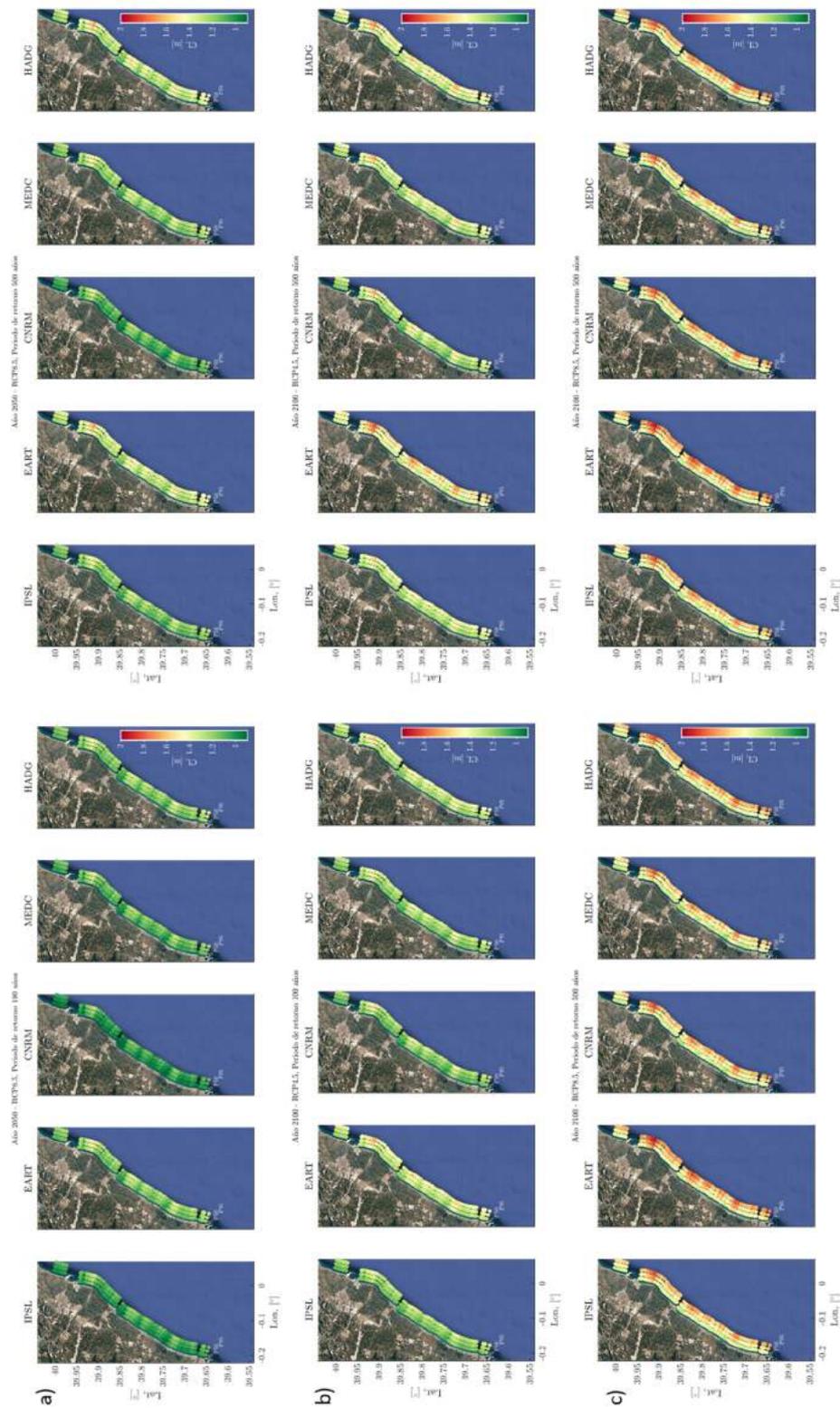


Figura 28. CI de 100 y 500 años de periodo de retorno. El panel a) corresponde al año 2050 en el escenario RCP8.5, el panel b) muestra el año 2100 en el escenario RCP4.5 y el panel c) hace referencia al año 2100 en el escenario RCP8.5. En las figuras, la línea de puntos más próxima a tierra se corresponde con el P5% de ANMM, la intermedia con el P50% de ANMM y la más lejana con el P95% de ANMM.

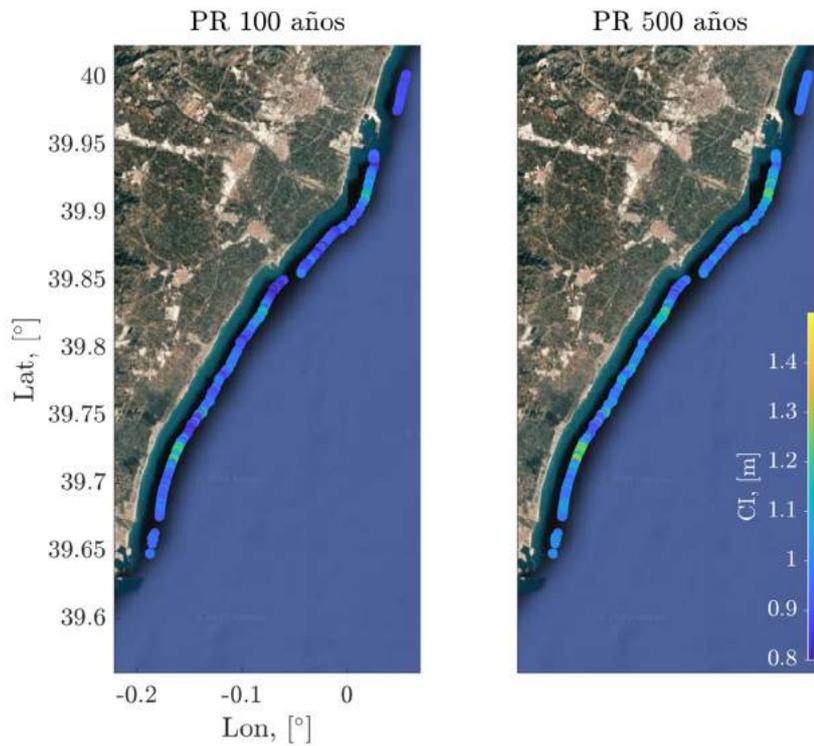


Figura 29. CI de 100 y 500 años de periodo de retorno en 2005, considerado como el presente.

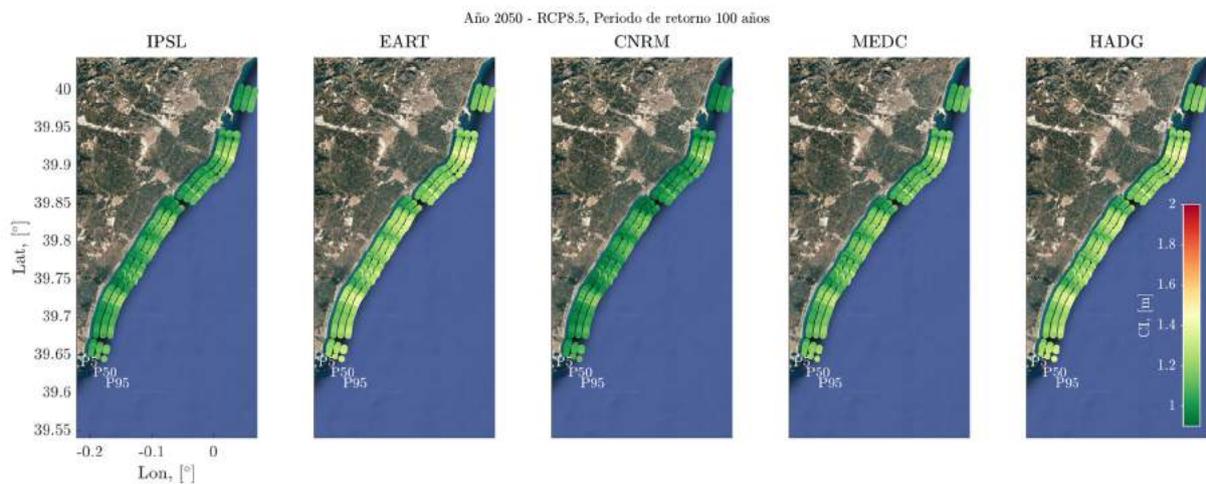


Figura 30. CI de 100 años de periodo de retorno para los diferentes RCMs y el escenario RCP8.5 en el año 2050. En la figura, la línea de puntos más próxima a tierra se corresponde con el P50 de ANMM, la intermedia con el P50% de ANMM y la más lejana con el P95 de ANMM.

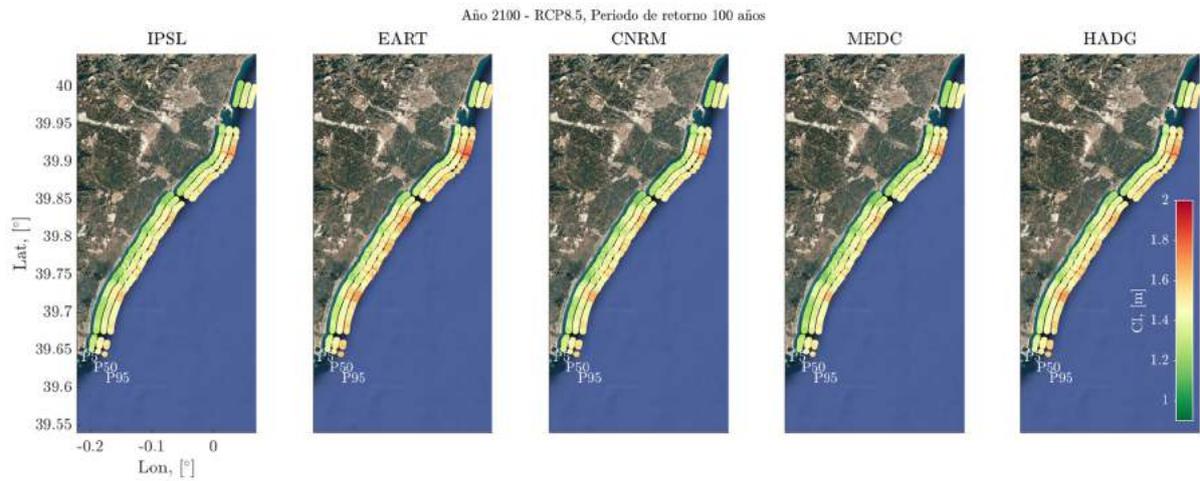


Figura 31. Cota de inundación de 100 años de periodo de retorno para los diferentes RCMs y el escenario RCP8.5 en el año 2100. En la figura, la línea de puntos más próxima a tierra se corresponde con el P5% de ANMM, la intermedia con el P50% de ANMM y la más lejana con el P95% de ANMM.

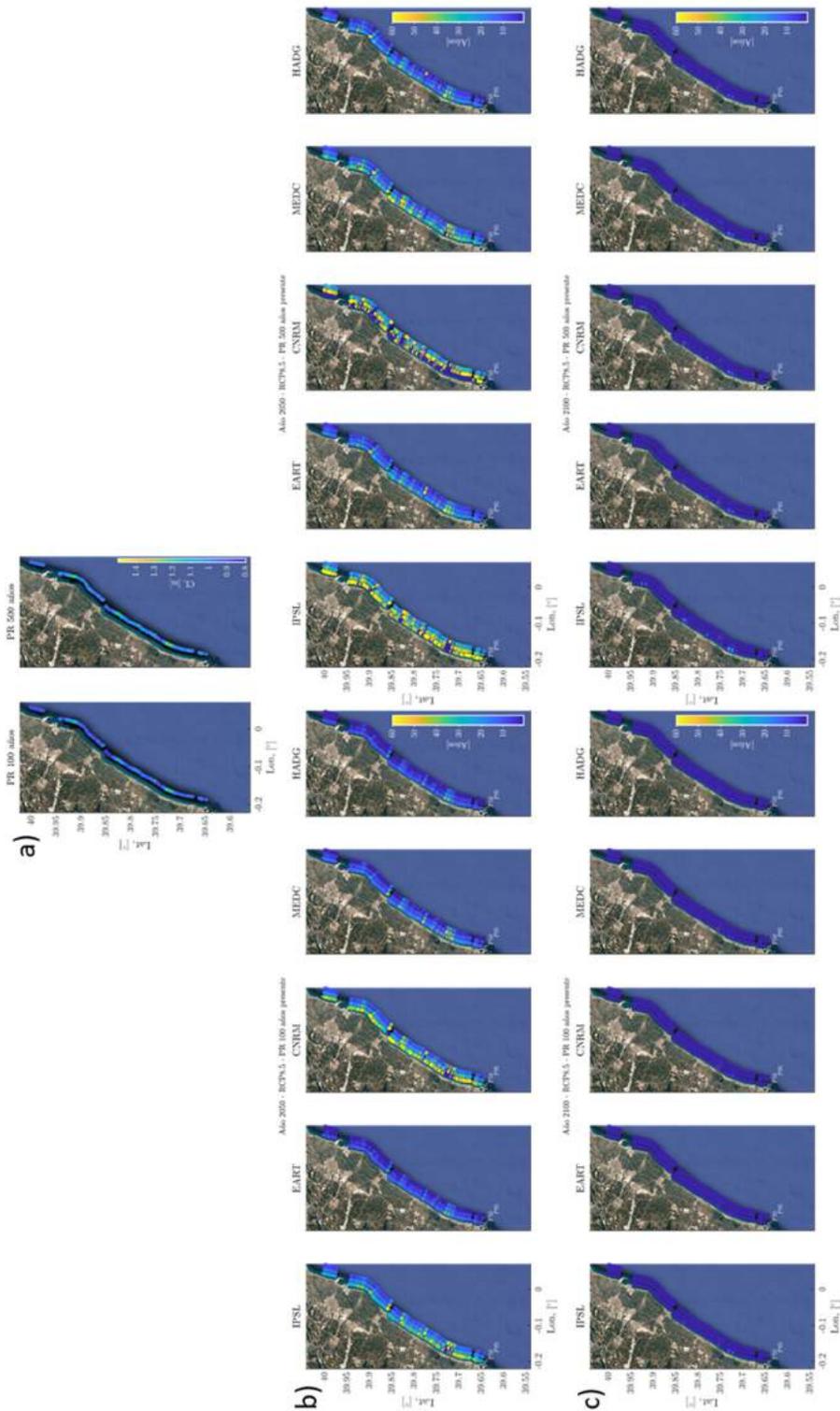


Figura 32. En el panel a) se muestra la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno en 2005. El panel b) representa, para los distintos modelos y el escenario RCP8.5 en el año 2050, los periodos de retorno asociados a la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno presente. El panel c) representa, para los distintos modelos para el escenario RCP8.5 en el año 2100, los periodos de retorno asociados a la CI de 100 y 500 años de periodo de retorno en el presente.

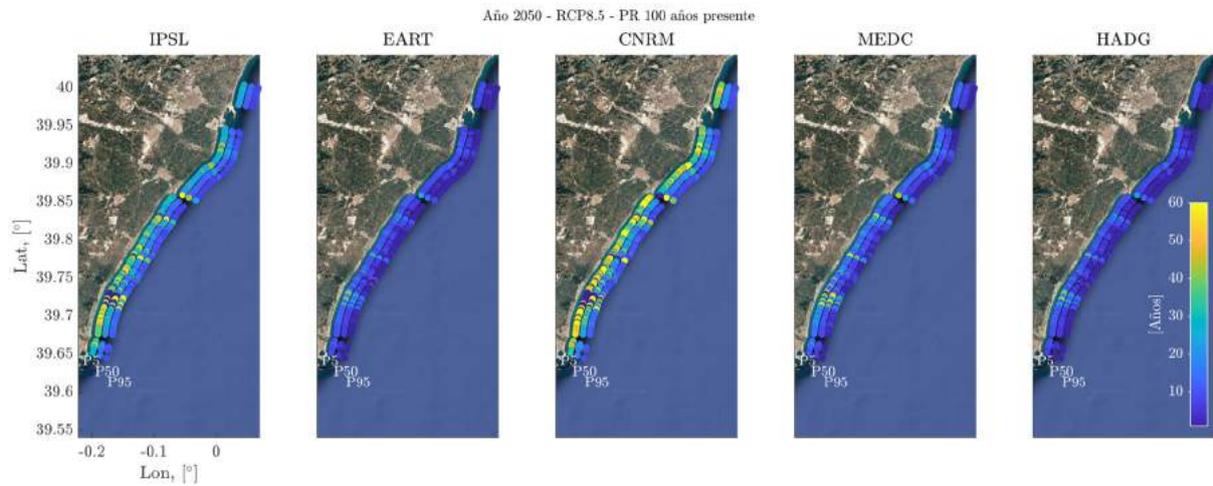


Figura 33. Periodos de retorno futuros de la magnitud de la CI de 100 años de periodo de retorno presente para el escenario RCP8.5 en el 2050.

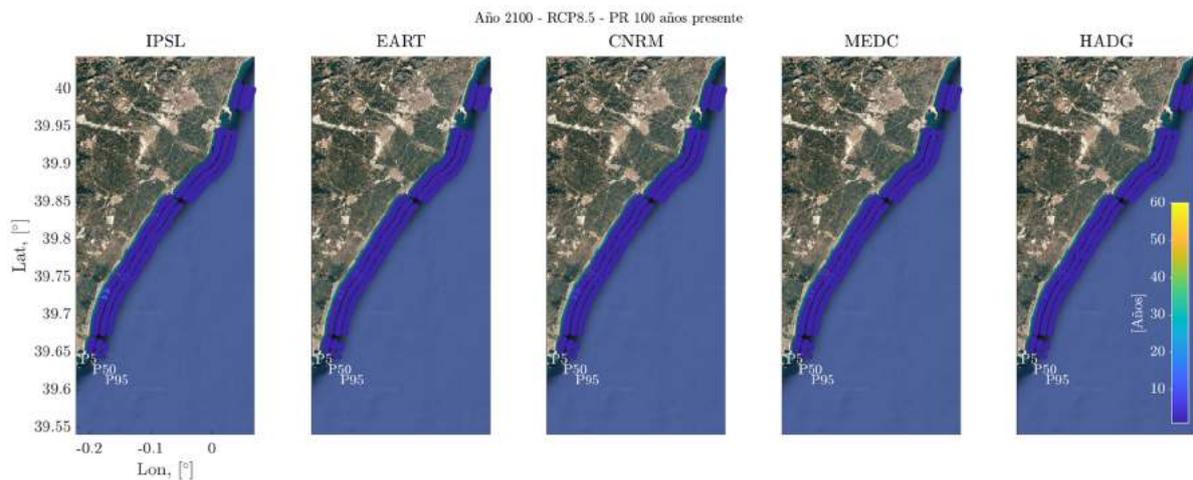


Figura 34. Periodos de retorno futuros de la magnitud de la CI de 100 años de periodo de retorno presente para el escenario RCP8.5 en el 2100.

4.3. Modelado hidráulico de la inundación costera

La ejecución del modelo RFSM-EDA requiere la preparación de mallas de cómputo que delimitan las celdas dónde se resuelven las ecuaciones de gobierno. En el tramo de costa del estudio, la orografía baja y poco accidentada hace que la línea de nivel de 10 metros empleada para cortar el modelo digital del terreno se extienda considerablemente hacia tierra. Como consecuencia, el MDT sobre el que se apoya el modelo de inundación es extenso, lo que dificulta el proceso de elaboración de la malla y el tiempo de ejecución. Para abordar este problema, se ha dividido el tramo de estudio en dos mallas, (Figura 35), asegurando un solape de al menos 1 km entre ellas.

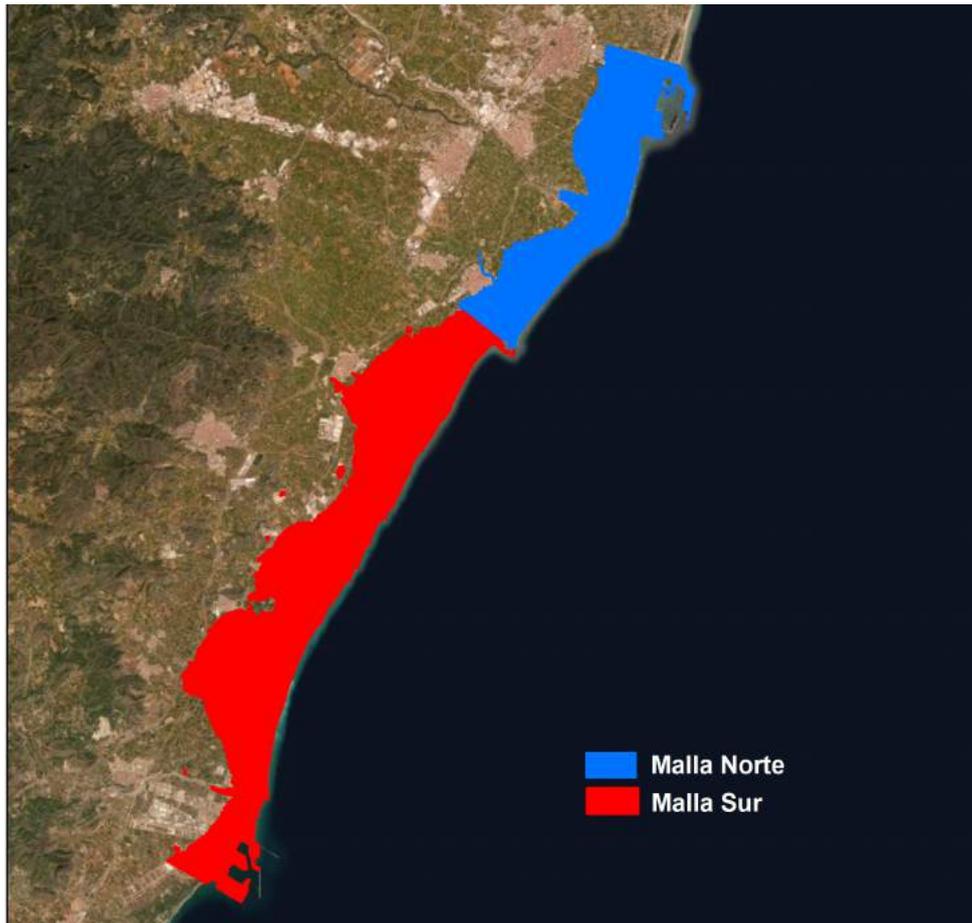


Figura 35. Mallas de cómputo del modelo de inundación RFSM-EDA.

Se han realizado diversas pruebas y se han ajustado las mallas de cómputo de tal forma que las celdas se adaptan a los accidentes topográficos más relevantes, con un tamaño que permite el equilibrio entre el coste computacional y la estabilidad en la simulación. Las celdas obtenidas tienen una superficie media de 3500 m² y oscilan entre los 2500 y 5000 m². La Figura 36 muestra el detalle de las mallas de cómputo del RFSM-EDA en las principales playas del tramo de estudio.

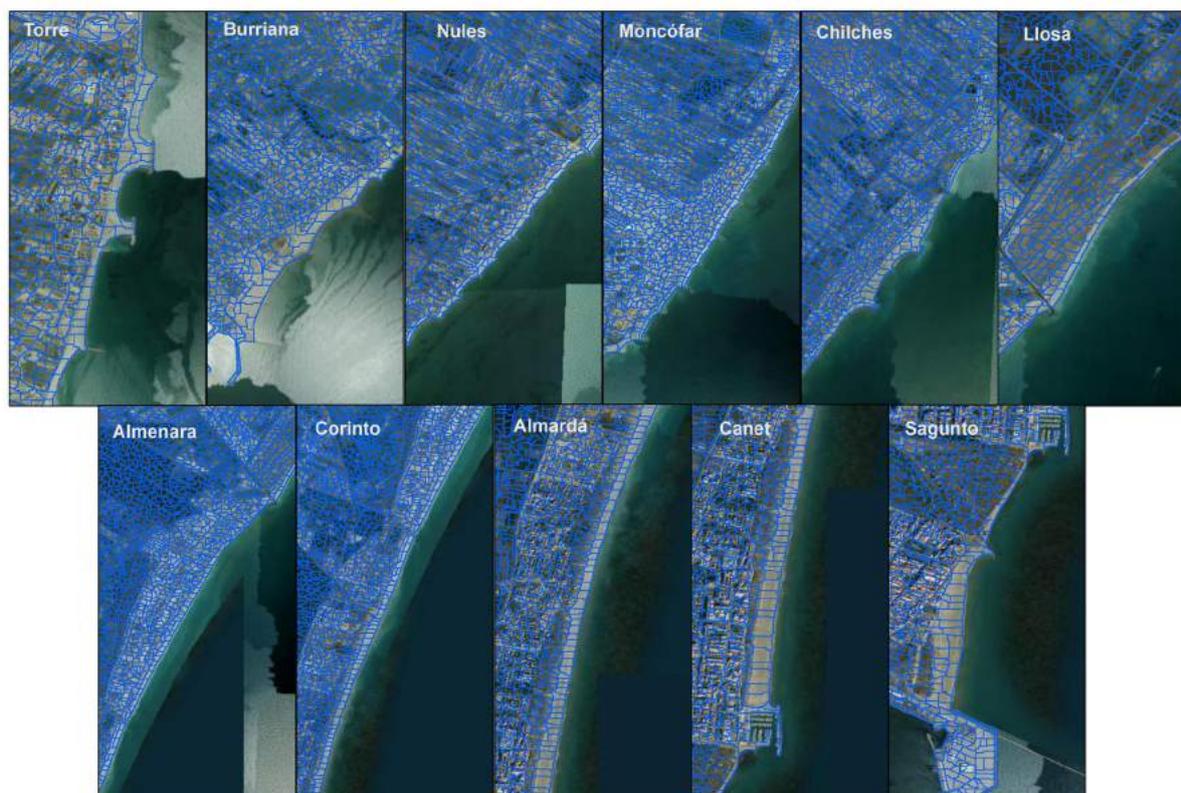


Figura 36. Detalle de las mallas en las principales playas del tramo de estudio.

4.4. Resultados

El modelado hidráulico de la inundación permite propagar la inundación en tierra, obteniendo la altura de la lámina de agua y la extensión de la zona inundada. En la Figura 37 se muestra la envolvente de modelos de la extensión de la zona inundada en las principales playas de la zona de estudio en el año 2050 para el RCP4.5. Como se puede ver en la imagen, la diferencia entre percentiles de ANMM es insignificante en este periodo. Por otro lado, en la Figura 38 se muestra la envolvente de modelos en el año 2100 para el RCP8.5. En este caso sí se aprecia claramente la influencia de las distintas trayectorias de ANMM en la inundación final. Del análisis de envolventes de inundación se pone de manifiesto que las mayores superficies inundadas se producen en las playas de Burriana, Canet y Sagunto. Pese a ello, el patrón de acreción de estas playas minimiza el riesgo de inundación para la población y los activos próximos a estas playas. El mayor riesgo de inundación se presenta en las playas de Torre, Moncófar y Chilches, donde la zona inundada se aproxima, llegando a rebasar las defensas costeras en el peor escenario futuro. Pese a que se trata de una costa baja y llana, el riesgo de inundación costera futura, empleando el MDT presente, es bajo.

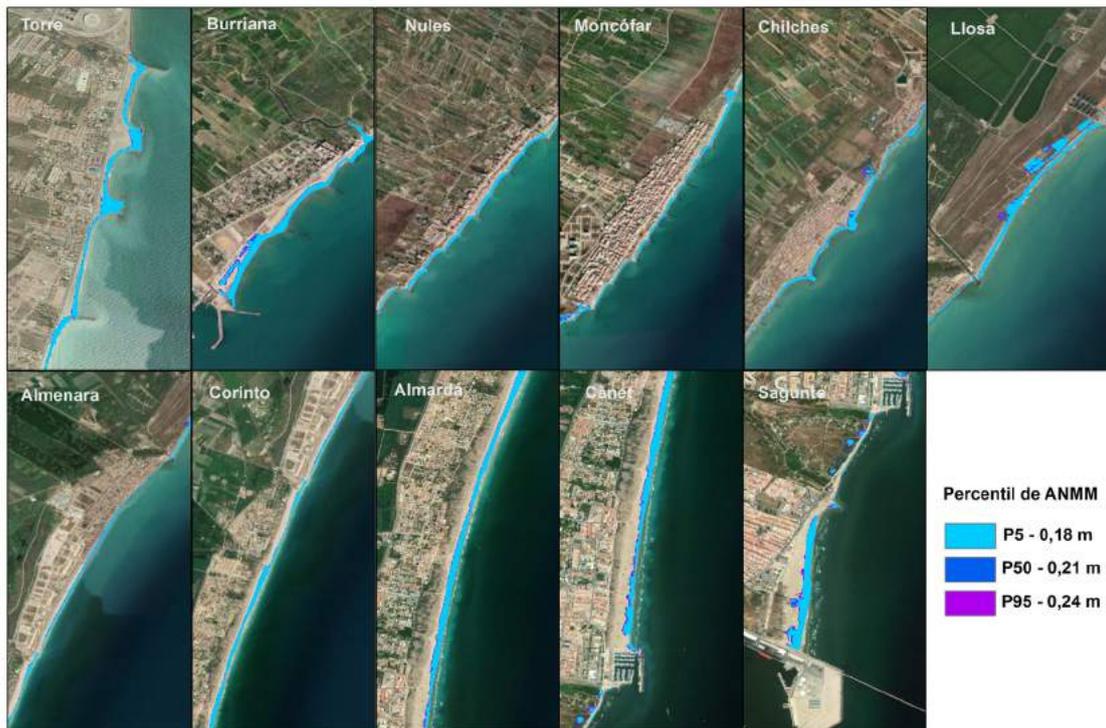


Figura 37. Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP4.5 en el año 2050, correspondientes a la envolvente de RCMs en diferentes playas del tramo de estudio.



Figura 38. Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100, correspondientes a la envolvente de RCMs en diferentes playas del tramo de estudio.

En la figura 39 se muestra la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno en el año 2100 para el RCP8.5 para distintos modelos y trayectorias de ANMM. Se aprecia el amortiguamiento de las diferencias entre modelos por la propagación en tierra de la inundación. Es importante tener en cuenta la dependencia del MDT de la extensión de la inundación. En este caso se ha empleado un MDT de 5 metros de resolución, adecuado para estudios regionales, pero esta resolución no es capaz de captar en detalle las diferencias decimétricas en la CI asociada a los diferentes modelos.

En las Figuras 40 y 41 representan en detalle la extensión de la inundación de 100 años de periodo de retorno de los modelos HADG y MEDC para el RCP8.5 en el año 2100. Se aprecia el mayor alcance de la zona inundada del modelo HADG, sobre todo en el percentil 5% de ANMM en la playa de Burriana.

En la

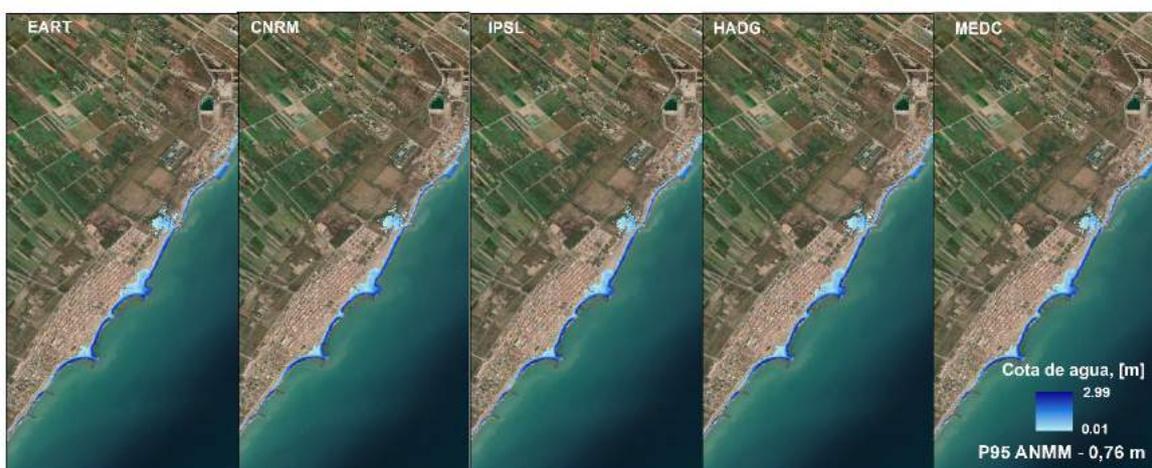


Figura 42 figura 42 se muestra la cota de agua de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 en las playas de Burriana y Chilches. En el caso de emplear el MDT presente y la CI futura, se aprecia la casi completa inundación de las playas y el rebase del paseo marítimo en el caso de la playa de Chiches. Se aprecia la casi completa inundación de las playas y el rebase del paseo marítimo en el caso de la playa de Chiches, en el caso de emplear el MDT presente.

En las Figuras 43 y 44 se muestran los mapas de cota de la lámina de agua asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno de los modelos EART y CNRM en el escenario RCP8.5 en el año 2100. En ambas playas, el modelo EART genera una superficie inundada ligeramente superior.

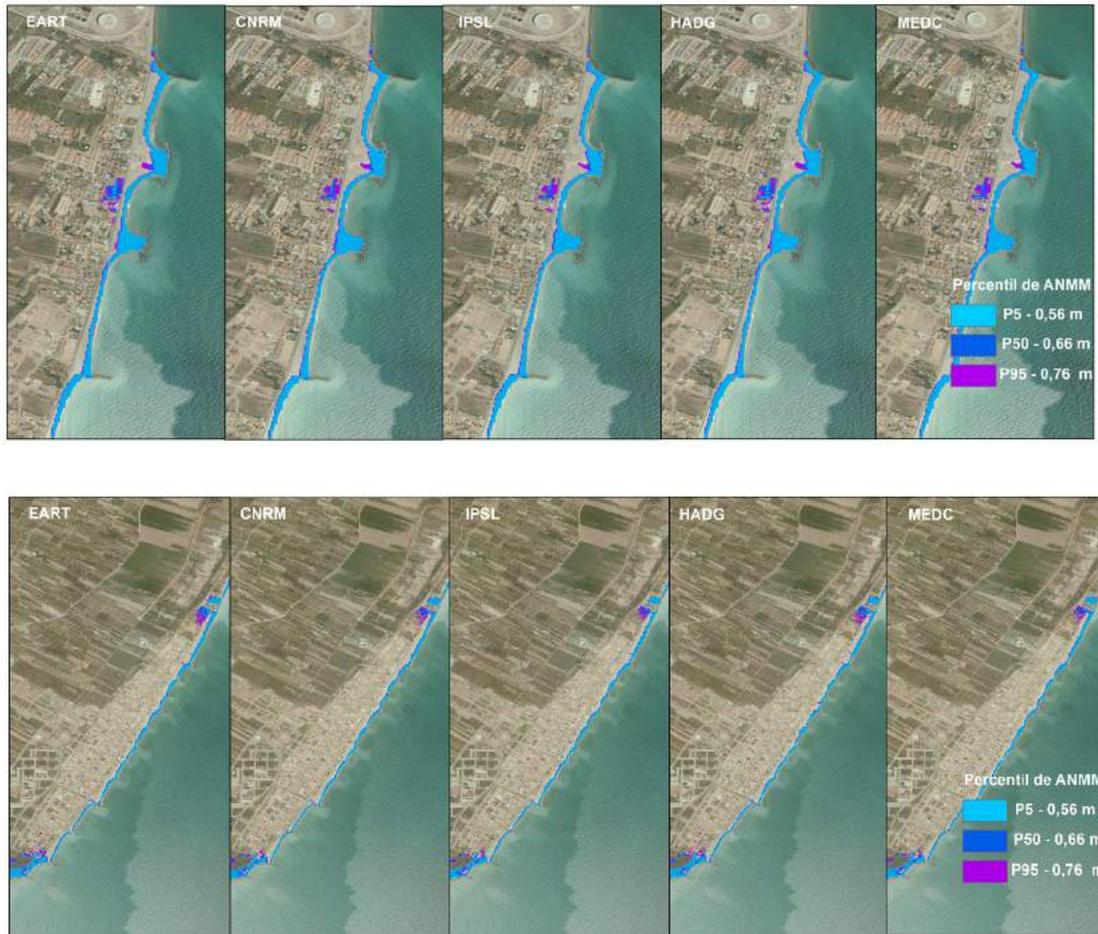


Figura 39. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 en las playas de Torre (panel superior) y Moncófar (panel inferior).

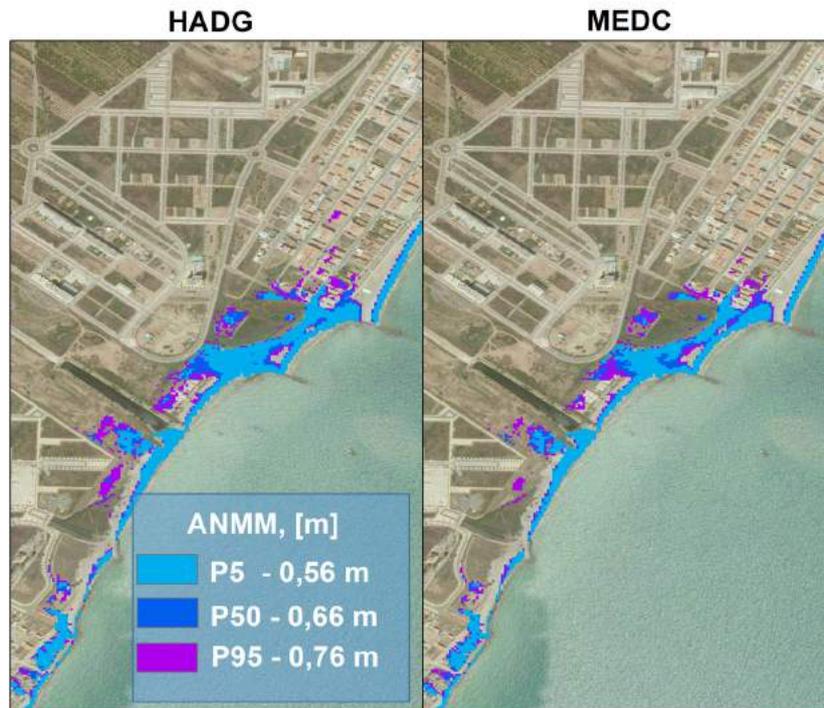


Figura 40. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 en la zona sur de Moncófar.

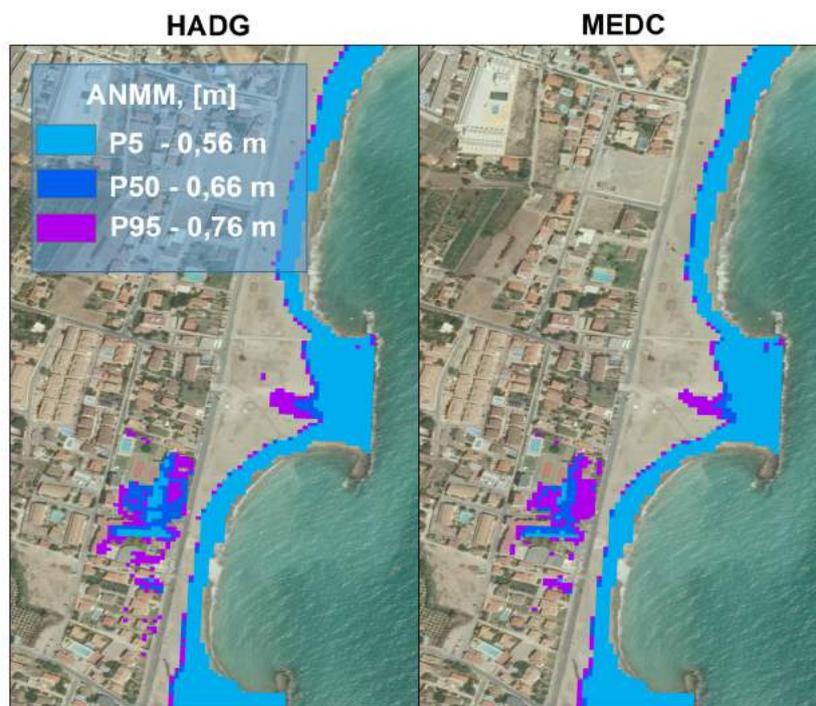


Figura 41. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 en la playa de Torre.

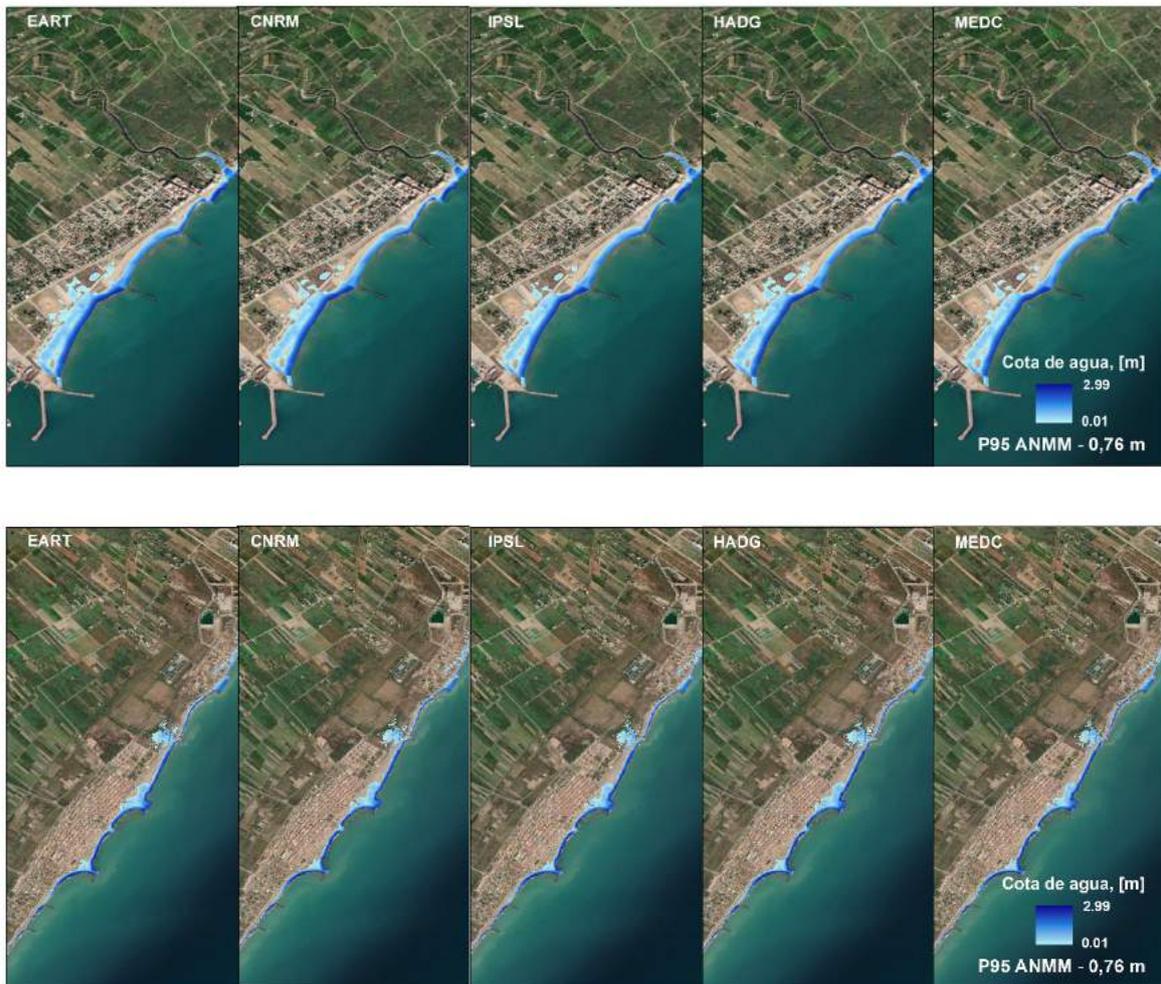


Figura 42. Mapas extensión de la inundación y cota de la lámina de agua asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno de los cinco RCMs para el escenario RCP8.5 en el año 2100 considerando el percentil 95% de ANMM en las playas de Burriana (panel superior) y Chilches (panel inferior).



Figura 43. Mapas extensión de la inundación y cota de la lámina de agua asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno de los RCMs EART y CNRM para el escenario RCP8.5 en el año 2100 considerando el percentil 95% de ANMM (0,76 cm) en Burriana.



Figura 44. Mapas extensión de la inundación y cota de la lámina de agua asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno de los RCMs EART y CNRM para el escenario RCP8.5 en el año 2100 considerando el percentil 95% de ANMM (0,76 cm) en Chilches.

La Figura 45 muestra la envolvente de la extensión de la zona inundada en diferentes horizontes temporales asociada al P95% de ANMM y a la CI de periodo de retorno de 100 años. En la Figura 46 se representan los diferentes modelos de manera desagregada. Se aprecia el claro aumento de la extensión de la inundación futura y la ligera diferencia entre modelos en la extensión de la superficie inundada.

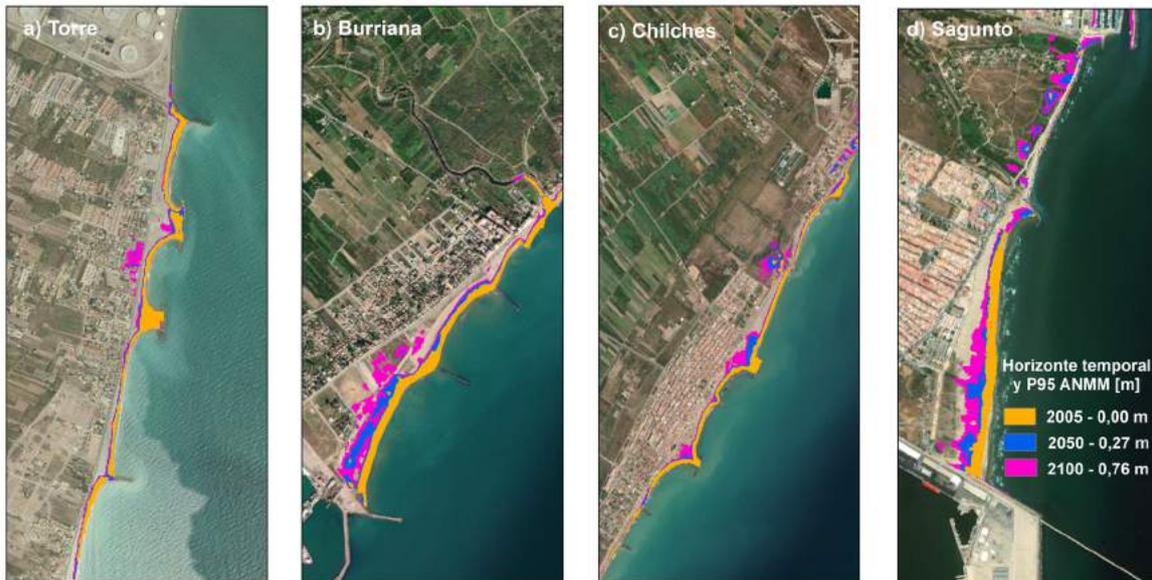


Figura 45. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI 100 años de periodo de retorno, envolvente de los cinco RCMs para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 considerando el P95% de ANMM.



Figura 46. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI 100 años de periodo de retorno, para los diferentes RCMs y para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 considerando el P95% de ANMM.

5. APROXIMACIÓN SIMPLIFICADA

La metodología se caracteriza por el empleo de las técnicas y modelos más avanzados del estado del conocimiento en materia de regionalización y modelado de la inundación con cobertura regional y a la escala de décadas y cientos de años. Su aplicación requiere un elevado conocimiento matemático y de los procesos relativos a de la dinámica marina y litoral e importantes recursos computacionales. Por ello, a continuación, se plantean una serie de simplificaciones que podrían realizarse y que, aunque aumentarían la incertidumbre del resultado, podrían facilitar su aplicación, sobre todo en el caso de no disponer de grandes recursos computacionales.

La primera simplificación está relacionada con el tratamiento de las proyecciones dinámicas. La generación sintética de eventos extremos requiere conocimientos en estadística multivariada, así como una supercomputadora para realizar los cálculos en un tiempo razonable. Se podría aplicar un método mucho más sencillo, que consistiría en emplear como eventos extremos, las tormentas observadas en las proyecciones, no requiriendo, por tanto, emulación sintética. Las tormentas se detectarían mediante la aplicación del criterio de extremos a las proyecciones dinámicas. Este método es mucho más rápido y no requiere conocimientos en estadística. Sin embargo, los resultados asumirán que las observaciones ya contienen las combinaciones de dinámicas extremas que generan las mayores inundaciones y las máximas realizaciones de cada variable.

Una segunda simplificación es aplicable al proceso de regionalización de las proyecciones dinámicas de oleaje. En lugar de aplicar el método híbrido descrito en el apartado 4.1.2, que requiere la aplicación y el manejo de modelos numéricos y estadísticos, además de recursos computacionales, se puede propagar asumiendo la hipótesis de teoría lineal de ondas y batimetría recta y paralela. Este método, pese a ser más rápido y sencillo, no tiene en cuenta las interacciones entre el oleaje y el nivel del mar ni la refracción inducida por un fondo no uniforme longitudinalmente.

La tercera simplificación hace referencia al modelado de la contribución del oleaje a la CI. En lugar de emplear un modelo hidrodinámico y resolver las complejas interacciones entre las dinámicas y la morfología del terreno, se podrían emplear formulaciones empíricas. Esta simplificación evita el coste computacional asociado a las múltiples ejecuciones del modelo hidrodinámico, aunque introduce incertidumbres con respecto a la calibración que necesitan algunas fórmulas empíricas.

La última simplificación afecta al modelado de la extensión de la superficie inundada. En este caso, se podrían aplicar métodos más sencillos como el corte directo del MDT a la CI o métodos bañera para considerar la influencia de celdas no comunicadas hidráulicamente. De esta manera se evita el proceso de elaboración y refinamiento de las mallas de cómputo del modelo hidráulico. Se introducen errores debido a que pueden inundarse zonas aisladas, no conectadas hidráulicamente con la costa, y no se tiene en cuenta la propagación del agua en tierra ni el efecto de la rugosidad del terreno.

La adopción de estas cuatro simplificaciones conservaría el muestreo de la incertidumbre asociada al problema del cambio climático, es decir, la incertidumbre vinculada a las proyecciones de oleaje, marea meteorológica y ANMM que se ha considerado a través de diferentes escenarios de concentraciones, modelos climáticos y trayectorias. No obstante, sí aumentaría la incertidumbre en el juego de posibles eventos extremos susceptibles de inundar, en el valor de la CI proyectada en costa y en la coherencia de los mapas de inundación producidos.

6. CONCLUSIONES

En esta parte metodológica se propone una metodología que supone un avance importante con respecto a la literatura actual, combinando por primera vez el conjunto de elementos que se describe a continuación.

En lo que respecta a los forzamientos considerados y su tratamiento estadístico:

- Empleo de proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica para dos escenarios de concentraciones (RCP4.5. y RCP8.5) y cinco modelos climáticos regionales (CNRM, EART, HADG, IPSL y MEDC).
- Empleo de proyecciones de ANMM para dos escenarios de concentraciones (RCP4.5. y RCP8.5) considerando tres trayectorias asociadas a los percentiles 5, 50 y 95 de la distribución de los resultados de veinte modelos climáticos.
- Reconstrucción de la marea astronómica pasada y futura mediante análisis de armónicos.
- Regionalización de las proyecciones dinámicas de oleaje mediante un método híbrido que combina modelado numérico y técnicas estadísticas.
- Desarrollo de un emulador de eventos extremos que considere las relaciones de interdependencia de las distintas variables, en distintos puntos del espacio, y aplicable a escalas regionales.
- Cálculo hidrodinámico de la contribución del oleaje a la CI futura empleando modelos numéricos específicos.

En lo que respecta al modelado de la inundación costera:

- Modelado de la extensión de la zona inundada en costa mediante un modelo hidráulico bidimensional que utiliza la topografía y la rugosidad como elementos subyacentes de la malla de cómputo.

En lo que respecta a la consideración y al tratamiento de la incertidumbre:

- Aumento del rango de posibles eventos susceptibles de inundar, con respecto a las observaciones, mediante el empleo de la generación estadística.
- Muestreo de la incertidumbre asociada a las proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica considerando dos escenarios de concentraciones y cinco modelos climáticos regionales.
- Muestreo de la incertidumbre asociada al ANMM considerando, para dos escenarios de concentraciones, tres posibles trayectorias asociadas a tres percentiles de la distribución de los resultados de veinte modelos climáticos.
- El modelo de inundación se ha ejecutado para todas las combinaciones de escenarios de concentraciones, modelos climáticos y trayectorias de ANMM. No obstante, los resultados se han expresado, tanto de forma independiente, como agregados por escenarios de concentraciones, mostrando la variabilidad inter-modelo y la incertidumbre en el ANMM representadas por un valor medio y una varianza.

La metodología se ha validado en un tramo costero de 40 kilómetros entre el Puerto de Castellón y el Puerto de Sagunto. En las dos unidades fisiográficas diferenciadas (Castellón-Burriana y Burriana-Sagunto), las playas menos afectadas por inundación costera futura son las que se sitúan inmediatamente al norte de las grandes barreras de sedimento que son los puertos de Burriana, Canet de Belenguer y Sagunto, al ser playas en acreción y, por lo tanto, con un mayor valor de protección frente a inundaciones.

Por otro lado, las playas situadas al abrigo de los puertos están más expuestas a inundaciones y sus defensas se verán rebasadas más frecuentemente en el futuro. Es el caso de las playas de Torre, Moncófar o Chilches.

Pese a la orografía baja y llana de la costa, de no considerar cambios en el MDT, el riesgo de erosión costera futuro no es alarmante. Esto es debido a la relativa laxitud de las dinámicas tanto presentes como futuras de la zona. Atendiendo las consecuencias de los temporales recientes, los eventos compuestos de inundación costera y continental suponen la mayor amenaza para el tramo costero estudiado.

REFERENCIAS

- Ackermann, H. (1997). *A Note on Circular Nonparametric Classification*. 39, 577–587.
- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1–2), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>
- Besag, J. (1975). *Statistical Analysis of Non-lattice Data*. 24(3), 179–195.
- Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), 851–862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Carnicero, J. A., Ausín, M. C., & Wiper, M. P. (2013). Non-parametric copulas for circular-linear and circular-circular data: An application to wind directions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(8), 1991–2002. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0733-y>
- Daly, C., Roelvink, D., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., & McCall, R. (2012). Validation of an advective-deterministic approach to short wave breaking in a surf-beat model. *Coastal Engineering*, 60(1), 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.08.001>
- Dawson, R. J., Dickson, M. E., Nicholls, R. J., Hall, J. W., Walkden, M. J. A., Stansby, P. K., Mokrech, M., Richards, J., Zhou, J., Milligan, J., Jordan, A., Pearson, S., Rees, J., Bates, P. D., Koukoulas, S., & Watkinson, A. R. (2009). Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. *Climatic Change*, 95(1–2), 249–288. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9532-8>
- Gomes da Silva, P., Coco, G., Garnier, R., & Klein, A. H. F. (2020). On the prediction of runup, setup and swash on beaches. *Earth-Science Reviews*, 204(October 2019), 103148. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103148>
- Gouldby, B. P., Sayers, P. B., & Tarrant, O. (2008). Application of a flood risk model to the Thames Estuary for economic benefit assessment. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 39, 11–19. <https://doi.org/10.2495/RISK080021>
- Guza, R. T., & Thornton, E. B. (1981). Wave set-up on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 86(C5), 4133–4137. <https://doi.org/10.1029/JC086iC05p04133>
- Heberger, M., Cooley, H., Herrera, P., Gleick, P. H., & Moore, E. (2011). Potential impacts of increased coastal flooding in California due to sea-level rise. *Climatic Change*, 109(SUPPL. 1), 229–249. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0308-1>
- Lucio, D., Tomás, A., Lara, J. L., Camus, P., & Losada, I. J. (2020). Stochastic modeling of long-term wave climate based on weather patterns for coastal engineering applications. *Coastal Engineering*, 161(January), 103771. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103771>
- Mardia, K. V., Hughes, G., Taylor, C. C., & Singh, H. (2008a). A multivariate von Mises distribution with applications to bioinformatics. *Canadian Journal of Statistics*, 36(1), 99–109. <https://doi.org/10.1002/cjs.5550360110>

- Mardia, K. V., Hughes, G., Taylor, C. C., & Singh, H. (2008b). *With Applications To Bioinformatics*. 36(1), 99–109.
- Mokrech, M., Nicholls, R. J., Richards, J. A., Henriques, C., Holman, I. P., & Shackley, S. (2008). Regional impact assessment of flooding under future climate and socio-economic scenarios for East Anglia and North West England. *Climatic Change*, 90(1–2), 31–55. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9449-2>
- O'Neill, A. C., Erikson, L. H., Barnard, P. L., Limber, P. W., Vitousek, S., Warrick, J. A., Foxgrover, A. C., & Lovering, J. (2018). Projected 21st century coastal flooding in the Southern California Bight. Part 1: Development of the third generation CoSMoS model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/jmse6020059>
- Reniers, A. J. H. M., Thornton, E. B., Stanton, T. P., & Roelvink, J. A. (2004). Vertical flow structure during Sandy Duck: Observations and modeling. *Coastal Engineering*, 51(3), 237–260. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.02.001>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Rueda, A., Camus, P., Tomás, A., Vitousek, S., & Méndez, F. J. (2016). A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator based on weather patterns. *Ocean Modelling*, 104, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.06.008>
- Rueda, A., Gouldby, B., Méndez, F. J., Tomás, A., Losada, I. J., Lara, J. L., & Díaz-Simal, P. (2016). The use of wave propagation and reduced complexity inundation models and metamodels for coastal flood risk assessment. *Journal of Flood Risk Management*, 9(4), 390–401. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12204>
- Sayol, J. M., & Marcos, M. (2018). Assessing Flood Risk Under Sea Level Rise and Extreme Sea Levels Scenarios: Application to the Ebro Delta (Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2), 794–811. <https://doi.org/10.1002/2017JC013355>
- Singh, H., Hnizdo, V., & Demchuk, E. (2002). *Biometrika Trust Probabilistic Model for Two Dependent Circular Variables Published by : Oxford University Press on behalf of Biometrika Trust Stable URL : https://www.jstor.org/stable/4140614 Linked references are available on JSTOR for this article : Mi. 89(3), 719–723.*
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Toimil, A., Losada, I. J., Díaz-Simal, P., Izaguirre, C., & Camus, P. (2017). Multi-sectoral, high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding. *Climatic Change*, 145(3–4), 431–444. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2104-z>
- Wahl, T., Plant, N., & Long, J. W. (2016). *Journal of Geophysical Research : Oceans in the northern Gulf of Mexico*. 3029–3043. <https://doi.org/10.1002/2015JC011482>.Received

ANEXO I. TRATAMIENTO DE LAS DINÁMICAS

Aplicación del criterio de extremos

La detección de las dinámicas susceptibles de generar las mayores inundaciones requiere la aplicación de un criterio de detección de tormentas. En la literatura existen diversos criterios de detección aplicables a un único punto de forzamiento, (Rueda et al., 2016; Wahl et al., 2016; Sayol & Marcos, 2018). La aplicación simultánea del criterio a varios puntos de forzamiento, requiere el desarrollo de un nuevo criterio que detecte el conjunto de dinámicas capaz de generar las mayores inundaciones en el dominio de cálculo. Una aproximación puede basarse en maximizar el módulo del flujo de energía, entrante en la zona:

$$|\bar{F}| = \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{nt} (E_i |C_{g_i}|) \sim \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{nt} (H_i^2 T_i) \quad (11)$$

Para cálculo del flujo de energía entrante basta con calcular la media espacial, en los nt puntos de forzamiento del contorno, del producto H^2T .

Sin embargo, un indicador basado en el flujo de energía entrante máximo no contiene información acerca del nivel de propagación, que puede ser fundamental a la hora de generar inundación. Para ello, se ha empleado un criterio que también incluye la información del nivel generalizando el empleado en (Rueda et al., 2016) a varios puntos del espacio:

$$\bar{CI}_{criterio} = \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{nt} (MA_i + MM_i + 0.106\sqrt{H_{0_i}L_{0_i}}) \quad (12)$$

El criterio de extremos se basa en un *proxy* de la CI en la costa calculado a partir de las dinámicas en profundidades en indefinidas. Dónde AT es la marea astronómica, MM es la marea meteorológica y $0.106\sqrt{H_{0_i}L_{0_i}}$ es una estimación del set-up según la formulación de (Stockdon et al., 2006), H_0 es la altura de ola en indefinidas y L_0 es la longitud de onda en indefinidas.

En los escenarios futuros no se considera el $ANMM$ en el criterio de selección de extremos. En el caso de hacerlo, se debe aplicar el mismo valor en todo el mes y los resultados no se verían alterados.

La maximización mensual del nivel de agua total promedio ($\bar{CI}_{criterio}$) conduce a la detección del juego de variables en el contorno susceptibles de generar las mayores inundación.

Selección de puntos directores

La complejidad del emulador multivariado asciende drásticamente a medida que aumentan los puntos de forzamiento. Debido a la posibilidad de que exista una alta correlación entre distintas variables de puntos espacialmente próximos, una estrategia consiste en reducir el número de puntos a emular sintéticamente.

Para ello, el primer paso consiste en verificar las correlaciones. Considerando las particularidades de las variables circulares (Fischer, 1995), la medida de la correlación entre los diferentes tipos de variables se evalúa de la manera siguiente:

- Variables lineales, X e Y.

$$\rho_{XY} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (13)$$

- Variables circulares-lineales, α_X e Y. Definiendo $r_{cy} = \text{corr}(\cos(\alpha_X), Y)$, $r_{sy} = \text{corr}(\sin(\alpha_X), Y)$ y $r_{sc} = \text{corr}(\sin(\alpha_X), \cos(\alpha_X))$, la correlación entre α_X e Y es:

$$\rho_{\alpha_X Y} = \sqrt{\frac{r_{cy}^2 + r_{sy}^2 + 2r_{cy}r_{sy}r_{cs}}{1 - r_{cs}^2}} \quad (14)$$

- Variables circulares-circulares, α_X y α_Y .

$$\rho_{\alpha_X \alpha_Y} = \frac{\sum_i \sin(\alpha_{Xi} - \bar{\alpha}_X) \sin(\alpha_{Yi} - \bar{\alpha}_Y)}{\sqrt{\sum_i \sin^2(\alpha_{Xi} - \bar{\alpha}_X) \sum_i \sin^2(\alpha_{Yi} - \bar{\alpha}_Y)}} \quad (15)$$

Dónde $\bar{\alpha}$ es la media angular, calculada a partir de la función tangente inversa de cuatro cuadrantes:

$$\bar{\alpha} = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_i \sin(\alpha_i)}{\sum_i \cos(\alpha_i)} \right) \quad (16)$$

La representación de la matriz de correlaciones cruzada permite observar visualmente la presencia o no de variables correlacionadas, lo que posibilita reducir la dimensión del análisis.

En el caso de que exista una alta correlación entre variables, es necesario seleccionar, de manera automatizada, los puntos de forzamiento a emular sintéticamente o puntos directores. En el caso general de mallas rectangulares, se buscarán al menos un punto por cada contorno de la malla, pudiendo ser necesarios más puntos en el caso de grandes irregularidades en la batimetría o en el clima marítimo.

La base de los algoritmos de clasificación es la métrica de la distancia entre vectores. En el caso de las variables lineales, es recomendable emplear la métrica euclídea. Sin embargo, esta métrica no es válida en el caso de las variables circulares debido a su modularidad ($\text{mod}(2\pi)$). La distancia angular admite dos valores, según la lectura sea en el sentido horario o antihorario. Generalmente se prefiere la distancia más corta. La distancia angular mínima entre dos ángulos es: θ_a y θ_b (Ackermann, 1997) es:

$$\delta = \pi - |\pi - |\theta_a - \theta_b|| \quad (17)$$

La clasificación se realiza en todo el conjunto de modelo-escenario-periodos fijando el número de *clústers* de agregación igual al número de puntos directores necesarios. El algoritmo de clasificación empleado es el K-medias, implementado en diversos programas de cálculo científico. Del análisis, extraemos los puntos directores que se emularán sintéticamente.

Nota: En la metodología aquí descrita, se ha realizado una clasificación independiente a cada una de las variables. Sin embargo, sería igualmente válido aplicar el algoritmo de clasificación K-medias al conjunto de todas las variables al mismo tiempo. Para ello, una definición posible de distancia entre los vectores \mathbf{x} e \mathbf{y} , formados por variables circulares y lineales, es:

$$\|x - y\| = \sqrt{(Hi_x - Hi_y)^2 + (Tmi_x - Tmi_y)^2 + (\pi - |\pi - |\theta i_x - \theta i_y||)^2} \quad (18)$$

Dónde $i = 1, 2, \dots, nt$, siendo nt el número de puntos de forzamiento en el contorno.

Inferencia del emulador multivariado

La inferencia del emulador multivariado requiere, por un lado, determinar los parámetros del modelo estadístico y por otro, el ajuste heterocedástico. De esta manera se obtienen parámetros de oleaje y marea meteorológica de tormentas sintéticas mensuales. La marea astronómica, al ser una variable determinista, se extrae aleatoriamente de la serie GOT.

Modelo estadístico

El núcleo del modelo estadístico es un modelo multivariado extremal basado en cópulas gaussianas. Un modelo multivariado direccional acoplado es el encargado de modelar las relaciones de interdependencia entre variables cíclicas.

$$f_{Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_{iw}, SS_{iss}}(Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_{iw}, MM_{iss}) = \underbrace{f(Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_j, MM_{iss})}_{\text{MME Cópula gaussiana}} \underbrace{f(Dir_{iw \neq j} | Dir_j)}_{\text{MM Direcciones}} \quad (19)$$

Dónde:

- $iw=1, 2, \dots, n$. Siendo n los puntos de forzamiento directores de oleaje.

- iss es el punto de forzamiento de nivel.

- j es el punto de vínculo entre el modelo basado en cópulas gaussianas y el modelo direccional.

Inferencia del modelo multivariado extremal basado en cópulas gaussianas.

El MME basado en cópulas gaussianas modeliza las variables lineales en todos los puntos de directores y una variable direccional en el punto de vínculo. La flexibilidad de la modelización multivariada mediante cópulas permite calcular la función de densidad conjunta a partir de las marginales de las diferentes variables junto con una función cópula que modela las interdependencias. En este estudio se han empleado cópulas elípticas, y más concretamente gaussiana, por su facilidad a la hora de tratar con problemas en más de dos dimensiones. La función de densidad del MME gaussiano es, por tanto:

$$F_{Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_j, SS_{iss}}(Hs_{iw}, Tm_{iw}, Dir_j, MM_{iss}) = C(F(Hs_{iw}), F(Tm_{iw}), F(Dir_j), F(MM_{iss}); \Sigma) = C_{\Sigma}(\Phi^{-1}(F(Hs_{iw})), \Phi^{-1}(F(Tm_{iw})), \Phi^{-1}(F(Dir_j)), \Phi^{-1}(F(MM_{iss}))) \quad (20)$$

Dónde:

- Σ es la matriz de correlaciones de las variables $[(Hs_{iw}), (Tm_{iw}), (Dir_j) \text{ y } (MM_{iss})]$ en el espacio $[0,1]^{3nw+1}$.
- Las marginales de extremos mensuales de altura de ola, periodo medio y marea meteorológica siguen una de distribución generalizada de extremos $Hs_{iw}, Tm_{iw}, MM_{iss} \sim GEV$; mientras que la dirección se ajusta a una función de distribución empírica, $Dir_j \sim$ función empírica.

La determinación de los coeficientes de ajuste del modelo multivariado gaussiano se realiza, de manera directa, una vez ajustadas las marginales de cada variable. Consiste en determinar la matriz Σ de correlaciones de las variables transformadas al espacio normal por medio de su función de distribución marginal $F(-)$.

Inferencia del modelo *multivariado* de direcciones

Para el modelado estadístico de las variables direccionales, se ha empleado un modelo de mezcla basado en la distribución de von Mises multivariada presentada en (Mardia et al., 2008). La distribución de von Mises es una equivalencia circular de la distribución de Gauss, y tiene como limitación el hecho de que sólo puede modelar distribuciones monomodales o con una única dirección predominante. Para resolver ese problema, se emplean distribuciones de mezcla, en la que se ponderan distribuciones de von Mises multivariadas monomodales, para así acomodar varias direcciones predominantes:

$$f_{\theta}(\theta) = \sum_{i=1}^k p_i T_{\theta_i}(\theta) \quad (21)$$

Dónde:

- $\theta = [Dir_1, Dir_2, \dots, Dir_n]$
- k es el número de componentes direccionales de mezcla
- p_i es la probabilidad de ocurrencia de cada componente direccional
- $T_{\theta_i}(\theta)$ es la distribución de von Mises multivariada monomodal

La elección automatizada del número de componentes de mezcla es un tema complejo que sigue abierto en la literatura especializada. Sin embargo, una primera estimación del número idóneo de componentes de mezcla consiste en la observación del fenómeno físico. De esta manera, la rosa de oleaje es una herramienta visual a partir de la cual escoger el número de componentes de mezcla.

Una vez escogido el número (k) de componentes de mezcla, es necesario realizar una clasificación en el espacio de las direcciones de los eventos de tormenta observados. Para ello, se aplica el algoritmo K-medias y una métrica apropiada de la distancia angular, por ejemplo. El resultado del análisis es la clasificación del conjunto de direcciones de tormentas (20 años x 12 meses) de los puntos directores (n) en (k) subconjuntos.

$$[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k] \in \boldsymbol{\theta}_{20 \times 12, n} \quad (22)$$

El cálculo de la probabilidad de ocurrencia de cada componente direccional (p_i) consiste en el recuento del número de elementos en cada *clúster*.

$$p_i = \frac{N_i}{N_t} \quad (23)$$

Dónde:

- N_i es el número de elementos en el subconjunto i

- N_t es el número de elementos totales (20 años x 12 meses)

Pese a que el modelo gaussiano se infiere para cada mes (cada ajuste tiene 20 valores ya que los intervalos temporales son de 20 años), el modelo de direcciones se infiere anualmente, y considera todos los eventos de tormenta mensuales. Esto es debido a la limitación que establece la clasificación en componentes direccionales, que reduce drásticamente el número de observaciones con las que ajustar el modelo multivariado direccional. Sin embargo, la estacionalidad no se pierde gracias a la dirección de vínculo, que es modelada en la cópula gaussiana a escala mensual.

A continuación, se ajusta el modelo multivariado direccional propuesto en (Mardia et al., 2008), a cada subconjunto de direcciones. La función de densidad multivariada de $\boldsymbol{\theta}^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n] \in \mathbb{T}^n = [-\pi, \pi)^n$ es:

$$f_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}) = \{T(\boldsymbol{\kappa}, \boldsymbol{\Lambda})\}^{-1} \exp\{\boldsymbol{\kappa}^T \mathbf{c}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\mu}) + \mathbf{s}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{s}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\mu}) / 2\} \quad (24)$$

Dónde:

- $\boldsymbol{\theta}^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$, $\boldsymbol{\mu}^T = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n] \in \mathbb{T}^n$, $\boldsymbol{\kappa}^T = [\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n] \in \mathbb{R}^n$ siendo $\kappa_i > 0$ y $\boldsymbol{\Lambda} = \lambda_{ij} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ con $\boldsymbol{\Lambda}^T = \boldsymbol{\Lambda}$ y $\lambda_{ii} = 0$.

- $\mathbf{c}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\mu})^T = [\cos(\theta_1 - \mu_1), \cos(\theta_2 - \mu_2), \dots, \cos(\theta_n - \mu_n)]$

- $\mathbf{s}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\mu})^T = [\sin(\theta_1 - \mu_1), \sin(\theta_2 - \mu_2), \dots, \sin(\theta_n - \mu_n)]$

- $\{T(\boldsymbol{\kappa}, \boldsymbol{\Lambda})\}^{-1}$ es una constante de normalización que únicamente tiene expresión analítica en el caso bivariado:

$$T(\kappa_1, \kappa_2, \lambda) = 4\pi^2 \sum_{m=0}^{\infty} \binom{2m}{m} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^{2m} \kappa_1^{-m} I_m(\kappa_1) \kappa_2^{-m} I_m(\kappa_2) \quad (25)$$

Siendo $I_p(\kappa)$ la función modificada de Bessel de orden p .

En el caso bivariado, la función de densidad (24) es idéntica al modelo bivariado de (Singh et al., 2002):

$$f_{\theta}(\theta_1, \theta_2) = \frac{\exp\{\kappa_1 \cos(\theta_1 - \mu_1) + \kappa_2 \cos(\theta_2 - \mu_2) + \lambda_{12} \sin(\theta_1 - \mu_1) \sin(\theta_2 - \mu_2)\}}{T(\kappa_1, \kappa_2, \lambda)} \quad (26)$$

En el caso de modelar tres variables circulares, una expresión análoga a la ecuación (24) es:

$$f_{\theta}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \{T(\kappa, \Lambda)\}^{-1} \Gamma(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \{T(\kappa, \Lambda)\}^{-1} \exp\{\kappa_1 \cos(\theta_1 - \mu_1) + \kappa_2 \cos(\theta_2 - \mu_2) + \kappa_3 \cos(\theta_3 - \mu_3) + \lambda_{12} \sin(\theta_1 - \mu_1) \sin(\theta_2 - \mu_2) + \lambda_{13} \sin(\theta_1 - \mu_1) \sin(\theta_3 - \mu_3) + \lambda_{23} \sin(\theta_2 - \mu_2) \sin(\theta_3 - \mu_3)\} \quad (27)$$

La constante $\{T(\kappa, \Lambda)\}^{-1}$, permite que $f_{\theta}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ sea una función de densidad :

$$\{T(\kappa, \Lambda)\}^{-1} = \frac{1}{\iiint \Gamma(\theta_1, \theta_2, \theta_3) d\theta} \quad (28)$$

Dada una muestra de la distribución (24), necesitamos estimar los parámetros μ , κ y Λ del modelo. Debido a que no existe una expresión explícita para la constante de normalización, el estimador de máxima verosimilitud debe implementarse dentro de un algoritmo de optimización en el que, a cada paso de la iteración, se calcule la constante de normalización para el juego de parámetros de prueba. La estimación mediante el método de máxima verosimilitud es extremadamente costosa computacionalmente, es por ello que se proponen dos alternativas: el método de los momentos y el método de la pseudo-máxima verosimilitud.

Método de los momentos

En este caso se consideran todas las distribuciones univariadas y bivariadas condicionales. Una estimación de $\hat{\mu}_i = \bar{x}_{0i} = 1, \dots, n$, dónde \bar{x}_{0i} es la media circular de la distribución marginal de θ_i . En el caso particular de datos altamente concentrados, las matrices de concentraciones κ y de precisiones Λ se aproximan a partir de la matriz de covarianzas Σ :

$$(\Sigma^{-1})_{ii} = \kappa_i, (\Sigma^{-1})_{ij} = -\lambda_{ij}, i \neq j \quad (29)$$

La estimación de la matriz de covarianza $\hat{\Sigma} = \bar{S}_{ij}$ mediante el método de los momentos es:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \sin(\theta_{ir} - \bar{x}_{0i}) \sin(\theta_{jr} - \bar{x}_{0j}) \quad (30)$$

Método de la máxima pseudo-verosimilitud

La estimación mediante máxima pseudo-verosimilitud (Besag, 1975) se basa en probabilidades condicionales en lugar de en la función de densidad completa. De esta manera, se evita el cálculo iterativo de la constante de normalización en cada paso, con el consiguiente ahorro en tiempo de cálculo.

El estimador de pseudo-verosimilitud de una distribución de von Mises n -variada, para una muestra de m elementos es:

$$PL = (2\pi)^{-pn} \prod_{j=1}^n \prod_{i=1}^m \left[I_0(\kappa_{j.rest}^{(i)}) \right]^{-1} \exp\{\kappa_{j.rest}^{(i)} \cos(\theta_{ji} - \mu_{j.rest}^{(i)})\} \quad (31)$$

Dónde para la observación i -ésima, los coeficientes de la distribución condicional se calculan en función de los parámetros del modelo:

$$\mu_{j.rest}^{(i)} = \mu_j + \tan^{-1} \left\{ \left[\sum_{l \neq j} \lambda_{jl} \sin(\theta_{li} - \mu_l) \right] / \kappa_j \right\} \quad (32)$$

$$\kappa_{j.rest}^{(i)} = \left\{ \kappa_j^2 + \left[\sum_{l \neq j} \lambda_{jl} \sin(\theta_{li} - \mu_l) \right]^2 \right\}^{1/2}$$

La inferencia de los parámetros del modelo consiste en maximizar la pseudo-verosimilitud (PL) con respecto a los $n + n(n + 1)/2$ parámetros desconocidos.

El problema de maximización de PL, debido a la dimensión del problema, es un problema de optimización complejo y costoso computacionalmente. Existen diversos métodos en la literatura empleados para la maximización multivariada, de entre ellos, se ha empleado el método del punto interior. Estos algoritmos se distribuyen, en los programas de cálculo científico usuales (Matlab y Python) mediante las funciones *fmincon* (Matlab) o *linprog*, librería *scipy* (Python).

Regresión heterocedástica

La relación entre el periodo medio y el periodo de pico se caracteriza por un aumento progresivo de la varianza, Figura 47. El modelo heterocedástico asume que las medias del periodo medio y del periodo pico siguen una relación potencial, siendo lineal la relación entre la varianza del periodo pico y el periodo medio, ecuación (33). Se asume que el periodo de pico sigue una distribución normal $T_p \sim N(\mu_{Tp}, \sigma_{Tp})$.

$$\mu_{Tp} = a\mu_{Tm}^b \text{ y } \sigma_{Tp} = c\mu_{Tm} \quad (33)$$

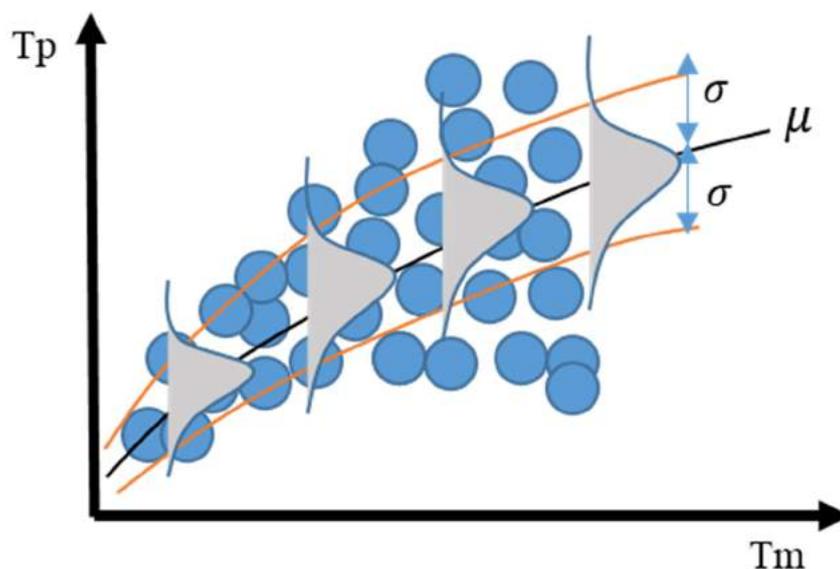


Figura 47. Relación heterocedástica entre el periodo medio y el periodo pico.

Para obtener los coeficientes a , b y c , se realiza una división en subconjuntos (3) de la muestra periodo medio-periodo pico y se calculan los estadísticos μ y σ en cada subconjunto. El modelo dictado por la ecuación (33) se determina a partir del ajuste de los pares de valores $\mu_{T_m} - \mu_{T_p}$ y $\mu_{T_m} - \sigma_{T_p}$.

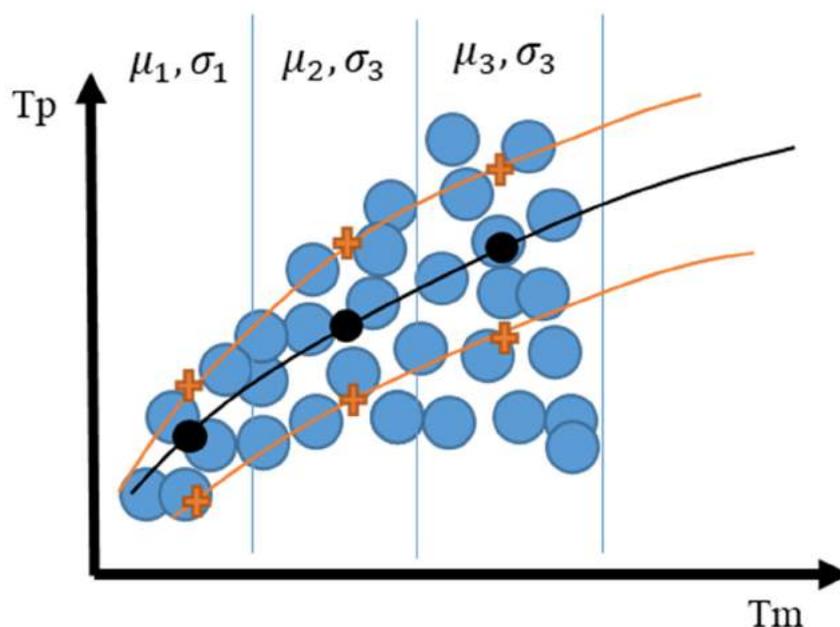


Figura 48. División en subconjuntos para el ajuste del modelo heterocedástico.

Emulación sintética de eventos extremos

Dada la estructura del emulador multivariado, Figura 52, la generación sintética se inicia a partir del MME basado en cópulas gaussianas del que se extrae un vector aleatorio de alturas de ola, periodos medios, dirección de vínculo y marea meteorológica. Para ello, se extrae un vector aleatorio de la

distribución normal multivariada $N_m(\mathbf{0}, \Sigma_m)$, donde Σ_m es la matriz de correlaciones del mes m . Entrando de forma inversa en las marginales de cada variable con el vector aleatorio normal se extrae una realización aleatoria k del vector $[H_{s1}, H_{s2}, \dots, H_{sn}, T_{m1}, T_{m2}, \dots, n, Dir_j, MM_1]_k$.

A continuación, el vínculo condicional con el modelo multivariado de direcciones se realiza mediante la variable Dir_j . Las direcciones $Dir_{i \neq j}$ se obtienen a partir del modelo multivariado de direcciones extrayendo aleatoriamente una realización de la función de densidad condicional $f_{Dir_{i \neq j} | Dir_j}(Dir_{i \neq j} | Dir_j)$. La función de densidad condicionada a Dir_j se obtiene a partir de la función de densidad n -variada $f_{\theta}(\theta)$ según la ecuación (34) (10). El procedimiento es idéntico al muestreo de Gibbs, perteneciente a la familia de métodos basados en cadenas de Markov y Montecarlo (MCMC)

$$f_{Dir_{i \neq j} | Dir_j}(Dir_{i \neq j} | Dir_j) = \frac{f_{\theta}(\theta)}{f_{Dir_j}(Dir_j)} \quad (34)$$

El siguiente paso en la emulación consiste en obtener el periodo de pico a partir del modelo heterocedástico calibrado mediante las observaciones del periodo medio y periodo de pico. Para ello, conocido el periodo medio, y asumiéndolo igual a μ_{Tm} , se pueden calcular μ_{Tp} y σ_{Tm} con la ecuación (33). El periodo de pico se obtiene extrayendo un número aleatorio de la distribución $N(\mu_{Tp}, \sigma_{Tm})$.

La marea astronómica no se modela estadísticamente debido a su carácter determinista. Para obtenerla, se extrae un valor aleatorio del mes y año de la base de datos GOT, reconstruida a partir de armónicos.

Finalmente, para generar eventos extremos de tormenta futuros, se debe incluir el ANMM correspondiente a las diferentes trayectorias consideradas.

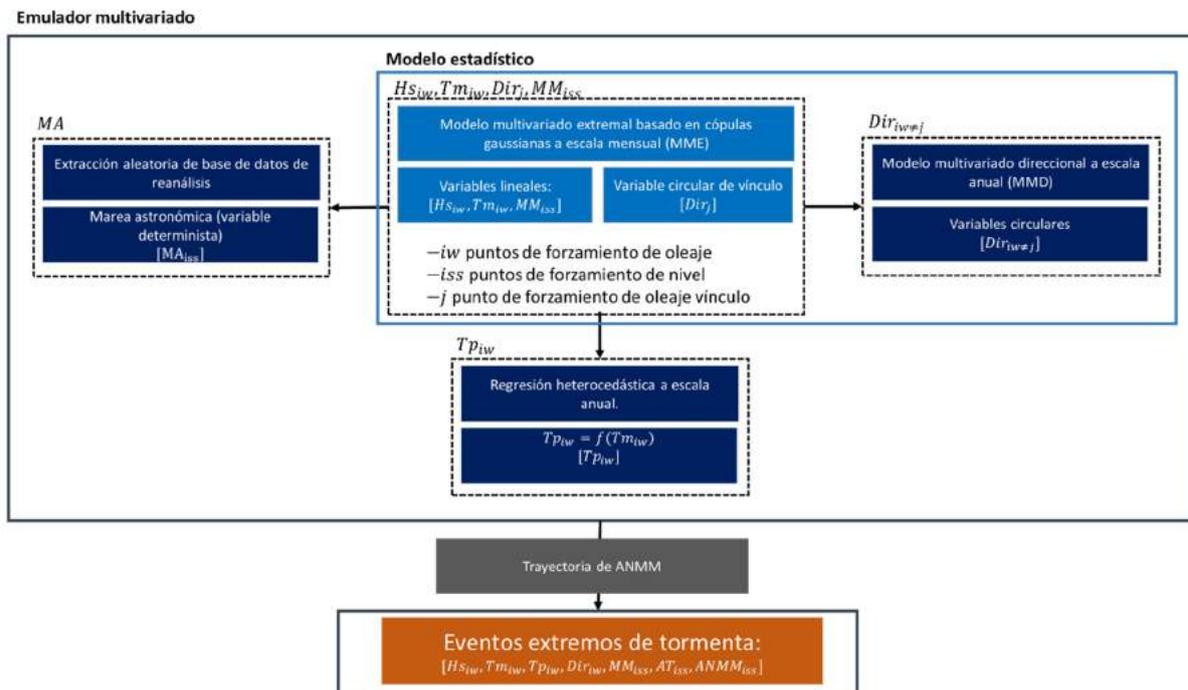


Figura 49. Esquema del emulador multivariado de eventos de tormenta.

ANEXO II. DESCRIPCIÓN DEL MODELO XBEACH.

El modelado hidrodinámico de la contribución del oleaje a la CI se realiza mediante el modelo *XBeach* ejecutado en perfiles (1D) en el modo *surfbeat*. *XBeach* en el modo *surfbeat* resuelve las variaciones en la onda corta asociadas al grupo de ondas y las ondas largas ligadas.

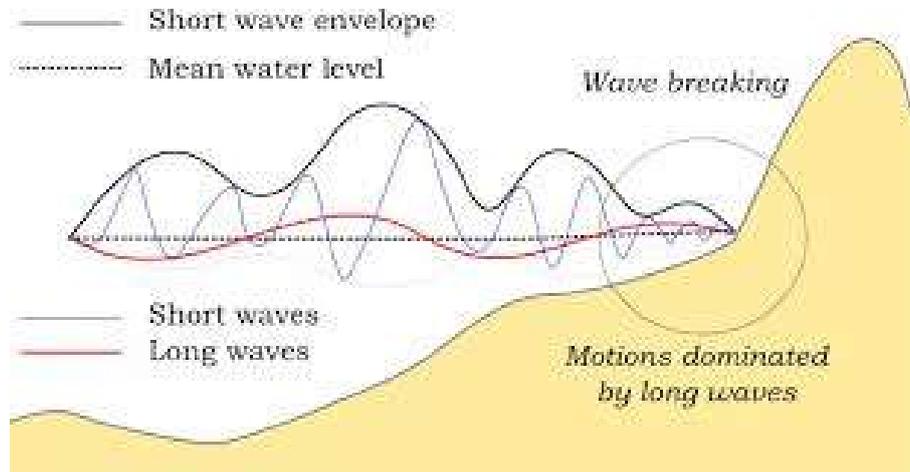


Figura 50. Envolvente de onda corta y ondas largas ligadas en la zona de rompientes. Fuente: XBeach manual.

Las variaciones de onda corta se resuelven mediante la ecuación de balance de ondas no estacionaria. Esta ecuación resuelve la variación de altura de ola en la escala del grupo. Emplea un modelo de disipación del grupo de ondas según (Roelvink, 1993) y Daly et al., (2012) y un modelo de propagación del rodillo generado tras la rotura. Estas variaciones generan gradientes en el tensor de radiación que generan fuerza en la columna de agua que dan lugar a ondas infra gravitatorias y corrientes no estacionarias que se resuelven mediante las ecuaciones no lineales de aguas someras. De esta manera se modelan las corrientes generadas por el oleaje, por el viento, ondas largas (infragravitatorias y los movimientos de ascenso-descenso de las ondas infragravitatorias (*surfbeat*)).

La ecuación de balance de acción de ondas en 2D es:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} = -\frac{D_w}{\sigma} \quad (35)$$

Dónde la acción de ondas es:

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (36)$$

Dónde θ representa el ángulo de incidencia con respecto al eje x , S_w representa la densidad de energía del oleaje en cada sector direccional y σ es la frecuencia intrínseca. Las velocidades de propagación en x e y son:

$$c_{x(x,y,t,\theta)} = c_g \cos(\theta) + u^L \quad (37)$$

$$c_{y(x,y,t,\theta)} = c_g \sin(\theta) + v^L$$

Con u^L y v^L las velocidades longitudinales y transversales Lagrangianas, y c_g la velocidad de grupo obtenidas según la teoría lineal. La velocidad de propagación angular es:

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sin skh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin\theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos\theta \right) + \cos\theta \left(\frac{\partial u}{\partial x} \sin\theta - \frac{\partial u}{\partial y} \cos\theta \right) + \sin\theta \left(\frac{\partial v}{\partial x} \sin\theta - \frac{\partial v}{\partial y} \cos\theta \right) \quad (38)$$

Dónde el primer término de la ecuación anterior considera la refracción por fondo y los dos últimos la refracción por la acción de las corrientes. El número de onda se obtiene a partir de las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial k_x}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

La frecuencia radial absoluta es:

$$\omega = \sigma + k_x u^L + k_y v^L \quad (40)$$

La disipación total de la energía del oleaje debida a la rotura se modela según [Roelvink, \(1993\)](#) y se distribuye proporcionalmente en todas las direcciones.

ecuaciones siguientes:

$$S_{xx,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \cos^2 \theta) \right) S_w d\theta \quad (41)$$

$$S_{xy,w}(x, y, t) = \int \sin\theta \cos\theta \frac{c_g}{c} S_w d\theta$$

$$S_{yy,w} = \int \frac{c_g}{c} (1 + \sin^2 \theta) S_w d\theta$$

Acoplada a la ecuación de balance de acción de onda mediante el término de disipación por rotura, se encuentra la ecuación de balance de energía del rodillo o *roller*. De esta manera se modela la propagación del oleaje post-rotura. La forma de la ecuación de balance de energía del rodillo es idéntica a la del oleaje a excepción del término de disipación, (Reniers et al., 2004). La contribución del rodillo al tensor de radiación se calcula según la teoría lineal:

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int \cos^2 \theta S_r d\theta \quad (42)$$

$$S_{xy,r}(x, y, t) = \int \sin\theta \cos\theta S_r d\theta$$

$$S_{yy,r} = \int \sin^2 \theta S_r d\theta$$

Las fuerzas en la columna de agua se obtienen adicionando los gradientes en el tensor de radiación debido a la acción del oleaje y del rodillo:

$$F_x(x, y, t) = - \left(\frac{\partial S_{xx,w} + S_{xx,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy,w} + S_{xy,r}}{\partial y} \right) \quad (43)$$

$$F_y(x, y, t) = - \left(\frac{\partial S_{xy,w} + S_{xy,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy,w} + S_{yy,r}}{\partial y} \right)$$

Los flujos medios y de baja frecuencia se calculan mediante la ecuación de aguas someras mediante las ecuaciones Medias Lagrangianas Generalizadas (GLM) promediadas en vertical. En este marco, las ecuaciones de momento y continuidad se formulan en términos de la velocidad lagrangiana u^L , definida como la distancia que una partícula viaja en un periodo dividida de ese periodo. Esta velocidad se relaciona con la velocidad Euleriana (la velocidad de onda corta promediada observada en un punto fijo) mediante el drift de Stokes:

$$u^L = u^E + u^S \text{ y } v^L = v^E + v^S \quad (44)$$

u^S y v^S representan el drift de Stokes:

$$u^S = \frac{E_w \cos\theta}{\rho h c} \text{ y } v^S = \frac{E_w \sin\theta}{\rho h c} \quad (45)$$

Dónde la energía de onda corta y la dirección se obtienen de la ecuación de balance de la acción de ondas. Las ecuaciones de momento y continuidad GLM, que explican la propagación de ondas largas y corrientes son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) \\ = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\partial h} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial x} - f u^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\partial h}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0$$

Dónde τ_{bx}, τ_{by} son las tensiones tangenciales en el fondo, η es el nivel de agua y F_x, F_y son los esfuerzos inducidos por el oleaje, ν_h es la viscosidad horizontal y f es el efecto de Coriolis.

ANEXO III. DESCRIPCIÓN DEL MODELO RFSM-EDA

El modelo está basado en el método de almacenamiento de celdas y responde a una aproximación difusiva de las ecuaciones de agua someras (Shallow Water Equations, SWE). Difiere del resto de modelos difusivos por incorporar un término adicional, la aceleración local (o inercia local), que proporciona mayor estabilidad y menores tiempos de ejecución (Bates et al., 2010).

Las hipótesis de partica en las que se basa el modelo son las siguientes:

- El dominio puede ser dividido en depresiones topográficas discretas e hidráulicamente consistentes llamadas IZs (*Impact Zones*), Figura 51.
- La cota de la superficie de agua en cada IZ es constante.
- La relación entre la cota de la superficie de agua y el volumen en una IZ puede ser definido por una relación no histerética.
- El flujo entre dos IZs adyacentes se calcula linealmente a lo largo de la interfaz entre ellas.
- La interfaz puede ser caracterizada mediante una relación nivel-anchura, dónde se asume que la anchura aumenta cuando lo hace el nivel.

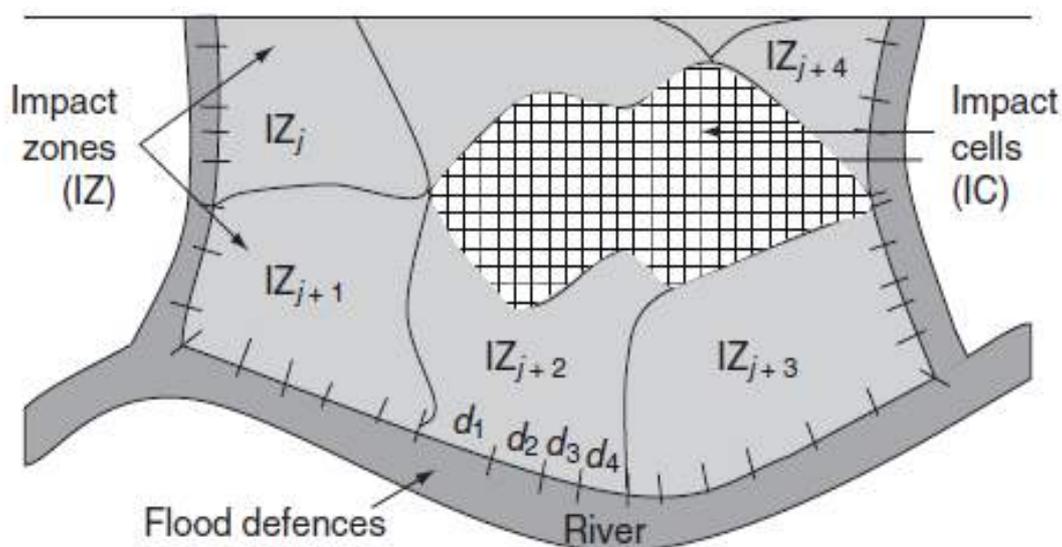


Figura 51. Representación conceptual de las Impact Zones (Gouldby et al., 2008).

La malla computacional que utiliza RFSM-EDA se basa en la topografía subyacente y está formada por IZs, una serie de polígonos irregulares. Cada una de las IZs está compuesta por celdas (*Impact Cells*) que drenan al mismo punto bajo, conocido como Punto de Acumulación. Las interfaces entre IZs son crestas topográficas o puntos altos. La cota más baja de cada interfaz entre IZs corresponde al punto a través del cual el agua fluye entre celdas y se conoce como Punto de Comunicación, (Figura 52).

Durante la simulación hidráulica, el modelo recibe volúmenes de descarga en la llanura de inundación a través de cada IZ costera (Figura 53). Esos volúmenes de inundación se computan como la diferencia entre el TWL del punto más cercano del conjunto de puntos en los que se ha reconstruido la serie de nivel y el correspondiente al contorno.

El flujo entre dos IZs se calcula mediante la ecuación de momento:

$$Q_f^{t+\Delta t} = \sum_p \frac{(Q_p^t - g \cdot \Delta t \cdot A_p^t \cdot S_f^t)}{1 + g \cdot \Delta t \cdot n^2 \cdot |Q_p^t| / A_p^t \cdot (R_p^t)^{4/3}} \quad (47)$$

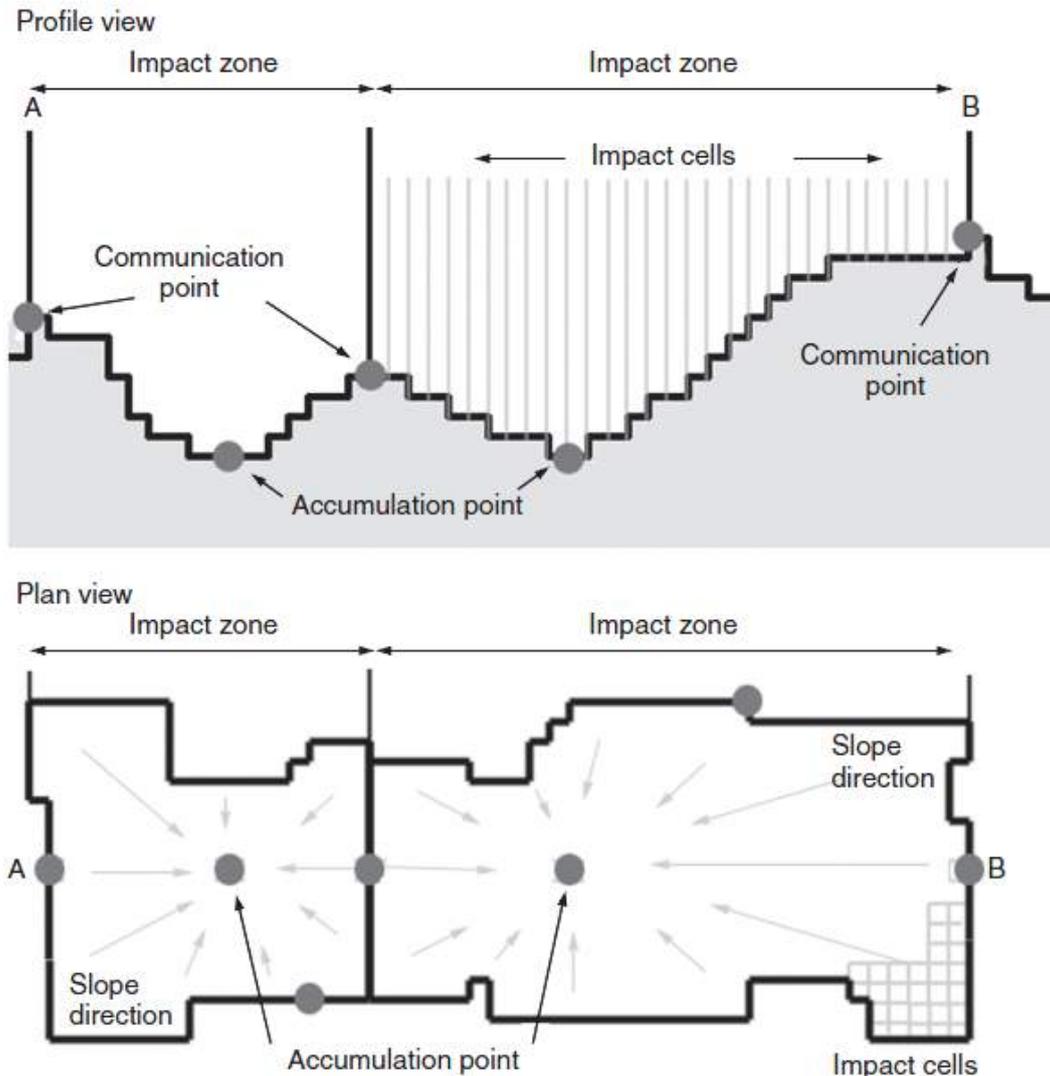


Figura 52. Representación conceptual de los Puntos de Acumulación y Comunicación en una IZ (Gouldby et al., 2008)

Donde Q_f es el flujo que pasa a través de la interfaz (m^3/s), Q_p es el flujo en cada sub-elemento celda (m^3/s), Δt es el paso de tiempo (s), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), A_p es el área de la celda (m^2), R_p es el radio hidráulico, que incluye fricción vertical y horizontal (m), n es el coeficiente de rugosidad de Manning y S_f es la pendiente de la superficie del agua, calculada como la diferencia entre niveles de IZs adyacentes dividida entre la distancia que separa sus centroides.

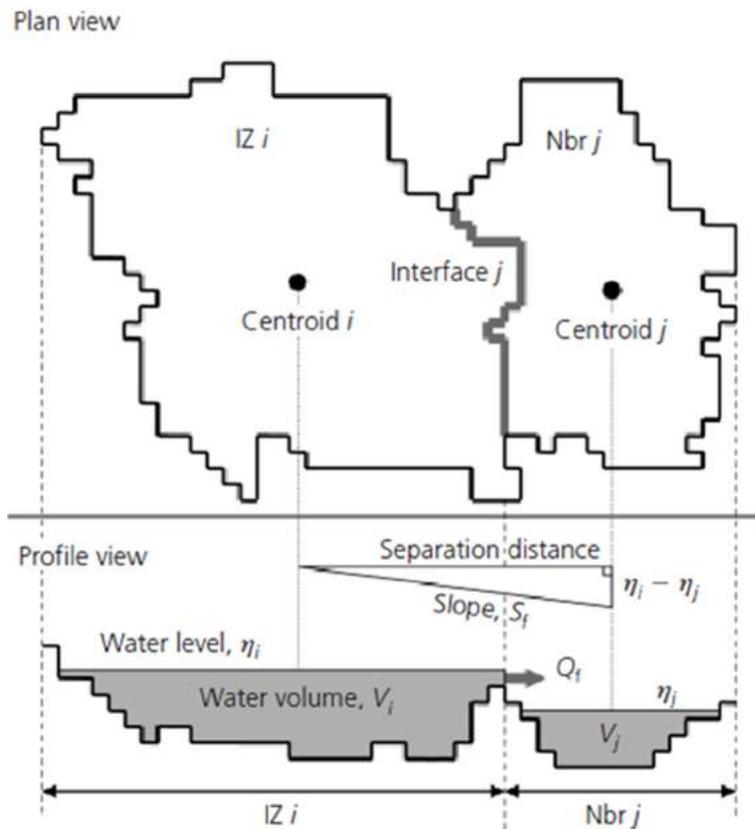


Figura 53. Representación conceptual de dos IZs adyacentes (Jamieson et al., 2012).

Una vez iniciada la simulación, ésta progresa mediante la aplicación de la ecuación de continuidad (ley de conservación de la masa) para cada IZ:

$$V_i^{t+\Delta t} = V_i^t + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^n Q_f^{t+\Delta t} \quad (48)$$

Donde V_i es el volumen de la IZ_{*i*} (m³) y n es el conjunto de IZs adyacentes. La estabilidad del modelo y, por tanto, su paso de tiempo adaptativo, están sujetos a la condición de Courant-Freidrichs-Lewy (CFL), que se satisface asegurando que el dominio de dependencia de las interfaces de una IZ no excede el área de la IZ. El máximo paso de tiempo admisible viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_{max} = \alpha_{min} \frac{A_i^t}{\sum_j w_f \cdot \max(\|u_i^t\| + c_i^t, \|u_j^t\| + c_j^t)} \quad (49)$$

Donde α es el parámetro utilizado para escalar el paso de tiempo, A_i es el área de la IZ_{*i*} (m²), w_f es la anchura de la interfaz (m), $\|u_i\|$ es la magnitud del vector velocidad de la IZ_{*i*} (m/s) y c_i es la celeridad de la onda (m/s). El hecho de que RFSM-EDA tenga como sub-elemento de la malla computacional la propia topografía es una ventaja y a la vez una limitación pues la resolución del MDT restringe la calidad y fiabilidad de los resultados del modelo.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española (28-5316)



Erosión

16 de Noviembre de 2020

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS.....	2
2. REVISIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES.....	4
3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	6
3.1. Regionalización del oleaje y propagación a rotura.....	8
3.2. Modelo de evolución de la línea de costa	10
3.2.1. Perfilado de la línea de costa	12
3.2.2. Ecuación de gobierno.....	13
3.2.3. Efecto de las estructuras.....	16
3.2.4. Algoritmo de asimilación de observaciones	20
3.3. Resultados potenciales	22
4. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN.....	24
4.1. Descripción general de la zona de estudio	24
4.2. Regionalización del oleaje y propagación a rotura.....	29
4.3. Modelado de la erosión.....	31
5. APROXIMACIÓN SIMPLIFICADA.....	66
6. CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS	69
ANEXO II. FILTRO EXTENDIDO DE KALMAN.....	82
ANEXO III. TABLAS RESUMEN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y ESTADÍSTICOS	87

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el cálculo de proyecciones de erosión costera.....	6
Figura 2. Diagrama de flujo de entradas y resultados de cada etapa de cálculo de las proyecciones de erosión.....	7
Figura 3. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para regionalizar las proyecciones de oleaje y propagarlas hasta la rotura considerando los efectos de la difracción.	8
Figura 4. Esquema de las distintas zonas afectadas por la difracción tras una estructura.....	10
Figura 5. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para modelar la erosión costera.....	11
Figura 6. Parametrización del perfil base.....	12
Figura 7. Esquema del cálculo del transporte longitudinal según el modelo de una línea.....	14
Figura 8. Modelado de la retención de sedimento tras una estructura.	17
Figura 9. Ejemplo teórico de la respuesta de la línea de costa frente a un espigón, primer año del análisis.....	18
Figura 10. Respuesta de la línea de costa ante distintas actuaciones antrópicas. En el panel a) se muestra un espigón, en el b) un dique exento que genera un tómbolo en su trasdós, en el c) el giro de una playa encajada protegida por una escollera y en el d) la difusión de un relleno en una playa rectilínea encajada.	19
Figura 11. Convergencia del filtro eKF hacia la solución teórica en función de la duración y frecuencia de las observaciones.	21
Figura 12. Dinámica sedimentaria del tramo de estudio.	25
Figura 13. Identificación de la zona de estudio y de sus unidades fisiográficas. En verde, unidad fisiográfica norte (Castellón-Burriana) y en rojo, unidad fisiográfica sur (Burriana-Sagunto)	25
Figura 14. Principales playas de la zona unidad fisiográfica norte. Enmarcada en rojo, la playa de Torre, en verde la playa del Grao de Burriana.	26
Figura 15. Algunas playas de la unidad fisiográfica sur. En rojo la playa de Nules, en verde, la playa de Moncófar.	27
Figura 16. Algunas playas de la unidad fisiográfica sur. En rojo la playa de Chilches, en verde la playa de Llosa, en azul la playa de Almenara, en magenta la playa de Corinto y en azul cian la playa de Almardá.....	28
Figura 17. Algunas playas de la unidad fisiográfica sur. En rojo la playa de Canet de Belenguer y en verde la playa del puerto de Sagunto.	29
Figura 18. Topo-batimetría de la zona de estudio y contorno de la malla general (G11) y de detalle (M101, M1102, M1103 y M1104).....	30
Figura 19. Casos seleccionados (puntos rojos) del total (puntos negros) del total de estados de mar horarios del hindcast GOW-ERA5 en el espacio de las tres primeras EOFs (73% de la varianza total). 30	
Figura 20. Dos de las 500 propagaciones del hindcast. El mapa de color representa la altura de ola y los vectores la dirección de propagación. Los puntos negros son los puntos de forzamiento del modelo y los rojos representan los puntos objetivo (en la batimétrica de 10 metros) en los que se realiza la reconstrucción con RBFs.	31
Figura 21. Perfiles empleados en la discretización espacial del dominio.	32
Figura 22. Detalle de los perfiles en la playa de Burriana (panel izquierdo) y Moncófar (panel derecho). La línea magenta representa la línea no erosionable.	33
Figura 23. Detalle de los perfiles empleados en la discretización espacial en las principales playas del caso de estudio.....	34
Figura 24. Muestras sedimentológicas puntuales en las provincias de Castellón y Valencia.	35
Figura 25. Cálculo del D50 en cada perfil. A la izquierda, polígonos de Voronoi y perfiles. A la derecha, esquema de los resultados obtenidos en cada perfil.....	36

Figura 26. Características sedimentológicas en la zona de estudio delimitada por la extensión de los perfiles. Se muestran los polígonos de Voronoi y los diferentes perfiles (en trazo discontinuo). Los puntos discretos se corresponden con los puntos medios de las intersecciones de cada perfil con los polígonos de Voronoi	36
Figura 27. Detección de la línea de costa en la playa de la Torre a partir de una imagen de Landsat-8 (panel superior) y en la playa del Puerto de Sagunto a partir de una imagen de Sentinel 2(panel inferior) mediante el algoritmo Coast-Sat.....	38
Figura 28. Calibración del modelo durante el periodo histórico 1990-2019. En el panel izquierdo se representan los perfiles sobre la zona de estudio (trazo negro discontinuo). En el panel derecho se representan las series de evolución de la línea de costa simulada (trazo negro continuo) y las observaciones (puntos de colores). El color del marco de las series simuladas y de las observaciones coincide con los perfiles correspondientes resaltados en el panel izquierdo.....	40
Figura 29. Evolución temporal de la línea de costa en un perfil en la playa de Nules. En el panel superior se representa la línea de costa (trazo negro) y las observaciones (puntos grises) con respecto a una referencia situada en el punto inicial del perfil en costa. En los paneles inferiores se representa la evolución de los parámetros libres del modelo en trazo negro, mientras que en gris se representa la evolución de la incertidumbre asociada al parámetro. El modelo se calibra mediante el filtro extendido de Kalman hasta 2015 mientras que durante el periodo 2015-2020 (resaltado en azul) se valida la calibración	41
Figura 30. Líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas para los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. Los diferentes paneles se corresponden con las principales playas del tramo de estudio.....	43
Figura 31. Detalle de las líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas para los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. En el panel izquierdo se muestra la playa de Chilches y en el panel derecho se muestra la playa de Llosa.	44
Figura 32. Líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas para los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. Los diferentes paneles se corresponden con las principales playas del tramo de estudio.....	45
Figura 33. Detalle de las líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas entre los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. En el panel izquierdo se muestra la playa de Chilches y en el panel derecho se muestra la playa de Llosa.....	46
Figura 34. Variación estacional de la línea de costa media en los horizontes temporales 2050 y 2100 promediada entre los cinco RCMs y entre las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. La línea continua representa la posición media de la línea de costa en el horizonte temporal y promediada entre las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs. La banda representa la envolvente (máxima variabilidad) de las posiciones medias de los inviernos (octubre-marzo) y los veranos (abril-septiembre) en los horizontes temporales 2050 y 2100 de las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs.....	47
Figura 35. Variación estacional de la línea de costa media en los horizontes temporales 2050 y 2100 promediada entre los cinco RCMs y entre las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. La línea continua representa la posición media de la línea de costa en el horizonte temporal y promediada entre las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs. La banda representa la envolvente (máxima variabilidad) de las posiciones medias de los inviernos (octubre-marzo) y los veranos (abril-septiembre) en los horizontes temporales 2050 y 2100 de las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs.....	48
Figura 36. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2050 con respecto al año 2010 para el RCP4.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2050	

para el RCP4.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 22). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo. 49

Figura 37. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2050 con respecto al año 2010 para el RCP8.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2050 para el RCP8.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 22). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo. 50

Figura 38. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2100 con respecto al año 2010 para el RCP4.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2100 para el RCP4.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 22). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo. 51

Figura 39. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2100 con respecto al año 2010 para el RCP8.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2100 para el RCP8.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 22). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo. 52

Figura 40. Análisis de la contribución relativa de los diferentes procesos modelados (transporte longitudinal, transversal y ANMM) a la variación de la línea de costa para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en las principales playas. Los sectores circulares representan las contribuciones medias entre los diferentes RCPs y trayectorias de ANMM. La incertidumbre asociada a los RCMs y a las trayectorias de ANMM se ha representado mediante arcos circulares concéntricos cuyos extremos determinan la contribución mínima y máxima de los procesos correspondientes. 53

Figura 41. Análisis de la contribución relativa de los diferentes procesos modelados (transporte longitudinal, transversal y ANMM) a la variación de la línea de costa para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en las playas de Torre (panel izquierdo) y Chilches (panel derecho). Los sectores circulares representan las contribuciones medias entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM. Los anillos concéntricos a los sectores representan las contribuciones mínima y máxima de los diferentes procesos asociados a los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM. La incertidumbre asociada a los RCMs y a las trayectorias de ANMM se ha representado mediante arcos circulares concéntricos cuyos extremos determinan la contribución mínima y máxima de los procesos correspondientes. 54

Figura 42. Ajuste extremal estacionario de los retrocesos en cuatro perfiles representativos en los periodos 2026-2045 (paneles a y c) y 2081-2100 (paneles b y d) para los escenarios RCP4.5 (paneles a y b) y RCP8.5 (paneles c y d). El ajuste de cada RCM se muestra con diferentes símbolos mientras que los colores distinguen las trayectorias de ANMM. 56

Figura 43. Ajuste extremal estacionario de los retrocesos en el perfil 200 de la playa de Llosa del periodo 2026-2045 para el escenario RCP4.5. El ajuste de cada RCM se muestra con diferentes símbolos mientras que los colores distinguen las trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART. 57

Figura 44. Ajuste extremal estacionario de los retrocesos en el perfil 200 de la playa de Llosa del periodo 2081-2100 para el escenario RCP8.5. El ajuste de cada RCM se muestra con diferentes símbolos mientras que los colores distinguen las trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART. 57

Figura 45. Comparación de retrocesos extremos en diferentes horizontes temporales calculados sobre la línea base de 1990 para el escenario RCP4.5. La línea gris sin bandas de confianza hace referencia a los retrocesos extremos del presente (calculados considerando el periodo 1990-2020). Las líneas azul y magenta representan los retrocesos extremos en los periodos 2026-2045 y 2081-2100 promediados entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. Las bandas de confianza representan la envolvente máxima y mínima de los retrocesos extremos de los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en los dos periodos futuros. 58

Figura 46. Comparación de retrocesos extremos en diferentes horizontes temporales calculados sobre la línea base de 1990 para el escenario RCP8.5. La línea gris sin bandas de confianza hace referencia a los retrocesos extremos del presente (calculados considerando el periodo 1990-2020). Las líneas azul y magenta representan los retrocesos extremos en los periodos 2026-2045 y 2081-2100 promediados entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. Las bandas de confianza representan la envolvente máxima y mínima de los retrocesos extremos de los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en los dos periodos futuros. 59

Figura 47. Representación espacial de los retrocesos extremos en la playa de Torre (paneles a y b) y Llosa (paneles c y d). Se representan los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno promediados entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en los periodos 2026-2045 (líneas en tono azul) y 2081-2100 (líneas en tono magenta) para los escenarios RCP4.5 (paneles a y b) y RCP8.5 paneles (c y d). 60

Figura 48. Metodología para el análisis pseudo no-estacionario extremal propuesto por Mentaschi et al. (2016). 61

Figura 49. Evolución temporal de los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno para el escenario RCP4.5 de acuerdo con el análisis pseudo no-estacionario en cuatro perfiles representativos de la zona de estudio. En los paneles central y derecho, la línea base media (línea negra discontinua) y

su incertidumbre, representada por la envolvente de RCMs y trayectorias de ANMM (banda gris), responden a la evolución de la posición media de la línea de costa y se obtienen aplicando una media móvil de 5 años de ventana a la serie temporal de retrocesos. En los paneles central y derecho, las líneas continuas representan la evolución temporal de los retrocesos extremos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno y las bandas sombreadas la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM representadas mediante su envolvente. En el panel central se muestra el análisis pseudo no-estacionario en el periodo 2026-2045, mientras que el panel derecho corresponde con el 2081-2100. 62

Figura 50. Evolución temporal de los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 de acuerdo con el análisis pseudo no-estacionario en cuatro perfiles representativos de la zona de estudio. En los paneles central y derecho, la línea base media (línea negra discontinua) y su incertidumbre, representada por la envolvente de RCMs y trayectorias de ANMM (banda gris), responden a la evolución de la posición media de la línea de costa y se obtienen aplicando una media móvil de 5 años de ventana a la serie temporal de retrocesos. En los paneles central y derecho, las líneas continuas representan la evolución temporal de los retrocesos extremos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno y las bandas sombreadas la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM representadas mediante su envolvente. En el panel central se muestra el análisis pseudo no-estacionario en el periodo 2026-2045, mientras que el panel derecho corresponde con el 2081-2100. 63

Figura 51. Representación espacial de los retrocesos extremos en las playas de Torre (paneles a y b) y Llosa (paneles c y d) de acuerdo con el análisis pseudo no-estacionario para el escenario RCP8.5. Se representan los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno promedios entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en el año 2050 (paneles a y c) 2100 (paneles b y d). 64

Figura 52. Representación espacial de los retrocesos extremos en el año 2046 para el escenario RCP8.5. Las líneas continuas representan los retrocesos medios de 5, 15 y 50 años de periodos de retorno mientras que las bandas sombreadas corresponden a la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM. 65

Figura 53. Representación espacial de los retrocesos extremos en el año 2100 para el escenario RCP8.5. Las líneas continuas representan los retrocesos medios de 5, 15 y 50 años de periodos de retorno mientras que las bandas sombreadas corresponden a la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM. 65

Figura 54. Definición espacial del dominio de cálculo para el downscaling híbrido 71

Figura 55. Selección de casos (en rojo) del total de 35 años de estados de mar horarios del hindcast (en negro), proyectados en el espacio de las tres primeras EOFs (73% de la varianza total). 74

Figura 56. Dos de las 500 propagaciones del hindcast. El mapa de color representa la altura de ola y los vectores la dirección de propagación. Los puntos negros son los puntos de forzamiento del modelo y los rojos representan los puntos objetivo en los que se realiza la reconstrucción con RBFs. 75

Figura 57. Validación de la selección y reconstrucción del *hindcast*. 76

Figura 58. Esquema de las distintas zonas afectadas por la difracción. 78

Figura 59. Ejemplo de aplicación de la corrección por difracción en el entorno de un espigón. 81

Figura 60. Esquema de la selección de eventos de erosión y acreción. En el caso de ejemplo, puesto que $Y_{st,ero,n}$ es mayor que $Y_{st,n-1}$ se trata de un evento de acreción 84

Figura 61. Ejemplo de la propagación de la media y la covarianza del vector de estado. En el panel izquierdo, método basado en el criterio experto. En el panel central, el método probabilístico. En el panel derecho el método basado en el filtro extendido de Kalman. 86

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los resultados potenciales de la aplicación de la metodología.	23
Tabla 2. Filtro extendido de Kalman.....	83
Tabla 3. Actualización del Jacobiano en función de la naturaleza erosiva o de acreción del proceso .	85
Tabla 4. Propagación de la covarianza del error del proceso	85
Tabla 5. Características geométricas de las principales playas del estudio con respecto a la línea de costa media del 2010	87
Tabla 6. Características sedimentológicas medias de las principales playas de la zona de estudio.	87
Tabla 7. Características geométricas del perfil activo representativo de las principales playas del estudio.....	88
Tabla 8. Diferentes estadísticos del error en el histórico. Valores sin subrayar con asimilación de observaciones, valores subrayados sin asimilación.	88
Tabla 9. Resumen de las actuaciones identificadas en el periodo 1990-2020 en el tramo de estudio	89

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- ANMM: Incremento del Nivel Medio del Mar como consecuencia del cambio climático, en metros.
- EOF: Función Empírica Ortogonal (del inglés, "Empirical Orthogonal Function").
- GCM: Modelo Climático General (del inglés, "Global Climate Model"), simulando las interacciones atmósfera-océano a escala planetaria.
- GOW: base de datos de oleaje en aguas indefinidas (del inglés, "Global Ocena Waves").
- MA: Marea Astronómica, en metros.
- MDT: Modelo Digital del Terreno
- MM: Marea Meteorológica, en metros.
- RBFs: Funciones de Base Radial, (del inglés "Radial Basis Functions").
- RCM: Modelo Climático Regional (del inglés, "Regional Climate Model"), simulando los procesos atmósfera-océano a escala regional considerando los resultados de los modelos GCM como condiciones de contorno para el aumento de resolución espacio-temporal.
- RCP: Trayectorias de Concentración Representativas, (del inglés, "Representative Concentration Pathway"). Constituyen los escenarios futuros de cambio climático función de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero caracterizadas por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m².
- RCP4.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de gases de efecto invernadero con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 4.5 W/m².
- RCP8.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de gases de efecto invernadero con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 8.5 W/m².
- RMSE: error cuadrático medio (del inglés, "root-mean-square error").
- SWAN: Modelo numérico de propagación del oleaje (del inglés, "Simulating Waves Nearshore").

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

- A : parámetro de Dean.
- α : diferencia entre el ángulo del oleaje incidente en rotura y la normal hacia costa de un transecto, en grados sexagesimales.
- α_c : ángulo de la normal hacia costa de un transecto, en grados sexagesimales.
- α_w : ángulo del oleaje incidente en rotura, en grados sexagesimales.
- $c_{g,b}$: velocidad de grupo en rotura, en metros por segundo.
- dc : Profundidad de cierre.
- dM : Distancia al mar desde la línea de referencia que define el perfil.
- dT : Distancia a tierra desde la línea de referencia que define el perfil.
- D_{50} : tamaño medio del grano, en milímetros.
- $D_{50,ref}$: tamaño medio del grano representativo de un perfil, en milímetros.
- ρ : densidad del agua, en kilogramos por metro cúbico.
- ρ_s : densidad seca del sedimento, en kilogramos por metro cúbico.
- ΔY_0 : posición de la línea de costa base, en metros.
- ΔY_{eq} : cambio en la posición de equilibrio debido a un determinado nivel del mar local, en metros.
- e_i : Espaciamiento entre los perfiles de base.
- G_i : Malla general de cómputo para la regionalización híbrida.
- H_b : altura de ola en rotura, en metros.
- H_{bd} : altura de ola en rotura corregida por difracción, en metros,
- h_b : profundidad de rotura, en metros.
- H_{berm} : cota de la berma
- $H_{s,12}$: altura de ola superada 12 horas al año, en metros.
- K_c : constante del modelo de transporte transversal.
- $K_{c,ero}$: constante de erosión.
- $K_{c,acr}$: constante de erosión.
- K_e : coeficiente que tiene en cuenta el efecto de las estructuras.
- K_{p1} : constante de calibración empírica del modelo de transporte longitudinal.
- κ : desviación con respecto a la matriz de covarianza inicial del error del vector estado.
- L_e : distancia entre el morro del espigón y la línea de costa a barlomar de una estructura, en metros.
- L_i : longitud de los transectos, en metros.
- M_i : Malla de detalle de cómputo para la regionalización híbrida.
- \vec{n} : Dirección normal a una línea.

- n_j : Número de perfiles de base.
- n : constante que depende de la formulación del transporte longitudinal.
- P : matriz de covarianza del error.
- q : volumen de arena aportado o retirado por unidad de longitud de línea de costa y tiempo.
- Q : gradiente longitudinal del transporte sólido de sedimento.
- Q_0 : transporte longitudinal neto función del oleaje incidente y de las propiedades del sedimento.
- R_{Bruun} : desplazamiento hacia tierra debido al aumento del nivel medio del mar, en metros.
- $\tan\beta_f$: Pendiente intermareal o del frente de la playa.
- $\tan\beta_n$: Pendiente del perfil activo.
- T_p : Periodo de pico, en segundos.
- V : volumen de un relleno de arena.
- v_{lp} : tendencia lineal que recoge procesos no resueltos
- W_b^* : anchura de la zona de rompientes, en metros.
- w_i : Punto de forzamiento de oleaje.
- Y : posición de la línea de costa, en metros.
- $Y_{obs,i}$: posición de la línea de costa observada en un instante de tiempo, en metros.
- \bar{Y}_{obs} : promedio de la posición de la línea de costa observada, en metros.
- Y_{PMVE} : posición de la línea de costa de pleamar media viva equinoccial medida desde el punto en tierra del perfil, en metros.
- Y_{pt} : posición de la línea de costa instantánea, en metros.
- $Y_{pt,ero}$: posición de la línea de costa instantánea en erosión, en metros.
- $Y_{pt,acr}$: posición de la línea de costa instantánea en erosión, en metros.
- Y_{pt}^{eq} : posición de la línea de costa de equilibrio, en metros.
- $Y_{sim,i}$: posición de la línea de costa simulada en un instante de tiempo, en metros.
- \bar{Y}_{sim} : promedio de la posición de la línea de costa simulada, en metros.
- Y_{WL} : posición de la línea de costa medida desde el punto en tierra del perfil, en metros.
- Z_{PMVE} : nivel de la pleamar media viva equinoccial, en metros.
- Z_{WL} : nivel de marea astronómica y meteorológica, en metros.
- θ_b : ángulo del oleaje en rotura, en grados sexagesimales.

RESUMEN EJECUTIVO

En esta parte metodológica se propone una metodología para analizar los impactos del cambio climático sobre la evolución de la línea de costa futura considerando las fuentes de incertidumbre asociadas. Para ello, se ha desarrollado un nuevo modelo de erosión/acreción que reproduce la respuesta de la costa frente a la acción conjunta del oleaje y el nivel del mar, e incluyendo el efecto de actuaciones antrópicas (estructuras y rellenos). La metodología incorpora un algoritmo de asimilación de observaciones en el modelo que permite mejorar considerablemente los resultados.

La metodología desarrollada se ha implementado en un tramo costero del Mediterráneo, situado entre el Puerto de Castellón y el Puerto de Sagunto, de alta complejidad, debido a su gran nivel de antropización. La metodología se ha aplicado a escala de unidad de gestión, sin embargo, es aplicable a cualquier escala espacial.

La zona de estudio se ha discretizado en celdas litorales delimitadas por transectos en los que se ha aplicado el nuevo modelo. Para calibrar y validar el modelo se han utilizado perfiles medidos y observaciones de líneas de costa obtenidas a partir de imágenes de satélite. El modelo se ha forzado con las proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica elaboradas en el marco de este trabajo y con distintas trayectorias de aumento del nivel medio del mar, además de con la marea astronómica reconstruida. Como resultado, para los escenarios y periodos de tiempo considerados, se han obtenido potenciales evoluciones de la línea de costa futura, así como estadísticos que pueden ser relevantes para la gestión del litoral, como, por ejemplo, cambios en la posición media de la línea de costa y eventos extremos de erosión, expresados con su incertidumbre para facilitar su comprensión al gestor.

El informe se estructura de la siguiente forma. En primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte relativo a las metodologías empleadas hoy día para elaborar proyecciones de evolución de la línea de costa, para poner de manifiesto los avances que este trabajo supone frente al conocimiento presente y su adecuación a la costa española. En segundo lugar, se describe la metodología, que ha sido estructurada en dos bloques principales: (1) la regionalización de las proyecciones de las dinámicas relevantes en la zona de interés y (2) el modelado de la evolución de la línea de costa. A continuación, se detalla la aplicación de la metodología a la zona de estudio seleccionada y se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, se proporcionan recomendaciones para simplificar algunos de los elementos propuestos en la metodología y se discuten las implicaciones que tendrían sobre los resultados y su incertidumbre. Con ello se pretende facilitar la aplicación de la metodología a diferentes niveles de exigencia en la toma de decisiones poniendo de manifiesto las implicaciones que las simplificaciones pueden suponer.

1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS

La evolución de la costa es el resultado de la interacción de un conjunto de procesos geológicos e hidrodinámicos, con un cierto grado de interrelación entre ellos, a los que hay que agregar la intervención humana. El clima es un factor determinante en estas interrelaciones y, por tanto, obtener proyecciones fiables sobre la evolución de largo plazo de la línea de costa es una de las bases esenciales para planificar la adaptación de la costa a los efectos derivados del cambio climático, reduciendo sus riesgos y aprovechando sus oportunidades.

Mediante la metodología aquí expuesta se pretende:

1. Dotar a los responsables de la gestión de la costa de una herramienta para evaluar los potenciales riesgos derivados del cambio climático originados por las modificaciones (erosión/acreción) de la línea de la costa incluyendo las actuaciones de origen antrópico.
2. Facilitar la incorporación de estrategias de adaptación flexible a la gestión de la costa española.
3. Analizar, evaluar y priorizar diferentes medidas de adaptación a lo largo de la costa española que sean eficaces y coste-eficientes.
4. Promocionar la integración de herramientas avanzadas de modelado y las observaciones para conseguir una más eficiente toma de decisiones y un mejor uso de los recursos disponibles.
5. Identificar qué aspectos será necesario desarrollar en el corto y medio plazo para mejorar las capacidades disponibles para gestionar la costa ante un marco de incertidumbre.

Para ello, la metodología propuesta pretende responder a cuestiones tales como:

- ¿Cuál será la evolución de un tramo de costa para un horizonte temporal y un escenario de emisiones determinado?
- ¿Cuáles serán los retrocesos de largo plazo inducidos por el aumento del nivel medio del mar en un tramo de costa determinado?
- ¿Qué playas pueden desaparecer de forma permanente si no se implementan medidas de adaptación? ¿Cuándo? ¿En qué escenarios de emisiones?
- ¿Cómo se modificará la variabilidad invierno-verano presente ante diferentes escenarios de cambio climático?
- Para diferentes escenarios de cambio climático ¿Cómo se van a modificar la intensidad y frecuencia de los eventos extremos de erosión? ¿Cómo puede afectar esto al Dominio Público Marítimo Terrestre y a los riesgos sobre la población, activos y actividad en la costa?
- ¿Cuál es el efecto de las obras de protección e infraestructuras presentes sobre la respuesta futura de la costa?
- ¿Cuáles son las estrategias de adaptación posibles ante diferentes escenarios y cuál sería la respuesta de la costa en caso de ser implementadas?

- ¿Cuáles son las incertidumbres asociadas a las evaluaciones anteriores y cómo es posible integrarlas en la toma de decisiones?
- Otras

En cuanto a las premisas se refiere, es necesario hacer constar las siguientes:

- La metodología propuesta y herramientas derivadas pretenden incorporar el mejor conocimiento científico-técnico disponible.
- La metodología presentada se formula sobre un marco conceptual común, siendo modular, en cuanto al conjunto de procesos que incluye, y multinivel en su grado de aplicación. Esto permite adaptar su aplicación a diferentes niveles de exigencia, complejidad y a los recursos, datos y capacidades disponibles. Esta aproximación al problema dota de una enorme flexibilidad a la metodología para aplicaciones diversas y por diferentes usuarios.
- Sobre la base del punto anterior, la metodología es válida para cualquier tramo de la costa española con diferentes niveles de aplicación y, por tanto, de la calidad de los resultados esperables.
- Aunque la metodología propuesta se ha enfocado al análisis de proyecciones futuras, es perfectamente aplicable para analizar la evolución histórica de la línea de costa.
- Dada su objetivo principal, analizar la evolución futura ante diferentes escenarios de cambio climático y horizontes temporales, se ha primado como uno de los elementos esenciales de la misma la incorporación de las incertidumbres de las proyecciones climáticas en el modelado y en la comunicación de los resultados.

2. REVISIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES

Durante las últimas décadas, se ha prestado gran atención al estudio de la respuesta de la línea de costa frente al cambio climático. A pesar de su controversia (Cooper & Pilkey, 2004), la Regla de Bruun (Bruun, 1962) sigue siendo utilizada por ingenieros de costas de todo el mundo como predictor del retroceso de la línea de costa debido al aumento del nivel medio del mar (ANMM). No obstante, el análisis de evolución de la línea de costa en el contexto del cambio climático, es decir, a la escala de décadas o centenas de años requiere el modelado conjunto de los efectos del ANMM (largo plazo) y de los eventos extremos de oleaje y nivel del mar (corto plazo), algo que todavía no está resuelto en su totalidad en la literatura (Robinet, 2018; Toimil et al., 2020a). Además, las proyecciones de erosión tienen mucha incertidumbre, incluso más que las de inundación, añadiendo un mayor grado de complejidad al problema. Parte de esta incertidumbre viene heredada de la incertidumbre intrínseca del cambio climático y de sus efectos, mientras que otra parte se debe a que todavía tenemos un conocimiento incompleto del funcionamiento de la dinámica litoral (Toimil et al., 2020b). Esto quiere decir que la práctica común, utilizada en muchos países del mundo, de adoptar un único valor del retroceso de la línea de costa debido a un único valor de ANMM es inadecuada para los nuevos marcos de gestión de riesgos, que exigen estimaciones que (1) consideren el efecto combinado de diversos factores de forzamiento y respuesta y (2) incorporen la incertidumbre asociada a los mismos en el resultado (p.ej., expresada a través de bandas de confianza).

Pese a que esta necesidad de nuevas metodologías es ampliamente reconocida por la comunidad científica (Toimil et al., 2020b), en la actualidad hay todavía muy pocos estudios que desarrollen proyecciones que no limiten los forzamientos al ANMM y que tengan cierto nivel de desarrollo probabilístico para incluir la incertidumbre. Por ejemplo, a día de hoy sólo existen tres estudios que hayan utilizado proyecciones dinámicas de oleaje, aunque en ninguno de ellos se corrige el sesgo introducido por los modelos climáticos antes de utilizar esa información para calcular los cambios en la línea de costa. Esto último puede dar lugar a funciones de distribución de la erosión erróneas, reduciendo su capacidad de reproducir eventos extremos adecuadamente. Uno de estos trabajos es el desarrollado por Zacharioudaki & Reeve (2011), donde se modelan proyecciones de cambios en la línea de costa a fin de siglo debidos a cambios en los gradientes de transporte longitudinal. Para calcular este transporte, los autores usan proyecciones de oleaje considerando dos escenarios de emisiones y dos modelos climáticos. Otro estudio es el publicado por (Casas-Prat et al., 2016) donde, para calcular volúmenes de arena potencialmente erosionados por eventos extremos a fin de siglo, se utilizan proyecciones de oleaje para un único escenario de emisiones y para un conjunto de cinco combinaciones de modelos climáticos. Recientemente el USGS americano ha desarrollado una metodología (CoSMoS) para el cálculo de los impactos del cambio climático en la costa de California. Dentro de ese trabajo, Vitousek et al. (2017) publicaron un estudio sobre la evolución futura de la línea de costa en el que se modela el transporte longitudinal y transversal de sedimentos empleando proyecciones de oleaje para un único escenario de emisiones y un único modelo climático combinadas con siete posibles trayectorias de ANMM. Además, el modelo de evolución de la línea de costa tiene implementado un algoritmo de asimilación de observaciones que ayuda a calibrar el modelo y mejora la precisión de los resultados. Si bien el trabajo de Vitousek et al. (2017) es el más avanzado hasta la fecha en cuanto a la combinación de los procesos litorales modelados, el uso de un filtro de asimilación

y la aplicación de proyecciones de oleaje, éste no considera todas las variables que pueden influir en la erosión (p.ej., la marea meteorológica) y tampoco muestrea suficientemente la incertidumbre.

La costa española se caracteriza por muy diferentes vertientes y características morfodinámicas de gran diversidad. El nivel de ocupación de nuestras costas y los últimos eventos extremos experimentados han puesto de manifiesto que la gestión de la misma debe incorporar, de la manera más adecuada posible, las proyecciones de la evolución de la línea de costa considerando las diferentes dinámicas a las que se ve expuesta y considerando el alto nivel de antropización de la misma. Solo así podrán plantearse trayectorias de adaptación flexibles en un marco de incertidumbre y recursos limitados.

En este trabajo se desarrolla una metodología para la elaboración de proyecciones de erosión que aúna, por primera vez en la literatura, los siguientes elementos: a) proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológicas considerando 5 modelos climáticos (RCMs); b) la regionalización híbrida de las dinámicas a costa; c) el modelado del transporte de sedimentos longitudinal y transversal considerando la combinación de todos los forzamientos que juegan un papel clave en los cambios de la línea de costa (oleaje, marea meteorológica, marea astronómica y ANMM); d) la incorporación del efecto de actuaciones antrópicas y estructuras en el modelado de la erosión; y e) la implementación de un filtro de asimilación de datos en el modelo de erosión. Además, la metodología es aplicable a escala regional.

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología se ha estructurado en dos grandes bloques. El primero consiste en la regionalización o transferencia hasta la costa de las proyecciones dinámicas de oleaje desde profundidades indefinidas. Para ello se ha aplicado un método híbrido que combina modelos numéricos y técnicas estadísticas para propagar el oleaje a la batimétrica de 10 m. A continuación, las series completas de dinámicas se vuelven a propagar hasta la rotura, de forma más simplificada, pero incorporando el efecto de la difracción. El segundo bloque contiene la descripción del modelo de erosión costera desarrollado y describe brevemente sus ecuaciones de gobierno, cómo considerar la presencia de estructuras costeras en la línea de costa y en qué consiste el algoritmo de asimilación de observaciones.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de la metodología en el contexto del trabajo realizado en otros capítulos de este informe. El bloque inicial, descrito en la Tarea 2 del presente trabajo, consiste en la elaboración y preparación de las proyecciones de cambio climático de las dinámicas marinas causantes de la erosión. Los bloques 1 y 2 corresponden a la parte metodológica que se describe en esta sección. Finalmente, en el bloque 3 se indica los tipos de resultados que se derivan de la aplicación de la metodología propuesta y que se analizan con detalle en la sección 4 de este documento.

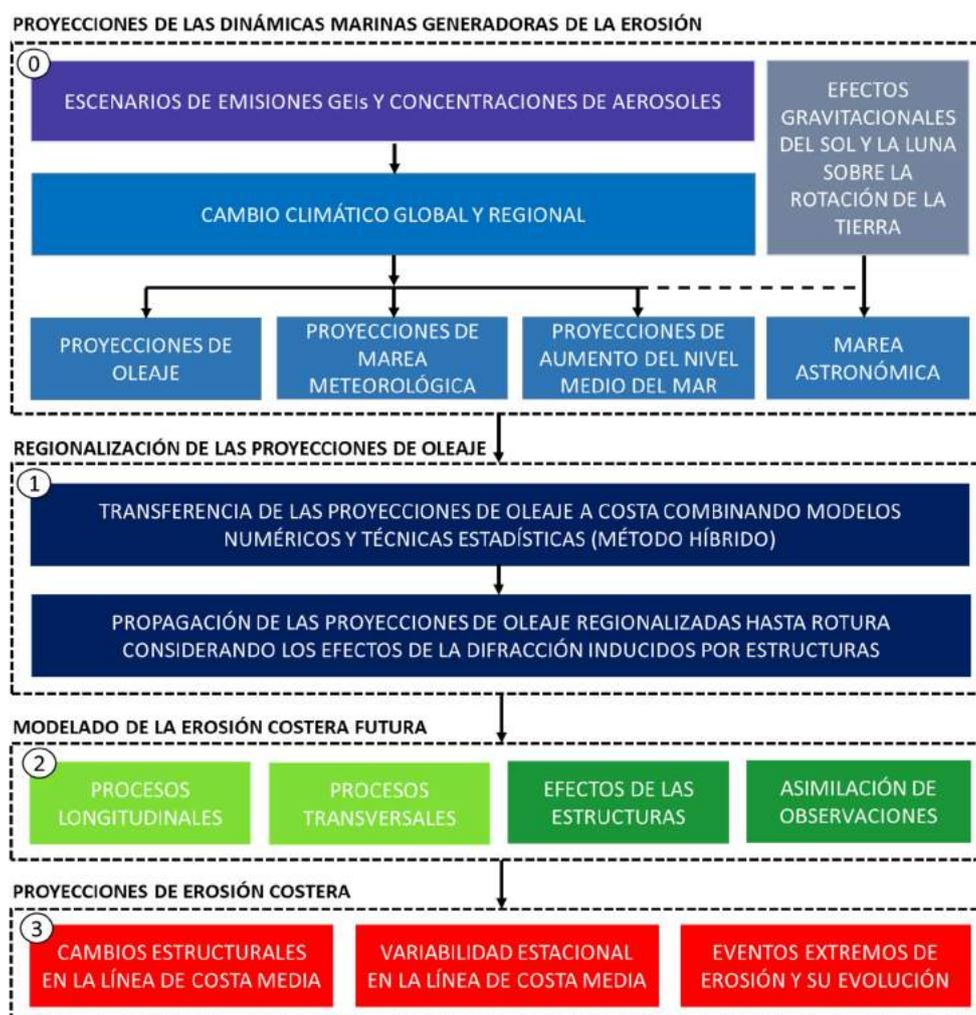


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el cálculo de proyecciones de erosión costera.

La Figura 2 relaciona el conjunto de datos de partida necesarios para desarrollar las proyecciones de erosión costera (dinámicas marinas, datos topo-batimétricos, tamaño del sedimento, temporalidad de las estructuras y observaciones de la línea de costa), las etapas de la metodología en las que intervienen (regionalización de las dinámicas, perfilado de la costa y modelado de la erosión) y los resultados, parciales y finales, que se derivan de las mismas (evoluciones horarias de la línea de costa futura y estadísticos de erosión asociados a condiciones medias y extremas). La etapa de regionalización de las dinámicas tiene como principales datos de partida las series proyectadas de las dinámicas y proporciona series de oleaje en costa y en rotura, considerando los efectos del nivel del mar y las estructuras, respectivamente. La etapa del perfilado de la costa tiene como datos iniciales la pendiente del perfil activo y el tamaño del sedimento. Utilizando como datos de entrada los perfiles obtenidos y las series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica, marea astronómica y ANMM, se ejecuta el modelo de erosión modular, que resuelve procesos transversales y longitudinales y utiliza observaciones de la línea de costa para la auto-calibración de sus parámetros. Como resultados finales, se obtienen evoluciones de la línea de costa, a partir de las cuales se infieren cambios estructurales (permanentes), la variabilidad estacional y eventos extremos.

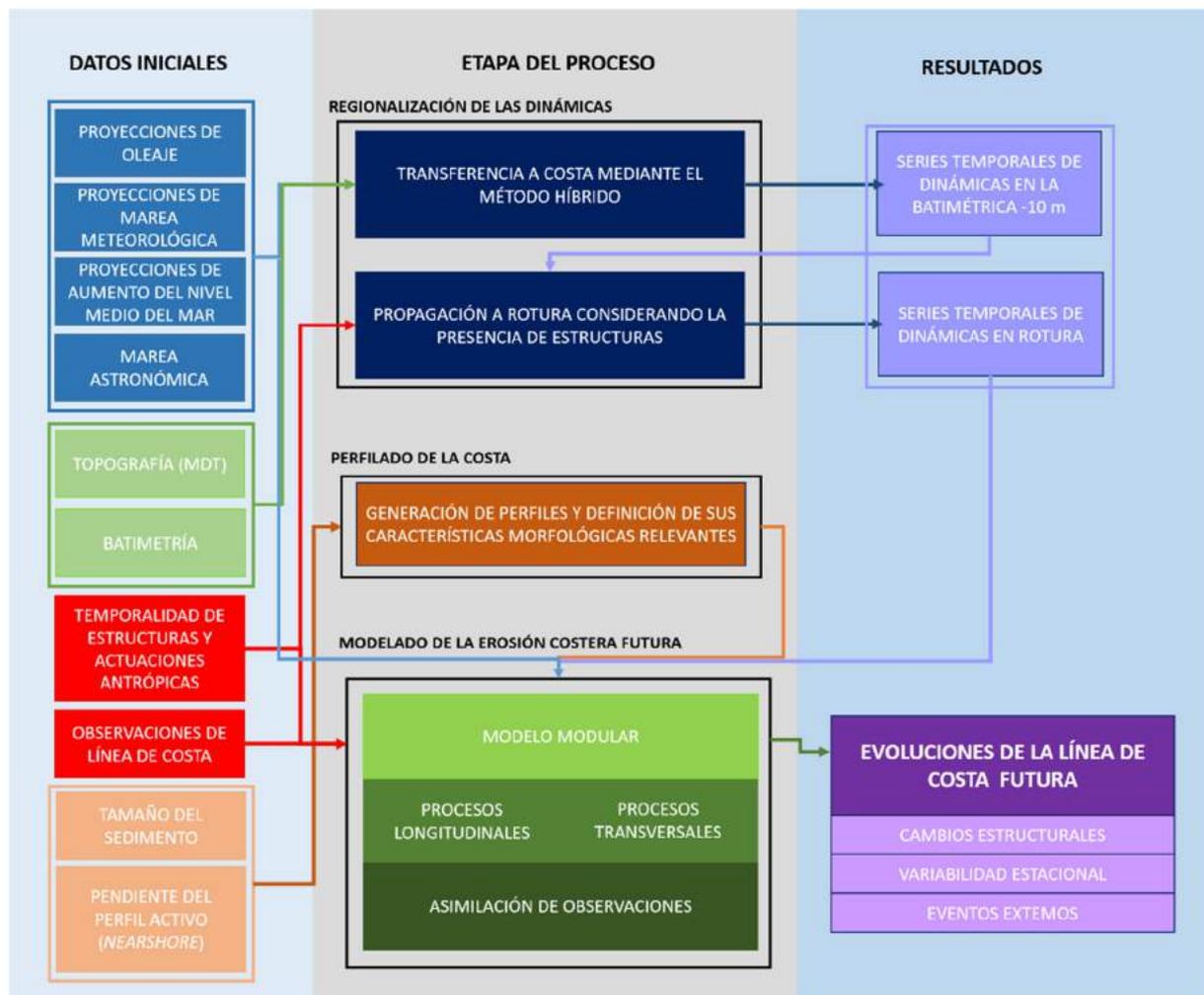


Figura 2. Diagrama de flujo de entradas y resultados de cada etapa de cálculo de las proyecciones de erosión.

3.1. Regionalización del oleaje y propagación a rotura

Para aplicar el modelo de erosión desarrollado se necesitan las propiedades del oleaje en rotura (en concreto, altura de ola, periodo y ángulo de rotura) e información del nivel del mar (marea meteorológica, marea astronómica, ANMM y set-up del oleaje). Las propiedades del oleaje en rotura son complejas de obtener debido a la influencia del calado (batimetría y nivel) sobre el que se propagan. La obtención de las dinámicas en rotura se realiza en dos etapas: la regionalización o transferencia de las proyecciones de oleaje a profundidades reducidas (batimétrica de 10 metros) y su propagación desde ese punto hasta rotura.

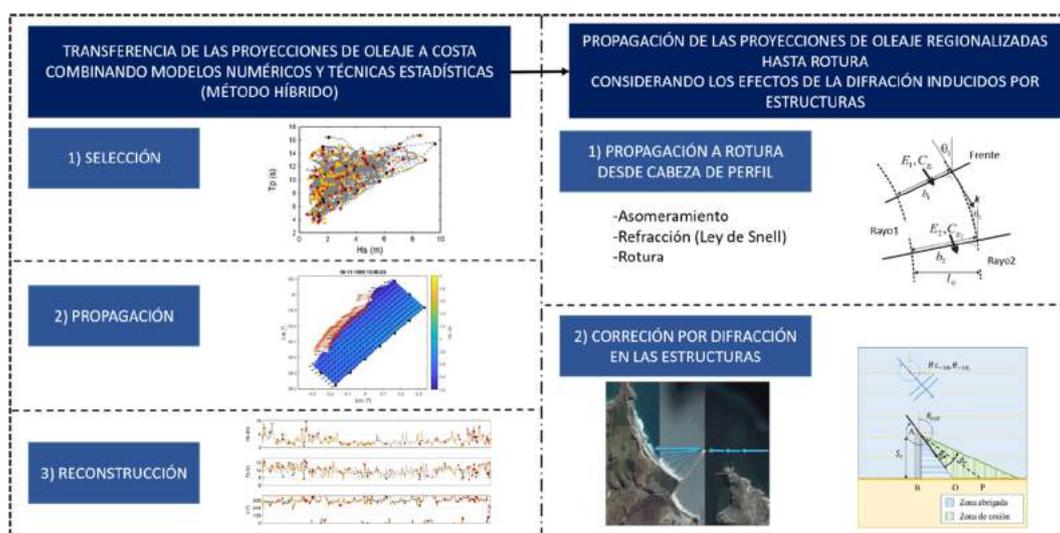


Figura 3. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para regionalizar las proyecciones de oleaje y propagarlas hasta la rotura considerando los efectos de la difracción.

Para facilitar la comprensión de la metodología en su conjunto y su reproducción, la explicación detallada de cada una de las etapas se recoge en el Anexo I.

Regionalización del oleaje

La regionalización de las proyecciones dinámicas de oleaje a la batimétrica de 10 metros se ha llevado a cabo a través de un método híbrido que combina modelado numérico y técnicas estadísticas (Camus et al., 2011). Para aplicar este método es necesario definir el dominio espacial de cálculo que estará limitado por los puntos que disponen de información de las dinámicas que se pretende propagar desde profundidades indefinidas (borde exterior de la malla general) y que asimismo contendrá los puntos en la batimétrica de 10 metros (incluidos en las mallas de detalle) en los que se quiere extraer las propiedades del oleaje propagado.

Una vez definido el dominio de cálculo, se puede proceder a la aplicación del método híbrido, que consta esencialmente de cuatro pasos (ver Figura 3):

1. El primer paso consiste en recopilar, en los puntos del contorno exterior de la malla general, información de oleaje (altura de ola, periodo medio, periodo de pico y dirección) en profundidades indefinidas, marea astronómica, marea meteorológica y nivel medio del mar. Las series temporales de oleaje y marea meteorológica proyectadas en esos puntos deben ser

- sometidas a un proceso de corrección del sesgo introducido por los modelos climáticos. La falta de esta corrección llevaría a un cálculo de la erosión incorrecto. Debido a la alta correlación entre las variables consideradas y para reducir los tiempos de cálculo de los siguientes pasos, se lleva a cabo un análisis de componentes principales. Este análisis permite reducir la dimensión de los datos, seleccionando sólo las componentes que expliquen la mayor parte de la varianza.
2. El segundo paso consiste en seleccionar, de entre los datos resultado del paso anterior, el conjunto de casos que se van a propagar dinámicamente, es decir, usando un modelo de procesos. Estos casos deben ser suficientemente representativos del clima marítimo en la zona para, en el último paso del método híbrido, poder reconstruir la serie temporal completa una vez propagada. La selección de los casos a propagar se realiza con el algoritmo de máxima disimilitud que busca, de entre el conjunto de datos disponibles, aquellos que son más diferentes entre sí.
 3. El tercer paso consiste en propagar numéricamente los casos seleccionados con el modelo SWAN (Booji, Holthuijsen, & Ris, 1996). SWAN permite modelar los procesos de asomeramiento, refracción debida a batimetría y corrientes, disipación por rotura, *whitecapping* y fricción con el fondo. Como resultado, se obtiene, para los casos seleccionados, las propiedades del oleaje en los puntos objetivo a 10 m de profundidad.
 4. El cuarto y último paso consiste en la reconstrucción de las series temporales de oleaje completas en la costa a partir de los casos propagados. Para ello, se utiliza una técnica de interpolación multivariada basada en funciones de base radial. La selección de casos y la interpolación deben ser validadas ya sea con registros de boyas o datos de reanálisis en algún punto del dominio.

Propagación del oleaje a rotura considerando los efectos de la difracción

Tras la aplicación del método híbrido de regionalización, la altura de ola y dirección del oleaje reconstruidas en la batimetría de 10 metros se propagan hasta rotura. Para ello, bajo las hipótesis de teoría lineal de ondas y batimetría recta y paralela, se calculan las series de altura de ola y dirección en rotura aplicando el criterio espectral $H_b = 0.55h_b$ y considerando asomeramiento y refracción mediante las ecuaciones de dispersión lineal, la conservación del flujo de energía y la ley de Snell.

La presencia de estructuras produce la difracción del oleaje, fenómeno que no puede modelarse correctamente con modelos espectrales como SWAN. Si bien el modelado riguroso del proceso de difracción es muy complejo, sus efectos pueden identificarse y reproducirse de forma simplificada. Cuando el oleaje se acerca a una estructura se genera un bloqueo de la energía incidente que, en la zona de afeción, da lugar a dos zonas diferenciadas: la zona abrigada, donde el bloqueo de energía es total y la altura de ola se reduce drásticamente, y la zona de cesión, donde los frentes ceden parte de su energía lateralmente y la altura de ola se reduce de forma gradual (Figura 4) Figura 4. Si bien en la zona de cesión la dirección del oleaje no se ve afectada, en la zona abrigada el ángulo de incidencia de los rayos gira alrededor del punto de difracción. Las propiedades del oleaje en rotura por asomeramiento y refracción se han corregido con la formulación de Goda (Goda, 1985) para tener en cuenta este comportamiento. Como resultado, se obtienen las series de oleaje proyectado en rotura considerando los efectos de asomeramiento, refracción según la ley de Snell y difracción de acuerdo con el criterio de Goda.

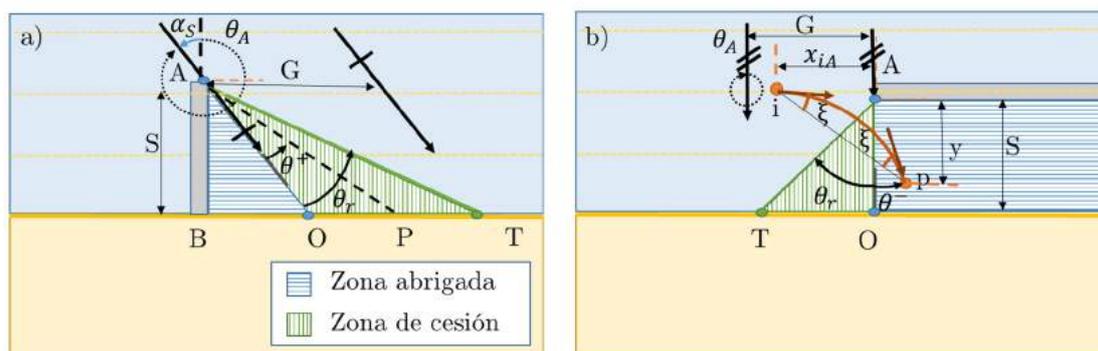


Figura 4. Esquema de las distintas zonas afectadas por la difracción tras una estructura.

3.2. Modelo de evolución de la línea de costa

Se ha desarrollado un modelo de evolución de la línea de costa modular y basado en perfiles perpendiculares a la costa que resuelve los procesos morfodinámicos más relevantes a escala regional y en escalas temporales que abarcan desde el corto plazo (eventos de tormenta) al largo plazo (cientos de años). El modelo permite tener en cuenta actuaciones antrópicas en la costa e incluye un algoritmo de asimilación de datos observados que permite calibrar sus parámetros libres y aumentar la precisión de los resultados.

El modelo de evolución de la línea de costa propuesto se enmarca en una estrategia de modelado en la que se utilizan como forzamiento las proyecciones de las dinámicas marinas desarrolladas en la Tarea 2 de este trabajo, aunque podrían aplicarse otras. Esta estrategia se describe en la Figura 5. El modelo propuesto simula la respuesta de la línea de costa frente a efectos de corto y largo plazo. Los efectos de corto plazo (variaciones interanuales, estacionales e interdecadales) vienen dados por el oleaje, la marea meteorológica y la marea astronómica y hacen que la línea de costa oscile en torno a una posición media. Además, algunas playas pueden experimentar giros (avance de un extremo y retroceso del otro) debido a gradientes en el transporte de sedimentos longitudinal inducidos por el oleaje. Estos cambios, no obstante, ocurren normalmente a escalas de decenas de años. Por otro lado, los efectos de largo plazo vienen dados esencialmente por el ANMM. Las proyecciones de oleaje necesitan ser regionalizadas y propagadas hasta la rotura, ya que es durante la rotura cuando el oleaje mueve el sedimento que produce cambios en la línea de costa. El número de escenarios, modelos climáticos, percentiles de ANMM puede ser cualquiera, aunque en este trabajo, como se verá más adelante, se han considerado 2 RCPs, 5 RCMs y 3 percentiles de la distribución de ANMM y su evolución en el tiempo. Con estos datos se ha alimentado el modelo de evolución de la línea de costa propuesto, que resuelve procesos transversales y longitudinales y cuenta con un algoritmo de asimilación que permite incorporar procesos no resueltos. Como resultado, se han obtenido series de evolución de la línea de costa para aquellas combinaciones de escenarios, modelos climáticos y trayectorias de ANMM consideradas. Para más detalle sobre el uso e interpretación de los resultados, ir a la Tabla 1 del apartado 4 de este informe.

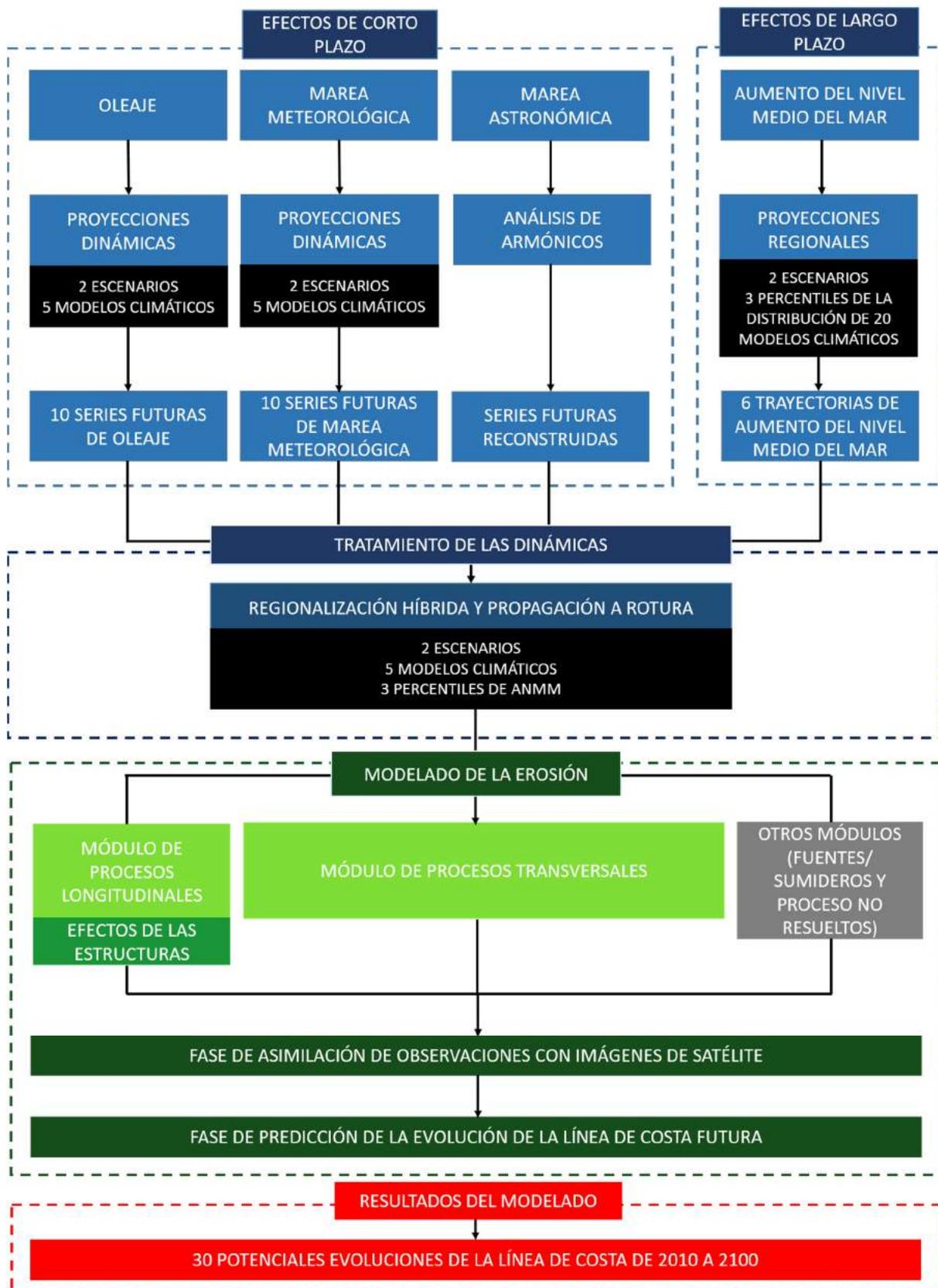


Figura 5. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta para modelar la erosión costera.

3.2.1. Perfilado de la línea de costa

Para resolver la ecuación de gobierno del modelo de erosión, se ha usado un sistema de coordenadas fijo. El empleo de modelos basados en sistemas de coordenadas fijos, a diferencia de aquellos que utilizan sistemas de coordenadas flexibles (Roelvink et al., 2020), requiere el perfilado de la costa objeto de análisis. La ecuación de gobierno devuelve la posición de la costa en cada perfil y se asume que la línea de orilla varía linealmente entre perfiles, por lo que el espaciamiento de los perfiles debe adaptarse a la escala espacial del estudio. A escala regional, deben emplearse espaciamientos inferiores a 500 m. Sin embargo, la metodología puede aplicarse, de manera directa, en estudios de detalle de zonas concretas reduciendo el espaciamiento entre perfiles.

Los perfiles deben adaptarse a la morfología del terreno para así captar los procesos fundamentales. De este modo, deben colocarse perfiles antes y después de estructuras antrópicas o naturales que alteren la dinámica sedimentaria.

El primer paso para construir los perfiles es la definición de la línea de costa base o de referencia, que puede ser la línea de costa presente. El perfil base i está definido por la normal a la línea de costa de referencia \vec{n}_i , un espaciamiento e_i , la distancia a tierra dT_i (1000 m) y la distancia hacia el mar dM_i (hasta la batimétrica 10 m), tal y como se indica en la Figura 6.

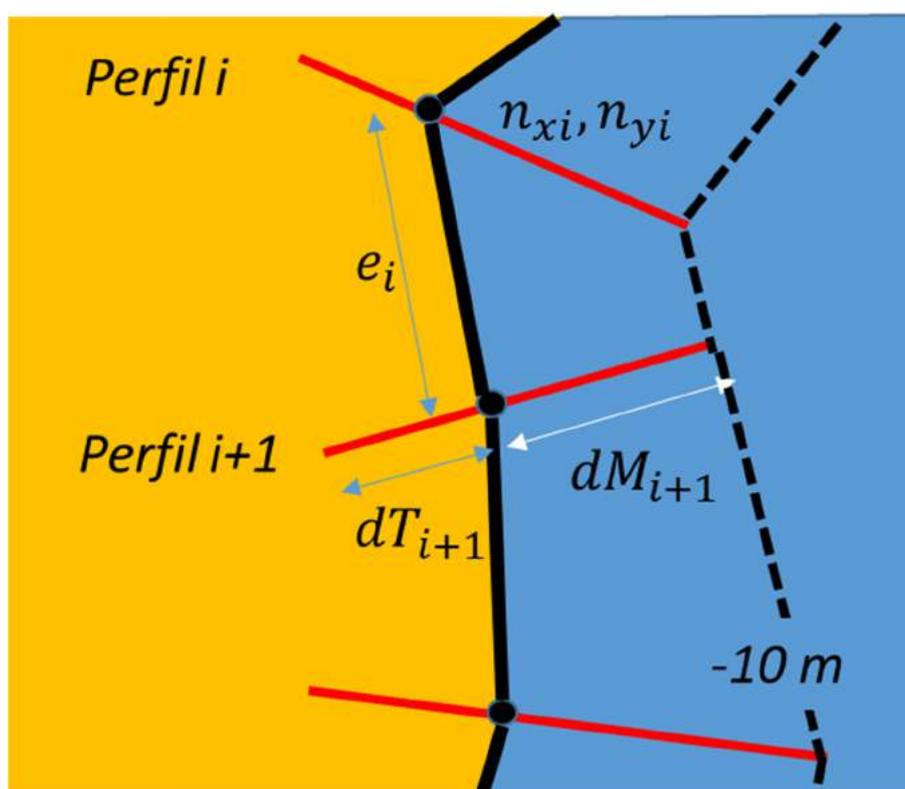


Figura 6. Parametrización del perfil base.

Los perfiles se generan automáticamente, a partir de la directriz, el espaciamiento y las distancias a tierra y hacia el mar. Posteriormente, se deben editar, adaptando el espaciamiento a la presencia de elementos o estructuras que afecten a la dinámica costera.

3.2.2. Ecuación de gobierno

El modelo, que resuelve la ecuación de gobierno (1), se compone de cuatro módulos que pueden activarse y desactivarse perfil a perfil en función de la tipología costera (playas abierta, playas encajada o estructura) y del tipo de transporte de sedimentos que tiene lugar.

$$\underbrace{\frac{\partial Y}{\partial t}}_{\text{Cambios en la línea de costa}} = \underbrace{-\frac{1}{d_c} \frac{\partial Q}{\partial x}}_{\text{Transporte longitudinal}} + \underbrace{\frac{1}{d_c} q}_{\text{Fuentes/ Sumideros}} + \underbrace{K_c [Y_{pt}^{eq} - Y_{pt}]}_{\text{Transporte transversal}} + \underbrace{vlt}_{\text{Procesos no resueltos}} \quad (1)$$

Módulo de transporte longitudinal

El primer módulo (primer término de la parte derecha de la ecuación (1)) corresponde al transporte longitudinal de sedimentos y se activa cuando su gradiente en una celda litoral, es decir, entre dos perfiles, es distinto de cero. Los gradientes en el transporte longitudinal, que se traducen en una translación del perfil hacia el mar o hacia tierra (Y_{pl}), pueden ser responsables de la rotación de playas encajadas (Turki et al., 2013) y de su forma de equilibrio (Hurst et al., 2015), del bypass de arena entre espigones (Kristensen et al., 2013) y de cambios crónicos en playas abiertas (Ashton & Murray, 2006).

Este módulo responde a un modelo de una línea con el que se calculan los gradientes longitudinales del transporte sólido de sedimento (Q) hasta la profundidad de cierre (d_c), evaluada según la formulación de (Birkemeier, 1985). Este gradiente viene dado por:

$$Q = K_e Q_0 \sin(2\alpha)^n \quad (2)$$

Donde, Q_0 representa la magnitud del transporte longitudinal neto función del oleaje incidente y de las propiedades del sedimento, n es una constante que depende de la formulación del transporte longitudinal, α es la diferencia entre el ángulo del oleaje incidente en rotura $\alpha_w = 270 - \theta_{naut}$ y la normal onshore del perfil $\alpha_c = \text{atan}\left(\frac{dy}{dx}\right) - 90$, x e y son las coordenadas proyectadas en UTM de la línea de costa y K_e es un coeficiente para tener en cuenta el efecto de las estructuras (detallado en el apartado 4.2.3).

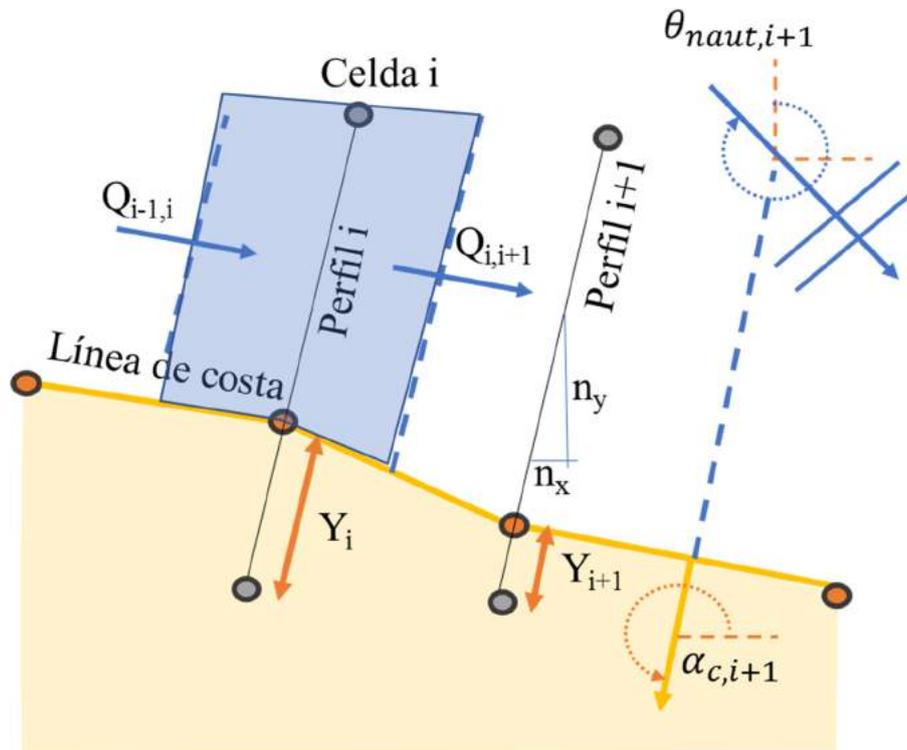


Figura 7. Esquema del cálculo del transporte longitudinal según el modelo de una línea.

Q_0 se ha calculado aplicando la fórmula del CERC $Q_0 = K_{pl} \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)(1-p)} H_{bd}^2 c_{g,b}$ (Komar, 1971), donde K_{pl} es una constante de calibración empírica, ρ es la densidad del agua, ρ_s es la densidad seca del sedimento, p es la porosidad, H_{bd} es la altura de ola en rotura corregida por difracción y $c_{g,b}$ es la velocidad de grupo en rotura.

Módulo de fuentes y sumideros

El segundo módulo (segundo término de la parte derecha de la ecuación (1)) permite incorporar fuentes o sumideros de sedimento, donde q se refiere al volumen de arena aportado o retirado por unidad de longitud de línea de costa y tiempo. Este término permite modelar aportes de sedimento o dragados si se conoce su temporalidad y volumen.

Módulo de transporte transversal

El tercer módulo (tercer término de la parte derecha de la ecuación (1)) corresponde al transporte transversal de sedimentos y se activa siempre total o parcialmente. Los procesos transversales ocurren a escalas temporales más cortas que los procesos longitudinales e incluyen fluctuaciones estacionales de la línea de costa (Davidson et al., 2013) y alteraciones debidas a eventos extremos.

Este módulo responde al modelo de evolución del perfil de equilibrio de Miller & Dean (2004) con las modificaciones propuestas por (Toimil et al., 2017) para incorporar la marea astronómica y el efecto del ANMM. Según el modelo, los cambios en la línea de costa, debidos al transporte transversal, responden a una ecuación cinética de primer orden que modula los cambios en la línea de costa según la diferencia entre el nivel instantáneo Y_{pt} y un nivel de equilibrio Y_{pt}^{eq} :

$$Y_{pt}^{eq} = \Delta Y_0 + \Delta Y_{eq} + R_{Bruun} \quad (3)$$

Donde Y_{st}^{eq} es la posición de equilibrio a la que tiende la línea de costa a una velocidad (K_c) que es distinta para procesos de erosión y de acreción, ΔY_0 es la línea de costa base, ΔY_{eq} es el cambio en la posición de equilibrio debido a un determinado nivel del mar local y R_{Bruun} es el desplazamiento hacia tierra debido al ANMM y expresado como el cociente entre el ANMM y la pendiente del perfil activo.

ΔY_{eq} se ha calculado aplicando la fórmula $\Delta Y_{eq} = -\frac{0.106H_{bd}+MM+MA}{\tan \beta_d}$, donde H_{bd} es la altura de ola en rotura corregida por difracción, MM es la marea meteorológica y MA es la marea astronómica.

$\tan \beta_d(t)$ es la pendiente dinámica de Miller y Dean definida como el cociente entre la altura desde la profundidad de rotura hasta la cota de la berma ($H_{berm} + h_b$) y la anchura de la zona de rompientes ($W_b^*(t)$):

$$\tan \beta_d(t) = \frac{H_{berm} + h_b}{W_b^*(t)} \quad (4)$$

La anchura de la zona de rompientes, asumiendo un perfil de Dean, es dependiente del tamaño de grano del sedimento, mediante el parámetro A (Dean, 1981):

$$W_b^*(t) = \left(\frac{h_b}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

La contribución del ANMM en la posición de equilibrio $R_{Bruun}(t)$ se obtiene asumiendo una respuesta “Bruuniana” del perfil:

$$R_{Bruun}(t) = \frac{SLR(t)}{\tan \beta_n} \quad (6)$$

Dónde $\tan \beta_n$ es la pendiente *nearshore* o pendiente de la zona activa del perfil.

$$\tan \beta_n = \frac{H_{berm} + d_c}{W^*} \quad (7)$$

d_c es la profundidad de cierre y W^* es el ancho de la zona activa del perfil hasta la profundidad de cierre. Asumiendo nuevamente un perfil teórico de Dean, su valor es:

$$W^* = \left(\frac{d_c}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

Módulo de procesos no resueltos

El cuarto módulo (cuarto término de la parte derecha de la ecuación (1)) corresponde a una tendencia lineal de largo plazo que representa todos los procesos no modelados con las ecuaciones de los tres primeros módulos del modelo y que pueden condicionar la posición de la línea de costa (Vitousek et al., 2017). En la ecuación (1), la tendencia a largo plazo v/t es constante, por lo que la respuesta de la costa varía linealmente. Esta constante se supone inicialmente nula y, durante el proceso de asimilación, su magnitud de cambia de forma que los procesos no resueltos se vuelven variables en el tiempo. Durante el periodo de proyección, no hay observaciones para asimilar con lo que su valor es constante en el tiempo y contribuye con una tendencia lineal a la evolución de la línea de costa. Esta componente puede producir error cuando procesos crónicos no resueltos generan respuestas no lineales.

3.2.3. Efecto de las estructuras

Los espigones pueden producir un bloqueo total o parcial en el transporte longitudinal de sedimentos. Esta reducción del transporte origina gradientes longitudinales en el transporte longitudinal que, a su vez, dan lugar a patrones de erosión-sedimentación en el entorno del espigón y a la reorientación de la costa (Kristensen et al., 2016). La magnitud de la reorientación dependerá esencialmente de las condiciones medias del flujo de energía reinante y de la longitud del espigón. Por otra parte, los diques exentos generan difracción, que trae como consecuencia en la hidrodinámica una disminución de la altura de ola en la zona abrigada y el giro de los frentes de onda. Debido a esta alteración de la línea de rompientes, la línea de costa en el trasdós de un dique exento se ve modificada, formando salientes o tómbolos en función de la geometría del espigón con respecto a la línea de costa inicial y a la posición media de la línea de rotura. Otras actuaciones consideradas en el modelo son las escolleras, que impiden el retroceso de la línea de costa y los rellenos.

La incorporación del efecto de la retención de sedimento por parte de las estructuras en el modelado de la evolución de la línea de costa se ha realizado con la reducción de la magnitud del transporte longitudinal Q_0 (ecuación (2)) en función de la anchura de la zona de rompientes W_b^* y la longitud del espigón L_e con respecto a la línea de costa a barlomar de la estructura (Figura 8). Para ello, y de acuerdo con la formulación de (Hanson & Kraus, 2011), se ha asumido que la ley de distribución de Q_0 es constante en una longitud del 25% superior a la zona de rompientes (Falqués et al., 2008). En ese caso, el coeficiente de paso K_e se obtiene de manera directa como $K_e = 1 - 0.8L_e/W_b^*$. El valor de K_e varía en el tiempo ya que W_b^* cambia y también lo hace L_e con respecto a la línea de costa.

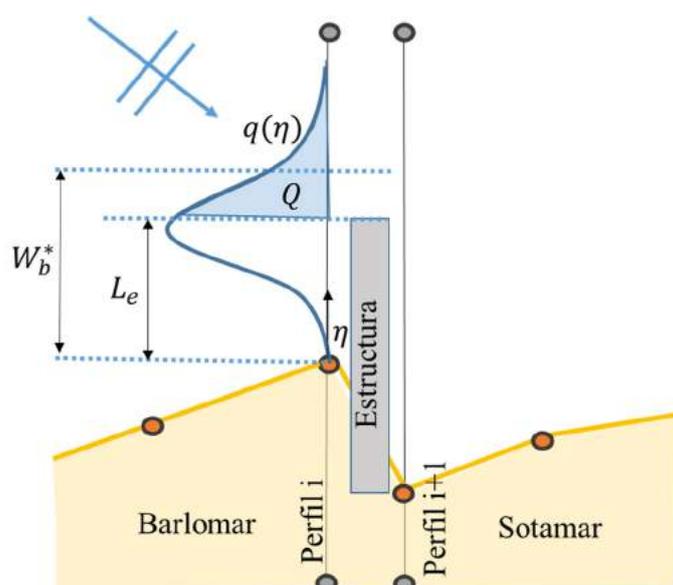


Figura 8. Modelado de la retención de sedimento tras una estructura.

Para analizar la respuesta de la línea de costa ante el bloqueo en el transporte de sedimentos, se analiza el ejemplo teórico mostrado en la Figura 9. Nótese que los parámetros empleados en el modelo son ficticios y se centran en analizar la respuesta del modelo, en ningún caso se busca reproducir un caso preciso. Para ello, se propaga a rotura el oleaje en la batimétrica -5 m y se mantiene constante durante toda la simulación. La propagación se realiza mediante la aplicación de la teoría lineal, la hipótesis de conservación de flujo de energía y la ley de Snell. Se aplica la corrección por difracción descrita en el apartado 4.1.

La Figura 9 representa la evolución de la línea de costa ante un forzamiento constante y condición de gradiente longitudinal nulo en los contornos. Inicialmente la línea de costa forma un ángulo de 45 grados en el plano cartesiano y presenta un espigón en su parte central. En el panel izquierdo de las figuras, la línea azul continua representa la anchura en la que se produce transporte de sedimento y equivale a $1.25W_b^*$ medida desde la línea de costa. Las flechas azules representan la dirección del oleaje en rotura y se sitúan sobre la línea de rotura (a W_b^* desde la línea de costa inicial). Por otro lado, la línea discontinua representa la línea de costa final de la simulación. Se aprecia el efecto de la difracción en la zona abrigada por el espigón en la reducción de la altura de ola y por consiguiente el avance hacia la costa de la línea de rotura y en el giro de los frentes de onda en la zona abrigada. En los paneles derechos se muestra el caudal de bypass que atraviesa la estructura y el coeficiente de paso K_e expresado en porcentaje.

Del análisis, se aprecia que los mayores cambios se producen en los cuatro primeros meses en los que el coeficiente K_e es nulo (la capacidad de retención de la estructura es total). Sin embargo, a partir del cuarto mes, la línea de costa situada en la zona de acreción, avanza y la línea $1.25W_b^*$ sobrepasa el morro del espigón, con lo que el coeficiente K_e deja de ser nulo y por tanto se produce un aumento rápido del caudal de bypass. A medida que la línea de costa progresa hacia una situación de equilibrio (perpendicular a la dirección de los rayos en rotura), el caudal que atraviesa la estructura disminuye, al disminuir los gradientes longitudinales del caudal sólido por la reducción del factor $\sin(2\alpha)$. En la

etapa final de la simulación, la línea de costa alcanza una situación de equilibrio por lo que el caudal sólido longitudinal es nulo.

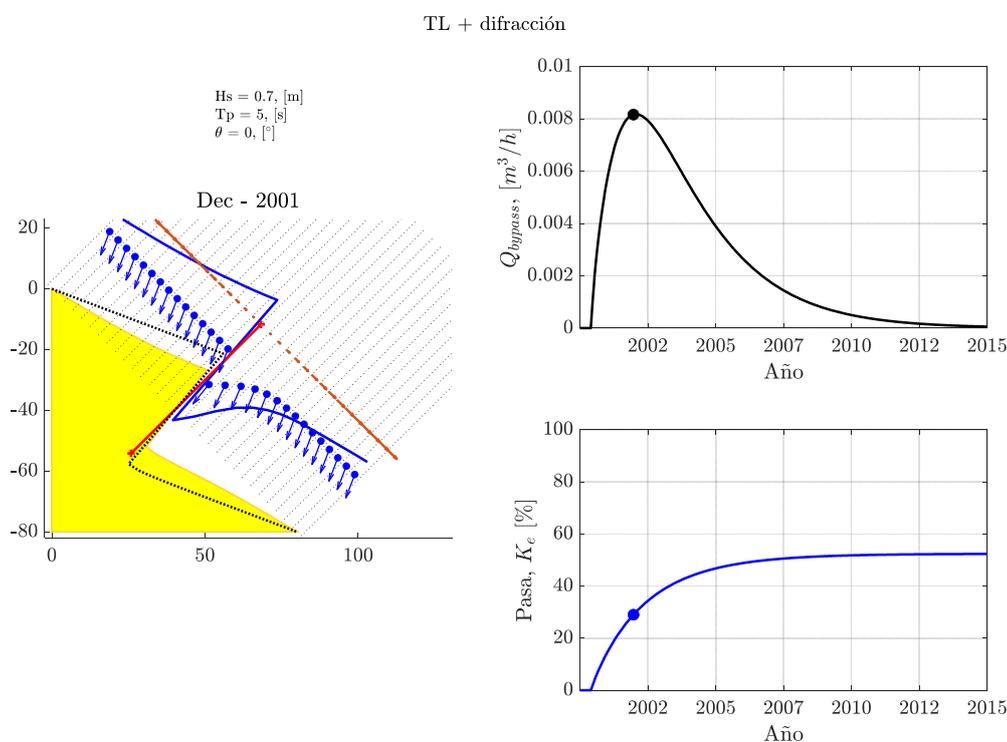


Figura 9. Ejemplo teórico de la respuesta de la línea de costa frente a un espigón, primer año del análisis.

El modelo se ha validado ante diferentes actuaciones antrópicas empleando soluciones analíticas en el caso de que existan (espigón y dique exento) o verificando que la línea de costa se modifica según el comportamiento cualitativa y cuantitativamente esperado (caso de la escollera y del relleno), tal y como se muestra en la Figura 10. En un primer lugar, se ha modelado numéricamente un dique exento considerando difracción y el bypass de sedimento. La comparación con la solución analítica es razonable, aunque se evidencian ligeras diferencias que se justifican con sus hipótesis de base, que consideran un bloqueo total del sedimento por parte de la estructura y no se tiene en cuenta la difracción. De este modo, los avances y retrocesos que predice la solución analítica son superiores a los modelados numéricamente, aumentando esa diferencia según avanza la línea de costa a barlomar del espigón, factor que disminuye la capacidad de retención de la estructura. Por otro lado, a sotamar de la estructura, los efectos de la difracción, modelados numéricamente, suavizan en retroceso justo en el trasdós del espigón, lo que no está considerado en la solución analítica. En el panel b) de la Figura 10 se compara la solución analítica de la evolución de la línea de costa tras un dique exento y la línea de costa modelada numéricamente. Los resultados comparan razonablemente bien, sobre todo teniendo en cuenta que la solución analítica considera la incidencia normal del oleaje en la zona no abrigada y un ángulo constante en la zona abrigada. La solución numérica, por su parte, considera variaciones tanto espaciales como temporales de la altura de ola y dirección. El siguiente ejemplo modelado es una playa parabólica encajada (condición de contorno sin intercambios en los dominios de cálculo) protegida por una escollera situada 50 metros tras la línea de costa inicial. La incidencia oblicua del oleaje genera una redistribución del sedimento, hasta que la playa alcanza el equilibrio con las dinámicas. Como se aprecia en la figura, el modelado numérico respeta dos aspectos críticos, la

conservación de la masa del sedimento y la condición de contorno de la escollera. Finalmente el último ejemplo modelado en la Figura 10 es la difusión de un relleno sinusoidal de 1.2M de m³ de arena durante el mes de junio (subpanel superior izquierdo en la Figura 10d). La incidencia normal del oleaje redistribuye el volumen vertido en la parte central hasta hacer avanzar uniformemente la línea de costa inicial.

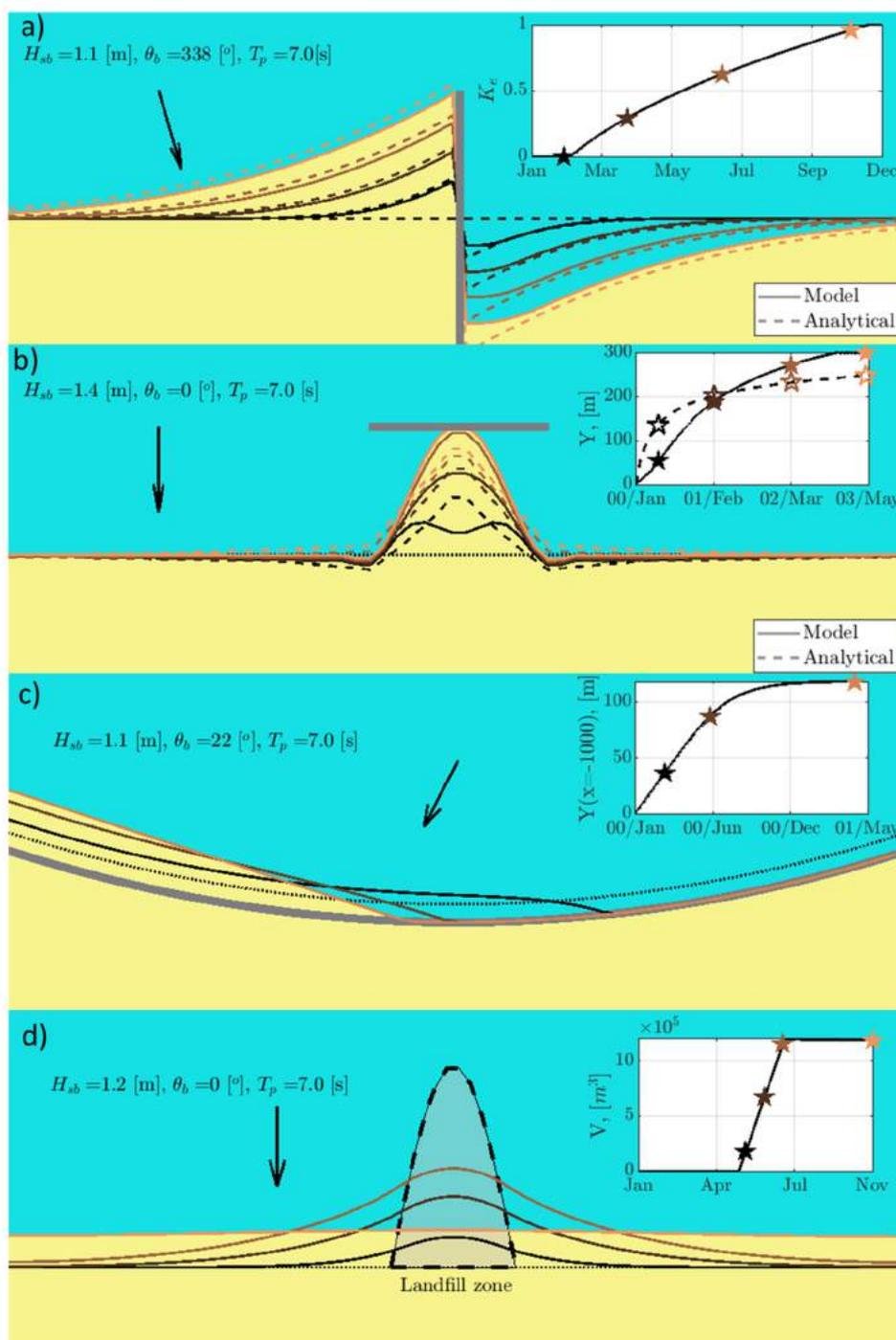


Figura 10. Respuesta de la línea de costa ante distintas actuaciones antrópicas. En el panel a) se muestra un espigón, en el b) un dique exento que genera un tómbolo en su trasdós, en el c) el giro de una playa encajada protegida por una escollera y en el d) la difusión de un relleno en una playa rectilínea encajada.

Del análisis precedente, se puede concluir que el modelado de las estructuras produce resultados cualitativa y cuantitativamente correctos.

3.2.4. Algoritmo de asimilación de observaciones

La modelización de la evolución de la línea de costa mediante modelos de evolución requiere, inevitablemente, calibración de sus parámetros libres (Splinter et al., 2013). El método de calibración escogido depende del tipo de observaciones disponibles y del coste computacional. La calibración puede realizarse eligiendo combinaciones de parámetros compatibles basadas en criterio experto, mediante el análisis probabilístico de todo el rango posible de valores de los parámetros (Simmons et al., 2017) o mediante algoritmos basados en el filtro extendido de Kalman (Long & Plant, 2012; Vitousek et al., 2017). En este caso, se ha optado por la calibración mediante el filtro extendido de Kalman frente al resto de opciones disponibles por tres motivos:

- Es un método de calibración que no requiere el criterio experto para la búsqueda de juegos de parámetros compatibles. Es, por tanto, un método de aplicación razonablemente sencillo, independientemente del conocimiento técnico del usuario.
- La calibración de las constantes se realiza dentro de la misma simulación. No se requiere la simulación de un gran número de casos, cada uno con un juego diferente de parámetros libres (e.g. métodos probabilísticos GLUE, aplicado en Simmons et al., 2017). De esta manera, el tiempo de cómputo de la calibración mediante el filtro extendido de Kalman es mucho más reducido que en el caso de la calibración mediante técnicas probabilísticas.
- Debido a las constantes intervenciones humanas en la zona de estudio, caben esperar variaciones temporales en los parámetros libres de las ecuaciones físicas de los procesos. Si esas actuaciones perduran tiempos superiores a los propios de la convergencia del algoritmo, el filtro extendido de Kalman será capaz de captar la variación en los parámetros libres asociada a la actividad antrópica.

El filtro Kalman conduce a una solución recursiva al problema de filtrado lineal óptimo, definido como la minimización del error medio cuadrático entre la realidad y la estimación. Se trata de un método recursivo, pues para cada actualización de la estimación se calcula únicamente a partir del estado precedente y de datos adicionales (observaciones). Para aplicar el filtro extendido de Kalman es necesario establecer el vector de estado, que es el conjunto de parámetros del instante precedente de un sistema, necesarios para predecir su comportamiento futuro. En este caso, el vector de estado está formado por los parámetros libres del modelo de erosión, que se han agrupado en consonancia con los módulos que lo componen: la componente de la línea de costa debida a procesos longitudinales (Y_{pl}) y la constante empírica K_{pl} asociada; la componente de la línea de costa debida a procesos transversales ($Y_{pt,ero}$ y $Y_{pt,acr}$) y la tasa a la que se acerca al equilibrio ($K_{c,ero}$ y $K_{c,acr}$), diferenciando entre procesos de erosión y acreción; y la tendencia lineal que recoge procesos no resueltos v_{lp} . Estos parámetros parten de un valor inicial prefijado y su magnitud evoluciona en el tiempo durante el proceso de asimilación y se mantiene constante durante el periodo predictivo.

La existencia de series de observaciones frecuentes y sostenida en el tiempo es una necesidad para calibrar los modelos de erosión. Para analizar la respuesta del filtro extendido de Kalman, hemos realizado un análisis de sensibilidad en el que generamos una serie sintética de posición de la línea de costa a partir de un juego de parámetros $[K_l, vlt, K_{acr}, K_{ero}]$ prefijado, Figura 11. Haciendo variar el juego de parámetros dentro de los márgenes establecidos por la matriz de covarianza del error del proceso \mathbf{P} , se ha estudiado el comportamiento del modelo. Del estudio se infiere la necesidad de observaciones suficientemente frecuentes (al menos trimestrales) y series largas (de al menos de cinco años) para la correcta convergencia del filtro extendido de Kalman hacia los parámetros libres prefijados. Se han fijado los parámetros iniciales del modelo iguales a los teóricos mas $\kappa\sqrt{\mathbf{P}}$. En lo que se refiere a las frecuencias y duraciones de las observaciones necesarias para el calibrado de los modelos, los resultados del análisis coinciden con los publicados en (Splinter et al., 2013).

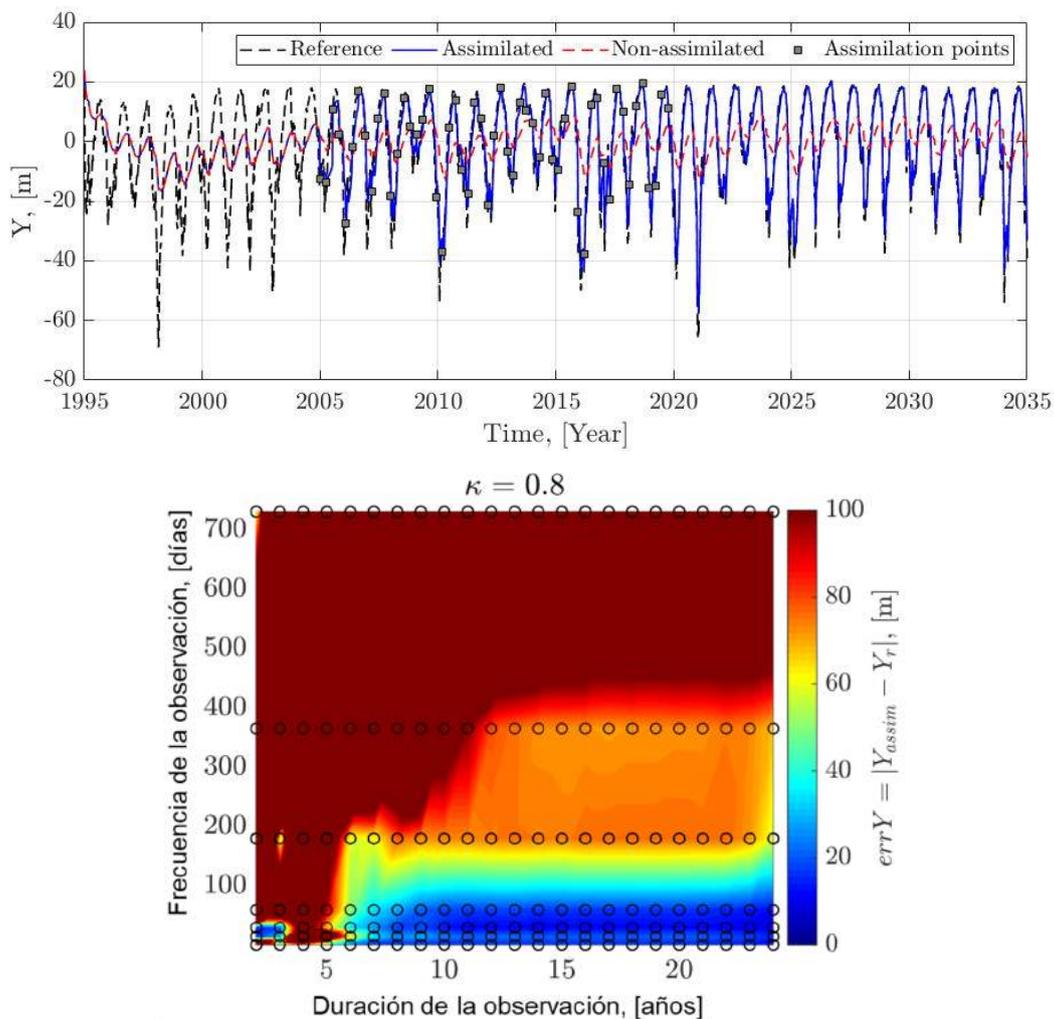


Figura 11. Convergencia del filtro eKF hacia la solución teórica en función de la duración y frecuencia de las observaciones.

Para facilitar la lectura del documento, la formulación matemática del filtro extendido de Kalman se describe con detalle en el Anexo II.

3.3. Resultados potenciales

De la aplicación de la metodología propuesta, pueden obtenerse diferentes resultados con los que dar respuesta al conjunto de cuestiones que han motivado este estudio. La aplicación del modelo de erosión da lugar a proyecciones horarias de evolución de la posición de la línea de costa para las combinaciones de RCM, RCP y trayectoria de ANMM consideradas. Analizando estas series pueden obtenerse los retrocesos (o avances) derivados de los diferentes procesos litorales modelados, abarcando escalas de tiempo que varían desde el corto plazo (temporales) hasta el largo plazo (decenas o cientos de años). Además, pueden analizarse cambios futuros en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de erosión. Asimismo, un ajuste pseudo no estacionario de los máximos retrocesos anuales permite obtener las evoluciones temporales de los eventos de erosión extremos asociados a un determinado periodo de retorno e identificar así cuándo estos eventos excederán determinados umbrales aceptables. Los resultados incorporan la incertidumbre asociada a dos RCPs, cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM correspondientes a tres percentiles de la distribución de ANMM.

La obtención y análisis de las proyecciones de evolución de la línea de costa permiten conocer los efectos de la erosión futura sobre el Dominio Público Marítimo Terrestre y sentar las bases de estudios posteriores de riesgos y adaptación en la costa.

La Tabla 1 muestra un resumen de los diferentes resultados que pueden derivarse de la aplicación de la metodología propuesta y de su proceso de obtención.

Resultado	Proceso de obtención
<i>Evolución temporal de la posición de la línea de costa para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los periodos objetivo</i>	Es el resultado directo de la aplicación del modelo de erosión desarrollado en el marco de este trabajo. El modelo se ha forzado con las series de proyecciones dinámicas de oleaje y nivel del mar para los diferentes RCMs y RCPs combinados con trayectorias de ANMM para esos mismos escenarios.
<i>Posiciones medias de la línea de costa en años objetivo</i>	Las posiciones medias de la línea de costa son el resultado de eliminar las variaciones estacionales de corto plazo de las series temporales de evolución de la posición de la costa. Se obtienen realizando un promedio de las posiciones de la línea de costa en los dos años anteriores al año horizonte.
<i>Cambios estructurales en la línea de costa en un año objetivo con respecto a un año base</i>	Se obtienen restando a la posición media de la línea de costa en el año objetivo la posición media de la línea de costa en el año base.
<i>Posiciones medias de verano y de invierno de la línea de costa en años objetivo</i>	Se obtienen realizando un promedio de las posiciones de la línea de costa en los veranos y los inviernos de los dos años anteriores al año horizonte.

Resultado	Proceso de obtención
<i>Contribución relativa de los distintos procesos modelados a la posición de la línea de costa</i>	Se obtiene realizando un análisis de ANOVA a través del cual se determina la contribución de la varianza de cada proceso modelado a la línea de costa.
<i>Retrocesos extremos para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los periodos objetivo</i>	Se obtienen mediante un ajuste estacionario de los máximos anuales de las series temporales de posición de la línea de costa a una función generalizada de extremos.
<i>Evolución temporal de los retrocesos extremos para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los periodos objetivo</i>	Se obtienen mediante un ajuste pseudo no-estacionario de los máximos anuales de las series temporales de posición de la línea de costa (Mentaschi et al., 2016).

Tabla 1. Resumen de los resultados potenciales de la aplicación de la metodología.

4. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN.

La metodología para la elaboración de proyecciones de erosión desarrollada se ha aplicado en un tramo de costa de aproximadamente 40 kilómetros situado en el litoral Mediterráneo español. En concreto, la zona piloto se encuentra entre los puertos de Castellón y Sagunto constituyendo una unidad de gestión litoral.

A lo largo de esta sección, se proporciona una descripción de la zona de estudio y de su discretización en transectos, se detallan los datos necesarios para la aplicación del modelo de evolución de la línea de costa desarrollado y se muestra el proceso de calibración con asimilación de datos procedentes de mediciones en perfiles e imágenes de satélite. Finalmente, se proporciona un resumen de los resultados obtenidos.

4.1. Descripción general de la zona de estudio

La morfología costera actual en el tramo de estudio está muy condicionada por las sucesivas actuaciones antrópicas que se han realizado a lo largo del tiempo en una costa inicialmente continua. La construcción de los puertos de Sagunto, Castellón y Burriana a principios del siglo veinte bloqueó el aporte norte de sedimentos a sotamar de las estructuras. De este modo, se pasó de una zona en equilibrio dinámico con un transporte longitudinal intenso y aporte sedimentario continuo, a una zona alterada que mantiene la misma intensidad en el transporte longitudinal de sedimentos, pero sin aportaciones en sus contornos (ver Figura 13). El resultado de las actuaciones ha producido erosiones crónicas en las playas abrigadas por las estructuras y acumulaciones en las playas a su trasdós, buscando el equilibrio estático de cada unidad fisiográfica. El fuerte desarrollo inmobiliario que tuvo lugar en la segunda mitad del siglo XX contribuyó a empeorar el desequilibrio en el que se encontraba la línea de costa, dado que se fomentó la construcción de edificaciones, en la primera línea de playas que ya se encontraban en retroceso crónico. Para intentar solucionarlo, se llevaron a cabo actuaciones locales como rigidizaciones y la construcción de espigones que no han conseguido resolver el grave problema de déficit de sedimentos en los tramos de costa situados aguas abajo.

Dinámica sedimentaria previa al siglo XX (sin puertos)



Dinámica sedimentaria posterior al siglo XX (con puertos)



Figura 12. Dinámica sedimentaria del tramo de estudio.

Los puertos de Castellón, Burriana y Sagunto crean dos unidades fisiográficas claramente diferenciadas: la unidad fisiográfica Norte, situada entre los puertos de Castellón y Burriana, y la unidad fisiográfica Sur, localizada entre los puertos de Burriana y Sagunto (Figura 13).

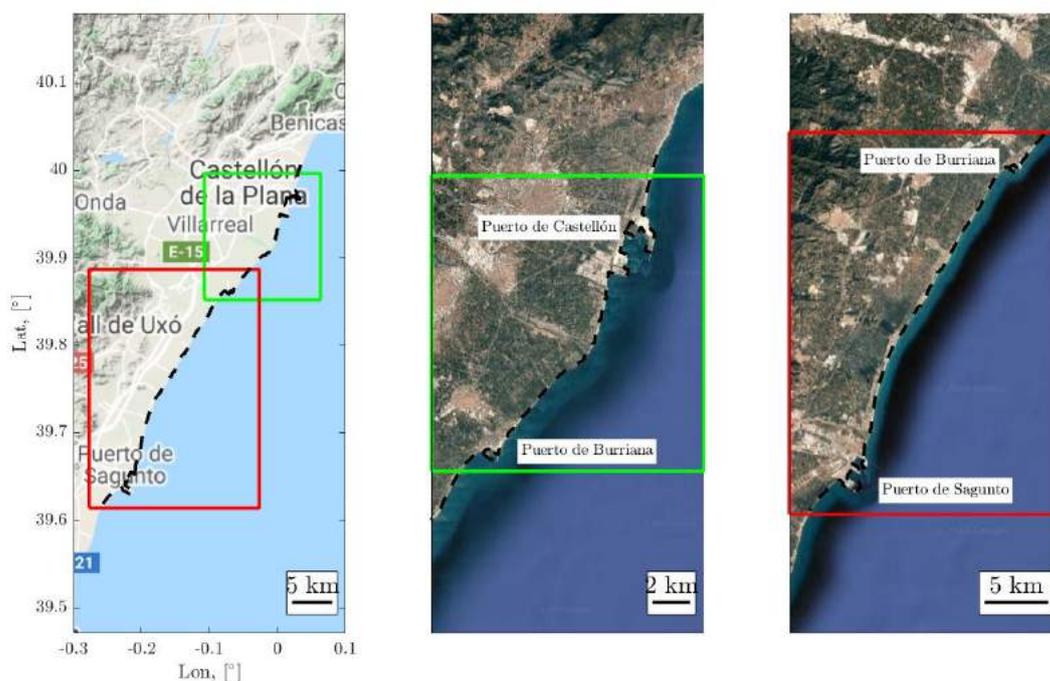


Figura 13. Identificación de la zona de estudio y de sus unidades fisiográficas. En verde, unidad fisiográfica norte (Castellón-Burriana) y en rojo, unidad fisiográfica sur (Burriana-Sagunto)

Los principales arenales de la unidad fisiográfica Norte son las playas de la Torre y la playa del Grao de Burriana. La playa de la Torre está al sur del puerto de Castellón e incluye a la playa de Ben Afeli. Es una playa fuertemente rigidizada por espigones, que generan celdas litorales más pequeñas que están en equilibrio estático para estabilizar la playa (Figura 14). La playa del Grao de Burriana está formada por acumulaciones de sedimento provocadas por la interrupción del caudal sólido por el puerto de Burriana. El triángulo sedimentario, de más de 700 metros en su parte más próxima al puerto, está totalmente rigidizado mediante cuatro espigones. Entre ambas playas se sitúan la playa del río Mijares y la playa Norte de Burriana, que no han sido incluidas en el análisis al estar totalmente rigidizadas por escollera o no disponer, incluso, de playa seca.

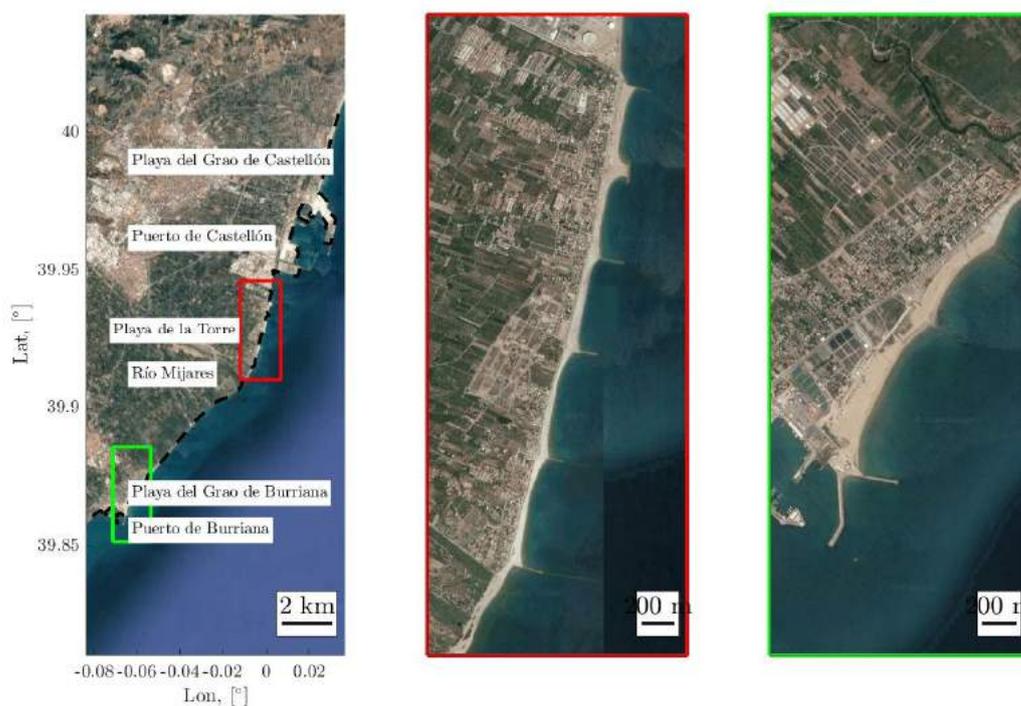


Figura 14. Principales playas de la zona unidad fisiográfica norte. Enmarcada en rojo, la playa de Torre, en verde la playa del Grao de Bruriana.

En la unidad fisiográfica Sur, entre el puerto de Burriana y el puerto de Castellón se distinguen diversas playas, siendo las más importantes: la playa de Nules, la playa de Moncófar, la playa de la Llosa, la playa de Almenara, la playa de Corinto, la playa de Almardá, la playa del puerto de Canet y la playa del puerto de Sagunto.

La playa de Nules está situada al sur del puerto de Burriana. Está compartimentada por un campo de 8 espigones y en su inicio la línea de orilla está protegida por una escollera. Por su parte, la playa de Moncófar abarca el frente costero del municipio de Moncófar. Está fuertemente rigidizada por espigones (ver Figura 15).

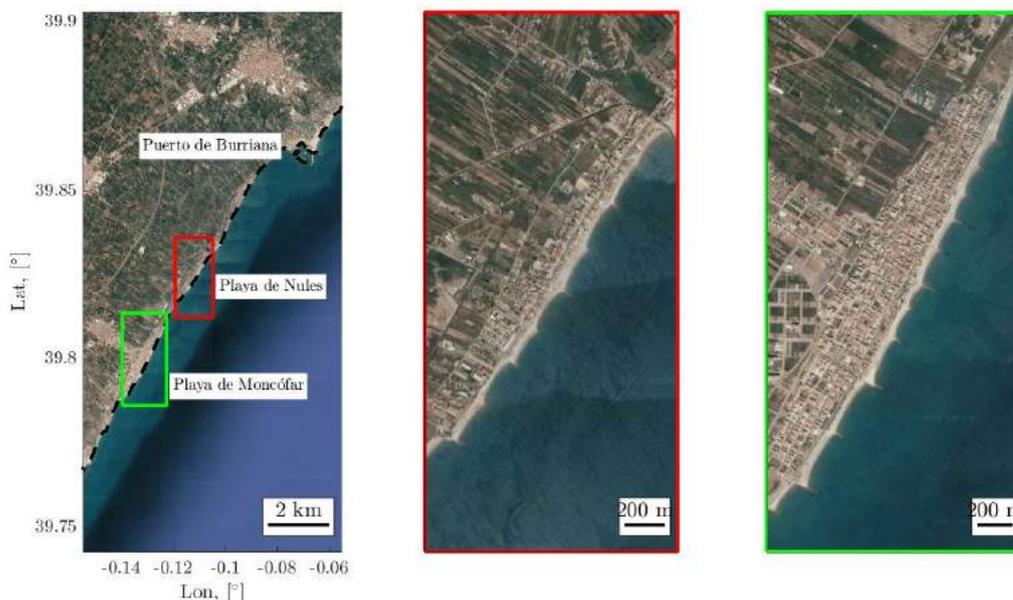


Figura 15. Algunas playas de la unidad fisiográfica sur. En rojo la playa de Nules, en verde, la playa de Moncófar.

Aguas debajo de la playa de Moncófar se encuentra la playa de Chilches, en el término municipal del mismo nombre. Presenta en su tramo central, frente al casco urbano, dos diques que configuran en su interior una playa encajada y rígida que ha generado un deterioro importante de las playas aguas abajo, y más en concreto la playa de la Llosa. Al sur de la playa de Chilches se encuentra la playa de la Llosa. Esta playa no presenta estructuras de retención de sedimento ni construcciones a pie de orilla. Las estrategias de preservación de las playas situadas más al norte, que sí protegen núcleos urbanos, ha generado un fuerte retroceso en su línea de orilla de más de 60 metros en escasos 10 años. El giro provocado por este retroceso tiende a situar a la playa perpendicular a la dirección del flujo medio de energía entrante, lo que ha disminuido considerablemente el retroceso crónico anual de la playa).

Al sur de la playa de la Llosa, se encuentran las playas de Almenara, Corinto, Almardá y Canet de Belenguer. Estas playas tienen características similares, se encuentran conectadas y su extremo sur se apoya en el puerto de Canet de Belenguer. En general, no presentan problemas erosivos graves, debido al bloqueo importante de sedimentos que ejerce el puerto de Canet a sotamar.

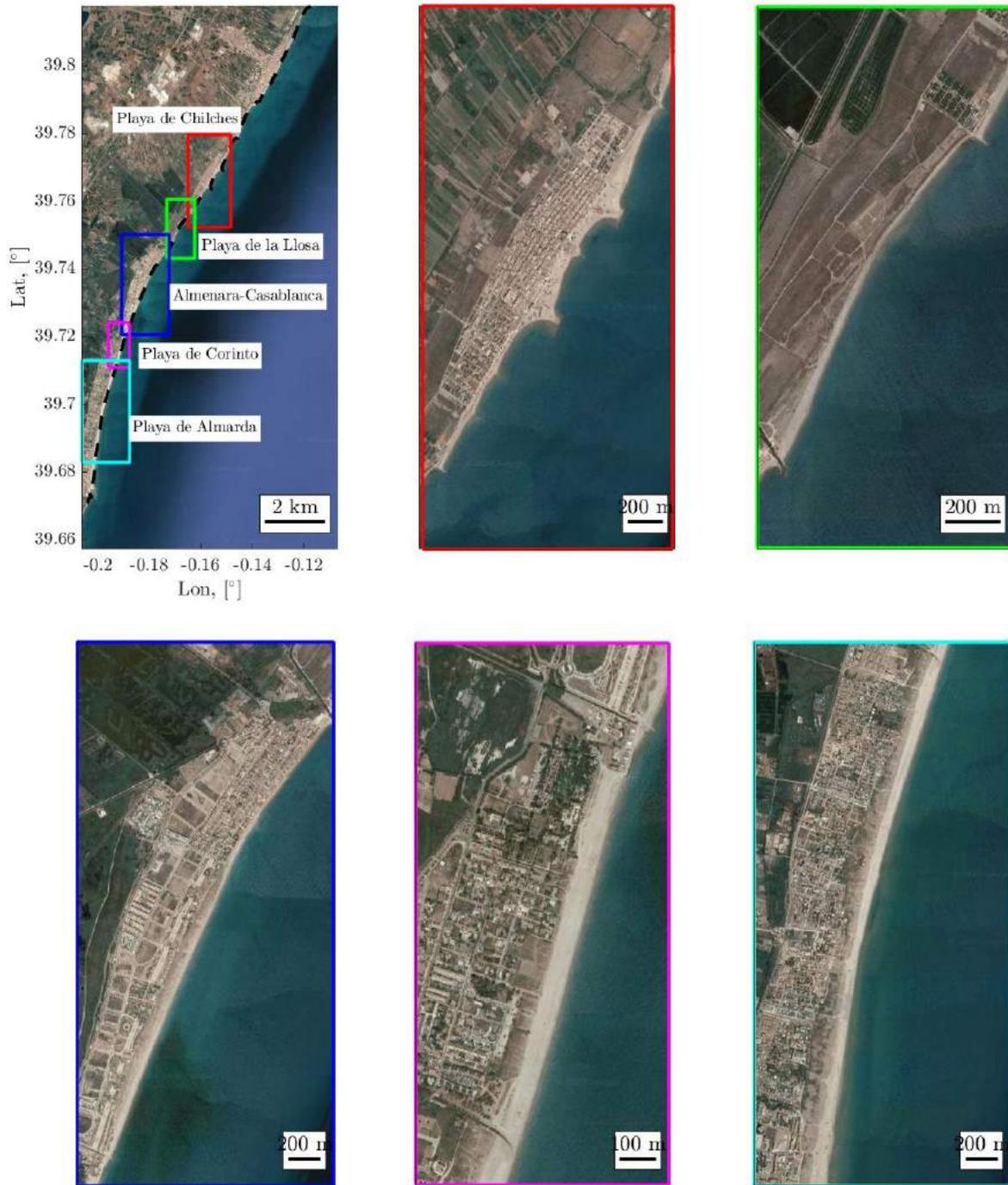


Figura 16. Algunas playas de la unidad fisiográfica sur. En rojo la playa de Chilches, en verde la playa de Llosa, en azul la playa de Almenara, en magenta la playa de Corinto y en azul cian la playa de Almardá

La playa del puerto de Sagunto constituye el último arenal del tramo. Se ha generado gracias al bloqueo total de sedimento por parte del puerto de Sagunto, llegando a formarse un importante triángulo arenoso (Figura 17).



Figura 17. Algunas playas de la unidad fisiográfica sur. En rojo la playa de Canet de Belenguer y en verde la playa del puerto de Sagunto.

4.2. Regionalización del oleaje y propagación a rotura

Para la regionalización de las proyecciones de oleaje y su propagación hasta la rotura, se ha generado una topo-batimetría de detalle combinando tres bases de datos: el modelo digital de terreno (MDT) del IGN, las eco-cartografías de Castellón y Valencia del MITERD y la batimetría de la red de datos y observaciones marinas europeas (por sus siglas en inglés, EMODnet).

Con estos datos se llevado a cabo el proceso de regionalización del oleaje aplicando el método híbrido descrito en el apartado 4.1. Para realizar el modelado numérico, se ha generado una malla general y cuatro mallas de detalle de 500 y 50 metros de resolución, respectivamente (Figura 18).

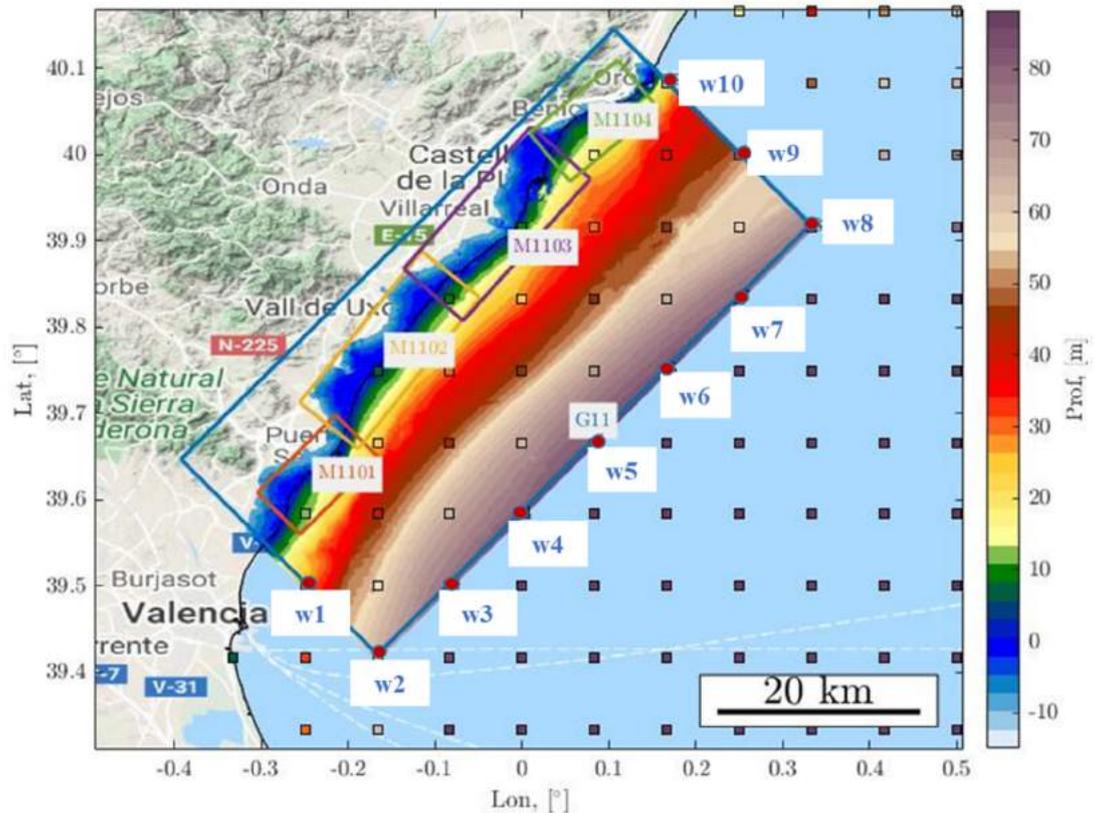


Figura 18. Topo-batimetría de la zona de estudio y contorno de la malla general (G11) y de detalle (M101, M1102, M1103 y M1104)

Para reducir la dimensión de las variables, se han escogido las componentes principales que explican el 99% de su varianza. Los casos representativos seleccionados con el algoritmo de máxima disimilitud para propagar numéricamente ascienden a 500.

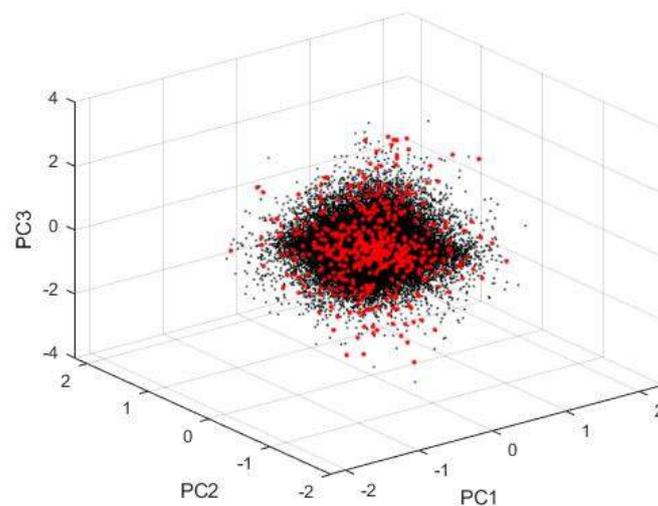


Figura 19. Casos seleccionados (puntos rojos) del total (puntos negros) del total de estados de mar horarios del hindcast GOW-ERA5 en el espacio de las tres primeras EOFs (73% de la varianza total).

Una vez realizada la propagación numérica, se han reconstruido las series completas de las proyecciones de oleaje cada 200 metros a lo largo de la costa de estudio. Para validar la selección y la interpolación posterior, se ha reconstruido el clima marítimo en un punto de la malla global de las proyecciones que se encuentra en el interior del dominio de cálculo.

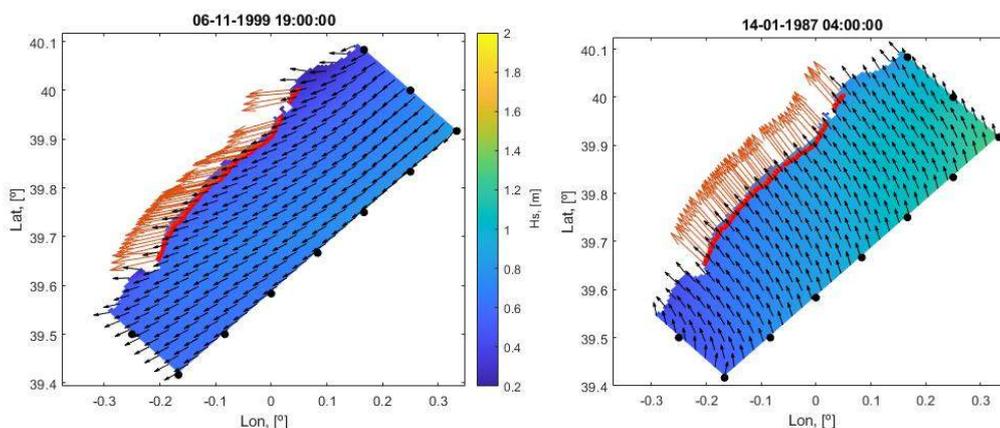


Figura 20. Dos de las 500 propagaciones del hindcast. El mapa de color representa la altura de ola y los vectores la dirección de propagación. Los puntos negros son los puntos de forzamiento del modelo y los rojos representan los puntos objetivo (en la batimétrica de 10 metros) en los que se realiza la reconstrucción con RBFs.

Las proyecciones dinámicas de oleaje en costa se han propagado desde la batimétrica de 10 metros hasta la rotura, incluyendo los efectos de la difracción. La información sobre fechas de construcción, reparación y demolición de las diferentes obras se han obtenido del MITERD (CEDEX, 2013) y de la observación de imágenes de satélite.

4.3. Modelado de la erosión

Para aplicar el modelo de erosión desarrollado, es necesario disponer de un conjunto de parámetros físicos que incluyen las características del sedimento, la pendiente del perfil activo en cada transecto, observaciones de posiciones históricas de la línea de costa e información de actuaciones antrópicas.

Discretización de la zona de estudio en transectos

Para resolver numéricamente la ecuación de gobierno del modelo de erosión (1) es necesario discretizar el problema temporal y espacialmente. La discretización temporal viene condicionada por la resolución horaria de las proyecciones de las dinámicas marinas; y la discretización espacial se ha llevado a cabo dividiendo el tramo de costa de estudio en celdas litorales de aproximadamente 200 metros delimitadas por transectos. Por tanto, a lo largo de los 40 kilómetros de la zona de estudio se han definido 256 transectos (ver

Figura 21). La Figura 22 representa el detalle del perfilado en las playas de Burriana y Moncófar. Se pone de manifiesto la generación automática de los perfiles normales a la línea de costa y la posterior edición manual para poder modelar el efecto de las estructuras. Dado que los módulos de los que consta el modelo de erosión se activan en función del tipo de costa sobre el que se encuentran, cada transecto tiene información de si la costa está o no rigidizada con escolleras o espigones. En el primer caso (perfiles representados en rojo), la posición de la línea de costa se calcula mediante el módulo

tres del modelo de erosión activado de forma parcial, es decir, modelando el efecto del ANMM sustituyendo la pendiente del perfil activo por la pendiente de la estructura. En este caso es importante señalar que se ha considerado que, si bien los procesos longitudinales no alteran la posición de la línea de costa en estos transectos, sí se generan caudales sólidos que pueden afectar a la posición de la línea de costa en las celdas adyacentes. Por otro lado, en los transectos en los que la costa no está rigidizada (perfiles de color negro), su posición se ha obtenido resolviendo la ecuación (1) completa.

En la Tabla 1 del Anexo III se recogen las características geométricas de las principales playas de la zona de estudio, calculadas con respecto a la línea de costa de 2010 (línea base). La anchura media se ha calculado promediando, en cada perfil, la distancia entre la línea base y la línea no erosionable (Figura 23, línea magenta). Del mismo modo, el área se ha calculado como la superficie encerrada por el polígono definido por los perfiles representativos de cada playa de estudio, la línea base y la línea no erosionable.



Figura 21. Perfiles empleados en la discretización espacial del dominio.

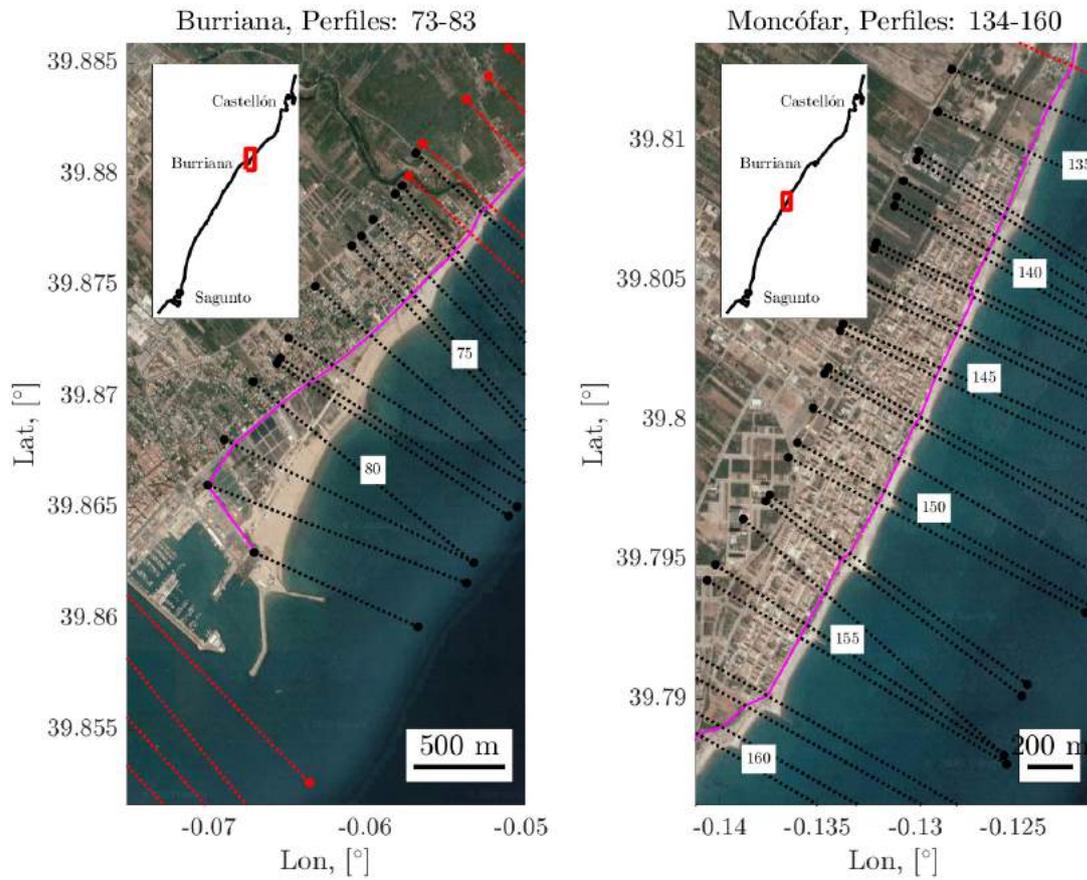


Figura 22. Detalle de los perfiles en la playa de Burriana (panel izquierdo) y Moncófar (panel derecho). La línea magenta representa la línea no erosionable.

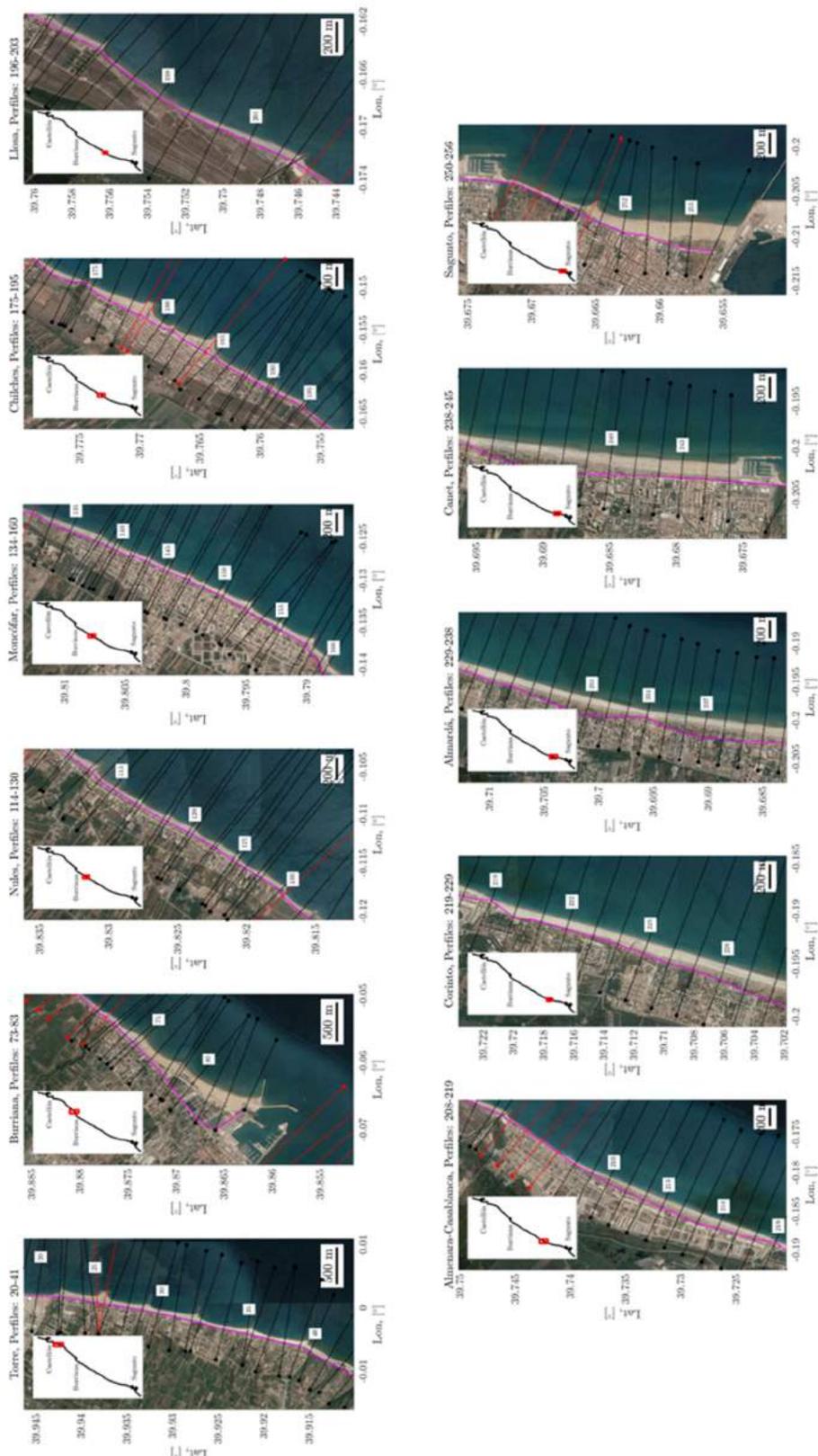


Figura 23. Detalle de los perfiles empleados en la discretización espacial en las principales playas del caso de estudio.

Estudio sedimentológico

Se ha llevado a cabo una caracterización de la distribución de sedimento en la zona de estudio. Para ello, se ha empleado la base de datos de sedimento del MITERD (Figura 24). La integración de la información espacial del sedimento (D_{50}) en el modelo de erosión se ha realizado en diferentes pasos. El primer paso ha consistido en atribuir a cada observación puntual un área de referencia mediante la teselación de Voronoi, que es una partición del plano euclídeo en polígonos cuyos lados son las mediatrices entre puntos próximos y delimitan su área de influencia. A continuación, se ha calculado la intersección de los transectos con los polígonos correspondientes y se ha obtenido la distribución del D_{50} del sedimento en cada perfil y su longitud de referencia (Figura 25). El $D_{50,ref}$ representativo de cada transecto y que, por tanto, se ha incorporado en el modelado de la erosión, se ha calculado ponderando los $D_{50,i}$ de los diferentes polígonos intersectados por cada transecto con su longitud proyectada (L_i):

$$D_{50,ref} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i D_{50,i}}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (9)$$

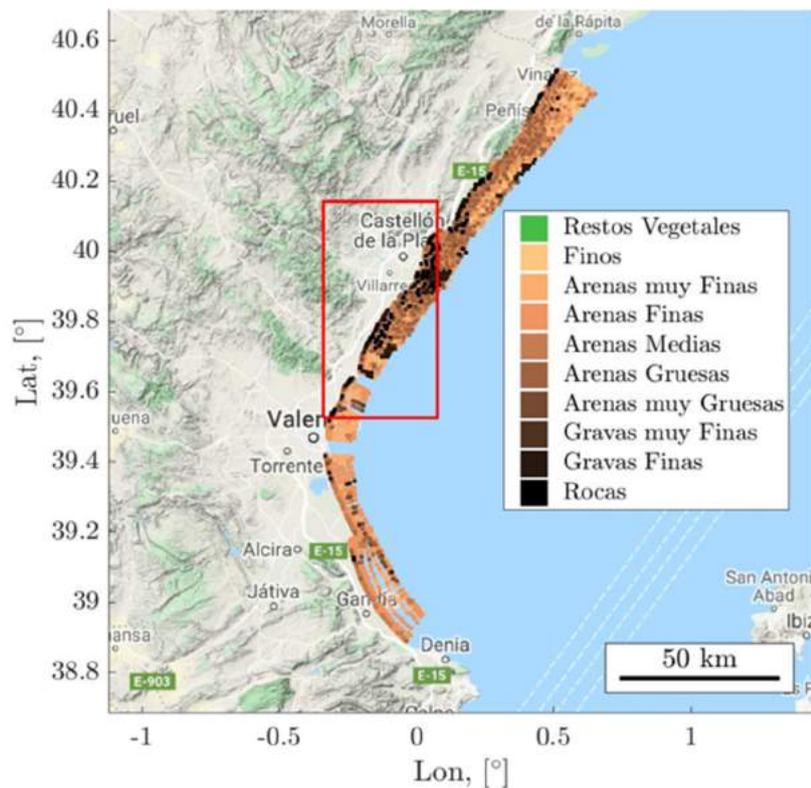


Figura 24. Muestras sedimentológicas puntuales en las provincias de Castellón y Valencia.

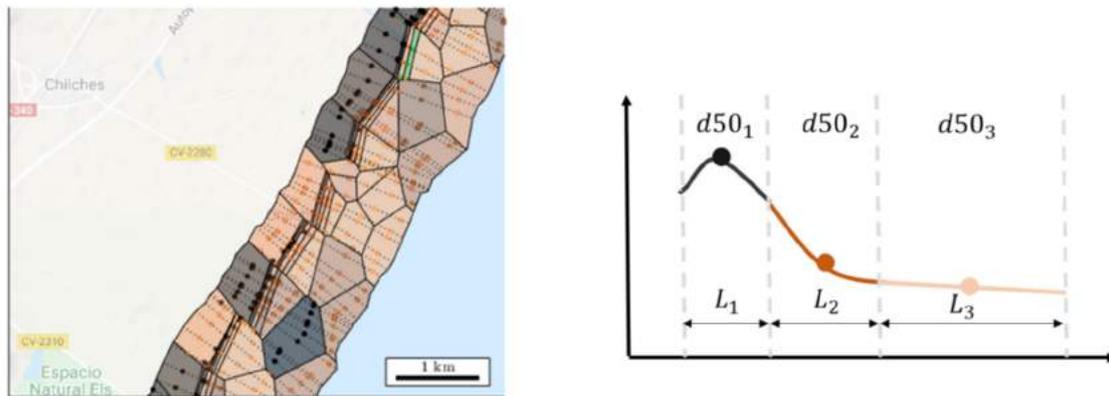


Figura 25. Cálculo del D50 en cada perfil. A la izquierda, polígonos de Voronoi y perfiles. A la derecha, esquema de los resultados obtenidos en cada perfil.

Del mismo modo, se ha retenido el D_{50} del frente de playa para identificar los perfiles que atraviesan un tramo protegido por escollera. En estos perfiles, la evolución de la línea de costa queda únicamente afectada por la inundación pasiva por ANMM, puesto que el efecto de los procesos longitudinales y transversales queda anulado por la rigidización de la línea de orilla. Sin embargo, se siguen calculando los caudales longitudinales de transporte de sedimentos, puesto que, aunque sus gradientes no generen cambios en la línea de costa a la altura del perfil, sí pueden generar cambios en las zonas adyacentes no protegidas por escollera.

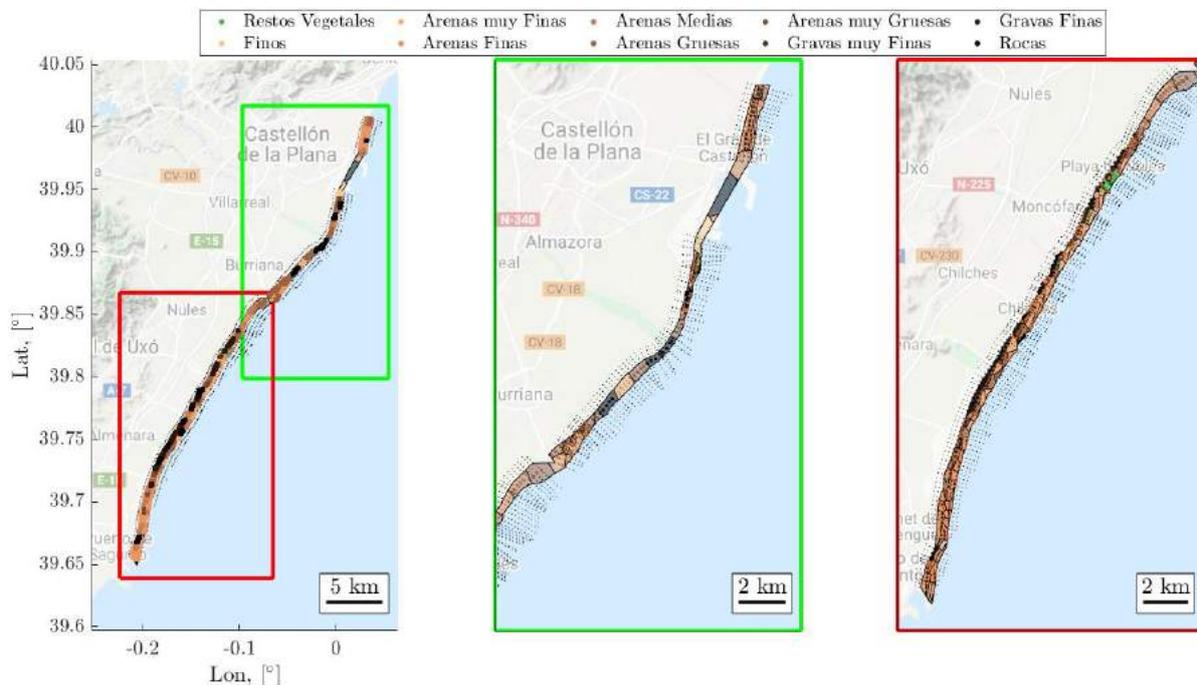


Figura 26. Características sedimentológicas en la zona de estudio delimitada por la extensión de los perfiles. Se muestran los polígonos de Voronoi y los diferentes perfiles (en trazo discontinuo). Los puntos discretos se corresponden con los puntos medios de las intersecciones de cada perfil con los polígonos de Voronoi

En la Tabla 2 del Anexo III se muestra las características sedimentológicas medias de las principales playas de la zona de estudio. Se observa que las playas que protegen núcleos urbanos tienen un tamaño de grano mayor, evidenciando regeneraciones que han tratado de estabilizar el perfil.

Cálculo de la pendiente del perfil activo

El cálculo de la pendiente del perfil activo en equilibrio requiere la determinación de la profundidad de cierre, la cota de la berma y la anchura del perfil activo. La primera se ha calculado aplicando la fórmula de Birkemeier (1985):

$$d_c = 1.57H_{s,12} \quad (10)$$

Donde $H_{s,12}$ es la altura de ola superada 12 horas al año.

La cota de la berma se ha asumido igual a un metro en todo el tramo de estudio y la anchura de la zona de rompientes se obtiene de la manera siguiente:

$$W^* = \left(\frac{d_c}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

Dónde A es el parámetro del perfil de Dean y depende del D50 de referencia del perfil.

La Tabla 3 del Anexo III muestra la profundidad de cierre y la anchura y pendiente del perfil activo en las principales playas de la zona de estudio.

Obtención de observaciones de la línea de costa

Para realizar una calibración adecuada del modelo de erosión es necesario contar con una campaña de monitorización suficientemente larga con observaciones frecuentes. Si bien en la zona de estudio se han realizado diversos estudios puntuales en los que se han medido perfiles, no existe ninguna campaña de monitorización continuada ni en tiempo ni en espacio. Por este motivo, las observaciones de la línea de costa con las que calibrar el modelo de erosión se han obtenido a partir de imágenes de satélite procedentes de Landsat5, Landsat8 y Sentinel2. Para ello, se ha aplicado el algoritmo desarrollado por (Vos et al., 2019) que detecta la línea de costa utilizando técnicas de clasificación supervisada de imágenes y de segmentación sub-píxel con una precisión superior a 10 metros. Los resultados obtenidos se han validado en aquellas zonas en las que se ha dispuesto de mediciones de perfiles proporcionadas por el MITERD. En la Figura 27 se muestran dos ejemplos del método de detección de la línea de costa en las playas de la Torre y del Puerto de Sagunto.

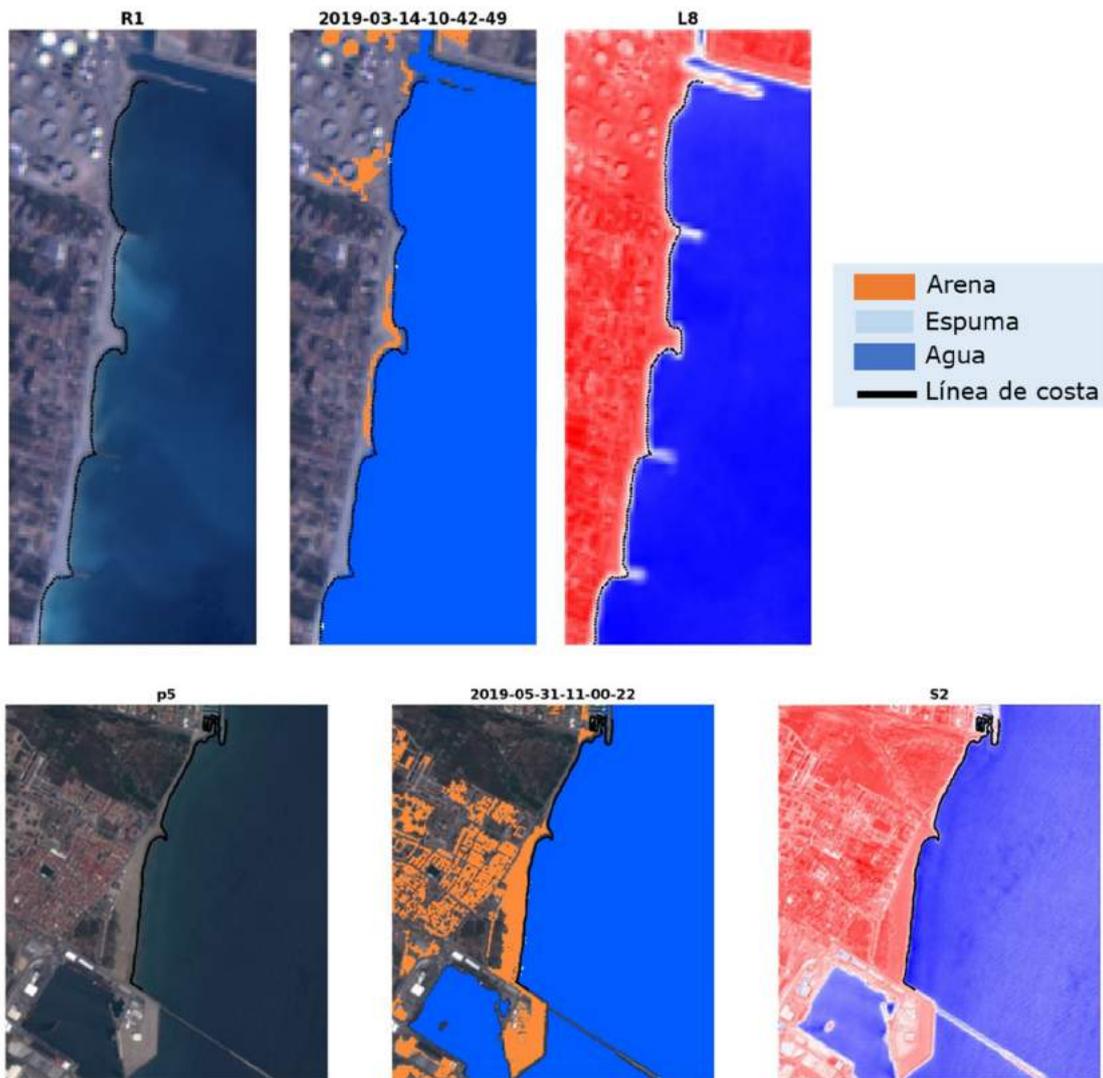


Figura 27. Detección de la línea de costa en la playa de la Torre a partir de una imagen de Landsat-8 (panel superior) y en la playa del Puerto de Sagunto a partir de una imagen de Sentinel 2(panel inferior) mediante el algoritmo Coast-Sat.

Para poder utilizar las observaciones de la línea de orilla en el modelo híbrido de erosión, es necesario tener en cuenta que las observaciones están afectadas por la marea astronómica y meteorológica. Pese a que la reducida carrera de marea en la zona de estudio, no va a generar alteraciones significativas de las observaciones, hemos realizado la corrección por marea siguiente para poder referenciar la línea de orilla con respecto a la línea de pleamar media:

$$Y_{PMVE} = Y_{WL} + \frac{Z_{PM} - Z_{WL}}{\tan \beta_f} \quad (12)$$

Donde:

Y_{PMVE} es la posición de la línea de costa de pleamar media viva equinoccial medida desde el punto en tierra del perfil; Y_{WL} es la posición de la línea de costa medida desde el punto en tierra del perfil, tal y cómo se obtiene del código Coast-Sat (sin corregir por marea), afectada por un nivel de marea astronómica y meteorológica WL; Z_{PMVE} es el nivel de la pleamar media viva equinoccial; Z_{WL} es el nivel de marea astronómica y meteorológica en el instante en el que se tomó la imagen de satélite; y $\tan \beta_f$ es la pendiente foreshore, que corresponde con el frente de playa.

Calibración del modelo

La calibración y validación del modelo de evolución de la línea de costa se ha llevado a cabo para el periodo 1990-2020 usando como forzamiento la marea meteorológica y el oleaje (regionalizado y propagado a rotura) obtenidos a partir del reanálisis de ERA5, además de la marea astronómica. La Figura 28 muestra los resultados obtenidos en cinco transectos, en los que se ha representado la serie de evolución de la línea de costa simulada (línea de color negro) y las observaciones asimiladas (puntos grises). Los transectos 34, 79 y 123 reflejan cambios bruscos producidos por actuaciones antrópicas, esencialmente regeneraciones de playas y la construcción de espigones. El conjunto de actuaciones antrópicas identificadas en el periodo 1990-2020 en todo el tramo de estudio se recoge en la Tabla 9 del Anexo IV. Todas ellas están recogidas por las observaciones empleadas para calibrar el modelo y se han modelado con la formulación propuesta. Los resultados para el perfil 123 se muestran con más detalle en la Figura 29, donde se representa, además, la evolución de los parámetros libres del modelo (del segundo al cuarto panel) y su incertidumbre (sombreado gris). El filtro extendido de Kalman sólo se ha aplicado en el periodo 1990-2015 y, de 2015 en adelante, se ha validado la calibración.

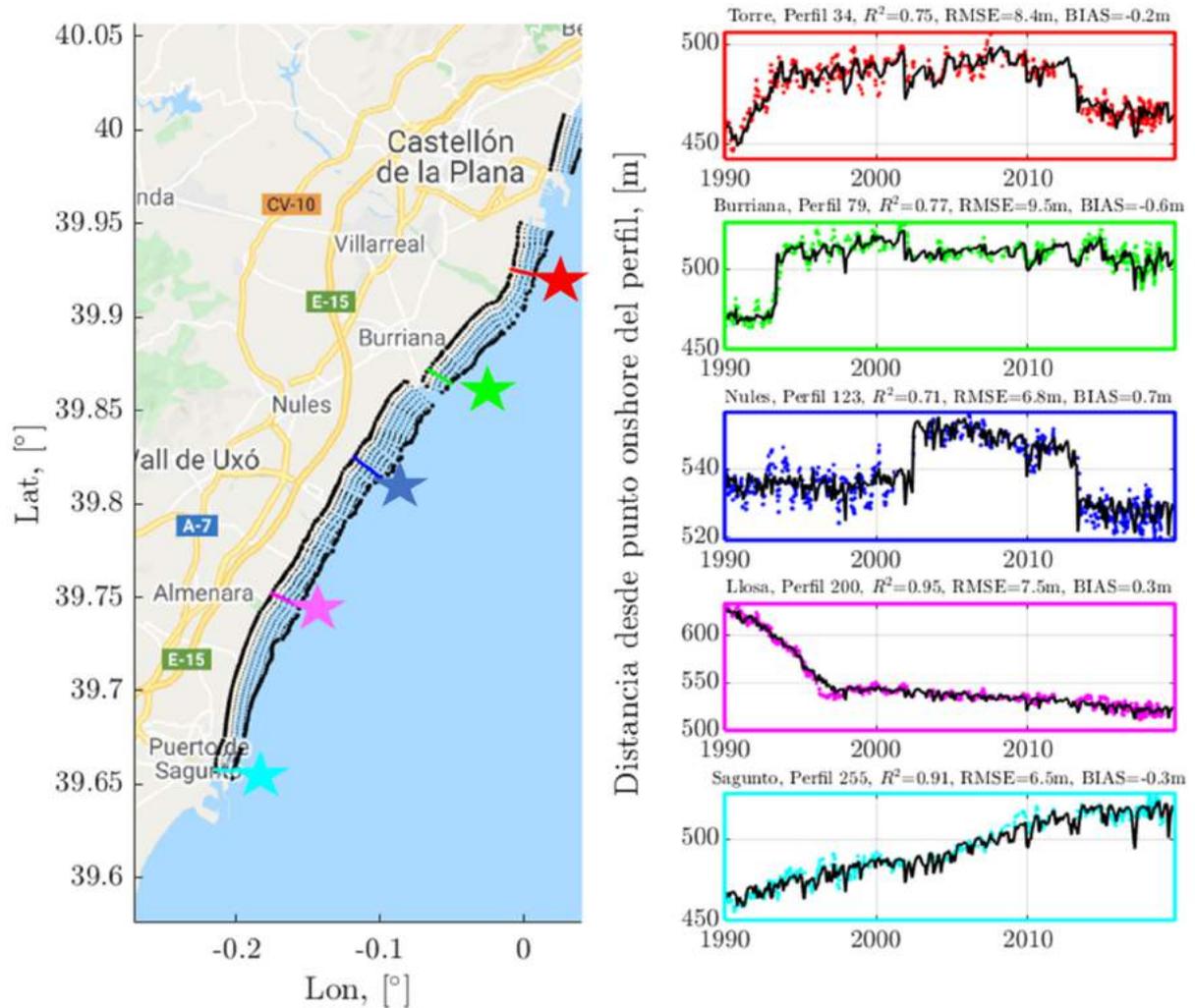


Figura 28. Calibración del modelo durante el periodo histórico 1990-2019. En el panel izquierdo se representan los perfiles sobre la zona de estudio (trazo negro discontinuo). En el panel derecho se representan las series de evolución de la línea de costa simulada (trazo negro continuo) y las observaciones (puntos de colores). El color del marco de las series simuladas y de las observaciones coincide con los perfiles correspondientes resaltados en el panel izquierdo.

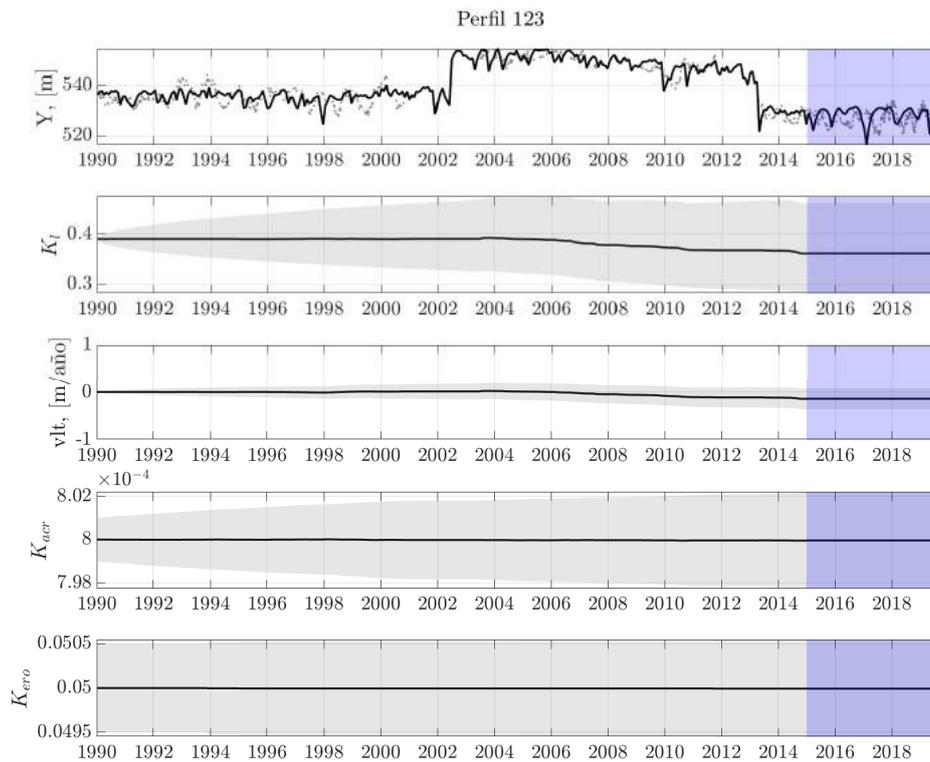


Figura 29. Evolución temporal de la línea de costa en un perfil en la playa de Nules. En el panel superior se representa la línea de costa (trazo negro) y las observaciones (puntos grises) con respecto a una referencia situada en el punto inicial del perfil en costa. En los paneles inferiores se representa la evolución de los parámetros libres del modelo en trazo negro, mientras que en gris se representa la evolución de la incertidumbre asociada al parámetro. El modelo se calibra mediante el filtro extendido de Kalman hasta 2015 mientras que durante el periodo 2015-2020 (resaltado en azul) se valida la calibración

Para determinar la capacidad predictiva del modelo, se han comparado las series de evolución de la línea de costa simulada con y sin asimilación y la serie observada, y se han calculado estadísticos del error (RMSE, BIAS, R^2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{sim,i} - Y_{obs,i})^2} \quad (13)$$

$$BIAS = \bar{Y}_{sim} - \bar{Y}_{obs}$$

$$R^2 = \frac{\sigma^2(Y_{sim}Y_{obs})}{\sigma^2(Y_{sim})\sigma^2(Y_{obs})}$$

Estos estadísticos, recogidos en la Tabla 4 del Anexo III, ponen de manifiesto la mejora que produce la asimilación de datos. Por otro lado, el hecho de que, aun sin asimilación, los estadísticos arrojen valores satisfactorios pone de manifiesto la habilidad del modelo desarrollado para simular los procesos físicos relevantes.

4.4. Resultados

Para obtener las proyecciones de evolución de la línea de costa, el modelo de erosión se ha forzado con información de oleaje, marea meteorológica, marea astronómica y ANMM. Las proyecciones dinámicas de oleaje, regionalizado y propagado a rotura, y de marea meteorológica utilizadas corresponden a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (representativos de concentraciones moderadas y elevadas, respectivamente) y a los modelos climáticos CNRM, EART, HADG, IPSL y MEDC. Para esos mismos escenarios, se han obtenido tres trayectorias de ANMM asociadas a los percentiles 5, 50 y 95 de una distribución normal ajustada a los resultados de veinte modelos climáticos. Por último, la marea astronómica futura se ha reconstruido mediante el análisis de sus armónicos.

Como resultado, se han obtenido, en cada uno de los 256 transectos, 30 series de evolución de la línea de costa horarias de 2020 a 2100. Con estos datos se han calculado posiciones medias, variaciones estacionales, cambios estructurales y erosiones extremas, todo ellos con la incertidumbre asociada a los escenarios, modelos climáticos y percentiles de ANMM. A continuación, se resumen los principales resultados derivados del análisis realizado.

Evolución temporal (largo plazo) de la posición media de la línea de costa

El efecto combinado del transporte longitudinal y el ANMM induce cambios crónicos o estructurales en la posición media de la línea de costa en torno a la cual se producen variaciones estacionales e interanuales. Para determinar la posición media de la línea de costa en un año horizonte, se han promediado las posiciones de la línea de costa durante los dos años anteriores.

Las Figuras 29 y 31 muestran, para los RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente, la posición media de la línea de costa de las principales playas de la zona piloto en 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100. Con el fin de tener en cuenta las incertidumbres derivadas de los forzamientos, las posiciones en 2050 y 2100 recogen toda la variabilidad inter-modelo y la incertidumbre asociada al ANMM, es decir, se obtienen promediando las posiciones futuras calculadas mediante cada modelo climático y trayectoria de ANMM. Del estudio de las posiciones medias se aprecia la tendencia erosiva en la playa de Torre, que ha sido contenida, sólo parcialmente, por el campo de espigones. En el caso de la inacción, se aprecia claramente la completa reorientación de los compartimentos entre espigones hacia la dirección del flujo de energía de los temporales que movilizan el sedimento. Este giro antihorario hace que la línea de costa llegue a tocar las defensas costeras. La playa de Burriana, situada al norte del puerto, tiene una clara tendencia a la acreción por transporte longitudinal. A medio plazo futuro, el transporte longitudinal supera al ANMM, sin embargo, en escenarios a largo plazo el retroceso asociado al ANMM supera a la acreción por transporte longitudinal. En lo que respecta a las playas de la unidad Burriana-Sagunto, la erosión crónica de la zona norte ha obligado a proteger con campos de espigones las playas de Nules, Moncófar y Chilches, mientras que las playas de Almenara, Almardá, Canet y Sagunto se encuentran estables o en acreción. En el futuro, las pequeñas celdas litorales compartimentadas por espigones de las playas de Nules y Moncófar, sufrirán una rotación antihoraria que tenderá a minimizar los gradientes longitudinales de transporte sólido. El giro hará que la línea de costa intersecte el paseo marítimo en el peor de los escenarios, en el caso de no intervenir. Por otro lado, las playas situadas al sur de la unidad fisiográfica sufren acreción por transporte longitudinal. Sin embargo, a fin de siglo los efectos del ANMM serán predominantes, y todas las playas retrocederán.

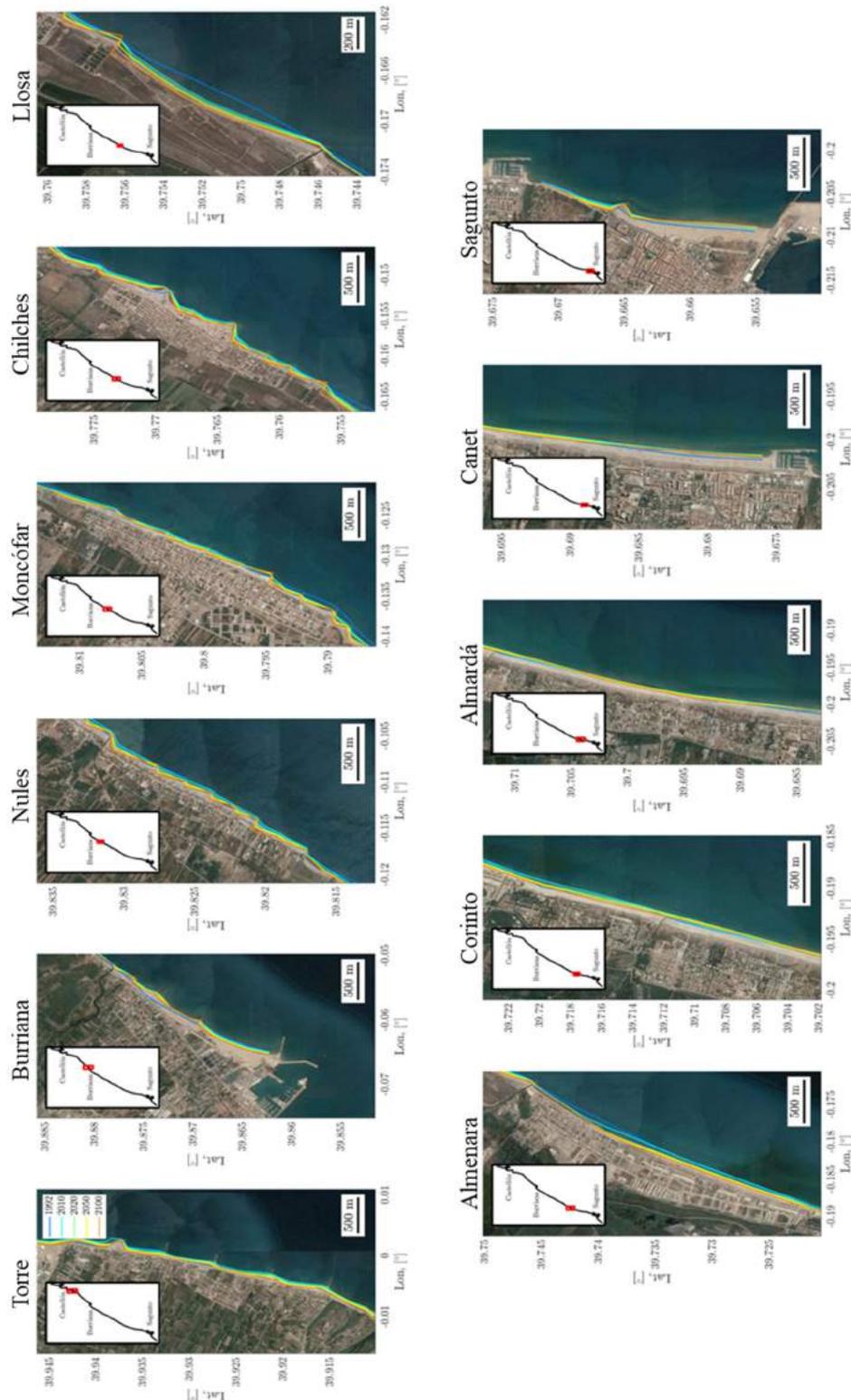


Figura 30. Líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas para los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. Los diferentes paneles se corresponden con las principales playas del tramo de estudio.

En la Figura 31 se muestra un detalle de las líneas de costa medias en diferentes horizontes temporales promediadas en los cinco RCMs y en las tres trayectorias de ANMM modeladas para el RCP4.5. La playa de Chilches (panel izquierdo de la figura) sufre un retroceso generalizado de la línea de costa en periodos futuros y la rotación de los compartimentos delimitados por espigones para adaptarse al flujo medio de energía reinante. De no tomar medidas, el retroceso futuro de la línea de costa rebasa ampliamente las construcciones al sur de la playa, exponiendo a la población y a los activos allí presentes. La evolución temporal de la línea de costa en la playa de Llosa (panel derecho de la figura) evidencia un retroceso muy importante entre los años 1992 y 2010 debido a la estrategia de gestión en las playas urbanas situadas al norte. La tendencia erosiva tiende a estabilizarse tras el año 2010, sin embargo, se producen retrocesos importantes a fin de siglo que alcanzan los 200 metros con respecto a la línea de costa media de 1992 en la parte central de la playa. Pese a ello, playa de Llosa no presenta impedimentos físicos a la migración del perfil ante el ANMM.

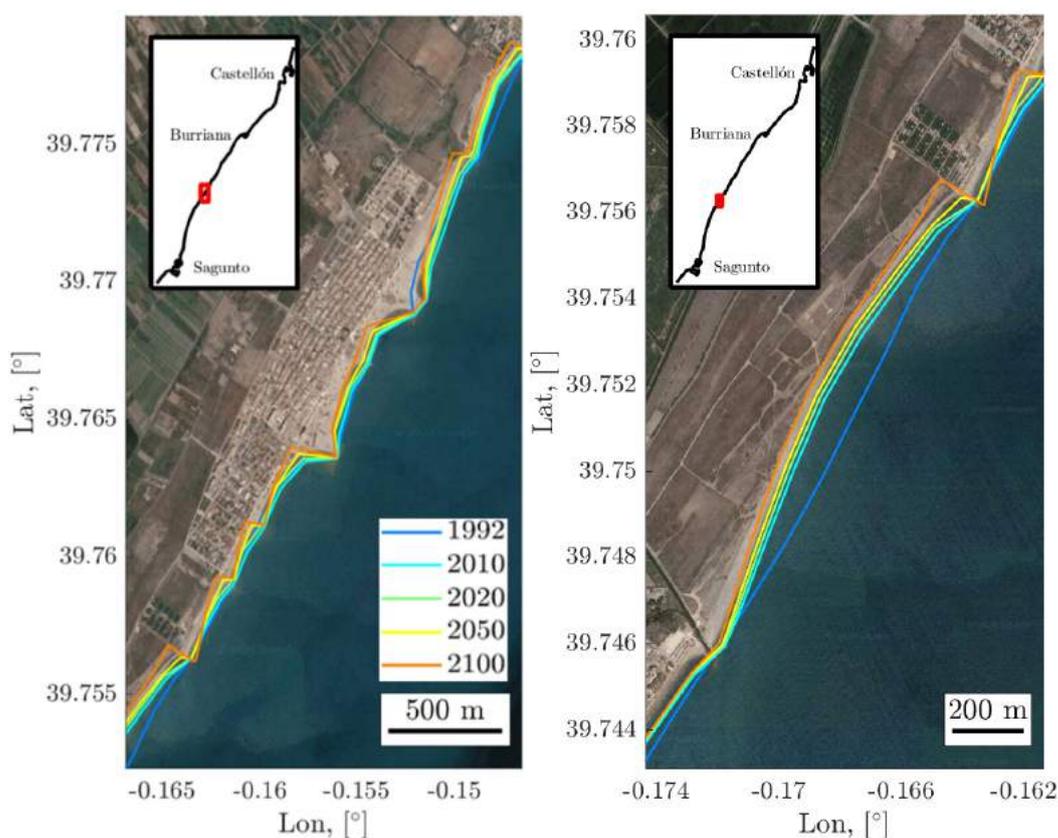


Figura 31. Detalle de las líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas para los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. En el panel izquierdo se muestra la playa de Chilches y en el panel derecho se muestra la playa de Llosa.

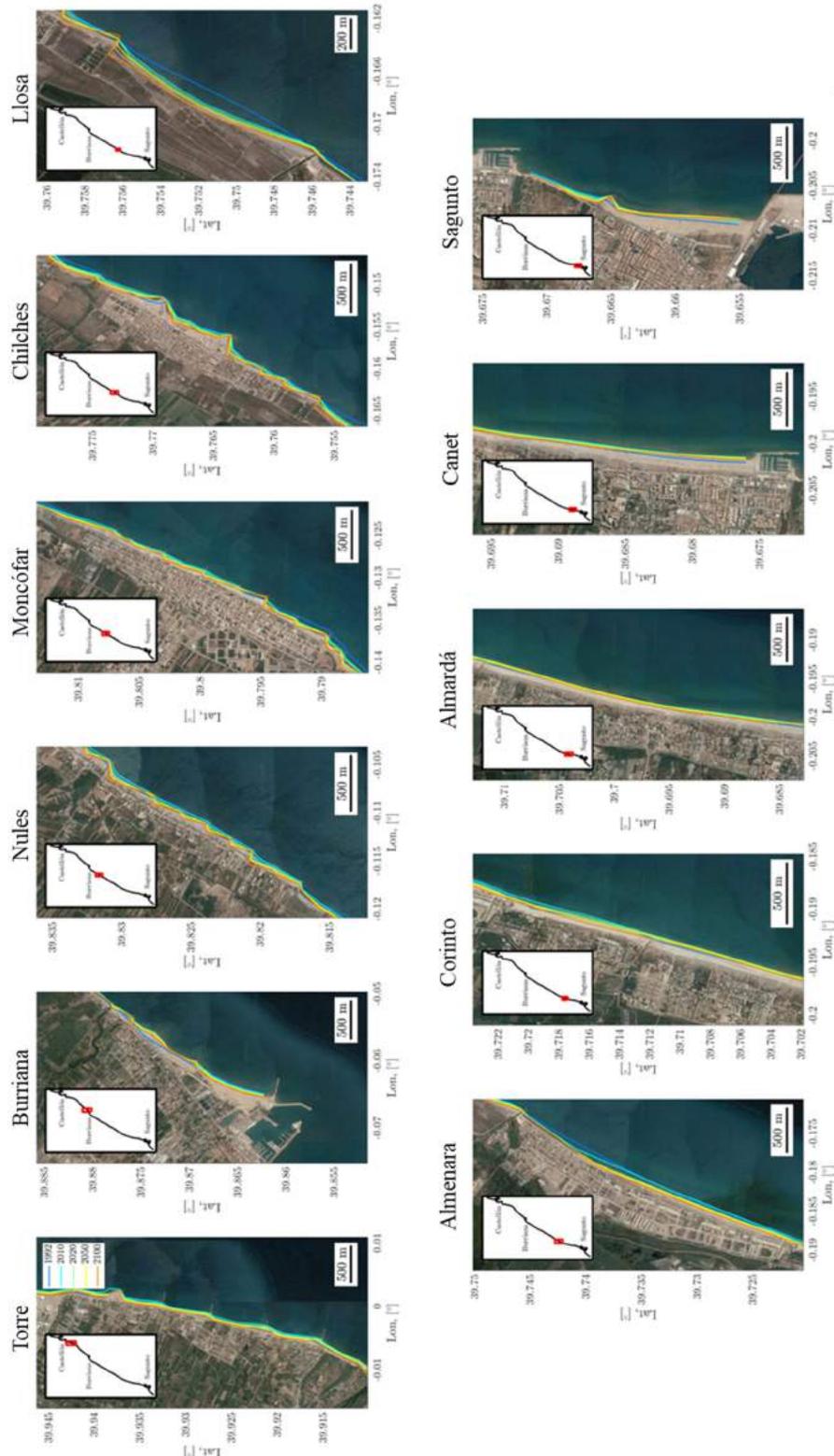


Figura 32. Líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas para los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. Los diferentes paneles se corresponden con las principales playas del tramo de estudio.

En la Figura 33 se muestra un detalle de las líneas de costa medias en diferentes horizontes temporales promediadas entre los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el RCP8.5. Los patrones de erosión y acreción en las playas coinciden con el comportamiento mostrado en la Figura 31, aunque los efectos del ANMM acentúan los retrocesos.

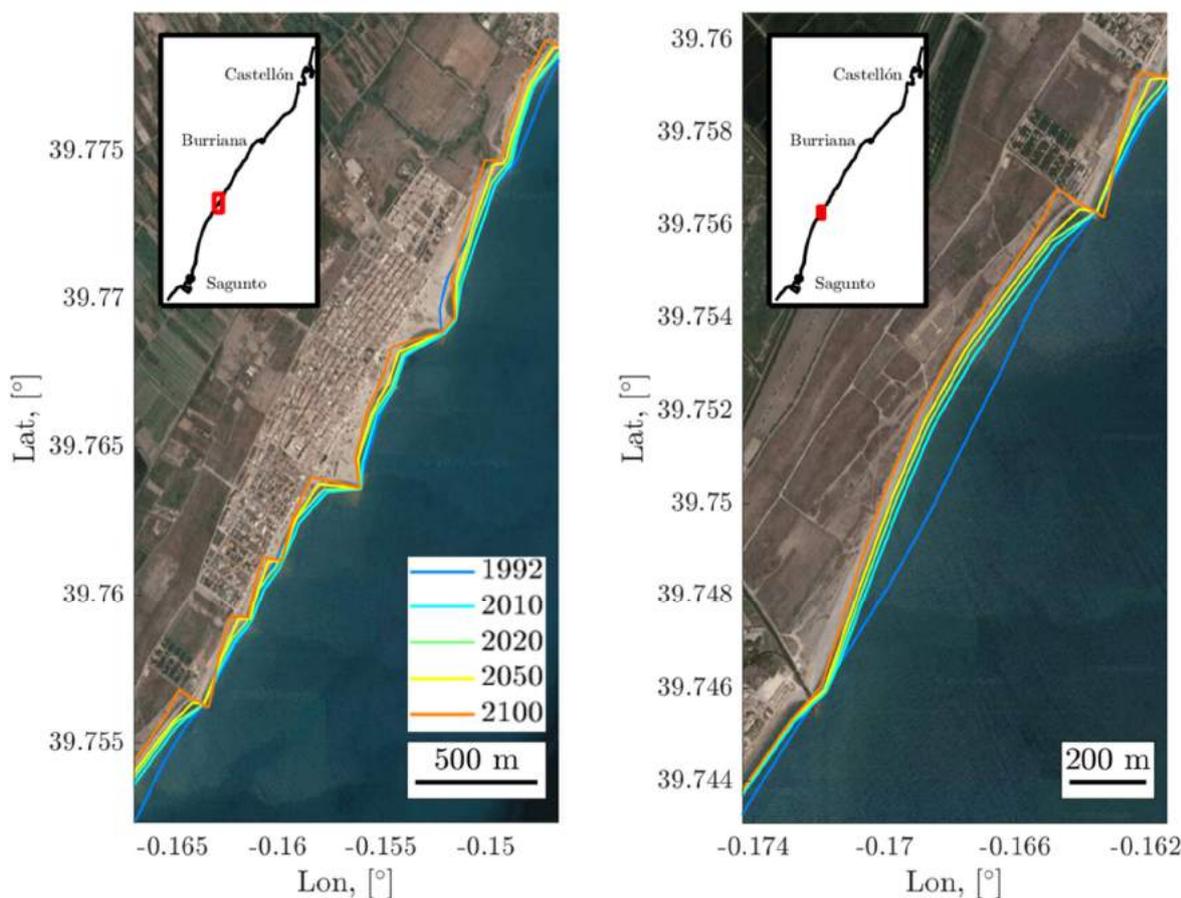


Figura 33. Detalle de las líneas de costa medias en los horizontes temporales 1992, 2010, 2020, 2050 y 2100 promediadas entre los cinco RCMs y las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. En el panel izquierdo se muestra la playa de Chilches y en el panel derecho se muestra la playa de Llosa.

Variación estacional de la posición media de la línea de costa

La posición media de la línea de costa sufre avances o retrocesos de forma estacional en función de la energía de las dinámicas incidentes. Por ello, en estas latitudes, la posición media de la línea de costa en invierno suele experimentar un retranqueo con respecto a su posición en verano.

Las Figuras 33 y 34 muestran, para los RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente, y para cada modelo climático y trayectoria de ANMM, la posición media de la línea de costa de las principales playas de la zona piloto en 2050 y 2100 y su variación estacional asociada, representada con un sombreado que comprende la envolvente de posiciones medias de la línea de costa en invierno y verano.

En el panel izquierdo de las figuras se muestra la playa de Torre, la playa de Burriana y la playa de Moncófar. En el panel derecho se muestran las playas de Almenara, Almardá y Sagunto. La variación estacional de la línea de costa media es del entorno de 20 m en todas las playas. Se aprecia claramente la erosión crónica en las playas de Torre (panel izquierdo superior) y Moncófar (panel izquierdo inferior) en la línea de costa media del 2100. Por otro lado, en el resto de playas (Almenara, Burriana y Sagunto), la tendencia a la acreción por su situación al norte de los grandes puertos se compensa, a fin de siglo, por el ANMM en el RCP4.5. En el caso del RCP8.5, la línea de costa futura retrocede en todas las playas debido a la mayor contribución del ANMM.

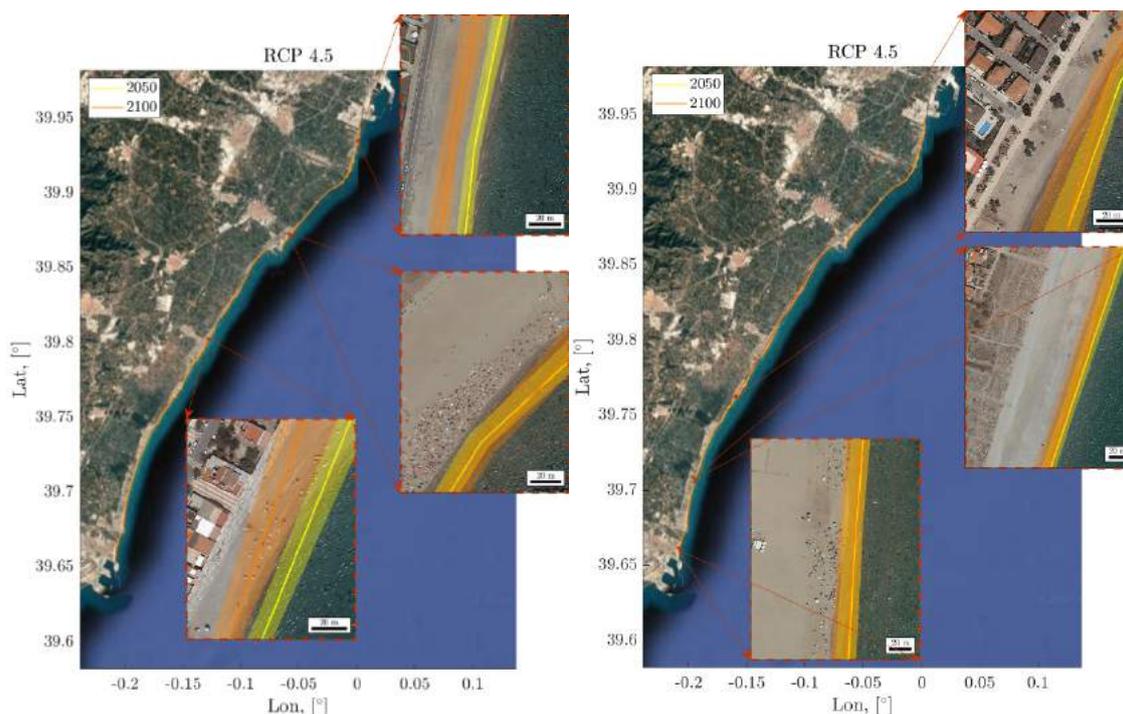


Figura 34. Variación estacional de la línea de costa media en los horizontes temporales 2050 y 2100 promediada entre los cinco RCMs y entre las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. La línea continua representa la posición media de la línea de costa en el horizonte temporal y promediada entre las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs. La banda representa la envolvente (máxima variabilidad) de las posiciones medias de los inviernos (octubre-marzo) y los veranos (abril-septiembre) en los horizontes temporales 2050 y 2100 de las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs.

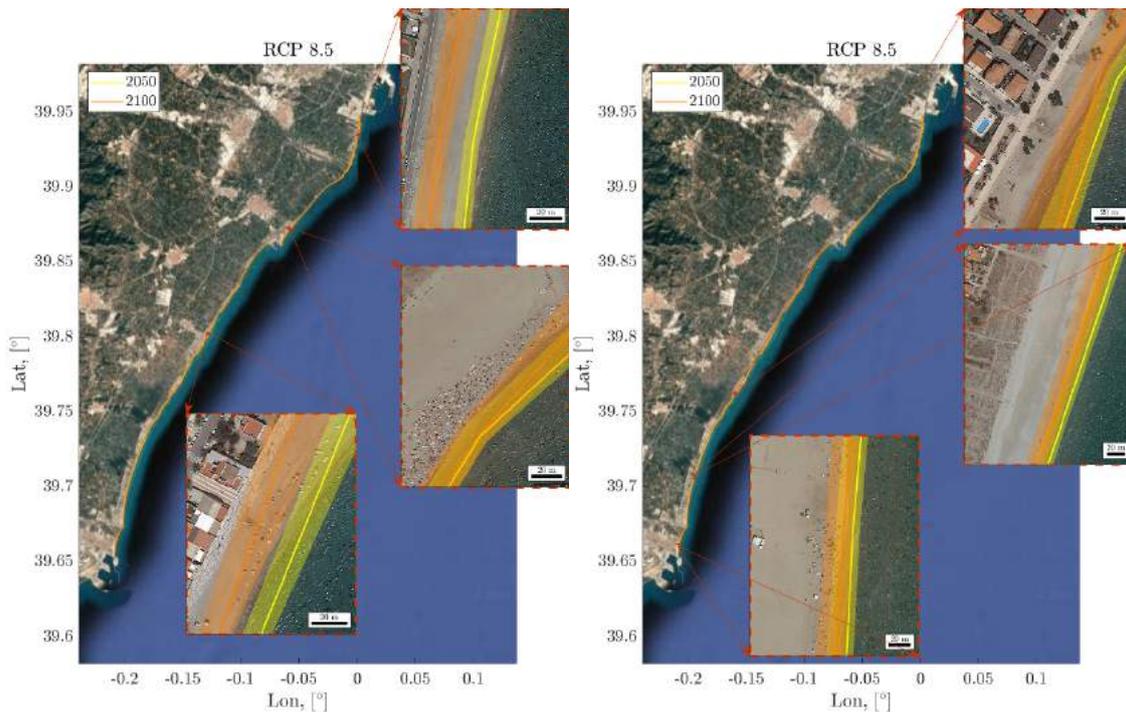


Figura 35. Variación estacional de la línea de costa media en los horizontes temporales 2050 y 2100 promediada entre los cinco RCMs y entre las tres trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. La línea continua representa la posición media de la línea de costa en el horizonte temporal y promediada entre las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs. La banda representa la envolvente (máxima variabilidad) de las posiciones medias de los inviernos (octubre-marzo) y los veranos (abril-septiembre) en los horizontes temporales 2050 y 2100 de las diferentes combinaciones de RCMs y RCPs.

Distribución de cambios estructurales en la posición media de la línea de costa

Las posiciones medias de la línea de costa en los horizontes temporales 2010, 2050 y 2100 se han promediado en los transectos de los principales arenales de la zona de estudio para obtener posiciones representativas en los años objetivo. Con esta información, se ha calculado el cambio estructural (avance o retroceso) de la línea de costa en cada playa en 2050 y 2100 con respecto a 2010 (año base), además del correspondiente aumento o pérdida de superficie.

Los resultados se muestran en valor absoluto y relativo para los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente para cada uno de las playas. Cada una de las playas está delimitada por los transectos definidos en la Figura 23. Las áreas de referencia de las playas, definidas desde la línea de costa del 2010 hasta la frontera no erosionable (línea magenta de la Figura 23) y recogidas en la Tabla 1 del Anexo III son las empleadas para relativizar los resultados. Los resultados se recogen en un diagrama de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo. Las Figuras 35 y 36 corresponden al año 2050, y las Figuras 37 y 38 al 2100.

La dinámica sedimentaria juega un papel relevante en los resultados. Las playas más afectadas son las playas de Torre, Nules, Moncófar, Chilches y Llosa. Pese a los fuertes retrocesos medios a fin de siglo en estas playas del orden de 60 m, la compartimentación mediante espigones evita la pérdida total de la playa. Sin embargo, la reorientación entre espigones reduce drásticamente el valor de protección de la playa frente a inundaciones, pues la línea de costa en la zona norte de los compartimentos llega a rebasar las defensas costeras. Las playas más estables son las playas de Burriana, Corinto, Almará, Canet y Sagunto. Pese a ello, sufrirán retrocesos del orden de 30 m, debido fundamentalmente a la contribución del ANMM.

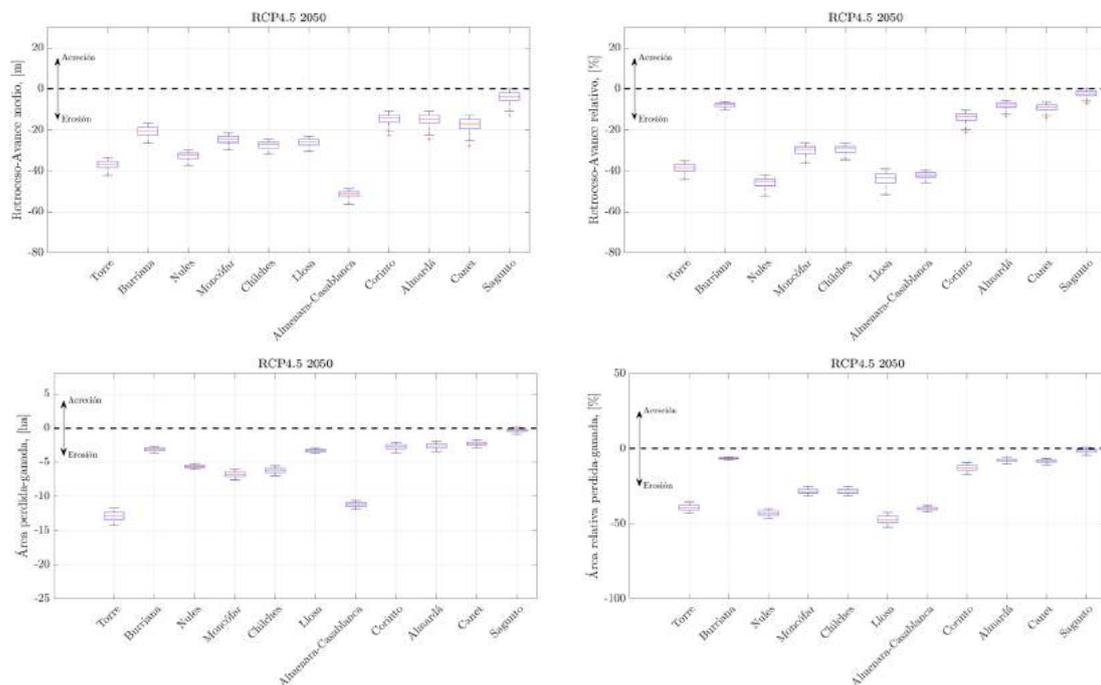


Figura 36. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2050 con respecto al año 2010 para el RCP4.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2050 para el RCP4.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 23). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo.

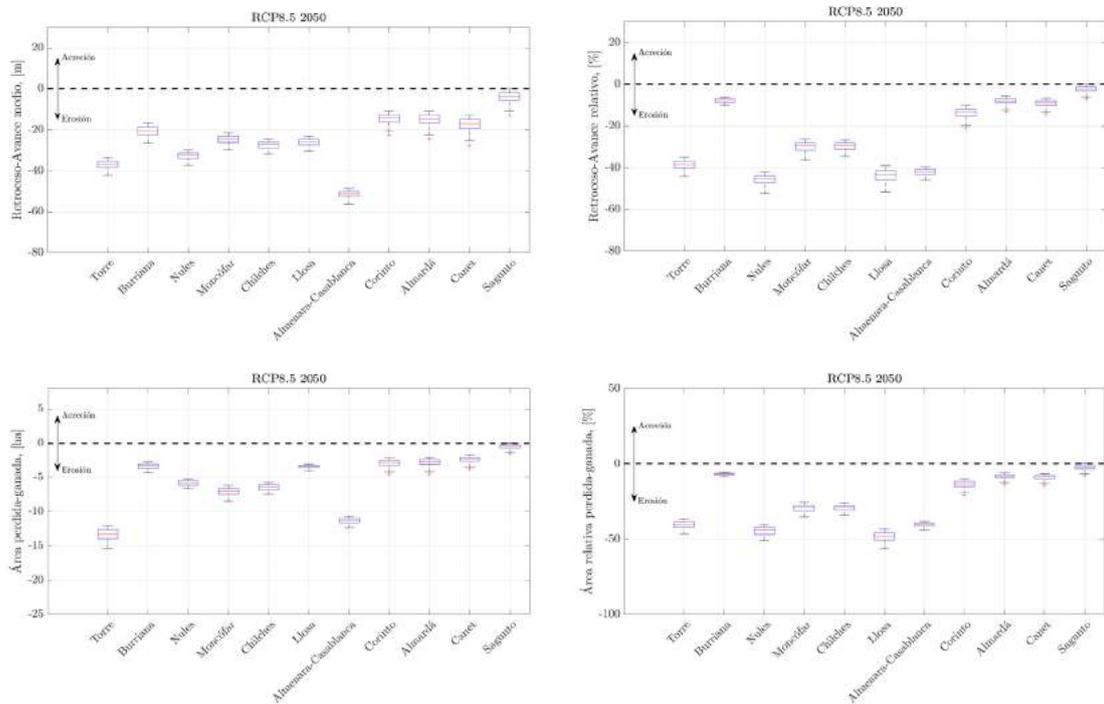


Figura 37. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2050 con respecto al año 2010 para el RCP8.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2050 para el RCP8.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 23). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo.

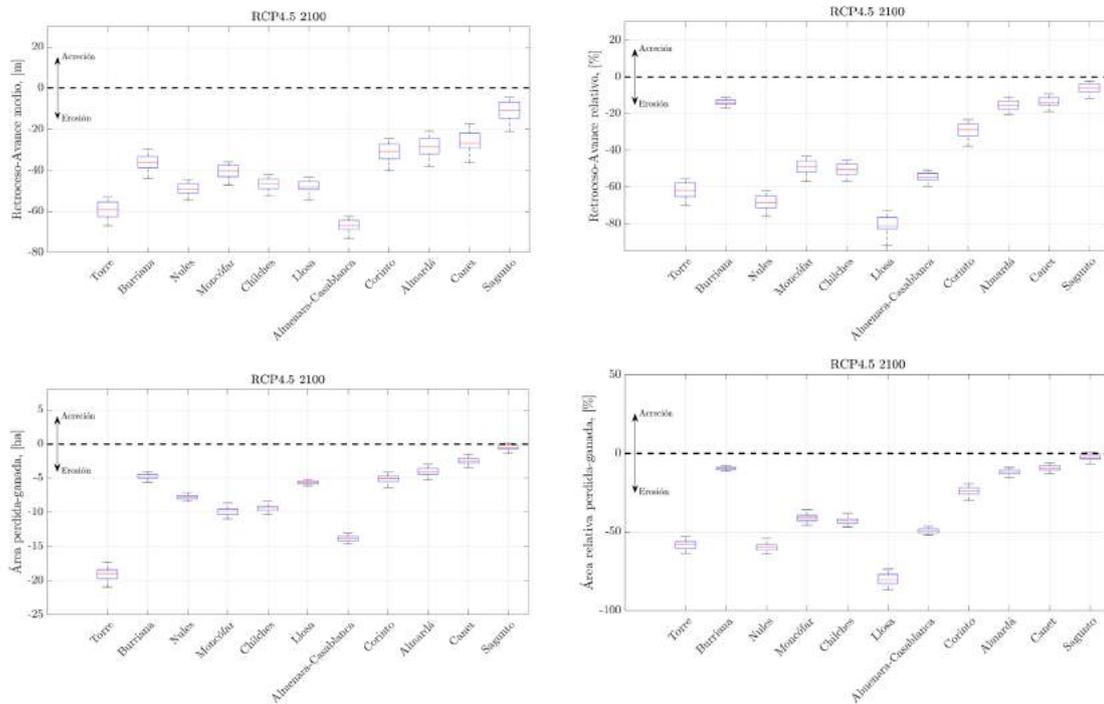


Figura 38. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2100 con respecto al año 2010 para el RCP4.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2100 para el RCP4.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 23). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo.

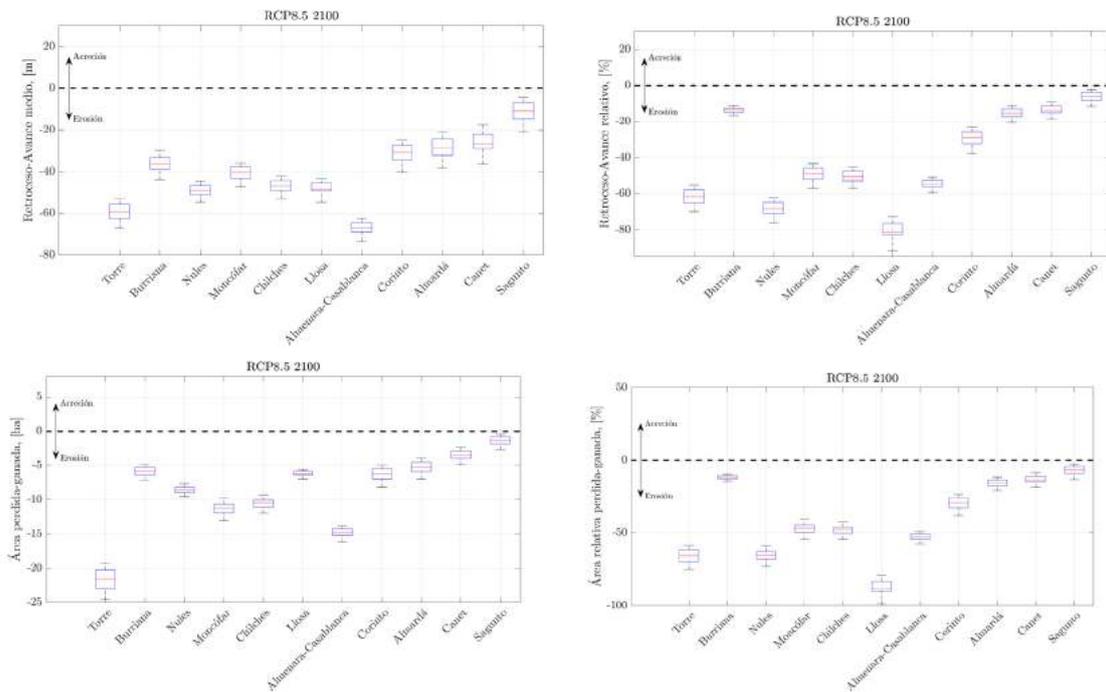


Figura 39. Retrocesos y áreas perdidas en el año 2100 con respecto al año 2010 para el RCP8.5 en los principales arenales del tramo Castellón-Sagunto. Los valores de retrocesos y áreas absolutos se han calculado a partir de los cambios estructurales en la posición media de la línea de costa en el año 2100 para el RCP8.5 de cada RCM, con respecto a la línea media del año 2010 del hindcast. Los retrocesos representativos de cada arenal se obtienen promediando los retrocesos estructurales en los diferentes transectos que conforman la playa. Los resultados absolutos se relativizan con respecto al ancho y al área de playa en el año 2010, que se han calculado a partir de la línea no erosionable (Figura 23). Los resultados se recogen en diagramas de cajas que muestran la incertidumbre inherente a los cinco modelos climáticos y a las tres trayectorias de ANMM. Las líneas horizontales de cada caja representan los cuartiles del 25, 50 y 70 de la distribución de todos los valores posibles y los extremos de los bigotes representan los valores máximo y mínimo.

Contribución de los diferentes procesos de transporte de sedimentos considerados a la variabilidad de la posición de la línea de costa

Se ha determinado la fracción de la varianza total de la línea de costa expresada en función de cada uno de los procesos de transporte de sedimentos incluidos en el modelado. La disociación de los efectos del ANMM de la componente del transporte transversal se ha realizado mediante una media móvil con una ventana de 5 años.

Los resultados se presentan en gráficos de sectores en los que se ha promediado la contribución de cada proceso modelado en las principales playas de la zona piloto. La incertidumbre asociada a los modelos climáticos y a las trayectorias de ANMM se ha representado mediante arcos circulares concéntricos cuyos extremos determinan la contribución mínima y máxima de los procesos correspondientes.

La Figura 40 muestra los resultados para todo el tramo de estudio y para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. En general, puede apreciarse que, independientemente del escenario considerado, el porcentaje de la varianza atribuido a procesos longitudinales, transversales o por aumento del nivel medio del mar cambia con la localización y orientación de la playa, siendo los procesos de transporte longitudinal los dominantes en la zona central del tramo piloto, al sur del puerto de Burriana. En esta

zona, la costa rota en sentido horario hacia el sureste, aumentando, por tanto, el ángulo relativo con respecto al flujo medio de energía del oleaje, lo que hace que el transporte longitudinal aumente significativamente. Asimismo, puede observarse que, para el RCP8.5, el porcentaje de varianza de la posición de la línea de costa asociado al aumento del nivel medio del mar, incrementa su peso relativo, siendo especialmente relevante en las playas de Sagunto, Almardá y Almenara.

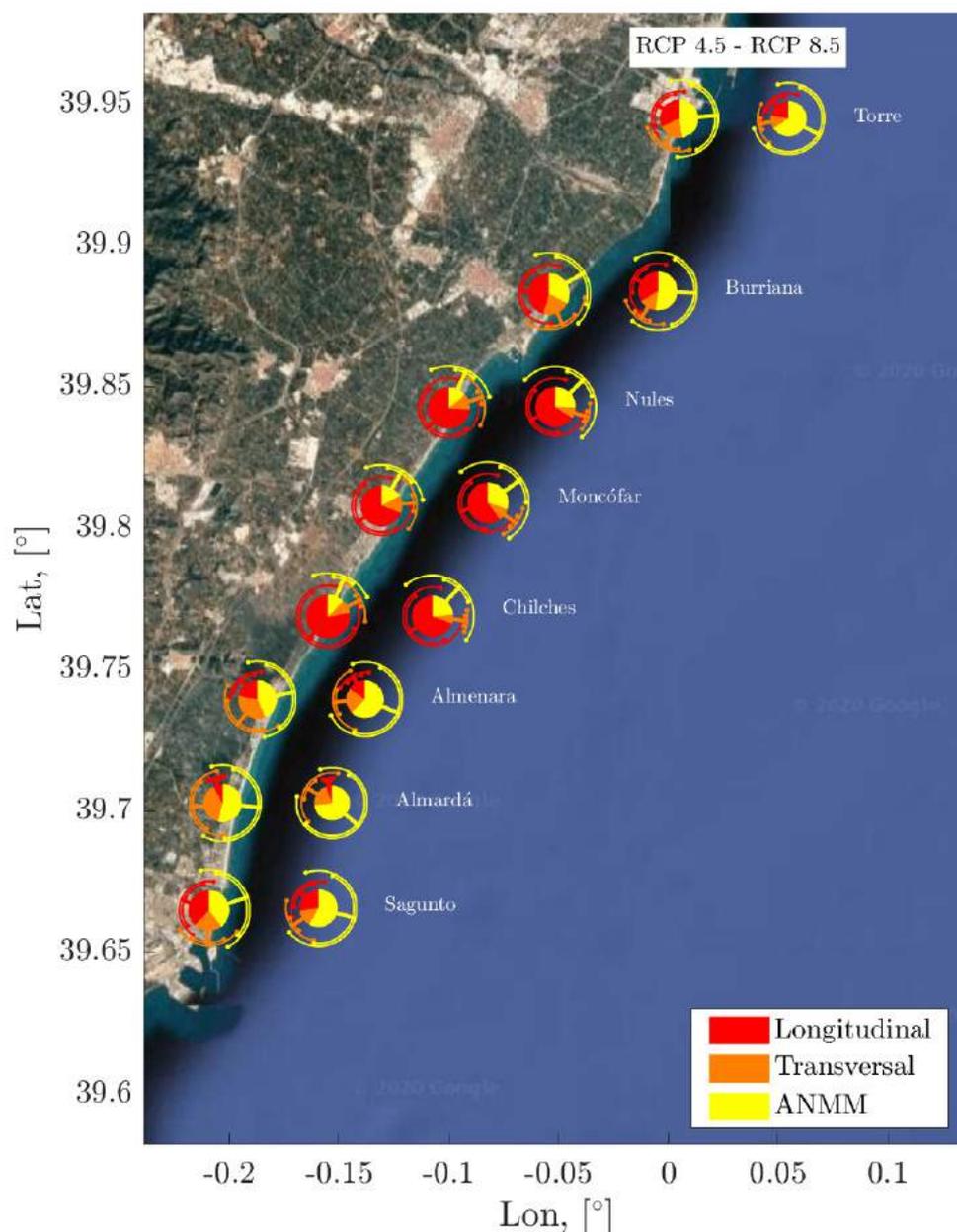


Figura 40. Análisis de la contribución relativa de los diferentes procesos modelados (transporte longitudinal, transversal y ANMM) a la variación de la línea de costa para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en las principales playas. Los sectores circulares representan las contribuciones medias entre los diferentes RCPs y trayectorias de ANMM. La incertidumbre asociada a los RCMs y a las trayectorias de ANMM se ha representado mediante arcos circulares concéntricos cuyos extremos determinan la contribución mínima y máxima de los procesos correspondientes.

La Figura 41 muestra el detalle de la contribución relativa de los diferentes procesos modelados en las playas de Torre (panel izquierdo) y Chilches (panel derecho). De la comparación del peso relativo de los diferentes procesos en la evolución de la línea de costa de las playas, se pone de manifiesto la mayor contribución del transporte longitudinal en la playa de Chilches con respecto a Torre, motivada por el mayor ángulo relativo entre la línea de costa con respecto a la dirección del flujo medio de energía reinante. Por otro lado, se evidencia, en las dos playas, el aumento de la contribución del ANMM al pasar al escenario de emisiones RCP8.5. En ambos casos, la variación en la línea de costa motivada por procesos transversales es inferior a la contribución del ANMM y del transporte longitudinal. El análisis de la contribución de los diferentes procesos a la variación de la línea de costa es una herramienta esencial para planificar adecuadamente las estrategias de adaptación y mitigación, pues las actuaciones dependen del proceso dominante.

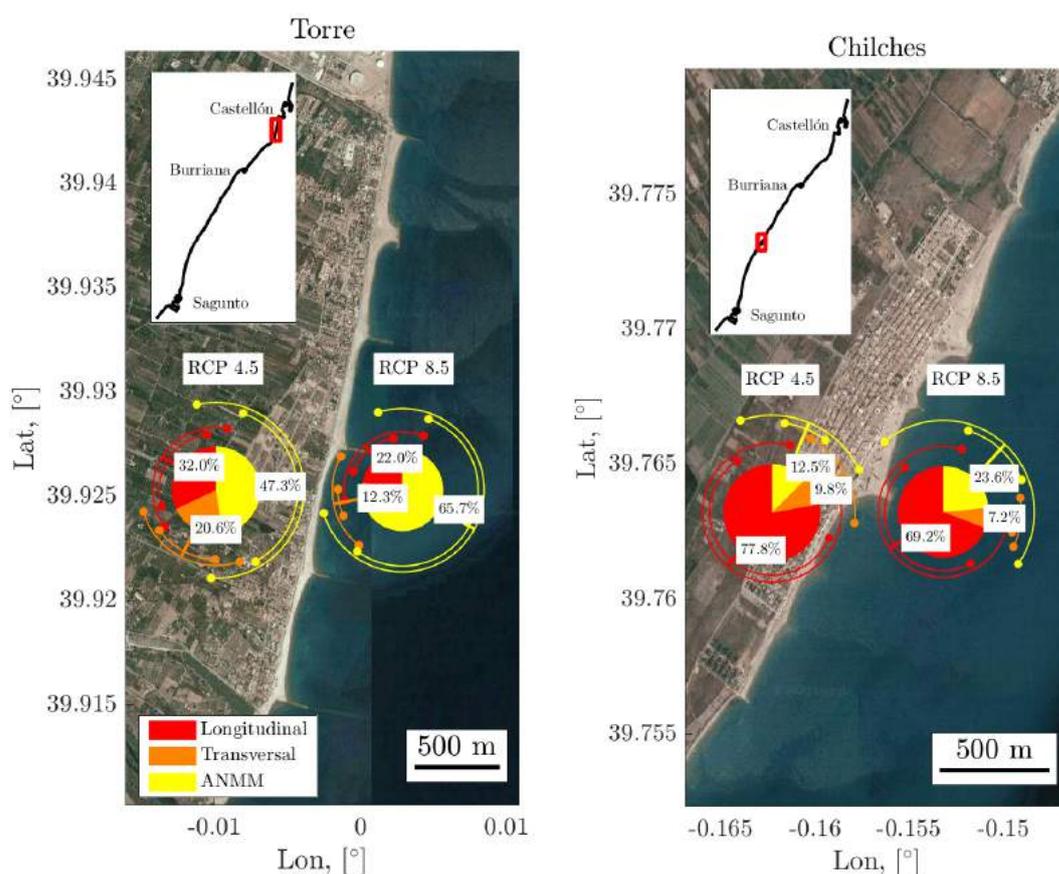


Figura 41. Análisis de la contribución relativa de los diferentes procesos modelados (transporte longitudinal, transversal y ANMM) a la variación de la línea de costa para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en las playas de Torre (panel izquierdo) y Chilches (panel derecho). Los sectores circulares representan las contribuciones medias entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM. Los anillos concéntricos a los sectores representan las contribuciones mínima y máxima de los diferentes procesos asociados a los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM. La incertidumbre asociada a los RCMs y a las trayectorias de ANMM se ha representado mediante arcos circulares concéntricos cuyos extremos determinan la contribución mínima y máxima de los procesos correspondientes.

Eventos extremos de erosión

En torno a la posición media de la línea de costa se producen, además de variaciones estacionales, retrocesos episódicos debidos a eventos extremos de oleaje y nivel del mar que es necesario prever para una gestión más eficiente y resiliente de la costa.

Con ese objetivo, se han extraído de las series de evolución de la línea de costa simuladas los eventos de erosión máximos anuales y se han ajustado a una función generalizada de extremos (GEV por sus siglas en inglés).

Debido al fuerte transporte longitudinal en esta zona y a los efectos del ANMM, la posición media en torno a la que oscila la línea de costa no es fija, sino que varía en el tiempo debido a la tendencia erosiva o de acreción inducida por estos procesos. Por ello, es necesario que los extremos de erosión con los que se esté trabajando tengan una referencia.

En un primer análisis se ha realizado un ajuste estacionario. Este tipo de ajustes tiene una limitación en lo que respecta a datos con tendencia y, si bien permite determinar los retrocesos asociados a periodos de retorno que pueden producirse en un periodo de tiempo (de tendencia similar), no proporcionan información sobre la probabilidad de un evento en un año concreto, ni la evolución temporal anual de esa probabilidad.

La Figura 42 muestra, para los RCP4.5 y RCP 8.5. y para los periodos 2026-2045 y 2081-2100, respectivamente, la distribución de retrocesos extremos en cuatro transectos con respecto a la posición media de la línea de costa en 2010, distinguiendo entre modelos climáticos y trayectorias de ANMM. Mientras que los colores representan las diferentes trayectorias de ANMM, los símbolos se asocian con los 5 RCMs. Para los dos RCPs e independientemente del modelo seleccionado, en cualquiera de los perfiles la erosión aumenta con el periodo de retorno. Asimismo, e independientemente del periodo de retorno considerado, el valor de los retrocesos es mayor en el periodo 2081-2100 que en el 2026-2045, independientemente del RCP considerado, y mayor para el RCP8.5 que para el RCP4.5, para cualquier periodo. A medida que la erosión aumenta para los mayores percentiles de ANMM, la selección del RCM es lo que introduce la mayor variabilidad para un periodo de retorno dado. Esto pone, una vez de manifiesto, que la gestión de medio-largo plazo de la costa debe analizar los eventos extremos y que el análisis debe contar con un número suficiente de modelos climáticos para poder considerar las incertidumbres asociadas a los RCMs en los resultados finales. Por ejemplo, mientras que para mitad de siglo en el escenario RCP8.5, la mayor parte de los modelos proyectan un retroceso en el entorno de 10 m para un periodo de retorno de 10 años en Sagunto, el EART proyecta valores 3 veces superiores. Esta incertidumbre debe ser incorporada en el análisis de estrategias de adaptación que pretendan limitar el efecto de los temporales invernales para garantizar la recuperación de la playa para la temporada estival.

Para facilitar la interpretación de los resultados, las Figuras 42 y 43 resaltan, de manera independiente, la variabilidad entre RCMs y trayectorias de ANMM de los retrocesos extremos en el perfil 200 de la playa de Llosa. La Figura 43 muestra el ajuste extremal del periodo 2026-2045 para el RCP4.5, mientras que la Figura 44 corresponde con el periodo 2081-2100 para el RCP8.5. De la comparación de resultados entre ambas figuras se evidencia que no sólo los retrocesos son mayores al progresar en el

tiempo y ante escenarios de emisiones más severos, sino que la contribución relativa del ANMM a la incertidumbre en la estimación, también aumenta.

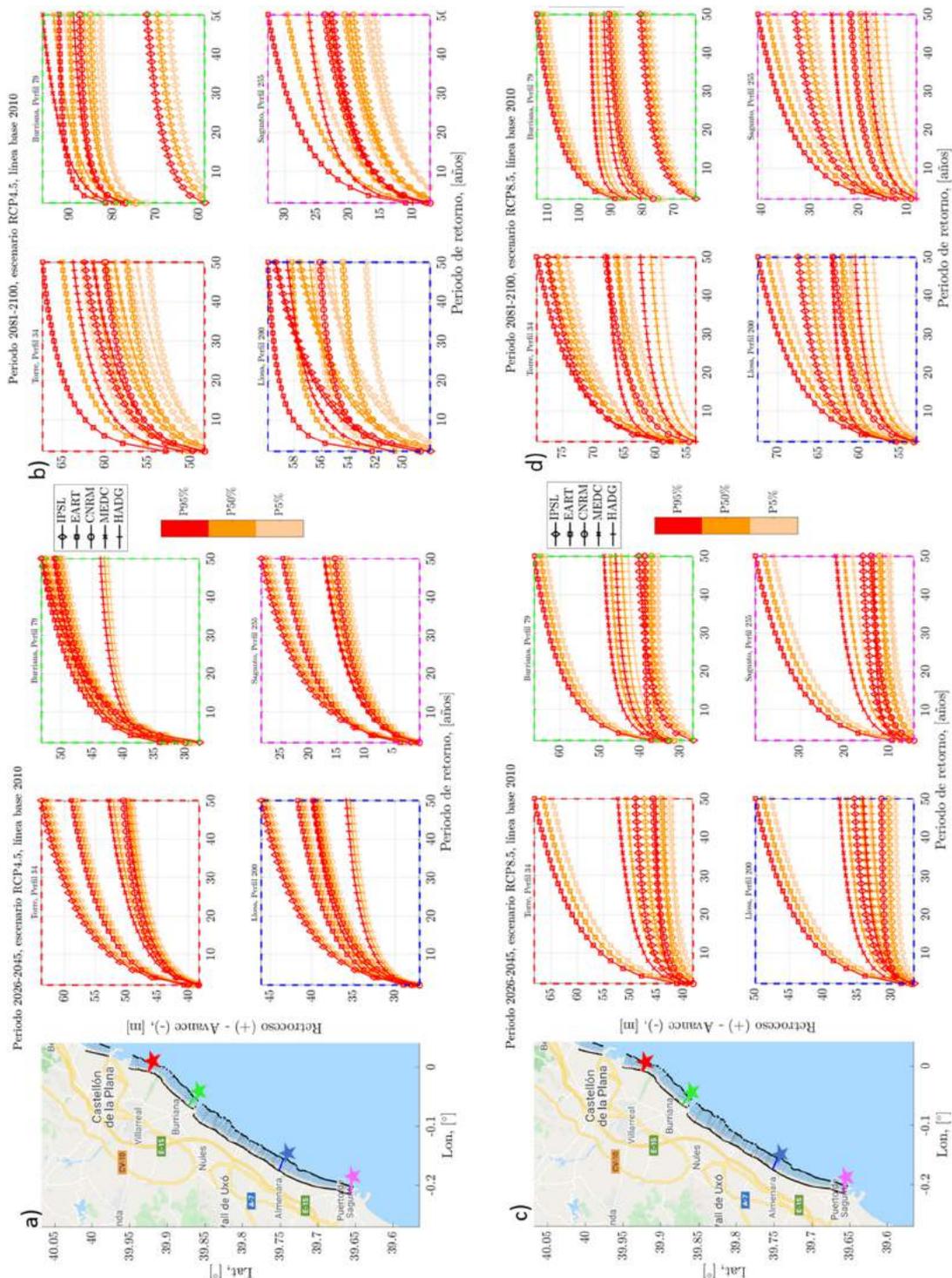


Figura 42. Ajuste extremal estacionario de los retrocesos en cuatro perfiles representativos en los periodos 2026-2045 (paneles a y c) y 2081-2100 (paneles b y d) para los escenarios RCP4.5 (paneles a y b) y RCP8.5 (paneles c y d). El ajuste de cada RCM se muestra con diferentes símbolos mientras que los colores distinguen las trayectorias de ANMM.

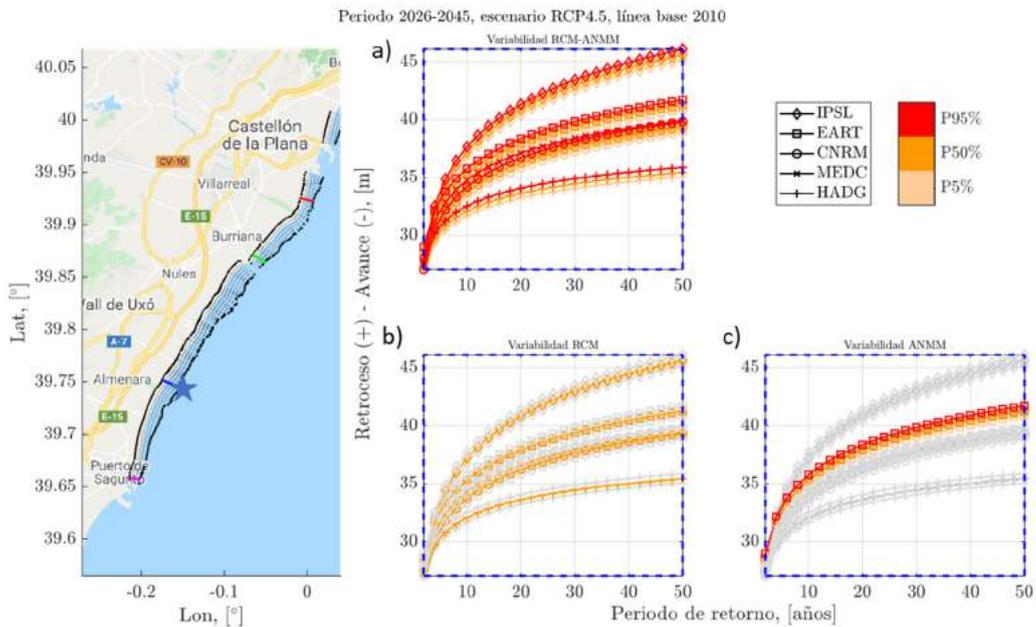


Figura 43. Ajuste extremal estacionario de los retrocesos en el perfil 200 de la playa de Llosa del periodo 2026-2045 para el escenario RCP4.5. El ajuste de cada RCM se muestra con diferentes símbolos mientras que los colores distinguen las trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART.

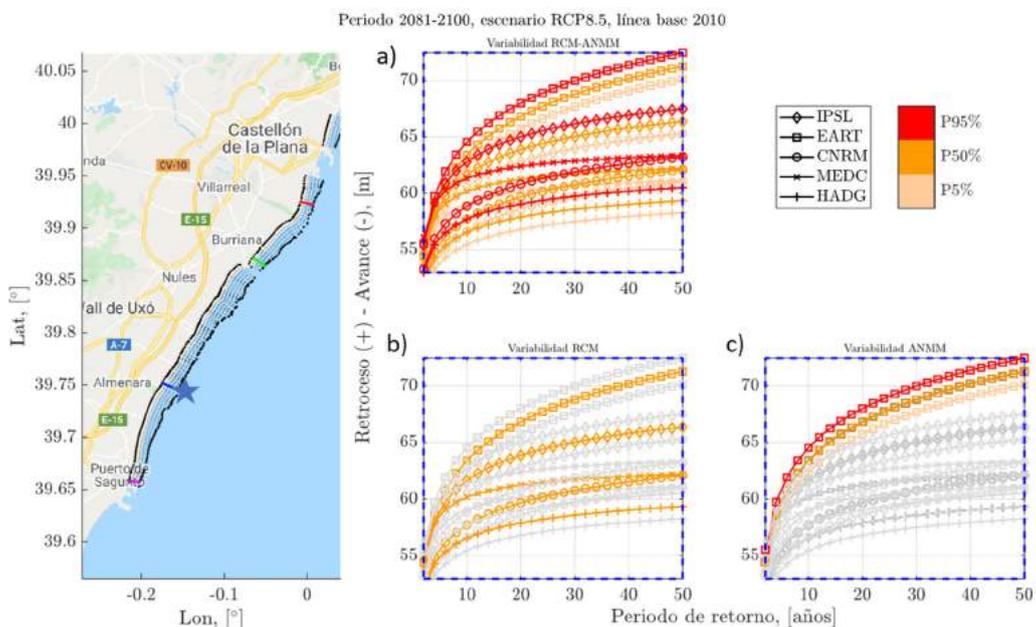


Figura 44. Ajuste extremal estacionario de los retrocesos en el perfil 200 de la playa de Llosa del periodo 2081-2100 para el escenario RCP8.5. El ajuste de cada RCM se muestra con diferentes símbolos mientras que los colores distinguen las trayectorias de ANMM. En el panel a) se muestra la variabilidad total entre RCMs y trayectorias de ANMM. En el panel b) se resalta la variabilidad entre RCMs para el percentil del 50% de ANMM. En el panel c) se destaca la variabilidad entre percentiles de ANMM en el caso del modelo EART.

Para poder comparar esta información con lo que ha ocurrido en el periodo histórico 1990-2020, las Figuras 44 y 45 muestran la distribución de retrocesos extremos para los tres periodos, utilizando en este caso 1990 como año de referencia para la línea base. Como se puede observar, para los dos periodos futuros se ha representado el valor medio (línea continua) y el rango de variabilidad asociado a los modelos climáticos y a las trayectorias de ANMM. Los valores positivos hacen referencia a retrocesos con respecto a la línea de 1990, mientras que los negativos evidencian la tendencia a la acreción de la playa. El ajuste estacionario a series con tendencia muestra, por ejemplo, que la playa de Sagunto está claramente en acreción, pues la playa avanza, significativamente (del orden de 20 metros) con respecto a la línea de costa de 1990. Por otro lado, destaca el fuerte retroceso que sufre la playa de Llosa con respecto a la línea base de 1990. Este hecho está motivado por la fuerte antropización de las playas de Nules, Moncófar y Chilches, situadas al norte. Las intervenciones constantes controlan parcialmente los problemas de erosión crónicos en esas playas perjudicando gravemente a las zonas costeras situadas a sotamar, en este caso a la playa de Llosa. La playa de Burriana sufre un avance de unos 20 m en la línea de costa presente con respecto a la línea base de 1990. Pese a ello, en el periodo 2081-2100 estará sometida a retrocesos extremos del orden de 40 m. En lo que respecta a la playa de Torre, la alta antropización de la zona afecta a los análisis extremales. Se aprecia que el retroceso extremo presente supera a los retrocesos en el horizonte 2050. Sin embargo, los efectos del ANMM hacen que en el periodo 2081-2100 se alcancen retrocesos superiores a 20 m.

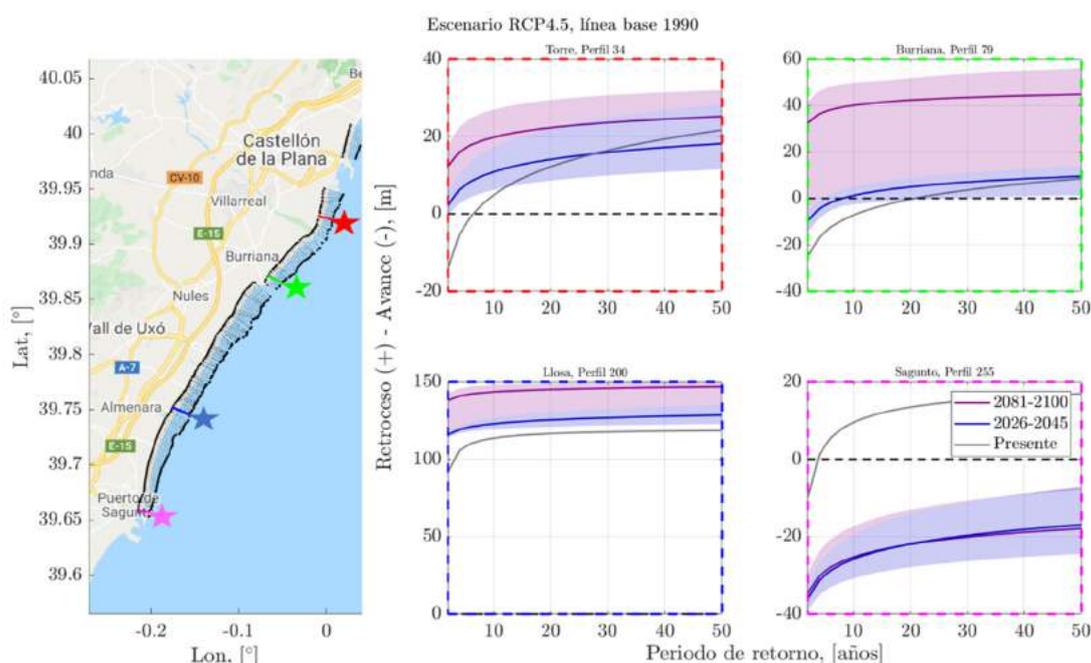


Figura 45. Comparación de retrocesos extremos en diferentes horizontes temporales calculados sobre la línea base de 1990 para el escenario RCP4.5. La línea gris sin bandas de confianza hace referencia a los retrocesos extremos del presente (calculados considerando el periodo 1990-2020). Las líneas azul y magenta representan los retrocesos extremos en los periodos 2026-2045 y 2081-2100 promediados entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM para el escenario RCP4.5. Las bandas de confianza representan la envolvente máxima y mínima de los retrocesos extremos de los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en los dos periodos futuros.

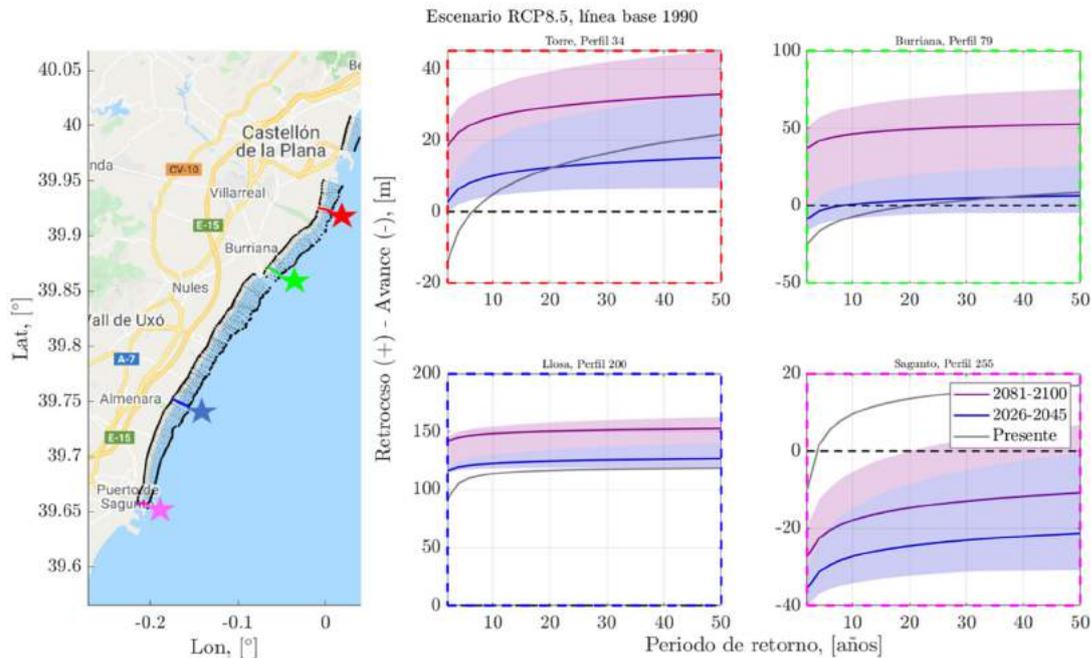


Figura 46. Comparación de retrocesos extremos en diferentes horizontes temporales calculados sobre la línea base de 1990 para el escenario RCP8.5. La línea gris sin bandas de confianza hace referencia a los retrocesos extremos del presente (calculados considerando el periodo 1990-2020). Las líneas azul y magenta representan los retrocesos extremos en los periodos 2026-2045 y 2081-2100 promediados entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM para el escenario RCP8.5. Las bandas de confianza representan la envolvente máxima y mínima de los retrocesos extremos de los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en los dos periodos futuros.

Las posiciones de la línea de costa correspondientes a los eventos extremos de erosión con periodo de retorno 5, 15 y 50 años en los perfiles 34 y 200 se muestran en la Figura 47, donde la línea continua representa el valor medio de los modelos climáticos y trayectorias de ANMM.

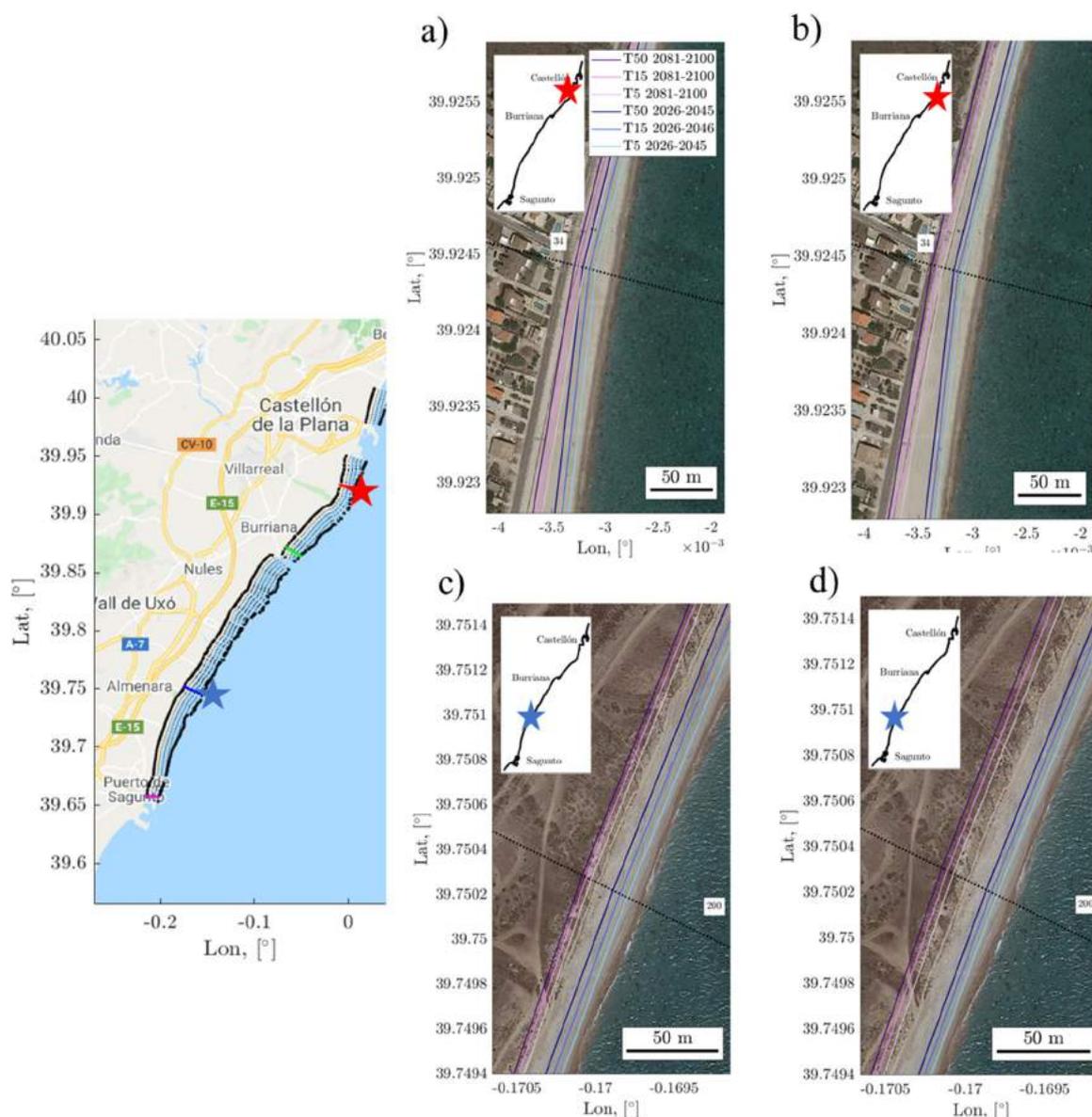


Figura 47. Representación espacial de los retrocesos extremos en la playa de Torre (paneles a y b) y Llosa (paneles c y d). Se representan los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno promediados entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en los periodos 2026-2045 (líneas en tono azul) y 2081-2100 (líneas en tono magenta) para los escenarios RPC4.5 (paneles a y b) y RCP8.5 paneles (c y d).

En un segundo análisis, se ha realizado un ajuste pseudo-no estacionario siguiendo el método propuesto por (Mentaschi et al., 2016) que consta de tres pasos (Figura 48). El primer paso consiste en extraer la tendencia de la serie, que en este caso se ha realizado mediante una media móvil. En el segundo paso se ajusta la función de extremos a la serie sin tendencia. Finalmente, el último paso consiste en añadir la tendencia que se había extraído de la serie a los resultados del ajuste, año a año.

Como resultados, se ha obtenido la evolución temporal de los eventos de erosión de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno en algunos transectos para los periodos 2026-2045 y 2081-2100 y para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (Figuras 48 y 49). La tendencia se ha calculado mediante una media móvil de 5 años (línea discontinua) y la envolvente de los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM se ha representado sombreada en gris. Del análisis se aprecia claramente la tendencia a largo plazo asociada fundamentalmente a procesos de transporte longitudinal y de ANMM y las alteraciones de menor escala temporal por transporte transversal. Se aprecia la estabilidad de la playa de Sagunto, en la que la acreción se ve compensada por el ANMM (línea base horizontal). A excepción del perfil 79 correspondiente a la playa de Burriana, los retrocesos extremos con respecto a la línea base varían entre 10 y 30 metros para periodos de retorno de 5 y 50 años respectivamente en el peor escenario futuro. Por otro lado, los retrocesos extremos en la playa de Burriana alcanzan valores de entre 30 y 45 m con respecto a la línea base, lo que puede explicarse por el menor tamaño del sedimento con respecto al resto de playas, ver Tabla 2 del Anexo III.

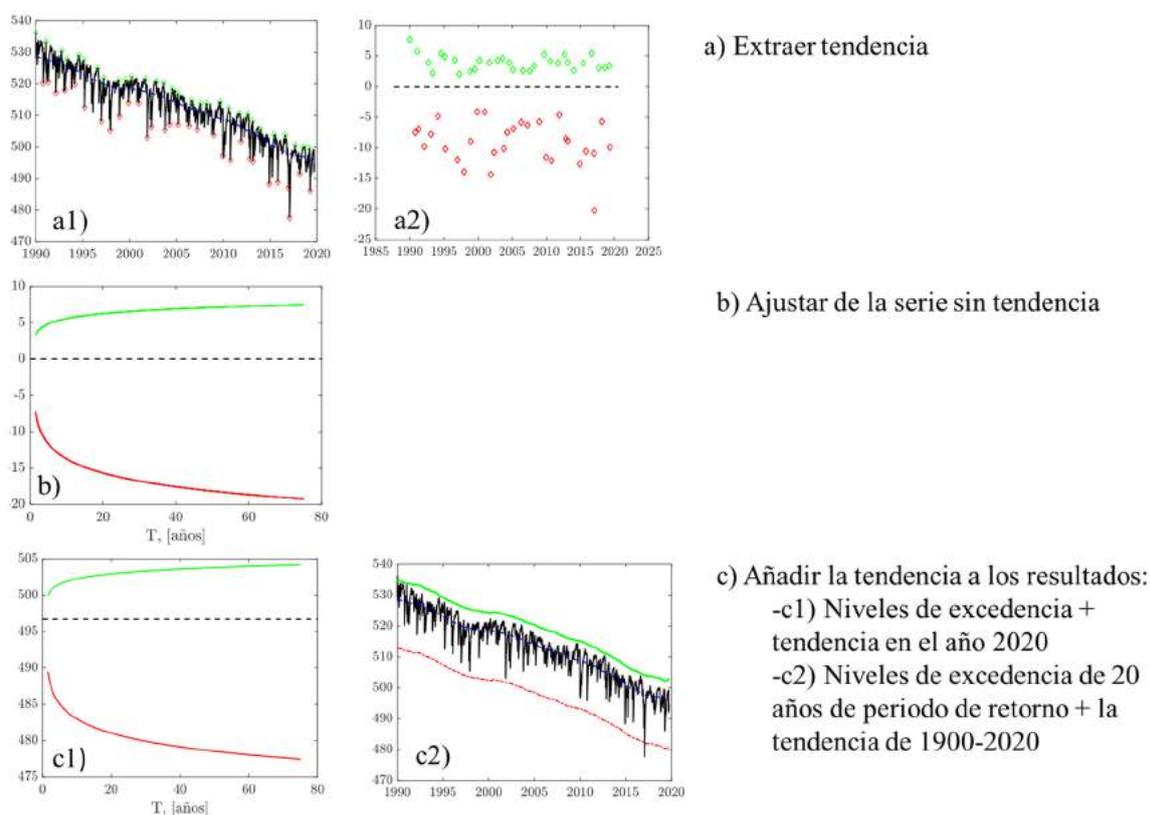


Figura 48. Metodología para el análisis pseudo no-estacionario extremal propuesto por Mentaschi et al. (2016).

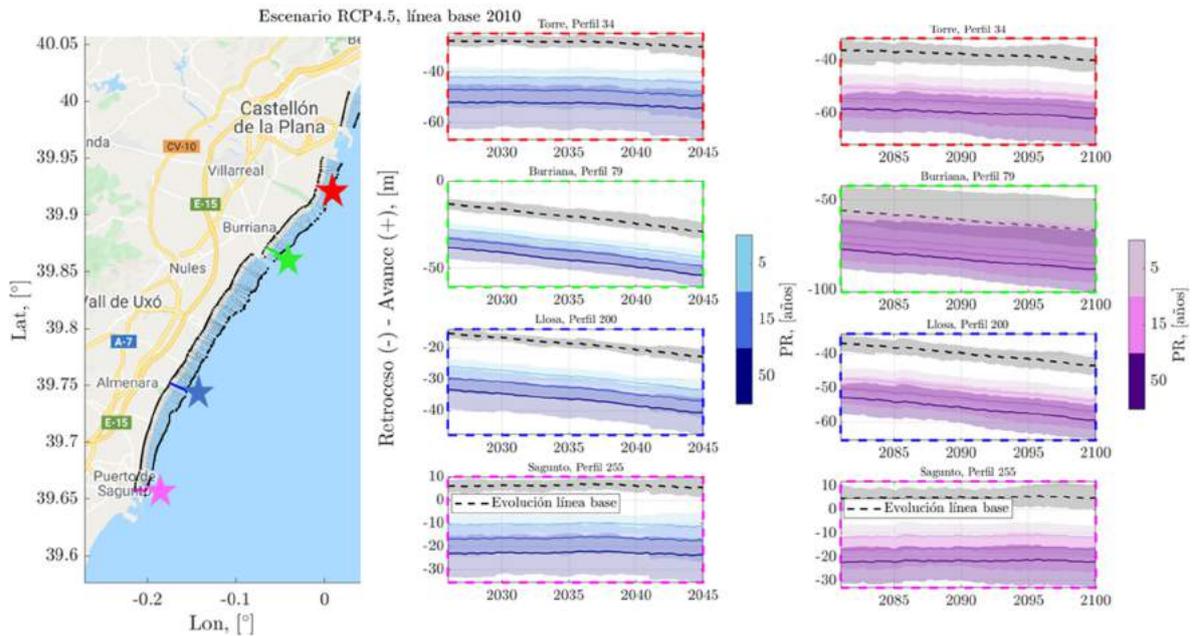


Figura 49. Evolución temporal de los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno para el escenario RCP4.5 de acuerdo con el análisis pseudo no-estacionario en cuatro perfiles representativos de la zona de estudio. En los paneles central y derecho, la línea base media (línea negra discontinua) y su incertidumbre, representada por la envolvente de RCMs y trayectorias de ANMM (banda gris), responden a la evolución de la posición media de la línea de costa y se obtienen aplicando una media móvil de 5 años de ventana a la serie temporal de retrocesos. En los paneles central y derecho, las líneas continuas representan la evolución temporal de los retrocesos extremos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno y las bandas sombreadas la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM representadas mediante su envolvente. En el panel central se muestra el análisis pseudo no-estacionario en el periodo 2026-2045, mientras que el panel derecho corresponde con el 2081-2100.

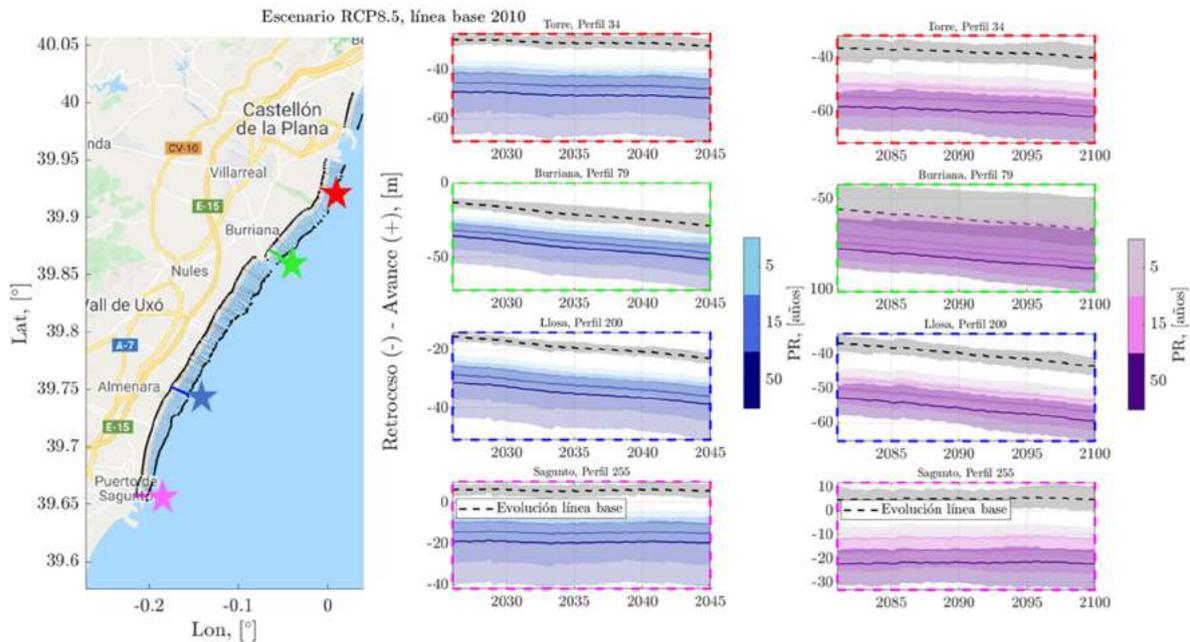


Figura 50. Evolución temporal de los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 de acuerdo con el análisis pseudo no-estacionario en cuatro perfiles representativos de la zona de estudio. En los paneles central y derecho, la línea base media (línea negra discontinua) y su incertidumbre, representada por la envolvente de RCMs y trayectorias de ANMM (banda gris), responden a la evolución de la posición media de la línea de costa y se obtienen aplicando una media móvil de 5 años de ventana a la serie temporal de retrocesos. En los paneles central y derecho, las líneas continuas representan la evolución temporal de los retrocesos extremos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno y las bandas sombreadas la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM representadas mediante su envolvente. En el panel central se muestra el análisis pseudo no-estacionario en el periodo 2026-2045, mientras que el panel derecho corresponde con el 2081-2100.

Para facilitar la comprensión de las Figuras 48 y 49, la Figura 51 muestra la posición espacial de la línea de costa asociada a los periodos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno, una vez promediados los diferentes modelos climáticos y trayectorias de ANMM en los años 2050 y 2100. En ella, se pone de manifiesto que la línea de costa en el transecto 34 de la playa de Torre llega a superar el paseo marítimo en el peor escenario futuro. Por otro lado, en lo que se refiere a la playa de Burriana, la línea de costa en el perfil 79 sufre un fuerte retranqueo motivado por el patrón de erosión a sotamar de un espigón. La playa de Llosa sufre un retranqueo considerable, sin embargo, la ausencia de construcciones aledañas posibilita el retranqueo del perfil de playa para adaptarse a las dinámicas futuras. La playa de Sagunto sufre un ligero retroceso, ya que los efectos del ANMM son más importantes que la tendencia a la acreción por transporte longitudinal.

Finalmente, las Figuras 51 y 52 muestran algunos detalles de las líneas de costa correspondientes a los eventos extremos de erosión con periodo de retorno 5, 15 y 50 años para los horizontes 2050 y 2100. La línea continua y la franja sombreada representan la media y la envolvente de los resultados obtenidos considerando todos los modelos climáticos y trayectorias de ANMM. Las conclusiones del análisis extremal estacionario siguen siendo válidas. La playa de Torre retrocede y en algunas zonas el retroceso rebasa las construcciones aledañas a final de siglo. La playa de Burriana, aunque retrocede, no deja expuesto al núcleo urbano debido a la gran anchura del triángulo acumulativo situado al norte

del puerto. La playa de Moncófar, al igual que ocurre en la playa de Torre y el resto de playas protegidas por campos de espigones, experimenta un giro antihorario de los diferentes compartimentos entre estructuras, dejando gravemente expuestas las construcciones en primera línea. Las playas situadas al sur de la unidad fisiográfica Burriana-Sagunto, no sufren retrocesos que comprometen el valor de protección de la playa, debido fundamentalmente al transporte longitudinal que amortigua el efecto del ANMM.

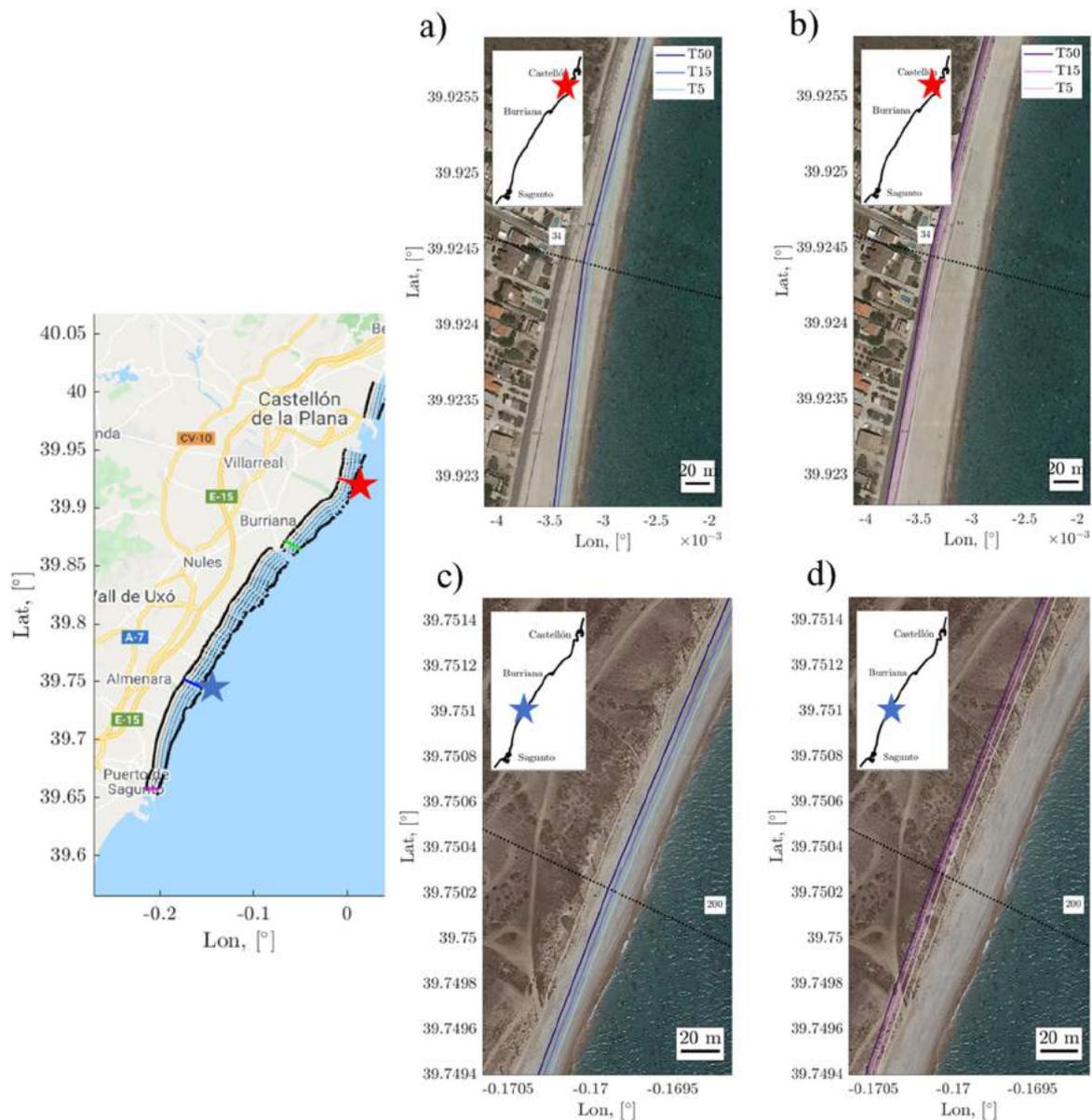


Figura 51. Representación espacial de los retrocesos extremos en las playas de Torre (paneles a y b) y Llosa (paneles c y d) de acuerdo con el análisis pseudo no-estacionario para el escenario RCP8.5. Se representan los retrocesos de 5, 15 y 50 años de periodo de retorno promedios entre los diferentes RCMs y trayectorias de ANMM en el año 2050 (paneles a y c) 2100 (paneles b y d).

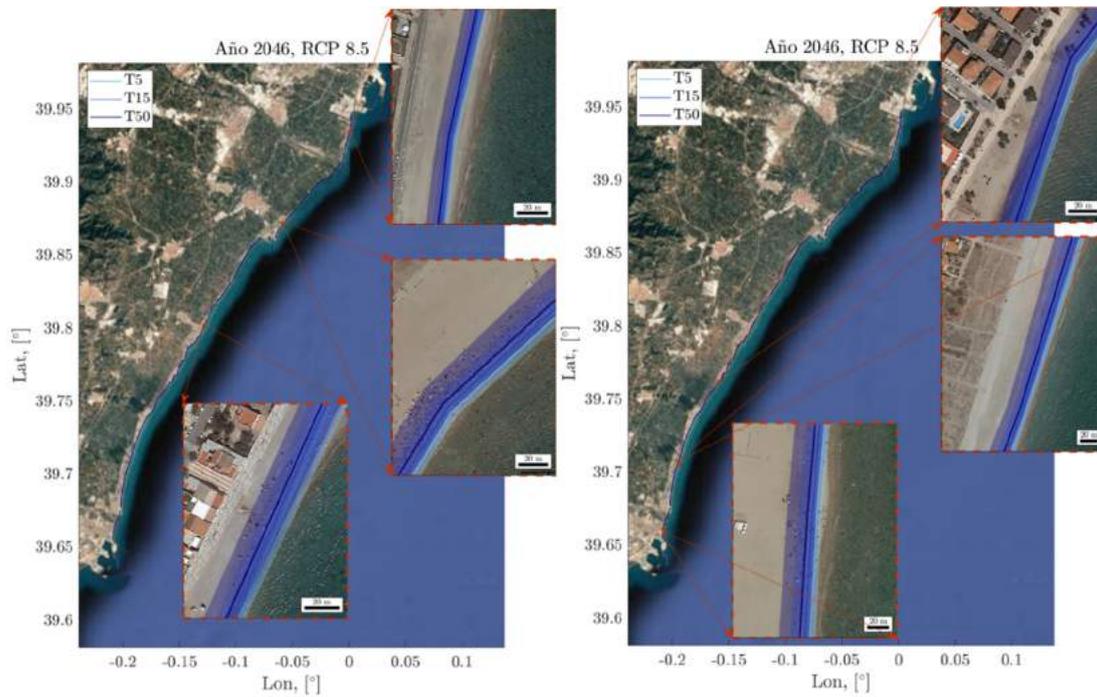


Figura 52. Representación espacial de los retrocesos extremos en el año 2046 para el escenario RCP8.5. Las líneas continuas representan los retrocesos medios de 5, 15 y 50 años de periodos de retorno mientras que las bandas sombreadas corresponden a la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM.

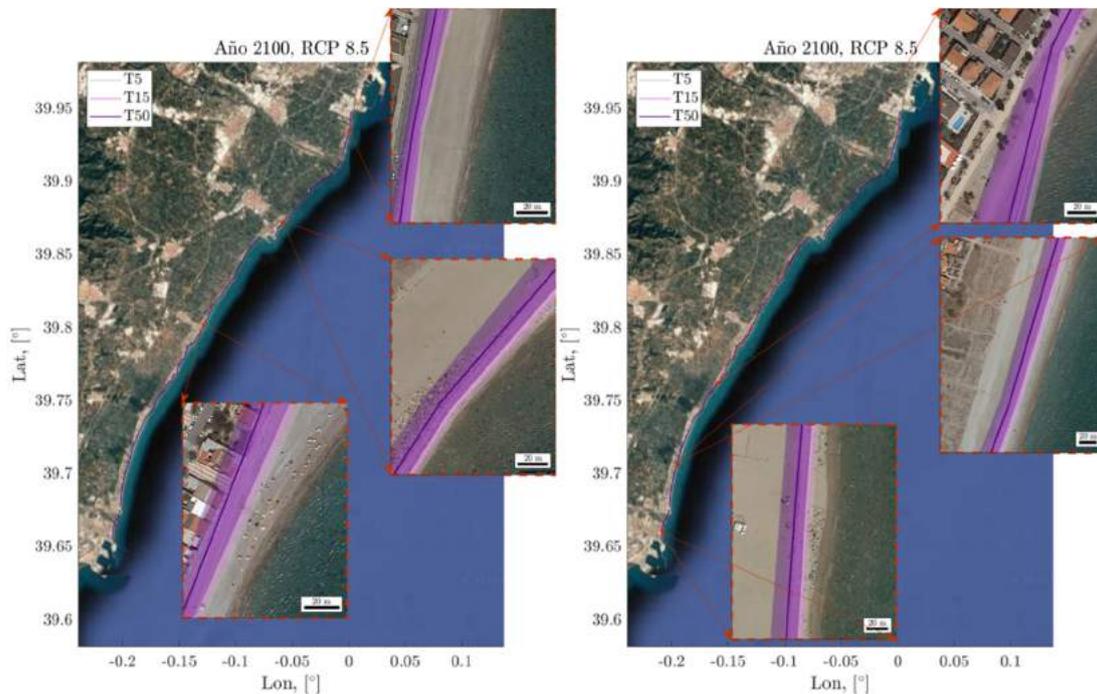


Figura 53. Representación espacial de los retrocesos extremos en el año 2100 para el escenario RCP8.5. Las líneas continuas representan los retrocesos medios de 5, 15 y 50 años de periodos de retorno mientras que las bandas sombreadas corresponden a la incertidumbre inherente a los cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM.

5. APROXIMACIÓN SIMPLIFICADA

La metodología se caracteriza por el empleo de las técnicas y modelos más avanzados del estado del conocimiento en materia de regionalización y modelado de transporte de sedimentos con cobertura regional y a la escala de décadas y cientos de años. Su aplicación requiere un elevado conocimiento matemático y de los procesos relativos a la dinámica marina y litoral e importantes recursos computacionales. Por ello, a continuación, se plantean dos simplificaciones que podrían realizarse y que, aunque aumentarían la incertidumbre del resultado, podrían facilitar su aplicación, sobre todo en el caso de no disponer de grandes recursos computacionales.

La primera simplificación está relacionada con la regionalización de las proyecciones dinámicas de oleaje. En lugar de aplicar el método híbrido descrito en el apartado 3.1, que requiere de la aplicación y el manejo de modelos numéricos y estadísticos, además de una supercomputadora que permita realizar las simulaciones numéricas en un tiempo razonable, podría aplicarse un procedimiento mucho más sencillo bajo las hipótesis de teoría lineal de ondas y batimetría recta y paralela. Se calcularían las series de altura de ola y dirección en rotura considerando asomeramiento y refracción mediante las ecuaciones de dispersión lineal sin corrientes, conservación del flujo de energía y ley de Snell. Este método es mucho más rápido y se puede aplicar en un ordenador normal, tampoco requiere elevados conocimientos de modelado numérico ni de estadística, pero los resultados no serán tan precisos y no tendrían en cuenta interacciones entre el oleaje y el nivel del mar (p.ej., posibles amplificaciones) cubriendo toda la casuística de escenarios considerados durante el proceso de propagación.

La segunda simplificación hace referencia a la incorporación en el modelo de erosión del filtro extendido de Kalman para la asimilación de observaciones. El uso de este tipo de algoritmos, su implementación en modelos de evolución de la línea de costa y su posterior aplicación requiere conocimientos matemático-estadísticos avanzados. Además, su eficacia en el entrenamiento de modelos de erosión está fuertemente condicionada a la disponibilidad de series de observaciones relativamente largas y frecuentes, que no siempre son fáciles de obtener y pueden requerir un preproceso importante antes de poder ser utilizadas. Por ello, y dado que el modelo de erosión en sí mismo ha demostrado habilidad en la predicción de cambios en la línea de costa, la alternativa que se propone es no emplear filtro de asimilación. En este caso, la calibración del modelo de erosión sería menos precisa y las predicciones tendrían un error mayor, aunque asumible. El mayor problema estaría en tramos de costa que han sufrido constantes intervenciones humanas a lo largo del tiempo, lo que lleva a variaciones en los parámetros libres de las ecuaciones físicas de los modelos difíciles de capturar sin asimilación. Si esas actuaciones perduran tiempos superiores a los propios de la convergencia del algoritmo, el filtro extendido de Kalman sí es capaz de captar la variación en los parámetros libres asociada a la actividad antrópica.

La adopción de estas dos simplificaciones conservaría el muestreo de la incertidumbre asociada al problema del cambio climático, es decir, la incertidumbre vinculada a las proyecciones de oleaje, marea meteorológica y ANMM que se ha considerado a través de diferentes escenarios de concentraciones, modelos climáticos y trayectorias. No obstante, sí aumentaría la incertidumbre en el valor del oleaje proyectado en costa y reduciría la capacidad predictiva del modelo de erosión.

6. CONCLUSIONES

En esta parte metodológica se propone una metodología que supone un avance importante con respecto a la literatura actual, combinando por primera vez el conjunto de elementos que se describe a continuación.

En lo que respecta a los forzamientos considerados:

- Empleo de proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica para dos escenarios de concentraciones (RCP4.5. y RCP8.5) y cinco modelos climáticos regionales (CNRM, EART, HADG, IPSL y MEDC).
- Empleo de proyecciones de ANMM para dos escenarios de concentraciones (RCP4.5. y RCP8.5) considerando tres trayectorias asociadas a los percentiles 5, 50 y 95 de la distribución de los resultados de veinte modelos climáticos.
- Reconstrucción de la marea astronómica pasada y futura mediante análisis de armónicos.
- Regionalización de las proyecciones dinámicas de oleaje mediante un método híbrido que combina modelado numérico y técnicas estadísticas.
- Propagación de las proyecciones dinámicas del oleaje regionalizadas hasta la rotura considerando los procesos de asomeramiento, refracción y difracción. Para ello, se ha tenido en cuenta la temporalidad de las estructuras costeras en el tramo de estudio.

En lo que respecta al modelado de la erosión costera:

- Modelado del transporte de sedimentos longitudinal y transversal teniendo en cuenta la combinación de oleaje, marea meteorológica, marea astronómica y nivel medio del mar, presentes y futuros.
- Incorporación en el modelo de erosión del efecto de estructuras y potenciales regeneraciones de playas en la evolución de la línea de costa.
- Incorporación en el modelo de erosión de un algoritmo de asimilación de datos observados que permite mejorar la capacidad predictiva del modelo.
- Consideración de la distribución espacial de las características del sedimento en toda la zona de estudio.

En lo que respecta a la consideración y al tratamiento de la incertidumbre:

- Creación de una base de datos de líneas de costa históricas a partir de imágenes de satélite mediante técnicas de teledetección *sub-píxel*, para la reducción de la incertidumbre en el modelado de la erosión.
- Reducción de la incertidumbre en el modelado de la erosión mediante el uso del filtro extendido de Kalman para la asimilación de observaciones de líneas de costa.

- Muestreo de la incertidumbre asociada a las proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica considerando dos escenarios de concentraciones y cinco modelos climáticos regionales.
- Muestreo de la incertidumbre asociada al ANMM considerando, para dos escenarios de concentraciones, tres posibles trayectorias asociadas a tres percentiles de la distribución de los resultados de veinte modelos climáticos.
- El modelo de erosión se ha ejecutado para todas las combinaciones de escenarios de concentraciones, modelos climáticos y trayectorias de ANMM. No obstante, los resultados se han expresado, tanto de forma independiente, como agregados por escenarios de concentraciones, mostrando la variabilidad inter-modelo y la incertidumbre en el ANMM representadas por un valor medio y una varianza.

La metodología se ha validado en un tramo costero de 40 kilómetros entre el Puerto de Castellón y el Puerto de Sagunto. En las dos unidades fisiográficas diferenciadas (Castellón-Burriana y Burriana-Sagunto), las playas menos afectadas son las que se sitúan inmediatamente al norte de las grandes barreras de sedimento que son los puertos de Burriana, Canet de Belenguer y Sagunto, al acumularse material debido al fuerte transporte longitudinal norte-sur. La estabilidad de las playas de Burriana, Corinto, Almardá, Canet y Sagunto no parece estar comprometida en el futuro.

Por otro lado, las playas situadas al abrigo de los puertos experimentan un problema de erosión permanente, pese a las numerosas actuaciones antrópicas realizadas. Es el caso de las playas de Torre, Nules, Moncófar, Chilches o Almenara. La situación se agudiza en la playa de la Llosa, donde numerosos espigones bloquean gran parte del tránsito de sedimento agravando el retroceso crónico en la misma.

REFERENCIAS

- Ashton, A. D., & Murray, A. B. (2006). High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(4). <https://doi.org/10.1029/2005JF000422>
- Birkemeier, W. A. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111(3), 598–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:3\(598\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:3(598))
- Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), 851–862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>
- Casas-Prat, M., McInnes, K. L., Hemer, M. A., & Sierra, J. P. (2016). Future wave-driven coastal sediment transport along the Catalan coast (NW Mediterranean). *Regional Environmental Change*, 16(6), 1739–1750. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0923-x>
- Cooper, J. A. G., & Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: Time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43(3–4), 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.07.001>
- Davidson, M. A., Splinter, K. D., & Turner, I. L. (2013). A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coastal Engineering*, 73, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.002>
- Dean, R. G. (2016). *Equilibrium Beach Profiles : Characteristics and Applications* Author (s): Robert G . Dean Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/4297805> JSTOR is a not-for-profit service that helps scholars , researchers , and students discover , use , and build upon. 7(1), 53–84.
- Falqués, A., Garnier, R., Ojeda, E., Ribas, F., & Guillen, J. (2008). Q2D-morfo: A medium to long term model for beach morphodynamics. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2007 - Proceedings of the 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 1, 71–78.
- Hanson, H., & Kraus, N. C. (2011). Long-Term Evolution of a Long-Term Evolution Model. *Journal of Coastal Research*, 59(1989), 118–129. <https://doi.org/10.2112/si59-012.1>
- Hurst, M. D., Barkwith, A., Ellis, M. A., Thomas, C. W., & Murray, A. B. (2015). Exploring the sensitivities of crenulate bay shorelines to wave climates using a new vector-based one-line model. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, 120(12), 2586–2608. <https://doi.org/10.1002/2015JF003704>
- Komar, P. D. (1971). The mechanics of sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 76(3), 713–721. <https://doi.org/10.1029/jc076i003p00713>
- Kristensen, S. E., Drønen, N., Deigaard, R., & Fredsoe, J. (2016). Impact of groyne fields on the littoral drift: A hybrid morphological modelling study. *Coastal Engineering*, 111, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.009>
- Kristensen, Sten Esbjørn, Drønen, N., Deigaard, R., & Fredsoe, J. (2013). Hybrid morphological modelling of shoreline response to a detached breakwater. *Coastal Engineering*, 71, 13–27.

<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.06.005>

- Long, J. W., & Plant, N. G. (2012). Extended Kalman Filter framework for forecasting shoreline evolution. *Geophysical Research Letters*, 39(13), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2012GL052180>
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Voukouvalas, E., Sartini, L., Feyen, L., Besio, G., & Alfieri, L. (2016). Non-stationary Extreme Value Analysis: a simplified approach for Earth science applications. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, February*, 1–38. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-65>
- Mínguez, R., Espejo, A., Tomás, A., Méndez, F. J., & Losada, I. J. (2011). Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(11), 1466–1485. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00008.1>
- Robinet, A. (2018). *Modélisation de l' évolution long-terme du trait de côte le long des littoraux sableux dominés par l' action des vagues To cite this version : HAL Id : tel-01755070.*
- Roelvink, D., Huisman, B., Elghandour, A., Ghonim, M., & Reyns, J. (2020). Efficient Modeling of Complex Sandy Coastal Evolution at Monthly to Century Time Scales. *Frontiers in Marine Science*, 7(July), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00535>
- Simmons, J. A., Harley, M. D., Marshall, L. A., Turner, I. L., Splinter, K. D., & Cox, R. J. (2017). Calibrating and assessing uncertainty in coastal numerical models. *Coastal Engineering*, 125(April), 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.04.005>
- Splinter, K. D., Turner, I. L., & Davidson, M. A. (2013). How much data is enough? The importance of morphological sampling interval and duration for calibration of empirical shoreline models. *Coastal Engineering*, 77, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.02.009>
- Toimil, A., Camus, P., Losada, I. J., Le Cozannet, G., Nicholls, R. J., Idier, D., & Maspataud, A. (2020). Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: Methods and uncertainty treatment. *Earth-Science Reviews*, 202(June 2019), 103110. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103110>
- Toimil, Alexandra, Losada, I. J., Camus, P., & Díaz-Simal, P. (2017). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coastal Engineering*, 128(August), 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004>
- Toimil, Alexandra, Losada, I. J., Nicholls, R. J., Dalrymple, R. A., & Stive, M. J. F. (2020). Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review. *Coastal Engineering*, 156(December 2018). <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103611>
- Turki, I., Medina, R., Coco, G., & Gonzalez, M. (2013). An equilibrium model to predict shoreline rotation of pocket beaches. *Marine Geology*, 346, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.08.002>
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Limber, P., Erikson, L., & Cole, B. (2017). A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(4), 782–806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150(April), 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Zacharioudaki, A., & Reeve, D. E. (2011). Shoreline evolution under climate change wave scenarios. *Climatic Change*, 108(1), 73–105. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-0011-7>

ANEXO I. REGIONALIZACIÓN DEL OLEAJE Y PROPAGACIÓN A ROTURA

Downscaling híbrido a la batimétrica -10 metros

Un paso previo a las cuatro etapas del *downscaling* híbrido consiste en la definición de la malla general y de detalle de cálculo y la identificación de los puntos de forzamiento. Los contornos de la malla general deben coincidir con puntos de salida de resultados de los modelos de oleaje global que contienen la información de dinámicas a propagar. En el caso de estudio que nos ocupa se ha generado una mallado regular girado que comprende una malla general de 500x500 metros de resolución y cuatro mallas de detalle de 50x50 metros de resolución. La extensión de la malla de detalle es bien superior a la zona de estudio para evitar problemas de borde asociados a los contornos. El anidamiento entre las mallas general y de detalle es unidireccional. Una vez definida la discretización horizontal del mallado, la profundidad se obtiene mediante interpolación de la topobatimetría referenciada con respecto al NMM en Alicante. La topobatimetría se obtiene mediante unión de la topografía (MDT 5x5 metros del IGN) y la batimetría (ecocartografía del MITERD y batimetría de EMODNET).

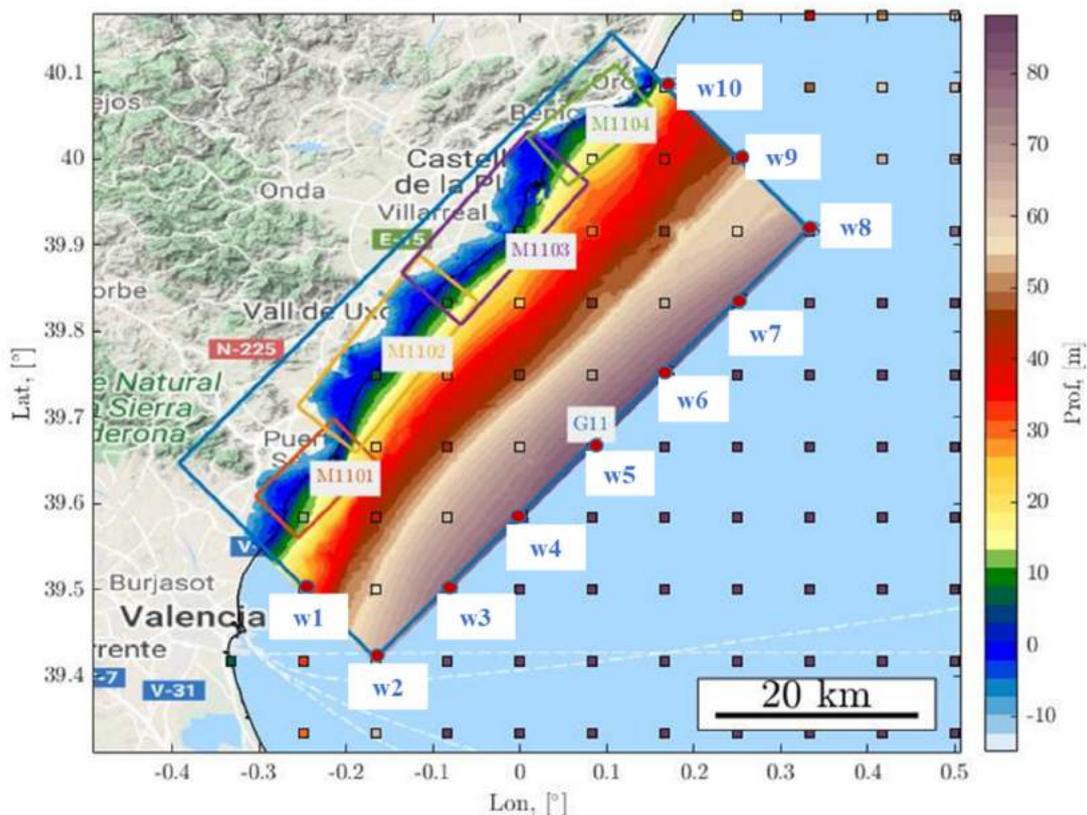


Figura 54. Definición espacial del dominio de cálculo para el downscaling híbrido

A continuación, se detallan cada una de las etapas del proceso de *downscaling* híbrido en estudios regionales:

- a) En primer lugar, se genera una matriz de datos con las variables meteoceanográficas relevantes para la selección de casos representativos. Debido a la escala espacial del estudio, se consideran diez puntos de forzamiento de oleaje de los que se extraen altura de ola, periodo medio, periodo de pico y dirección y un punto de nivel central (marea astronómica, marea meteorológica y nivel medio del mar). La altura de ola y dirección del *hindcast* son corregidas con observaciones de satélite según la metodología descrita en (Mínguez et al., 2011). En el caso de las proyecciones, a las series temporales de altura de ola, periodo medio, periodo de pico y marea meteorológica se les aplica una corrección de sesgo basada en la técnica del *Quantile Mapping* tomando como referencia el *hindcast* (GOW-ERA5). La matriz $\mathbf{M}_{n \times m}$ resultante tiene 51 columnas ($m=51$), pues la variable circular dirección se linealiza considerando sus proyecciones en los ejes cartesianos.

En el caso del *hindcast*, la variable nivel está compuesta por la suma de la marea astronómica y la marea meteorológica. La definición de la matriz de datos \mathbf{M} es:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} H_{s_i}^1 & Tm_i^1 & Tp_i^1 & Dx_i^1 & Dy_i^1 & MA^1 & + & MM^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{s_i}^t & Tm_i^t & Tp_i^t & Dx_i^t & Dy_i^t & MA^t & + & MM^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{s_i}^n & Tm_i^n & Tp_i^n & Dx_i^n & Dy_i^n & MA^n & + & MM^n \end{pmatrix} \quad (14)$$

Dónde el subíndice i hace referencia a los puntos de forzamiento de oleaje, $i=1,2,3, \dots, 10$ y el superíndice t se refiere al número de instantes temporales (horas) del *hindcast*, que en el caso que nos ocupa va desde enero del 1985 hasta diciembre del 2019.

La consideración de una trayectoria de aumento del nivel del mar desconocido en el caso de las proyecciones a futuro, introduce una complicación adicional al procedimiento. La solución adoptada ha consistido en generar una matriz \mathbf{M} de dimensiones $2n \times m$. El desdoblamiento de la matriz permite considerar un nivel mínimo (asociado al percentil del 5% del ANMM al inicio del periodo de estudio) y un nivel máximo (asociado al percentil del 95% del ANMM al final del periodo de estudio). La consideración de los niveles extremos sigue el principio del algoritmo de máxima disimilitud, MDA (paso b), que tiende a seleccionar los elementos más dispares de un conjunto. En el caso de las proyecciones, se genera una matriz de datos \mathbf{M} por cada RCM (CNRM, IPSL, HADG, EART, MEDC), escenario (RCP 4.5, RCP 8.5) y periodo considerado (2026-2045 y 2081-2100) que se suma a la matriz de datos del *hindcast* (GOW-ERA5 1985-2019).

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} Hs_i^1 & Tm_i^1 & Tp_i^1 & Dx_i^1 & Dy_i^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Hs_i^t & Tm_i^t & Tp_i^t & Dx_i^t & Dy_i^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Hs_i^n & Tm_i^n & Tp_i^n & Dx_i^n & Dy_i^n \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} MA^1 + MM^1 + ANMM_{min} \\ \vdots \\ MA^t + MM^t + ANMM_{min} \\ \vdots \\ MA^n + MM^n + ANMM_{min} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Hs_i^1 & Tm_i^1 & Tp_i^1 & Dx_i^1 & Dy_i^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Hs_i^t & Tm_i^t & Tp_i^t & Dx_i^t & Dy_i^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Hs_i^n & Tm_i^n & Tp_i^n & Dx_i^n & Dy_i^n \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} MA^1 + MM^1 + ANMM_{max} \\ \vdots \\ MA^t + MM^t + ANMM_{max} \\ \vdots \\ MA^n + MM^n + ANMM_{max} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Debido a la elevada correlación entre las variables y buscando reducir el tiempo de cálculo en las etapas que siguen, se aplica una reducción de dimensionalidad mediante componentes principales (PCA). El objetivo del análisis en componentes principales es de reducir, por proyección en un subespacio afin ortogonal, la dimensión de un conjunto de datos. Para ello, se deben estandarizar las variables de la matriz \mathbf{M} (hacer que la media sea nula y la desviación típica igual a la unidad) generando la matriz $\bar{\mathbf{M}}$ centrada-reducida. La diagonalización de la matriz de covarianza \mathbf{S} de la matriz $\bar{\mathbf{M}}$ conduce a la obtención de la matriz de autovectores columna (funciones empíricas ortogonales o modos propios o direcciones principales) $\Phi_{m \times m} = (\mathbf{EOF}_1, \mathbf{EOF}_2, \dots, \mathbf{EOF}_m)$ y la matriz diagonal de autovalores $diag(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$, en orden decreciente $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$. Las variables estandarizadas (vectores columna de la matriz $\bar{\mathbf{M}}$ se pueden proyectar en el subespacio afin ortogonal dando lugar a la matriz de componentes principales $\bar{\mathbf{M}}_{n \times m}^{EOF} = (\mathbf{PC}_1, \mathbf{PC}_2, \dots, \mathbf{PC}_m) = \bar{\mathbf{M}} \Phi$. De lo que se evidencia que cada componente principal se forma mediante combinación lineal de las variables iniciales.

El porcentaje varianza total explicada por la componente principal \mathbf{PC}_m es entonces $\sigma_m^2 = \lambda_m / \sum_{j=1}^m \lambda_j$, donde debido a la estandarización de las variables la varianza total es $\sum_{j=1}^m \lambda_j = m$. La diagonalización concentra la varianza total explicada en las primeras componentes, con lo que debido a la alta correlación entre las variables que componen la matriz $\bar{\mathbf{M}}$, un número de las primeras componentes principales inferior a m contiene la mayor parte de la varianza explicada. El criterio para la elección del número de componentes principales a considerar se justifica en (Camus et al, 2011), consiste en escoger el número $d \leq m$ de componentes principales tales que el porcentaje de la varianza total explicada sea superior o igual al 99%, $d \mid \frac{\sum_{k=1}^d \lambda_k}{m} \times 100 = 99\%$. Con ello, la matriz de datos estandarizada $\bar{\mathbf{M}}$, se puede proyectar en el subespacio afin ortogonal *reducido* definido por d funciones empíricas ortogonales $\Phi_{m \times d}^d = (\mathbf{EOF}_1, \mathbf{EOF}_2, \dots, \mathbf{EOF}_d)$ dando lugar a la matriz de d componentes principales $\bar{\mathbf{M}}_{n \times d}^{EOF} = (\mathbf{PC}_1, \mathbf{PC}_2, \dots, \mathbf{PC}_d) = \bar{\mathbf{M}} \Phi^d$. A título de ejemplo, en el caso del *hindcast* 17 componentes principales fueron necesarias para representar el 99% de la varianza total de las 51 variables físicas.

- b) El siguiente paso consiste en la selección de los casos a propagar dinámicamente. Estos casos deben ser suficientemente representativos para, mediante interpolación multivariada, poder reconstruir la serie completa propagada. Para ello, se utiliza el algoritmo de máxima disimilitud (MDA) que busca, de entre el conjunto de datos multivariado, aquellos más diferentes entre sí. Este algoritmo permite la selección de los casos óptimos en cuanto a representación del conjunto total de valores, (Camus et al., 2011). La aplicación del algoritmo MDA permite seleccionar un número reducido $l=500$, $\bar{\mathbf{M}}_{500 \times d}^{EOF}$, de los n estados de mar multivariados de las matrices $\bar{\mathbf{M}}_{n \times d}^{EOF}$.

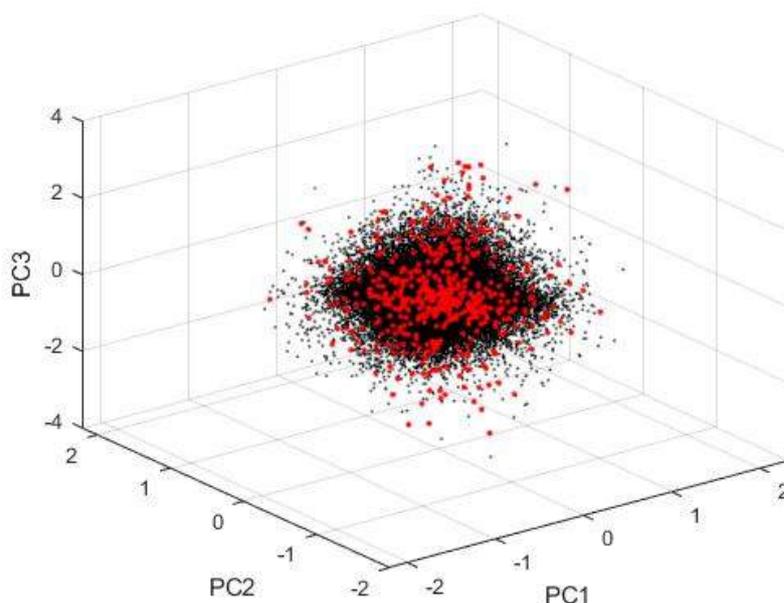


Figura 55. Selección de casos (en rojo) del total de 35 años de estados de mar horarios del hindcast (en negro), proyectados en el espacio de las tres primeras EOFs (73% de la varianza total).

La aplicación del algoritmo de selección a cada matriz de datos $\bar{\mathbf{M}}$ da lugar a baterías de 500 casos a propagar numéricamente, una por cada RCM, escenario y periodo que se suma a los 500 casos del *hindcast*. Pese a la eficiencia de la metodología híbrida, la propagación y posterior reconstrucción aplicada a cada RCM, escenario y periodo individualmente, tiene un coste de cómputo de alrededor de 7 días. Una estrategia de reducción de tiempo de cálculo consiste en agrupar las baterías de 500 casos de cada RCM, escenario y periodo futuros y mediante una segunda aplicación del algoritmo MDA, reducirlas a una única batería de 500 casos, representativa del conjunto de modelos climáticos, escenarios y periodos futuros. En esta aplicación hemos optado por aplicar esta metodología a las proyecciones futuras, con lo que distinguimos, por un lado, una librería de 500 casos representativa del *hindcast* (GOW-ERA5) y una librería de 500 casos correspondiente a las proyecciones.

Para poder realizar la segunda selección en las proyecciones dinámicas, se debe tener en cuenta que las direcciones principales $\Phi_{m \times m} = (\mathbf{EOF}_1, \mathbf{EOF}_2, \dots, \mathbf{EOF}_m)$ asociadas a cada RCM, escenario y periodo no tienen por qué ser iguales, ni tampoco el número d de PCs de las

matrices reducidas. Es por ello que los 500 casos seleccionados asociados a cada RCM, escenario y periodo futuros, $\bar{\mathbf{M}}_{500 \times d}^{EOF}$, deben ser proyectados en el espacio de las m variables físicas para así poder agrupar términos equivalentes $\mathbf{M}_{500 \times m}$. A continuación, procedemos a concatenar las matrices $\mathbf{M}_{500 \times m}$ asociadas a cada RCM escenario y periodo repitiendo la reducción de dimensiones mediante componentes principales y la posterior selección MDA.

- c) Las dos librerías de 500 estados de mar horarios correspondientes al *hindcast* y a las proyecciones son propagadas numéricamente mediante el programa SWAN (Booij et al. 1996) en modo estacionario. SWAN es un modelo numérico que resuelve la ecuación de balance de acción de onda del espectro. Modeliza el asomeramiento, la refracción por batimetría y corrientes, la interacción ola-ola y ola-corriente, la generación por viento, la disipación por rotura, *whitcapping* y el rozamiento con el fondo. El resultado de la propagación son las propiedades del oleaje (H_s, T_m, T_p, θ) en los puntos objetivo k para cada uno de los 500 casos $\mathbf{M}_{p_k 500 \times 4}$.

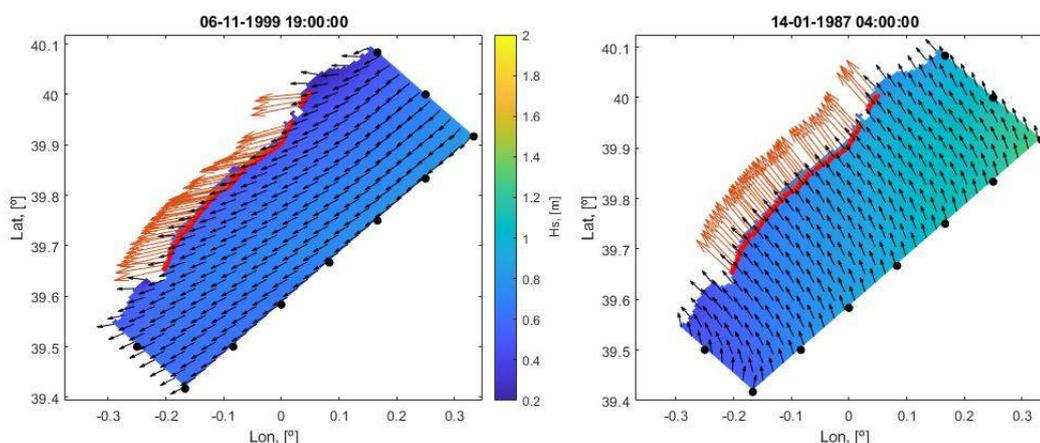


Figura 56. Dos de las 500 propagaciones del hindcast. El mapa de color representa la altura de ola y los vectores la dirección de propagación. Los puntos negros son los puntos de forzamiento del modelo y los rojos representan los puntos objetivo en los que se realiza la reconstrucción con RBFs.

- d) El cuarto paso de la metodología híbrida de *downscaling* consiste en la reconstrucción mediante interpolación multivariada usando funciones de base radial (RBFs). En el caso del hindcast, se aplica directamente la metodología propuesta en (Camus et al., 2011). La serie propagada completa de n instantes temporales en cada punto objetivo de cada variable de interés $\mathbf{M}_{p_k n \times var}$ se obtiene a partir de los resultados de la propagación de los 500 casos en el punto objetivo $\mathbf{M}_{p_k 500 \times 4}$, la matriz proyectada en el espacio de las EOFs de los 500 casos seleccionados $\bar{\mathbf{M}}_{500 \times d}^{EOF}$ y la matriz proyectada en el espacio de las EOFs de los n instantes $\bar{\mathbf{M}}_{n \times d}^{EOF}$. La aplicación de la misma metodología en el caso de las proyecciones, implicaría tener que hacer numerosas reconstrucciones en dos pasos, un paso por cada selección. En cada paso se realizarían tantas reconstrucciones como combinaciones de RCM, escenario, periodo y trayectoria de nivel del mar consideradas. El motivo es que las direcciones principales $\Phi_{m \times m} = (\mathbf{EOF}_1, \mathbf{EOF}_2, \dots, \mathbf{EOF}_m)$ asociadas a cada RCM, escenario y periodo de la primera selección no tiene por qué coincidir con las direcciones principales en la segunda y última selección. Una alternativa para evitar el proceso de reconstrucción en dos pasos consiste en emplear las

matrices expresadas en base física y no en el espacio de las EOFs. De esta manera, la serie propagada completa de la variable de interés en el caso de las proyecciones $\mathbf{Mp}_k_{n \times \text{var}}$, se obtiene a partir de los resultados de la propagación en el punto objetivo $\mathbf{Mp}_k_{500 \times 4}$ y las matrices $\mathbf{M}_{500 \times m}$ y $\mathbf{M}_{n \times m}$. De esta manera, aunque el coste de cómputo de las funciones de interpolación en base radial es más elevado al considerar la completa dimensionalidad del problema, evitamos la reconstrucción en dos pasos (uno por cada selección).

Para verificar la selección y la interpolación en el *hindcast*, ante la falta de registros de boyas en la zona de estudio, hemos reconstruido el clima marítimo en un punto de la malla del modelo global que coincide en el interior del dominio de cálculo, (ver Figura 57). Del punto interno se extrae la matriz propagada $\mathbf{Mp}_k_{500 \times \text{var}}$ y se compara la matriz $\mathbf{Mp}_k_{n \times \text{var}}$ conocida (modelo global), con la reconstrucción calculada.

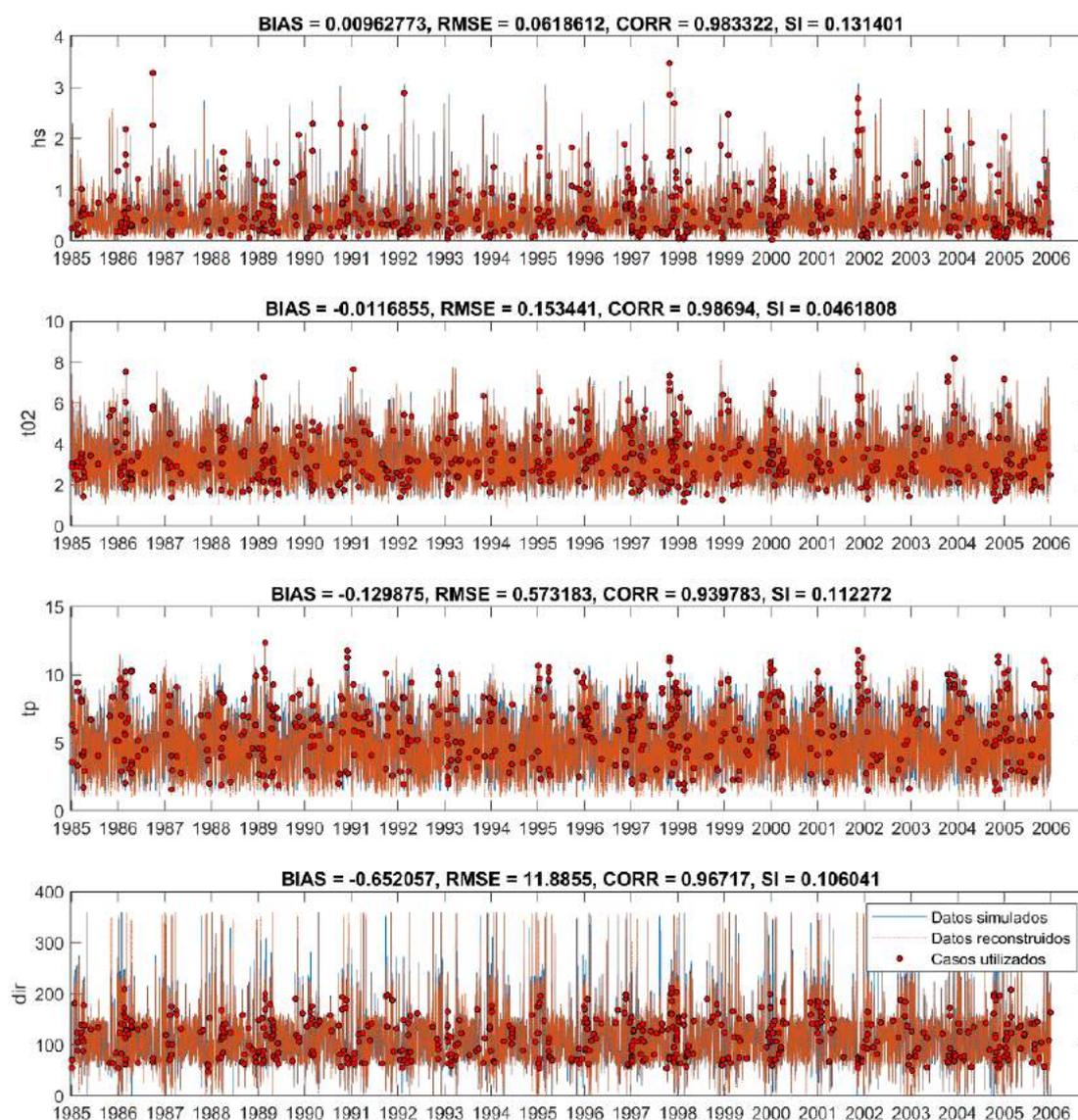


Figura 57. Validación de la selección y reconstrucción del *hindcast*.

Propagación a rotura

La propagación a rotura se realiza en una etapa a parte del *downscaling* híbrido debido a dos motivos:

1. La detección fiable de las propiedades en rotura del oleaje y la posición en la que se produce implica la generación de una malla de cálculo para el SWAN curvilínea y de alta resolución en la zona de rompientes, en el entorno de los 5-10 metros de tamaño de celda. La escala del estudio (O 100 km) hace que el coste de cómputo y de post-proceso de resultados sea elevado.
2. La presencia de numerosas estructuras genera difracción, fenómeno que no es correctamente modelado por los modelos espectrales.

Es por ello que las propiedades (altura de ola y dirección) del oleaje en la batimétrica -10 metros son propagadas a rotura en una nueva etapa. Para ello, bajo las hipótesis de teoría lineal de ondas y batimetría recta y paralela, se calcula la altura de ola y dirección en rotura considerando asomeramiento y refracción. Posteriormente se corrigen por difracción según la formulación de Goda, 1985.

El cálculo de las propiedades en rotura se realiza a partir de la ecuación de la dispersión lineal sin corrientes, de la conservación del flujo de energía y de la irrotacionalidad del número de onda:

$$w^2 = gk \tanh(kh) \quad (16)$$

$$\nabla EC_g = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{K} = 0$$

Orientando la dirección offshore según el eje x y la dirección longitudinal a la costa según y, la hipótesis de batimetría recta y paralela anula las variaciones según la dirección longitudinal $\partial/\partial y = 0$. Las ecuaciones (16.b) y (16.c) se transforman en:

$$\frac{\partial EC_g}{\partial x} = 0 \rightarrow EC_g = cte \quad (17)$$

$$\frac{\partial k \sin \theta}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\sin \theta}{\underbrace{c}_{\text{Ley de Snell}}} = cte$$

Empleando el criterio de rotura espectral $H_b = 0,55h_b$, se puede calcular iterativamente la profundidad de rotura resolviendo numéricamente la ecuación

siguiente:

$$H_{-10} K_s K_r - 0,55 h_b = 0 \quad (18)$$

Dónde:

$-H_{-10}$ es la altura de ola en la batimétrica -10 obtenida en el *downscaling* híbrido.

$$-K_s = \sqrt{\frac{n_{-10}c_{-10}}{n_b c_b}}$$

es el coeficiente de asomeramiento, $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$ y $c = \frac{L}{T}$

$$-k_R = \sqrt{\frac{\cos \theta_{-10}}{\cos \theta_b}}$$

Una vez conocida la profundidad de rotura h_b , la altura de ola en rotura H_b y la dirección θ_b , por asomeramiento y refracción, se obtienen aplicando las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

El hecho de considerar la difracción es incompatible con la hipótesis de conservación del flujo de energía en los rayos. El fenómeno de la difracción genera una transferencia de energía perpendicular a la dirección principal de propagación, y es motivada por cambios significativos en la altura de ola, debidos generalmente a la presencia de un obstáculo. La difracción suele ir unida a la refracción, y el cálculo conjunto es complejo y computacionalmente costoso (Berkoff, 1972), lo que hace que sea incompatible con las escalas de presente estudio.

Pese a la dificultad de la modelización rigurosa del proceso de difracción, sus efectos son fácilmente identificables. El bloqueo en la energía incidente debida a una estructura, genera una zona de afección en la que se distingue una zona abrigada y una zona de cesión, (ver Figura 58).

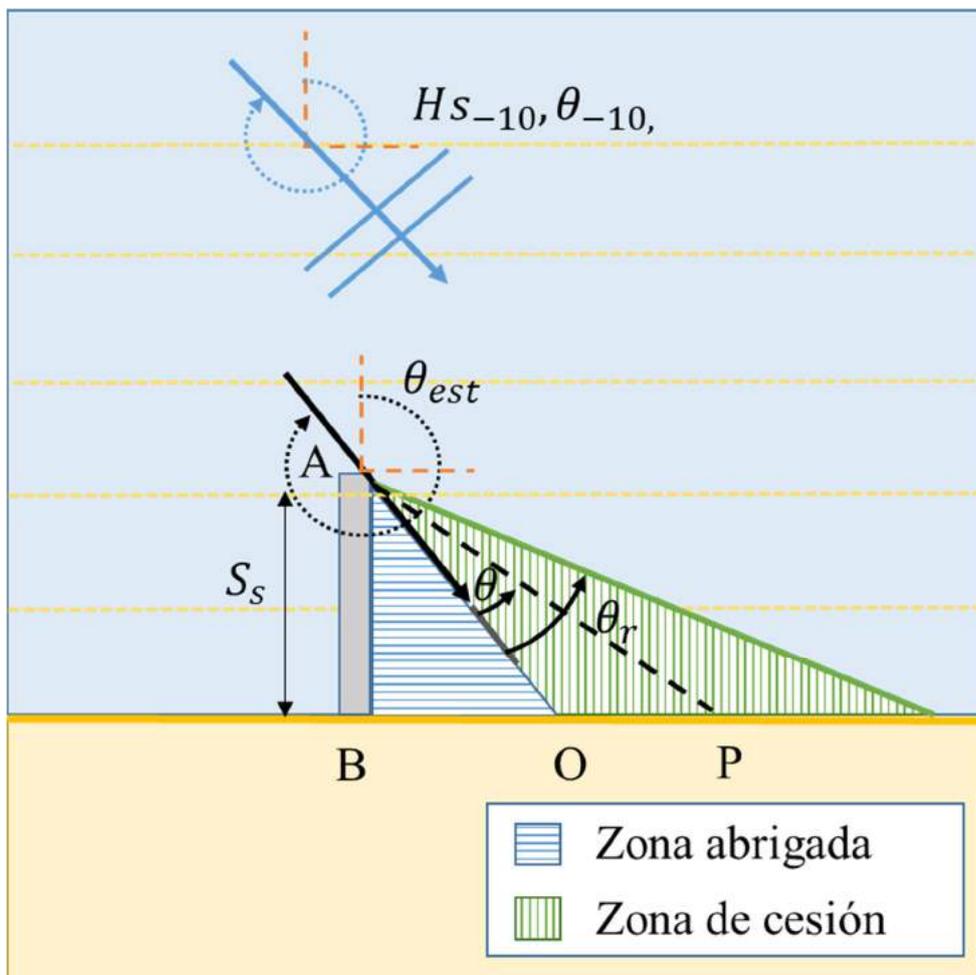


Figura 58. Esquema de las distintas zonas afectadas por la difracción

La estructura bloquea completamente la energía en la zona abrigada, con lo que los rayos situados inmediatamente a sotamar, en la zona de cesión, ceden parte de su energía lateralmente. De esta manera se uniformiza el gradiente longitudinal en altura de ola en la zona abrigada. La zona abrigada ve drásticamente reducida su altura de ola debido al bloqueo. Del mismo modo, en la zona de cesión se produce una reducción gradual de la energía, disminución que aumenta con la cercanía a la zona abrigada. La dirección del oleaje no se ve afectada en la zona de cesión, mientras que en la zona abrigada el ángulo de incidencia de los rayos gira hasta llegar a ser paralelo justo en el contacto con la estructura, respetando así la condición de no deslizamiento.

Pese a la dificultad de las ecuaciones que describen este proceso, este comportamiento se puede modelar de manera aproximada mediante expresiones empíricas (Goda, 1985, Hanson & Kraus, 2011, Hurst et al., 2015). Considerando el ángulo θ , aquel que forman los segmentos AO y el segmento AP y siendo positivo si P está en la zona de cesión y negativo si está en la zona abrigada, los efectos de la difracción sobre las propiedades en rotura por asomeramiento y refracción pueden modelarse según las ecuaciones siguientes:

$$H_{bd} = K_d H_b \quad (19)$$

Dónde:

- H_{bd} , es la altura de ola en rotura por asomeramiento, refracción y difracción.

- H_b , es la altura de ola en rotura por asomeramiento y refracción.

- K_d , es el coeficiente de difracción, cuyo valor estimado es:

$$K_d = 0,71 + 0,0093\theta + 0,000025\theta^2 \quad \text{si } 0 \geq \theta \geq -90 \quad (20)$$

$$K_d = 0,71 + 0,29 \sin\left(\frac{90\theta}{\theta_r}\right) \quad \text{si } 0 \geq \theta \geq \theta_r$$

En las formulaciones simplificadas recogidas en Hurst et al., (2015) y (Hanson & Kraus, 2011), no existe acuerdo en la extensión de la zona de cesión y parametrizada mediante el ángulo θ_r . En el caso de Hurst et al., (2015), se considera una zona de cesión cuya longitud, medida en la línea de costa, sea igual a la longitud de la zona abrigada. Por su parte, Hanson & Kraus, (2011) consideran un ángulo θ_r igual a 90°, lo que hace que la extensión de la zona de cesión sea infinita si la línea de costa es rectilínea. En la formulación aquí empleada θ_r se considera un parámetro libre que se puede calibrar mediante modelos de propagación más avanzados o mediante imágenes de satélite en las que se aprecia claramente la rotura.

De la misma manera, la dirección corregida por la difracción es:

$$\alpha_{bd} = \alpha_b K_d^{0,375} \quad (21)$$

Adicionalmente, para cumplir la condición de contorno de perpendicularidad entre los frentes de ondas y la estructura en las zonas próximas a ésta, se debe considerar una corrección extra aplicable si:

$$\theta < 0 \quad y \quad \frac{PB}{S_s} < \frac{1}{2} [\tan(\alpha_s) + \tan(0,88\alpha_b)] \quad (22)$$

Dónde α_s es el ángulo entre los segmentos AO y AB.

El ángulo de ola corregido por difracción en las zonas en las que se cumple la condición (22) es:

$$\alpha_{bd} = \alpha_b K_d^{0,375} \left\{ \frac{2PB}{S_s [\tan(\alpha_s) + \tan(0,88\alpha_b)]} \right\} \quad (23)$$

A título de ejemplo, se muestra en la Figura 59 una batimetría recta y paralela, que forma 45 grados con el sistema de referencia empleado. Hemos generado 30 perfiles paralelos y perpendiculares a la línea de costa que se extienden hasta la batimétrica -5 metros. Un espigón perpendicular a la línea de costa se dispone en la mitad del dominio de cálculo entre los perfiles 15 y 16 (línea roja en la figura). Definidas las condiciones del oleaje offshore en cabeza de perfil, el oleaje se propaga a rotura considerando asomeramiento y refracción y a la cabeza de la estructura (punto A). El punto de rotura en cada perfil se representa mediante puntos de diferentes colores y la dirección de rotura mediante su vector. En primer lugar, se realiza una zonificación de las zonas para distinguir qué ecuaciones se aplican para considerar la difracción:

- Los puntos negros son zonas no afectadas por difracción.
- Los puntos azules y verdes son puntos de la zona abrigada. Los puntos azules son aquellos en los que se cumple la condición (11).
- Los puntos amarillos son los puntos de la zona de afección.

Una vez realizada la zonificación, se aplican las ecuaciones correspondientes para considerar el efecto de la difracción.

Se aprecia la reducción de la altura de ola en rotura en zona abrigada por el dique, que pasa de 0,6 metros en el perfil 15 a 0,26 en el perfil 16 (línea negra en el panel derecho de la Figura 59). A partir del perfil 16, la altura de ola va creciendo hasta alcanzar el valor que tenía sin considerar la difracción. Igualmente se aprecia el efecto en la dirección, que pasa de 16º en el perfil 15 a 41º en el perfil 16. Se hace evidente que el ángulo de los rayos en rotura en el perfil 16, adyacente a la estructura en la zona abrigada, tiende a 45º, cumpliendo la condición de contorno que dicta la estructura. El ángulo se restablece, alcanzando en los últimos perfiles prácticamente el mismo valor que tenía de no considerarse la difracción.

En el ejemplo se ha empleado un ángulo θ_r de extensión de la zona de cesión igual a 40° . El empleo de un ángulo menor reduciría la extensión de la zona afectada por la difracción.

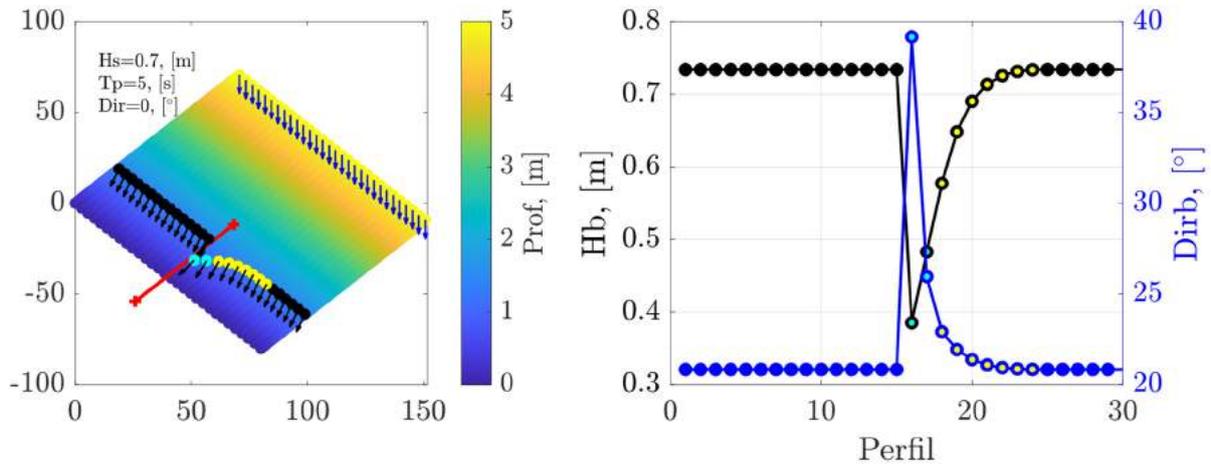


Figura 59. Ejemplo de aplicación de la corrección por difracción en el entorno de un espigón.

Es importante tener en cuenta que, para el cálculo de las series temporales de dinámicas en rotura, es necesario tener en cuenta la temporalidad de las estructuras del tramo. La información sobre fechas de construcción, remozado y demolición de las diferentes obras son obtenidas bien de (CEDEX, 2013) bien de la observación de imágenes de satélite en el caso de no estar referenciadas en el documento.

ANEXO II. FILTRO EXTENDIDO DE KALMAN

El filtro Kalman conduce a una solución recursiva al problema de filtrado lineal óptimo, definido como la minimización del error medio cuadrático entre la realidad y la estimación. Se trata de un método recursivo, pues para cada actualización de la estimación se calcula únicamente a partir del estado precedente y de datos adicionales (observaciones). El filtro Kalman es aplicable a sistemas dinámicos lineales, discretos en el tiempo. Para ello, se debe definir el concepto de vector estado Ψ , definido como el conjunto de parámetros mínimo del instante precedente del sistema que es necesario para predecir su comportamiento futuro. El vector de estado es, normalmente, desconocido, y para estimarlo se utiliza un conjunto de observaciones. Matemáticamente el problema a resolver se reduce a dos ecuaciones, la ecuación del proceso (24) y la ecuación de las observaciones (25).

$$\Psi_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1,n} \Psi_n + \mathbf{w} \quad (24)$$

$$\mathbf{y}_{\text{obs},n} = \mathbf{H}_n \Psi_n + \mathbf{v}_n \quad (25)$$

La matriz $\mathbf{F}_{n+1,n}$ realiza la transición entre el estado en el instante n al instante $n+1$. El ruido del proceso \mathbf{w} , se asume aditivo, blanco, Gaussiano, de media cero y cuya matriz de covarianza \mathbf{Q} es diagonal.

La matriz $\mathbf{F}_{n+1,n}$ realiza la transición entre el estado en el instante n al instante $n+1$. El ruido del proceso \mathbf{w} , se asume aditivo, blanco, Gaussiano, de media cero y cuya matriz de covarianza \mathbf{Q} es diagonal.

En el caso de las observaciones, \mathbf{H}_n es la matriz de mediciones y relaciona el vector de estado con las variables observables y \mathbf{v} es el ruido aditivo, blanco, Gaussiano, de media cero y matriz de covarianza \mathbf{R}_n diagonal. El ruido del proceso \mathbf{w}_n y de las observaciones \mathbf{v}_n no están correlacionados. Definidas las ecuaciones del problema, el filtro Kalman tiene por objetivo el resolver conjuntamente las ecuaciones del proceso y de las observaciones de manera óptima para minimizar el error medio cuadrático de la estimación del estado.

Siendo el vector de estado Ψ desconocido, el vector de estado estimado en el instante n a partir de un vector de estado estimado a priori disponible Ψ_n^- y a partir de las observaciones disponibles en el instante n es:

$$\Psi_n = \mathbf{G}_n^1 \Psi_n^- + \mathbf{G}_n \mathbf{y}_n \quad (26)$$

Dónde $\mathbf{G}_n^1 = \mathbf{I} - \mathbf{G}_n \mathbf{H}_n$, el problema se resuelve obteniendo la matriz \mathbf{G}_n , también llamada ganancia de Kalman.

Una limitación del filtro Kalman es su aplicabilidad únicamente a sistemas lineales, que se pone de manifiesto en las ecuaciones (24) y (25). El filtro extendido de Kalman eKF constituye una generalización del método a sistemas no lineales a partir una aproximación de primer orden de las ecuaciones no lineales del proceso y eventualmente de las observaciones. En el caso de sistemas como el descrito por la ecuación (1) la ecuación de procesos (24), es no lineal, lo que obliga a utilizar el filtro eKF.

$$\Psi_{n+1} = \mathbf{f}(n, \Psi_n) + \mathbf{w}_n \quad (27)$$

En la expresión (26), $\mathbf{f}(n, \boldsymbol{\psi}_n)$ representa la matriz no lineal de transición que depende del tiempo. La idea del filtro Kalman extendido consiste en linealizar las ecuaciones del vector estado en torno a la estimación más reciente, lo que da como resultado un sistema lineal.

<p><i>Inicialización:</i> Para $n=0$</p> <p>(1) <i>Determinar los valores esperados de $\boldsymbol{\psi}_0, \mathbf{P}_0, \mathbf{Q}, \mathbf{R}$</i></p> <p><i>Bucle:</i> Para $n=1, 2, \dots$</p> <p>(2) <i>Propagación del vector de estado (resolución de la ED del proceso)</i></p> <p>$\boldsymbol{\psi}_n^- = \mathbf{f}(n, \boldsymbol{\psi}_{n-1})$</p> <p>(3) <i>Cálculo del Jacobiano de la transformación (linealización de primer orden)</i></p> <p>$\mathbf{J}_n = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(n, \boldsymbol{\psi})}{\partial \boldsymbol{\psi}} \right _{\boldsymbol{\psi}=\boldsymbol{\psi}_n^-}$</p> <p>(4) <i>Cálculo de la matriz de covarianza del error del proceso</i></p> <p>$\mathbf{P}_n^- = \mathbf{J}_n \mathbf{P}_{n-1} \mathbf{J}_n^T + \mathbf{Q}$</p> <p><i>Si hay observaciones en el instante n:</i></p> <p>(5) <i>Cálculo de la ganancia Kalman</i></p> <p>$\mathbf{G}_n = \mathbf{P}_n^- \mathbf{H}_n^T [\mathbf{H}_n \mathbf{P}_n^- \mathbf{H}_n^T + \mathbf{R}_n]^{-1}$</p> <p>(6) <i>Actualización del vector de estado</i></p> <p>$\boldsymbol{\psi}_n = \boldsymbol{\psi}_n^- + \mathbf{G}_n (\mathbf{Y}_{obs,n} - \mathbf{H}_n \boldsymbol{\psi}_n^-)$</p> <p>(7) <i>Actualización de la matriz de covarianza del error del proceso</i></p> <p>$\mathbf{P}_n = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_n \mathbf{H}_n) \mathbf{P}_n^-$</p>

Tabla 2. Filtro extendido de Kalman

La aplicación concreta del filtro extendido de Kalman a la ecuación (1) requiere la definición del vector de estado (expresión 28). Nótese que a diferencia de Long & Plant, (2012) y Vitousek et al., (2017), el hecho de utilizar una constante de erosión y acreción diferente en el modelo de transporte transversal implica la consideración de un vector de estado en el que los parámetros a corto plazo se distingue entre erosión y acreción.

$$\boldsymbol{\psi} = [\mathbf{Y}_{It} \quad \mathbf{K}_{It} \quad \mathbf{V}_{It} \quad \mathbf{Y}_{st,ero} \quad \mathbf{Y}_{st,acr} \quad \mathbf{K}_{ero} \quad \mathbf{K}_{acr}] \quad (28)$$

La matriz $\mathbf{f}(n, \boldsymbol{\psi}_{n-1})$ no lineal de propagación del vector de estado, se obtiene utilizando un esquema de Euler hacia delante (explícito) en el caso de la integración de los procesos longitudinales y un esquema Crank-Nicholson centrado (explícito) en el caso del modelo de perfil. Asimismo, se deben inicializar las matrices de covarianza del error del proceso $\mathbf{P}_{ero,0}$ y $\mathbf{P}_{acr,0}$, de ruido del proceso $\mathbf{Q}_{ero,0}$ y $\mathbf{Q}_{acr,0}$ y de error en la medida \mathbf{R} . Las matrices \mathbf{Q} y \mathbf{R} se asumen constantes. Dado que las

observaciones representan la suma de la componente a largo plazo y a corto plazo de la línea de costa, el error se puede condensar en un escalar R.

$$\Psi_n^- = f(n, \Psi_{n-1}) = \Psi_{n-1}^- + \frac{\partial \Psi}{\partial t} \Delta t = \Psi_{n-1}^- + \begin{bmatrix} -\frac{1}{d_c} \frac{\partial Q}{\partial x} + v_{lt} + \frac{1}{d_c} q \\ 0 \\ 0 \\ \frac{A_{ero}[(y_{eq,n+1} + y_{eq,n}) - y_n]}{1 + A_{ero}} \\ \frac{A_{acr}[(y_{eq,n+1} + y_{eq,n}) - y_n]}{1 + A_{acr}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} P_{ero,0} &= \mathbf{diag}([P_{Y_{lt}} P_{K_{lt}} P_{v_{lt}} P_{Y_{st,ero}} 0 P_{K_{ero}} 0]) \\ P_{acr,0} &= \mathbf{diag}([P_{Y_{lt}} P_{K_{lt}} P_{v_{lt}} 0 P_{Y_{st,acr}} 0 P_{K_{acr}}]) \\ Q_{ero,0} &= \mathbf{diag}([Q_{Y_{lt}} Q_{K_{lt}} Q_{v_{lt}} Q_{Y_{st,ero}} 0 Q_{K_{ero}} 0]) \\ Q_{acr,0} &= \mathbf{diag}([Q_{Y_{lt}} Q_{K_{lt}} Q_{v_{lt}} 0 Q_{Y_{st,acr}} 0 Q_{K_{acr}}]) \\ Q_{acr,0} &= \mathbf{diag}([Q_{Y_{lt}} Q_{K_{lt}} Q_{v_{lt}} 0 Q_{Y_{st,acr}} 0 Q_{K_{acr}}]) \\ R &= R_{Y_{obs}} \end{aligned}$$

Una vez avanzado el vector de estado, se debe distinguir si se produce una erosión o una acreción en el paso de tiempo calculado. Si $Y_{st,ero,n} < Y_{st,n-1}$ diremos que se produce erosión, mientras que en el caso contrario se trataría de acreción. Esta condición es suficiente para distinguir si se trata de un proceso erosivo o de acreción puesto que la constante sólo modula la amplitud de la respuesta, siendo el sentido de avance idéntico en el caso de erosión o acreción.

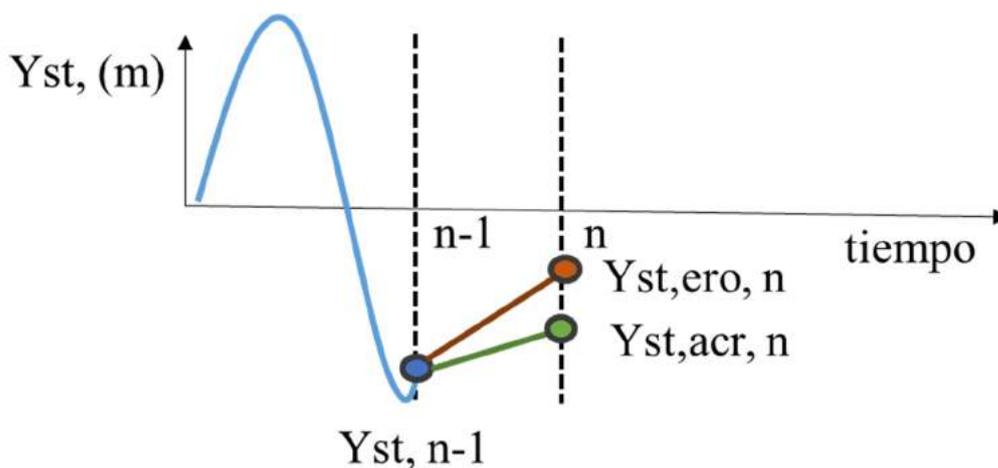


Figura 60. Esquema de la selección de eventos de erosión y acreción. En el caso de ejemplo, puesto que $Y_{st,ero,n}$ es mayor que $Y_{st,n-1}$ se trata de un evento de acreción

A continuación, se calcula el Jacobiano de la transformación, el cual, pone de manifiesto la naturaleza desacoplada de los procesos longitudinales y transversales.

$$J_n = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(n, \Psi)}{\partial \Psi} \right|_{\Psi = \Psi_n} = \begin{bmatrix} J_{lt} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & J_{st} \end{bmatrix} \quad (30)$$

En el caso de que se trate de un evento de erosión, los términos $J_{[5,7],i}$ relacionados con la acreción, se anulan y recíprocamente en el caso de acreción.

Si $Y_{st,ero,n} < Y_{st,n-1}$:
 $J_{[5,7],i} = 0$;
 Si no:
 $J_{[4,6],i} = 0$;

Tabla 3. Actualización del Jacobiano en función de la naturaleza erosiva o de acreción del proceso

El cálculo de la matriz de covarianza del error del proceso **P** requiere atención especial debido a la consideración de una constante de erosión diferente a la constante de acreción. Por un lado, los términos de la matriz referidos al modelo transversal deben ser actualizados a partir del paso de tiempo en el que se haya producido un proceso, de erosión o acreción, igual al del paso de tiempo del análisis. En lo que se refiere a los términos del modelo longitudinal, estos deben ser actualizados a partir de los términos de la matriz de covarianza obtenida en el paso anterior.

Si $Y_{st,ero,n} < Y_{st,n-1}$:
 (1) $n_{ero} = n_{ero} + 1$
 (2) $\mathbf{P}_n^- = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{lt,n}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_{st,ero,n}^- \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{lt,n-1}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_{st,ero,n_{ero}-1}^- \end{bmatrix} \mathbf{J}^T + \mathbf{Q}_{ero}$
 (3) $\mathbf{P}_{st,ero,n_{ero}} = \mathbf{P}_n^-$
 Si no:
 (1) $n_{acr} = n_{acr} + 1$
 (2) $\mathbf{P}_n^- = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{lt,n}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_{st,acr,n}^- \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{lt,n-1}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_{st,acr,n_{acr}-1}^- \end{bmatrix} \mathbf{J}^T + \mathbf{Q}_{acr}$
 (3) $\mathbf{P}_{st,acr,n_{acr}} = \mathbf{P}_n^-$

Tabla 4. Propagación de la covarianza del error del proceso

Una vez introducida la sutileza en el análisis motivada por la distinción entre procesos de erosión y de acreción en el modelo de perfil se ejecutan los pasos (5), (6) y (7) de la Tabla 2.

Una vez descrita la metodología de calibración mediante el filtro extendido de Kalman, un ejemplo visual de la comparación de los tres métodos de calibración descritos en el apartado 4.3 se muestra en la Figura 61 (se ha omitido, por simplicidad en la representación, el efecto de las observaciones). Considerando la naturaleza estocástica del vector de estado, se puede representar mediante su media y su covarianza n-dimensional. La propagación del vector de estado se realiza mediante la ecuación de procesos (28). En el caso del criterio experto, se simulan vectores de estado discretos cuya elección depende de conocimientos previos. Es función de ese criterio experto que los vectores de estado estimados (puntos verdes), estén lo más próximos posibles de los valores reales del vector de estado. En el caso de métodos probabilísticos (panel central de la figura), se asume una función de distribución del vector de estado y se simulan todas las realizaciones. En el caso del filtro extendido de Kalman, se estima un vector inicial de estado medio (punto azul del panel derecho) y su covarianza asociada. Las estimaciones iniciales deben ser próximas a las reales, aunque la asimilación de observaciones contribuye a corregir desviaciones de partida. Posteriormente se propaga tanto el vector de estado medio estimado, cómo su covarianza estimada. En el filtro extendido de Kalman se asume que el vector de estado es una variable aleatoria Gaussiana que se propaga analíticamente mediante la linearización del sistema no lineal.

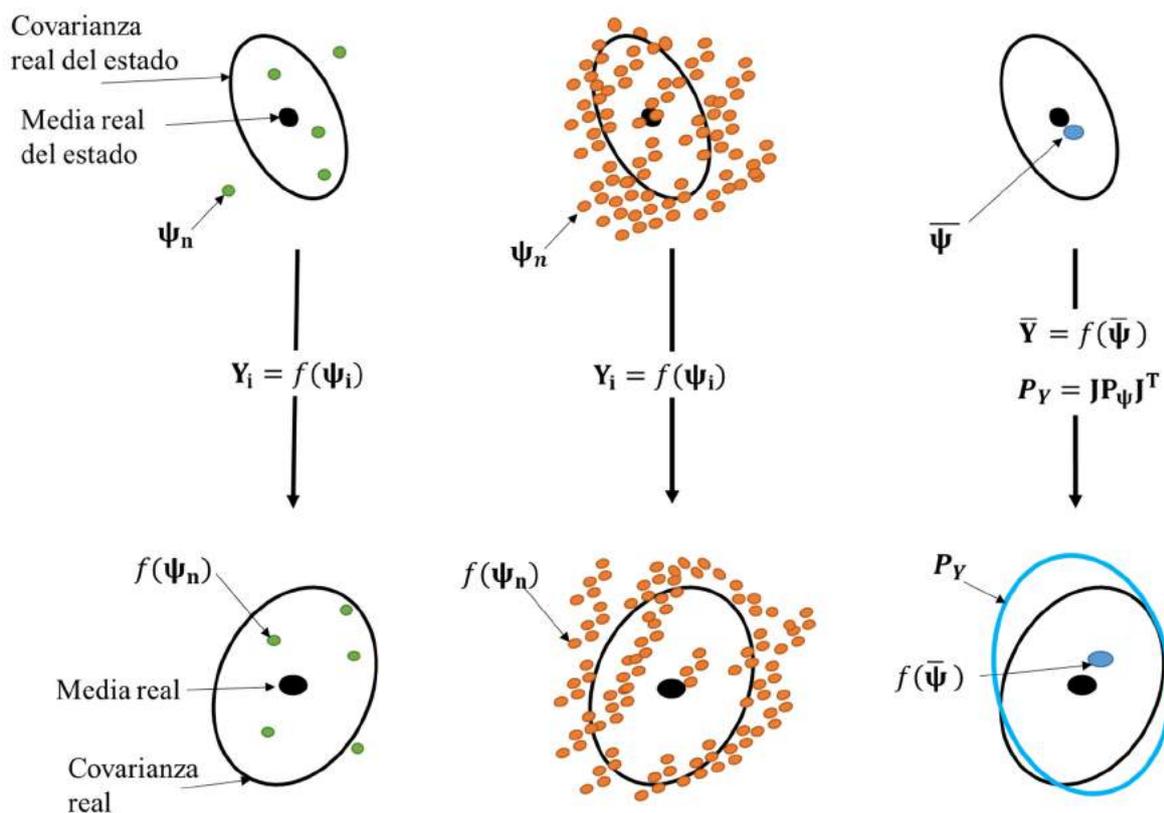


Figura 61. Ejemplo de la propagación de la media y la covarianza del vector de estado. En el panel izquierdo, método basado en el criterio experto. En el panel central, el método probabilístico. En el panel derecho el método basado en el filtro extendido de Kalman.

ANEXO III. TABLAS RESUMEN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y ESTADÍSTICOS

Playa	Perfiles	Longitud, [m]	Anchura media, [m]	Área, x10.000 [m ²]
<i>Torre</i>	20-41	3808	94	32
<i>Grao de Burriana</i>	73-83	1820	260	49
<i>Nules</i>	114-130	1843	73	13
<i>Moncófar</i>	134-160	3015	83	24
<i>Chilches</i>	175-195	2447	93	22
<i>Llosa</i>	196-203	1234	60	7
<i>Almenara</i>	208-219	2181	126	29
<i>Corinto</i>	219-229	1998	101	20
<i>Almarda</i>	229-238	1798	181	33
<i>Canet</i>	238-245	1384	186	26
<i>Puerto de Sagunto</i>	251-256	1189	176	19

Tabla 5. Características geométricas de las principales playas del estudio con respecto a la línea de costa media del 2010

Playa	D ₅₀ ref [mm]	Tipo	D ₅₀ frente, [mm]	Tipo
<i>Torre</i>	0,33	Arenas Medias	0,34	Arenas Medias
<i>Grao de Burriana</i>	0,22	Arenas Finas	0,37	Arenas Medias
<i>Nules</i>	0,59	Arenas Medias	2,17	Gravas muy Finas
<i>Moncófar</i>	0,40	Arenas Medias	0,88	Arenas muy Gruesas
<i>Chilches</i>	0,30	Arenas Medias	0,69	Arenas Gruesas
<i>Llosa</i>	0,35	Arenas Medias	3,42	Gravas
<i>Almenara</i>	0,58	Arenas Medias	1,17	Arenas muy Gruesas
<i>Corinto</i>	0,34	Arenas Finas	0,31	Arenas Medias
<i>Almarda</i>	0,25	Arenas Finas	0,28	Arenas Medias
<i>Canet</i>	0,19	Arenas Finas	0,21	Arenas Medias
<i>Puerto de Sagunto</i>	0,19	Arenas Finas	0,18	Arenas Medias

Tabla 6. Características sedimentológicas medias de las principales playas de la zona de estudio.

Playa	dc, [m]	W*, [m]	Talud, $(\tan \beta_n)^{-1}$, [H/V]
Torre	5,0	246	41
Grao de Burriana	3,5	191	42
Nules	3,1	105	25
Moncófar	3,0	110	28
Chilches	2,9	118	30
Llosa	3,3	142	33
Almenara	2,6	88	25
Corinto	2,8	152	40
Almarda	3,6	224	49
Canet	3,1	191	47
Puerto de Sagunto	3,2	201	48

Tabla 7. Características geométricas del perfil activo representativo de las principales playas del estudio.

Playa	RMSE, [m]	BIAS, [m]	R ²
Torre	3,72 / <u>8,05</u>	0,57/ <u>3,40</u>	0,91 / <u>0,73</u>
Grao de Burriana	4,37 / <u>10,99</u>	0,93 / <u>6,59</u>	0,89 / <u>0,66</u>
Nules	3,91 / <u>5,99</u>	0,29 / <u>2,31</u>	0,80 / <u>0,65</u>
Moncófar	4,71 / <u>10,46</u>	0,53 / <u>5,74</u>	0,81 / <u>0,58</u>
Chilches	4,22 / <u>12,31</u>	0,88 / <u>9,06</u>	0,74 / <u>0,50</u>
Llosa	4,68 / <u>22,13</u>	0,72 / <u>16,87</u>	0,91 / <u>0,55</u>
Almenara	4,51 / <u>15,04</u>	0,87 / <u>2,92</u>	0,82 / <u>0,41</u>
Corinto	5,61 / <u>7,56</u>	0,55 / <u>2,01</u>	0,68 / <u>0,59</u>
Almarda	5,24 / <u>8,49</u>	0,92 / <u>5,17</u>	0,49/ <u>0,39</u>
Canet	5,40 / <u>14,49</u>	0,70 / <u>9,70</u>	0,89 / <u>0,83</u>
Puerto de Sagunto	4,00 / <u>13,24</u>	0,40 / <u>10,73</u>	0,91 / <u>0,67</u>

Tabla 8. Diferentes estadísticos del error en el histórico. Valores sin subrayar con asimilación de observaciones, valores subrayados sin asimilación.

Playa	Actuación	Fecha
<i>Torre</i>	Relleno	1993
	Construcción de espigón y relleno	1999-2000
	Eliminación de espigones y relleno	2006-2007
<i>Burriana</i>	Construcción de espigones	1993
	Sustitución de dique exento por espigón y relleno	2014-2015
<i>Nules</i>	Construcción de espigones y relleno	2001-2002
	Relleno	2011-2012
<i>Moncófar</i>	Relleno	1998-2002
	Relleno	2011-2012
<i>Chilches</i>	Relleno	2011-2012
<i>Almenara</i>	Construcción obras de defensa y rellenos	1996-1998
	Construcción de escollera	1997
	Relleno	2001
	Relleno	2004
	Refuerzo escollera	2005
	Prolongación escollera	2008
	Prolongación escollera	2010
	Prolongación escollera	2012
	Prolongación escollera	2013
Prolongación escollera	2015	
<i>Corinto</i>	Refuerzo escollera	2016
	Relleno	1995-1998
<i>Almardá</i>	Relleno	2007-2010
<i>Canet</i>	Relleno	1995-1998
<i>Sagunto</i>	Préstamo sedimento	1993-1997
	Relleno	1995-1998

Tabla 9. Resumen de las actuaciones identificadas en el periodo 1990-2020 en el tramo de estudio



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española (28-5316)

Inundación-erosión

16 de Noviembre de 2020

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS.....	2
2. REVISIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES.....	3
3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	5
3.1. Perfilado de la costa	9
3.2. Obtención de la topobatimetría futura.....	11
3.3. Tratamiento de las dinámicas y modelado de la inundación.....	13
3.4. Resultados potenciales.....	13
4. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN.....	15
4.1. Perfilado de la costa	15
4.2. Obtención de la topobatimetría futura.....	16
4.3. Tratamiento de las dinámicas y modelado de la inundación.....	25
4.4. Resultados	26
4.5. Comparación con los resultados de la inundación empleando el MDT presente.....	31
5. CONCLUSIONES	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología propuesta para el cálculo de proyecciones de inundación considerando la erosión costera.....	6
Figura 2. Diagrama de flujo de entradas y resultados de cada etapa de cálculo de las proyecciones de inundación considerando la erosión costera	8
Figura 3. Parametrización de los perfiles de base.....	9
Figura 4. Aumento de resolución de los perfiles de base.	10
Figura 5. Cinemática del perfil asociada al transporte longitudinal y al aumento del nivel medio del mar (ANMM).....	12
Figura 6. Esquema del paso del sistema de coordenadas global al local del perfil.....	12
Figura 7. Perfilado de la costa en la zona de estudio.....	15
Figura 8. Aplicación del modelo de traslación del perfil. En el panel superior se muestra un esquema de la cinemática asociada a los diferentes procesos. En el panel inferior se muestra la actualización de un perfil para las tres.....	17
Figura 9. Modelo digital del terreno emergido presente.....	18
Figura 10. Modelo digital del terreno emergido para el promedio de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el año 2050.	19
Figura 11. Modelo digital del terreno emergido para el escenario RCP4.5 en el año 2100.	20
Figura 12. Modelo digital del terreno emergido para el escenario RCP8.5 en el año 2100.	21
Figura 13. Comparación de la evolución del modelo digital del terreno emergido en diferentes playas.	23
Figura 14. Detalle de la comparación de la evolución del modelo digital del terreno emergido en las playas de Chilches y Corinto.El sombreado representa la superficie de playa erosionada de forma permanente con respecto al presente.....	24
Figura 15. Simulación XBeach de uno de los temporales sintéticos en el perfil 20. En el panel superior se muestra el momento en el que se produce el máximo remonte. En el panel inferior se representa la serie de remontes infragravitorios o surfbeat.	25
Figura 16 Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP4.5 en el año 2050, correspondientes a la envolvente de modelos en diferentes playas del tramo de estudio.....	27
Figura 17. Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100, correspondientes a la envolvente de modelos en diferentes playas del tramo de estudio.....	27
Figura 18. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 correspondientes a la envolvente de modelos en las playas de Torre (panel superior) y Moncófar (panel inferior).	28
Figura 19. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno del modelo EART para el escenario RCP8.5 del año 2100 y P95% de ANMM (0,76 cm) en las playas de Burriana (panel superior), Chilches (panel central) y Moncófar sur (panel inferior).....	29
Figura 20. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno, envolvente de los cinco RCMs para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 y P95% de ANMM.	30

Figura 21. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno, en los diferentes RCMs para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 y P95% de ANMM. 30

Figura 22. Efecto de los cambios en la morfología de la zona costera activa en la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2050 para los percentiles del 5% (40 cm), 50% (48 cm) y 95% (55 cm). 32

Figura 23. Efecto de los cambios en la morfología de la zona costera activa en la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 para los percentiles del 5%, 50% y 95%. 33

Figura 24. Detalle del efecto de los cambios de la morfología de la zona costera activa en la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 para los percentiles del 5%, 50% y 95% en la zona de Moncófar sur. En el panel a) se muestra la extensión de la zona inundada en el caso de emplear el MDT presente y en el panel b) se muestra la extensión de la inundación sobre el MDT futuro. 34

Figura 25. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 y P95% de ANMM. En el panel superior se muestra la envolvente de modelos y en el inferior se representan los modelos desagregados. 35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los resultados potenciales de la aplicación de la metodología. 14

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- ANMM: Incremento del Nivel Medio del Mar como consecuencia del cambio climático, en metros.
- AR: Alta Resolución
- ArcGIS: Programa comercial para el tratamiento de la información geográfica.
- CI: Cota de Inundación, en metros.
- GCM: Modelo Climático General (del inglés, "Global Climate Model"), simulando las interacciones atmósfera-oceano a escala planetaria.
- GEIs: Gases de Efecto Invernadero, contribuyendo al calentamiento global por la emisión a la atmósfera resultado de la acción antropogénica.
- GEV: Función de distribución Generalizada de Extremos (del inglés, "Generalized Extreme Value function").
- GIS: Sistema de Información Geográfica, (del inglés, "Geographical Information System")
- IDW: Método de interpolación espacial basado en la distancia inversa ponderada, (del inglés, "Inverse Distance Weighting")
- MA: Marea Astronómica, en metros.
- MDT: Modelo Digital del Terreno
- MM: Marea Meteorológica, en metros.
- NMR: Nivel del Mar en Reposo. En el periodo de referencia suma de la marea astronómica y meteorológica. En los periodos futuros suma de la marea astronómica, meteorológica y aumento del nivel medio del mar. En metros.
- RCM: Modelo Climático Regional (del inglés, "Regional Climate Model"), simulando los procesos atmosfera-oceano a escala regional considerando los resultados de los modelos GCM como condiciones de contorno para el aumento de resolución espacio-temporal.
- RCP: Trayectorias de Concentración Representativas, (del inglés, "Representative Concentration Pathway"). Constituyen los escenarios futuros de cambio climático función de los escenarios de emisiones GEIs, caracterizadas por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m².
- RCP4.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de los GEIs con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 4.5 W/m².
- RCP8.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de los GEIs con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 8.5 W/m².
- RFSM-EDA: Modelo hidráulico de inundación (del inglés, Rapid Flood Spreading Method with Explicit Diffusion Acceleration term).
- SWAN: Modelo numérico de propagación del oleaje (del inglés, "Simulating Waves Nearshore").
- XBeach: Modelo numérico que resuelve la hidrodinámica en la zona de rompientes, (del inglés, "eXtreme Beach").

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

- B: Cota de la berma.
- β_f : Pendiente intermareal o del frente de la playa.
- β_n : Pendiente del perfil activo.
- Dc: Profundidad de cierre.
- Dir: Dirección del oleaje, en grados sexagesimales.
- dM: Distancia al mar desde la línea de referencia que define el perfil.
- dT: Distancia a tierra desde la línea de referencia que define el perfil.
- e_i : Espaciamiento entre los perfiles de base.
- e_i^{AR} : Espaciamiento entre los perfiles de alta resolución.
- H_0 : Altura de ola en indefinidas, en metros.
- Hs: Altura de ola significativa, en metros.
- H_{s10} : Altura de ola significativa en la batimétrica de 10 metros.
- L: Longitud de onda del oleaje, en metros.
- L_0 : Longitud de onda del oleaje en profundidades indefinidas, en metros.
- \vec{n} : Dirección normal a una línea.
- nx: Proyección de la dirección normal según el eje x.
- ny: Proyección de la dirección normal según el eje y.
- n_i : Número de perfiles de base.
- n_i^{AR} : Número de perfiles de alta resolución.
- η_{XB} : Serie temporal de remontes calculada con el modelo XBeach, incluye el NMR, el setup estático y la componente infragravitatoria.
- R_{ANMN} : Retroceso del perfil activo debido al ANMM.
- R_{long} : Retroceso del perfil activo debido al transporte longitudinal.
- S_{IG} : Remonte infragravitatorio.
- T_m : Periodo medio, en segundos.
- T_p : Periodo de pico, en segundos.
- V_{ANMN} : Ascenso del perfil activo debido al ANMM.

RESUMEN EJECUTIVO

En esta parte metodológica se propone una metodología para analizar los impactos del cambio climático sobre la inundación costera teniendo en cuenta las proyecciones de erosión y considerando las fuentes de incertidumbre asociadas. Para ello, se ha desarrollado una metodología integrada que aúna los desarrollos de las Subtareas 1.2 y 1.3 y en la que las proyecciones de erosión costera se emplean como condición de contorno en el modelado de las proyecciones de inundación costera. El acoplamiento se realiza mediante un modelo de traslación del perfil, que traduce los cambios futuros de la línea de costa en modificaciones del perfil activo. Los perfiles alterados se interpolan espacialmente para generar la topo-batimetría empleada como dato de entrada en la metodología de inundación. La metodología se ha implementado en un tramo costero del Mediterráneo, situado entre el Puerto de Castellón y el Puerto de Sagunto, de alta complejidad, debido a su nivel de antropización. La metodología se ha implementado a la escala de unidad de gestión, sin embargo, es aplicable a cualquier escala espacial.

A partir de las proyecciones de la evolución de la línea de costa elaboradas en la Subtarea 1.3, se calculan las posiciones medias en los escenarios futuro objetivos en los que calcular la inundación. Posteriormente, se realiza un aumento de la resolución del perfilado empleado en el cálculo de las proyecciones de erosión que permita aplicar, de manera consistente, el modelo de traslación de perfil. La aplicación del modelo de traslación de perfil junto con la interpolación espacial permite obtener un modelo digital del terreno actualizado y consistente con los escenarios y periodos de tiempo futuros objetivo. Para calcular la cota de inundación, es necesario determinar la contribución del oleaje. Para ello, los eventos extremos sintéticos generados en la metodología de inundación (Subtarea 1.2) y regionalizados a costa deben volverse modelar hidrodinámicamente sobre la topo-batimetría actualizada. De esta manera es posible considerar las complejas interacciones entre la nueva morfología del terreno y la hidrodinámica. Una vez se ha reconstruido la cota de inundación en la costa, se ha utilizado un modelo hidráulico bidimensional para el cálculo de la inundación. Como resultado, para los escenarios y horizontes temporales considerados, se han obtenido mapas de inundación correspondientes a cotas de inundación de diferentes periodos de retorno estadísticamente significativas, originadas por la combinación de eventos extremos multi-modelo y el aumento del nivel medio del mar, incluida su incertidumbre, y que incorporan el efecto de los cambios en la línea de costa. El informe se estructura de la siguiente forma. En primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte relativo a las metodologías empleadas hoy día para elaborar proyecciones de inundación considerando cambios en la línea de costa, para así poner de manifiesto los avances que este trabajo supone frente al conocimiento presente y su adecuación a la costa española. En segundo lugar, se describe la metodología que permite, a partir de las proyecciones de evolución de la línea de costa, establecer la condición de contorno para modelar las proyecciones de inundación. A continuación, se detalla la aplicación de la metodología a la zona de estudio seleccionada y se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, se proporcionan recomendaciones para simplificar algunos de los elementos propuestos en la metodología y se discuten las implicaciones que tendrían sobre los resultados y su incertidumbre. Con ello se pretende facilitar la aplicación de la metodología a diferentes niveles de exigencia en la toma de decisiones poniendo de manifiesto las implicaciones que pueden suponer las simplificaciones propuestas.

1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS

La inundación costera es el resultado de la interacción de un conjunto de procesos geológicos e hidrodinámicos, con un cierto grado de interrelación entre ellos, a los que hay que agregar la intervención humana. El clima es un factor determinante en estas interrelaciones y, por tanto, obtener proyecciones fiables sobre la inundación futura es una de las bases esenciales para planificar la adaptación de la costa a los efectos derivados del cambio climático, reduciendo sus riesgos y aprovechando sus oportunidades.

Mediante la metodología aquí expuesta se pretende:

1. Dotar a los responsables de la gestión de la costa de diversas metodologías para evaluar el riesgo de inundación y erosión combinado derivado del cambio climático, considerando su incertidumbre.
2. Facilitar la incorporación de estrategias de adaptación flexible a la gestión de la costa española.
3. Analizar, evaluar y priorizar diferentes medidas de adaptación a lo largo de la costa española que sean eficaces y coste-eficientes.
4. Promocionar la integración de herramientas avanzadas de modelado para conseguir una más eficiente toma de decisiones y un mejor uso de los recursos disponibles.
5. Identificar qué aspectos será necesario desarrollar en el corto y medio plazo para mejorar las capacidades disponibles para gestionar la costa ante un marco de incertidumbre.

Para ello, la metodología propuesta pretende responder a cuestiones tales como:

- Para un escenario de emisiones y horizonte temporal determinado, ¿cuál será la extensión de la inundación costera teniendo en cuenta los cambios en la línea de costa?, ¿y la cota de la lámina de agua sobre el terreno asociada a esa inundación?, ¿cómo puede afectar ese cambio al Dominio Público Marítimo Terrestre y a los riesgos sobre la población, activos y actividad en la costa?
- ¿Cuáles son las estrategias de adaptación posibles ante diferentes escenarios y cuál sería la respuesta de la costa en caso de ser implementadas?
- ¿Cuáles son las incertidumbres asociadas a las evaluaciones anteriores y cómo es posible integrarlas en la toma de decisiones?
- Otras

2. REVISIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES

El estudio conjunto de la inundación y erosión se ha llevado a cabo en numerosos estudios forenses de temporales en escalas locales a regionales. No obstante, existen muy pocos estudios en los que se haya modelado, de forma acoplada, la inundación y la erosión en la escala temporal del cambio climático. Fundamentalmente esto se debe a que inundación y erosión son fenómenos complejos que, además, ocurren a diversas escalas temporales.

En la escala local, existen diversos modelos numéricos concebidos para el análisis conjunto de la erosión y la inundación a corto plazo. De entre ellos, destacan XBeach, (Roelvink et al., 2009) o MIKE 21 (Warren & Bach, 1992). McCall et al. (2010) modelaron con XBeach el retroceso de la línea de costa y el rebase en la isla de Santa Rosa (Florida) durante el huracán Ivan en 2004. Recientemente, Gharagozlou et al. (2020) extendieron a escala regional el análisis realizado por McCall et al. (2010), modelando la respuesta hidrodinámica y morfodinámica de los márgenes exteriores de la costa de Carolina del Norte durante el huracán Isabel en 2003. Grases et al., (2020), también con XBeach, realizaron un análisis extremal de eventos de erosión presentes y futuros en un tramo costero del delta del Ebro. Las dinámicas futuras se generaron por emulación sintética, asumiendo estacionario el clima futuro entre 2050 y 2100. La mayoría de estos estudios se corresponden con análisis de eventos ya ocurridos en escalas espacio-temporales reducidas. Generalmente, disponen de la topo-batimetría anterior y posterior al evento y la extensión de la zona inundada, por lo que se limitan a verificar la bondad de los resultados del modelo. El de Grases et al. (2020) es el único estudio en el que se emplea este tipo de modelado para predecir la respuesta de un tramo costero frente a escenarios futuros. Sin embargo, no queda clara la obtención del clima marítimo extreme futuro y, lo que es más importante, no consideran los cambios a largo plazo en la topo-batimetría activa.

Por otro lado, existen muy pocos estudios en la literatura en los que se modele la inundación considerando los cambios a largo plazo en la línea de costa motivados por las condiciones medias. Stripling et al. (2017) propusieron un modelo de evolución de una línea combinado con otro modelo que hace evolucionar perfiles topográficos. Consiguieron así una topografía actualizada sobre la que modelar la inundación con un modelo hidráulico. La metodología se aplicó con éxito en la costa oeste de Calabria (Italia), considerando rellenos hipotéticos y aumentos de la carga sedimentaria del río adyacente. Otro ejemplo es la metodología desarrollada en el marco del proyecto CoSMoS por el centro de investigación americano USGS para evaluar la respuesta futura de la costa californiana frente al cambio climático. Para ello, desarrollaron un modelo de evolución de la línea de costa (Vitousek et al., 2017) y otro de retrocesos de acantilados (Limber et al., 2018), que a su vez alimentan un modelo de traslación del perfil (Erikson et al., 2017) para calcular mapas de inundación y determinar el riesgo asociado.

De la revisión del estado del arte del modelado conjunto de la inundación y la erosión, se pone de manifiesto la dificultad de modelar conjuntamente la interacción estos dos procesos a las diferentes escalas temporales a las que se producen. Así, el primer conjunto de referencias aquí citadas trata sobre el modelado de eventos extremos, a corto plazo, de eventos de inundación y de erosión. En estos estudios no se tienen en cuenta los cambios crónicos morfológicos, bien porque el estudio se centra en únicamente eventos del pasado (McCall et al., 2010; Gharagozlou et al., 2020) o bien porque directamente se desprecia por simplicidad en el análisis (Grases et al., 2020). Además, sólo dos de los estudios revisados consideran las variaciones morfológicas a largo plazo en el cálculo de la inundación costera. De entre ellos, sólo en el proyecto CoSMoS se calcula las proyecciones de impactos debidas al cambio climático. Pese a la innovación y el valor añadido del trabajo, el muestreo de la incertidumbre es muy limitado tanto por las dinámicas usadas (proyecciones asociadas a un único modelo climático regional, o RCM, de sus siglas en inglés) como en su tratamiento estadístico (los extremos se calculan directamente de la serie de proyecciones).

En este trabajo se desarrolla una metodología para la elaboración de proyecciones de inundación que aúna, por primera vez en la literatura, los siguientes elementos: a) proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológicas considerando 5 RCMs; b) el tratamiento estadístico de las dinámicas en indefinidas para determinar todas las combinaciones de oleaje y nivel del mar extremos que podrían provocar inundación en la costa considerando su variabilidad y dependencia espacial; c) la regionalización híbrida de las dinámicas a costa; d) la incorporación de los cambios morfodinámicos a medio y largo plazo; e) el cálculo hidrodinámico de la contribución del oleaje a la cota de inundación (CI); y f) el modelado hidráulico de la inundación costera. Además, la metodología es aplicable a escala regional

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para poder acoplar las metodologías de análisis de inundación y erosión, descritas en las Subtareas 1.2 y 1.3 del presente informe, respectivamente, se han desarrollado un conjunto de métodos y herramientas que intentan cubrir ese vacío en el estado del conocimiento.

La metodología que proponemos consta de tres bloques. El primer bloque consiste en el perfilado de la costa para poder aplicar el modelo de traslación de perfil. Para ello, sobre la base de los perfiles empleados en el modelado de la erosión (Subtarea 1.3), se generan nuevos perfiles con un menor espaciado entre ellos. Sobre estos nuevos perfiles se delimita la zona activa, extendida desde la profundidad de cierre hasta la berma. El segundo bloque consiste en la actualización de la topobatimetría. Para ello, se calcula una topobatimetría media, es decir, sin considerar variaciones de corto plazo en la línea de costa. Esto requiere la extracción de la contribución del transporte longitudinal y del ANMM a la posición de la línea de costa en el periodo futuro objetivo. El modelo de traslación de perfil asocia a cada proceso su cinemática representativa y aplica esa transformación a la zona activa. Una vez transformados los perfiles, se realiza una interpolación espacial para obtener la topobatimetría media modificada. El tercer bloque se centra en el tratamiento de las dinámicas para obtener la CI actualizada. Debido a que los cambios en la topobatimetría sólo afectan a la parte activa del perfil, es suficiente con rehacer el modelado hidrodinámico de la contribución del oleaje a la CI y el cálculo nuevamente de la CI. Para ello, se emplea la selección de los eventos extremos multivariados de oleaje y nivel del mar emulados sintéticamente y propagados a costa en la metodología de inundación (Subtarea 1.2). Una vez reconstruida la CI asociada a cada evento sintético, se ajusta una función de extremos para obtener las CIs asociadas a diferentes periodos de retorno. Estas CIs son significativas porque contienen toda la estadística del emulador multivariado. Con estos datos se ha alimentado el modelo de inundación, que es muy dependiente de la topografía y considera la rugosidad del terreno. De acuerdo con lo descrito en la Subtarea 1.2, como resultado, se obtienen mapas de inundación para diferentes combinaciones de escenarios, modelos climáticos y trayectorias de evolución de ANMM. Si bien el número de escenarios, modelos climáticos, percentiles de ANMM puede ser cualquiera, aunque en este trabajo, como se verá más adelante, se han considerado 2 RCPs, 5 RCMs y 3 percentiles de la distribución de ANMM. Para más detalle sobre el uso e interpretación de los resultados, ir a la Tabla 1 del apartado 4 de este informe. Todo este proceso se describe en la Figura 1.

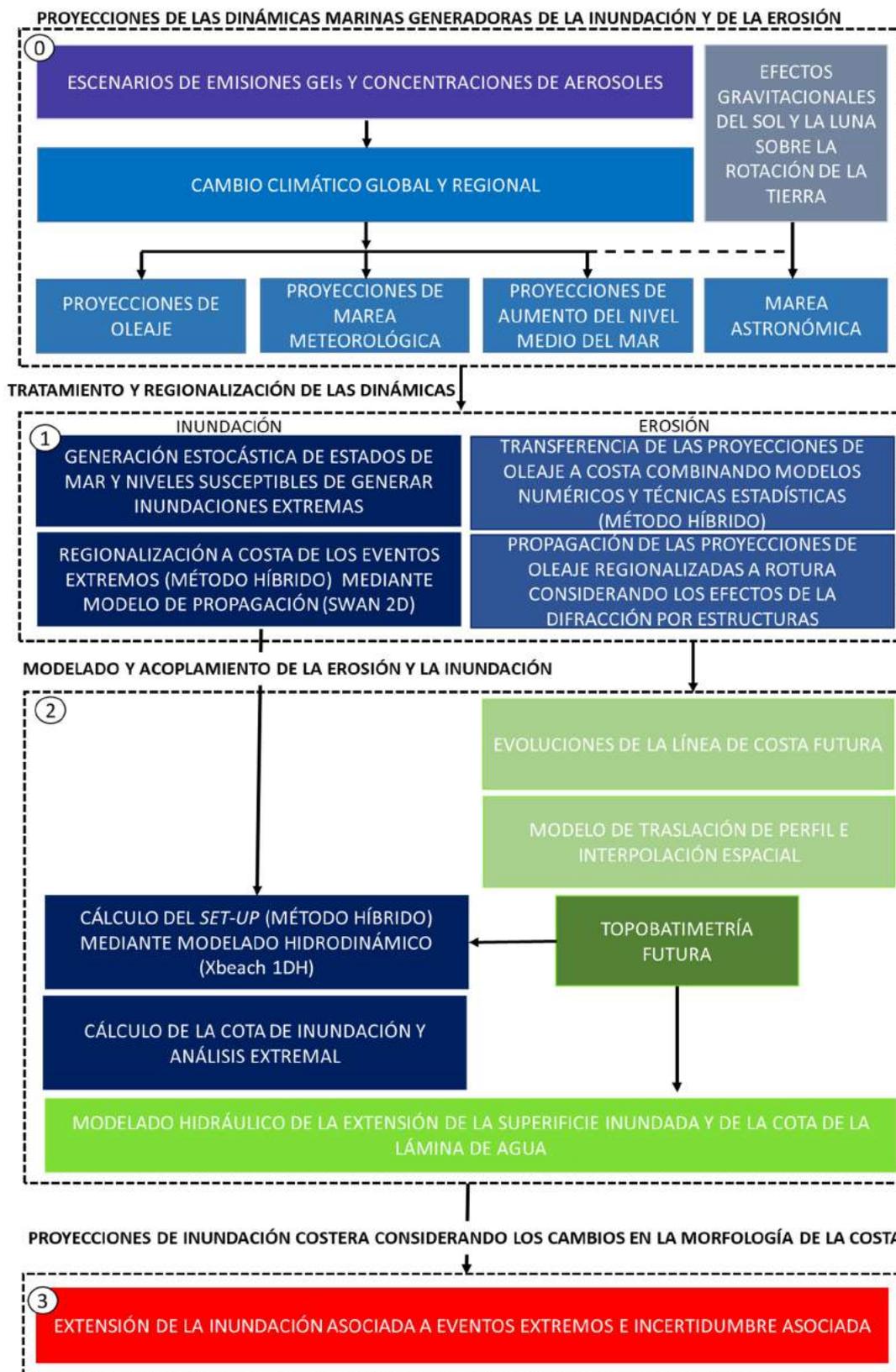


Figura 1. Metodología propuesta para el cálculo de proyecciones de inundación considerando la erosión costera.

La Figura 2 relaciona el conjunto de datos de partida necesarios para desarrollar las proyecciones de inundación y erosión combinadas (dinámicas marinas, datos topo-batimétricos, usos del suelo, tamaño del sedimento, temporalidad de las estructuras y observaciones de la línea de costa), las etapas de la metodología en las que intervienen (perfilado de la costa, obtención de las topo-batimetrías que incorporan proyecciones de erosión y tratamiento de las dinámicas) y los resultados, parciales y finales, que se derivan de las mismas (mapas de extensión de la inundación y cota de la lámina de agua). En la figura se indican los datos de entrada necesarios para ejecutar el modelo de erosión con el que se extraerá la condición de contorno para el modelado de la inundación (descritos en la Subtarea 1.3). Las metodologías para determinar los impactos del cambio climático sobre la erosión y la inundación de la costa se destacan en verde, y en línea discontinua representa el acoplamiento entre ambas. Este acoplamiento se realiza en varias etapas. Para el perfilado de la zona de estudio y la obtención de nuevas topo-batimetrías los datos iniciales necesarios son la topo-batimetría original y los cambios estructurales en la línea de costa obtenidos de la Subtarea 1.3. El modelo de translación de perfil proporciona los nuevos perfiles que incorporan la cinemática asociada a los cambios estructurales de la línea de costa y, a través de una interpolación de esos perfiles, se obtienen nuevas topo-batimetrías asociadas a los escenarios considerados. El tratamiento de las dinámicas, el cálculo de la CI y su ajuste a una función de extremos se realizará análogamente a lo descrito en la Subtarea 1.2 pero empleando las nuevas topo-batimetrías. Finalmente, estas topo-batimetrías y las CIs correspondientes a los escenarios considerados, además de la información espacial de los usos del suelo, constituyen la condición de contorno del modelo hidráulico con el que se obtienen los mapas de inundación.

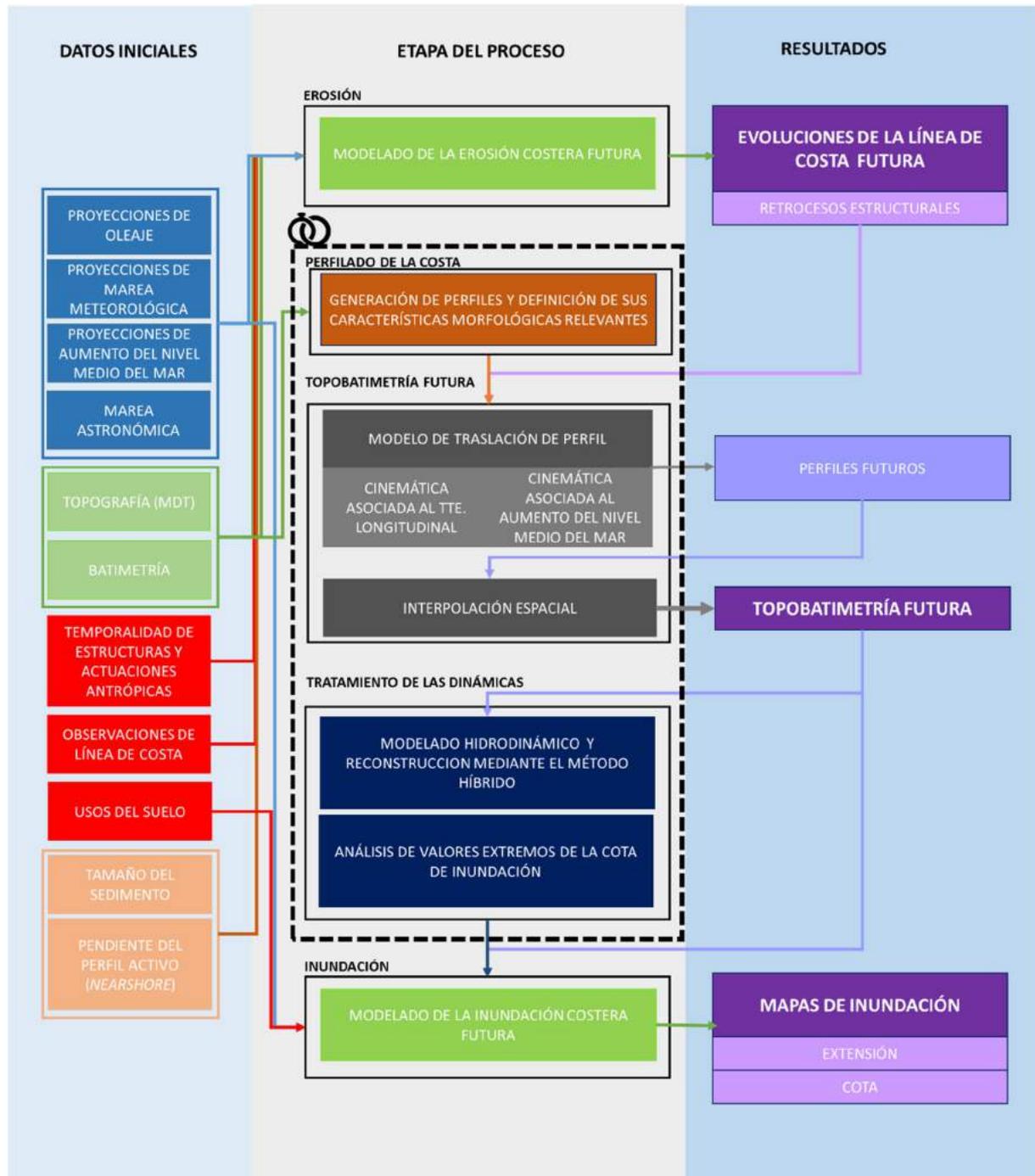


Figura 2. Diagrama de flujo de entradas y resultados de cada etapa de cálculo de las proyecciones de inundación considerando la erosión costera

3.1. Perfilado de la costa

Para calcular la topobatimetría futura a partir de los resultados del modelo de erosión, es necesario discretizar la costa con perfiles. Los perfiles deben estar espaciados una distancia suficientemente reducida, que permita la posterior generación de un MDT a una resolución adecuada para poder ejecutar el modelo de inundación. Para ello, los perfiles base, empleados en las metodologías de erosión para definir la línea de costa y de inundación para la ejecución del modelo hidrodinámico, se emplean como referencia para la generación de un perfilado a mayor resolución.

El perfil de base i se definen por la normal a una directriz (línea de costa presente) \vec{n}_i , un espaciamiento e_i , la distancia a tierra dT_i (1000 m) y la distancia hacia el mar dM_i (hasta la batimétrica -10 m), tal y como se muestra en la Figura 3.

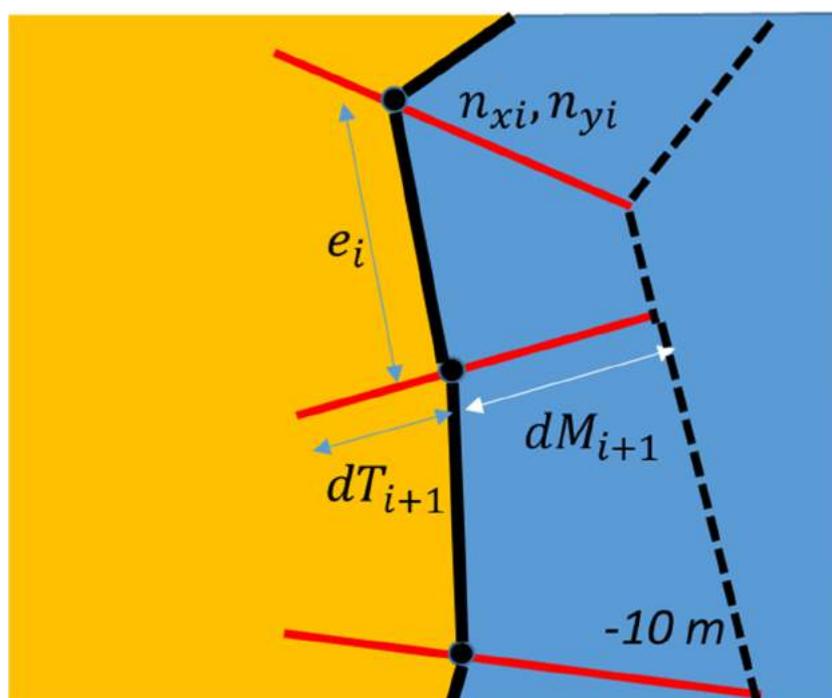


Figura 3. Parametrización de los perfiles de base.

Los perfiles de base tienen un espaciamiento medio del orden de 200 metros, incompatible con la resolución necesaria para poder generar un MDT actualizado mediante interpolación. Teniendo en cuenta que el MDT de base tiene una resolución de 5 m, un espaciamiento óptimo de los perfiles sería igual o inferior a ese valor. Sin embargo, el coste computacional del proceso es elevado, siendo un espaciamiento de 20 metros una solución de compromiso. De acuerdo a ello, la generación de nuevos perfiles se realiza teniendo como referencia los perfiles de base, pero disminuyendo su espaciamiento.

Para ello, el número de perfiles de alta resolución (AR) n_i^{AR} , entre los perfiles de base $i, i + 1$ es :

$$n_i^{AR} = \text{techo}(e_i / e_i^{AR}) \quad (1)$$

Dónde la función techo redondea al entero superior, e_i^{AR} es el espaciamiento de alta resolución $e_i, > e_i^{AR}$, que se impone al tramo $i, i + 1$.

La normal de los n_i^{AR} perfiles AR se calcula mediante interpolación lineal, ponderando la distancia entre los perfiles $i, i + 1$.

$$n_{xi,j}^{AR} = n_{xi} + \frac{n_{xi+1} - n_{xi}}{e_i} e_i^{AR} j, \quad j \in [1, 2, \dots, n_i^{AR}] \quad (2)$$

$$n_{yi,j}^{AR} = n_{yi} + \frac{n_{yi+1} - n_{yi}}{e_i} e_i^{AR} j, \quad j \in [1, 2, \dots, n_i^{AR}]$$

Por otro lado, la extensión hacia tierra puede reducirse para así ahorrar coste de cómputo. Sin embargo, la distancia deber ser tal que, al menos, el perfil emergido contenga la berma de la playa. Por otro lado, la distancia hacia el mar no tiene porqué alcanzar la batimetría -10 m, y es suficiente con que llegue a la profundidad de cierre empleada en el modelado de la erosión (Figura 4).

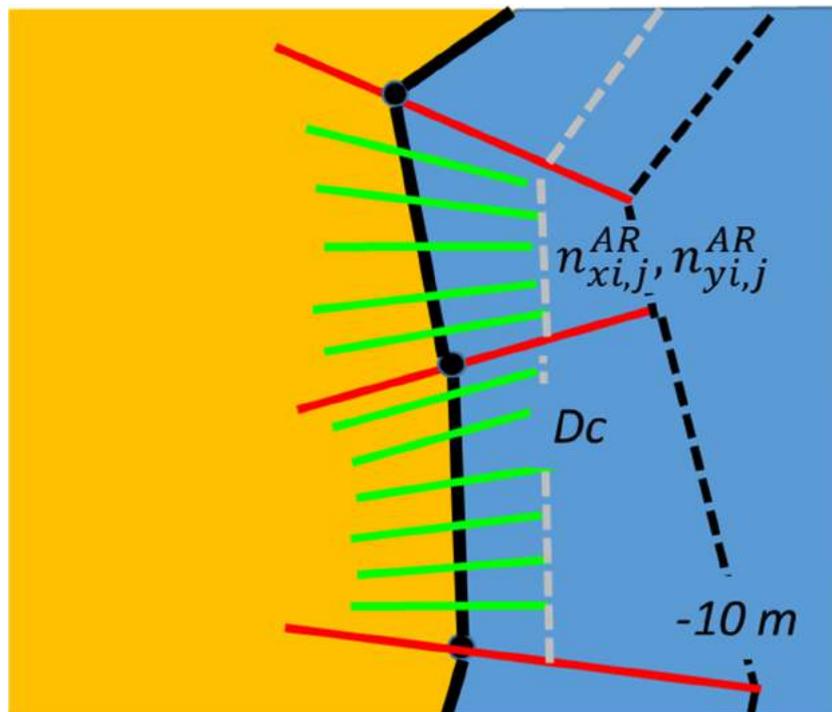


Figura 4. Aumento de resolución de los perfiles de base.

Mediante herramientas GIS, los perfiles de alta resolución se discretizan, a su vez, en puntos espaciados cada 5 metros para así obtener una nube plana. A continuación, la proyección de esa nube de puntos sobre la topobatemetría presente en coordenadas proyectadas, se almacena en una base de datos que tiene los siguientes campos:

- Identificador del punto.
- Coordenadas xyz del punto.
- Identificador del perfil.

3.2. Obtención de la topobatimetría futura

La obtención de la topobatimetría futura implica un aumento de la dimensión de los resultados obtenidos en el modelado de la erosión, que se traduce en el paso de una línea plana en el espacio (línea de costa) a una superficie espacial (topobatimetría). Para ello, es necesario considerar las hipótesis de base de los diferentes procesos que se modelan para evaluar la línea de costa futura. Los retrocesos asociados a procesos longitudinales, según la formulación de los modelos de una línea, llevan asociados una cinemática del perfil activo que se caracteriza, únicamente, por la traslación horizontal. Por otro lado, los procesos transversales, según la formulación de (Miller & Dean, 2004) e incluyendo el efecto del aumento del nivel medio del mar (ANMM) según (Toimil et al., 2017), asumen que el perfil se reacomoda, ante cambios de niveles, según un movimiento de traslación vertical y horizontal. La cinemática de los procesos transversales del modelo coincide con la regla de Bruun, (Bruun, 1962), puesto que comparten las mismas hipótesis de base.

Debido a que la consideración de los cambios a corto plazo en la topobatimetría futura implica un coste computacional elevado, se ha optado por generar una topobatimetría media en los años-escenario objetivo: en 2050 considerando el cambio en la línea de costa correspondiente al valor medio para los RCP4.5 y RCP8.5; y en 2100 teniendo en cuenta los cambios asociados a los RCP4.5 y RCP8.5 de forma independiente. Para ello, se han considerado únicamente retrocesos debidos a procesos litorales a largo plazo (transporte longitudinal y ANMM) promedio de los 5 RCMs en el año objetivo $R_{long}(año)$, $R_{ANMM}(año)$, sólo diferenciando entre los 2 RCPs a fin de siglo. El ANMM se ha separado de la serie de cambios en la línea de costa mediante una media móvil de 5 años de ventana, resultando una serie de erosión-acreción debida a procesos transversales.

Los retrocesos $R_{long}(año)$ y $R_{ANMM}(año)$ se obtienen en los perfiles de base del modelo de erosión. Por ello, el cálculo de estos parámetros en los perfiles de alta resolución se hace interpolando linealmente a partir de los perfiles i de base:

$$R_{ANMMi,j}^{AR} = R_{ANMMi,j} + \frac{R_{ANMMi+1,j} - R_{ANMMi,j}}{e_i} e_i^{ARj}, \quad j \in [1, 2, \dots, n_i^{AR}] \quad (3)$$

$$R_{longi,j}^{AR} = R_{longi,j} + \frac{R_{longi+1,j} - R_{longi,j}}{e_i} e_i^{ARj}, \quad j \in [1, 2, \dots, n_i^{AR}]$$

Para poder aplicar el modelo de traslación, es necesario identificar los puntos de cada uno de los perfiles y aplicar una rotación para orientar el eje x de coordenadas según la directriz de cada perfil. A continuación, el modelo de traslación transforma los puntos de los perfiles de alta resolución de acuerdo con la cinemática descrita en la Figura 5. El retroceso o avance de la línea de costa debido a procesos longitudinales $R_{long}(año)$ genera una traslación horizontal del perfil activo. Por otro lado, el ANMM induce una traslación vertical equivalente V_{ANMM} y un retroceso R_{ANMM} , que según la regla de Bruun es $R_{ANMM} = V_{ANMM} / \tan\beta_n$, donde $\tan\beta_n$ es la pendiente del perfil activo.

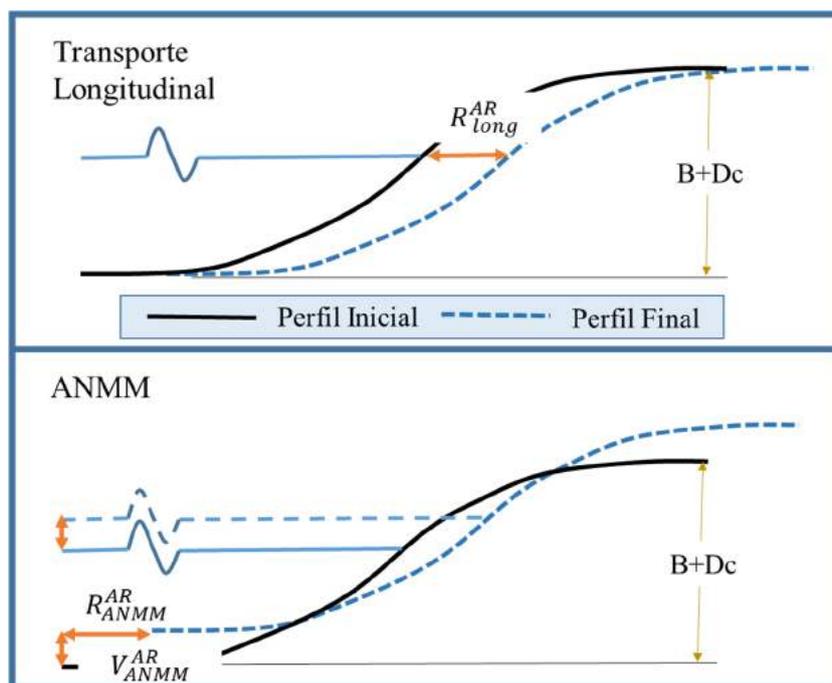


Figura 5. Cinemática del perfil asociada al transporte longitudinal y al aumento del nivel medio del mar (ANMM).

Una vez que el modelo de traslación modifica el perfil, se aplica una transformación geométrica inversa para devolver los puntos del perfil al sistema de referencia global (Figura 6).

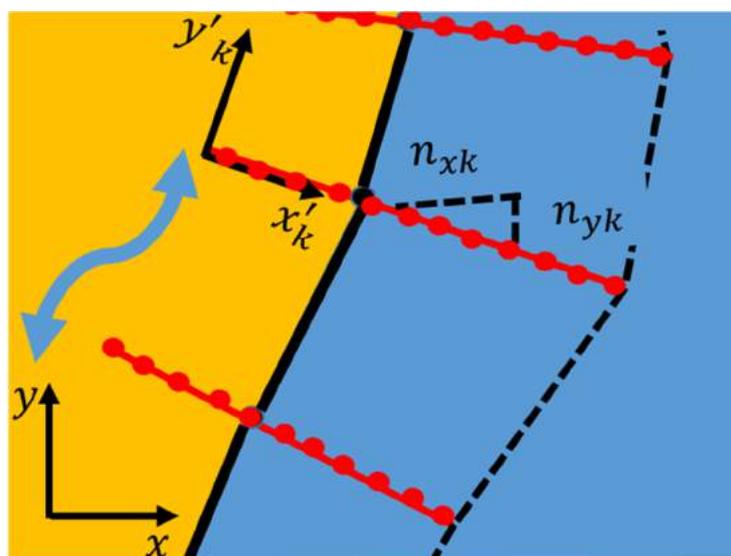


Figura 6. Esquema del paso del sistema de coordenadas global al local del perfil.

Tras generar las nubes de puntos correspondientes a los escenarios futuros, se genera un *ráster* o superficie de la zona activa actualizada mediante una interpolación espacial empleando la técnica de distancia inversa ponderada (herramienta *IDW* en ArcGIS). Finalmente, se realiza una fusión de la superficie creada y la topobatemetría presente, teniendo en cuenta que en las zonas en las que se produzcan solapes, será la superficie creada la que prevalecerá. La herramienta *Mosaic to New Raster* de ArcGIS permite hacer esta operación.

3.3. Tratamiento de las dinámicas y modelado de la inundación

Dado que la metodología contempla el modelado hidrodinámico de contribución del oleaje a la CI, la actualización de la topobatimetría activa, implica la re-ejecución del cálculo hidrodinámico de los 500 casos seleccionados con el modelo XBeach. La propagación de la selección con el modelo SWAN no es necesaria, puesto que el resultado del proceso (las dinámicas en la batimétrica -10 m) no se ven afectados por los cambios en la morfología.

Tras la ejecución de los 500 casos seleccionados en los perfiles de base, es necesario reconstruir, mediante interpolación multivariada empleando funciones de base radial, el set-up asociado a los eventos sintéticos emulados. Posteriormente, la suma lineal de las diferentes componentes ($ANMM + MM + AT + set - up$) da lugar a la CI de cada realización sintética. El análisis extremal conduce a la obtención de las cotas de inundación asociadas a los periodos de retorno de cálculo con las que forzar el modelo hidráulico de propagación de la inundación en tierra. Para ello, se ha ajustado una función generalizada de extremos (*GEV* por sus siglas en inglés) a cada una de las 1000 series de 100 años de CI mensual.

3.4. Resultados potenciales

De la aplicación de la metodología propuesta, pueden obtenerse diferentes resultados con los que dar respuesta al conjunto de cuestiones que han motivado este estudio. En primer lugar, el empleo de un modelo de traslación de perfil acoplado al modelo de evolución de la línea de costa permite actualizar la topo-batimetría de la zona de estudio considerando los cambios litorales a largo plazo motivados por las dinámicas marinas proyectadas. Utilizando esa nueva topo-batimetría pueden obtenerse las CIs asociadas a diferentes periodos de retorno actualizadas, a lo largo de toda la costa y de forma probabilística, para las combinaciones de RCM, RCP y trayectoria de ANMM consideradas. Con las CIs calculadas y las topo-batimetría futuras, pueden obtenerse mediante modelado hidráulico los mapas de inundación que dan información sobre la extensión de la superficie inundada y la cota de la lámina de agua. Los resultados incorporan la incertidumbre asociada a dos RCPs, cinco RCMs y tres trayectorias de ANMM correspondientes a tres percentiles de la distribución de ANMM.

La obtención y análisis de las proyecciones de inundación costera permiten conocer el efecto combinado de la inundación y la erosión futuras sobre el Dominio Público Marítimo Terrestre y sentar las bases de estudios posteriores de riesgos y adaptación en la acosta.

La Tabla 1 muestra un resumen de los diferentes resultados que pueden derivarse de la aplicación de la metodología propuesta y de su proceso de obtención.

Resultado	Proceso de obtención
<i>Topo-batimetría activa futura incorporando cambios en la línea de costa</i>	Se calcula mediante la aplicación del modelo de traslación de perfil forzado con los resultados del modelo de evolución de la línea de costa.
<i>Cotas de inundación de diferentes periodos de retorno para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los años objetivo, considerando cambios en la topo-batimetría activa</i>	Se obtienen mediante un ajuste de los máximos anuales de las de series de cota de inundación a una función generalizada de extremos. Estas series son las 1000 series sintéticas de 100 años de eventos extremos de oleaje y nivel del mar obtenidos a partir de las series de proyecciones dinámicas de oleaje y nivel del mar para los diferentes RCMs y RCPs combinadas con trayectorias de ANMM para esos mismos escenarios.
<i>Mapas de inundación (extensión y cota de la lámina de agua) asociados a cotas de inundación de diferentes periodos de retorno para cada combinación de RCM, RCP y trayectoria de ANMM y para los años objetivo, incorporando el efecto de los cambios en la línea de costa</i>	Se obtienen forzando un modelo hidráulico con hidrogramas generados a partir de las cotas de inundación calculadas y la duración característica de las tormentas de la zona. Para ello, se emplea la topo-batimetría futura, actualizada con los resultados del modelo de evolución de la línea de costa.

Tabla 1. Resumen de los resultados potenciales de la aplicación de la metodología.

4. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN

La metodología para modelar las proyecciones de inundación desarrollada se ha aplicado en un tramo de costa de aproximadamente 40 kilómetros situado en el litoral Mediterráneo español. En concreto, la zona piloto se encuentra entre los puertos de Castellón y Sagunto constituyendo una unidad de gestión litoral.

A lo largo de esta sección, se detallan los datos necesarios para la realización de los diferentes pasos de la metodología. Finalmente, se proporciona un resumen de los resultados obtenidos.

4.1. Perfilado de la costa

A partir de los perfiles de base, empleados en las metodologías de erosión y de inundación, se calculan perfiles de alta resolución. El aumento de resolución en la discretización espacial, permite pasar de 256 perfiles de base a 2199 perfiles de alta resolución. Los perfiles de alta resolución tienen un espaciamiento máximo de 20 metros entre ellos, son normales a la línea de costa, se extienden hacia tierra, al menos, hasta la berma y hacia el mar hasta superar la profundidad de cierre. En la Figura 7 se muestra el conjunto de perfiles de base empleados en las metodologías de erosión y de inundación así como los perfiles de alta resolución en la zona de estudio.

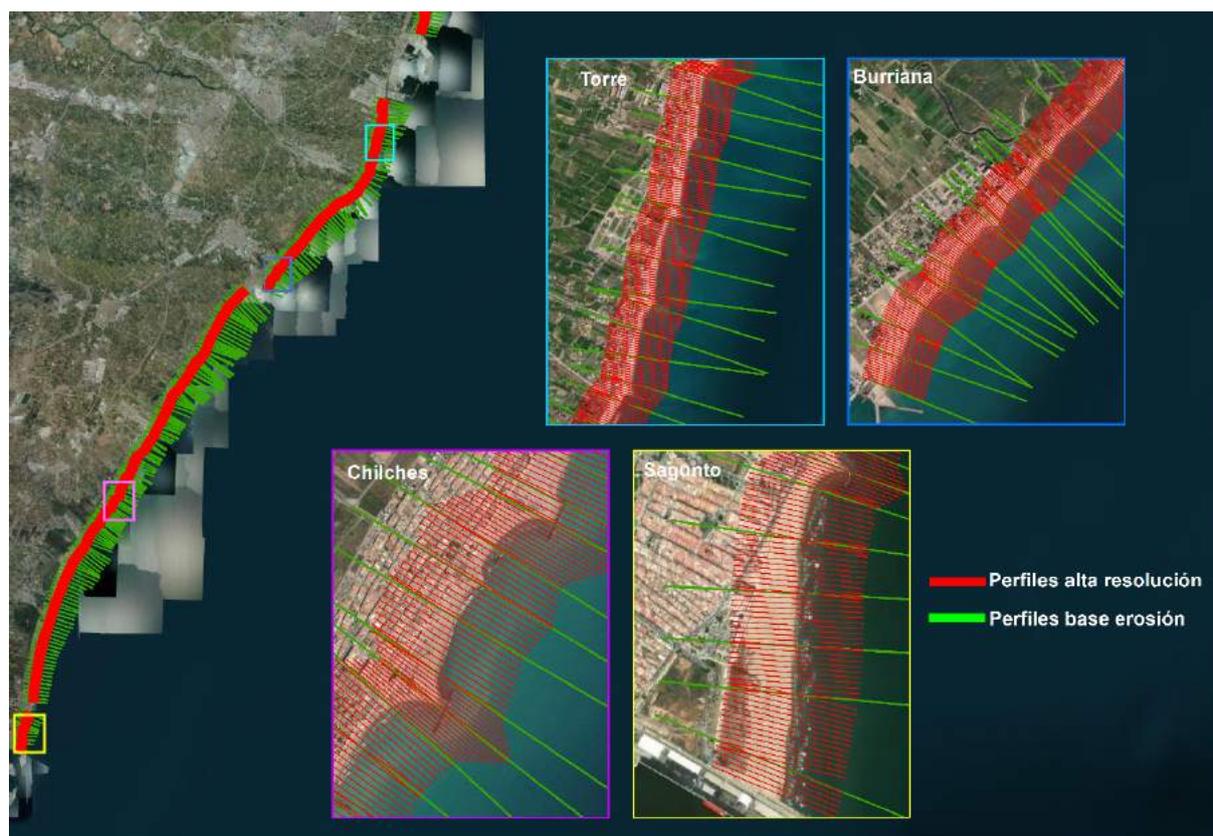


Figura 7. Perfilado de la costa en la zona de estudio.

4.2. Obtención de la topobatimetría futura

La actualización de la topobatimetría requiere el cálculo de los retrocesos medios asociados a procesos longitudinales y ANMM en los años objetivo para cada una de las combinaciones de modelos, escenarios y trayectoria de ANMM. En todo rigor, se deberían generar 30 topo-batimetrías futuras para cada año objetivo, lo que daría lugar a un coste computacional excesivo. Por otro lado, la ganancia en cuanto al modelado del impacto es discutible, debido a la resolución de la nube de puntos con la que se interpola la topobatimetría en comparación con los valores (reducidos) de la CI. Atendiendo a ello y al rango de variaciones de los retrocesos futuros, se han calculado tres topo-batimetrías, 2050 RCP medio, 2100 RCP4.5 y 2100 RCP8.5.

Mediante herramientas GIS, los perfiles de alta resolución se discretizan, a su vez, cada 5 metros. De este modo, se genera una nube de puntos de 20 metros de resolución en el sentido longitudinal a la costa y 5 metros en el sentido normal a la costa. A continuación, tras la transformación del sistema de coordenadas del global al local de cada transecto, se aplica el modelo de traslación de perfil. El modelo de traslación del perfil aplica, a la parte activa, cinemática asociada al transporte longitudinal y al ANMM (Figura 8a). En la Figura 8b se muestra la evolución de la parte emergida del perfil 45, en la que se ha actualizado el perfil inicial según los desplazamientos horizontales y verticales detallados en el panel derecho de la imagen. Se pone de manifiesto que el modelado de la inundación teniendo en cuenta la erosión, no tiene por qué dar lugar a mayores extensiones de la mancha de inundación. En el perfil de la figura, si la CI es inferior a 0.95 metros, la inundación calculada sobre la topobatimetría presente dará lugar una menor extensión inundada que en la morfología del futuro. Recíprocamente, si la CI es superior a 0.95 metros, la extensión de la inundación en la topobatimetría presente será bien superior que en las topo-batimetrías del futuro.

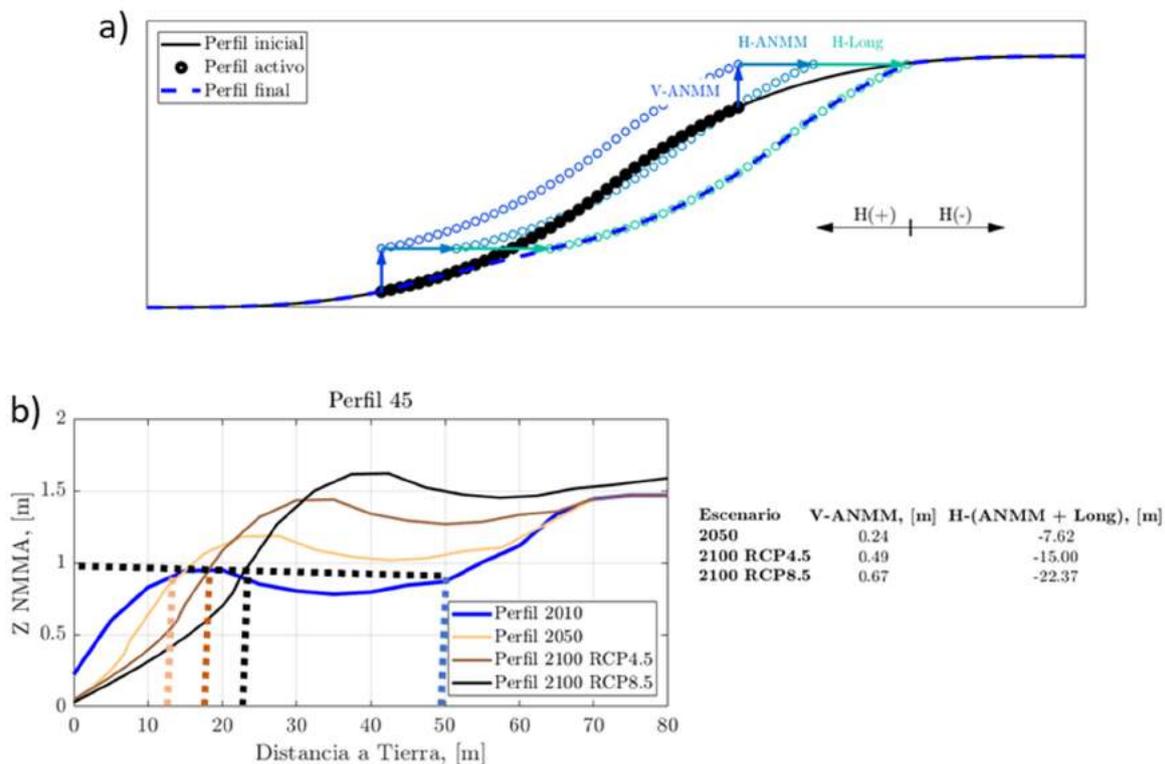


Figura 8. Aplicación del modelo de traslación del perfil. En el panel superior se muestra un esquema de la cinemática asociada a los diferentes procesos. En el panel inferior se muestra la actualización de un perfil para las tres

Tras la aplicación del modelo de traslación en los 2199 perfiles, el siguiente paso consiste en generar las nubes de puntos actualizadas mediante el cambio del sistema de coordenadas, del local del perfil al global. Cada nube de puntos da lugar a una superficie actualizada de la zona activa del perfil, que después se combina con la topobatemetría base del presente. En la Figura 9 se muestra el modelo digital del terreno emergido presente. El resultado de la aplicación del modelo de traslación del perfil se muestra en las figuras 10, 11 y 12, que muestran respectivamente el terreno emergido en el año 2050, para el promedio de los cambios en la línea de costa asociados a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 considerando todos los RCMs y el percentil 50 del ANMM, y en el año 2100, para los cambios en la línea de costa asociados a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 de forma independiente, considerando en cada caso el promedio de todos los RCMs y el percentil 50 del ANMM.

Del examen de la topografía futura resultante, dónde se propagará la inundación mediante modelado hidráulico, se aprecian los patrones dictados por el modelo de evolución de la línea de costa. Resulta interesante comparar la Figura 10 del presente con la Figura 11 del 2050 escenario RCP 4.5 en las zonas con campos de espigones, en concreto, en las playas de Torre, Nules y Moncófar. En ellas se aprecia la reorientación de la playa entre espigones siguiendo la dirección del flujo medio de energía (noreste). Este efecto se acentúa en el largo plazo (año 2100 escenarios RCP4.5 y RCP8.5) en las figuras 11 y 12. En rasgos generales, el efecto de hacer evolucionar la morfología a partir de la evolución de la línea de costa, trae como resultado un retroceso general claramente apreciable debido al ANMM y una reorientación de las playas encajadas entre espigones.

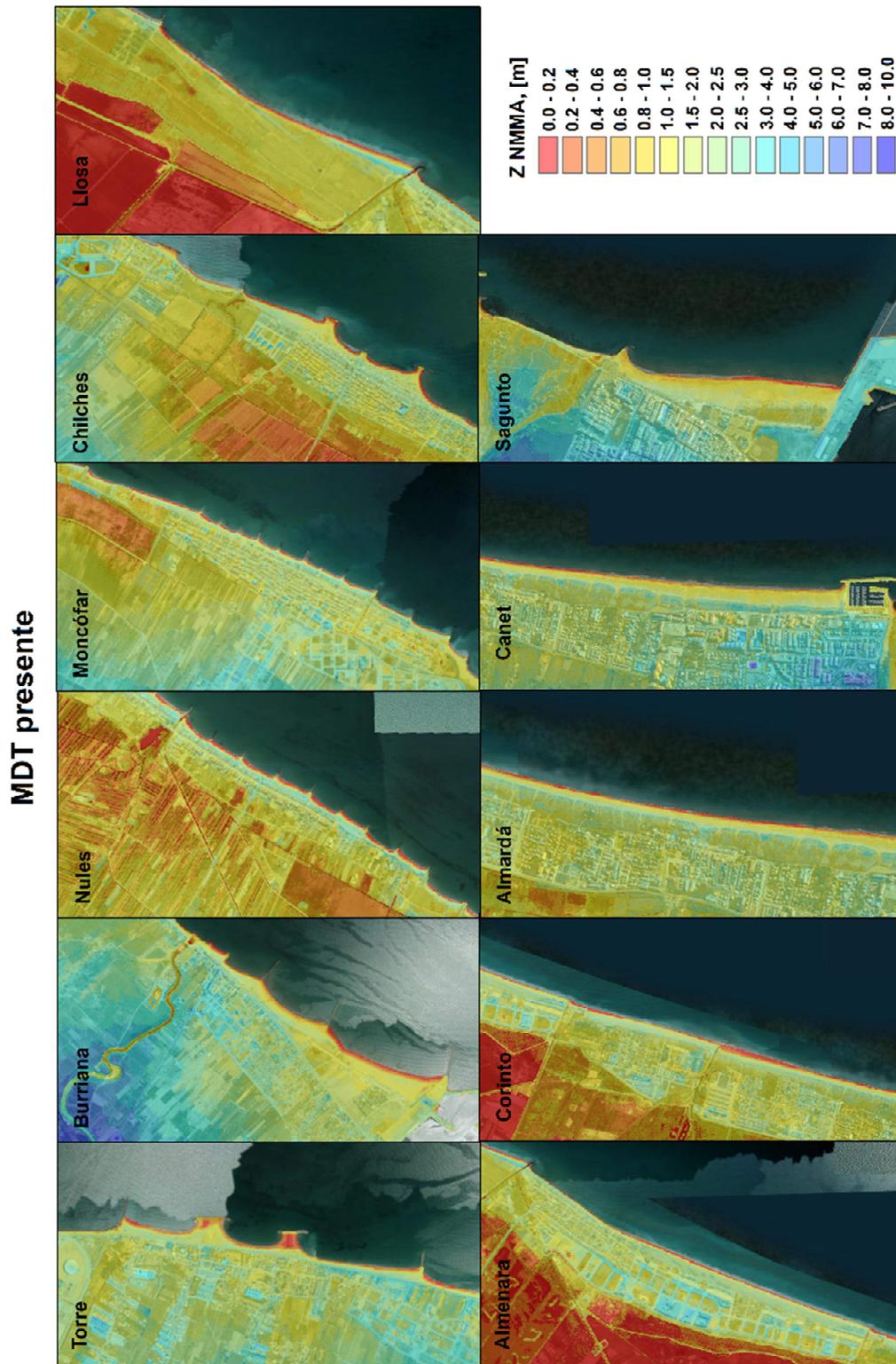


Figura 9. Modelo digital del terreno emergido presente.

MDT 2050 promedio RCP4.5 y RCP8.5

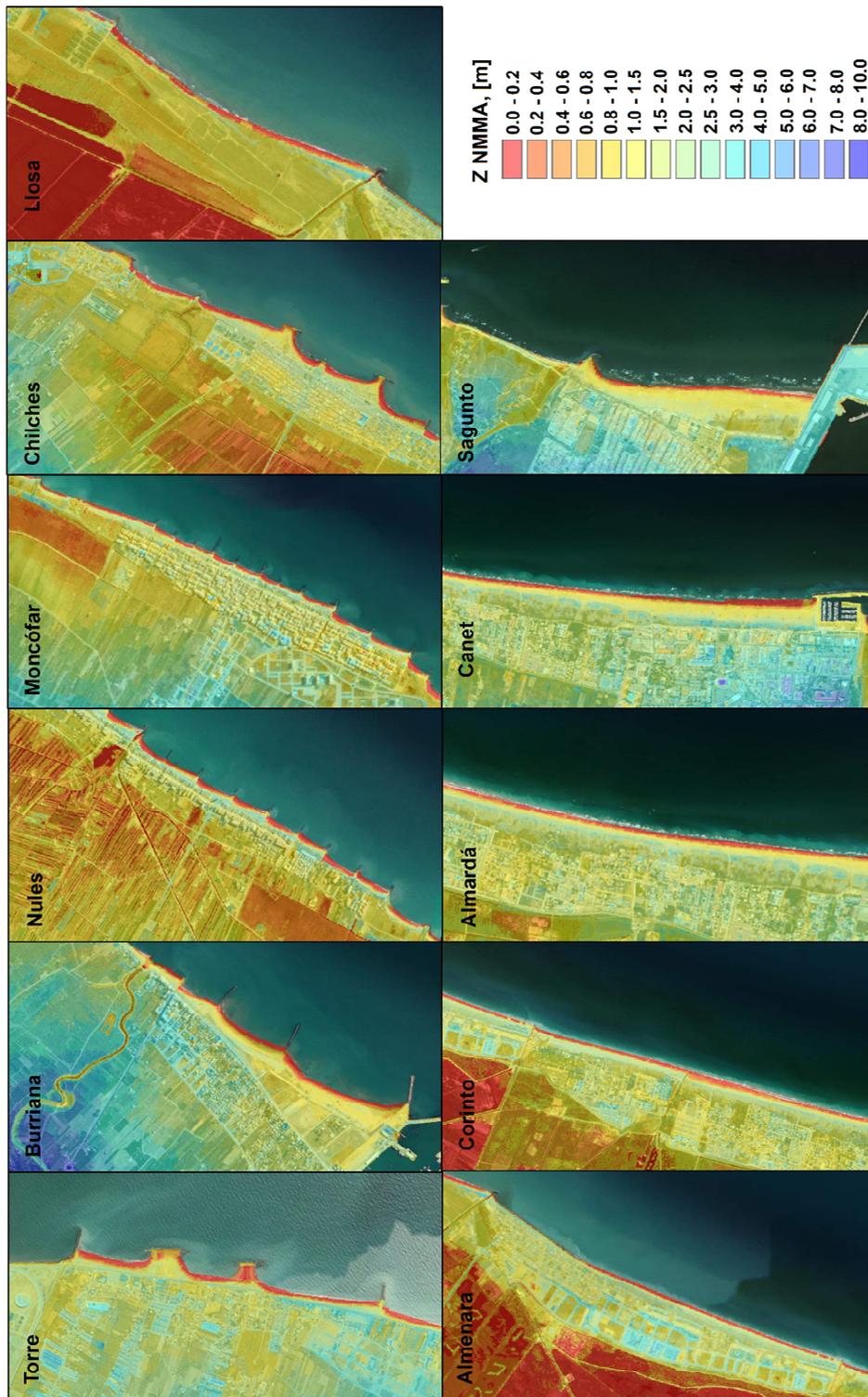


Figura 10. Modelo digital del terreno emergido para el promedio de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el año 2050.

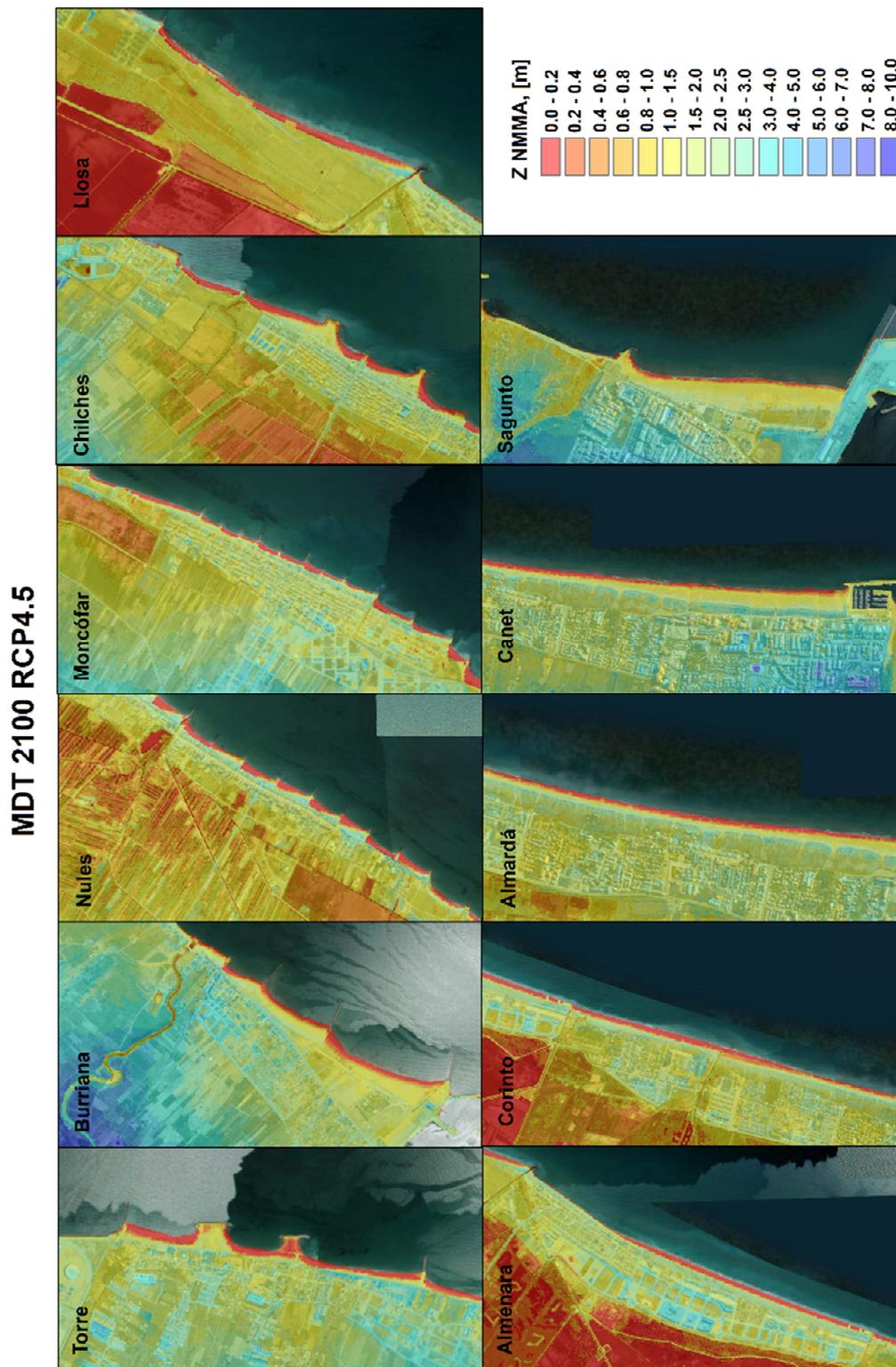


Figura 11. Modelo digital del terreno emergido para el escenario RCP4.5 en el año 2100.

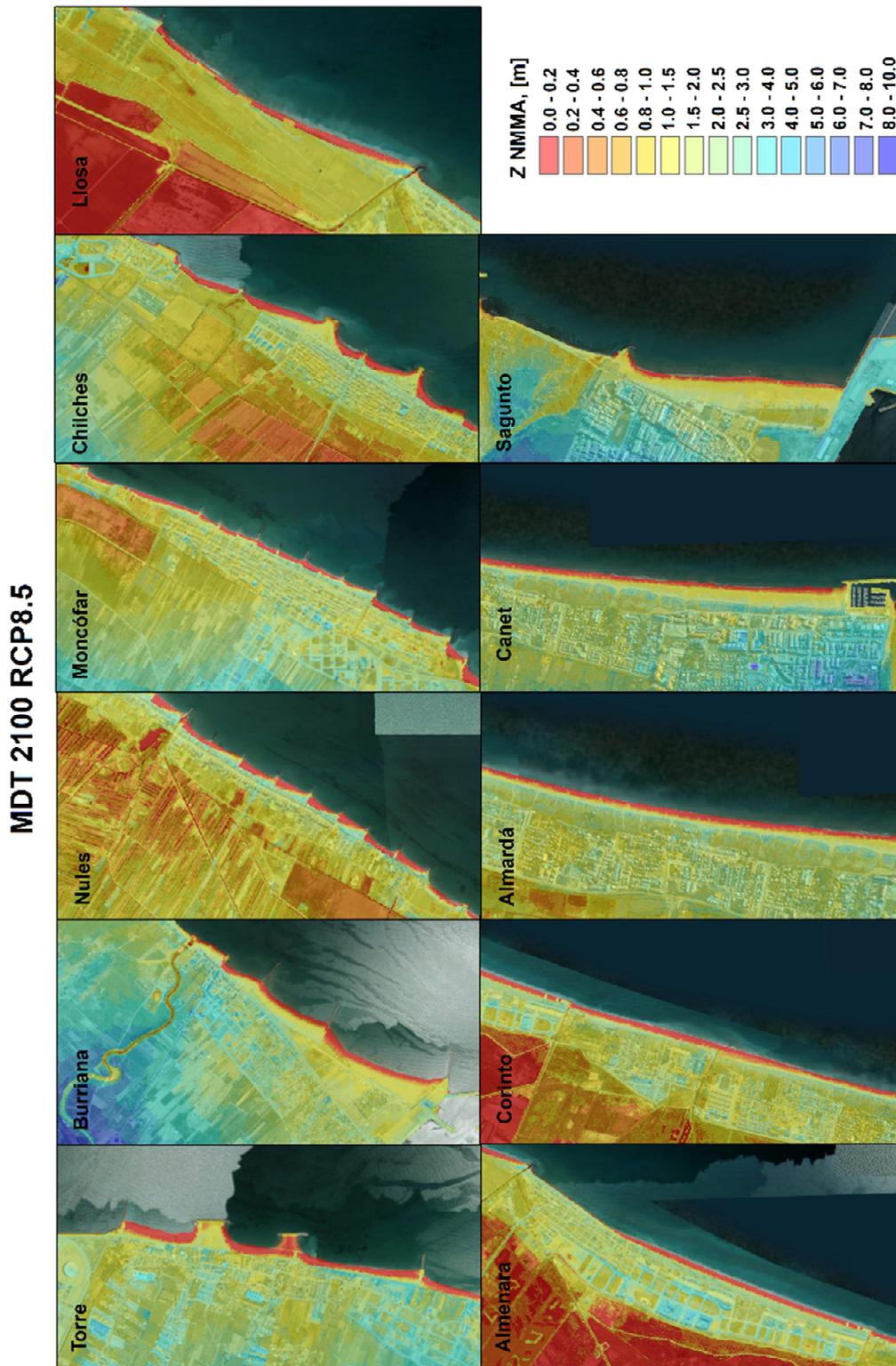


Figura 12. Modelo digital del terreno emergido para el escenario RCP8.5 en el año 2100.

En la Figura 13 se muestra la comparación entre el MDT presente y los escenarios futuros (2050 RCP medio y 2100 RCP 8.5) en algunas playas. En la playa de Burriana, se aprecia un retroceso generalizado motivado por el ANMM y un giro antihorario de la zona de playa entre espigones, se aprecia sobre todo en el compartimento justo al norte del puerto. En Nules y Chiches, los diferentes compartimentos arenosos entre espigones giran en sentido antihorario, para así lograr alcanzar el equilibrio estático en el transporte longitudinal. La superficie de playa perdida de forma permanente con respecto al presente debida al retroceso estructural de la línea de costa se ha representado en la Figura 14 con un sombreado en las playas de Chilches y Corinto. Es importante tener en cuenta que estos análisis no consideran la implementación de medidas de adaptación.

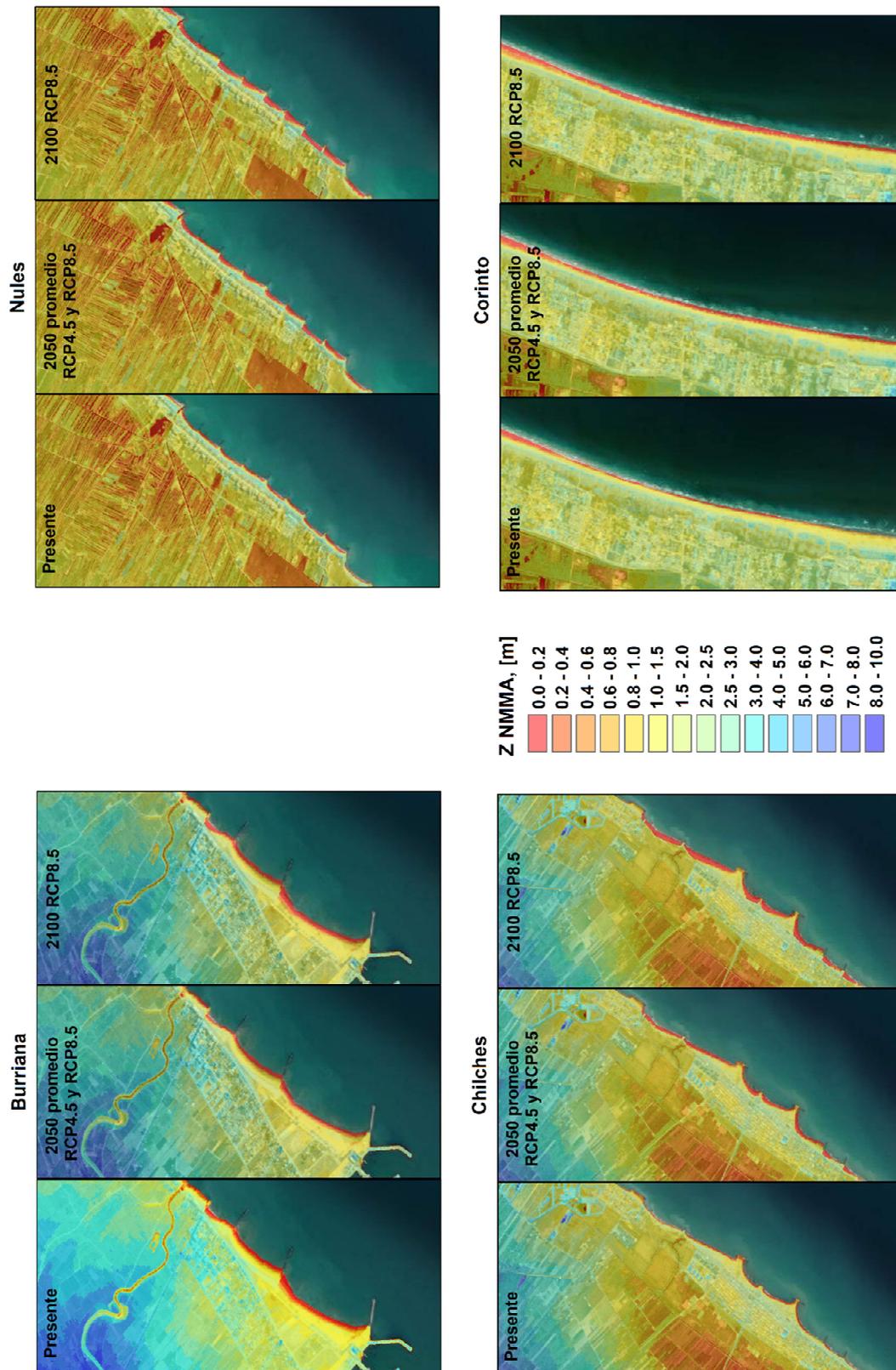


Figura 13. Comparación de la evolución del modelo digital del terreno emergido en diferentes playas.

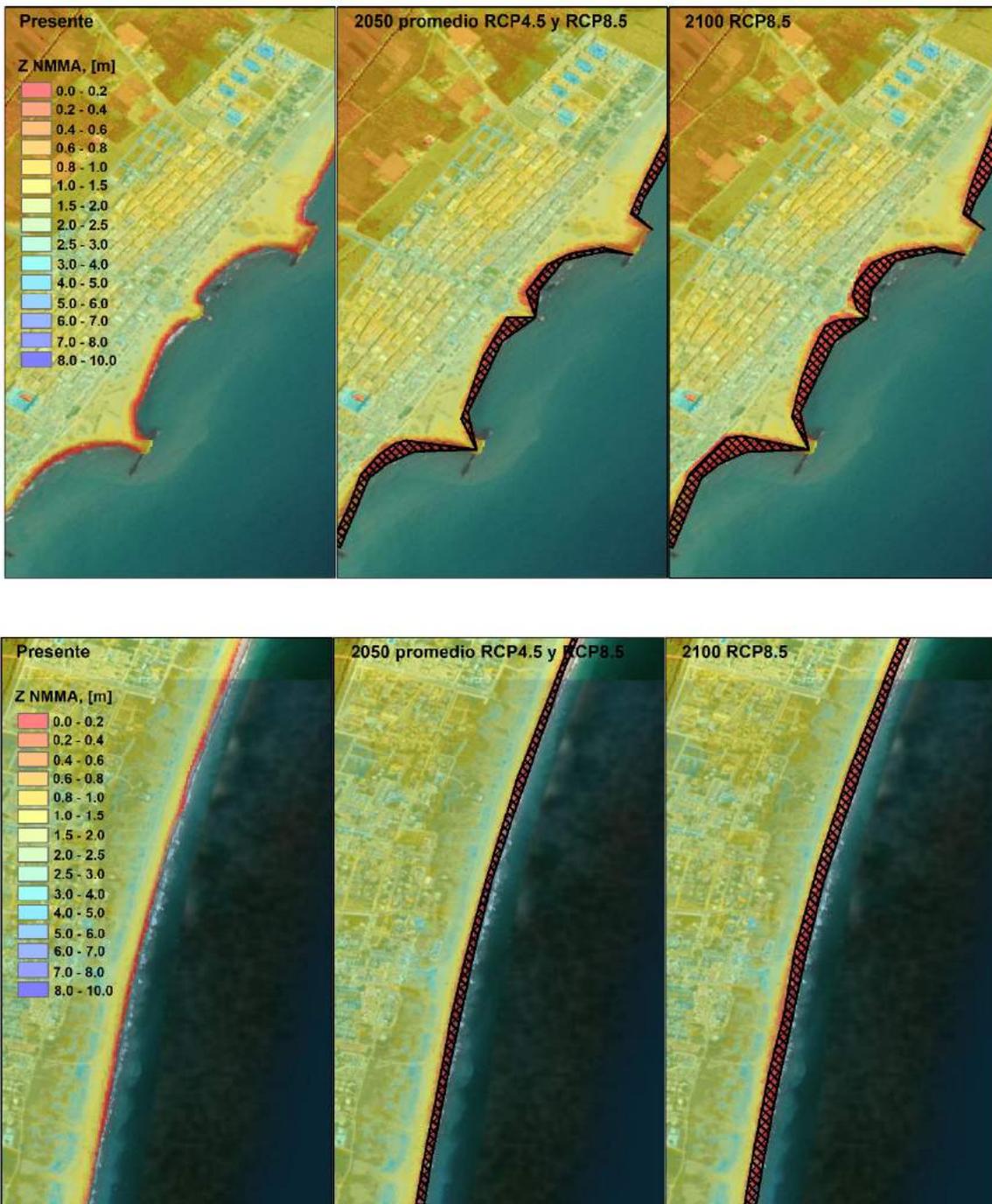


Figura 14. Detalle de la comparación de la evolución del modelo digital del terreno emergido en las playas de Chilches y Corinto. El sombreado representa la superficie de playa erosionada de forma permanente con respecto al presente.

4.3. Tratamiento de las dinámicas y modelado de la inundación

La contribución del oleaje a la CI depende de las interacciones entre la hidrodinámica y la morfología del terreno. Debido a que los cambios se producen en la topobatimetría activa, los resultados de la propagación a la batimétrica -10 metros no sufren modificaciones. Sin embargo, se deben actualizar los valores del *set-up* calculado a partir del modelo XBeach ejecutado en perfiles. Para ello, es necesario volver a ejecutar los 500 casos en los 256 perfiles de base, obtenidos en cada una de las tres topobatimetrías futuras. El coste computacional es elevado, pues requiere la ejecución de 384000 simulaciones (500 casos seleccionados x 256 perfiles x 3 topo-batimetrías) de estados de mar extremos de una hora.

En la Figura 15, se muestra los resultados de una simulación hidrodinámica en un perfil. El panel superior representa la envolvente del grupo de ondas en color azul oscuro sobre la onda larga asociada, que se propaga sobre el nivel del mar en reposo (en azul cian). En el panel inferior se muestra la serie de remotes infragravitatorios. Del análisis de los resultados se aprecia que el resultado de XBeach se encuentra acotado por la formulaciones de Stockdon et al. (2006) y Guza & Thornton (1981).

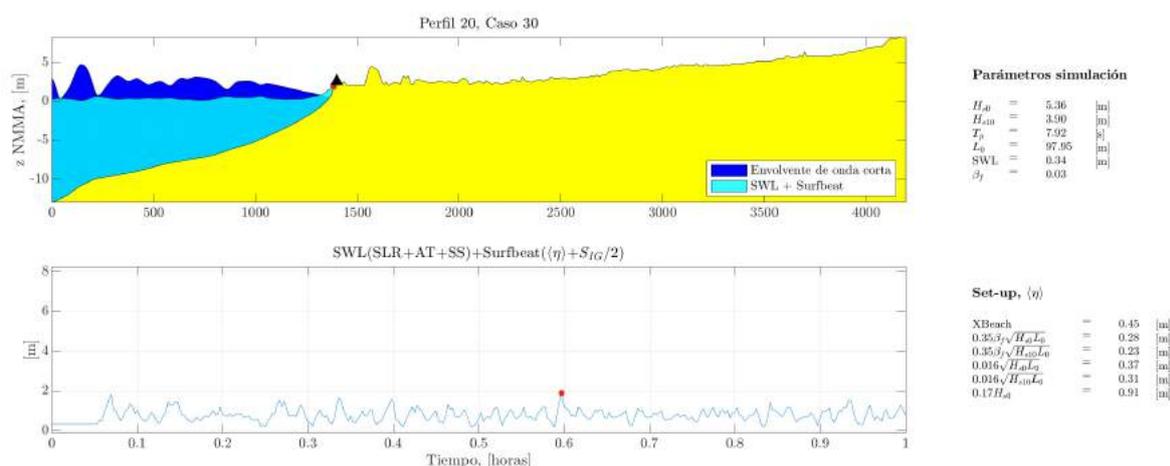


Figura 15. Simulación XBeach de uno de los temporales sintéticos en el perfil 20. En el panel superior se muestra el momento en el que se produce el máximo remonte. En el panel inferior se representa la serie de remotes infragravitatorios o surfbeat.

Una vez se han ejecutado los casos con XBeach, se ha reconstruido el set-up asociado a las 1000 series de 100 años de eventos sintéticos generadas para cada RCM, RCP y periodo de tiempo. Con esta información se ha obtenido la CI por superposición lineal de sus componentes, tal y como se ha explicado en la Subtarea 1.2. Mediante el ajuste de una función de extremos a esas series de tormentas se han obtenido las CI de 100 y 500 años de periodo de retorno. A partir de esos valores de CI extremos, se construyen hidrogramas representativos de tormentas en la zona de estudio con los que forzar el modelo de inundación. La simulación de la inundación costera, de forma análoga a lo descrito en la Subtarea 1.2, se ha realizado mediante el modelo hidráulico RFSM-EDA.

4.4. Resultados

En la Figura 16 se muestra la envolvente de modelos de la extensión de la zona inundada asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno en las principales playas de la zona de estudio en el año 2050 para el escenario RCP4.5. Como se puede ver, la diferencia entre percentiles de ANMM es insignificante en este periodo. La Figura 17 representa lo mismo pero para el año 2100 y el escenario RCP8.5. En este caso sí se aprecia claramente la influencia de las distintas trayectorias de ANMM en la inundación final. Del análisis de envolventes de inundación, se pone de manifiesto que las mayores superficies inundadas se producen en las playas de Burriana, Canet y Sagunto. Sin embargo, estas playas están en acreción atendiendo al transporte longitudinal, al estar al norte de los puertos, por lo que la exposición de la población y activos ante eventos extremos de inundación es menor. El mayor riesgo de inundación se presenta en las playas de Torre, Moncófar y Chilches, dónde la zona inundada rebasa las defensas inundando parte del núcleo urbano.

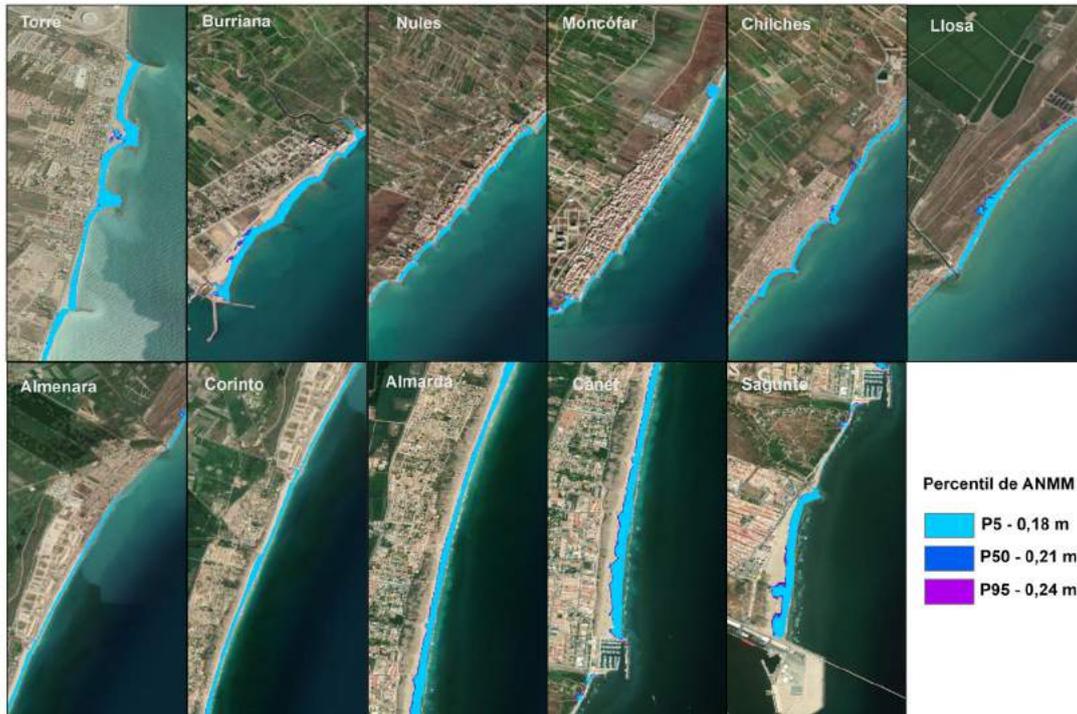


Figura 16 Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP4.5 en el año 2050, correspondientes a la envolvente de modelos en diferentes playas del tramo de estudio.

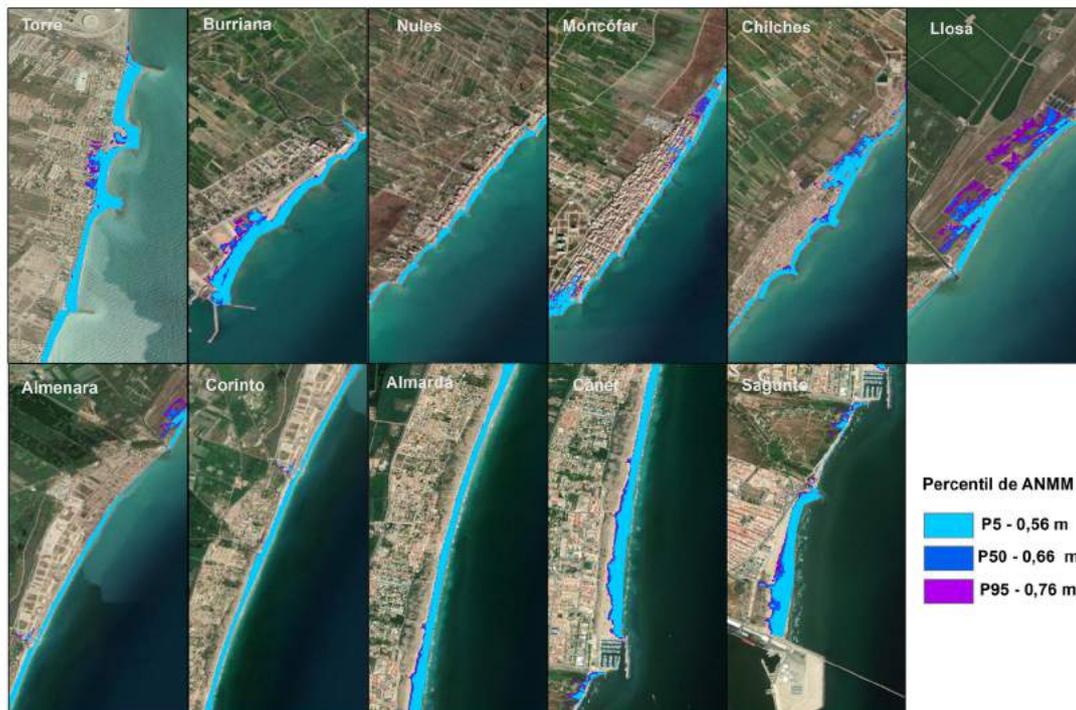


Figura 17. Mapas de inundación asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100, correspondientes a la envolvente de modelos en diferentes playas del tramo de estudio.

En la Figura 18 se muestra la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno en el año 2100, para el escenario RP8.5 y para distintos RCMs y percentiles de ANMM en las playas de Torre y Moncófar. Se pueden observar ligeras diferencias en la inundación producida por los diferentes modelos. Los modelos EART y HADG dan lugar a mayores inundaciones en las dos playas. Sin embargo, no se aprecian diferencias significativas, que pueden ser atribuibles a que la relación entre la resolución del MDT y la magnitud de los cambios en la CI entre los RCMs. Por otro lado, para esas condiciones, todos los RCMs pronostican una inundación del núcleo urbano tras la playa de Torre. Igualmente, la extensión de la zona inundada alcanza los núcleos urbanos al norte y al sur de la playa de Moncófar.

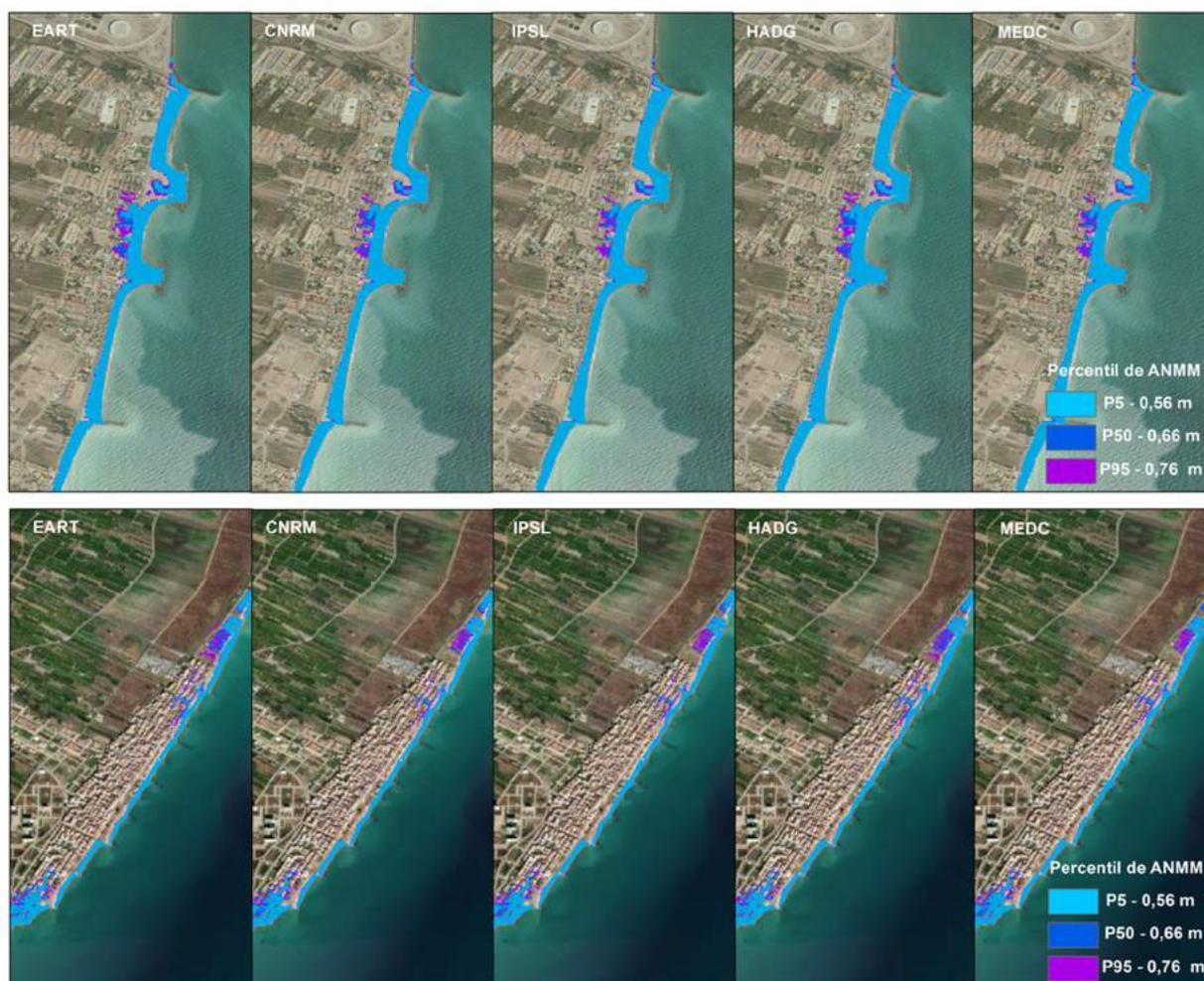


Figura 18. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 correspondientes a la envolvente de modelos en las playas de Torre (panel superior) y Moncófar (panel inferior).

En la Figura 19 representa la inundación (extensión y cota de la lámina de agua) asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 y el P95% de ANMM 2100 en las playas de Burriana, Chilches y Moncófar. La zona inundada comprende prácticamente la totalidad de la playa de Burriana, aunque no alcanza ninguna construcción. En la playa de Chilches, la inundación alcanza toda la playa inundando algunas zonas urbanas situadas en la zona norte de la playa.

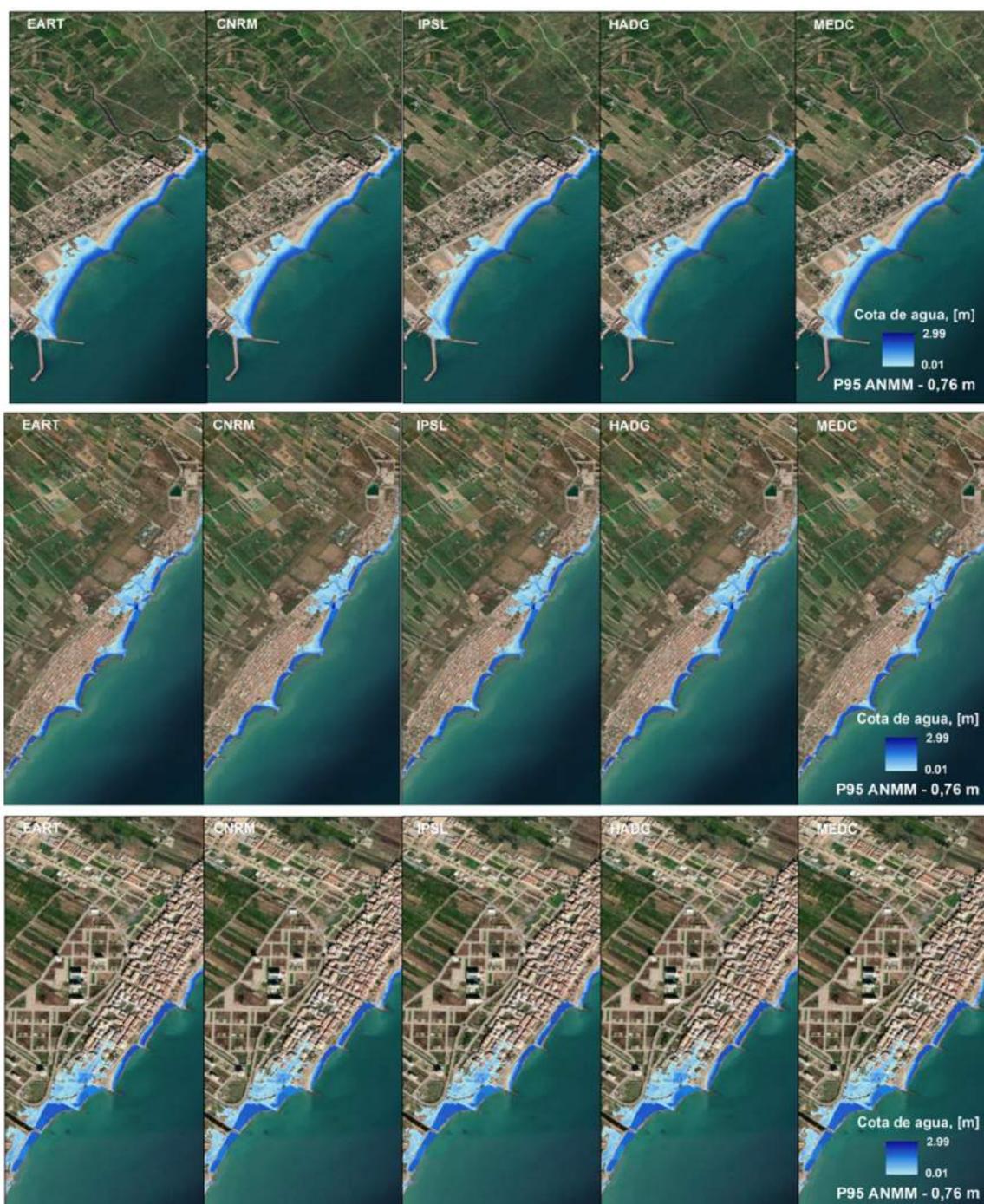


Figura 19. Mapas de inundación de detalle asociados a la CI de 100 años de periodo de retorno del modelo EART para el escenario RCP8.5 del año 2100 y P95% de ANMM (0,76 cm) en las playas de Burriana (panel superior), Chilches (panel central) y Moncófar sur (panel inferior).

La Figura 21 muestra la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno considerando el P95% de ANMM y distintos horizontes temporales. En el panel superior se muestra la envolvente de modelos, mientras que en el inferior se representan los diferentes modelos desagregados. Se aprecia el claro aumento de la extensión de la inundación futura y algunas diferencias en los modelos, sobre todo en el futuro.

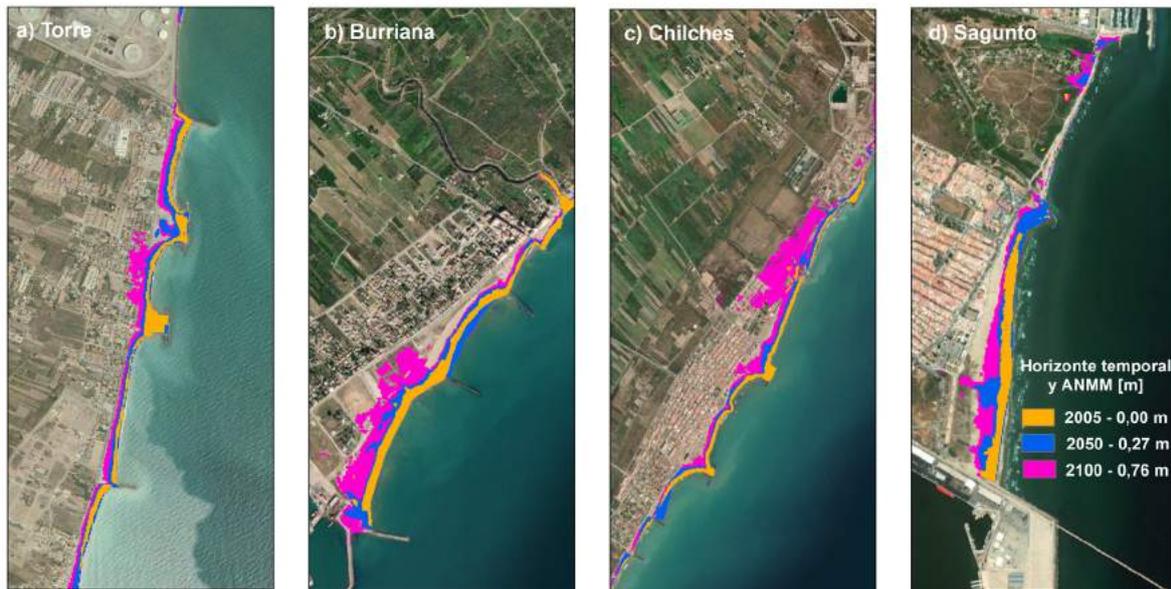


Figura 20. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno, envoltorio de los cinco RCMs para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 y P95% de ANMM.

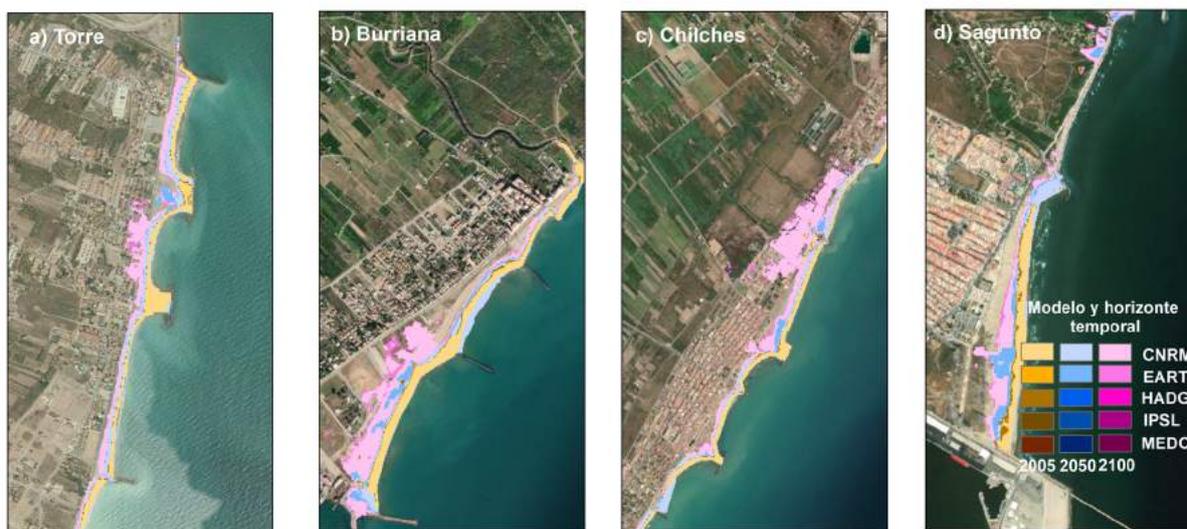


Figura 21. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno, en los diferentes RCMs para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 y P95% de ANMM.

4.5. Comparación con los resultados de la inundación empleando el MDT presente

En esta sección se muestra la comparación de resultados con y sin considerar la evolución morfológica. La Figura 22 muestra la comparación de la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno en 2050 bajo el escenario RCP8.5, propagada sobre el MDT presente y sobre el MDT futuro. Se pone de manifiesto una mayor extensión de la zona inundada al actualizar el MDT, sin embargo, no se alcanza ninguna zona urbana próxima a las playas de Torre y Moncófar. La Figura 22 muestra la extensión de la inundación de la CI de 100 años de periodo de retorno en 2100 bajo el escenario RCP8.5, propagada sobre el MDT presente y sobre el MDT futuro. En este caso se aprecian grandes diferencias en los resultados. En el caso de la playa de Torre, la actualización del MDT implica que se inunde una zona urbana amplia situada al norte. De manera similar, la inundación sobre el MDT futuro en la playa de Chilches alcanza el núcleo urbano situado al norte de la playa. En la playa de Moncófar, el alcance de la inundación sobre el MDT futuro es bien superior que sobre el MDT presente, inundando una superficie urbana considerable (ver figura 23).



Figura 22. Efecto de los cambios en la morfología de la zona costera activa en la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2050 para los percentiles del 5% (40 cm), 50% (48 cm) y 95% (55 cm).

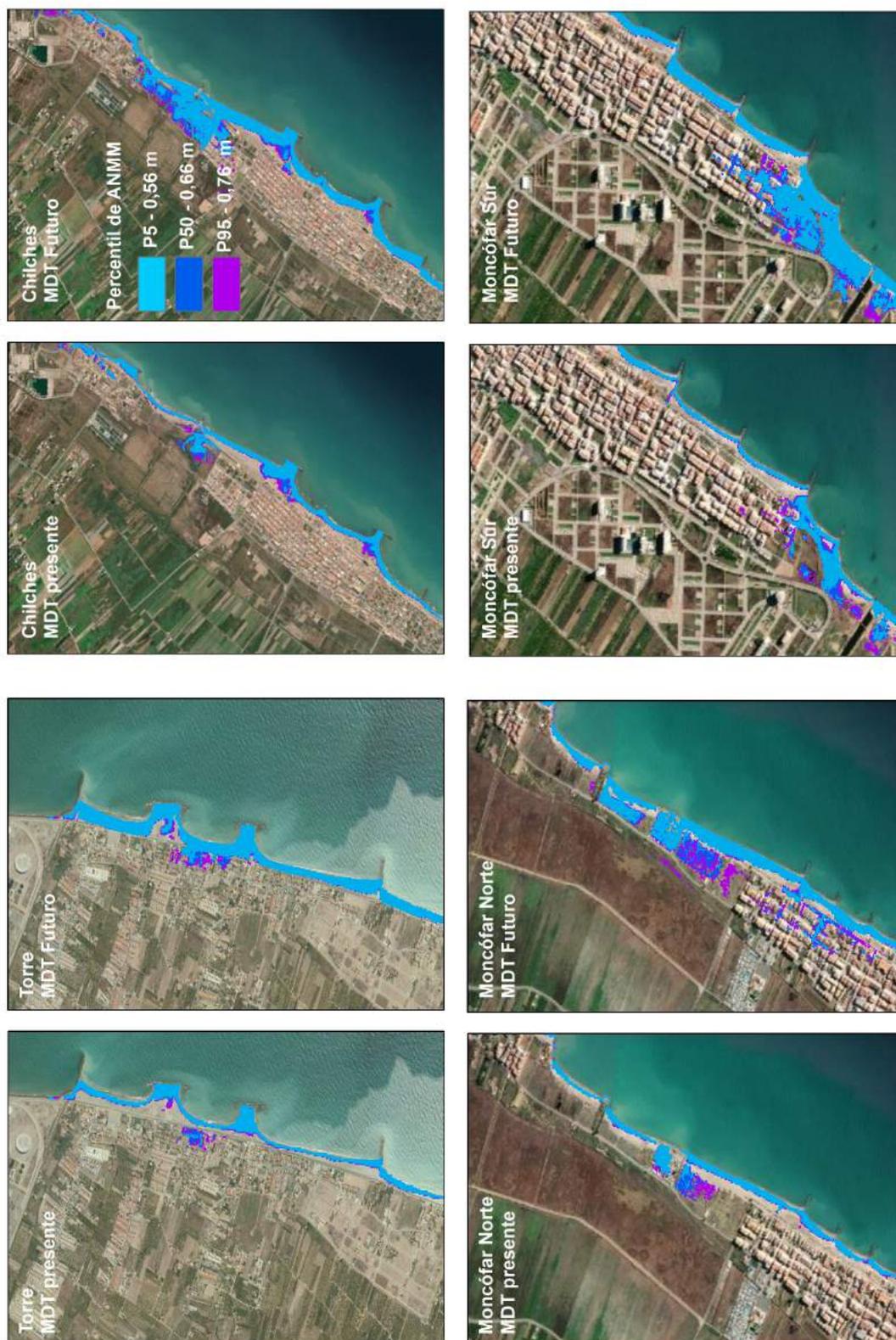


Figura 23. Efecto de los cambios en la morfología de la zona costera activa en la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 para los percentiles del 5%, 50% y 95%.

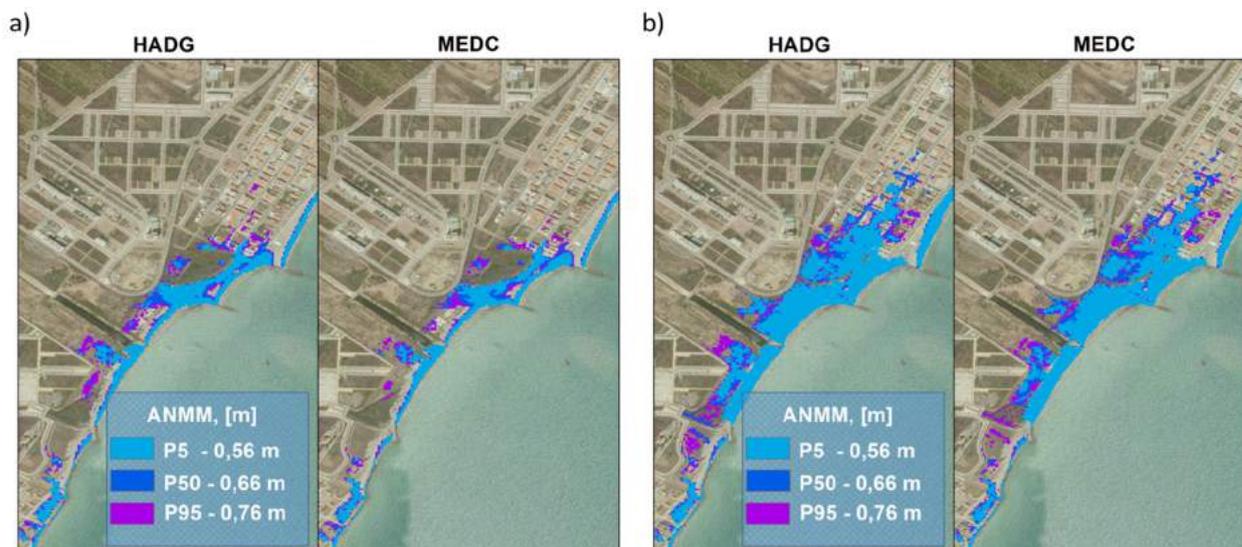


Figura 24. Detalle del efecto de los cambios de la morfología de la zona costera activa en la extensión de la inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en el año 2100 para los percentiles del 5%, 50% y 95% en la zona de Moncófar sur. En el panel a) se muestra la extensión de la zona inundada en el caso de emplear el MDT presente y en el panel b) se muestra la extensión de la inundación sobre el MDT futuro.

En la Figura 25 se muestra el alcance la zona inundada producida por la CI de 100 años de periodo de retorno para los diferentes modelos, en los horizontes temporales histórico, 2050 y 2100, y para el escenario RCP8.5. El panel superior representa la extensión inundada sin considerar cambios en el MDT, mientras que en el inferior sí se tienen en cuenta. Se pone de manifiesto el avance con el tiempo de la superficie inundada y la necesidad de incorporar los cambios morfológicos en el cálculo de la inundación.



Figura 25. Comparación del alcance de la zona inundada asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno para el escenario RCP8.5 en los años 2005, 2050 y 2100 y P95% de ANMM. En el panel superior se muestra la envolvente de modelos y en el inferior se representan los modelos desagregados.

5. CONCLUSIONES

En esta parte metodológica se propone una metodología que supone un avance importante con respecto a la literatura actual, combinando por primera vez dos metodologías novedosas en el modelado de impactos del cambio climático.

En lo que respecta a los forzamientos considerados:

- Empleo de proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica para dos escenarios de concentraciones (RCP4.5. y RCP8.5) y cinco modelos climáticos regionales (CNRM, EART, HADG, IPSL y MEDC).
- Empleo de proyecciones de ANMM para dos escenarios de concentraciones (RCP4.5. y RCP8.5) considerando tres trayectorias asociadas a los percentiles 5, 50 y 95 de la distribución de los resultados de veinte modelos climáticos.
- Reconstrucción de la marea astronómica pasada y futura mediante análisis de armónicos.
- Regionalización de las proyecciones dinámicas de oleaje mediante un método híbrido que combina modelado numérico y técnicas estadísticas.

En lo que respecta al modelado de la erosión costera:

- Modelado del transporte de sedimentos longitudinal y transversal teniendo en cuenta la combinación de oleaje, marea meteorológica, marea astronómica y nivel medio del mar, presentes y futuros.
- Incorporación en el modelo de erosión del efecto de estructuras y potenciales regeneraciones de playas en la evolución de la línea de costa.
- Incorporación en el modelo de erosión de un algoritmo de asimilación de datos observados que permite mejorar la capacidad predictiva del modelo.
- Consideración de la distribución espacial de las características del sedimento en toda la zona de estudio.

En lo que respecta al modelado de la inundación costera:

- Desarrollo de un emulador de eventos extremos que considere las relaciones de interdependencia de las distintas variables, en distintos puntos del espacio, y aplicable a escalas regionales.
- Cálculo hidrodinámico de la contribución del oleaje a la CI futura mediante modelado numérico.
- Modelado de la extensión de la zona inundada en costa mediante un modelo hidráulico 2D.

En lo que respecta al modelado combinado de la inundación y la erosión

- Desarrollo de un modelo de traslación de perfil que traduce los avances y retrocesos de la línea de costa asociados a los diferentes procesos calculados en cambios en el perfil.
- Generación de topo-batimetrías futuras considerando los cambios a largo plazo de la morfología del terreno.

En lo que respecta a la consideración y al tratamiento de la incertidumbre:

- Creación de una base de datos de líneas de costa históricas a partir de imágenes de satélite mediante técnicas de teledetección *sub-píxel*, para la de la calibración del modelo de erosión.
- Reducción de la incertidumbre en el modelado de la erosión mediante el uso del filtro extendido de Kalman para la asimilación de observaciones.
- Aumento del rango de posibles eventos susceptibles de inundar, con respecto a las proyecciones dinámicas, mediante el empleo de la generación estadística.
- Muestreo de la incertidumbre asociada a las proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica considerando dos escenarios de concentraciones y cinco modelos climáticos regionales.
- Muestreo de la incertidumbre asociada al ANMM considerando, para dos escenarios de concentraciones, tres posibles trayectorias asociadas a tres percentiles de la distribución de los resultados de veinte modelos climáticos.
- El modelo de inundación se ha ejecutado para todas las combinaciones de escenarios de concentraciones, modelos climáticos y trayectorias de ANMM. No obstante, los resultados se han expresado, tanto de forma independiente, como agregados por escenarios de concentraciones, mostrando la variabilidad inter-modelo y la incertidumbre en el ANMM representadas por un valor medio y una varianza.

La metodología se ha validado en un tramo costero de 40 kilómetros entre el Puerto de Castellón y el Puerto de Sagunto. En las dos unidades fisiográficas diferenciadas (Castellón-Burriana y Burriana-Sagunto), las playas menos afectadas por inundación costera futura son las que se sitúan inmediatamente al norte de las grandes barreras de sedimento (puertos de Burriana, Canet de Belenguer y Sagunto), al ser playas en acreción y, por lo tanto, con un mayor valor de protección frente a inundaciones.

Por otro lado, las playas situadas al abrigo de los puertos están más expuestas a inundaciones y sus defensas se verán rebasadas más frecuentemente en el futuro. Es el caso de las playas de Torre, Moncófar o Chilches.

La aplicación de la metodología de inundación y erosión combinadas, de no tomarse medidas de adaptación o mitigación, aumenta significativamente el riesgo de inundación costera futura en el tramo de estudio. Los resultados del estudio realizado, ponen de manifiesto la necesidad de tener en cuenta los cambios a largo plazo de la morfología costera en el modelado de la inundación costera futura.

REFERENCIAS

- Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 117-130.
- DHI. (2012). *MIKE 21, User manual*.
- Erikson, L. H., Andrea O, Barnard, P. L., Vitousek, S., & Limber, P. W. (2017). Climate change-driven beach evolution at decadal to centennial time scales. *Coastal Dynamics*, 210, 9–15.
- Gharagozlou, A., Dietrich, J. C., Karanci, A., Luettich, R. A., & Overton, M. F. (2020). Storm-driven erosion and inundation of barrier islands from dune-to region-scales. *Coastal Engineering*, 158, 103674. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103674>
- Grases, A., Gracia, V., García-León, M., Lin-Ye, J., & Sierra, J. P. (2020). Coastal flooding and erosion under a changing climate: Implications at a low-lying coast (ebro delta). *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020346>
- Guza, R. T., & Thornton, E. B. (1981). Wave set-up on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 86(C5), 4133–4137. <https://doi.org/10.1029/JC086iC05p04133>
- Limber, P. W., Barnard, P. L., Vitousek, S., & Erikson, L. H. (2018). A Model Ensemble for Projecting Multidecadal Coastal Cliff Retreat During the 21st Century. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(7), 1566–1589. <https://doi.org/10.1029/2017JF004401>
- McCall, R. T., Van Thiel de Vries, J. S. M., Plant, N. G., Van Dongeren, A. R., Roelvink, J. A., Thompson, D. M., & Reniers, A. J. H. M. (2010). Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*, 57(7), 668–683. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.02.006>
- Miller, J. K., & Dean, R. G. (2004). A simple new shoreline change model. *Coastal Engineering*, 51(7), 531–556. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.05.006>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Stripling, S., Panzeri, M., Blanco, B., Rossington, K., Sayers, P., & Borthwick, A. (2017). Regional-scale probabilistic shoreline evolution modelling for flood-risk assessment. *Coastal Engineering*, 121(November 2016), 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.12.002>
- Toimil, A., Losada, I. J., Camus, P., & Díaz-Simal, P. (2017). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coastal Engineering*, 128(August), 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004>

Vitousek, S., Barnard, P. L., Limber, P., Erikson, L., & Cole, B. (2017). A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(4), 782–806.

Warren, I., & Bach, H. (1992). MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 229-240.

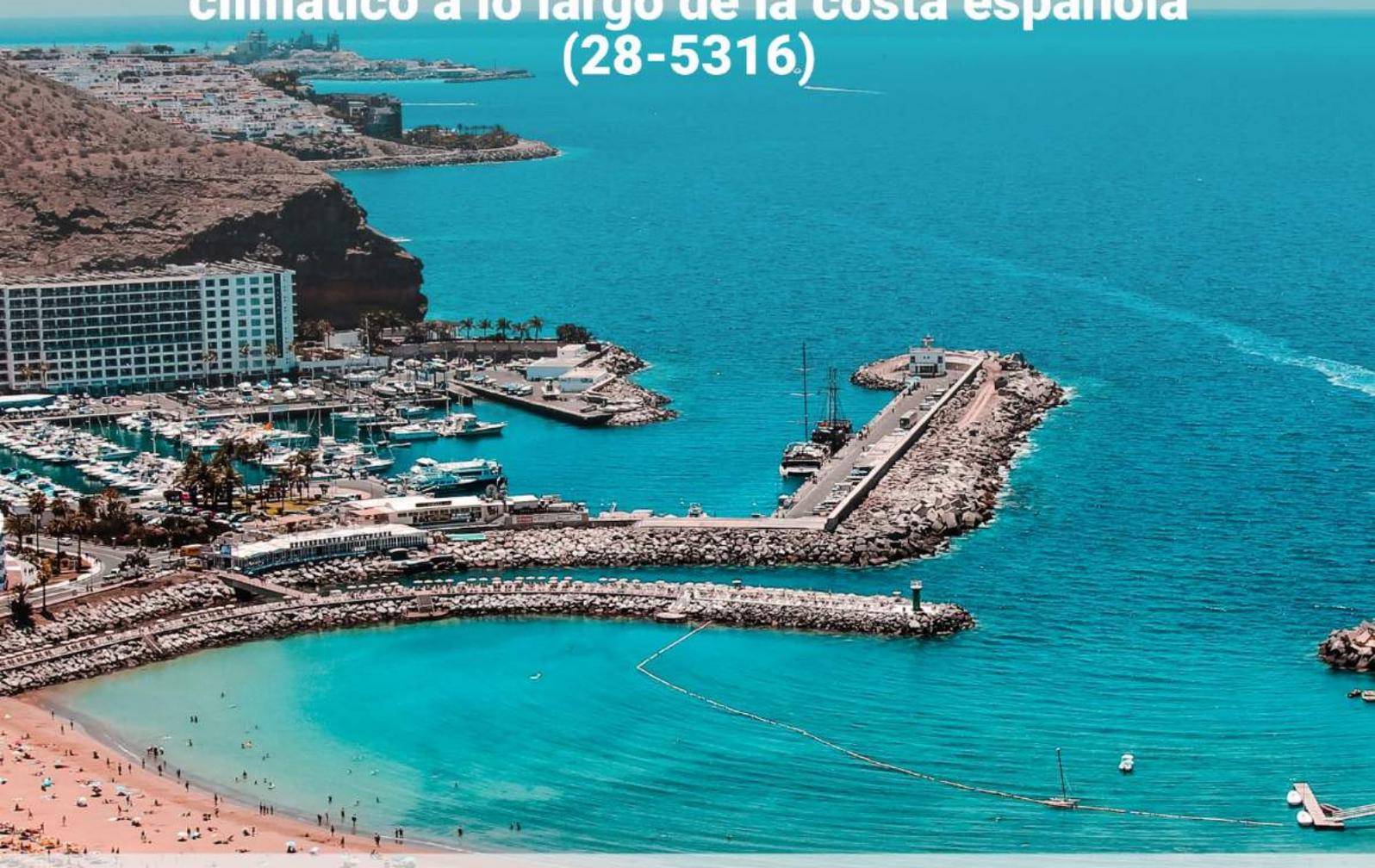


GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española (28-5316)



Estructuras

16 de Noviembre de 2020

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS.....	2
2. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA PROYECCIÓN DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE OBRAS DE PROTECCIÓN.	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Revisión del estado del arte y metodologías existentes.....	6
2.3. Desarrollo de la metodología.....	19
2.4.1. Objetivos e hipótesis de trabajo.....	19
2.4.2. Metodología general	20
2.4.3. Aproximación I.....	24
2.4.4. Aproximación II.....	47
2.4. Definición del caso piloto para la validación de la metodología.	63
2.4.5. Definición del tramo costero	64
2.4.6. Definición de las infraestructuras costeras	67
2.4.7. Definición de los modos de fallo y parada.....	71
2.5. Aplicación de las fases de downscaling e impacto.....	74
2.5.1. Aplicación de la Aproximación I.....	74
2.5.2. Aproximación II.....	87
2.5.3. Comparación y discusión de los resultados obtenidos.....	98
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.	102
REFERENCIAS	106
ANEXO I: EMULADOR DEL RÉGIMEN EXTREMAL	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología propuesta para la evaluación de los impactos de cambio climático tomando como referencia el trinomio forzamiento climático, estructura costera expuesta y vulnerabilidad.	4
Figura 2. Cascada de incertidumbre en la evaluación de los impactos del cambio climático (Adaptado de Wilby & Dessai, 2010)	5
Figura 3. Caracteres general y operativo del tramo de obra (tomado de la ROM 0.0 - 01).	12
Figura 4. Valores recomendados en función de los caracteres general y operativo del tramo de obra (tomado de la ROM 0.0 - 01).	14
Figura 5 Valores recomendados de vida útil mínima (tomado de la ROM 1.0 - 09).	15
Figura 6 Valores recomendados de máxima probabilidad conjunta de fallo para ELU y ELS (tomado de la ROM 1.0 - 09).	16
Figura 7 Valores recomendados de operatividad mínima (tomado de la ROM 1.0 - 09).	17
Figura 8 Valores recomendados de número medio de paradas operativas (tomado de la ROM 1.0 - 09).	18
Figura 9 Valores recomendados de duración máxima de parada operativa (tomado de la ROM 1.0 - 09).	19
Figura 10 Métodos de verificación en función del IRE e ISA (tomado de la ROM 1.0 - 09).	19
Figura 11 Metodología general para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección del litoral.	21
Figura 12 Aproximación metodológica I para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección del litoral.	25
Figura 13 Esquema de anidamiento de mallas de propagación y resolución espacial de las mismas, para resolver el downscaling del oleaje desde los nodos de las proyecciones dinámicas hasta la malla de detalle en el Puerto de Candás (Principado de Asturias).	26
Figura 14 Ejemplo de función de distribución Log-Normal de ANMM, regionalizada en un nodo según Slangen et al., 2014, para el escenario RCP 8.5 y el año 2100, caracterizada por 10 deciles equiprobables.	27
Figura 15 Selección del subconjunto de tamaño P=15 de una base de datos bidimensional, tras la aplicación del algoritmo MAXDISS (tomado de Camus et al., 2011).	30
Figura 16 Aplicación del algoritmo MAXDISS para la selección conjunta del régimen medio y extremal para cualquier periodo de referencia, escenario climático y modelo.	31
Figura 17 Metodología para la propagación numérica con SWAN de los estados de mar seleccionados hasta la zona de estudio.	32
Figura 18 Refracción del oleaje entre P_0 y uno de los l puntos del contorno (Modificado de Water Wave mechanics for Engineers and Scientists, Dean & Dalrymple 1991).	34
Figura 19 Mapa de propagación sobre la malla de detalle para un oleaje en P_0 de $H_s=8.77m$; $T_m=8.7s$; $T_p=10.5s$; $Dir=55.1^\circ$ y $NM=0.93m$	35
Figura 20 Espectro bidimensional en uno de los M puntos a pie de dique para un oleaje en P_0 de $H_s=8.77m$; $T_m=8.7s$; $T_p=10.5s$; $Dir=55.1^\circ$ y $NM=0.93m$	35
Figura 21 Metodología para la reconstrucción RBF del régimen medio y extremal a pie de dique.	36
Figura 22 Panel izquierdo: Comparación entre la altura de ola resultado de la propagación híbrida de una serie de proyecciones dinámicas en un escenario y periodo futuro a los deciles del ANMM inferior, ANMM 1, y superior, ANMM 10, y el valor en aguas abiertas. Panel derecho: Comparación entre los regímenes extremales de altura de ola resultado de la emulación sintética en aguas abiertas, con el resultado de la propagación híbrida de los eventos extremos sintéticos en un escenario y periodo futuro a los deciles del ANMM inferior, ANMM 1, y superior, ANMM 10.	37

Figura 23 Ejemplo del árbol de fallo de una estructura costera. Las relaciones entre elementos / modos de fallo “o” obedecen a una conceptualización de sistema en serie en el que el fallo se alcanza si se produce alguno de los fallos individuales.	38
Figura 24 Ejemplo de los modos de fallo hidráulicos y geotécnicos de una estructura costera en talud (tomado de ROM 1.1-18).	39
Figura 25 Esquema conceptual para la evaluación de los impactos de cambio climático en las obras de protección costera siguiendo la aproximación metodológica I.	40
Figura 26 Ilustración para la obtención de la probabilidad de fallo (Pf), como el área bajo la curva de la región de fallo (Adaptado de Burcharth et al., 1993).	41
Figura 27 Esquema para la obtención del ratio de fallo anual en un determinado escenario climático y periodo de referencia.	42
Figura 28 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de parada operativa.	43
Figura 29 Funciones de densidad del número medio de paradas operativas anuales para el periodo de referencia histórico y los periodos futuros en los dos escenarios de cambio climático analizados.	45
Figura 30 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de fallo hidráulicos.	46
Figura 31 Evolución temporal de la probabilidad de fallo para el periodo de referencia histórico y los periodos de referencia futuro en los dos escenarios de cambio climático analizados. Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático.	47
Figura 32 Aproximación II para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección.	48
Figura 33 Estrategia de propagación del oleaje basado en formulaciones semi-empíricas.	49
Figura 34 Pasos a seguir para la obtención de los regímenes medio y extremales en los M puntos a pie de dique.	51
Figura 35 Comparación entre la altura de ola resultado de la propagación analítica de una serie de proyecciones dinámicas en un escenario y periodo futuro empleando los deciles del ANMM inferior, ANMM 1, y superior, ANMM 10, y el valor en P_0	51
Figura 36 Ajuste del Régimen extremal para la obtención de los eventos de cálculo del ELU y ELS.	55
Figura 37 Obtención del oleaje y nivel del mar de cálculo para un determinado escenario climático y periodo de análisis.	55
Figura 38 Esquema conceptual para la evaluación de los impactos de cambio climático en las obras de protección costera siguiendo la Aproximación II.	57
Figura 39 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de parada operativa.	58
Figura 40 Funciones de densidad de la inoperatividad anual para el periodo de referencia histórico y los periodos de futuros en los dos escenarios de cambio climático analizados.	59
Figura 41 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de fallo hidráulicos aplicando la Aproximación II.	60
Figura 42 Evolución del parámetro de daño a la largo del siglo 21 en función del temporal de cálculo en cada uno de los modelos climáticos y periodos analizados. Los periodos futuros corresponden únicamente al RCP8.5. El resultado para cada uno de los modelos se representa mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático.	62
Figura 43 Paneles superiores: Localización de la zona piloto. Panel inferior: Protección costera en el tramo de estudio.	63
Figura 44 Descripción de la información batimétrica en la zona de estudio y de los nodos de las bases de datos de las proyecciones dinámicas de los que se hace uso para caracterizar el clima marítimo. 66	

Figura 45 Trayectorias de aumento del nivel medio de mar hasta final de siglo en la costa del Maresme en los escenarios futuros de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5..... 66

Figura 46 Sección tipo de la estructura costera analizada..... 68

Figura 47 Árbol de fallo de la estructura analizada..... 71

Figura 48 Definición de la berma intermedia a través de sus características geométricas (Tomada de EuroTop Manual, 2018)..... 74

Figura 49 Regímenes extremales mensuales en el modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045 en el escenario RCP8.5. Las 10.000 simulaciones sintéticas de 50 años aplicando el emulador multivariado se representan mediante su valor medio (línea azul continua) y las bandas de confianza del 90% (líneas azules discontinuas). Los valores registrados en la base de datos del modelo climático se representan por puntos negros. Panel superior izquierda: Altura de ola significativa, Hs (m). Panel superior derecha: Periodo de pico, Tp (s). Panel inferior izquierda: Marea meteorológica, MM (m). Panel inferior derecha: Periodo medio, Tm (s). 76

Figura 50 Representación bivariada de la función de densidad conjunta en el modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045, en el escenario RCP8.5. Las 10.000 simulaciones sintéticas de 50 años, obtenidas aplicando el emulador multivariado, se representan mediante líneas continuas azules y los valores registrados en la base de datos del modelo climático mediante líneas discontinuas negras. Panel superior izquierda: Hs-Tm. Panel superior derecha: Hs-Tp. Panel central izquierda: Tm-MM. Panel central derecha: Tm-Tp. Panel inferior izquierda: Hs-Dir. Panel inferior derecha: Hs-MM. 77

Figura 51 Representación bivariada de la aplicación del algoritmo MAXDISS en el modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045, en el escenario RCP8.5. Los datos del modelo se representan por punto negro. Los valores seleccionados aplicando el algoritmo por puntos rojos. Panel izquierdo: Hs- NM. Panel derecho: Hs-Tm. 79

Figura 52 Propagación numérica del oleaje mediante el modelo SWAN. Se representan situaciones de temporal proveniente del noreste (panel superior izquierda); sureste (panel superior derecha); sur (panel inferior izquierda) y suroeste (panel inferior derecha)..... 79

Figura 53 Reconstrucción del oleaje a pie de dique de los eventos sintéticos extremos (paneles superiores) y de las proyecciones dinámicas (paneles inferiores). Modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045 en el escenario RCP8.5 ANMM5. Se representa la relación de transferencia de la altura de ola significativa (paneles de la izquierda) y el comportamiento bivariado Hs-Dir a pie de dique (paneles de la derecha). 80

Figura 54 Proyección de los impactos operativos según los tres criterios ROM (Operatividad mínima anual, paneles superiores; número medio de paradas, paneles centrales; duración máxima parada, paneles inferiores). Se representan agregados por periodo de análisis y escenario climático asumiendo modelos equiprobables. Paneles de la izquierda: Evolución temporal de los criterios de diseño operativos. Paneles de la derecha: Funciones de densidad de los criterios de diseño operativos. Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático 83

Figura 55 Proyección de los impactos del Estado límite Último. Se representan agregados por periodo de referencia y escenario climático, asumiendo modelos equiprobables. Modo de fallo hidráulico del desplazamiento de las piezas del manto caracterizado por su evolución temporal (panel superior izquierda) y sus funciones de densidad (panel superior derecha). Evolución de los criterios ROM, probabilidad de fallo del ELU (panel inferior izquierda) y del tiempo medio entre fallos (panel inferior derecha). Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático 85

Figura 56 Proyección de los impactos del Estado límite de Servicio. Se representan agregados por periodo de y escenario climático asumiendo modelos equiprobables. Modo de fallo hidráulico del daño

sobre el equipamiento ferroviario por rebase caracterizado por su evolución temporal (panel superior izquierda) y sus funciones de densidad (panel superior derecha). Evolución de los criterios ROM, probabilidad de fallo del ELS (panel inferior izquierda) y del tiempo medio entre fallos (panel inferior derecha). Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático 86

Figura 57 Proyección de los impactos operativos según los tres criterios ROM (Operatividad mínima anual, paneles superiores; Número medio de paradas, paneles centrales; Duración máxima parada, paneles inferiores. Se representan agregados por periodo de análisis y escenario climático asumiendo modelos equiprobables. Paneles de la izquierda: Evolución temporal de los criterios de diseño operativos. Paneles de la derecha: Funciones de densidad de los criterios de diseño operativos. Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático. 95

Figura 58 Proyección de los impactos del Estado límite Último. Se representan agregados por periodo de análisis y escenario climático, asumiendo modelos equiprobables. Modo de fallo hidráulico del desplazamiento de las piezas del manto caracterizado por su evolución temporal (panel izquierdo) y sus funciones de densidad (panel derecho). Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático..... 96

Figura 60 Diferencias entre la Aproximación I y la Aproximación II en la propagación del oleaje (panel izquierdo) y en la obtención del régimen extremal a pie de dique (panel derecho). Modelo climático EART para el periodo de análisis 2026-2045 en el escenario RCP8.5 y el decil ANMM5..... 101

Figura 61 Metodología para la construcción de los 4N+N emuladores climáticos descriptores del régimen extremal, así como la simulación de eventos sintéticos extremales. NVU se refiere al número de vidas útiles sintéticas, cada una con una vida útil V_m 110

Figura 62 Metodología para la obtención de las muestras R-dimensionales a escala mensual..... 111

Figura 63 Cópula bidimensional para modelar la función de distribución conjunta de las variables x_1 y x_2 , con funciones de distribución marginal $F_{x_1}(x_1)$ y $F_{x_2}(x_2)$ 112

Figura 64 Regresión heterocedástica para el modelo probabilista de caracterización del periodo de pico, T_p función del periodo medio, T_m . Los parámetros de la función de distribución normal F_{T_p} se obtienen mediante modelos potenciales dependientes del periodo medio..... 114

Figura 65 Metodología para la simulación sintética de eventos extremos multivariados a escala mensual..... 115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Repercusión económica del cese de actividad por fallo estructural.	69
Tabla 2 Repercusión social y ambiental del cese de actividad por fallo estructural.....	69
Tabla 3 Repercusión económica del cese de actividad por parada operativa.	69
Tabla 4 Repercusión social y ambiental del cese de actividad por parada operativa.....	70
Tabla 5 Bases de cálculo de la obra litoral, descritas a través del carácter general y operativo del tramo.	71
Tabla 6 Resumen de los impactos del cambio climático desde el punto del estado límite operativo (ELO), de servicio (ELS) y último (ELU). Se representa la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, agregando los resultados por periodo de referencia y escenario climático (modelos equiprobables).	87
Tabla 7 Altura de ola significativa H_s (m) del temporal de cálculo (ELU) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 4975 años.	89
Tabla 8 Periodo de pico T_p (s) del temporal de cálculo (ELU) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 4975 años.....	89
Tabla 9 Periodo medio T_m (s) del temporal de cálculo (ELU) para cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 4975 años.....	90
Tabla 10 Nivel del mar NM (m) del temporal de cálculo (ELU) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 4975 años.....	90
Tabla 11 Altura de ola significativa H_s (m) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 690 años.	91
Tabla 12 Periodo de pico T_p (s) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 690 años.....	91
Tabla 13 Periodo medio T_m (s) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de estudio, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 690 años.....	92
Tabla 14 Nivel del mar NM (m) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 690 años.....	92
Tabla 15 Resumen de los impactos del cambio climático desde el punto del estado límite operativo (ELO), de servicio (ELS) y último (ELU). Se representa la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, agregando los resultados por periodo de referencia y escenario climático (modelos equiprobables).	98
Tabla 16 Comparación de resultados de los impactos del cambio climático para los estados límite operativo (ELO), de servicio (ELS) y último (ELU) aplicando la Aproximación I y Aproximación II. Se representa la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, agregando los resultados por periodo de análisis y escenario climático (modelos equiprobables). Se resaltan aquellos escenarios con diferencias notables entre ambas aproximaciones.	100
Tabla 17 Método de resolución recomendado según el carácter general del tramo. Adaptado de ROM 1.0-09.....	103

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- ANMM: Incremento del Nivel Medio del Mar como consecuencia del cambio climático, en metros.
- Dir: Dirección media de procedencia del oleaje en el estado de mar, en grados sexagesimales.
- ECDF: Función de distribución Empírica.
- ELO: Estado Límite Operativo, al que se adscriben los modos de parada que provocan una parada de las operaciones de la obra portuaria o litoral.
- ELS: Estado Límite de Servicio, al que se adscriben los modos de fallo que provocan un daño sobre algún elemento de la obra, pero sin incidencia en la estabilidad de ésta.
- ELU: Estado Límite Último, al que se adscriben los modos de fallo que provocan un daño sobre algún elemento de la obra con incidencia en la estabilidad de ésta.
- FORM/SORM: Métodos de Fiabilidad de Primer y Segundo Orden, respectivamente, resolviendo la integral de la probabilidad de fallo multidimensional por aproximación analítica.
- FSE: Formulación Semi-Empírica.
- GCM: Modelo Climático General, simulando las interacciones atmósfera-océano a escala planetaria.
- GEIs: Gases de Efecto Invernadero, contribuyendo al calentamiento global por la emisión a la atmósfera resultado de la acción antropogénica.
- GEV: Función de distribución Generalizada de Extremos.
- Hs: Altura de ola significativa, caracterizada por la media del tercio superior de las alturas de olas individuales del estado de mar, en metros.
- H_{2%}: Altura de ola excedida por el 2% de las alturas de olas individuales del estado de mar, en metros.
- IPCC: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, conformado por un grupo de expertos que evalúan periódicamente el estado del conocimiento científico-técnico, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.
- IRE: Índice de Repercusión Económica, descriptor del carácter general de la obra.
- IREO: Índice de Repercusión Económica Operativo, descriptor del carácter operativo de la obra.
- ISA: Índice de Repercusión Social y Ambiental, descriptor del carácter general de la obra.
- ISAO: Índice de Repercusión Social y Ambiental Operativo, descriptor del carácter operativo de la obra.
- JONSWAP: Espectro escalar teórico multiparamétrico, caracterizando la densidad de energía del oleaje en un estado de mar para cada intervalo de frecuencial.
- Lago Plazo: Periodo de proyección futuro comprendido entre 2081 y 2100.
- MAXDISS: Algoritmo de selección de Máxima Disimilitud.
- MA: Marea Astronómica, en metros.
- Medio Plazo: Periodo de proyección futuro comprendido entre 2026 y 2045.

- MM: Marea Meteorológica, en metros.
- NM: Nivel del Mar. En el periodo de referencia suma de la marea astronómica y meteorológica. En los periodos futuros suma de la marea astronómica, meteorológica y aumento del nivel medio del mar. En metros.
- PDF: Función de densidad.
- RBFs: Funciones de Base Radial.
- RCM: Modelo Climático Regional, simulando los procesos atmosfera-océano a escala regional considerando los resultados de los modelos GCM como condiciones de contorno para el aumento de resolución espacio-temporal.
- RCP: Trayectorias de Concentración Representativas. Constituyen los escenarios futuros de cambio climático función de los escenarios de emisiones GEIs, caracterizadas por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m².
- RCP4.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de los GEIs con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 4.5 W/m².
- RCP8.5: Escenario futuro de cambio climático, caracterizado por una trayectoria de los GEIs con un forzamiento radiativo en el año 2100 de 8.5 W/m².
- ROM: Recomendaciones de Obras Marítimas. Constituye la normativa española en proyectos de obras portuarias y defensas litorales.
- SWAN: Modelo numérico de propagación del oleaje (Simulating Waves Nearshore).
- Tm: Periodo medio del estado de mar, en segundos.
- Tp: Periodo de pico del estado de mar, caracterizado como la inversa de la frecuencia con mayor densidad de energía espectral, en segundos.

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

- B: Anchura de la berma intermedia, en metros.
- BC: Banda de confianza. Asumiendo una distribución normal, las bandas de confianza del 90% se obtienen como la media ± 1.645 la desviación estándar.
- $C(F_{x_1}(x_1), F_{x_2}(x_2))$: Función cópula de las variables x_1 y x_2 .
- C_{colapso} : Coeficiente de ajuste para la FSE del cálculo del daño en diques en talud formados por escolleras localizados en aguas someras, rompiendo en colapso sobre éste.
- C_{voluta} : Coeficiente de ajuste para la FSE del cálculo del daño en diques en talud formados por escolleras localizados en aguas someras, rompiendo en voluta sobre éste.
- C_r : Coeficiente reductor por cota de coronación superior.
- CV: Coeficiente de variación de una determinada variable, relacionando su desviación estándar y media aritmética.
- $CV_{\text{cotg } \alpha}$: Coeficiente de variación del talud del manto exterior.
- $CV_{\rho, \text{rock}}$: Coeficiente de variación de la densidad de las piezas del manto exterior.
- C_1, C_2 : Coeficientes de ajuste para la FSE del cálculo de caudal de rebase en diques en talud. c: celeridad del oleaje, obtenida como la relación entre la longitud de onda y el periodo, en metros por segundo.
- c: celeridad del oleaje, en metros por segundo.
- c_0 : celeridad del oleaje en profundidades indefinidas, en metros por segundo.
- c_g : celeridad de grupo del oleaje, en metros por segundo.
- $\text{cotg } \alpha$: Talud del manto exterior de la estructura de protección ($\text{cotg } \alpha = 1 / \tan \alpha$).
- d: Número de variables, pertenecientes al subconjunto L, empleadas para la construcción del modelo multidimensional mediante cópulas Gaussianas.
- D_m : Duración máxima probable de una parada operativa en el año.
- D_{n50} : Diámetro nominal de las piezas del manto principal exterior.
- $F_x(x)$: Función de distribución mensual de la variable x.
- $F_{x_1, x_2}(x_1, x_2)$: Función de distribución conjunta de las variables x_1 y x_2 .
- g: Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2 .
- G_c : Anchura de la berma superior.
- H_{rotura} : Altura de ola máxima admisible por limitación de calado.
- h: Calado a pie de dique sin considerar la componente de las mareas ni del aumento del nivel medio del mar, si lo hubiere, referido al nivel medio del mar local, en metros.
- $K_{\text{asom.}}$: Coeficiente de asomeramiento del oleaje.
- $K_{\text{refr.}}$: Coeficiente de refracción del oleaje.
- K_T : Relación entre el periodo de pico y el periodo medio del oleaje de un estado de mar.

- k : número de onda del oleaje.
- L : Longitud de onda del oleaje, en metros.
- L_{berm} : Anchura equivalente de la berma intermedia, considerando las características particulares del estado de mar en la reducción de la tasa de rebase, en metros.
- L_0 : Longitud de onda del oleaje en profundidades indefinidas, en metros.
- M : Puntos objetivo a los que se propaga el oleaje, para la evaluación de los impactos del cambio climático.
- N : Número de modelos climáticos disponibles en la zona de estudio con todas las variables de oleaje y nivel requeridas para la cuantificación de los impactos del cambio climático.
- N_f : Número de vidas útiles sintéticas en las que se alcanza el fallo.
- N_m : Número medio de paradas operativas anuales.
- N_{olas} : Número de olas del estado de mar.
- N_{VU} : Número de vidas útiles sintéticas, cada una de V_m años, a simular en la metodología de Monte Carlo.
- n : Factor de celeridad de grupo del oleaje. Empleado para el cálculo de la celeridad de grupo a partir de la celeridad del oleaje.
- P_f : Máxima probabilidad conjunta de fallo admisible en la vida útil.
- $P_{f,ELU}$: Máxima probabilidad conjunta de fallo admisible en la vida útil de los modos de fallo adscritos al estado límite último.
- $P_{f,ELS}$: Máxima probabilidad conjunta de fallo admisible en la vida útil de los modos de fallo adscritos al estado límite de servicio.
- p : Operatividad mínima anual admisible.
- P : Coeficiente de permeabilidad.
- P : Número de estados de mar resultado de aplicar el algoritmo de selección MAXDISS.
- P_0 : Punto localizado en aguas indefinidas sobre el que se realizan los procedimientos matemático-estadísticos para la propagación del oleaje hasta la zona de estudio. En la aproximación II, se transfiere la información directamente desde este punto.
- $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$: Puntos en los contornos del dominio numérico de propagación, empleados en la aproximación I para una propagación realista de las condiciones meteo-oceanográficas desde P_0 .
- q : Caudal medio de rebase sobre la estructura en el estado de mar, en l/s/m.
- q_{umbral} : Valor umbral del caudal medio de rebase sobre la estructura en un estado de mar, en l/s/m.
- $q_{\text{umbral, ELS}}$: Valor umbral del caudal medio de rebase sobre la estructura en un estado de mar, separando la región de fallo y no fallo en la evaluación de los impactos del estado límite de servicio, en l/s/m.
- $q_{\text{umbral, ELO}}$: Valor umbral del caudal medio de rebase sobre la estructura en un estado de mar, separando la región de parada y no parada operativa en la evaluación de los impactos del estado límite operativo, en l/s/m.

- q_{crit} : Valor máximo del caudal medio de rebase sobre la estructura en un estado de mar con capacidad de desencadenar un impacto en el estado límite de servicio en una determinada vida útil sintética.
- R: Número de variables meteo-oceanográficas de interés para la cuantificación de los impactos de cambio climático.
- R_{ij} : Muestra L dimensional con las variables meteo-oceanográficas de interés correspondientes al mes i y al año j de la serie temporal de las proyecciones dinámicas analizada, obtenida según el criterio de selección de extremos mensuales.
- r_B, r_{db}, d_B : Parámetros geométricos para el cálculo de la influencia de la berma intermedia en la reducción de la tasa de rebase.
- S: Parámetro adimensional para la cuantificación del daño en diques en talud de escolleras por la acción de un determinado estado de mar.
- S_{umbral} : Valor umbral del parámetro adimensional de daño.
- S_{crit} : Valor máximo del parámetro adimensional de daño en un estado de mar con capacidad de desencadenar un impacto en el estado límite último en una determinada vida útil sintética.
- $\tan \alpha$: Pendiente del manto exterior de la estructura de protección.
- $\tan \beta$: pendiente de la batimetría, requerida para la propagación del oleaje en la aproximación II.
- T_r : Periodo de retorno, en años.
- $T_{r,ELU}$: Periodo de retorno del temporal de cálculo para los modos de fallo adscritos al estado límite último, en años.
- $T_{r,ELS}$: Periodo de retorno del temporal de cálculo para los modos de fallo adscritos al estado límite de servicio, en años.
- V: Muestra conjunta compuesta por las proyecciones dinámicas horarias y eventos sintéticos extremos de un determinado periodo de analisis, escenario y modelo climático.
- V_m : Vida útil mínima de la estructura litoral.
- Δ : Densidad relativa de las piezas del manto exterior.
- β : Ángulo de incidencia del oleaje sobre la obra litoral, referido a la perpendicular de la alineación del tramo estudiado, en grados sexagesimales.
- γ : Factor de ensanchamiento espectral del estado de mar. Como regla general, se considera un espectro teórico tipo JONSWAP con $\gamma=3.3$.
- γ_β : Coeficiente reductor de rebase sobre la estructura por oblicuidad.
- γ_{berma} : Coeficiente reductor de rebase sobre la estructura por la presencia de bermas intermedias.
- γ_f : Coeficiente reductor de rebase sobre la estructura por fricción.
- ξ : Número de Iribarren. Relaciona la pendiente del talud del dique y el peralte del oleaje.
- ξ_{cr} : Número de Iribarren crítico. Separa las condiciones de oleaje con rotura en voluta y colapso sobre la estructura.

- ξ_x : Parámetro de forma de la función de distribución GEV, descriptora de la variable x .
- φ_x : Parámetro de escala de la función de distribución GEV, descriptora de la variable x .
- μ : Media aritmética de una determinada muestra.
- μ_x : Parámetro de localización de la función de distribución GEV, descriptora de la variable x .
- σ : Desviación estándar de una determinada muestra.
- σ_{oleaje} : Dispersión direccional del oleaje en un estado de mar, en grados sexagesimales.
- ρ_{rock} : Densidad de las piezas del manto exterior, en Kg./m³.
- λ : Tasa de fallo anual, en años⁻¹.
- Γ : Coeficiente de correlación de Spearman.
- Ψ : Variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado.
- Ψ_{ELU} : Variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado, con capacidad para desencadenar un impacto en el estado límite último.
- Ψ_{ELS} : Variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado, con capacidad para desencadenar un impacto en el estado límite de servicio.
- Ψ_{ELO} : Variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado, con capacidad para desencadenar un impacto en el estado límite operativo.
- Ψ_{umbral} : Valor umbral de la variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado, separando la región de fallo/parada de la de no fallo/no parada.
- $\Psi_{umbral,ELU}$: Valor umbral de la variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado con capacidad para desencadenar un impacto en el estado límite último, separando la región de fallo y no fallo.
- $\Psi_{umbral,ELS}$: Valor umbral de la variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado con capacidad para desencadenar un impacto en el estado límite de servicio, separando la región de fallo y no fallo.
- $\Psi_{umbral,ELO}$: Valor umbral de la variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado con capacidad para desencadenar un impacto en el estado límite operativo separando la región de parada y no parada.
- Ψ_{crit} : Valor máximo de la variable de gobierno del proceso de interacción oleaje-estructura analizado, separando la región de fallo/parada de la de no fallo/no parada, en una determinada vida útil sintética.

RESUMEN EJECUTIVO

Las estructuras costeras constituyen el primer elemento artificial de defensa del Dominio Público Marítimo Terrestre ante la acción de las dinámicas marinas, siendo fundamentales para la protección y correcto funcionamiento de los sectores económicos, productivos y sociales en las zonas litorales. Es por ello que, dentro de la estrategia española de adaptación al cambio climático, se necesita dotar a los tomadores de decisiones de una herramienta que permita cuantificar los potenciales impactos del cambio climático sobre las obras de protección con el objetivo de incorporar de forma eficiente estrategias de adaptación en las políticas de gestión de la costa en un entorno de variabilidad e incertidumbre climática.

Para dar cumplimiento a tales objetivos, en éste documento se presenta la metodología para la evaluación de los impactos de cambio climático en las estructuras costeras del litoral español entendiendo como tal cualquier estructura rígida localizada en la línea de costa. Ésta metodología se compone de dos aproximaciones diferentes, incorporándose en la primera las técnicas estadísticas y numéricas más avanzadas en el estado del conocimiento, mientras que en la segunda aproximación se introducen hipótesis simplificadoras de los procesos a modelar. Tomando como referencia el marco normativo español técnico en vigor (Recomendaciones de Obras Marítimas, ROM Puertos del Estado) y el marco conceptual propuesto por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para la evaluación multisectorial de los impactos de cambio climático, se desarrolla una metodología integral que transfiere los cambios futuros del clima a impactos en las obras del litoral. Ello se apoya en el mejor conocimiento científico-técnico existente, permitiendo modelar las implicaciones que tienen los esperables cambios del clima a escala global y regional en la escala local de las obras litorales. En este sentido, merece la pena remarcar que la metodología propuesta incorpora los cambios en todas las variables climáticas con capacidad de desencadenar un impacto (no únicamente considerando el aumento de nivel medio del mar), resultado de una caracterización climática presente y futura a escala horaria multi-modelo (no basada en escenarios estáticos de cambio climático). Siguiendo una metodología probabilista para el adecuado tratamiento de las incertidumbres existentes dentro del análisis, el gestor del litoral puede cuantificar bajo que escenarios climáticos y horizontes temporales futuros las obras del litoral dejan de cumplir los requerimientos de diseño, permitiendo proyectar en el tiempo actuaciones en elementos concretos para una adaptación flexible y eficiente.

La metodología presentada se ha aplicado íntegramente en un caso piloto en la costa española, demostrando la inmediata aplicabilidad de lo descrito en la guía.

1. MOTIVACIÓN Y PREMISAS

Las estructuras costeras son especialmente vulnerables al cambio climático debido a su larga vida útil, su localización en la costa y la vulnerabilidad de las operaciones en ella se realizan. Las obras litorales y portuarias contribuyen al desarrollo económico-social desde la escala local hasta la escala regional y nacional, siendo fundamentales para el correcto funcionamiento del sistema productivo. Los pequeños puertos pesqueros son la principal fuerza tractora en la mayoría de los pequeños núcleos de población del litoral español, mientras que estructuras de defensa del litoral son claves para actividades tales como el turismo y la cadena logística y de suministros. Es, por lo tanto, relevante conocer si para la protección de las personas, bienes y servicios o para la gestión del territorio el cambio climático puede desencadenar fallos en las estructuras de defensa del litoral con consecuencias negativas importantes para los sectores económicos, productivos y sociales.

Mediante la metodología aquí expuesta se pretende:

- Dotar a los responsables de la gestión de la costa de una herramienta para evaluar los potenciales riesgos originados por los impactos del cambio climático sobre las obras de protección del litoral y otras infraestructuras localizadas en la costa.
- Facilitar la incorporación de estrategias de adaptación flexible a la gestión de las obras de protección y otras infraestructuras localizadas en la costa española.
- Analizar, evaluar y priorizar diferentes medidas de adaptación que sean eficaces y coste-eficientes.
- Promocionar la integración de herramientas avanzadas de modelado para conseguir una más eficiente toma de decisiones y un mejor uso de los recursos disponibles.
- Identificar qué aspectos será necesario desarrollar en el corto y medio plazo para mejorar las capacidades disponibles para gestionar la costa ante un marco de incertidumbre.

Para ello, la metodología propuesta pretende responder a cuestiones tales como:

- Para una estructura determinada, ¿cuáles son los mecanismos y modos de fallo que pueden verse más afectados por efecto del cambio climático?
- ¿Cuál será la evolución de los criterios estructurales, funcionales y operativos de una obra determinada en función de los horizontes temporales y escenarios de emisiones considerados?
- ¿Cuál será el efecto del aumento del nivel medio del mar sobre la funcionalidad y operatividad de una obra determinada?
- ¿Cuándo se estima que puede producirse la pérdida total de operatividad de una obra determinada? ¿Cómo varía ese horizonte temporal con el escenario de emisiones?
- Para diferentes escenarios de cambio climático ¿Cómo se van a modificar la intensidad y frecuencia de los eventos extremos y cuál va a ser su efecto sobre las obras de protección? ¿Cómo puede afectar esto a las obras e infraestructuras localizadas en el Dominio Público Marítimo Terrestre?

- ¿Cuáles son las estrategias de adaptación posibles ante diferentes escenarios y cuál sería la respuesta de medio largo plazo de las obras de protección en caso de ser implementadas?
- ¿Cómo puede incorporarse el efecto del cambio climático en el diseño de nuevas obras de protección?
- ¿Cuáles son las incertidumbres asociadas a las evaluaciones anteriores y cómo es posible integrarlas en la toma de decisiones?

En cuanto a las premisas se refiere, es necesario hacer constar las siguientes:

Sobre el marco general

- En esta metodología se va a entender como obra de protección de la costa cualquier estructura rígida localizada en la línea de costa, entre cuyos fines se encuentre la estabilización de la línea de costa o la protección frente a la inundación. Se incluye, por tanto, obras tales como: estructuras formando la línea de costa como muros, revestimientos, diques de contención y paseos marítimos; estructuras perpendiculares a la línea de costa, como espigones y estructuras paralelas a la costa como diques exentos y, en general, todas aquellas de las que sea posible determinar su fiabilidad, funcionalidad y operatividad.
- La metodología propuesta y herramientas derivadas pretenden incorporar el mejor conocimiento científico-técnico disponible.
- La metodología presentada se formula sobre un marco conceptual común con el resto de las metodologías planteadas en este Contrato de Servicios y multinivel en su grado de aplicación. Esto permite adaptar su aplicación a diferentes niveles de exigencia, complejidad y a los recursos, datos y capacidades disponibles. Esta aproximación al problema dota de una enorme flexibilidad a la metodología para aplicaciones diversas y por diferentes usuarios.
- Sobre la base del punto anterior, la metodología es válida para cualquier tramo de la costa española, con diferentes niveles de aplicación y, por tanto, distintos niveles de incertidumbre esperables.
- Dada su objetivo principal, analizar la evolución futura ante diferentes escenarios de cambio climático y horizontes temporales, se ha primado como uno de los elementos esenciales de la misma la incorporación de las incertidumbres en el análisis y en la comunicación de los resultados.

Sobre el caso específico de las obras marítimas

- A la hora de plantear esta nueva metodología, no es posible obviar que en España las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM, Puertos del Estado) constituyen el marco normativo técnico en vigor. Dichas recomendaciones no sólo contemplan el proyecto y obra de infraestructuras específicamente portuarias, sino que también son aplicables a obras de protección del litoral y propugnan un análisis técnico de carácter eminentemente probabilista. Por todo lo anterior, el marco normativo ROM debe ser un claro referente sobre el que definir una metodología de estudio específica para considerar los efectos del cambio climático.

- Análogamente, no es posible obviar el marco conceptual propuesto por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) para la evaluación multisectorial de los impactos derivados del cambio climático. Es por ello, que la terminología IPCC debe ser la tomada como referencia para la implementación de los términos forzamiento climático, exposición y vulnerabilidad en el análisis de obras marítimas. Tal y como se ilustra en la Figura 1, el elemento central es la estructura costera (exposición) sobre la que se definen los requerimientos que de ella se esperan, los elementos que la constituyen y los mecanismos que pueden producir un fallo en esta. Por lo tanto, los impactos se deben a la relación existente entre el trinomio formado por la acción climática, estructura costera expuesta y su vulnerabilidad.

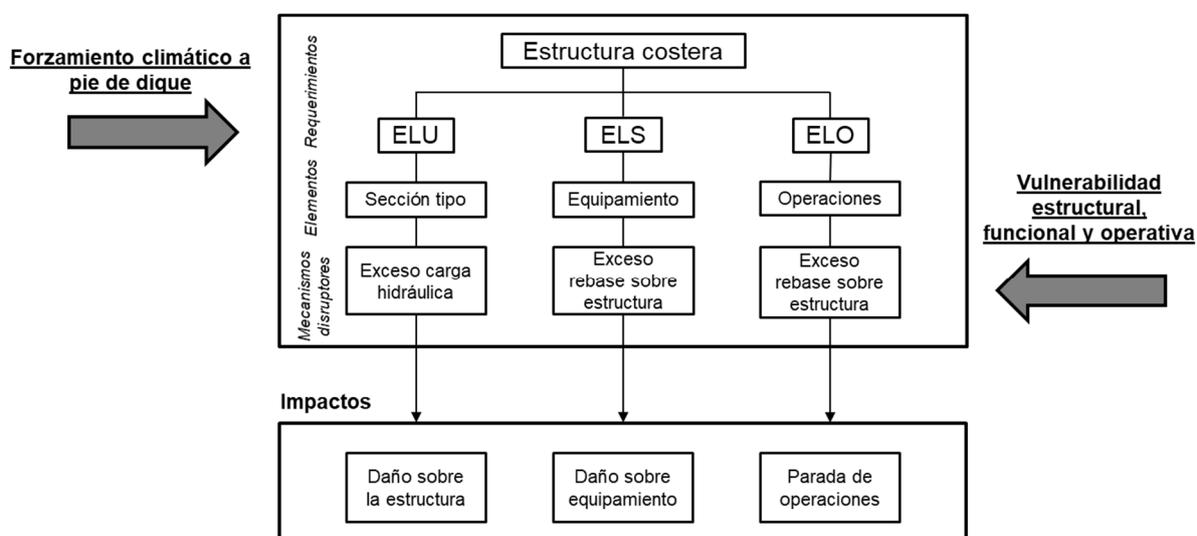


Figura 1. Metodología propuesta para la evaluación de los impactos de cambio climático tomando como referencia el trinomio forzamiento climático, estructura costera expuesta y vulnerabilidad.

Sobre el análisis de las incertidumbres

- Independientemente del sector o problema considerado, el análisis de los riesgos derivados del cambio climático cuenta con un alto grado de incertidumbre. En el estado del arte, las fuentes y cascada de incertidumbres se centran esencialmente en la determinación de las proyecciones de los forzamientos climáticos futuros que alimentan los modelos de impacto que conducen a la evaluación del riesgo, (Figura 2). Sin embargo, dichos forzamientos dependerán del escenario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) considerados. Éstos servirán a su vez para forzar modelos generales de circulación (GCMs). Considerando los procesos climáticos regionales, los resultados de los GCMs se regionalizan a través de los modelos climáticos regionales (RCMs). Finalmente, y con el fin de considerar los efectos locales sobre la estructura objeto de estudio, se aumenta nuevamente la resolución de los procesos espacio-temporales de los forzamientos climáticos. Estos alimentan los modelos de impactos que permiten plantear las medidas de adaptación. El esquema planteado permite transferir la información desde los escenarios de emisiones hasta las consecuencias locales de éstos, formando una cascada de incertidumbre que es necesario incorporar, en la medida de lo posible, en la gestión.

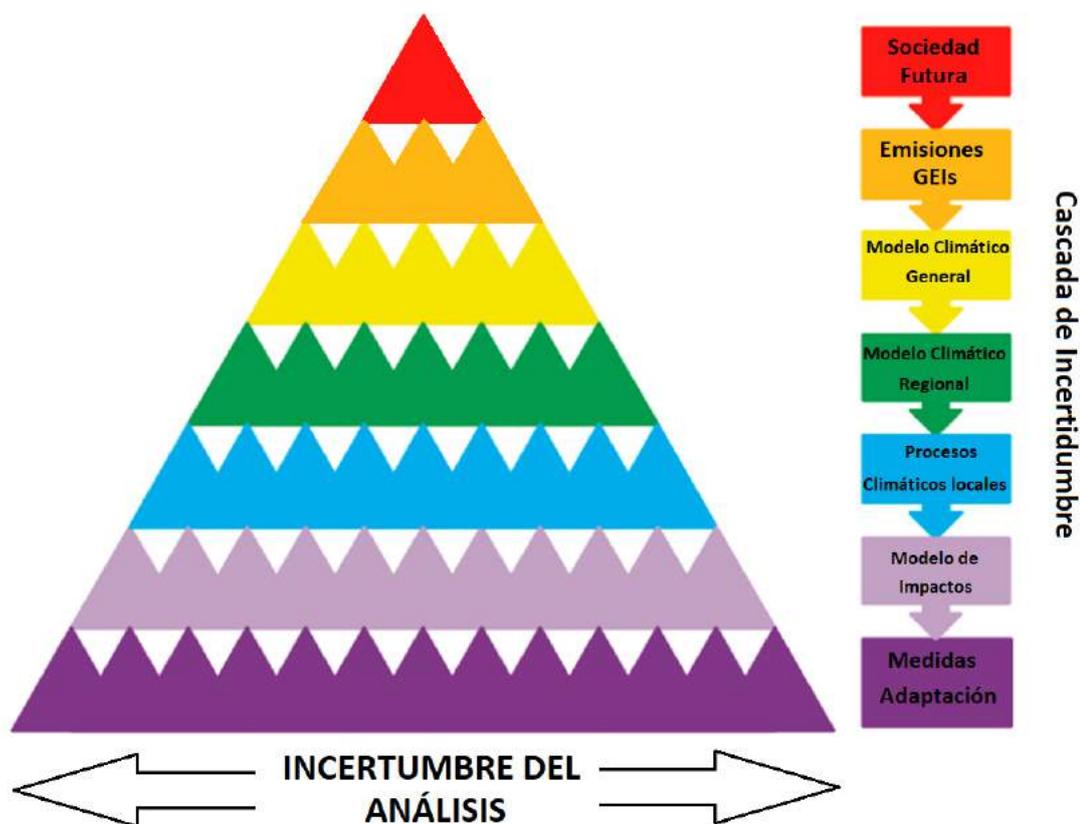


Figura 2. Cascada de incertidumbre en la evaluación de los impactos del cambio climático (Adaptado de Wilby & Dessai, 2010)

- En el contexto anterior, y sin pérdida de generalidad, en la metodología que se propone a continuación, se parte de la base de que se dispone de un número determinado de GCMs, RCPs y trayectorias de aumento del nivel medio del mar (ANMM) a lo largo del siglo 21 que permiten considerar las incertidumbres derivadas de las proyecciones climáticas en el análisis. Es decir, la incertidumbre se introduce en los modelos climáticos a través del uso de un número determinado de modelos que permiten obtener diferentes realizaciones, considerando así, caracterizaciones estadísticas de su conjunto o incertidumbres. Estas bases de datos provienen de los trabajos ejecutados en este mismo contrato y están disponibles para cualquier usuario (Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019)).

La metodología sería igualmente válida con otras combinaciones y número de RCPs, GCMs y trayectorias de ANMM. Su selección condicionaría el nivel de incertidumbre de los resultados finales. Reducir el número de GCMs y trayectorias de ANMM aumentaría considerablemente la incertidumbre en los resultados finales.

2. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA PROYECCIÓN DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE OBRAS DE PROTECCIÓN.

2.1. Introducción.

En este capítulo se desarrolla y valida una metodología que de manera probabilística permite evaluar los impactos del cambio climático sobre la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de obras de protección de la costa (diques exentos, espigones, paseos, muros, etc.). Dicha metodología contempla la determinación de la incertidumbre asociada a los impactos del cambio climático sobre las obras de protección analizadas.

La metodología para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección se aplica a un caso de estudio real para su validación, haciendo uso de las bases de datos de proyecciones dinámicas generadas en la Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019) del presente contrato de servicios.

A continuación, se realiza una revisión del estado de conocimiento en metodologías de evaluación de los impactos del cambio climático sobre obras de protección. Posteriormente se define la metodología y se aplica a un caso de estudio para su validación. Finalmente, se incluyen una serie de conclusiones específicas asociadas a la evaluación de los impactos del cambio climático sobre las obras de protección costeras.

2.2. Revisión del estado del arte y metodologías existentes

En este apartado se lleva a cabo una revisión del estado del conocimiento en metodologías de evaluación de los impactos del cambio climático en obras de protección del litoral atendiendo a la escala espacial del análisis; a la naturaleza de los impactos analizados y al tratamiento de la incertidumbre. En relación con la escala espacial, una metodología de escala nacional/regional proporciona una estimación aproximada del riesgo, haciendo uso principalmente de indicadores agregados representativos del sistema de obras de protección y su interacción con los forzadores climáticos. Una metodología de escala local permite la cuantificación del grado de cumplimiento de los requerimientos individuales como resultado de una mejor resolución de los procesos de transformación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa, así como de aquellos derivados de su interacción con las estructuras. De forma paralela a la revisión científica, se analizan las guías y recomendaciones existentes en otros países con el fin de contextualizar la metodología propuesta con lo realizado en países una problemática similar.

En cuanto a la resolución de impactos se refiere, las metodologías existentes se pueden dividir entre aquellas que analizan los mecanismos que producen la interrupción de las actividades sin consecuencias estructurales, cómo pueden ser cambios en la agitación debida al oleaje; las que evalúan los impactos que pueden ocasionar daños en los elementos de la obra sin poner en riesgo su integridad estructural, cómo puede ser el aumento del rebase del oleaje sobre la misma; y las que evalúan los mecanismos que pueden desencadenar una reducción de las condiciones de seguridad como consecuencia de la superación de la capacidad resistente de alguno de sus elementos estructurales.

Finalmente, el tratamiento de las incertidumbres, climáticas y no climáticas, se puede llevar a cabo mediante análisis deterministas o probabilistas. Los primeros se basan en el estudio de un número acotado de escenarios en los que las variables involucradas se tratan mediante valores característicos. Los probabilistas, en cambio, tienen en cuenta la variabilidad existente, tanto en las dinámicas generadoras de impactos como en la respuesta de los elementos, mediante la caracterización de sus funciones de probabilidad. Si dichas funciones de probabilidad se consideran normales, el impacto analizado se puede estudiar analíticamente mediante los métodos de nivel II, mientras que si se consideran funciones de densidad no estrictamente gaussianas, se tienen los denominados métodos de nivel III en los que su resolución requiere el empleo de técnicas semi-analíticas (métodos de fiabilidad de primer y segundo orden, *FORM* y *SORM* respectivamente por su denominación en inglés) o de simulación numérica (técnica de Monte Carlo). De este resumen inicial se puede concluir que las aproximaciones de alta resolución espacial o de escala local que evalúan, tanto impactos operativos como estructurales siguiendo una técnica probabilista de nivel III, son los que proporcionan los análisis de riesgo más fiables, tanto por los procesos que se resuelven como por las técnicas empleadas, siendo óptimos para el análisis del riesgo de las obras de protección en un entorno inherente de incertidumbre propio del cambio climático, así como para la gestión eficiente de las posibles medidas de adaptación.

En cuanto a la literatura científica nacional e internacional relativa al análisis de los impactos de cambio climático sobre las infraestructuras costeras y portuarias, éstas se pueden agrupar atendiendo a cuatro grandes categorías.

La primera de ellas se refiere al tipo de impactos que se evalúan, es decir, si son impactos operacionales, desencadenados por un aumento en la severidad de las condiciones regulares del “*día a día*”, o estructurales, debido a cambios en la capacidad de generar daños de los eventos extremos. Esta primera diferenciación tiene que ver con el desacoplamiento estadístico del análisis, ya que los primeros se abordan con técnicas estadísticas descriptivas clásicas y los segundos mediante técnicas de extremos.

La segunda categoría trata fundamentalmente la forma en la que se proyectan las condiciones futuras de oleaje y nivel, para lo que pueden utilizarse diferentes metodologías que han ido evolucionando con la accesibilidad a los datos y capacidades computacionales. Así, los primeros trabajos introducen los cambios en las dinámicas marinas a través de los cambios en las series de datos históricas mediante extrapolación con diferentes niveles de complejidad, mientras que los trabajos más recientes utilizan la información de los forzamientos proyectados de vientos y presión sobre los mares y océanos para, utilizando técnicas estadísticas o dinámicas, proyectar la información de las dinámicas en la costa. En este aspecto es también necesario destacar que no todos los estudios existentes consideran las mismas dinámicas. Así, la mayor parte de la literatura está dominada por trabajos en los que es el aumento del nivel medio del mar el único forzamiento de cambio climático considerado, ignorando los cambios asociados al oleaje o la marea meteorológica.

La tercera categoría obedece a la escala espacial del análisis, diferenciándose los estudios a escala global, regional y a escala local. Dependiendo del problema a analizar, generalmente los estudios a escala global y regional tratan de generar información útil en la determinación de estrategias o políticas, introduciendo hipótesis simplificadoras en la caracterización del elemento analizado y en los forzamientos climáticos que conllevan un alto nivel de incertidumbre, pero sirve a los propósitos del

análisis. Permiten así mismo hacer un análisis inicial para identificar problemas o ámbitos geográficos donde es necesario priorizar estudios más detallados. Es necesario comentar que, como ventaja, este tipo de estudios es generalmente menos demandante en datos de entrada y en computación.

Los estudios de alta resolución cubren una extensión espacial mucho menor pero permiten modelar con un mayor grado de detalle los procesos locales de interacción flujo-estructura así como tener un conocimiento detallado los efectos del cambio climático sobre la estructura e incluso cuáles deben ser las posibles medidas de adaptación.

Finalmente, la cuarta categoría en esta clasificación tiene que ver con el enfoque elegido para tratar el entorno de incertidumbre inherente en el análisis. Aquí se puede diferenciar entre los trabajos de carácter más bien determinista basados en analizar los cambios a través de escenarios representativos (por ejemplo, considerando los cambios en el periodo de retorno de la solicitación de cálculo) mientras que los segundos abordan las posibles y múltiples condiciones futuras basadas en su probabilidad de ocurrencia.

Con esta estructuración general del estado del arte, a continuación, se presentan los trabajos más relevantes.

Comenzando por los trabajos que evalúan el cambio en los criterios operativos, debidos principalmente a un exceso de oleaje interior en las dársenas (agitación portuaria) o un exceso de rebase sobre las estructuras, destacar el trabajo presentado por Camus et al., 2019 por llevar a cabo un análisis probabilista a escala local de los efectos del cambio climático en la operativa de los puertos de pequeño/mediano tamaño. Sierra et al., 2017 y Campos et al., 2019, en comparación con el trabajo anterior, realizan un análisis nuevamente a escala local basado en proyecciones dinámicas, pero con un enfoque determinista. De los análisis de impactos del cambio climático a escala regional, mencionar los trabajos de Sierra et al., 2016 y Camus et al., 2017 como ejemplos de estudios enfocados en el rebase y Sierra et al., 2015 en la agitación.

En cuanto a los trabajos que evalúan la influencia del cambio climático en la fiabilidad de las estructuras costeras, todos se llevan a cabo en una escala local de alta resolución. No obstante, existe una mayor heterogeneidad si atendemos al criterio enfoque determinista/probabilista. Con el primer tipo de tratamiento de las incertidumbres destaca el trabajo presentado por Burcharth et al., 2014 como ejemplo conceptual de una metodología de fácil aplicación para adaptar las infraestructuras costeras ante cambios en las condiciones climáticas modificando la geometría inicial. Para ello se pueden colocar piezas de un tamaño superior, bermas adicionales o incluso mantos exteriores extras. No obstante, estas modificaciones suponen cambios en el comportamiento hidrodinámico de la obra, por ejemplo, en cuanto a su permeabilidad, siendo necesario aplicar nuevas formulaciones que tengan en cuenta dichas modificaciones tal y como se explica en Eldrup et al., 2019. Por su parte Chini et al., 2012 presenta un trabajo nuevamente siguiendo un enfoque determinista, en el que determina como se incrementan los ratios de rebase por aumento del oleaje incidente y nivel del mar de cálculo.

No obstante, a diferencia del campo de la operatividad, las técnicas probabilistas han tenido un mayor recorrido en el ámbito de la verificación de la fiabilidad estructural. Trabajos basados en métodos analíticos como FORM o SORM (Castillo et al., 2006) o como en la técnica de Monte Carlo (Lara et al., 2019 y Tomás et al., 2019) han sido presentados como ejemplos metodológicos de como introducir las

técnicas probabilistas en la verificación estructural de las obras litorales o incluso en la optimización de su diseño en un entorno climático cambiante (Galiatsatou et al., 2018). No obstante, la razón principal por la que los trabajos de verificación estructural han sido más estudiados con estas técnicas que los enfocados en la operatividad obedece a como se estudian los forzamientos climáticos con capacidad de desencadenar un fallo estructural. Dado que los eventos extremos más disruptivos tienen una probabilidad de ocurrencia muy baja, aunque son posibles, numerosos estudios han lidiado con el análisis estocástico de las variables climáticas (Lira-Loarca et al., 2020 y Lucio et al., 2020). El objetivo de estos trabajos es estudiar probabilísticamente las variables ambientales con capacidad de generar daños, para alimentar modelos probabilísticos de análisis de la fiabilidad estructural. Esta técnica basada en los denominados emuladores climáticos que alimentan modelos de comportamiento estructurales ha sido aplicada por Lucio et al., 2019 para cuantificar probabilísticamente como el aumento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático puede producir cambios en los criterios de diseño.

En cuanto a las guías existentes en otros países para la evaluación de los efectos del cambio climático en las obras de protección del litoral dentro de su aproximación de adaptación al cambio climático, destacar que la mayoría de éstas únicamente incorporan la influencia del aumento del nivel medio del mar. Máxime, en caso de considerar cambios en otras variables climáticas con potencial capacidad de inducir impactos, como el oleaje, este se incorpora a través de una tasa de cambio fija y determinista sin considerar los efectos locales tomando únicamente como referencia lo recogido en informes tales como los del IPCC. Entre aquellos países que incorporan la influencia conjunta del aumento del nivel medio del mar y el oleaje se encuentra Gran Bretaña, a través de su *“Climate Change Adaptation Report (2016)”* dentro del plan de actuación ante el cambio climático. Para ello propone analizar una serie de escenarios futuros estáticos preestablecidos (por ejemplo, en 2050 en un escenario RCP8.5), definiendo la tasa de aumento en tanto por ciento del aumento del nivel medio del mar, frecuencia e intensidad del oleaje. Las directrices así recogidas en la guía británica instan a los gestores portuarios y del litoral a cuantificar la reducción del periodo de retorno de los eventos extremos con el fin de cuantificar el impacto en su material inmovilizado. Visión similar considerando la única amenaza de aumento del nivel medio del mar se encuentra en la aproximación de Estados Unidos, tanto en lo dispuesto por la Agencia de Protección Ambiental en *“Planning for Climate Change Impacts at U.S. Ports (2008)”* como por el cuerpo de ingenieros en *“Procedures to evaluate sea level change: Impacts, Responses and adaptation (2019)”*. Otros países como Japón únicamente dictan una serie de recomendaciones de buena práctica, sin llegar a esbozar una metodología y procedimiento a aplicar (*“National Plan for Adaptation to the impacts of Climate Change (2015)”*). En este sentido merece la pena destacar el marco conceptual propuesto por la administración central australiana, compuesta por una serie de cinco documentos centrada en definir, evaluar y prepararse para los potenciales efectos del cambio climático en puertos (Scott et al., 2013). Entre estos cinco documentos merece la pena destacar los resultados del primero (McEvoy et al., 2013) que pretende sentar las bases para entender los cambios futuros en las dinámicas marinas. Así pues, tras realizar una serie de proyecciones climáticas futuras empleando un único modelo climático, se establecen una serie de indicadores de cambio particularizados a lo largo de la costa australiana. Estos escenarios de cambio climáticos basado únicamente en indicadores, se emplea en los documentos dos (Chhetri et al., 2013) y tres (Kong et al., 2013) para cuantificar de forma independiente las implicaciones desde el punto de

vista operativo y estructural, respectivamente. Finalmente, Holanda cuenta con una ambiciosa política medio ambiental recogida en dos planes estatales: “*National Climate Adaptation Strategy ‘Adapting with Ambition’ (2016)*” y “*Delta Plan on Spatial Adaptation (2019)*”. El primero de los programas describe los principales riesgos futuros que tendrá que encarar el país, haciendo especial énfasis en la inundación costera a lo largo de su litoral. El segundo de los programas trata de ser un plan multisectorial implicando a las diferentes administraciones en la toma de medidas de adaptación al cambio climático. A pesar de lo extenso de ambos programas, centrándose en las obras de protección del litoral, únicamente se recoge la alta peligrosidad futura por el efecto del aumento del nivel medio del mar con inundaciones prácticamente permanentes de zonas litorales actuales. Cabe citar por último la guía metodológica propuesta por el PIANC, asociación internacional de alta relevancia en el ámbito marítimo y portuario, en PIANC 178-2020. Basándose en proyecciones al final del periodo del escenario climático analizado, al igual que el documento australiano, e incorporando relaciones de dependencia entre el cambio esperado en nivel del mar y el oleaje, evalúa la tasa de cambio de los impactos en entornos portuarios.

En vista de lo anterior, es preciso elaborar nuevas metodologías que evalúen conjuntamente los criterios operacionales y estructurales con el objetivo de cuantificar los impactos derivados del cambio climático en las obras de protección (Toimil et al., 2020). Éstas deben articularse en (1) una caracterización fidedigna de las condiciones climáticas históricas y futuras, con una buena representatividad de las condiciones del régimen medio y de los eventos extremos. En este sentido, disponer de proyecciones dinámicas de las variables oceánicas constituye el punto de partida. Así mismo, es necesario (2) hacer uso de modelos y/o métodos de última generación para resolver los procesos de propagación e interacción flujo estructura. Finalmente (3) el análisis debe llevarse a cabo siguiendo una aproximación probabilista con el objetivo de gestionar el entorno de incertidumbre inherente del cambio climático. Tal desarrollo metodológico es requerido para poner a disposición de los gestores españoles del litoral de una herramienta de ayuda a la toma de decisiones que permite, en primer lugar, cuantificar los impactos derivados del cambio climático de forma realista para, en segundo lugar, implementar medidas de adaptación flexible eficientemente conociendo los múltiples escenarios futuros.

En este sentido, en el ámbito español destacan las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM, Puertos del estado) como marco normativo técnico. Dichas recomendaciones no sólo contemplan el proyecto y obra de infraestructuras específicamente portuarias, sino que también son aplicables a obras de protección del litoral. Además, la serie de recomendaciones ROM tienen un marcado carácter probabilista tanto en la definición de las variables o drivers climáticos, como en el estudio de sus impactos en las obras marítimas, y en concreto la verificación de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de las obras marítimas a lo largo de su vida útil. Dicha aproximación probabilista tiene su máximo referente en las metodologías de verificación mediante métodos de Nivel III (usualmente implementadas mediante técnicas de simulación numérica, como la de Monte Carlo). Finalmente, como la vida útil de dichas estructuras perdura durante decenas de años, los efectos del cambio climático han de ser tenidos en cuenta. En este sentido cabe destacar que la componente de variabilidad intrínseca hiperanual de los forzamientos climáticos (los denominados hiper ciclos) se

considera en la metodología propuesta al emplear proyecciones climáticas provenientes de reanálisis numéricos.

Por todo lo anterior, el análisis probabilista de los impactos del cambio climático en las obras de protección del litoral, tienen en el marco normativo ROM un claro referente con base en el cual se puede definir la presente metodología de estudio. A continuación, se resumen algunos aspectos relevantes de la ROM 0.0 – 01 en la que se sientan las bases del proyecto de las obras marítimas y que van a integrarse como parte de la nueva metodología propuesta.

En la ROM 0.0 – 01 se especifican, entre otras, las bases de cálculo que en una obra marítima se suele analizar. Para ello previamente se definen los denominados carácter general y operativo de cada tramo de obra marítima, respectivamente determinados por los modos de fallo y parada operativa (Figura 3.). A su vez, el carácter general se define a partir de las repercusiones económicas, sociales y ambientales en el caso de producirse la destrucción de la obra o pérdida total del servicio (modo de fallo asociado a la fiabilidad o la funcionalidad). El carácter operativo se define a partir de las repercusiones económicas, sociales y ambientales cuando la obra deja de operar (modo de parada asociado a la operatividad). Cabe señalar que lo que en la ROM se define como repercusiones económicas, sociales y ambientales representan las consecuencias derivadas de los riesgos asociados al fallo y parada operativa de la obra de protección costera.

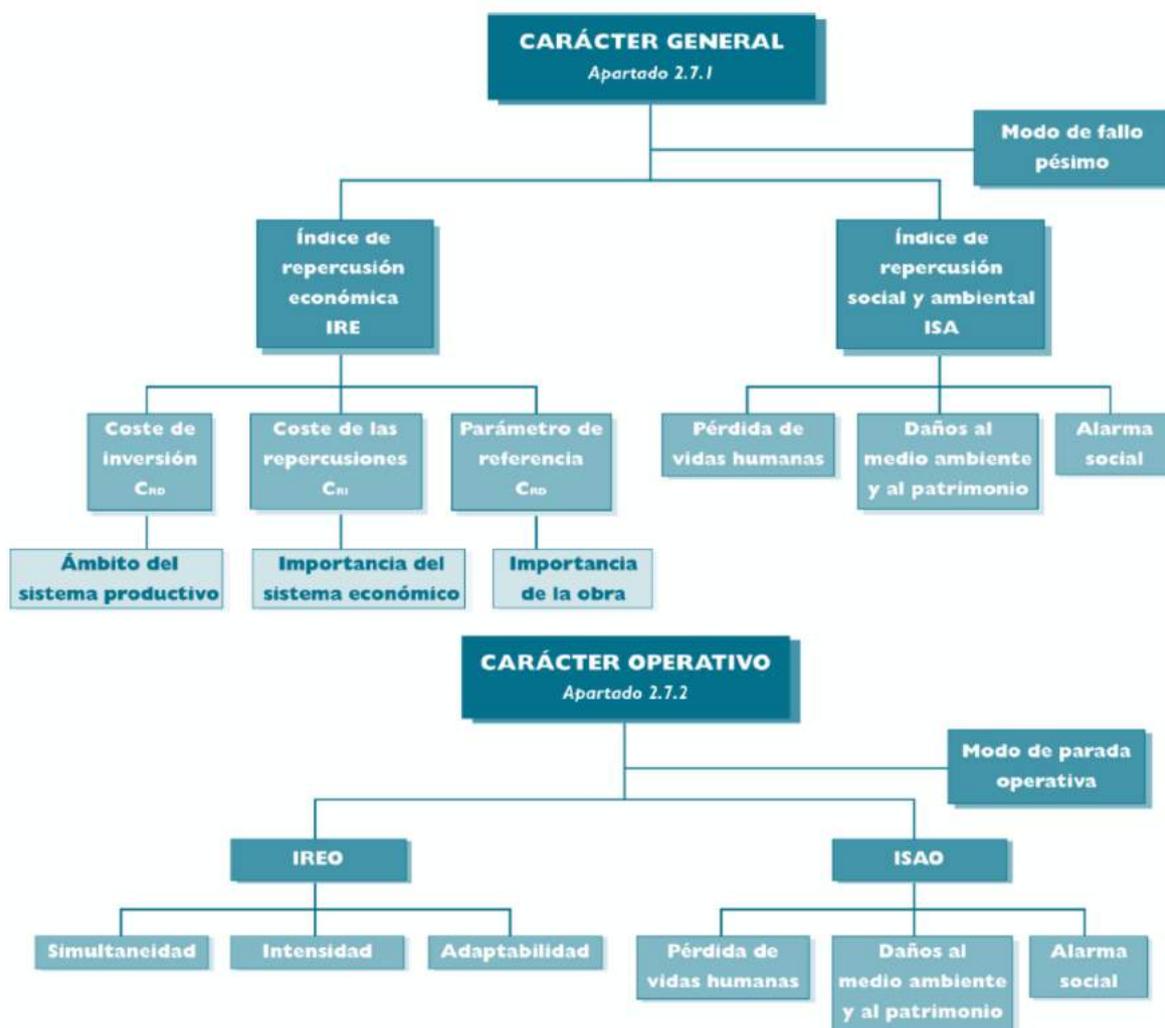


Figura 3. Caracteres general y operativo del tramo de obra (tomado de la ROM 0.0 - 01).

Especificar el carácter general y el carácter operativo de la obra, así como, entre otros, determinar el valor de su vida útil es responsabilidad del promotor de la obra marítima; pero a falta de una definición específica, en la ROM 0.0 - 01 se establece una metodología para definirlos, estableciendo los valores de las bases de cálculo de cualquier obra marítima. Dicha metodología se basa en la definición de una serie de índices que tabulan de manera normalizada las repercusiones económicas, sociales y ambientales.

Con base en ello, el carácter general de la obra se establece en función de los siguientes índices:

- Índice de Repercusión Económica (IRE): Valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción de la obra y por cese o afección de las actividades directamente relacionadas con ella, previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma.

- Índice de Repercusión Social y Ambiental (ISA): Estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: pérdida de vidas humanas, daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.

A su vez, el carácter operativo de la obra se establece en función de los siguientes índices:

- Índice de Repercusión Económica Operativo (IREO): Valora cuantitativamente los costes ocasionados por la parada operativa del tramo de obra.
- Índice de Repercusión Social y Ambiental Operativo (ISAO): Estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse un modo de parada operativa de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: pérdida de vidas humanas, daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y alarma social generada.

A partir de los valores de IRE e ISA obtenidos para el carácter general de la obra y los valores de IREO e ISAO del carácter operativo de la obra en la ROM 0.0 – 01 se recomienda una serie de valores para las bases de cálculo (ver Figura 4):

- Vida útil mínima (V_m): Periodo de tiempo mínimo que transcurre durante la fase de servicio de una obra; se expresa en años. En general corresponde al periodo de tiempo mínimo en el que la obra cumple la función principal para la que fue concebida.
- Máxima probabilidad conjunta de fallo (P_f): Valor máximo admisible de la probabilidad de fallo en la vida útil de la obra frente a todos los modos de fallo principales adscritos a todos los Estados Límite Últimos (ELU) o Estados Límite de Servicio (ELS).
- Operatividad mínima (p): es el valor mínimo de operatividad anual. A su vez, la operatividad se define como el valor complementario de la probabilidad de parada operativa frente a todos los modos de parada principales.
- Número medio de paradas operativas (N_m): Es el número de veces que, en promedio, en el año, un tramo de obra deja de cumplir los requisitos de explotación, debido a la ocurrencia de todos los modos de parada operativas.
- Duración máxima de una parada operativa (D_m): Es el tiempo máximo esperado, en el año, que transcurre desde que se produce una parada operativa hasta que se restablece la explotación del tramo de obra; se expresa en horas.



Figura 4. Valores recomendados en función de los caracteres general y operativo del tramo de obra (tomado de la ROM 0.0 - 01).

Finalmente, en la ROM 1.0 – 09 se proponen una serie de valores para las bases de cálculo a partir del carácter de algunas obras marítimas y portuarias del ámbito costero español. A continuación se recopilan una serie de cuadros que en función del tipo de obra, identifican los valores de IRE e ISA con los valores recomendados de vida útil mínima (Figura 5), probabilidad conjunta de fallo para Estados Límite Últimos y Estados Límite de Servicio (Figura 6). Así como los valores recomendados de operatividad, en función del tipo de obra, para los valores asociados de IREO e ISAO: operatividad mínima (Figura 7), número medio de paradas operativas (Figura 8) y duración máxima de parada operativa (Figura 9).

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA		ÍNDICE IRE ⁷		VIDA ÚTIL MÍNIMA (V _m) ⁷ (años)	
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Puertos abiertos a todo tipo de tráficos	r ₃	Alto	50
		Puertos para tráficos especializados	r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	PUERTO PESQUERO		r ₂	Medio	25
	PUERTO NÁUTICO-DEPORTIVO		r ₂	Medio	25
	INDUSTRIAL		r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	MILITAR		r ₂ (r ₃) ²	Medio (alto) ²	25 (50) ²
	PROTECCIÓN DE RELLENOS O DE MÁRGENES		r ₂ (r ₃) ³	Medio (alto) ³	25 (50) ³
	ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁴		r ₃	Alto
PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		r ₂ (r ₃) ⁵	Medio (alto) ⁵	25 (50) ⁵	
PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		r ₁ (r ₃) ⁶	Bajo (alto) ⁵	15 (50) ⁷	
REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		r ₁	Bajo	15	

¹ El índice IRE se elevará a r₃ cuando el tráfico esté asociado con el suministro energético o con materia primas minerales estratégicos y no se disponga de instalaciones alternativas adecuadas para su manipulación y/o almacenamiento.

² El índice IRE se elevará a r₃ cuando la instalación militar se considere esencial para la defensa nacional.

³ En obras de protección de rellenos o de defensa de márgenes se tomará un índice IRE igual al señalado para el área portuaria en que se localiza.

⁴ Se entienden como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquéllos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.

⁵ El índice IRE se elevará a r₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido esté asociado con el abastecimiento de agua para uso urbano o con la producción energética.

⁶ El índice IRE se elevará a r₂ cuando en su zona de afección se localicen edificaciones o instalaciones industriales.

⁷ Los índices inferiores a r₃ de la tabla se elevarán un grado por cada 30 M€ de coste de inversión inicial de la obra de abrigo.

Figura 5 Valores recomendados de vida útil mínima (tomado de la ROM 1.0 - 09).

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA			ÍNDICE ISA		P_{ELU}	P_{ELS}
ÁREAS PORTUARIAS	COMER-CIAL	Mercancías peligrosas ²	s_3	Alto	0.01	0.07
		Pasajeros y Mercancías no peligrosas ¹	s_2	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique	s_1	No significativo	0.20	0.20
	PESQUERO	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s_2	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s_1	No signif.	0.20	0.20
	NÁUTICO-DEPORT.	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s_2	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s_1	No signif.	0.20	0.20
	INDUS-TRIAL	Mercancías peligrosas ²	s_3	Alto	0.01	0.07
		Mercancías no peligrosas	s_2	Bajo	0.10	0.10
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique	s_1	No significativo	0.20	0.20
MILITAR	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique ¹	s_3	Alto	0.01	0.07	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s_1	No signif.	0.20	0.20	
PROTEC-CIÓN *	Mercancías peligrosas ²	s_3	Alto	0.01	0.07	
	Mercancías no peligrosas	s_2	Bajo	0.10	0.10	
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ³		s_4	Muy alto	0.0001	0.07
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		s_2 (s_3) ⁴	Bajo (alto) ⁴	0.10 0.0001	0.10 0.07
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		s_2 (s_4) ⁵	Bajo (muy alto) ⁵	0.10 0.0001	0.10 0.07
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		s_1	No signif.	0.20	0.20
	<p>* PROTECCIÓN DE RELLENOS O MÁRGENES.</p> <p>¹ En el caso de que en la superficie adosada al dique esté previsto que se ubiquen edificaciones (p.e. estaciones marítimas, lonjas...), depósitos o silos que pudieran resultar afectados en el caso de fallo de la obra de abrigo, se considerará un índice ISA muy alto (s_4) ($P_{ELU}=0.0001$; $P_{ELS} = 0,007$).</p> <p>² Se consideran mercancías peligrosas los grupos de de sustancias prioritarias incluidas en el anejo X de la Directiva Marco del Agua (Decisión 2455/2001/CE), en el inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER: Decisión 2004/479/CE), y en el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías Peligrosas (Real Decreto 145/1989). (Ver ROM 5.1-05).</p> <p>³ Se entiende como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquéllos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.</p> <p>⁴ El índice ISA se elevará a s_3 cuando la toma de agua o el punto de vertido estén asociados con el abastecimiento de agua para uso urbano o industrial o con la producción energética.</p> <p>⁵ El índice ISA se elevará a s_4 cuando en caso de fallo pudieran resultar afectadas edificaciones u otras instalaciones industriales.</p>					

Figura 6 Valores recomendados de máxima probabilidad conjunta de fallo para ELU y ELS (tomado de la ROM 1.0 - 09).

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA		ÍNDICE IREO		$r_{f,ELO}$		
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique a las que afecte el rebase	r_{03}	Alto	0.99	
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías adosadas al dique con adosadas a las que no les afecte el rebase	Con tráfico de graneles	r_{02}^2	Medio	0.95 ¹
			Con tráfico de pasajeros y de mercancía general regulares	r_{03}^2	Alto	0.99 ¹
			Con tráfico de mercancía general tramp	r_{02}^2	Medio	0.95 ¹
	PUERTO PESQUERO		r_{03}	Alto	0.99 ¹	
	PUERTO NÁUTICO-DEPORTIVO		r_{03}	Alto	0.99 ¹	
	INDUSTRIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique a las que afecte el rebase	r_{03}	Alto	0.99	
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique a las que afecte el rebase	r_{02}	Medio	0.95 ¹	
	MILITAR		r_{03}	Alto	0.99	
	PROTECCIÓN DE RELLENOS O DE MÁRGENES		r_{03}	Alto	0.99	
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES		r_{03}	Alto	0.99	
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		r_{03} $(r_{02})^3$	Alto (medio) ³	0.99 $(0.95)^3$	
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		r_{01} $(r_{03})^4$	Bajo (alto) ⁴	0.85 $(0.99)^4$	
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		r_{01}	Bajo	0.85	
	<p>¹ En el caso de que los tráfico sean estacionales, la operatividad mínima se referirá a dicho periodo. ² En el caso de que la intensidad de la demanda sea pequeña (grado de utilización del área abrigada < 40%) los índices obtenidos podrán reducirse un grado. ³ El índice IREO podrá reducirse a r_{02} cuando pueda considerarse que la demanda puede adaptarse a la parada operativa. ⁴ El índice IREO deberá aumentarse a r_{03} cuando su zona de afección sea urbana o industrial.</p>					

Figura 7 Valores recomendados de operatividad mínima (tomado de la ROM 1.0 - 09).

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA			INDICE ISAO	N_m		
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique a las que afecte el rebase	Mercancías peligrosas ¹	s_{o3}	Alto	2
			Pasajeros y Mercancías no peligrosas	s_{o2}	Bajo	5
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías adosadas al dique o sólo con las que no les afecte el rebase		s_{o1}	No signif.	10
	PUERTO PESQUERO			s_{o2}	Bajo	5
	PUERTO NÁUTICO-DEPORTIVO			s_{o2}	Bajo	5
	INDUSTRIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique a las que afecte el rebase	Mercancías peligrosas ¹	s_{o3}	Alto	2
			Mercancías no peligrosas	s_{o2}	Bajo	5
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías adosadas al dique o adosadas a las que no les afecte el rebase		s_{o1}	No signif.	10
	MILITAR	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique a las que afecte el rebase		s_{o3}	Alto	2
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s_{o1}	No signif.	10
PROTECCIÓN*	Con zonas de almacenamiento adosadas al dique a las que afecte el rebase	Mercancías peligrosas ¹	r_{o3}	Alto	2	
		Mercancías no peligrosas	s_{o2}	Bajo	5	
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES			s_{o4}	Muy alto	0
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO			s_{o2} (s_{o3}) ²	Bajo (alto) ³	5 (2)
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES			s_{o1} (s_{o3}) ³	No signif. (alto) ³	10 (2) ³
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS			s_{o1}	No signif.	10
	* PROTECCIÓN DE RELLENOS O MÁRGENES.					
¹ Se considerarán mercancías peligrosas los grupos de sustancias prioritarias incluidas en el anejo X de la Directiva Marco del Agua (Decisión 2455/2001/CEE), en el inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER: Decisión 2000/479/CE), y en el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías peligrosas (Real Decreto 145/1989). (Vre ROM 5.1).						
² El índice ISAO se elevará a s_{o2} cuando la parada operativa pueda tener importantes consecuencias medioambientales.						
³ El índice IREO deberá aumentarse a s_{o3} cuando su zona de afección sea urbana o industrial.						

Figura 8 Valores recomendados de número medio de paradas operativas (tomado de la ROM 1.0 - 09).

ÍNDICE IREO	ÍNDICE ISAO			
	No significativo	Bajo	Alto	Muy alto
Bajo	24 horas	12 horas	6 horas	0
Medio	12 horas	6 horas	3 horas	0
Alto	6 horas	3 horas	1 horas	0

Figura 9 Valores recomendados de duración máxima de parada operativa (tomado de la ROM 1.0 - 09).

Por otro lado, pero también a partir de los índices IRE e ISA, en la ROM 1.0 – 09 se recomienda utilizar distintos métodos de verificación de los modos de fallo y parada operativa. Así, a medida que aumenta la repercusión económica, social y ambiental en el caso de producirse el fallo de la obra, se definen métodos de verificación más precisos, pero a la vez más complejos de aplicar. En la Figura 10 se muestra una tabla con los métodos de verificación propuestos en función de los valores de IRE e ISA calculados para la obra. El número entre corchetes indica [1]: Método del coeficiente de seguridad global, (Nivel I); [2]: Métodos de los Coeficientes Parciales, (Nivel I); [3] Métodos de Nivel II; y [4] Métodos de Nivel III. Por lo que cuando los valores de IRE e ISA son ambos Medios o Bajos, se recomiendan métodos de verificación con Nivel I y en el caso de que alguno sea Alto o Muy Alto, se recomiendan utilizar algún método de orden jerárquico superior (Nivel II o Nivel III).

IRE	No significativo	Bajo	Alto	Muy Alto
Bajo	[1]	[2]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]
Medio	[2]	[2]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]
Alto	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]

Figura 10 Métodos de verificación en función del IRE e ISA (tomado de la ROM 1.0 - 09).

2.3. Desarrollo de la metodología.

2.4.1. Objetivos e hipótesis de trabajo

El objetivo principal de este apartado, tal y como se ha presentado anteriormente, es desarrollar una metodología, que, de manera probabilística, permita evaluar los impactos del cambio climático sobre la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de las obras de protección de la costa. Dicha metodología contempla la determinación de la incertidumbre asociada a los impactos del cambio climático sobre dichas obras de protección.

Tras la revisión de las metodologías existentes y con base en las bases de datos generadas en el presente proyecto, se definen una serie de hipótesis de partida a ser tenidas en cuenta en la definición y desarrollo de la metodología:

- Las obras de protección del litoral, objeto de estudio, incluyen una amplia muestra de tipologías distintas (diques exentos, espigones, paseos marítimos, muros, etc.). Las tipologías más representativas y comunes de estas obras están incluidas en el alcance de la metodología.

- La metodología tomará como referencia el marco normativo de ámbito nacional: ROM (Recomendaciones de Obras Marítimas), la Ley de Costas, la transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva de Inundaciones; así como el marco de análisis definido por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático).
- El impacto del cambio climático en las obras de protección se circunscribe al análisis de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de dichas obras. En la metodología no se evaluará específicamente el impacto sobre el sistema completo o zona protegida por las obras.
- La fiabilidad, funcionalidad y operatividad de las obras se definirá respectivamente a través de la definición de los modos de fallo hidráulicos de los Estados Límite Últimos y Estados Límite de Servicio (para fiabilidad y funcionalidad) y los modos de parada operativa climática (para operatividad). Dichos modos se calcularán específicamente para cada obra, no mediante indicadores, sino resolviendo las ecuaciones de verificación concretas de cada uno.
- Las ecuaciones de verificación de dichos modos de fallo o parada se cuantificarán a partir del uso de formulaciones semi-empíricas del estado del arte o en caso de no existir, mediante el uso de modelos numéricos de interacción flujo-estructura, por ejemplo. Para ello será necesario caracterizar la geometría y características concretas de las obras a estudiar.
- Se hará uso de las proyecciones dinámicas (resultados de la Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019) de las variables que condicionan los modos de fallo y parada operativa de las obras: oleaje, viento y nivel del mar.
- Dentro de la metodología, será necesario realizar el downscaling de las dinámicas para definir el oleaje y nivel del mar a pie de obra, teniendo en cuenta la batimetría específica de cada zona de estudio.
- La definición de las dinámicas a pie de obra o peligrosidad permitirá caracterizar la variación inter-anual e intra-anual de la peligrosidad.

2.4.2. Metodología general

Atendiendo a los objetivos e hipótesis de partida expuestos en el apartado anterior, se define una metodología general para su aplicación en tramos costeros de interés, que se organiza en 7 pasos metodológicos que a su vez se agrupan en tres fases (tal y como se representa en la Figura 11): definición del caso de estudio, downscaling de dinámicas y evaluación de los impactos. A su vez, las técnicas para caracterizar las dinámicas y evaluar los impactos en la operatividad serán distintas a las utilizadas para estudiar la fiabilidad y funcionalidad de las obras. Las técnicas para definir los modos de parada operativa (operatividad) atenderán a la caracterización del régimen medio o funciones de distribución de las dinámicas (sub-metodología “A”), pues la parada operativa se define en el intervalo de tiempo del año; sin embargo, las técnicas para definir los modos de fallo hidráulico del Estado Límite Último y Estado Límite de Servicio (fiabilidad y funcionalidad) atenderán a la caracterización del régimen extremal o funciones de distribución de los valores extremos de las dinámicas (sub-metodología “B”), pues los Estados Límite se definen en la vida útil de la obra (suelen ser de varias decenas de años, ver valores para obras en áreas litorales de la Figura 5).

Método general:

Definición del caso de estudio:

- 1- Definición tramo costero y su clima marítimo
- 2- Definición infraestructuras costeras
- 3- Definición modos de fallo y parada

Downscaling:

- 4- Propagación de N series de oleaje históricas y 4N futuras.

5A- Régimen Medio

5B- Régimen Extremal

Definición del oleaje incidente en M puntos a pie de obra

Evaluación de Impactos

6A- Modo de parada operativa

6B- Modos de fallo hidráulico

N+4N funciones de densidad (PDF) de modos de fallo y parada.

- 7- Cambios en 4N PDF futuros frente a N históricos para fiabilidad, funcionalidad y operatividad

Figura 11 Metodología general para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección del litoral.

La primera de las fases de la metodología general es la **definición del caso de estudio**, en la que se recopila toda la información necesaria para la aplicación de la metodología, así como se definen las bases de cálculo. Dicha fase se subdivide en tres pasos metodológicos:

1. Definición del tramo costero y su clima marítimo. Se define la zona o tramo costero a estudiar, recopilando la batimetría de detalle de la zona e identificando los nodos o puntos más representativos de la base de datos de las proyecciones dinámicas de alta resolución de variables marinas generadas en la Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019). Dicho tramo costero, en coherencia con la resolución espacial de las proyecciones dinámicas, tendrá una extensión en el orden de los 10 km. Sin pérdida de generalidad, si se dispone de series temporales suficientemente largas (mínimo 20 años) provenientes de una fuente diferente a las proyecciones dinámicas generadas en la anteriormente citada Tarea 2 pueden aplicarse los métodos y técnicas desarrollados en el presente proyecto. En cualquier caso, dado que se han desarrollado forzamientos de alta resolución a lo largo de la costa española, la metodología presentada parte de la hipótesis de que dicha información climática se encuentra disponible en cualquier obra del litoral español.

2. Definición de las infraestructuras costeras. Dentro del tramo de estudio se localizan e identifican las infraestructuras costeras u obras, caracterizando la geometría y características de cada una de ellas, así como las bases de cálculo con las que fueron proyectadas (según ROM 1.0-09, ver de Figura 5 a Figura 9): Vida útil mínima (V_m), Máxima probabilidad conjunta de fallo del Estado Límite Ultimo ($P_{f,ELU}$), Máxima probabilidad conjunta de fallo del Estado Límite de Servicio ($P_{f,ELS}$), Operatividad mínima (p), Número medio de paradas operativas (N_m), Duración máxima de una parada operativa (D_m). En caso el caso de obras de nueva construcción la metodología propuesta es igualmente de aplicación, verificándose que el diseño realizado cumple los requerimientos ROM en cualquier escenario proyectado de cambio climático.
3. Definición de los modos de fallo y parada. Para cada infraestructura costera se definen los modos de fallo hidráulicos del ELU y ELS, los modos de parada operativa a ser analizados, así como las ecuaciones de verificación y umbrales que rigen el fallo de cada uno de ellos. En general, las ecuaciones de verificación de dichos modos de fallo o parada se cuantificarán a partir del uso de formulaciones semi-empíricas del estado del arte pero, en el caso de no existir, se definirán a partir del uso de modelos numéricos de interacción flujo-estructura o equivalentes. En este apartado, es importante definir las variables climáticas de las que dependen los modos de fallo y parada a analizar, pues en base a ellas se construirá la metodología de downscaling del oleaje y evaluación de impactos.

En la definición del caso de estudio se identifica, para cada tramo, los nodos más representativos de la base de datos de las proyecciones dinámicas de alta resolución espacial, aproximadamente cada 8km. En dichos nodos se tiene series horarias de variables de oleaje (altura de ola significativa, periodo medio, periodo de pico y dirección media), viento (modulo y dirección a 10 m) y marea meteorológica, para cada uno de los N modelos climáticos (GCM o RCM). Para cada variable y modelo climático se tienen series continuas de unos 20 años para distintos periodos: periodo histórico (1985-2005), periodo futuro a medio plazo (2026-2045) y periodo futuro a largo plazo (2081-2100); a su vez, para cada periodo futuro se tienen dos escenarios climáticos: RCP4.5 y RCP8.5. En total se tienen $2 \times 2N = 4N$ series de variables futuras y N series de variables históricas de proyecciones dinámicas. En caso de disponer de series temporales de las variables climáticas provenientes de otras fuentes, los métodos y técnicas son igualmente aplicables.

Para conformar el nivel del mar se define, además de la marea meteorológica, la marea astronómica y el aumento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático (ANMM). Considerando la marea astronómica como determinista, se puede obtener para cada nodo la correspondiente serie horaria de marea astronómica continua desde 1985 hasta 2100. Finalmente, el ANMM se define para los mismos periodos y escenarios que el resto de las variables, dos periodos futuros: a medio plazo (2026-2045) y a largo plazo (2081-2100) y para cada uno de ellos, dos escenarios climáticos: RCP 4.5 y RCP8.5. Cabe señalar que la variable ANMM se define a través de una serie de estadísticos representativos de cada periodo y escenario futuro, empleando para ello la serie continua de ANMM. Así se consigue caracterizar la incertidumbre de las variables, para cada escenario y periodo, de todas las dinámicas afectadas por el cambio climático.

Como se ha comentado con anterioridad, a pesar de tener toda la información climática a una muy alta resolución espacial, en el orden de los 8 km, aún no es suficiente para definir con precisión los impactos sobre las obras de protección, por ello se incorpora dentro de la metodología general la segunda fase: downscaling (regionalización).

El downscaling de las dinámicas tiene como objetivo definir la peligrosidad o las dinámicas a pie de obra que condicionan la fiabilidad, funcionalidad u operatividad de la infraestructura costera. Dichas dinámicas son el oleaje y el nivel del mar. En cuanto a la definición del nivel del mar a pie de obra (composición de la marea astronómica, marea meteorológica y el aumento del nivel medio del mar), se considera que es suficientemente adecuado usar para ello directamente los valores definidos en los nodos a 8 km de resolución. Esto lleva implícito que la propagación de la onda de marea hasta la costa es despreciable, lo cual es válido para los tramos de costa abiertos al oleaje exterior, debido a la configuración batimétrica de la plataforma continental española, pero no es válido para tramos costeros del interior de rías o estuarios. En los casos en los que las obras de protección estén situadas en tramos costeros del interior de rías o estuarios o en los que el nivel del mar esté afectado por el régimen de caudales fluviales, deberá ser tenido en cuenta específicamente en la aplicación de la presente metodología introduciendo la componente del nivel del mar correspondiente a la descarga fluvial en los mismos términos que la componente marina (marea meteorológica).

En cuanto a la definición del oleaje a pie de obra, no se considera adecuado usar para ello directamente los valores definidos en los nodos a 8 km de resolución. Es necesario resolver los procesos de propagación costera que interactúan con la batimetría: refracción, asomeramiento, rotura, generación local, etc. ya que modifican sustancialmente los valores del oleaje a medida que éste se aproxima a la costa. Para ello, en esta fase de la metodología se resuelve el downscaling del oleaje, a partir de la información batimétrica de detalle en la zona de estudio y utilizando la información de oleaje, viento y nivel de los nodos definidos en la fase anterior. Dicho downscaling se subdivide a su vez en dos pasos metodológicos:

4. Propagación de N series de oleaje histórica y 4N futuras. Se propaga eficientemente la gran cantidad de series de 20 años de estados de mar horarios hasta pie de obra. De forma coherente con la metodología general, para permitir la caracterización de la incertidumbre del oleaje a pie de obra debida al cambio climático, para cada escenario y periodo. Para ello se definen dos aproximaciones distintas (Aproximación I y Aproximación II) basadas en modelos numéricos o fórmulas semi-empíricas para resolver los procesos de propagación y rotura del oleaje. Las características de ambas aproximaciones se explicarán en los apartados siguientes.
5. Caracterización del régimen medio y régimen extremal. A partir de las series de oleaje propagadas a pie de obra se caracteriza el régimen medio de oleaje (5A) y el régimen extremal de oleaje (5B).

Finalmente, la tercera de las fases de la metodología general es la evaluación de impactos del cambio climático sobre la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de las obras del tramo de estudio. Dicha fase se subdivide en dos pasos metodológicos:

6. Evaluación de los modos de fallo y parada. El impacto del cambio climático sobre la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de las obras se evalúa respectivamente a través de la resolución de las ecuaciones de verificación definidas para los distintos modos de fallo hidráulicos del Estados Límite Últimos y Estados Límite de Servicio (para fiabilidad y funcionalidad, 6B) y los modos de parada operativa climática (para operatividad, 6A). Como toda la metodología tiene un marcado carácter probabilista, se definen las N funciones de densidad históricas y las 4N funciones de densidad futuras de cada uno de los modos de fallo y parada definidos.
7. Evaluación de impactos. La evaluación de los impactos se realiza mediante el análisis de los cambios de las 4N funciones de densidad futuras (representativas de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad) con respecto a las N funciones de densidad históricas.

El desarrollo de cada uno de los pasos metodológicos puede implicar una gran complejidad y necesidades de cálculo, debido a ello, a continuación, se definen dos aproximaciones metodológicas distintas:

- **Aproximación I:** Downscaling avanzado
- **Aproximación II:** Downscaling simplificado

Tal y como se explica a continuación, las diferencias entre ambas aproximaciones metodológicas radican fundamentalmente en la aplicación de la fase de downscaling y su implicación en la fase de evaluación de impactos. Sin embargo, la definición del caso de estudio, es igual en las dos aproximaciones.

2.4.3. Aproximación I

La Aproximación I desarrolla por completo los objetivos planteados en la metodología general utilizando una técnica de regionalización de las dinámicas más avanzada que la de la aproximación simplificada. Se definen las mismas 3 fases (definición del caso de estudio, downscaling de dinámicas y evaluación de los impactos), que a su vez se organizan en 7 pasos metodológicos, tal y como se resumen en la Figura 12. A continuación, se desarrolla cada uno de los pasos específicos de la aproximación I, salvo los pasos 1, 2 y 3 de la definición del caso de estudio (primera fase del método) pues no se incorpora ninguna modificación respecto a lo explicado en el apartado anterior.

APROXIMACIÓN I:

Definición del caso de estudio:

- 1- Definición tramo costero y su clima marítimo
- 2- Definición infraestructuras costeras
- 3- Definición modos de fallo y parada

Downscaling: Propagación de N series de oleaje históricas y 4N futuras.

4-I Downscaling híbrido con modelo SWAN

5A-I Régimen Medio

Series horarias de 20 años

5B-I Régimen Extremal

Emulador Clima

5AB-I.1 Selección MAXDISS

5AB-I.2 Ejecución SWAN

5AB-I.3 Reconstrucción RBF

Definición del oleaje incidente en M puntos a pie de obra

Evaluación de Impactos

6A-I Modo de parada operativa

Operatividad mínima
Número medio de paradas
Duración máxima de paradas

6B-I Modos de fallo hidráulico

Ratios de fallo anual
Prob. fallo ELU en la vida útil
Prob. fallo ELS en la vida útil

N+4N funciones de densidad (PDF) de modos de fallo y parada.

7- Cambios en 4N PDF frente a N PDF históricos para fiabilidad, funcionalidad y operatividad.

Figura 12 Aproximación metodológica I para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección del litoral.

4-I: Downscaling híbrido

Para resolver los procesos de propagación del oleaje desde los nodos definidos en las proyecciones dinámicas (resultado de la Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019)) que cuentan con una resolución de 8 km, hasta el pie de cada una de las obras a analizar donde se pretende obtener una resolución del orden de decenas de metros, se hace uso de una metodología híbrida de downscaling basada en las técnicas desarrolladas en Camus et al., 2011. La aplicación de dicha metodología hará uso de batimetrías de detalle específicas de la zona de estudio, si estuvieran disponibles, para llegar, como se ha dicho, a resoluciones espaciales del orden de los 25 m – 50 m. En la Figura 13 se presenta un ejemplo de la configuración de las mallas necesaria de la propagación del oleaje para generar la regionalización de la información de oleaje desde los nodos en los que se cuenta con los datos de las proyecciones dinámicas de los diferentes modelos climáticos hasta el puerto de Candás (Principado de Asturias).

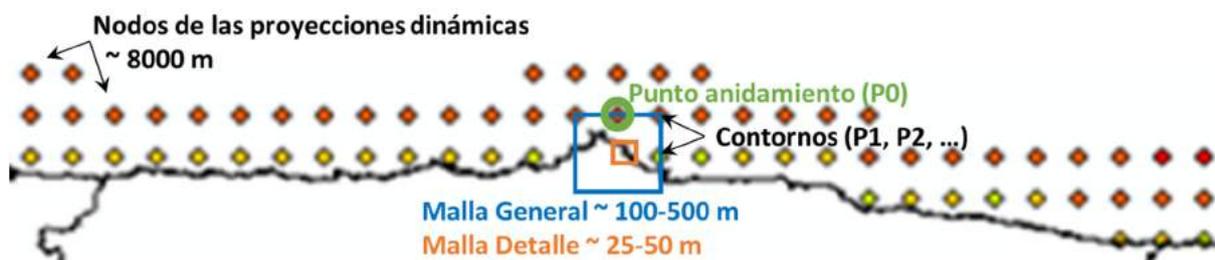


Figura 13 Esquema de anidamiento de mallas de propagación y resolución espacial de las mismas, para resolver el downscaling del oleaje desde los nodos de las proyecciones dinámicas hasta la malla de detalle en el Puerto de Candás (Principado de Asturias).

La metodología híbrida para realizar el downscaling del oleaje ha sido aplicada con asiduidad desde Camus et al., 2013, verificándose su eficiencia y utilidad. Dicha metodología combina la propagación del oleaje mediante la ejecución de un número seleccionado de casos con el modelo numérico SWAN (Booij, et al., 1999), junto con sofisticadas técnicas matemático-estadísticas para la reconstrucción de las series de oleaje en los puntos de interés (M puntos). El modelo SWAN es uno de los más usados en la literatura para simular el oleaje en profundidades intermedias y reducidas. SWAN es un modelo de tercera generación que resuelve los siguientes procesos: generación de oleaje por viento, propagación del oleaje en el tiempo y el espacio, asomeramiento, refracción, triadas e iteraciones cuádruples del oleaje, disipación por “whitecapping”, fricción con el fondo, rotura por fondo y “set-up” entre otros. Lo cual garantiza resolver correctamente todos los procesos necesarios de propagación costera y definir correctamente el oleaje a pie de obra. Cabe señalar, por su importancia, que la resolución de los procesos no lineales de rotura del oleaje están incluidas en el modelo numérico.

Utilizando la configuración de la Figura 13 como ejemplo ilustrativo, en general, se definirá un único punto de anidamiento (P0) para cada zona de estudio. Para dicha zona se recomienda utilizar una extensión del orden de 10 km sobre la línea de costa, acorde con la resolución espacial de los nodos de las proyecciones dinámicas de partida que, en este caso es de 8 km. También condicionado por la distribución de los nodos de las proyecciones dinámicas, las mallas de propagación se configuran, en general, rectangulares y orientadas al Norte, Este, Sur u Oeste (no inclinadas). En cuanto a las dinámicas a utilizar para el downscaling, se utilizarán como forzamientos las series dinámicas de oleaje y nivel del mar en el punto de anidamiento (P0). Se verificará que el oleaje en el punto de anidamiento en ningún caso esté en rotura ($\text{profundidad} > 0.55 \cdot H_s$) para que la rotura sea resuelta directamente por el modelo numérico SWAN. Dado que el punto de anidamiento está relativamente cerca de la costa no se considera la generación local de oleaje en los últimos 10 km de propagación y, por tanto, no se incluirá el viento local. El nivel del mar se considera constante en las mallas de propagación, y compuesto por las series de marea astronómica, marea meteorológica y aumento del nivel medio del mar (ANMM).

Siguiendo la técnica establecida en Camus et al. 2019, para incorporar probabilísticamente la incertidumbre del ANMM (para distintos periodos y escenarios climáticos), en esta metodología se caracterizará la contribución del ANMM al nivel del mar por medio de 10 deciles equiprobables de la función de densidad de ANMM al final del periodo de estudio (ver Figura 14). Cabe señalar que para obtener los deciles, se ha ajustado una distribución Log-Normal a la media y desviación estándar de

las proyecciones regionalizadas de Slangen et al. 2014. Esta información está caracterizada en los nodos definidos en las proyecciones dinámicas (resultado de la Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019)).

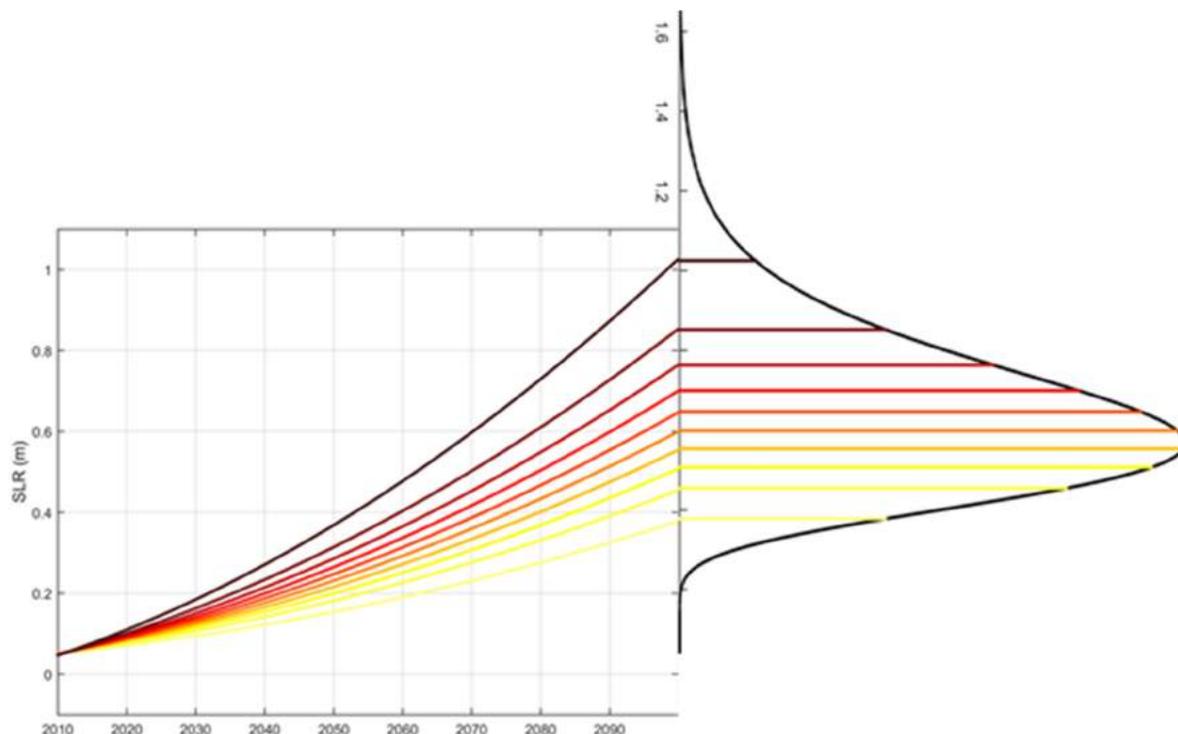


Figura 14 Ejemplo de función de distribución Log-Normal de ANMM, regionalizada en un nodo según Slangen et al., 2014, para el escenario RCP 8.5 y el año 2100, caracterizada por 10 deciles equiprobables.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de las obras de protección se encuentran en profundidades reducidas y, por tanto, condicionadas por la rotura del oleaje, se considera crucial la correcta representación de los procesos de rotura, que a su vez depende de la calidad de la caracterización, no sólo del oleaje sino también de la batimetría de detalle y de todas las componentes del nivel del mar. Por ello, la presente metodología de downscaling, hace especial hincapié en una adecuada caracterización probabilística del nivel del mar (ANMM) y en la resolución de los procesos de rotura mediante el modelo numérico SWAN.

Por otro lado, y tal y como se explicará a continuación, la caracterización intra-anual de los regímenes de oleaje y niveles se realiza a escala mensual, para representar tanto la variación invierno/verano en la severidad del oleaje, mareas meteorológicas, etc. así como la influencia de los solsticios de verano e invierno en la caracterización de la marea astronómica (mareas vivas y mareas muertas) que tanto influyen en los procesos de rotura del oleaje.

Por lo tanto, a partir de las series de Hs, Tm, Tp, Dir (de oleaje), MM (marea meteorológica), MA (Marea astronómica) y los 10 deciles de ANMM (ANMM 1, ... 10) en el nodo P0 de anidamiento, se aplica la metodología de downscaling híbrido para propagar las N series horarias de oleaje histórica (para cada uno de los modelos climáticos, GCM o RCM, en el periodo de referencia, 1985-2005) y las 4N series horarias de oleaje futuras (para los dos escenarios climáticos, RCP4.5 y RCP8.5 de cada uno de los dos

periodos futuros, 2026-2045 y 2081-2100) hasta los M puntos de interés. Cada una de dichas N+4N series está compuesta por aproximadamente 20 años continuos de estados de mar horarios.

En función de si es preciso la caracterización del régimen medio de oleaje (cuando sea necesario definir la operatividad de las infraestructuras costeras) o del régimen extremal de oleaje (cuando sea necesario definir la fiabilidad o funcionalidad de las infraestructuras costeras) o los dos, se definen los siguientes pasos metodológicos del downscaling híbrido.

5A-I: Régimen medio

Dado que la operatividad de las infraestructuras costeras se evalúa en el año, tal y como se recoge en los criterios técnicos de la ROM, y que como resultado de este proyecto se han generado series temporales horarias con una extensión de 20 años, no es necesario la generación sintética de eventos correspondientes al régimen medio para evaluar los modos de parada adscritos al estado límite operativo. Es por ello por lo que el régimen medio a pie de obra queda definido, en los escenarios futuros, por las 4N series de estados de mar propagadas a los diez deciles de ANMM (40N de aquí en adelante) y por las N series temporales de estados de mar en el periodo histórico. Es decir, el régimen medio de la obra de protección costera se define por el forzamiento de 40N+N series horarias de oleaje y nivel habiéndose propagado siguiendo la metodología de downscaling híbrido anteriormente descrita. Este proceso es sumamente importante, pues el nivel del mar condiciona la altura de ola a pie de dique ya que modifica los procesos de transformación del oleaje, y una evaluación fiable de los modos de parada requiere no únicamente considerar cambios en el nivel del mar, sino la influencia de éste en el oleaje.

5B-I: Régimen extremal

La verificación de los criterios funcionales y de seguridad de las infraestructuras costeras, a diferencia de los asociados a la operatividad, se evalúa en intervalos de tiempo uno o dos órdenes de magnitud superiores, es decir, desde las decenas hasta los cientos de años. Ello significa que los forzamientos climáticos que pueden desencadenar un fallo estructural o funcional en la obra de protección tienen una probabilidad de ocurrencia muy baja, e incluso puede que no hayan existido nunca en las bases de datos, pues éstas tienen una longitud temporal acotada a 20 años. Es por ello por lo que una fidedigna caracterización del régimen extremal requiere aumentar el tamaño muestral de eventos extremos, empleándose para ello el denominado emulador de clima. Esta técnica estadística permite generar sintéticamente eventos extremos a partir de las series temporales horarias de las variables de oleaje y nivel del mar, manteniendo las relaciones estadísticas de multidimensionalidad y no estacionariedad. Es decir, el primer aspecto trata la ocurrencia conjunta de valores poco probables de las variables del clima marítimo (como pueden ser la altura de ola significativa, el periodo medio, la dirección de procedencia del oleaje, el nivel del mar, et.) en la definición de los eventos extremos. Por otra parte, el segundo aspecto, introduce la modulación de éstos en el año presentado una variabilidad mensual que en el caso de la costa española se caracterizan por ser más probables en los meses de invierno. En resumen, se pretende caracterizar el régimen extremal considerando su carácter multidimensional y no estacionario, para ser capaces de simular estadísticamente el mayor rango posible de eventos con incidencia en los modos de fallo a analizar y con una incertidumbre acotada. Para ello, se aplica la técnica de los emuladores climáticos (Lucio et al., 2020) que consta de,

primeramente, una caracterización estadística que recoge el comportamiento multivariado y no estacionario, para posteriormente simular eventos sintéticos basados en la caracterización anterior. Para ello, se propone trabajar a escala mensual, pues permite asegurar al mismo tiempo una buena representatividad del carácter multidimensional y de la variabilidad intra-anual de los eventos extremos. En el Anexo I se encuentra una detallada explicación de la técnica del emulador de clima del régimen extremal.

5AB-I: Régimen medio y extremal

A continuación, se presenta el método de downscaling híbrido propuesto para propagar, desde el punto representativo de aguas profundas hasta el punto de interés en la costa, las proyecciones dinámicas de las variables relevantes, utilizadas para caracterizar el régimen medio, así como los eventos sintéticos, descriptores del régimen extremal. Dicho método combina técnicas estadísticas (selección MAXDISS y reconstrucción RBF) con técnicas numéricas (modelo SWAN), permitiendo realizar las propagaciones de miles de estados de mar, con un coste computacional asequible y de forma fiable.

Dentro de la metodología general que se propone, es necesario propagar hasta el pie de la obra considera dos grandes grupos de forzamientos. Por un lado, cada uno de los eventos del periodo de referencia histórico, tanto los que se incluyen directamente en los resultados de las proyecciones dinámicas como los generados sintéticamente y que se componen de las siguientes variables [Hs, Tm, Tp, Dir, NM=MA+MM]. Por otro lado, es también necesario realizar las propagaciones de los eventos correspondientes a los escenarios de cambio climático y periodos futuros, que se caracterizan por [Hs, Tm, Tp, Dir, NM=MA+MM+ANMM]. Con el fin de optimizar los recursos computacionales, y sin que ello implique una pérdida de fiabilidad en el método, el procedimiento para la transferencia de las dinámicas marinas hasta la zona de estudio se realiza conjuntamente para el régimen extremal y medio. Tal y como se describirá a continuación, la selección de estados de mar a propagar se realizará combinando un subconjunto representativo del periodo histórico (sin ANMM), y otro subconjunto representativo de los escenarios y periodos futuros (con ANMM). Dicha técnica, que se ha denominado MAXDISS de MAXDISSs, permite obtener una muestra representativa de la variabilidad climática sea cual sea su escenario/periodo de estudio/modelo climático. A continuación, dicha muestra se propaga numéricamente mediante el programa SWAN hasta la zona de estudio, para finalmente reconstruir estadísticamente cualquier estado de mar.

- Periodo de referencia histórico:
 - N series temporales horarias (proyecciones dinámicas).
 - N x (NVU x V_m x 12) eventos sintéticos extremos.
- Escenarios y periodos futuros:
 - 4N x 10 ANMMs series temporales horarias (proyecciones dinámicas).
 - 4N x (NVU x V_m x 12 x 10 ANMMs) eventos sintéticos extremos.

5AB-I.1 Selección MAXDISS

El primer paso consiste en la aplicación del algoritmo de máxima disimilitud (MAXDISS) para la identificación de una muestra reducida de tamaño P que sea representativa de la variabilidad climática en el punto seleccionado de profundidades indefinidas (ver Figura15 ; Camus et al., 2011). Dicho algoritmo se inicializa seleccionando un evento en la base de datos origen. Posteriormente, los $P-1$ eventos restantes son seleccionados secuencialmente con la condición de mayor disimilitud en la base de datos de partida respecto al subconjunto ya seleccionado (condición de máxima distancia en el espacio muestral formado por las variables [Hs, Tm, Dir, NM]).

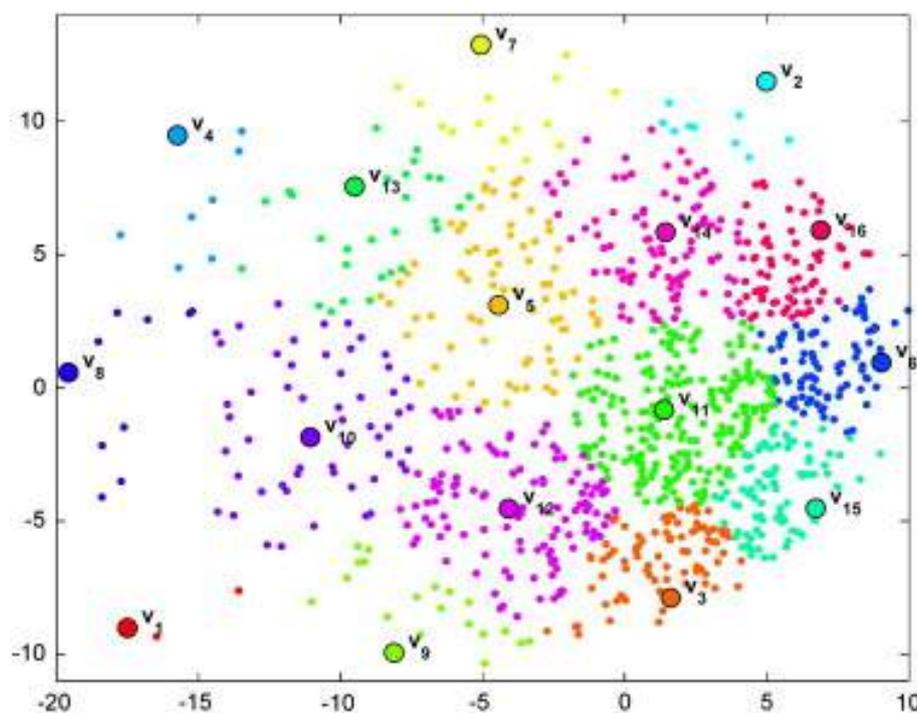


Figura15 Selección del subconjunto de tamaño $P=15$ de una base de datos bidimensional, tras la aplicación del algoritmo MAXDISS (tomado de Camus et al., 2011).

Dada la ingente cantidad de datos (ver Figura 16), se propone aplicar dicho algoritmo de forma recursiva y secuencial, lo que se ha denominado MAXDISS de MAXDISSes. Ello permite concatenar subconjuntos representativos de unas condiciones climáticas dadas, de forma que al aplicar el algoritmo sobre dichos subconjuntos se consiga una selección eficiente (pues se realiza sobre unas muestras varios órdenes de magnitud inferior a las bases de datos de partida) pero fiable, puesto que son representativas de la totalidad de periodos de referencia, escenarios y modelos climáticos.

La metodología propuesta se basa en obtener, en primer lugar, los $N+4N$ subconjuntos formados, cada uno de ellos, con los P eventos representativos, al mismo tiempo, de las condiciones climáticas regulares (régimen medio) y de las extremas; para el periodo de referencia, escenario y modelo climático analizado. Para ello se definen lo que en el esquema de la Figura 16 se denominan muestras conjuntas V . Así pues, para un modelo climático, en un determinado periodo de tiempo y escenario, la muestra V se define por la unión de las series temporales de las proyecciones dinámicas y los eventos sintéticos extremos mediante las variables [Hs,Tm, Dir, NM]. El periodo de pico, aunque no se considera en la selección, se identifica en consonancia con los P estados de mar seleccionados.

Precisamente la variable nivel del mar es la que condiciona el tamaño de P y la diferenciación entre los pasos a seguir en el periodo de referencia histórico, sin ANMM, y los periodos futuros, con ANMM. En cuanto al tamaño de P , dado que el nivel del mar se trata como una variable más de la selección se propone utilizar $P=1000$, de forma que el espacio muestral 4-dimensional quede correctamente representado. En cuanto al método en el periodo de referencia histórico, el nivel del mar es la combinación de marea meteorológica y marea astronómica, mientras que en los escenarios futuros debe añadirse el aumento del nivel medio del mar, que se trata como otra variable estocástica.

Dado que el objetivo principal de la selección es cubrir el rango completo de condiciones climáticas con influencia en la propagación del oleaje hasta la obra para poder inferir (interpolarse) la solicitación sobre ésta, para unas condiciones de oleaje y nivel cualesquiera, en los periodos futuros la muestra V se conforma de forma similar al periodo de referencia histórico añadiendo a cada evento de oleaje el aumento del nivel medio del mar del decil inferior (ANMM 1) y el superior (ANMM 10). Es decir, la muestra conjunta se duplica en cuanto a las variables $[Hs, Tm, Dir]$, al considerar el menos (ANMM 1) y mayor (ANMM 10) aumento del nivel medio del mar esperado, para el escenario y periodo analizado. Ello permite que unas mismas condiciones climáticas $[Hs, Tm, Dir, MM+MA]$, pero con un aumento del nivel medio del mar entre los dos anteriores, pueda interpolarse fiablemente, pues los límites superior e inferior se encuentran correctamente modelados.

La segunda parte del método consiste en realizar una nueva selección sobre la muestra formada por los $N+4N$ subconjuntos de tamaño P previamente seleccionados. El subconjunto resultado de aplicar nuevamente el algoritmo MAXDISS da lugar a la muestra de tamaño $P=1000$ que maximiza la disimilitud del conjunto de periodos de referencia, escenarios y modelos climáticos, tanto desde el punto de vista del régimen medio, como extremal. Es decir, el subconjunto final es representativo de cualquier condición, tanto regular como extrema, bajo cualquier escenario y modelo climático siendo ésta la muestra que se ejecuta numéricamente tal y como se explica a continuación.

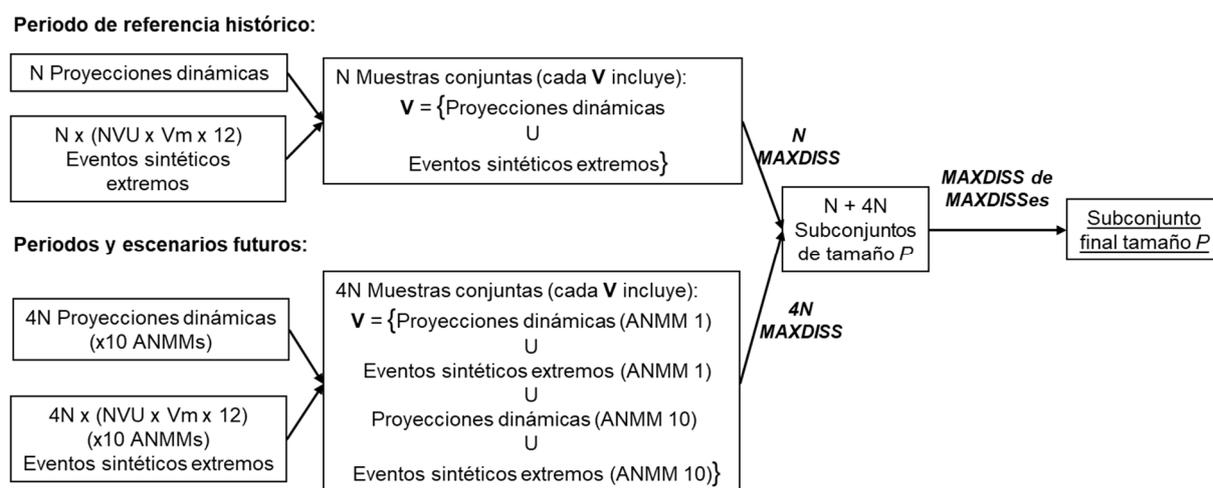


Figura 16 Aplicación del algoritmo MAXDISS para la selección conjunta del régimen medio y extremal para cualquier periodo de referencia, escenario climático y modelo.

5AB-I.2 Ejecución SWAN

El segundo paso en el procedimiento consiste en propagar el subconjunto final, resultado de la aplicación del algoritmo MAXDISS hasta la zona de estudio. Esto se realiza mediante el modelo numérico SWAN (Booij et al., 1999), que incluye los procesos de transformación espacial del oleaje por efecto conjunto de refracción; asomeramiento; disipación de energía por fondo, así como los fenómenos característicos de las profundidades reducidas como la rotura del oleaje y las interacciones no-lineales. SWAN está basado en la ecuación conservación de la acción de onda promediada cuya resolución permite obtener los parámetros espectrales del oleaje en puntos de interés del dominio de propagación. Cualquier modelo que resuelva la misma ecuación puede ser empleado en la aplicación de esta metodología.

La configuración numérica para la propagación de la energía asociada a los estados de mar seleccionados debe realizarse con el fin de conseguir la mejor caracterización posible del oleaje que incide sobre la obra. Es decir, las mallas de cálculo de la configuración numérica, deben incluir todos los elementos batimétricos (tales como bajos, lajas o contornos costeros como cabos) cuya presencia produzca un efecto acusado en la transformación del oleaje. Más aún, dado que el forzamiento del oleaje no es constante a lo largo de los contornos de las mallas de cálculo y que los estados de mar seleccionados han sido obtenidos en un punto específico, debe establecerse una relación de compatibilidad entre el punto denominado punto de anidamiento (P0) sobre el que se realizaron los pasos metodológicos anteriores y los puntos localizados en los contornos. Con estas premisas, el proceso de propagación con el modelo SWAN consta de las siguientes etapas mostradas en la Figura 17 y que se describen a continuación.

Propagación numérica con SWAN

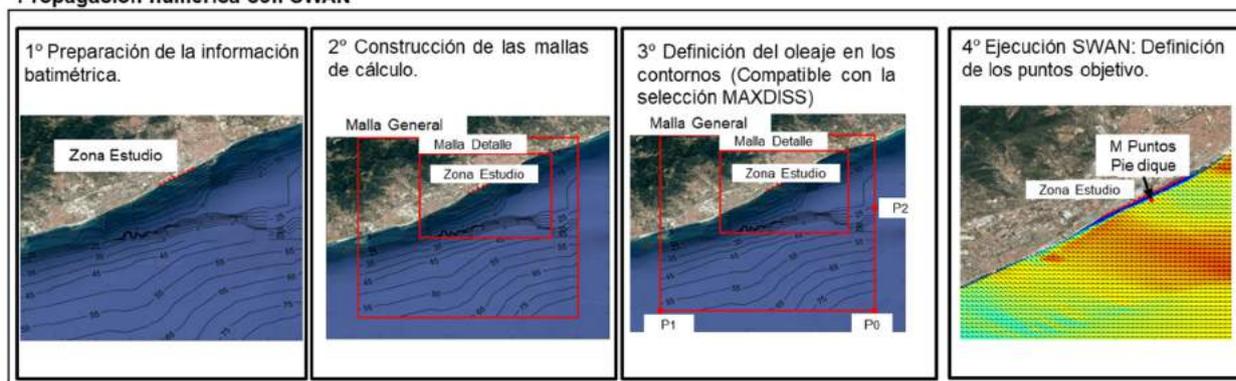


Figura 17 Metodología para la propagación numérica con SWAN de los estados de mar seleccionados hasta la zona de estudio.

El primer paso consiste en obtener la información batimétrica en la zona de estudio. Cuanto mayor sea la calidad de la batimetría mejor será la caracterización de la transformación del oleaje incidente. Esto es especialmente en las zonas más próximas a la costa en la que los efectos locales pueden tener implicaciones importantes en la transformación del oleaje que pueden verse sustancialmente modificados por los cambios en el nivel del mar.

En el segundo paso, se procede a configurar las mallas de cálculo. Para ello, es necesario definir dominios de ejecución con una resolución espacial acorde con la variabilidad de los procesos de transformación del oleaje. En otras palabras, dado que los gradientes espaciales de la altura de ola varían en magnitud desde aguas profundas hasta la costa, parece adecuado utilizar diferentes resoluciones espaciales las mallas de cálculo con la consiguiente optimización de los recursos computacionales. Esto justifica adoptar una malla general que cubra los procesos de transformación del oleaje de meso escala (orden de magnitud de la distancia entre nodos entre los 100-500 m), y anidada a ésta una o varias mallas de detalle (orden de magnitud de la distancia entre nodos entre los 25-50m) que incluya el punto objetivo en el que se localiza la obra.

El tercer paso consiste en definir el oleaje en los contornos de las mallas de cálculo de forma que cualquier estado de mar definido en el punto de anidamiento de la zona de estudio, P_0 , anteriormente definido, se propague hasta la zona de estudio. Es decir, deben definirse las variables [Hs,Tm,Tp,Dir,NM] en cada uno de los puntos $P_1, P_2, P_3, \dots, P_l$ localizados suficientemente alejados de costa, de forma que sean concomitantes con las variables [Hs,Tm,Tp,Dir,NM] en P_0 . Ello permite que la metodología puntual propuesta para la caracterización del régimen medio y extremal tenga en cuenta la variabilidad espacial en los procesos de propagación hasta los M puntos a pie de dique de la estructura de protección.

Dado que dichos puntos de contorno se encuentran fuera de las zonas de interacción no lineal del oleaje, se puede asumir que los periodos son constantes. Además, dado el reducido tamaño de la malla general (orden de magnitud de los 10 Km), es posible considerar el nivel del mar uniforme en todo el dominio. Así pues, únicamente es necesario definir [Hs,Dir] en cada uno de los l puntos del contorno compatible con [Hs,Dir] $_{P_0}$. Para ello se considera que entre P_0 y los puntos de contorno el tren de onda únicamente se modifica por asomeramiento y por refracción, modelándose ambos procesos analíticamente bajo la hipótesis de batimetría recta y paralela. Así pues, la dirección del oleaje únicamente se ve modificada por la refracción según la ley de Snell (Ec. 1). En cuanto a la altura de ola en cada punto l del contorno se obtiene obteniendo los coeficientes de asomeramiento y refracción entre P_0 y el punto analizado (Ec.2). El primero se obtiene de la relación de celeridades de grupo la cual es función del periodo y el calado. El segundo se obtiene de la relación de ángulos respecto a la perpendicular a la orientación de la batimetría a través de sus cosenos (Figura 18).

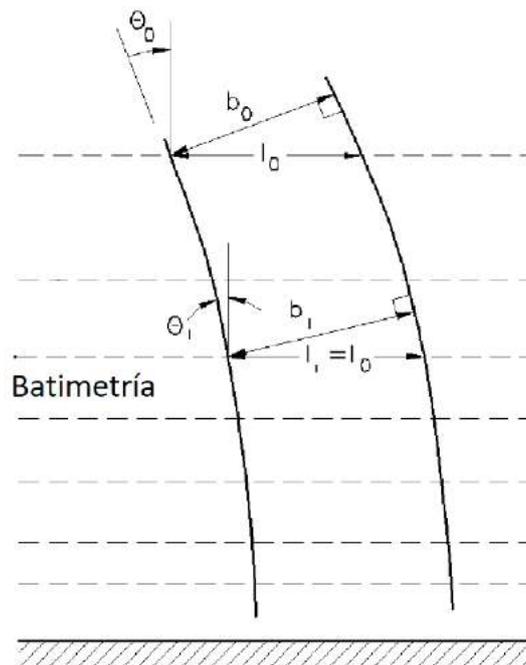


Figura 18 Refracción del oleaje entre P_0 y uno de los I puntos del contorno (Modificado de Water Wave mechanics for Engineers and Scientists, Dean & Dalrymple 1991).

$$Dir_l = \sin^{-1} \left(\frac{\sin Dir_0 c_l}{c_0} \right) \quad (Ec. 1)$$

$$Hs_l = Hs_0 K_{asom} K_{refra} = Hs_0 \sqrt{\frac{cg_0}{cg_l}} \sqrt{\frac{\cos Dir_0}{\cos Dir_l}} \quad (Ec. 2)$$

Finalmente, se procede a la ejecución del modelo SWAN para los P estados de mar. Para ello, y de forma adicional a las variables meteo-oceanográficas ya caracterizadas se asume un espectro input tipo JONSWAP, con un factor de ensanchamiento del pico, $\gamma=3.3$ y una dispersión angular, $\sigma_{oleaje}=20^\circ$. Como resultado se obtienen mapas de propagación (Figura 19) sobre la malla general y malla de detalle que muestran cómo se transforma el oleaje hasta llegar a la zona de estudio. Sin embargo, el objetivo de esta ejecución es obtener las variables $[Hs,Dir]$ en los M puntos a pie de dique (Figura 20) para definir las funciones de transferencia con P_0 .

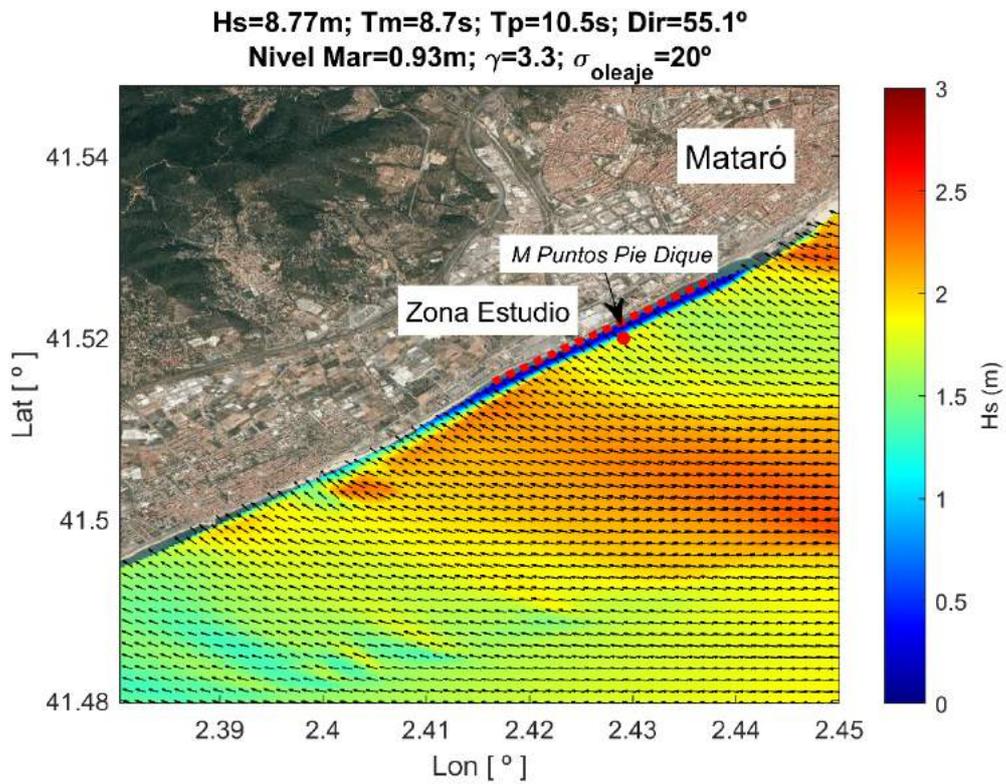


Figura 19 Mapa de propagación sobre la malla de detalle para un oleaje en P_0 de Hs=8.77m; Tm=8.7s; Tp=10.5s; Dir=55.1° y NM=0.93m.

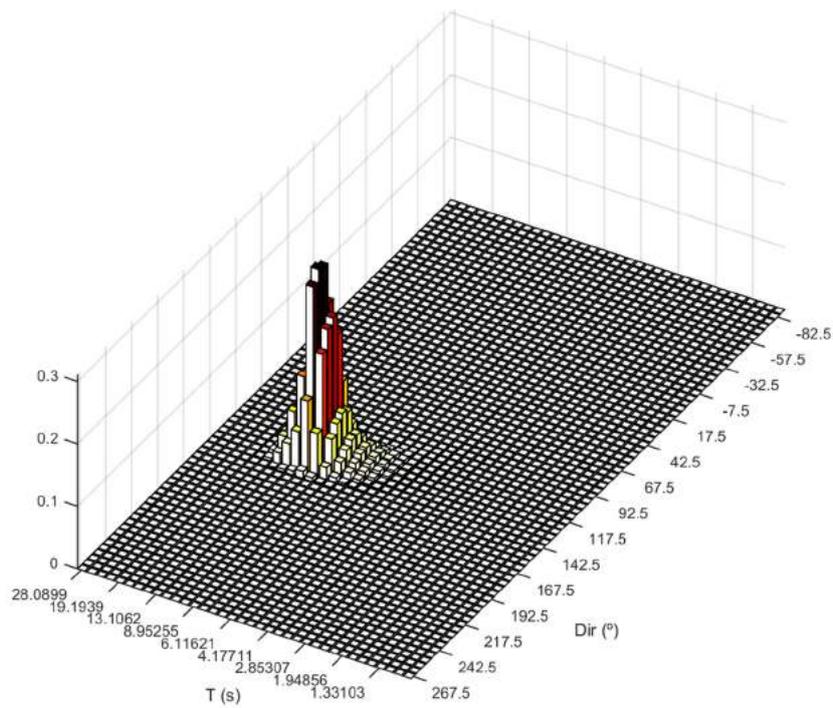


Figura 20 Espectro bidimensional en uno de los M puntos a pie de dique para un oleaje en P_0 de Hs=8.77m; Tm=8.7s; Tp=10.5s; Dir=55.1° y NM=0.93m.

5AB-I.3 Reconstrucción RBF

El último paso de la metodología de downscaling híbrido consiste en la reconstrucción de la totalidad de las proyecciones dinámicas y eventos sintéticos extremos (definidos en P_0) en la localización de la estructura litoral, caracterizada por M puntos a pie de dique. Tomando los resultados de las ejecuciones numéricas para los P estados de mar, se ajustan las funciones matemático-estadísticas para la transferencia analítica de todos los estados de mar desde aguas abiertas. Para ello se emplea la técnica de interpolación no lineal basada en las funciones de base radial (RBFs, Camus et al., 2011), obteniendo el régimen medio y régimen extremal a pie de dique. La metodología propuesta para ello puede verse esquematizada en la Figura 21 .

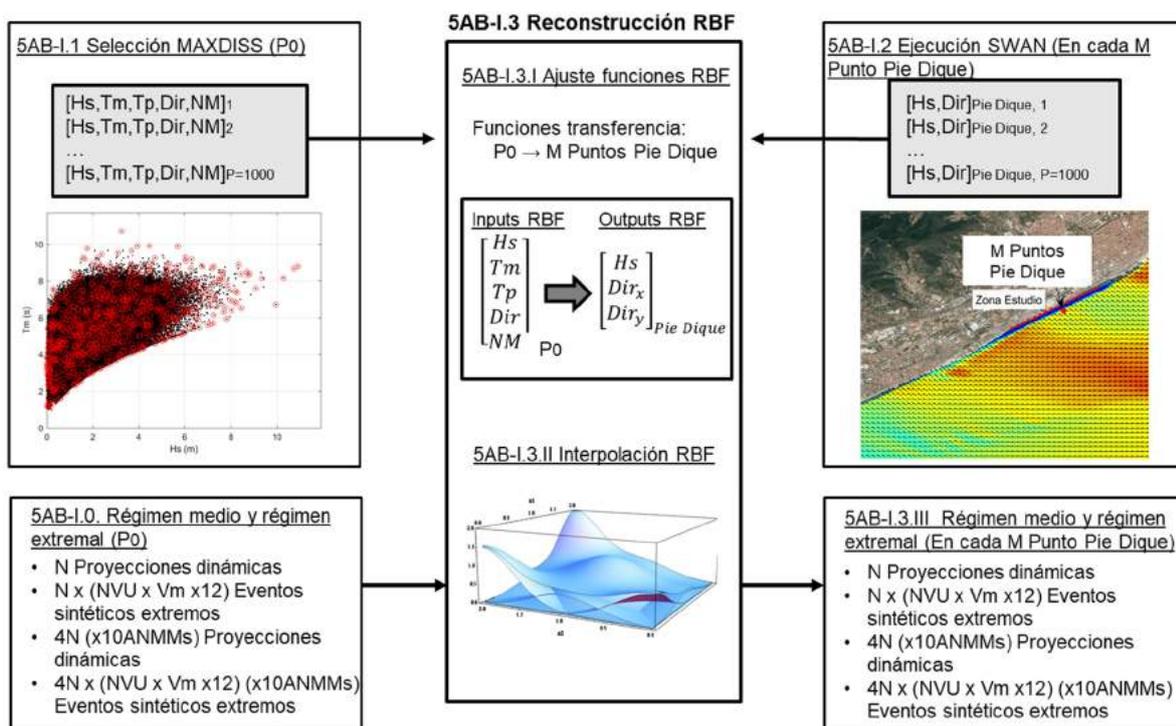


Figura 21 Metodología para la reconstrucción RBF del régimen medio y extremal a pie de dique.

El primer paso consiste en ajustar las funciones de transferencia RBF entre P_0 y los M puntos a pie de dique. En este caso, dado que los periodos y nivel de mar se consideran iguales en ambas localizaciones, se ajustan las funciones que permiten obtener analíticamente, a pie de dique, la altura de ola (Ec.3) y la dirección del oleaje, a través de sus componentes espaciales para cada punto a pie de dique (Ec.4 y Ec.5).

$$Hs_{Pie\ dique} = RBF([Hs, Tm, Tp, Dir, NM], \{[Hs, Tm, Tp, Dir, NM]_1; \dots; [Hs, Tm, Tp, Dir, NM]_{1000}\}, \{[Hs]_{Pie\ Dique, 1}; \dots; [Hs]_{Pie\ Dique, 1000}\}) \quad (Ec. 3)$$

$$Dir_{x\ pie\ dique} = RBF([Hs, Tm, Tp, Dir, NM], \{[Hs, Tm, Tp, Dir, NM]_1; \dots; [Hs, Tm, Tp, Dir, NM]_{1000}\}, \{[Dir_x]_{Pie\ Dique, 1}; \dots; [Dir_x]_{Pie\ Dique, 1000}\}) \quad (Ec. 4)$$

$$\text{Dir}_{y_{\text{pie dique}}} = \text{RBF} \left([\text{Hs}, \text{Tm}, \text{Tp}, \text{Dir}, \text{NM}], \{ [\text{Hs}, \text{Tm}, \text{Tp}, \text{Dir}, \text{NM}]_1; \dots; [\text{Hs}, \text{Tm}, \text{Tp}, \text{Dir}, \text{NM}]_{1000} \}, \right. \\ \left. \{ [\text{Dir}_y]_{\text{Pie,Dique}_1}; \dots; [\text{Dir}_y]_{\text{Pie Dique,1000}} \} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

La aplicación de estas formulaciones de interpolación permite obtener las variables H_s , Dir_x , Dir_y en cada punto a pie de dique de cualquier estado de mar caracterizado en P_0 por $[\text{Hs}, \text{Tm}, \text{Tp}, \text{Dir}, \text{NM}]$ a través de los resultados numéricos obtenidos en el apartado anterior. Así pues se tiene que cada P estado de mar ejecutado mediante el modelo SWAN ($\{ [\text{Hs}, \text{Tm}, \text{Tp}, \text{Dir}, \text{NM}]_1; \dots; [\text{Hs}, \text{Tm}, \text{Tp}, \text{Dir}, \text{NM}]_{1000} \}$) resulta $\{ [H_s]_{\text{Pie dique}, 1}; \dots; [H_s]_{\text{Pie dique}, 1000} \}$, $\{ [\text{Dir}_x]_{\text{Pie dique}, 1}; \dots; [\text{Dir}_x]_{\text{Pie dique}, 1000} \}$, $\{ [\text{Dir}_y]_{\text{Pie dique}, 1}; \dots; [\text{Dir}_y]_{\text{Pie dique}, 1000} \}$, para cada punto a pie de dique. Por lo tanto, ya es posible aplicar dichas formulaciones de transferencia para la propagación del régimen medio y extremal hasta la obra litoral (Figura 22). Siguiendo el esquema conceptual llevado a lo largo de toda la metodología, en el periodo de referencia histórico se propagan mediante RBF hasta pie de dique las N proyecciones dinámicas y los $N \times (\text{NVU} \times \text{Vm} \times 12)$ eventos sintéticos extremos. Por otra parte, por la combinación de los dos periodos futuros y de los dos escenarios climáticos, es necesario transferir $4N$ proyecciones dinámicas y los $4N \times (\text{NVU} \times \text{Vm} \times 12)$ eventos sintéticos extremos hasta pie de obra. Cada uno de estos es propagado a 10 niveles resultado de sumas los 10 deciles de ANMM a las componentes de marea astronómica y meteorológica.

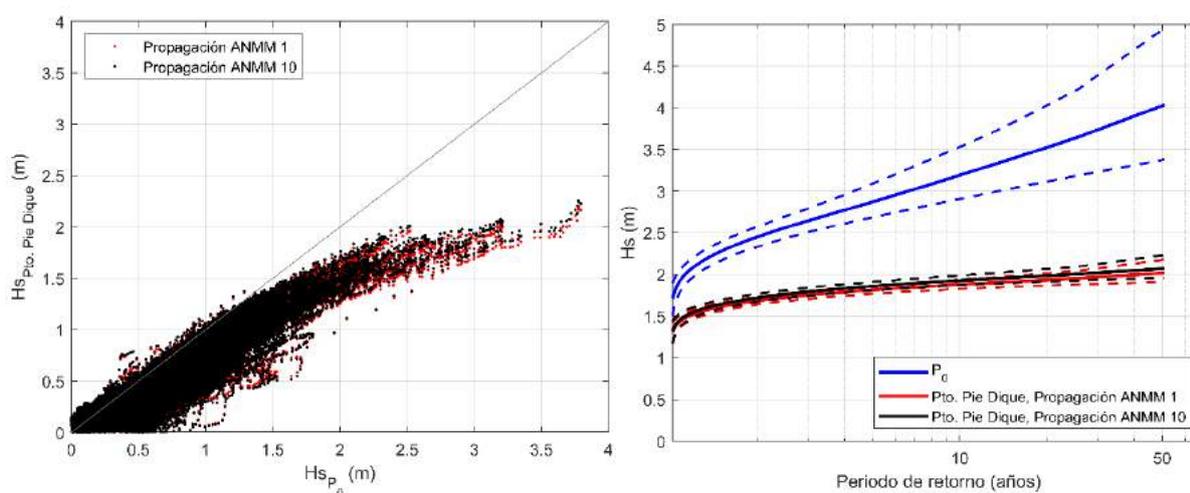


Figura 22 Panel izquierdo: Comparación entre la altura de ola resultado de la propagación híbrida de una serie de proyecciones dinámicas en un escenario y periodo futuro a los deciles del ANMM inferior, ANMM 1, y superior, ANMM 10, y el valor en aguas abiertas. Panel derecho: Comparación entre los regímenes extremales de altura de ola resultado de la emulación sintética en aguas abiertas, con el resultado de la propagación híbrida de los eventos extremos sintéticos en un escenario y periodo futuro a los deciles del ANMM inferior, ANMM 1, y superior, ANMM 10.

6-I: Evaluación de impactos

La evaluación de los impactos estructurales, funcionales y operacionales se lleva a cabo siguiendo una metodología probabilista, obteniendo el grado de cumplimiento de los objetivos de proyecto marcados por la normativa ROM (criterios de fiabilidad, servicio y operacionales) mediante aproximación numérica a través de la técnica de Monte Carlo (Lara et al., 2019). Para ello, en primer lugar, se debe describir la estructura costera objeto de análisis a través de su árbol de fallo (Burcharth et al., 1993). Un árbol de fallo (Figura 23) es una representación jerárquica que relaciona cómo unos

mecanismos disruptores (modos de fallo y modos de parada) afectando a unos elementos expuestos (sección tipo, equipamiento sobre la estructura y las operaciones que en ella se realiza) puede conducir al incumplimiento de los criterios de diseño. Un árbol de fallo, por lo tanto, se construye ad-hoc para cada estructura analizada, respondiendo a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los requerimientos técnicos que de ella se esperan? Por ejemplo, para estructuras sin ningún tipo de operativa sobre o detrás de ellas, se puede prescindir de la verificación operativa (por ejemplo, los espigones).
- ¿Cuáles son los elementos que pueden verse afectados por la acción climática? Ello requiere definir los elementos estructurales como los mantos de protección; los elementos requeridos para llevar a cabo las operaciones sobre ella sin ser claves para la seguridad de la obra (por ejemplo, equipamientos portuarios); y las operaciones que en ella se realizan (por ejemplo, las operaciones portuarias de carga/descarga).
- ¿Cuáles son los mecanismos que pueden conducir al incumplimiento de los objetivos de proyecto? Identificados cada uno de los elementos, se definen los modos que pueden conducir a su fallo o parada (Figura 24). Por ejemplo, el desplazamiento de piezas del manto principal es debido a un exceso de carga hidráulica sobre este.
- ¿Qué impactos produce sobre la estructura dichos modos de fallo y parada? Los modos de fallo adscritos al ELU provocan un daño sobre un elemento de la estructura lo cual se traduce en una pérdida de seguridad; Los modos de fallo adscritos al ELS provocan un daño sobre un elemento de la estructura sin que se vea comprometida su seguridad, únicamente su funcionalidad; y los modos de parada adscritos al ELO provocan una parada en las operaciones sin consecuencias estructurales (la parada cesa en cuanto cesa la acción climática).



Figura 23 Ejemplo del árbol de fallo de una estructura costera. Las relaciones entre elementos / modos de fallo "o" obedecen a una conceptualización de sistema en serie en el que el fallo se alcanza si se produce alguno de los fallos individuales.

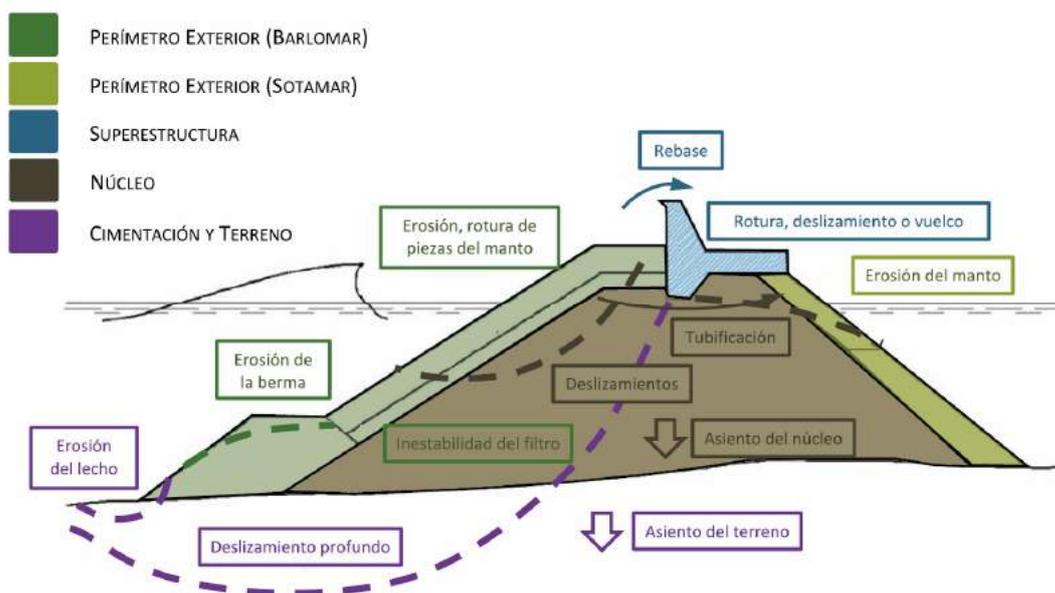


Figura 24 Ejemplo de los modos de fallo hidráulicos y geotécnicos de una estructura costera en talud (tomado de ROM 1.1-18).

El esquema conceptual propuesto para la evaluación de los impactos se esquematiza en la Figura 5. Remarcar que derivado de aplicar una aproximación probabilista, se evalúa el margen de cumplimiento de los objetivos de proyecto, aspecto altamente importante para la implementación de medidas de adaptación flexible. El elemento central es la estructura costera expuesta, caracterizada por tener que cumplir unos requerimientos de diseño que pueden verse incumplidos si alguno de sus elementos se ve afectado por mecanismos disruptores. La estructura costera objeto del análisis se encuentra solicitada por unas condiciones climáticas, extremas y regulares, las cuales han sido caracterizadas a pie de dique según los apartados anteriores. El tercer aspecto a considerar para la proyección de los impactos es la susceptibilidad de la estructura, caracterizada a través de la vulnerabilidad de cada uno de los elementos individuales y sus modos de fallo o parada. Para ello, debe caracterizarse el comportamiento (estructural, funcional u operativo) ante unas condiciones climáticas dadas, así como establecer umbrales a partir de los cuales se considera que se ha alcanzado el fallo o parada. En otras palabras, deben establecerse relaciones entre las variables solicitantes (clima marítimo) y las propiedades estructurales (peso de las piezas de los mantos, peso del espaldón, cota de coronación, etc.) de forma que se pueda cuantificar si existe, por ejemplo, un exceso de carga hidráulica o de rebase, así como umbrales de tales procesos de interacción oleaje-estructura que cuantifiquen si se ha alcanzado el fallo o la parada. En esta metodología se propone el empleo de formulaciones semi-empíricas (FSE) existentes en la literatura, así como los umbrales recogidos en los principales manuales internacionales. Así pues, una FSE relaciona como unas determinadas condiciones de oleaje y nivel interactúan con unas propiedades estructurales dadas, cuantificando el comportamiento de esta a través de una variable de gobierno Ψ descriptora del mecanismo analizado (Ec. 6). Si dicha variable supera el valor umbral Ψ_{umbral} , se considera que dichas condiciones desencadenan el fallo o la parada. Tomando como referencia las formulaciones de estabilidad en mantos exteriores, éstas relacionan el forzamiento climático a través de las variables [Hs,Tm,NM] con el tamaño de las piezas, su densidad y pendiente del talud. La relación funcional entre ambos conjuntos de variables da lugar al denominado

parámetro de daño (S), que sirve de métrica para evaluar cómo se desplazan las piezas del manto ante los forzamientos climáticos. Si dicho valor es superior al valor que define el nivel de daño máximo permitido, por ejemplo, inicio de avería, se considera el fallo de la estructura. De forma análoga se puede hacer para el rebase, tomando los umbrales de rebase que provocan un daño sobre el equipamiento o en la parada de las operaciones.

$$FSE \rightarrow \Psi = f(\text{Clima marítimo}, \text{Propiedades estructurales}) \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Fallo/Parada} \leftrightarrow \Psi > \Psi_{\text{umbral}}$$

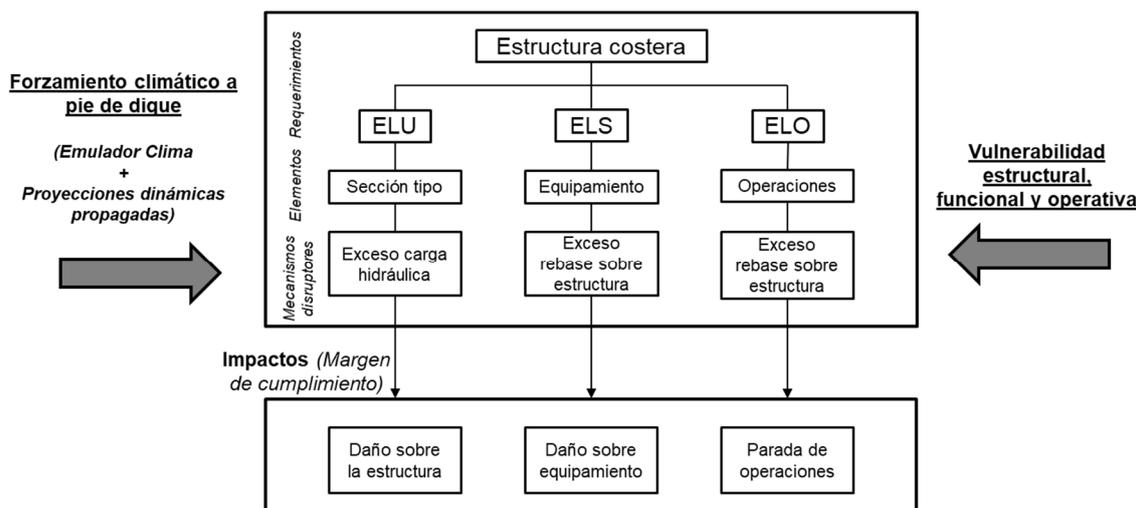


Figura 25 Esquema conceptual para la evaluación de los impactos de cambio climático en las obras de protección costera siguiendo la aproximación metodológica I.

Por lo tanto, la estructura o alguno de sus elementos individuales cumplirá los objetivos de diseño si el valor crítico de Ψ_{crit} en la vida útil es inferior a al valor umbral Ψ_{umbral} . Siguiendo con el ejemplo del daño en el manto exterior de un dique en talud, el evento extremo ocurrido en los V_m años con mayor daño es el que determina el valor de S_{crit} . No obstante, la determinación de dicho valor está sujeta a una incertidumbre inherente debida, tanto al propio clima marítimo que alcanza a la estructura durante su vida útil, como a la respuesta de ésta. En otras palabras, el evento extremo máximo a pie de dique esperable en la vida útil tiene un comportamiento totalmente estocástico y es por ello que se ha desarrollado una metodología para la generación sintética de miles de estados de mar extremos. Sin embargo, es necesario remarcar que la respuesta hidrodinámica de la estructura tiene también un marcado carácter probabilista. Esto se puede observar en las múltiples FSE existentes en la literatura, en el que se marcan las bandas de confianza de los ajustes propuestos, dando lugar a que unas mismas condiciones climáticas puedan provocar una respuesta estructural diferente. Por todo lo anterior, el objetivo no debe ser determinar un valor discreto de Ψ_{crit} sino la función de densidad completa que permite tener en cuenta todas las incertidumbres existentes dentro del análisis (Figura 26). Identificando el valor umbral que separa la región de fallo/no fallo, la probabilidad de fallo p_f esperable es el área bajo la curva tal que $\Psi_{\text{crit}} > \Psi_{\text{umbral}}$.

La determinación de la función de densidad de Ψ_{crit} puede realizarse de forma analítica bajo la hipótesis de comportamiento gaussiano de todas las variables involucradas en su determinación, lo cual no es realista, o mediante aproximación numérica a través de la técnica de Monte Carlo. Este

último método permite considerar el comportamiento real de cada variable individual a través de su caracterización estadística no-estrictamente gaussiana. Para ello, es necesario simular múltiples vidas útiles en tanto en cuanto se obtenga una muestra de Ψ_{crit} suficientemente grande que permita aproximar su función de densidad teórica. De forma análoga, y de acuerdo con lo expuesto en el apartado relativo a la generación sintética de estados de mar, la probabilidad de fallo resultado de aproximar Ψ_{crit} a través de NVU vidas útiles en las que se alcanza el fallo en N_f de ellas es:

$$p_f = \int_{\Psi_{crit} > \Psi_{umbral}} PDF(\Psi_{crit}) d\Psi_{crit} \approx \frac{N_f}{NVU} \quad (Ec. 7)$$

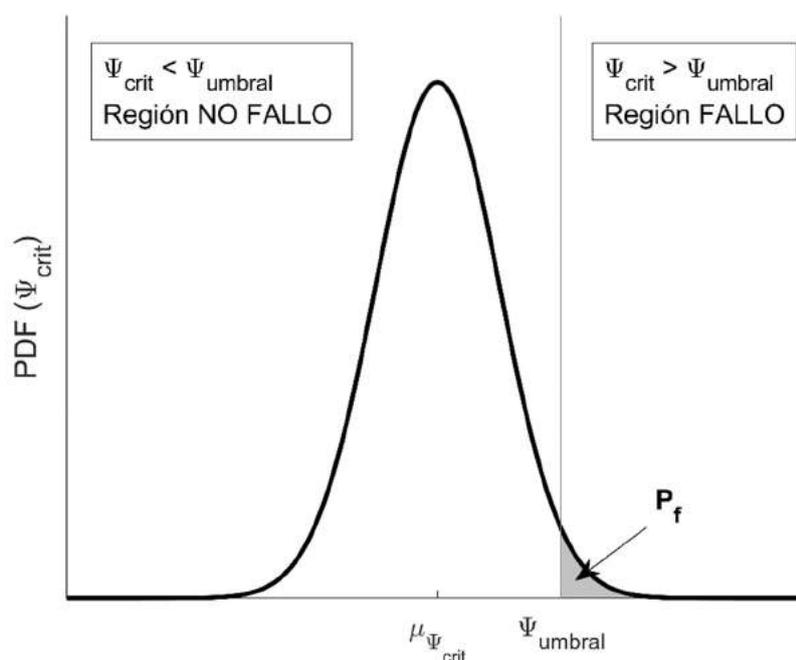


Figura 26 Ilustración para la obtención de la probabilidad de fallo (P_f), como el área bajo la curva de la región de fallo (Adaptado de Burcharth et al., 1993).

Además de conocer la probabilidad de fallo de la obra en su vida útil, un resultado altamente interesante desde el punto de vista de la toma de decisiones es la cuantificación probabilista de la evolución del periodo de retorno del fallo de la obra, T_r . Resultado de aplicar la técnica de Monte Carlo a escala mensual (con 12 valores de la variable de gobierno en cada uno de los V_m años), este puede obtenerse indirectamente a través del ratio de fallo anual λ_i . Para ello, año a año, se contabiliza el número de vidas útiles sintéticas que han fallado (Ec.8) siguiendo un procedimiento análogo al anteriormente descrito para el cálculo de la probabilidad de fallo en la vida útil (Figura 27). Asumiendo que los fallos en un determinado periodo de referencia y escenario climático son aleatoriamente constantes, el tiempo medio entre fallos puede obtenerse como la media de los NVU tasas de fallo anual (Ec.9). Dado que dicha variable cuantifica la tasa de recurrencia del fallo en años¹, su inversa resulta ser el periodo de retorno medio. En comparación con la probabilidad de fallo en la vida útil, dicha métrica permite tener en cuenta que en una misma vida útil puede haber más de un año en el que se alcance el fallo, lo que es altamente interesante en el planteamiento de futuras medidas de adaptación. Con todo ello, repitiendo el proceso en cada escenario climático, periodo de referencia y

modelo climático se obtiene la caracterización probabilista de la evolución del periodo de retorno, el cual comparándose con el periodo de retorno de diseño permite también cuantificar el cumplimiento futuro de los criterios de diseño.

$$\lambda_i \equiv \text{Tasa fallo anual (años}^{-1}) \rightarrow \lambda_i = \frac{Nf_i}{NVU} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\lambda = \frac{1}{V_m} \sum \lambda_i \rightarrow T_r = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Ec. 9})$$

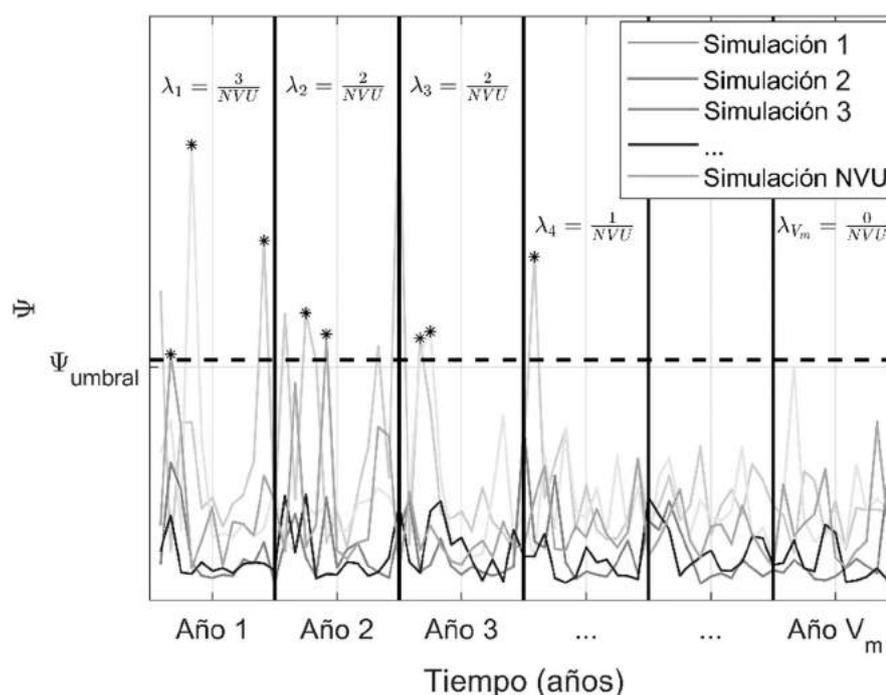


Figura 27 Esquema para la obtención del ratio de fallo anual en un determinado escenario climático y periodo de referencia.

Así pues, en el presente apartado se procede a analizar los impactos del cambio climático en sus múltiples categorías según la clasificación ROM, a través de los cambios en las funciones de densidad de las variables de gobierno descriptoras de los modos de fallo hidráulico y de parada, aplicando el método de Monte Carlo. Por cada periodo de análisis/escenario y modelo climático se obtienen las funciones de densidad completas de cada uno de estos mecanismos disruptores, con el fin de cuantificar los cambios en las probabilidades de fallo y periodos de retorno. La metodología propuesta, basada en un análisis de alta resolución, permite identificar los requerimientos más susceptibles a la variabilidad climática, así como los modos críticos. Esto es un factor determinante, no solamente para conocer el estado futuro de la estructura costera, sino de cara a plantear futuras medidas de adaptación basadas en el conocimiento objetivo resultado de aplicar la metodología propuesta. A continuación, se procede a describir los pasos a seguir en modos de parada operativa y en los modos de fallo hidráulico.

6A-I: Modos de parada operativa

Los modos de parada operativa son los mecanismos que producen una interrupción en la operativa de la estructura por un periodo de tiempo igual a la acción del agente climático, de forma que en cuanto cesa la acción de éste se restablece su normal uso sin consecuencias estructurales. En general, estos modos de parada son desencadenados por un excesivo rebase sobre la estructura o una excesiva agitación interior en el trasdós de ésta.

Atendiendo a la normativa ROM, los modos de parada se evalúan anualmente haciendo uso de las series temporales horarias y teniendo que verificar conjuntamente en la vida útil los criterios de operatividad mínima anual (p); número medio de paradas (N_m) y duración máxima esperada (D_m).

La metodología para cuantificar los cambios en cada uno de estos tres criterios por efecto del cambio climático se muestra en la Figura 28, diferenciando entre el periodo de referencia histórico y los periodos de referencia/escenarios climáticos futuros en los que debe considerarse la influencia del ANMM. En cualquier caso, tres son los pasos metodológicos que deben realizarse:

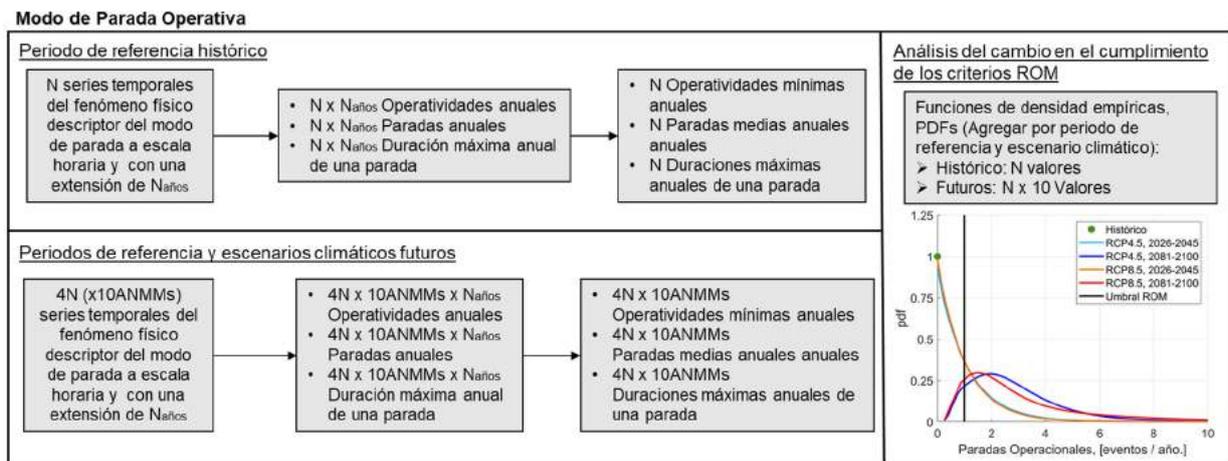


Figura 28 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de parada operativa.

1. Aplicar los conjuntos de proyecciones dinámicas del periodo de análisis/escenario y modelo climático con las variables de interés para obtener la serie temporal horaria y continua de extensión igual a $N_{\text{años}}$ con el fenómeno físico descriptor del modo de parada. Por ejemplo, en el caso concreto del rebase, debe obtenerse la serie temporal horaria de caudal y volúmenes de rebase sobre la estructura aplicando las FSEs de rebase. En el caso de los periodos de referencia y escenarios climáticos futuros, cada estado de mar se combina con cada uno de los deciles equiprobables de ANMM.
2. Cruzar las series temporales obtenidas en el paso anterior con el umbral operativo. Continuando con el ejemplo del rebase, se define el caudal o volumen de rebase a partir del cual se produce una parada de las operaciones. Esto conecta con el análisis anual de los tres criterios operativos, definiendo (1) las operatividades anuales (porcentaje de tiempo con condiciones operativas en cada año); (2) paradas anuales (número de eventos con condiciones no operativas en cada año) y (3) duración máxima anual (intervalo de tiempo consecutivo con mayor interrupción operativa en cada año). De forma análoga al paso

anterior, en los periodos de referencia futuro se tienen los valores correspondientes a estos 3 criterios multiplicado por diez por la influencia del ANMM.

3. Promediar los valores anuales obtenidos en el paso anterior para obtener estadísticos representativos del intervalo de tiempo analizado. Así pues, de las $N_{\text{años}}$ operatividades anuales se define la operatividad mínima anual (p) como el estadístico representativo del primer criterio. El segundo criterio queda descrito por el número medio de paradas anuales (N_m) en el intervalo de tiempo y el tercer criterio por la duración máxima probable (D_m), obtenida como la media de las duraciones máximas anuales.

Obtenido los valores discretos de cada modelo para cada periodo de referencia y escenario climático, estos deben agregarse por horizonte temporal de forma que se cuantifique el cambio a través de las funciones de densidad. Es decir, para cada uno de los tres criterios, en el periodo de referencia histórico se tendrá una función de densidad empírica construida con N valores los cuales se consideran equiprobables, pues los N modelos climáticos son igual de fiables para representar las condiciones climáticas en el periodo de tiempo analizado. En cambio, en los 4 horizontes temporales futuros, dichas funciones de densidad se encuentran conformadas por $N \times 10$ valores equiprobables, puesto que los 10 deciles de ANMM son igual de probables por definición.

Resultado de aplicar lo anterior se obtiene una representación probabilista del grado de cumplimiento de cada uno de los tres criterios operativos de la estructura litoral en el periodo de referencia histórico, en el medio y en el largo plazo bajo las dos condiciones de cambio climático analizadas (Figura 29). Dichas funciones de densidad son de gran valor para la toma de decisiones, pues cuantifican cual es la probabilidad de no consecución de los objetivos de proyecto desde el punto de vista operativo (área bajo la curva tal que la variable del criterio sea mayor al umbral ROM) en un escenario dado permitiendo definir sobre qué actuar y en que instante para mantener los criterios de diseño operativos.

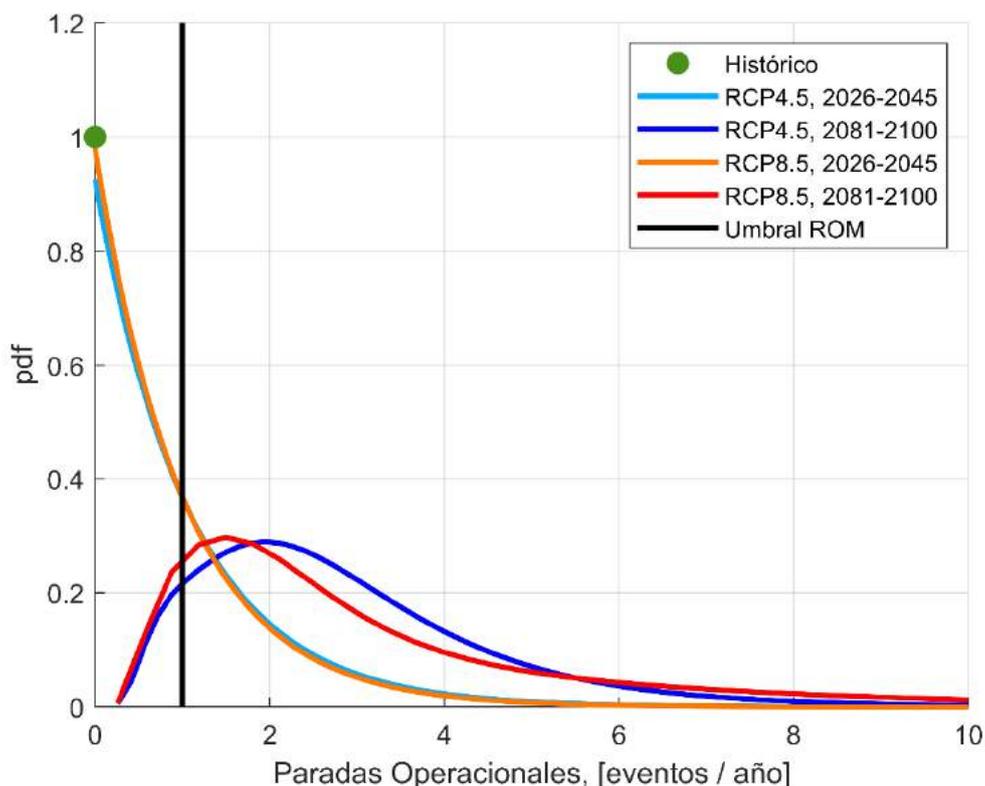


Figura 29 Funciones de densidad del número medio de paradas operativas anuales para el periodo de referencia histórico y los periodos futuros en los dos escenarios de cambio climático analizados.

6B-I: Modos de fallo hidráulico

Los modos de fallo hidráulicos son los mecanismos que producen un daño estructural debido a la acción oleaje. Estos se dividen en dos grupos de acuerdo con la finalidad del elemento que sufre el daño. Así pues, si se daña un elemento estructural con un papel clave para asegurar la seguridad estructural de la obra se habla de modos de fallo hidráulicos adscritos al estado límite último, mientras que si el elemento dañado no tiene la misión de garantizar la estabilidad de la obra, pero es requerido para llevar a cabo las actividades por las que se concibe, se habla de los modos de fallo pertenecientes al estado límite de servicio. Ejemplo de los primeros pueden ser los modos de fallo relacionados con el daño a las piezas del manto o espaldones mientras que los segundos se relacionan con los elementos del equipamiento tales como grúas e instalaciones.

Siguiendo con el marco conceptual de la normativa ROM, los modos de fallo hidráulicos son provocados por la acción de eventos extremos meteo-oceanográficos con un periodo de retorno de decenas o cientos de años, definiendo como criterio de diseño la probabilidad de fallo en la vida útil de la obra. En este caso, y a diferencia de los modos de parada operativa, también se introduce el concepto de periodo de retorno medio de la obra bajo las hipótesis climáticas analizadas. Así pues, el procedimiento para cuantificar la tasa de cambio de los criterios de diseño del ELU y ELS por efecto del cambio climático, se articula nuevamente en 3 pasos, que se muestran en la Figura 30 .

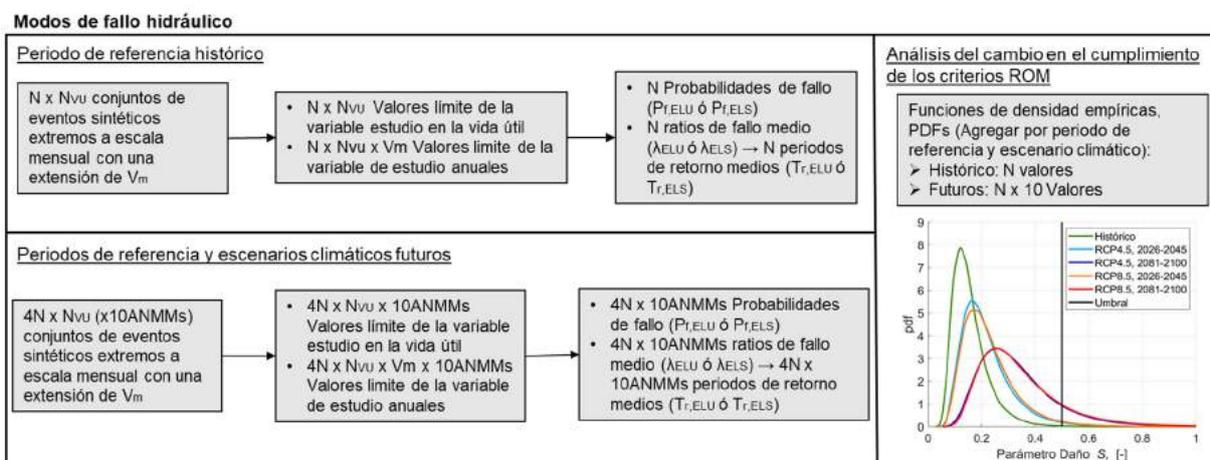


Figura 30 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de fallo hidráulicos.

1. Aplicar los conjuntos de eventos sintéticos extremos del periodo de análisis/escenario /modelo climático con las variables de interés para obtener las NVUs serie temporales mensuales de extensión igual a V_m con el fenómeno físico descriptor del modo de fallo, Ψ. Por ejemplo, en el caso concreto de daño sobre el manto principal, deben obtenerse las series temporales mensuales del parámetro de daño S aplicando alguna de las FSE existentes en la literatura. En el caso de los periodos de referencia y escenarios climáticos futuros, cada estado de mar extremo se combina con cada uno de los deciles equiprobables de ANMM.
2. Obtener el valor crítico de la variable de gobierno en cada una de las NVU vidas útiles, Ψ_{crit}. Repitiendo el procedimiento, año a año, en lugar de en la vida útil, se obtienen sus valores límite para el cálculo posterior de la tasa de fallo anual. Continuando con el ejemplo de daño en el manto principal, se define el valor máximo en cada una de las vidas útiles sintéticas del parámetro de daño S. De forma análoga al paso anterior, en los periodos de referencia futuro se tienen los valores correspondientes a los criterios de diseño relativos al ELU y ELS multiplicado por diez por la influencia del ANMM.
3. Por cada uno de los periodos de de análisis/escenarios y modelos climáticos construir la función de densidad de Ψ_{crit}, formando muestras de NVU valores. Cruzando cada una de estas funciones de densidad con el valor de diseño Ψ_{umbral}, se obtienen las N probabilidades de fallo en la vida útil para el periodo de referencia histórico, y las 4N x 10 probabilidades de fallo en la vida útil para los periodos de referencia y escenarios climáticos futuros, según lo mostrado en la Figura 26. Por su parte, el periodo de retorno medio se calcula previo cálculo de las V_m λ_i tasas de fallo anual, cruzando, año a año, con el valor de diseño, Ψ_{umbral}. Promediando su valor en la vida útil y calculando su inversa se obtiene el periodo de retorno.

Obtenidos los valores discretos de probabilidad de fallo de cada modelo para cada periodo de referencia y escenario climático, estos deben agregarse por horizonte temporal de forma similar a los modos de parada, considerando que los modelos y los 10 deciles (en caso de que existan) son equiprobables.

Resultado de aplicar lo anterior se obtiene una representación probabilista del grado de cumplimiento de los criterios de fiabilidad y funcionalidad de la estructura en el periodo de referencia histórico, en el medio y en el largo plazo, bajo los dos escenarios de cambio climático considerados. Tomando como ejemplo las trayectorias de las probabilidades de fallo (Figura 31), su evolución temporal son nuevamente de gran valor puesto que permiten disponer de una herramienta objetiva para la toma de decisiones en relación con el instante de tiempo y bajo qué condiciones puede ser requerido plantear medidas de adaptación que permitan mantener los criterios de diseño relativos a la fiabilidad y funcionalidad.

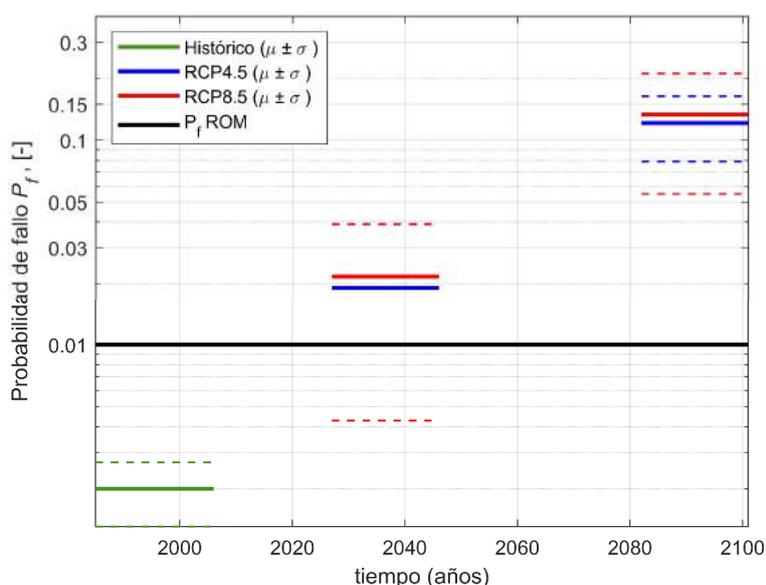


Figura 31 Evolución temporal de la probabilidad de fallo para el periodo de referencia histórico y los periodos de referencia futuro en los dos escenarios de cambio climático analizados. Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático

2.4.4. Aproximación II

La Aproximación II es una simplificación de la Aproximación I. Como se verá a continuación, se proponen un conjunto de simplificaciones que permiten la aplicación de la metodología general, pero introduciendo algunas limitaciones en cuanto al cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados. En la Aproximación II se definen las mismas 3 fases (definición del caso de estudio, downscaling de dinámicas y evaluación de los impactos), que a su vez se organizan en 7 pasos, tal y como se resume en la Figura 32. A continuación, se desarrolla cada uno de los pasos específicos de la Aproximación II, salvo los pasos 1, 2 y 3 correspondientes a la fase de definición del caso de estudio, pues no presenta modificación alguna con respecto a lo ya explicado en la metodología general.

Las diferencias esenciales entre la Aproximación II y la Aproximación I residen en una serie de simplificaciones en la técnica de downscaling de los forzamientos climáticos y en la generación sintética de estados de mar. Dada la complejidad de construir el modelo estadístico multivariado basado en cópulas Gaussianas de la Aproximación I, en esta aproximación se sustituye dicho modelo por una caracterización univariada de las variables de interés a pie de dique, relacionadas mediante modelos de dependencia entre ellas (no cópulas). Más aún, el oleaje a pie de dique no se obtiene

mediante la técnica de downscaling híbrido anteriormente descrito, sino que se propaga analíticamente aplicando las leyes de conservación del flujo de energía para el asomeramiento, de Snell para la refracción y de Goda para la rotura.

En la evaluación de los impactos, las formulaciones semi-empíricas a aplicar son las mismas que en la aproximación anterior. No obstante, dado que no se realiza una generación sintética, no es posible cuantificarlos mediante una aproximación probabilista. En este caso, y una vez obtenidas las series de oleaje y nivel, se evalúa el evento de diseño para cualquier escenario climático y periodo de análisis. Lógicamente, dada la variabilidad climática, el evento de diseño cambiará dando lugar a cambios en el impacto estudiado considerando la hipótesis de que la obra no sufre cambios estructurales en el tiempo.

Es, por tanto, importante señalar que la Aproximación II se basa en una metodología determinista (Verificación de un estado de mar de cálculo por escenario climático/periodo de estudio/modelo climático). Sin embargo, dado que se emplean N modelos climáticos, los resultados agregados por escenario y periodo se presentan de forma probabilista, con la única incorporación de la incertidumbre resultado de tener varios modelos climáticos y, por tanto, realizaciones del clima futuro.

APROXIMACIÓN II:

Definición del caso de estudio:

- 1- Definición tramo costero y su clima marítimo
- 2- Definición infraestructuras costeras
- 3- Definición modos de fallo y parada

Downscaling: Propagación de N series de oleaje históricas y 4N futuras.

4-II Fórmulas semi-empíricas

5A-II Régimen Medio

Series horarias de 20 años

5B-I Régimen Extremal

Temporales de cálculo

Definición del oleaje incidente en M puntos a pie de obra

Evaluación de Impactos

6A-II Modo de parada operativa

Operatividad mínima
Número medio de paradas
Duración máxima de paradas

6B-II Modos de fallo hidráulico

Prob. fallo ELU en la vida útil
Prob. fallo ELS en la vida útil

N+4N funciones de densidad (PDF) de modos de fallo y parada.

7- Cambios en 4N PDF frente a N PDF históricos para fiabilidad, funcionalidad y operatividad.

Figura 32 Aproximación II para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre obras de protección.

4-II: Downscaling simplificado

La obtención del oleaje incidente a pie de obra se obtiene, primero, propagando las N series temporales horarias hasta los M puntos a pie de dique, y segundo, caracterizando los regímenes extremales y medios en estas localizaciones. La resolución de los procesos de transformación del oleaje desde profundidades indefinidas hasta la costa se realiza mediante formulaciones analíticas y semi-empíricas. Este procedimiento se esquematiza en la Figura 33. El primer paso consiste en asimilar la batimetría real a una batimetría recta y paralela con una pendiente uniforme igual a $\tan \beta$. Dicha simplificación permite asumir que la refracción puede evaluarse haciendo uso de la Ley de Snell. Así pues, definido el punto P_0 de profundidades indefinidas (el mismo utilizado que en la aproximación anterior para construir el modelo multivariado), se transfiere el oleaje aplicando las formulaciones analíticas para asomeramiento y refracción. El último proceso relevante, especialmente cerca de la costa es la rotura que viene condicionada por la relación entre la altura de ola y la profundidad. Para incluirla, es necesario aplicar un criterio de rotura. En este caso, se recomienda hacer uso del criterio de Goda. Dada la influencia del nivel del mar en la propagación el ANMM se introduce, de manera análoga a la Aproximación I, a través de los 10 deciles equiprobables de la función de densidad del ANMM al final del escenario climático y periodo de estudio considerado.

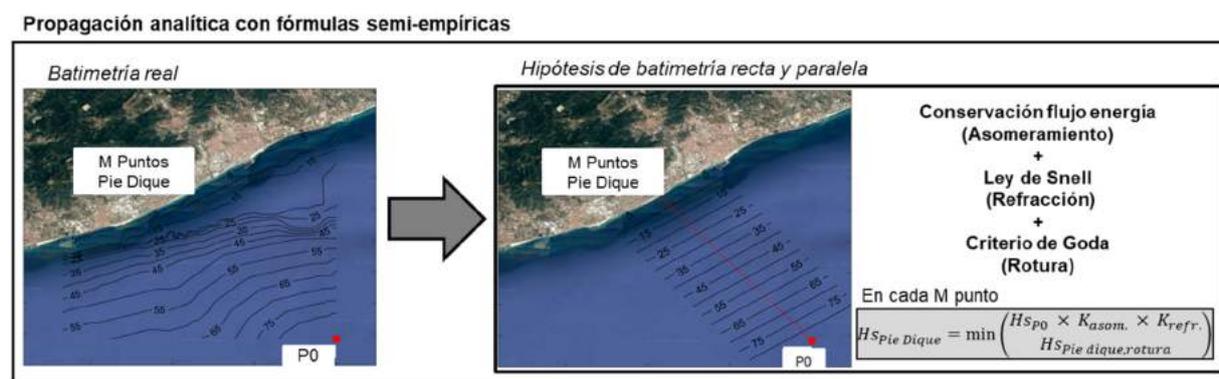


Figura 33 Estrategia de propagación del oleaje basado en formulaciones semi-empíricas

La propagación de las proyecciones dinámicas se realiza obteniendo, hora a hora, los coeficientes de asomeramiento y refracción que relacionan el punto en profundidades indefinidas (P_0) con la localización de estudio (M puntos a pie de dique). Así pues, cada estado de mar horario perteneciente a las $4N+N$ series temporales horarias se transfiere hasta la costa. Destacar, que al igual que en la aproximación anterior, las $4N$ series futuras se propagan con los niveles correspondientes a los 10 deciles seleccionados de ANMM. La localización de este tipo de estructuras en aguas someras hace que, en general, los eventos mayores vean el valor de la altura de ola limitado por la rotura compatible con la componente multivariada del estado de mar y nivel del mar.

Las formulaciones a emplear para ello se muestran a continuación.

El asomeramiento produce cambios en la altura de ola en la propagación y se determina mediante el coeficiente de asomeramiento K_{asom} . Dicho coeficiente se basa en la conservación del flujo de energía entre dos puntos, y se obtiene según lo mostrado en la ecuación 10, relacionando las celeridades de grupo, C_g entre el punto en profundidades indefinidas (P_0) y los M puntos a pie de dique.

$$K_{asom.} = \sqrt{\frac{C_{gP0}}{C_{gPie Dique}}} = \sqrt{\frac{\frac{C_{P0}}{2}}{n C_{Pie Dique}}} = \sqrt{\frac{\frac{L_0}{2T_p}}{\frac{1 + 2k(h_{Pie Dique} + NM)}{2 \sinh(2k(h_{Pie Dique} + NM))} \frac{L_{Pie Dique}}{T_p}}} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$L = \frac{gT_p^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

La refracción del oleaje produce un cambio en la dirección de propagación con respecto a la batimetría y en la altura de ola. El cambio de la altura de ola se caracteriza mediante el coeficiente de refracción $K_{refr.}$, obtenido mediante la conservación del flujo de energía, y la dirección en cada uno de los M puntos a pie de dique por $Dir_{Pie Dique}$, haciendo uso de la Ley de Snell, según la ecuación 11. Como ya se ha dicho anteriormente, la Ley de Snell y la expresión del coeficiente de refracción son únicamente válidas bajo la hipótesis de batimetría recta y paralela. Las direcciones de procedencia del oleaje mostradas en las ecuaciones siguientes se obtienen respecto a la perpendicular a la batimetría, para lo cual es necesario conocer la orientación de ésta.

$$K_{refr.} = \sqrt{\frac{\cos(Dir_{P0})}{\cos(Dir_{Pie Dique})}} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$Dir_{Pie Dique} = \sin^{-1}\left(\frac{C_{Pie Dique} \sin(Dir_{P0})}{C_{P0}}\right)$$

Finalmente, la rotura del oleaje se introduce mediante la formulación de rotura de Goda (2000), ecuación 12. Esta formulación acota superiormente la altura de ola $H_{S_{rotura}}$ compatible con el nivel sobre el que se propaga cada estado de mar. En el caso en el que, $h/L_{P0} < 0.2$, dicho criterio condiciona totalmente el oleaje a pie de dique independientemente de los procesos de transformación previos.

$$H_{S_{rotura}} = \begin{cases} K_{asom.} H_{S'_{P0}} & \rightarrow h/L_0 > 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_{S'_{P0}} + \beta_1 h), (\beta_{max} H_{S'_{P0}}), (K_{asom.} H_{S'_{P0}})\} & \rightarrow h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\beta_0 = 0.28 (H_{S'_{P0}}/L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan(\beta)^{1.5})$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan(\beta))$$

$$\beta_{max} = \max\{(0.92)(0.32(H_{S'_{P0}}/L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan(\beta)))\}$$

$$H_{S'_{P0}} = H_{S_{P0}} K_{refr.}$$

Es resultado de aplicar esta metodología es la obtención de N series temporales horarias de los parámetros de oleaje y nivel en el periodo histórico de referencia, y las equivalentes 4N (x10 ANMMs) de los escenarios y periodos futuros (Figura 34). De forma análoga a la aproximación I, únicamente se

modifican las variables altura de ola (afectada por el asomeramiento, refracción y rotura) y la dirección del oleaje (por la refracción). El resto de las variables tales como los periodos del oleaje y nivel del mar se considerar constantes.

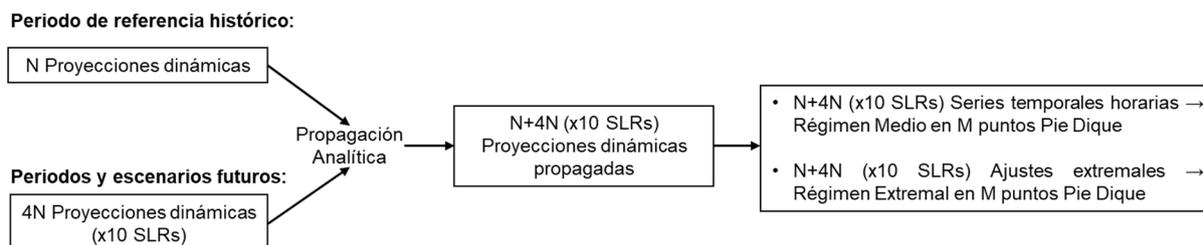


Figura 34 Pasos a seguir para la obtención de los regímenes medio y extremales en los M puntos a pie de dique.

5A-II: Régimen medio

La caracterización del régimen medio para la verificación de los criterios operativos se realiza siguiendo el mismo enfoque que en la Aproximación I. Propagadas las proyecciones dinámicas hasta el pie de dique, se obtienen las N+4N (x10 ANMMs) series temporales horarias que en el módulo de impactos se utilizarán para verificar la operatividad de la obra. Nuevamente, a pesar de aplicar un método de propagación más sencillo, puede verse la influencia del ANMM en la propagación hasta la costa (Figura 35) permitiendo así considerar la influencia que los cambios en el nivel medio del mar tienen sobre el oleaje.

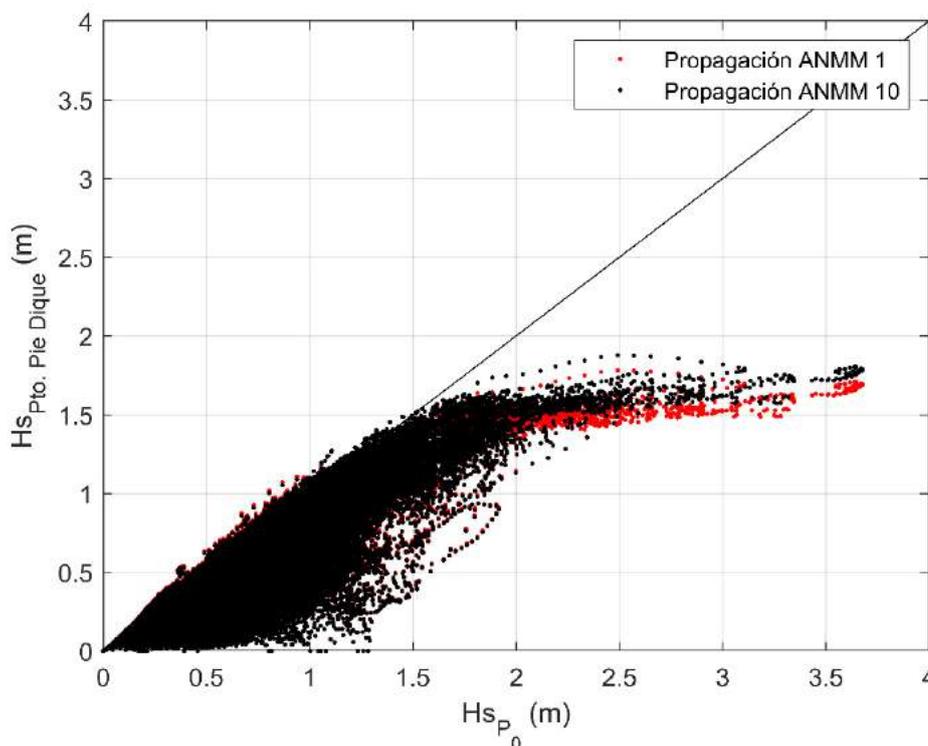


Figura 35 Comparación entre la altura de ola resultado de la propagación analítica de una serie de proyecciones dinámicas en un escenario y periodo futuro empleando los deciles del ANMM inferior, ANMM 1, y superior, ANMM 10, y el valor en P_0 .

5B-II: Régimen extremal

La caracterización del régimen extremal para la verificación de los criterios estructurales y operativos de la obra de protección se realiza siguiendo una metodología determinista. Para ello, en lugar de generar miles de eventos sintéticos extremos representativos del periodo de referencia/escenario y modelo climático analizado se define un único temporal, el denominado temporal de cálculo. Esta metodología permite conocer únicamente, si se cumplen o no los requerimientos técnicos, frente a las metodologías probabilistas que permiten conocer el margen con el que éstos se cumplen. No obstante, y sin pérdida de generalidad, dicha procedimiento sigue siendo extensamente aplicado en el diseño de obras de protección y estabilización de la costa.

Tomando nuevamente la normativa española ROM como referencia, el resultado de los 3 primeros pasos metodológicos (Definición del caso de estudio), servirá para definir el carácter general del tramo costero. Además de un conjunto de indicadores relativos a su importancia y de los requerimientos estructurales que de ella se esperan, se extraen la probabilidad de fallo máxima permitida para el ELU y ELS, así como su vida útil mínima (ver Figura 5 y Figura 6). Ambos parámetros se combinan según la ecuación 13 para definir el periodo de retorno del evento de diseño de la obra, tanto desde el punto de vista del ELU, si se aplica $P_{f,ELU}$, como del ELS, si $P_{f,ELS}$ es la que se emplea.

$$T_r = \frac{1}{1 - (1 - P_f)^{1/V_m}} \quad (Ec. 13)$$

donde T_r es el periodo de retorno, P_f la probabilidad de fallo y V_m la vida útil mínima.

Un aspecto que no debe de obviarse para que el análisis no tienda a la sobreestimación del evento de cálculo es el tratamiento de la dependencia entre variables. Es decir, a pesar de que no se construya un modelo estadístico sofisticado, como pueden ser las cópulas Gaussianas, el modelo de ajuste debe de tener en cuenta el carácter multivariado del evento de cálculo. De lo contrario estaremos definiendo un evento compuesto con un periodo de retorno notablemente superior a la realidad.

Para ello, la hipótesis en la que se fundamenta el modelo de ajuste extremal se basa en dos aspectos clave. El primero asume que la altura de ola significativa es la variable principal del oleaje a la hora de evaluar los impactos. Esta hipótesis puede comprobarse en las formulaciones de estabilidad para diques en talud, en las que la variable altura de ola aparece elevada al cubo. El segundo aspecto tiene que ver con la dependencia entre los parámetros. Para el oleaje, es conocida la dependencia existente entre, por ejemplo, la altura de ola y los periodos de pico y medio. Sin embargo, el nivel del mar considerado como la suma de la componente de marea astronómica, meteorológica y aumento del nivel medio del mar si lo hubiere, puede considerarse independiente del oleaje. Sobre esta base, en esta sección se presenta el método para la caracterización del régimen extremal en cada uno de los escenarios climáticos y periodos de análisis.

El método propuesto se basa en ajustes extremales univariados, si bien se introduce la dependencia entre variables a través de formulaciones de dependencia. En cuanto al nivel del mar ($NM=MA+MM+(ANMM)$), éste se considera independiente de la acción del oleaje, caracterizando una función de extremos sobre la variable suma de la componente astronómica y meteorológica. En los escenarios climáticos futuros, la consideración del aumento del nivel medio del mar se realiza sumando

al nivel del mar de cálculo el máximo ANMM esperado en el periodo de análisis. Dicha metodología se resume en la Figura 36 , y se explica a continuación.

En primer lugar, se define el método de selección de extremos, para construir posteriormente los ajustes. En este caso se propone la consideración de la variable altura de ola significativa como la variable principal descriptora de un temporal. Considerando evento extremo aquel estado de mar en el que la altura de ola significativa es superior al percentil del 99.5% de la serie temporal horaria, se obtiene la muestra de extremos. El resto de las variables, por ejemplo, el periodo de pico, se considera el concomitante a cada uno de esos instantes de tiempo, si bien el periodo medio del oleaje de cálculo se deriva directamente mediante el parámetro K_T que relaciona este con el periodo de pico.

El procedimiento explicado para la altura de ola significativa se repite de forma independiente para la variable compuesta por la suma de la componente astronómica y marea meteorológica del nivel del mar.

Los ajustes extremales para la obtención de cualquier temporal de cálculo compuesto por las variables altura de ola significativa, periodo de pico, periodo medio y nivel del mar se explica a continuación. En primer lugar, se caracteriza la función descriptora del régimen extremal de H_s , ajustando la función GEV sobre la muestra de extremos de H_s , previamente seleccionada (ecuación 14). Es importante destacar que además de la estima central, se debe caracterizar la incertidumbre del ajuste, para lo cual se modela la desviación estándar dependiente de H_s .

$$H_s(T_r; \mu_{H_s}, \varphi_{H_s}, \xi_{H_s}) = \mu_{H_s} - \frac{\varphi_{H_s}}{\xi_{H_s}} \left(1 - \left(\frac{1}{T_r} \right)^{-\xi_{H_s}} \right) \quad (Ec. 14)$$

$$\sigma_{H_s}(H_s; c_{0,H_s}, c_{1,H_s}, c_{2,H_s}, c_{3,H_s}) = c_{0,H_s} + c_{1,H_s}H_s + c_{2,H_s}H_s^2 + c_{3,H_s}H_s^3$$

En segundo lugar, se caracteriza el modelo de extremos del periodo de pico. En este caso, y para mantener su relación de dependencia con la altura de ola significativa, se modela mediante un ajuste potencial dependiente de la altura de ola significativa (Ecuación 15). Fijando la relación K_T que relaciona el valor del periodo de pico y periodo medio (cuyo valor a lo largo de la costa española varía entre 1.1 y 1.35, ROM 0.3-91), se obtiene, en tercer lugar, el T_m del temporal de cálculo.

$$Tp(H_s; a, b) = a H_s^b \quad (Ec. 15)$$

El nivel del mar de cálculo se considera independiente de la estimación de los parámetros del oleaje. La componente de marea astronómica MA se puede asumir determinista e independiente del oleaje. La marea meteorológica MM, aunque puede compartir mecanismos de generación de gran escala con el oleaje, en esta aproximación se considera correcto considerarla también independiente. En cuanto al incremento del nivel medio del mar ANMM, al tratarse de un proceso de largo plazo, su escala temporal es varios órdenes de magnitud superior a los anteriores. Ello implica que es adecuado no incluirlo en el ajuste de extremos, definiendo en cada uno de los escenarios climáticos futuros, el máximo valor esperado en el periodo analizado. Dicho valor se suma, en caso de que exista, al valor derivado del ajuste extremal del NM caracterizado mediante la función GEV, de forma análoga a como se hace para la altura de ola significativa (Ecuación 16).

$$NM(T_r; \mu_{NM}, \varphi_{NM}, \xi_{NM}) = \mu_{NM} - \frac{\varphi_{NM}}{\xi_{NM}} \left(1 - \left(\frac{1}{T_r} \right)^{-\xi_{NM}} \right) \quad (Ec. 16)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{NM}(NM; c_{0,NM}, c_{1,NM}, c_{2,NM}, c_{3,NM}) \\ = c_{0,NM} + c_{1,NM}NM + c_{2,NM}NM^2 + c_{3,NM}NM^3 \end{aligned}$$

Una vez construido los ajustes del régimen extremal que definen las variables de interés, se procede a la obtención de los temporales de cálculo representativos del periodo de análisis/escenario /modelo climático para la verificación del ELU y ELS. El objetivo es obtener los N+40N estados de mar de diseño, compuestos cada uno por [Hs, Tp, Tm, NM (+ANMM)], repitiendo el proceso para ambos estados límites. El procedimiento se recoge en la Figura 37 .

En primer lugar, se obtiene el valor de la altura de ola significativa tras haber obtenido el periodo de retorno de la obra, T_r , que se considera invariante en el tiempo. Asumiendo la altura de ola significativa se distribuye normalmente, dado un determinado periodo de retorno, el valor de diseño resulta ser la banda de confianza superior del 90% ($H_s + 1.645\sigma_{H_s}$), según la ecuación 14. Este valor permite la obtención del resto de los parámetros del oleaje.

En segundo lugar, se obtiene el periodo de pico aplicando el ajuste potencial que lo relaciona con la altura de ola significativa. Seguidamente se deriva el valor del periodo medio habiendo fijado una relación de éste con el periodo de pico.

Finalmente, se obtiene el nivel de mar de cálculo. Dado que, como se ha justificado anteriormente, se ha obtenido un régimen extremal independiente al del oleaje, la componente compuesta por la suma de MA y MM se obtiene de forma similar a la de Hs. No obstante, en este caso se propone trabajar con el valor derivado directamente de la estima central. A este valor debe sumarse, en caso de que exista, la componente del ANMM definida ésta como el máximo ANMM del escenario climático y periodo analizado. Es decir, en el caso de estudiar el RCP8.5, en el largo plazo, para el primer decil equiprobable, el valor a sumar es el máximo correspondiente a la serie de ANMM 1 en el escenario de cambio climático RCP8.5 durante el intervalo de tiempo 2081-2100.

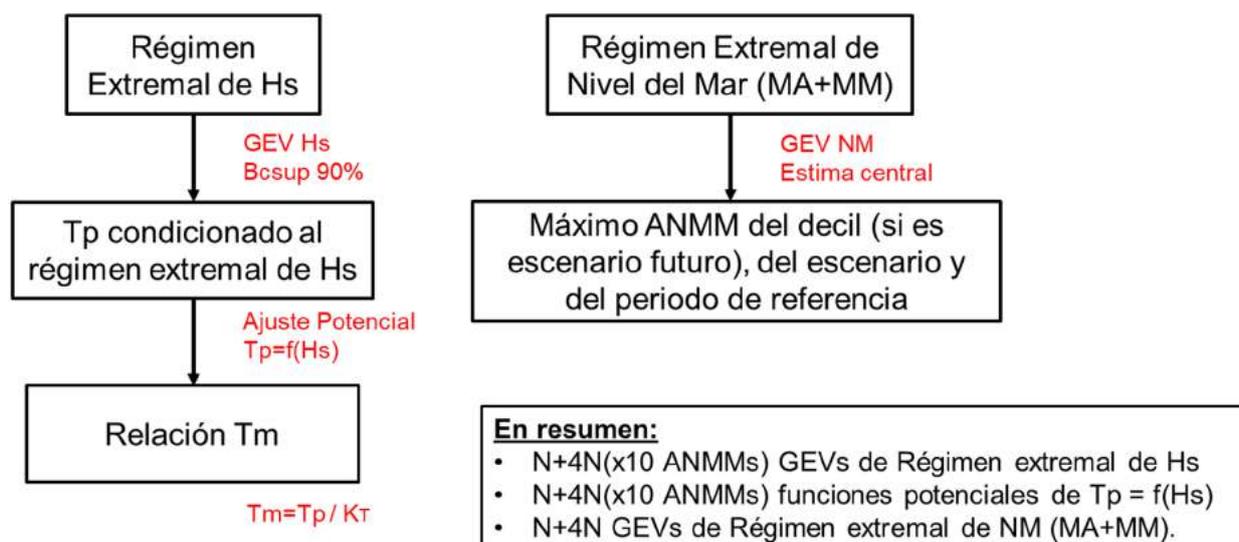


Figura 36 Ajuste del Régimen extremal para la obtención de los eventos de cálculo del ELU y ELS.

Caracterización del Oleaje y Nivel de cálculo

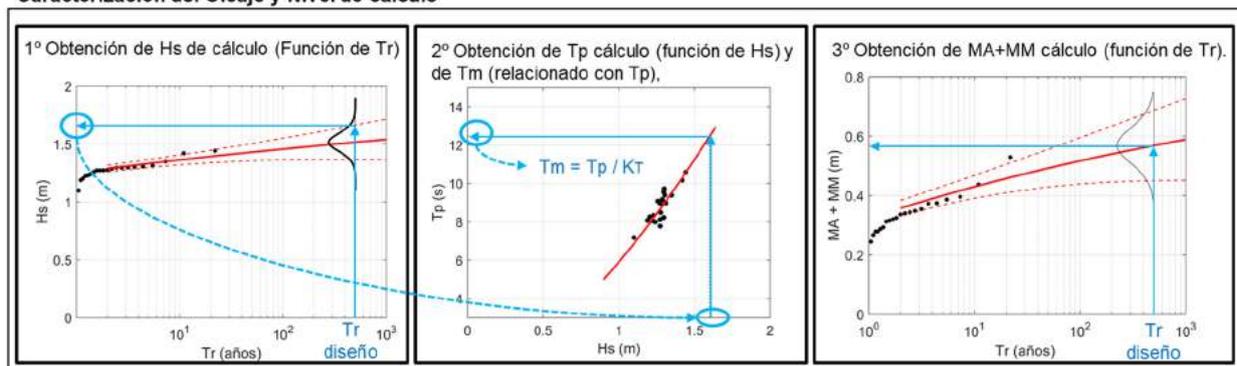


Figura 37 Obtención del oleaje y nivel del mar de cálculo para un determinado escenario climático y periodo de análisis.

6-II: Evaluación de impactos

La evaluación de los impactos estructurales, funcionales y operacionales se lleva a cabo siguiendo una metodología determinista, analizando el cumplimiento/no cumplimiento de los objetivos de proyecto según la normativa de aplicación ROM. Los requerimientos de fiabilidad y servicio se verifican con los temporales de cálculo obtenidos según el apartado anterior, mientras que los requerimientos operativos se comprueban con las series temporales horarios a pie de dique. Para ello, y al igual que en la Aproximación I, se define el árbol de fallo de la obra que relaciona los mecanismos que pueden conducir a la no consecución de los objetivos de proyecto, así como la relación jerárquica entre ellos. Para más detalles acerca de la conceptualización de la obra y la construcción de su árbol de fallo, ver 6-I: Evaluación de impactos.

Por lo tanto, el esquema conceptual para la evaluación de los impactos derivados del cambio climático se basa nuevamente en el trinomio Forzamiento /Estructura/Vulnerabilidad, tal y como se observa en la Figura 38, verificándose únicamente el cumplimiento o no cumplimiento de los objetivos de proyecto. En este caso, los elementos de la estructura costera analizada se caracterizan por tener que cumplir unos requerimientos de seguridad, funcionalidad y operatividad ante la solicitación climática, caracterizada por unos temporales de cálculo, en los dos primeros casos, y por las series temporales horarias a pie de dique para su evaluación operativa. Empleando las FSE descriptoras de los procesos Ψ a estudiar (fuerzas sobre elementos, caudales de rebase, agitación, etc.) y fijando los umbrales máximos permitidos Ψ_{umbral} se cuantifica el fallo/no fallo – parada/no parada de la obra ante los forzamientos climáticos. En el caso de los estados límites ultimo y servicio, únicamente se verifica el fallo ante el temporal de cálculo (Ecuaciones 17 y 18). En el estado límite operativo, se verifica el grado de cumplimiento aplicando las series temporales horarias resultado de propagar las proyecciones dinámicas hasta la localización costera (Ecuación 19).

$$(FSE)_{ELU} \rightarrow \Psi_{ELU} = f(\text{Temporal Cálculo}_{ELU}, \text{Propiedades estructurales}) \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\text{Fallo Estructural} \leftrightarrow \Psi_{ELU} > \Psi_{umbral,ELU}$$

$$(FSE)_{ELS} \rightarrow \Psi_{ELS} = f(\text{Temporal Cálculo}_{ELS}, \text{Propiedades estructurales}) \quad (\text{Ec. 18})$$

$$\text{Fallo Funcional} \leftrightarrow \Psi_{ELS} > \Psi_{umbral,ELS}$$

$$(FSE)_{ELO} \rightarrow \Psi_{ELO} = f(\text{Proyecciones horarias propagadas}, \text{Propiedades estructurales}) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$\text{Parada} \leftrightarrow \Psi_{ELO} > \Psi_{umbral,ELO}$$

La evaluación de los impactos sobre cada uno de los elementos de la estructura costera permite conocer si alguno de los elementos alcanza el fallo/parada en el escenario climático y periodo analizado. Hay que destacar que el tipo de resultados obtenidos en los estados límites relacionados con la integridad estructural de la obra (manto exterior, elementos monolíticos) o el equipamiento se verifican con el valor puntual de la variable de gobierno (Ψ_{ELU} o Ψ_{ELS}) del proceso de estudio. Esto significa que individualmente (modelo a modelo) la metodología no puede considerarse probabilista. No obstante, agregando los resultados de los N modelos climáticos en el periodo de referencia o de los 10N en los escenarios futuros, es posible presentar los resultados de forma probabilista considerando la incertidumbre propia de las proyecciones dinámicas.

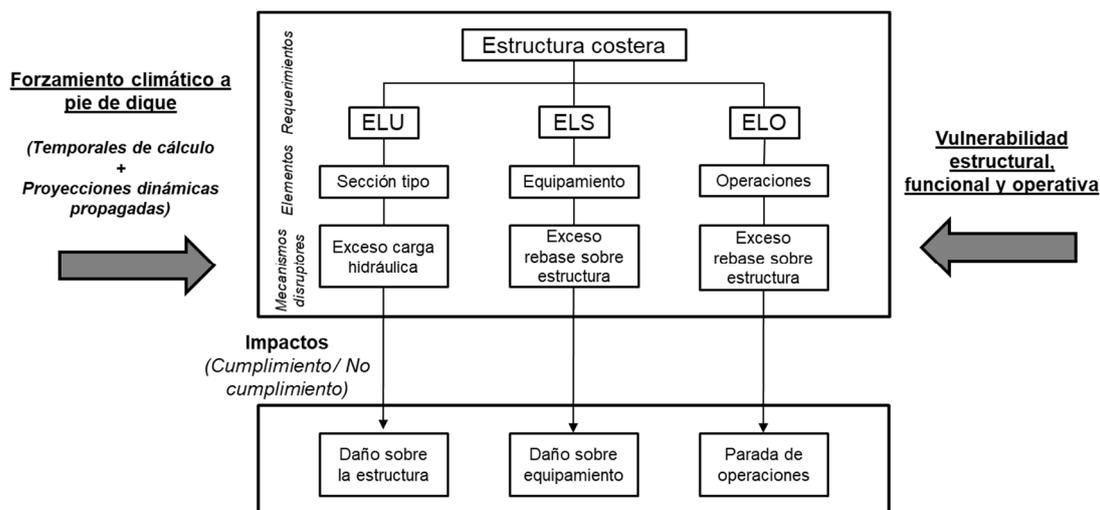


Figura 38 Esquema conceptual para la evaluación de los impactos de cambio climático en las obras de protección costera siguiendo la Aproximación II.

Con todo ello, se muestra cómo analizar los impactos de cambio climático en sus múltiples categorías según la clasificación ROM, a través de los cambios en los criterios de fallo/no fallo –parada/no parada de las variables de gobierno descriptoras de los modos de fallo hidráulico y de parada, aplicando una metodología determinista. Con el fin de cuantificar los cambios en los objetivos de proyecto, por cada uno de los periodos de análisis y escenarios climáticos, se obtienen las funciones de densidad de cada uno de los mecanismos disruptores, con la incertidumbre de los N modelos climáticos.

La aproximación metodológica aquí propuesta, basada en un análisis de alta resolución, permite identificar los requerimientos que pueden verse afectados por la variabilidad climática, así como los modos más críticos. Si bien el margen del cumplimiento/no cumplimiento no es posible conocerlo (únicamente se obtiene la función binaria cumplimiento/no cumplimiento), lo aquí presentado permite, al menos, pre-diseñar eficientemente futuras medidas de adaptación.

A continuación, se procede a describir los pasos metodológicos para el análisis pormenorizado de los modos de parada operativa y modos de fallo hidráulico.

6A-II: Modos de parada operativa

El procedimiento para la evaluación de los modos de parada operativa consta de los mismos pasos metodológicos que en la Aproximación I, dado que desde el punto de vista operativo la única diferencia del método radica en la técnica de downscaling empleada. Dado que la metodología de propagación analítica permite obtener series temporales horarias a pie de dique con las mismas características (longitud y resolución temporal) que aplicando la técnica de downscaling híbrido, la evaluación de los impactos se realiza dentro del mismo marco conceptual.

Los modos de parada operativa son los mecanismos que producen una interrupción en la operativa de la estructura por un periodo de tiempo igual a la acción del agente climático, de forma que en cuanto cesa la acción de ésta, se restablece su normal uso sin consecuencias estructurales. En general, estos modos de parada se desencadenan por un excesivo rebase sobre la estructura o una excesiva agitación interior en el trasdós de ésta.

Atendiendo a la normativa ROM, los modos de parada se evalúan anualmente haciendo uso de las series temporales horarias y teniendo que verificar, conjuntamente en la vida útil, los criterios de operatividad mínima anual (p); número medio de paradas (N_m) y duración máxima esperada (D_m).

La metodología para cuantificar los cambios de cada uno de estos tres criterios por efecto del cambio climático se muestra en la Figura 39, diferenciando entre el periodo de referencia histórico y los periodos y escenarios climáticos futuros, en los que debe considerarse la influencia del ANMM. En cualquier caso, tres son los pasos metodológicos que deben realizarse:

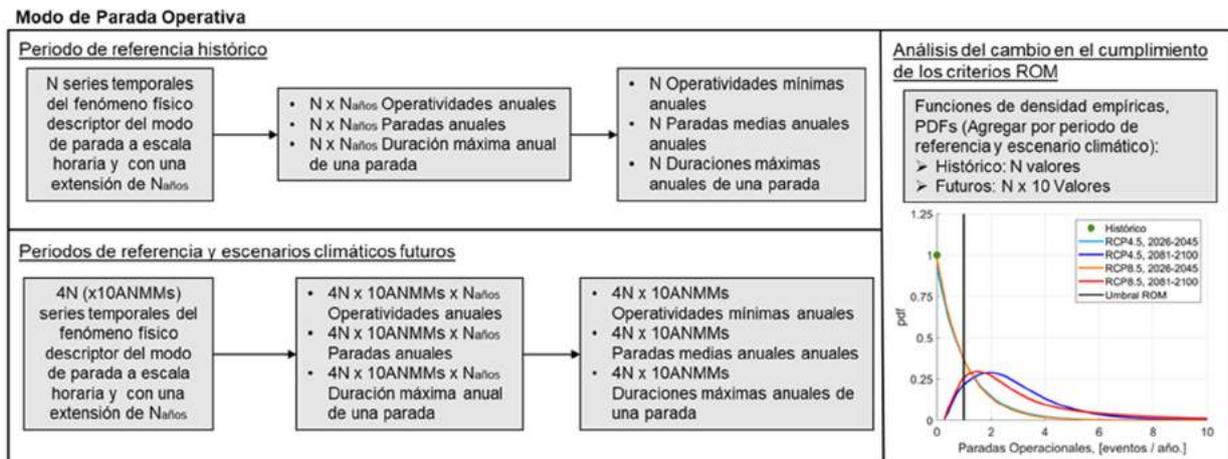


Figura 39 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de parada operativa.

1. Aplicar los conjuntos de proyecciones dinámicas del periodo de estudio/escenario y modelo climático con las variables de interés, para obtener la serie temporal horaria y continua de extensión igual a $N_{\text{años}}$ con el fenómeno físico descriptor del modo de parada. Por ejemplo, en el caso concreto del rebase, debe obtenerse la serie temporal horaria de caudal y volúmenes de rebase sobre la estructura aplicando las FSEs correspondientes. En el caso de los periodos de análisis y escenarios climáticos futuros, cada estado de mar se combina con cada uno de los deciles equiprobables de ANMM.
2. Cruzar las series temporales obtenidas en el paso anterior con el umbral operativo. Continuando con el ejemplo del rebase, se define el caudal o volumen de rebase a partir del cual se produce una parada de las operaciones. Esto conecta con el análisis anual de los tres criterios operativos, definiendo (1) las operatividades anuales (porcentaje de tiempo con condiciones operativas en cada año); (2) paradas anuales (número de eventos con condiciones no operativas en cada año) y (3) duración máxima anual (intervalo de tiempo consecutivo con mayor interrupción operativa en cada año). De forma análoga al paso anterior, en los periodos de análisis futuros se tienen los valores correspondientes a estos 3 criterios, multiplicado por diez para considerar la influencia del ANMM con sus correspondientes deciles.
3. Promediar los valores anuales obtenidos en el paso anterior para obtener estadísticos representativos del intervalo de tiempo analizado. Así pues, de las $N_{\text{años}}$ operatividades anuales se define la operatividad mínima anual (p) como el estadístico representativo del primer criterio. El segundo criterio queda reflejado por el número medio de paradas anuales

(Nm) en el intervalo de tiempo y el tercer criterio por la duración máxima probable (Dm), obtenida como la media de las duraciones máximas anuales.

Los valores discretos obtenidos de cada modelo, para cada periodo de análisis y escenario climático, deben agregarse por horizonte temporal de forma que se cuantifique el cambio a través de las funciones de densidad. Es decir, para cada uno de los tres criterios, en el periodo de referencia histórico se tendrá una función de densidad empírica construida con N valores los cuales se consideran equiprobables, pues los N modelos climáticos son igual de fiables para representar las condiciones climáticas en el periodo de tiempo analizado. En cambio, en los 4 horizontes temporales futuros, dichas funciones de densidad se encuentran conformadas por N x 10 valores equiprobables, puesto que los 10 deciles de ANMM son igual de probables por definición.

Resultado de aplicar lo anterior se obtiene una representación probabilista del grado de cumplimiento de cada uno de los tres criterios operativos de la estructura en los periodos de referencia histórico, de medio y largo plazo, bajo los dos escenarios de cambio climático analizadas (Figura 40). Dichas funciones de densidad son de gran valor para la toma de decisiones, pues cuantifican cuál es la probabilidad de no consecución de los objetivos de proyecto desde el punto de vista operativo (área bajo la curva, tal que la variable del criterio sea mayor que el umbral fijado por la ROM) en un escenario dado. Esto permite definir, por ejemplo, sobre qué elementos actuar y en qué instante para mantener los criterios de diseño operativos.

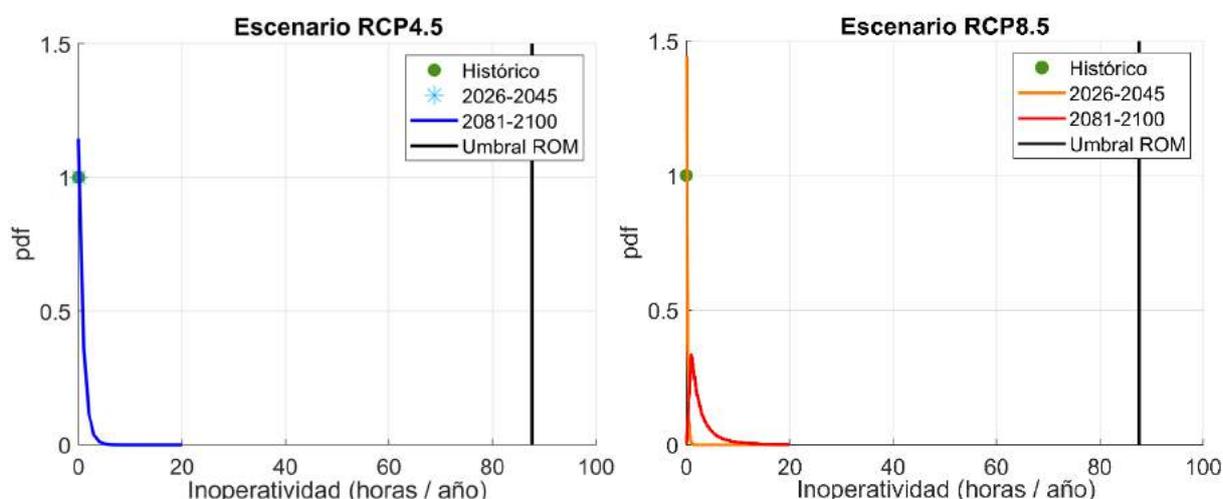


Figura 40 Funciones de densidad de la inoperatividad anual para el periodo de referencia histórico y los periodos de futuros en los dos escenarios de cambio climático analizadas.

6A-II: Modos de fallo hidráulico

El procedimiento para la evaluación de los modos de fallo hidráulico se basa en la verificación de un estado de mar pésimo, función del periodo de retorno de la obra, en cada uno de los periodos de análisis/escenarios y modelos climáticos considerados. Con ello, se comprueba en cada una de estos escenarios el cumplimiento o no de los criterios estructurales, presentando finalmente los resultados de forma probabilista al incorporar la incertidumbre derivada de los diferentes modelos climáticos empleados.

Los modos de fallo hidráulicos son los mecanismos que producen un daño estructural debido a la acción del oleaje. Estos se dividen en dos grupos, de acuerdo con la finalidad del elemento dañado. Así pues, si se daña un elemento estructural con un papel clave para asegurar la seguridad estructural de la obra se habla de modos de fallo hidráulicos, adscritos al estado límite último. Si el elemento dañado no tiene la misión de garantizar la estabilidad de la obra, pero es requerido para llevar a cabo las actividades por las que se concibe, se habla de los modos de fallo pertenecientes al estado límite de servicio. Ejemplo de los primeros puede ser los modos de fallo relacionados con el daño en las piezas del manto o espaldones, mientras que los segundos se relacionan con los elementos del equipamiento, tales como grúas e instalaciones.

Siguiendo con el marco conceptual de la normativa ROM, los modos de fallo hidráulicos son provocados por la acción de eventos extremos meteo-oceanográficos con un periodo de retorno de decenas o cientos de años. Este periodo de retorno define la importancia estructural de la obra, se considera constante en todo el análisis y permite obtener el temporal de cálculo en cada uno de los escenarios climáticos analizados. Así pues, definido un determinado periodo de retorno, se obtienen las características meteo-oceanográficas de éste en cada periodo/escenario/modelo verificándose si produce o no el fallo sobre la obra con características estructurales, iguales a las actuales en todo momento (se considera que parámetros tales como el diámetro de las piezas o cota de coronación no sufre modificaciones respecto a las condiciones iniciales).

Así pues, el procedimiento para cuantificar los cambios en el cumplimiento de los criterios de diseño del ELU y ELS por efecto del cambio climático, se articula nuevamente en 3 pasos, que se muestran en la Figura 41. Dado que cada uno de los estados límites, en general, consta de diferentes periodos de retorno (normalmente el periodo de retorno del ELU es superior al ELS), el procedimiento que se explica a continuación, debe realizarse dos veces en cada uno de los escenarios climáticos analizados.

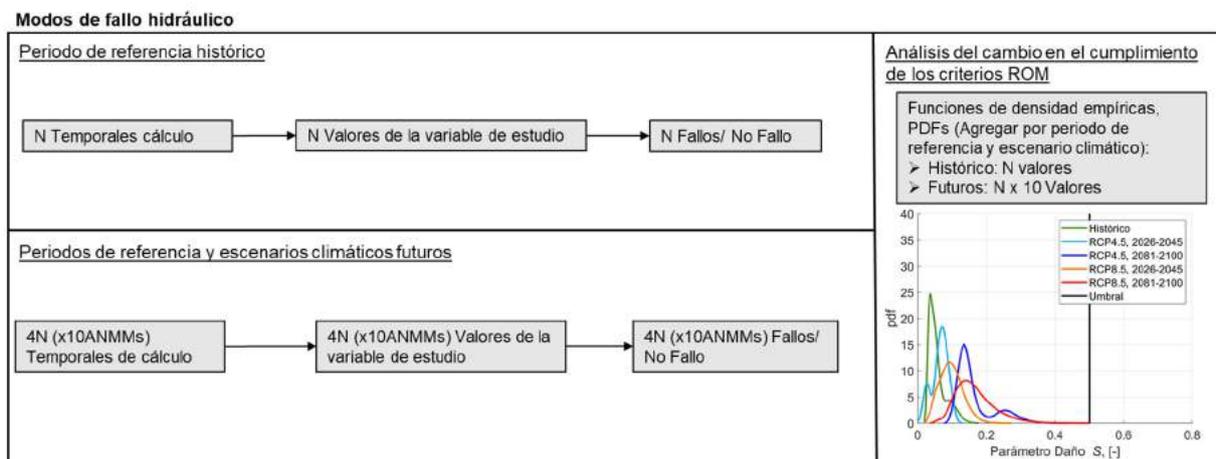


Figura 41 Metodología para el análisis de los impactos de cambio climático sobre los modos de fallo hidráulicos aplicando la Aproximación II.

1. Obtener los temporales de cálculo del periodo de de análisis /escenario y modelo climático con las variables de interés para la verificación del estado límite analizado. Este consta de las variables H_s , T_p , T_m , NM según lo explicado en 5B-II. En el caso de escenarios futuros, debe multiplicarse por 10 el procedimiento para considerar la influencia del ANMM a través de los 10 deciles equiprobables.
2. Obtener los valores de la variable descriptora del modo de fallo estudiado, Ψ . Por ejemplo, en el caso concreto del daño sobre el manto principal, deben obtenerse los valores del parámetro de daño, S , aplicando alguna de las FSE existentes en la literatura, forzada con los temporales de cálculo obtenidos en el paso anterior. En el caso de los periodos de referencia y futuros, cada estado de mar extremo se combina con cada uno de los deciles equiprobables de ANMM.
3. Por cada uno de los periodos de análisis/escenario y modelo climático se debe verificar el fallo/no fallo, cruzando cada uno de los valores descriptores del proceso estudiado con el valor de diseño, $\Psi_{umbrales}$. De forma análoga al paso anterior, en los periodos futuros el cumplimiento/no cumplimiento del criterio de diseño se obtiene multiplicado por diez por la acción del ANMM.

Obtenido los valores discretos de la variable de estudio, deben agregarse por horizonte temporal de forma similar a los modos de parada, considerando que los modelos y los 10 deciles (en caso de que existan) son equiprobables.

Como resultado de los pasos anteriores se obtiene una representación probabilista del cumplimiento de los criterios de fiabilidad y funcionalidad de la obra en los periodos de referencia histórico, en el medio y en el largo plazo, bajo los dos escenarios de cambio climático considerados.

Es necesario citar nuevamente que la variabilidad en los resultados obedece a la incertidumbre proveniente de los N modelos climáticos. Tomando como ejemplo las trayectorias del parámetro de daño para el temporal de cálculo del ELU (Figura 42), conocer su evolución a lo largo del siglo 21 permite disponer de una herramienta objetiva para la toma de decisiones. Esto permite analizar en qué instante de tiempo y bajo qué condiciones puede ser necesario plantear medidas de adaptación que permitan mantener los criterios de diseño relativos a fiabilidad y funcionalidad.

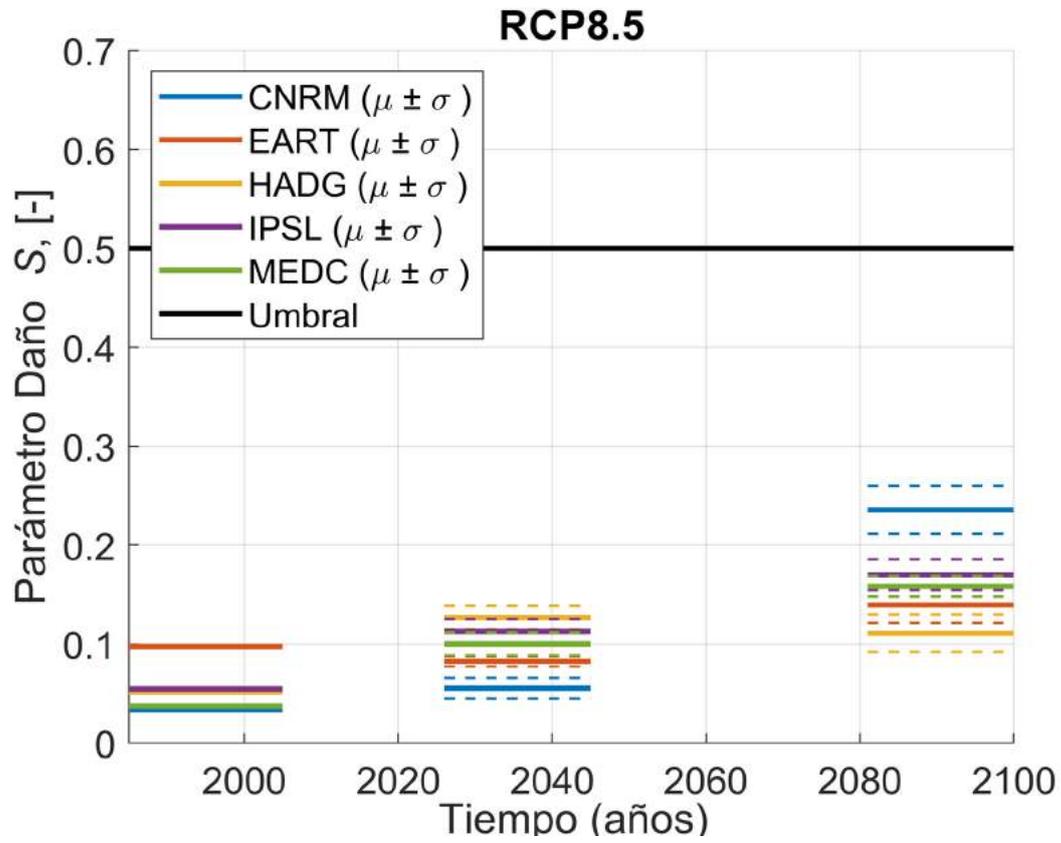


Figura 42 Evolución del parámetro de daño a la largo del siglo 21 en función del temporal de cálculo en cada uno de los modelos climáticos y periodos analizados. Los periodos futuros corresponden únicamente al RCP8.5. El resultado para cada uno de los modelos se representa mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático

2.4. Definición del caso piloto para la validación de la metodología.

En el presente apartado se presenta la aplicación de las dos aproximaciones metodológicas para la evaluación de los efectos del cambio climático sobre obras en la costa, con el objeto de validar los métodos y técnicas desarrolladas en el presente Contrato de Servicios.

Para ello, se ha seleccionado la protección costera de la línea ferroviaria de cercanías C-1 Barcelona-Mataró-Maçanet a su paso por la localidad de Mataró (Figura 43, paneles superiores) como caso piloto. Dicha línea ferroviaria discurre paralela a la costa del Maresme (Figura 43, panel inferior), habiéndose registrado eventos históricos de temporal marítimo con afección al servicio e instalaciones ferroviarias (nota de prensa de ADIF del 17 de diciembre de 2019).

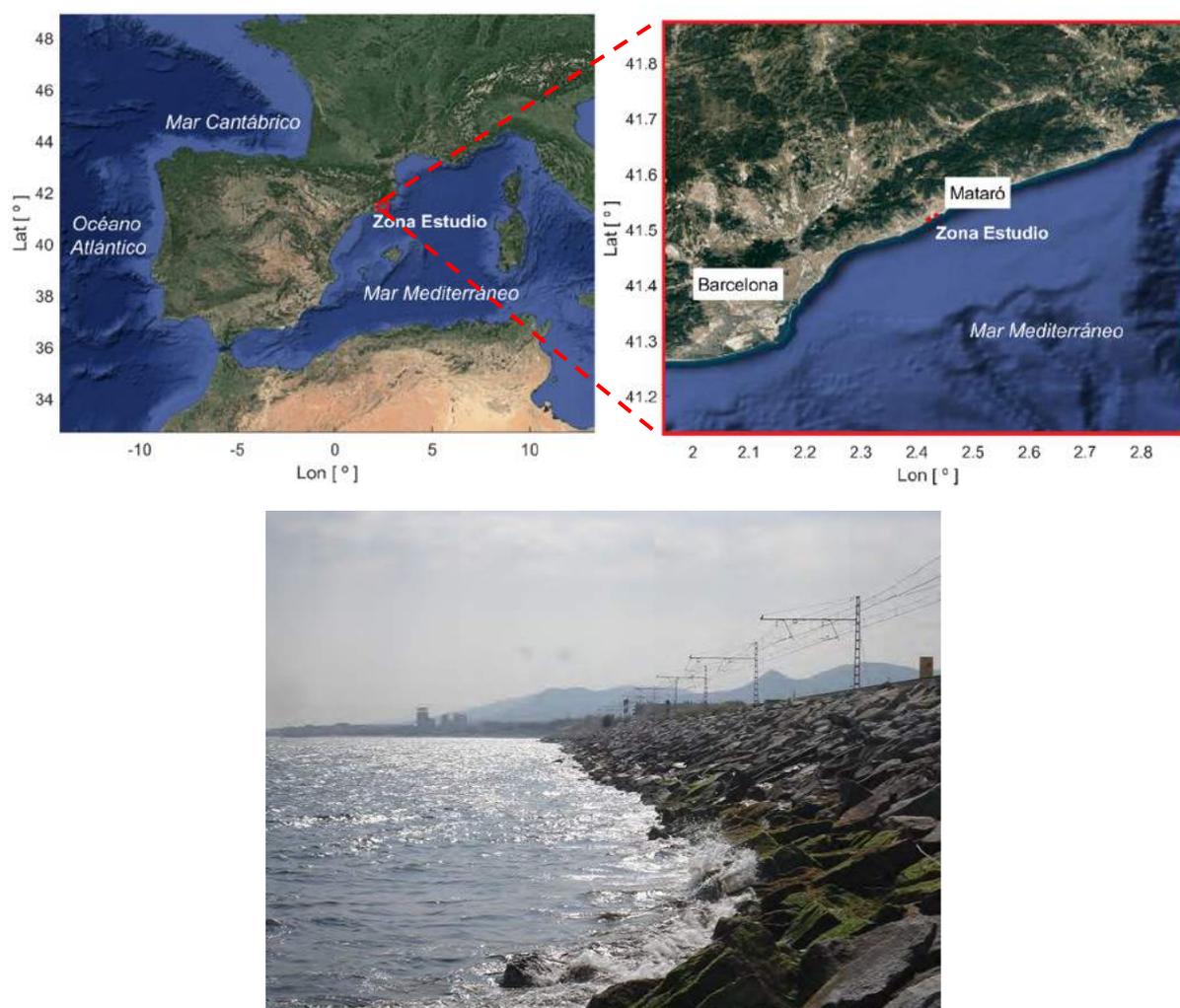


Figura 43 Paneles superiores: Localización de la zona piloto. Panel inferior: Protección costera en el tramo de estudio.

Siguiendo los pasos metodológicos desarrollados en ambas aproximaciones, a continuación, se presenta la definición del tramo costero, de las infraestructuras litorales estudiadas y de los modos de fallo y parada que condicionan su fiabilidad, funcionalidad y operatividad. Para ello, el usuario debe responder, previo a la aplicación de las metodologías de análisis propuestas, a las cuestiones destacadas a continuación. Hay que destacar que estas comienzan por conocer el problema final, lo que en la literatura científica se conoce cómo enfoque *bottom-up*.

- i. Descripción del problema: Cuantificación de los impactos del cambio climático en la estructura de protección costera de la línea de ferrocarril a su paso por la localidad de Mataró, evaluándose los modos de fallo con incidencia en la estabilidad y funcionalidad de la obra, así como los modos de parada afectando a la operatividad de ésta por eventos de rebase. Los requerimientos de la obra se obtienen en base al criterio ROM, evaluándose lo que se espera de la obra conocida su repercusión económica, social y ambiental.
- ii. Escala temporal del problema: Evaluación de largo plazo de los criterios de estabilidad, funcionalidad y operatividad de la obra atendiendo al marco normativo español ROM en el periodo de referencia 1985-2005 así como en los periodos futuros 2025-2045 y 2081-2100, ambos en los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5.
- iii. Escala espacial del problema: La proyección de los impactos de cambio climático se realiza siguiendo una metodología de alta resolución. Las actuaciones se llevan a cabo en un tramo homogéneo de 1900m de longitud (entre los P.K. 25+100 y 27+000), por ser el más crítico en la actualidad.
- iv. Configuración estructural y geométrica de la obra: Tipología de la sección tipo de dique en talud, constante a lo largo de los 1900m de longitud del tramo. En ella se analiza el daño en el manto principal del talud exterior (único modo de fallo adscrito al ELU), el daño en el equipamiento ferroviario por exceso de rebase (único modo de fallo adscrito al ELS) y la parada de operaciones por exceso de rebase (único modo de parada adscrito al ELO). Como punto a pie de dique, se toma una única localización representativa del tramo objeto de estudio (Lat.=41.5199°; Lon.=2.4291°).

2.4.5. Definición del tramo costero

La definición del tramo costero consta de la recopilación de la información descriptiva de la zona de estudio, así como, de las bases de datos climáticas a emplear. Para ello, en primer lugar, es necesario disponer de una información batimétrica detallada. En este caso, se emplea una batimetría con una resolución en vertical de 5 metros (Carta náutica 489, *Instituto Hidrográfico de la marina*) para resolver los procesos en aguas profundas, aumentándose la resolución espacial a medida que se reduce la profundidad (ver Figura 44) con el objetivo tratar de modelar lo más correctamente posible la rotura y los posibles efectos de concentración/dispersión del oleaje por cambios en los contornos batimétricos a escala local. Dicha información batimétrica junto con la definición de la línea de costa, proviene de la digitalización de las cartas náuticas en la zona de estudio.

En lo relativo a la información climática, y en vista de la disposición batimétrica desde profundidades indefinidas hasta la costa, el punto de anidamiento es el denominado P_0 en la Figura 44 . Es necesario recordar que este punto, en la Aproximación I, es el empleado para construir el emulador del clima del régimen extremal y, en la Aproximación II, para propagar de manera simplificada el oleaje hasta la zona de estudio.

Dado que para realizar el downscaling híbrido se necesita información meteo-oceanográfica en los contornos compatible y concomitante con el punto de anidamiento, para la Aproximación I se definen los Ptos. 1 y 2 como representativos del oleaje en los contornos. Tomando como referencia la numeración resultado de la Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019), el Punto Principal se corresponde con el punto 421, mientras que el contorno Este queda descrito por el punto 422 y el Oeste por el 407.

En cada uno de estos nodos la información a extraer es la siguiente:

- Oleaje: Series temporales horarias en el periodo de referencia histórico y en los dos futuros (medio plazo y largo plazo en los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5) con las variables altura de ola significativa H_s , periodo de pico T_p , periodo medio T_m y dirección de procedencia Dir en los modelos climáticos CNRM, EART, HADG, IPSL y MEDC. Estas series temporales con una cobertura temporal de 20 años resultan adecuadas para el empleo de la metodología propuesta. Así mismo, la resolución espacial de las bases de datos es de 10 Km.
- Marea Meteorológica: Series temporales horarias en el periodo de referencia histórico y en los dos futuros (medio plazo y largo plazo en los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5) con la componente de marea meteorológica MM en los modelos climáticos CNRM, EART, HADG, IPSL y MEDC. Estas series temporales deben haberse corregido en base al nivel de referencia de 1013mb de presión atmosférica en el periodo analizado. Las resoluciones espacio-temporales resultan ser las mismas que en las series de oleaje.
- Marea Astronómica: Serie temporal horaria en el periodo de referencia histórico y en los dos futuros (medio plazo y largo plazo en los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5) con la componente de marea determinista de marea astronómica, obtenida mediante análisis armónico de la base de datos resultado de la Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019) en el punto 421. Las resoluciones espacio-temporales resultan ser las mismas que en las series de oleaje, y
- Aumento del nivel del Mar local: Series temporales anuales en el periodo de referencia histórico y en los dos futuros (medio plazo y largo plazo en los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5) con la componente de aumento del nivel medio del mar ANMM en la zona de estudio. Cada una de éstas, está compuesta por las trayectorias de los 10 deciles equiprobables desde el instante de comienzo del análisis hasta final de siglo (Figura 45).

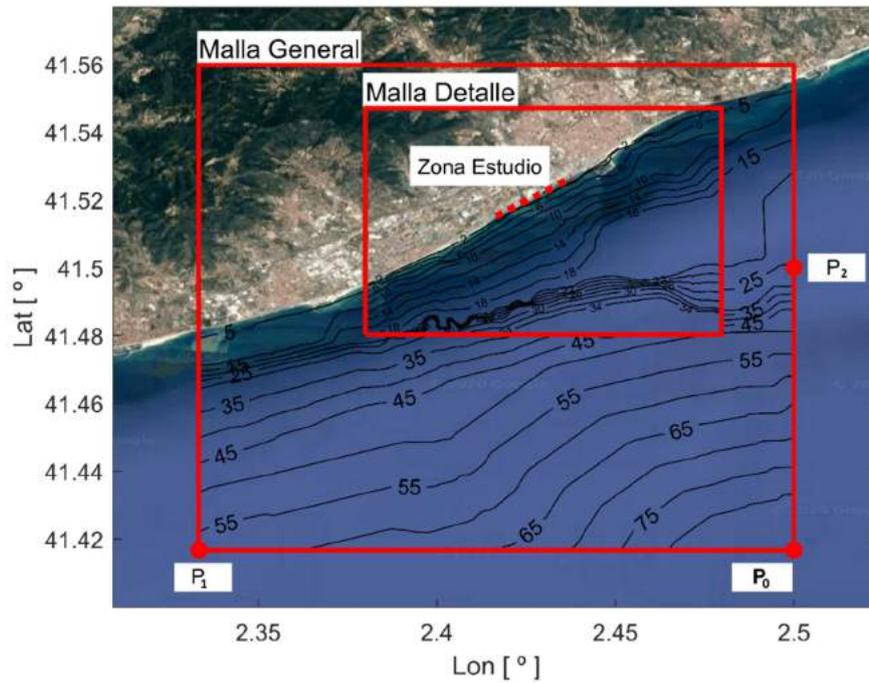


Figura 44 Descripción de la información batimétrica en la zona de estudio y de los nodos de las bases de datos de las proyecciones dinámicas de los que se hace uso para caracterizar el clima marítimo.

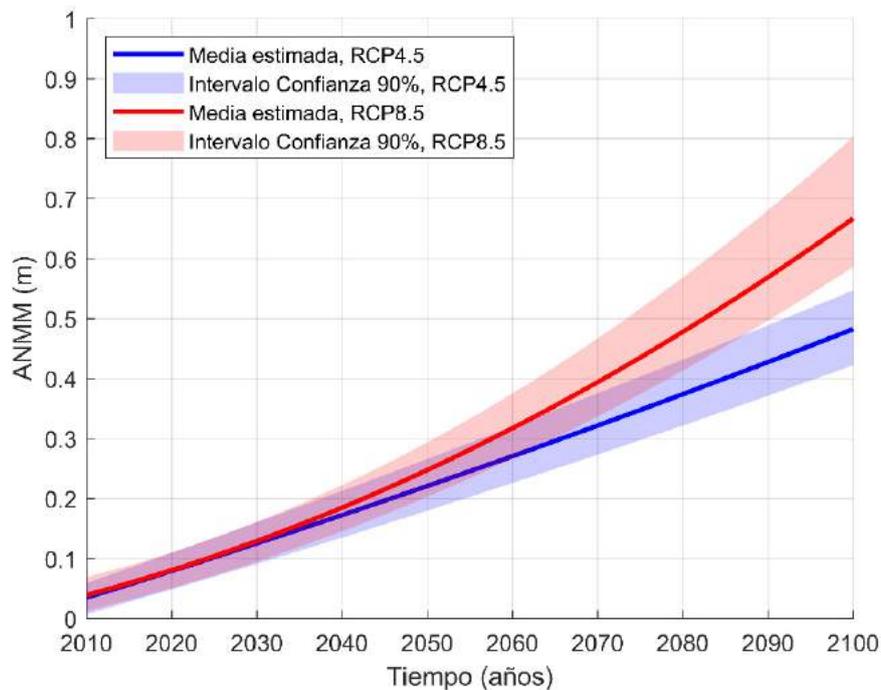


Figura 45 Trayectorias de aumento del nivel medio de mar hasta final de siglo en la costa del Maresme en los escenarios futuros de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5.

2.4.6. Definición de las infraestructuras costeras

En el tramo de estudio anteriormente descrito, las características geométricas y estructurales de la estructura costera estudiada son uniformes dando lugar a una única sección tipo (Figura 46). Esta estructura consta de dos mantos exteriores de doble capa de escollera, y de una berma intermedia. Además, se encuentra en aguas someras, con un calado que condiciona totalmente el oleaje incidente y su interacción con la estructura. Respecto a la coronación, la instalación ferroviaria se encuentra retranqueada dando lugar a otra berma en coronación.

Las características más relevantes de la sección tipo son las que se muestran a continuación asumiendo que se mantienen constantes en el tiempo, si bien se podría introducir tasas de variación de éstos resultado de una degradación o falta de un mantenimiento adecuado.

- Manto principal exterior: Escollera con un peso nominal W_{50} de 5 t dispuesto en 2 capas. Densidad nominal $\rho_{\text{rock}} = 2650 \text{ Kg}$, con un coeficiente de variación $CV\rho_{\text{rock}}$ del 5%. Función de distribución Normal con media 2650 Kg y desviación estándar 132.5 Kg.
- 1^{er} filtro manto exterior: Escollera con un peso nominal W_{50} de 500 Kg dispuesto en 2 capas. Densidad nominal $\rho_{\text{rock}} = 2650 \text{ Kg}$, con un coeficiente de variación $CV\rho_{\text{rock}}$ del 5%. Función de distribución Normal con media 2650 Kg y desviación estándar 132.5 Kg.
- Calado a pie de dique: 2 metros respecto al nivel medio del mar local.
- Berma intermedia: Anchura de 3.80 metros a la cota de +2.35 respecto al nivel medio del mar local.
- Berma superior: Anchura de 3.80 metros a la cota de +6.00 respecto al nivel medio del mar local.
- Talud de la estructura: Talud nominal $\cot(\alpha) = 1.5$, con un coeficiente de variación $CV\cot(\alpha)$ del 5%. Función de distribución Normal con media 1.5 y desviación estándar 0.075.
- Coeficiente de permeabilidad: $P = 0.4$ (ver Van Der Meer 1988).
- Coeficiente de fricción: $\gamma_f = 0.4$ (ver EuroTop Manual 2018).

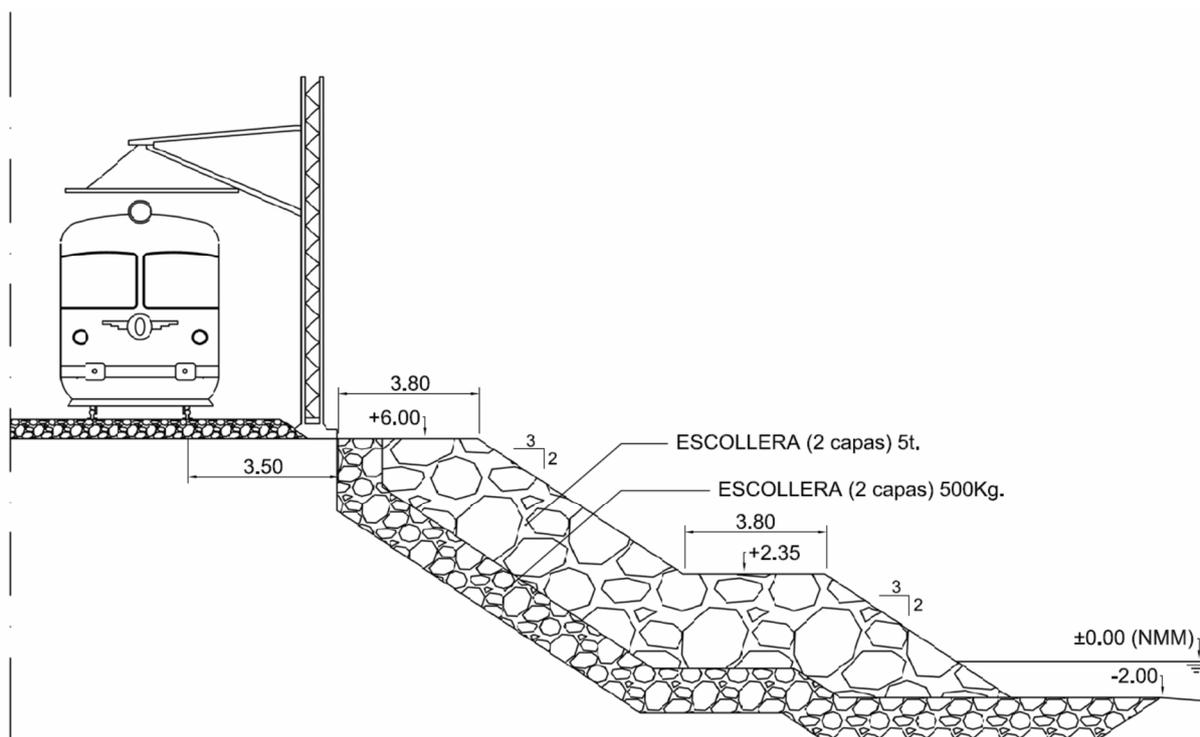


Figura 46 Sección tipo de la estructura costera analizada.

En cuanto a las bases de cálculo de la obra de defensa costera estudiada según el criterio ROM, su relevancia económica, ambiental y social queda descrita por cuatro índices descriptores del carácter general del tramo (IRE e ISA) así como de su carácter operativo (IREO e ISAO). En función del valor de éstos, se obtiene los criterios de diseño estructurales (Vida útil mínima y máximas probabilidad de fallo del ELU y ELS) y operativos (operatividad mínima, número máximo de paradas anuales y duración máxima de una parada).

A continuación, se detalla la obtención de los índices IRE, ISA, IREO, ISAO:

- Índice de repercusión económica IRE: Cuantificación de las repercusiones económicas del cese de las actividades relacionadas con la obra en caso de producirse un fallo estructural de la misma. A falta de más detalles, se considera que el coste de reconstrucción es igual al coste de construcción (41M€). Los costes imputables al cese de actividad se calculan con base en los coeficientes A, B y C (Tabla 1). El parámetro económico de adimensionalización toma el valor de 3M€ en el territorio español.

$$IRE = \frac{\text{Coste Reconstrucción}}{C_0} + C(A + B) = \frac{41M \text{ €}}{3M \text{ €}} + 1(5 + 5) = 24 \quad (\text{Ec. 20})$$

Coeficiente del ámbito del sistema A		
Local (1)	Regional (2)	Nacional / Internacional (5)
Coeficiente de la importancia estratégica B		

Irrelevante (0)	Relevante (2)	Esencial (5)
Coeficiente de la importancia económica C		
Irrelevante (0)	Relevante (1)	Esencial (2)

Tabla 1 Repercusión económica del cese de actividad por fallo estructural.

- Índice de repercusión social y ambiental ISA: Cuantificación de las repercusiones sociales y ambientales por cese de las actividades relacionadas con la obra en caso de producirse un fallo estructural de la misma. Se estima a partir de los parámetros ISA_1 , ISA_2 e ISA_3 (Tabla 2).

$$ISA = ISA_1 + ISA_2 + ISA_3 = 10 + 4 + 15 = 29 \quad (Ec. 21)$$

Subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas ISA_1				
Remoto (0)	Bajo (3)	Alto (10)	Catastrófico (20)	
Subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio artístico ISA_2				
Remoto (0)	Bajo (2)	Medio (4)	Alto (8)	Muy Alto (15)
Subíndice de alarma social ISA_3				
Remoto (0)	Medio (5)	Alto (10)	Máxima (15)	

Tabla 2 Repercusión social y ambiental del cese de actividad por fallo estructural.

- Índice de repercusión económico operativo IREO: Cuantificación de las repercusiones económicas del cese de las actividades relacionadas con la obra en caso de producirse una parada operativa. Se estima a partir de los parámetros D, E y F (Tabla 3).

$$IREO = F(D + E) = 3(5 + 3) = 24 \quad (Ec. 22)$$

Coeficiente de simultaneidad D		
Periodos no simultáneos (0)	Periodos simultáneos (5)	
Coeficiente de intensidad E		
Poco intenso (0)	Intensivo (3)	Muy intensivo (5)
Coeficiente de adaptabilidad F		
Adaptabilidad alta (0)	Adaptabilidad media (1)	Adaptabilidad baja (3)

Tabla 3 Repercusión económica del cese de actividad por parada operativa.

- Índice de repercusión social y ambiental operativo ISAO: Cuantificación de las repercusiones sociales y ambientales por cese de las actividades relacionadas con la obra en caso de producirse una parada operativa. Se estima a partir de los parámetros ISAO₁, ISAO₂ e ISAO₃ (Tabla 4).

$$ISAO = ISAO_1 + ISAO_2 + ISAO_3 = 10 + 4 + 15 = 29 \quad (Ec. 23)$$

Subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas ISAO ₁				
Remoto (0)	Bajo (3)	Alto (10)	Catastrófico (20)	
Subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio artístico ISAO ₂				
Remoto (0)	Bajo (2)	Medio (4)	Alto (8)	Muy Alto (15)
Subíndice de alarma social ISAO ₃				
Remoto (0)	Medio (5)	Alto (10)	Máxima (15)	

Tabla 4 Repercusión social y ambiental del cese de actividad por parada operativa.

Siguiendo el criterio ROM, las bases de cálculo de la obra quedan descritas por el carácter general y operativo del tramo. Como se muestra en la Tabla 5, los modos de fallo adscritos al estado límite último (ELU) deben garantizar una vida útil mínima de 50 años con una probabilidad conjunta de fallo máxima del 0.01.

En cuanto al estado límite de servicio (ELS), la vida útil mínima es de 50 años con una probabilidad conjunta de fallo máxima del 0.07.

Finalmente, en cuanto a los requerimientos operativos, la operatividad mínima anual debe ser de 0.99; el número medio de paradas operativas anuales es de 2 y la duración máxima de cada una de éstas de 1 hora. La definición de estos criterios de diseño permite conocer cuáles han sido las bases técnicas con las que se construyó la obra, pero también permite conocer como varían éstos en escenarios climáticos futuros. Como se explica en el apartado de los impactos, la influencia del cambio climático sobre la obra de protección estudiada se analizará a través de la cuantificación de los cambios en los criterios generales y operativos del tramo.

Carácter general del tramo	
IRE (>20, ALTO)	Vida útil mínima, $V_m = 50$ años
ISA (20-29, ALTO)	Máxima probabilidad conjunta fallo ELU, $P_{f_{ELU}} = 0.01$ Máxima probabilidad conjunta fallo ELS, $P_{f_{ELS}} = 0.07$
Carácter operativo del tramo	

IREO (>20, ALTO)	Operatividad mínima, $p = 0.99$
ISAO (20-29, ALTO)	Número medio de paradas operativas, $N_m = 2$
IREO (>20, ALTO) & ISAO (20-29, ALTO)	Duración máxima de una parada operativa, $D_m = 1$ hora

Tabla 5 Bases de cálculo de la obra litoral, descritas a través del carácter general y operativo del tramo.

2.4.7. Definición de los modos de fallo y parada

Los mecanismos que pueden conducir a un fallo estructural, modos de fallo, u operativo, modos de parada, se esquematizan en la Figura 47. Tal y como se explicó anteriormente, desde el punto de vista estructural, el único elemento susceptible de comprometer la seguridad de la obra es el manto exterior. Esto implica que el exceso de carga hidráulica sobre el manto exterior sea el único modo de fallo adscrito al estado límite último. Desde el punto de vista estructural, pero sin consecuencias críticas para la estabilidad de la obra, esta puede verse afectada por un daño sobre el equipamiento ferroviario. Nótese que el fallo de éste no implica la destrucción o el colapso del dique. Esto conduce a que el exceso de caudal de rebase sobre el equipamiento ferroviario sea el único modo de fallo a estudiar, desde el punto de vista del estado límite de servicio. Finalmente, la operatividad de la línea ferroviaria puede verse comprometida por un exceso de caudal de rebase, lo que, sin producir daños sobre el equipamiento, puede desencadenar las paradas de las operaciones ferroviarias. Esto motiva que nuevamente el exceso de caudal de rebase, pero desde el punto de vista operativo, sea el único modo de parada adscrito al estado límite operativo.

La modelización de los citados modos de fallo y parada se realiza considerando el oleaje incidente a pie de dique (resultado del módulo de downscaling), y las particularidades de la obra litoral. En este sentido, a continuación, se presenta la evaluación, tanto de la estabilidad hidráulica de las piezas del manto exterior, como del caudal de rebase sobre la estructura.

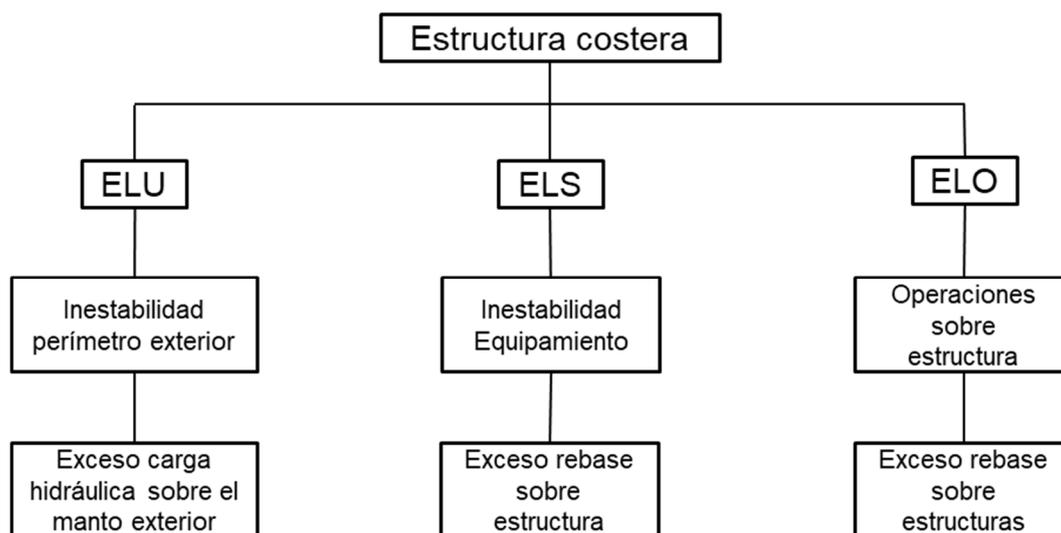


Figura 47 Árbol de fallo de la estructura analizada.

- Exceso carga hidráulica manto exterior

El exceso de carga hidráulica sobre el manto exterior se analiza aplicando la formulación semi-empírica presentada por van Gent et al. 2003. Esta formulación es adecuada para mantos exteriores formados por escollera, localizados en profundidades reducidas sobre con una pendiente de la batimetría suave.

Haciendo uso en la Aproximación I de los miles de estados de mar sintéticos descriptores del régimen extremal a pie de dique, o en la Aproximación II de los estados de mar de cálculo, se verifica la estabilidad del manto exterior comparando el valor del parámetro de daño medido, S , con el valor umbral recomendado en la literatura existente, $S_{umbral} = 0.5$ (inicio de avería).

La formulación empleada requiere obtener el parámetro $H_{2\%}$ del estado de mar para calcular la influencia de la limitación por fondo. Para ello, partiendo de los parámetros espectrales propagados a pie de dique y asumiendo un espectro teórico JONSWAP con $\gamma=3.3$, y una distribución Rayleigh de las alturas de olas individuales H_i , se obtienen los pares individuales $[H_i, T_i]$ del estado de mar. mediante la función de densidad bivariada de Longuet-Higgins (1983).

Los parámetros estructurales del dique se consideran probabilistas en la Aproximación I, simulándose al comienzo de cada una de las NVU vidas útiles sintéticas, tomando como referencia las funciones de distribución normal previamente caracterizadas. En la Aproximación II se toman los valores nominales.

Es necesario hacer constar que la fórmula de van Gent (2003) diferencia entre situaciones de rotura sobre el talud en voluta (Ec.24) o en colapso (Ec.25) al considera el número de Iribarren, ξ (Ec.26), que relaciona la pendiente del dique, α , con el peralte del oleaje. En cuanto a los parámetros de ajuste del modelo, la formulación para un oleaje rompiendo en voluta se caracteriza por un $c_{voluta} = 8.3$, con una desviación estándar $\sigma_{c,voluta} = 0.7$; para rotura en colapso, $c_{colapso} = 1.3$ con una desviación estándar $\sigma_{c,colapso} = 0.15$. Al igual que en el resto de parámetro estructurales, dichos coeficientes se simulan aleatoriamente al comienzo de cada vida útil sintética, asumiendo que siguen una distribución normal en la Aproximación I. Por el contrario, en la Aproximación II, se asumen los valores de diseño $c_{voluta} = 7.7$ y $c_{colapso} = 1.15$.

➤ Voluta ($\xi < \xi_{cr}$)

$$\frac{S}{\sqrt{N_{olas}}} = \left(\frac{1}{C_{voluta}} \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \xi^{0.5} P^{-0.18} \left(\frac{H_{2\%}}{H_s} \right) \right)^5 \quad (Ec. 24)$$

➤ Colapso ($\xi \geq \xi_{cr}$)

$$\frac{S}{\sqrt{N_{olas}}} = \left(\frac{1}{C_{colapso}} \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \xi^{-P} P^{-0.13} \tan \alpha^{0.5} \left(\frac{H_{2\%}}{H_s} \right) \right)^5 \quad (Ec. 25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_m^2}}} \\ \xi_{cr} = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/P+0.5} \end{array} \right. \quad (Ec. 26)$$

- Exceso rebase sobre la estructura

El exceso de rebase sobre la estructura se calcula siguiendo el procedimiento descrito en el Eurotop Manual (2018), para estructuras en talud. Este procedimiento es ampliamente empleado en ingeniería costera y portuaria, siendo el método más extendido entre la comunidad científica. En concreto, se ha utilizado el procedimiento para el cálculo del caudal de rebase en estructuras en talud (Procedimiento 6.3.1 de EuroTop Manual 2018, pp. 174-177):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = C_r \left(c_1 \exp \left[- \left(c_2 \frac{R_c}{H_s \gamma_f \gamma_\beta \gamma_{berma}} \right)^{1.3} \right] \right) \quad (Ec. 27)$$

La fórmula empleada para el cálculo del caudal de rebase, q , se presenta en la ecuación 36. En términos generales, el caudal depende de la altura de ola significativa a pie de dique, H_s , y del francobordo relativo, R_c (Distancia vertical entre el nivel del mar NM del estado de mar y la cota de coronación del dique). Además, el rebase puede verse reducido por la fricción de los bloques de protección γ_f ; la oblicuidad del oleaje γ_β ; la presencia de bermas intermedias γ_{berma} ; y de berma de coronación C_r .

En el caso de la estructura analizada, la disposición de 2 mantos exteriores de escollera en dos capas sobre un núcleo impermeable motiva usar $\gamma_f=0.4$ (EuroTop Manual 2018, pp. 175). Para considerar la influencia del ángulo de incidencia y de la berma intermedia, los factores de corrección se calculan, en cada estado de mar, aplicando las ecuaciones 28 y 29. Cabe destacar que la capacidad reductora de la berma intermedia depende de los parámetros B , L y d_b según la Figura 48. Finalmente, el retranqueo de la coronación se tiene en cuenta aplicando la ecuación 30, conociendo que la anchura de la berma de coronación es $G_c=3.8$ m.

En cuanto a los parámetros de ajuste del modelo, c_1 y c_2 , de forma análoga a la fórmula para el cálculo del daño en el manto exterior, se consideran normalmente distribuidos. El primer parámetro, c_1 , tiene un valor medio de 0.09 con desviación estándar igual a 0.0135. Para c_2 , el valor medio es 1.5 y la desviación estándar 0.15. En la Aproximación I, ambos se simulan al comienzo de cada vida útil, conocida su distribución normal. En cambio, en la Aproximación II, se emplea el denominado método de diseño fijándose el valor de c_1 en 0.1035 y el de c_2 en 1.35.

Los valores máximos de rebase permitidos en los estados límite de servicio y operativo son $q_{umbral,SLS} = 1$ l/s/m y $q_{umbral,ELO} = 0.001$ l/s/m, respectivamente.

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1 - 0.0063 |\beta|, & 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ \\ 1 - 0.0063 |80|, & |\beta| > 80^\circ \end{cases} \quad (Ec. 28)$$

$$\gamma_{berma} = 1 - r_B(1 - r_{db}), \quad 0.6 \leq \gamma_{berma} \leq 1 \quad (Ec. 29)$$

$$\begin{cases} r_B = \frac{B}{L_{Berm}} \\ r_{db} = 0.5 - 0.5 \cos \left(\pi \frac{d_b}{2 H_s} \right) \end{cases}$$

$$C_r = 3.06 \exp \left(-1.5 \frac{G_c}{H_s} \right), \text{ con un máximo en } C_r = 1 \quad (Ec. 30)$$

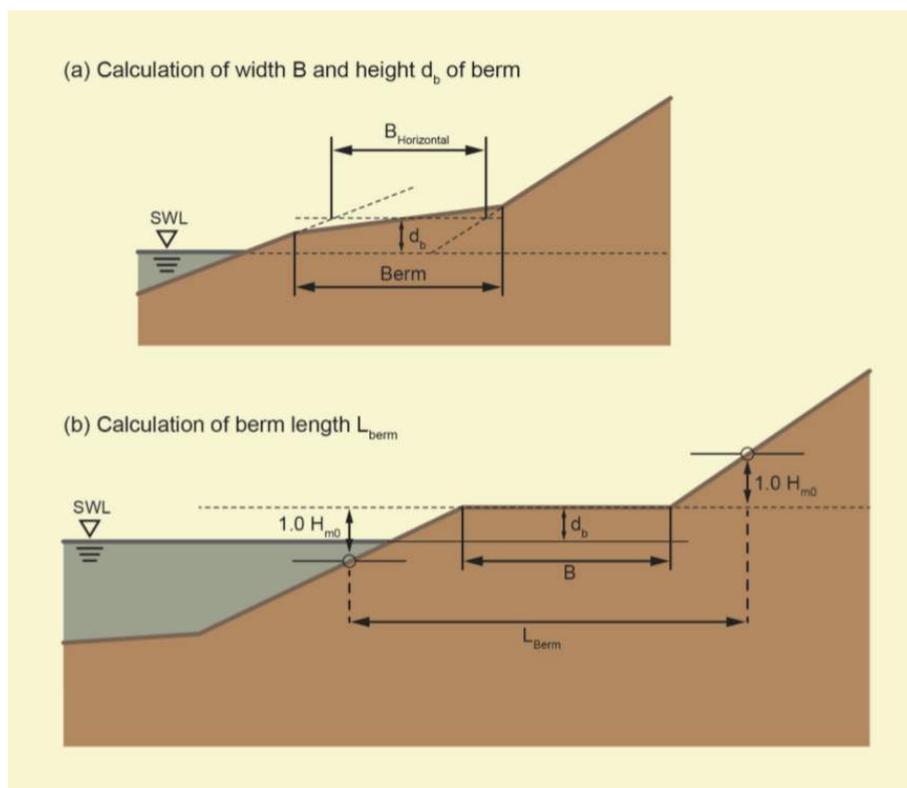


Figura 48 Definición de la berma intermedia a través de sus características geométricas (Tomada de EuroTop Manual, 2018).

2.5. Aplicación de las fases de downscaling e impacto

La proyección de las consecuencias derivadas del cambio climático en las obras de protección requiere, en primer lugar, conocer los forzamientos climáticos presentes y futuros que solicitan la estructura para, en segundo lugar, evaluar cómo cambia la respuesta estructural de la misma. Para ello es necesario aplicar el módulo de downscaling, que permite transferir la información climática hasta la zona de estudio, y el módulo de impactos, que cuantifica los cambios esperables en los criterios de diseño atendiendo a la normativa vigente. A continuación, se muestra cómo aplicar estos dos módulos en el caso de estudio, empleando las dos aproximaciones desarrolladas.

2.5.1. Aplicación de la Aproximación I

La Aproximación I se caracteriza por el empleo de técnicas de última generación, tanto para resolver los procesos de transformación del oleaje desde aguas profundas hasta la posición de la obra en la costa, como para inferir posibles eventos extremos no registrado pero probables. El objetivo es utilizar dicha información para evaluar los impactos del cambio climático en las estructuras costeras atendiendo a la ROM.

Obtención de la información climática a pie de obra

Para obtener el régimen extremal, se deben construir los 4N+N emuladores climáticos con N=5 (número de modelos climáticos) multivariados a escala mensual. Siguiendo la ecuación 9 y la ecuación 10, una vez definida la probabilidad de fallo mínima que se quiere caracterizar, ($P_{f_{ELU}}=0.01$), se generan 10.000 NVUs vidas útiles sintéticas de 50 Vm años, a escala mensual. Es decir, en cada uno de los 25 emuladores climáticos, se simulan 10.0000 x 50 x 12 eventos sintéticos extremos con las variables [Hs, Tm, Tp, Dir, MA+MM]. Se pretende con ello abarcar las múltiples combinaciones extremas entre sus variables, atendiendo a su probabilidad de ocurrencia en el escenario analizado.

En las Figura 49 y Figura 50 se presenta el resultado de aplicar la simulación sintética de estados de mar extremos basada en la técnica de Monte Carlo al modelo EART, para el periodo 2026-2045, en el escenario RCP8.5. Hay que recordar que se ha realizado en cada modelo, periodo y escenario climático.

Analizando la Figura 49, se observa como los regímenes univariados de cada una de las variables de interés están adecuadamente modelados en términos de intensidad (magnitud de los eventos extremos), frecuencia (recurrencia en el tiempo) y no estacionariedad (variabilidad dentro del año). La Figura 50, muestra que el comportamiento multidimensional de estos eventos también está correctamente caracterizado con una adecuada representación de los patrones de correlación de las variables dos a dos.

El régimen medio, la escala temporal del análisis de los impactos operativos (horaria), no requiere la simulación sintética de estados de mar representativos de las condiciones diarias, dado que las bases de datos de las proyecciones dinámicas (20 años) son suficientemente largas.

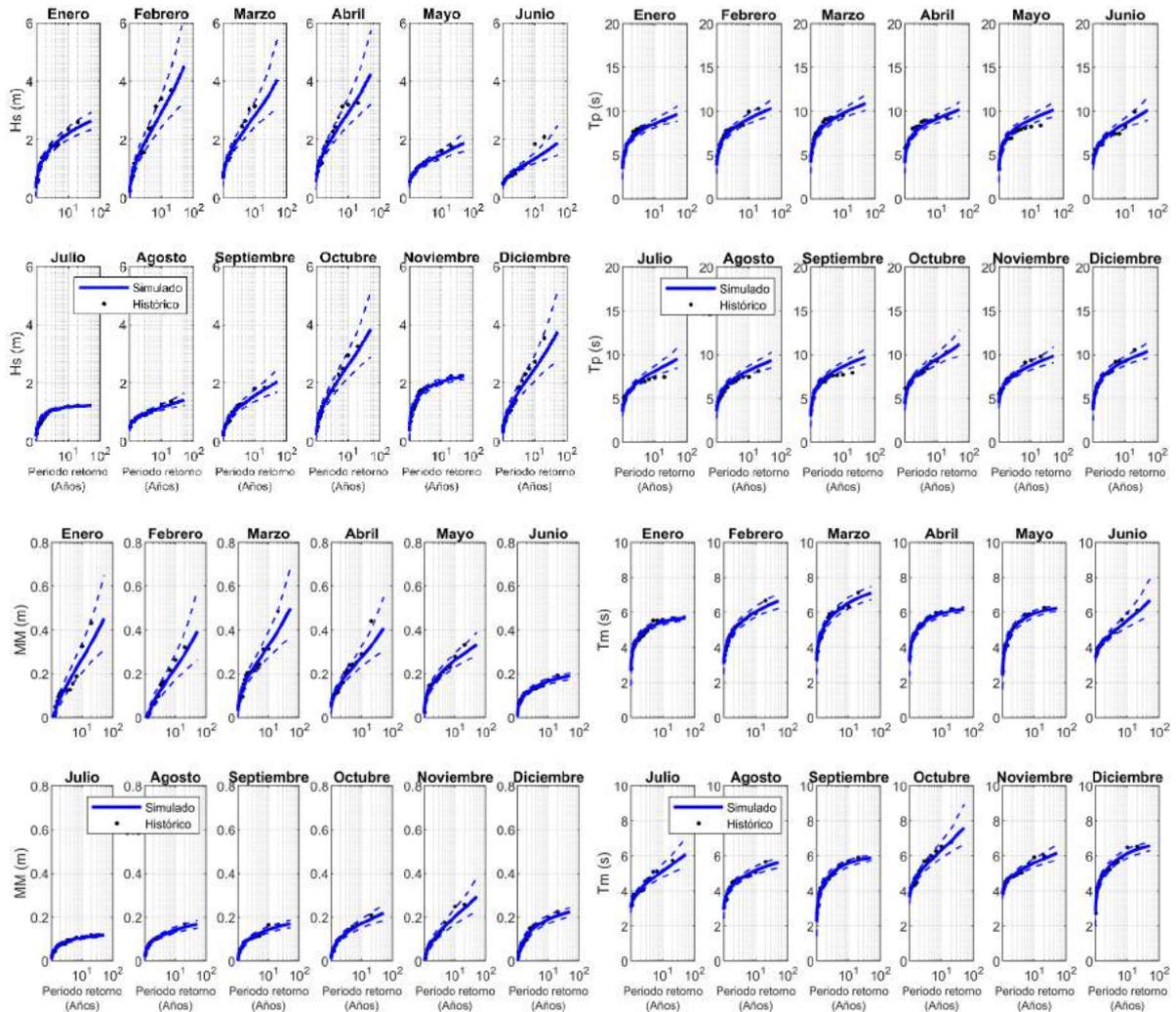


Figura 49 Regímenes extremales mensuales en el modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045 en el escenario RCP8.5. Las 10.000 simulaciones sintéticas de 50 años aplicando el emulador multivariado se representan mediante su valor medio (línea azul continua) y las bandas de confianza del 90% (líneas azules discontinuas). Los valores registrados en la base de datos del modelo climático se representan por puntos negros. Panel superior izquierda: Altura de ola significativa, H_s (m). Panel superior derecha: Periodo de pico, T_p (s). Panel inferior izquierda: Marea meteorológica, MM (m). Panel inferior derecha: Periodo medio, T_m (s).

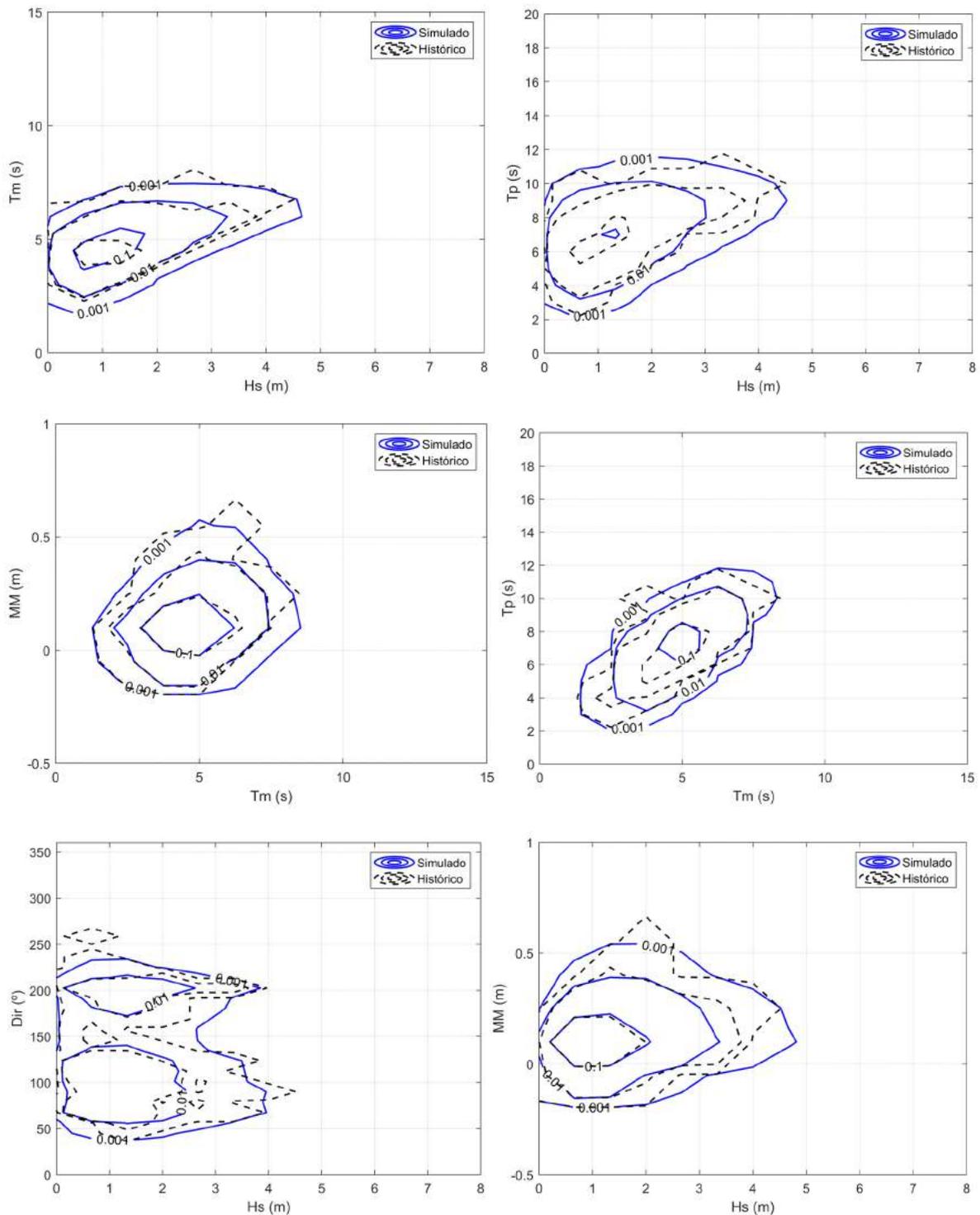


Figura 50 Representación bivariada de la función de densidad conjunta en el modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045, en el escenario RCP8.5. Las 10.000 simulaciones sintéticas de 50 años, obtenidas aplicando el emulador multivariado, se representan mediante líneas continuas azules y los valores registrados en la base de datos del modelo climático mediante líneas discontinuas negras. Panel superior izquierda: Hs-Tm. Panel superior derecha: Hs-Tp. Panel central izquierda: Tm-MM. Panel central derecha: Tm-Tp. Panel inferior izquierda: Hs-Dir. Panel inferior derecha: Hs-MM.

La transferencia del oleaje hasta la localización de interés, tanto de las condiciones extremas como medias, se lleva a cabo aplicando la técnica del downscaling híbrido que combina métodos estadísticos y numéricos.

El primero de estos métodos es la selección MAXDISS. En este caso concreto su aplicación consta de una primera selección de 25 subconjuntos de tamaño $P=1000$, representativos de las condiciones extremas (estados de mar sintéticos) y medias (proyecciones dinámicas de los modelos climáticos) considerando las variables [Hs,Tm,Dir,NM].

Siguiendo con el ejemplo del modelo EART, para el periodo de referencia 2026-2045, en el escenario RCP8.5, en la Figura 51 se muestra la aplicación de esta técnica incluyendo, para el periodo analizado, los dos percentiles de ANMM extremos (ANMM 1 y ANMM 10) en la definición del nivel del mar. La segunda selección se aplica sobre los 25 subconjuntos, cada uno de ellos de tamaño $P=1000$, para definir la muestra final, también de tamaño $P=1000$, representativa de la totalidad de la variabilidad climática en el punto de aguas abiertas para cualquier periodo de referencia, escenario y modelo climático.

La segunda parte de la metodología de downscaling híbrido consiste en la propagación numérica del subconjunto final, resultado de la selección final MAXDISS. Esto se realiza con el modelo numérico SWAN, pudiendo transferir el oleaje hasta profundidades intermedias-reducidas con una adecuada representación de sus procesos de transformación. En este caso, el punto objetivo a pie de dique se encuentra a un calado de 2 m, sumándole el NM de cada estado de mar para obtener el calado de cada una de las 1000 simulaciones.

En la Figura 52 se muestra los mapas de propagación en 4 situaciones representativas de temporal, atendiendo a la dirección de procedencia del oleaje. En este caso, hay que destacar las concentraciones de energía que se producen localmente, cerca de la zona de estudio, para los oleajes procedentes del NE.

Mediante las propagaciones numéricas se obtienen, para cada uno de los $P=1000$ estados de mar, los espectros del oleaje a partir de los que se puede calcular los parámetros altura de ola significativa y dirección media del oleaje a pie de dique.

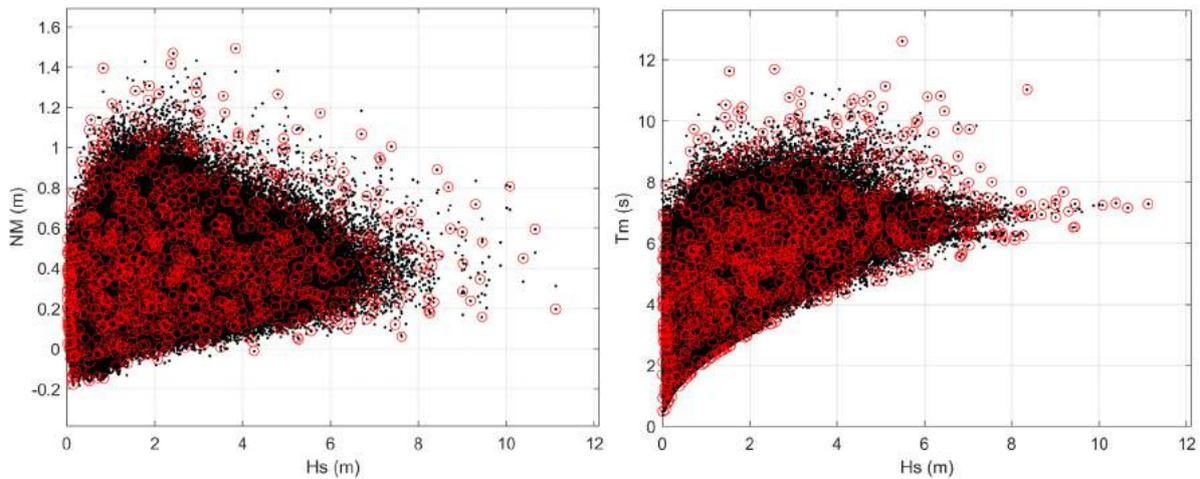


Figura 51 Representación bivariada de la aplicación del algoritmo MAXDISS en el modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045, en el escenario RCP8.5. Los datos del modelo se representan por punto negro. Los valores seleccionados aplicando el algoritmo por puntos rojos. Panel izquierdo: Hs- NM. Panel derecho: Hs-Tm.

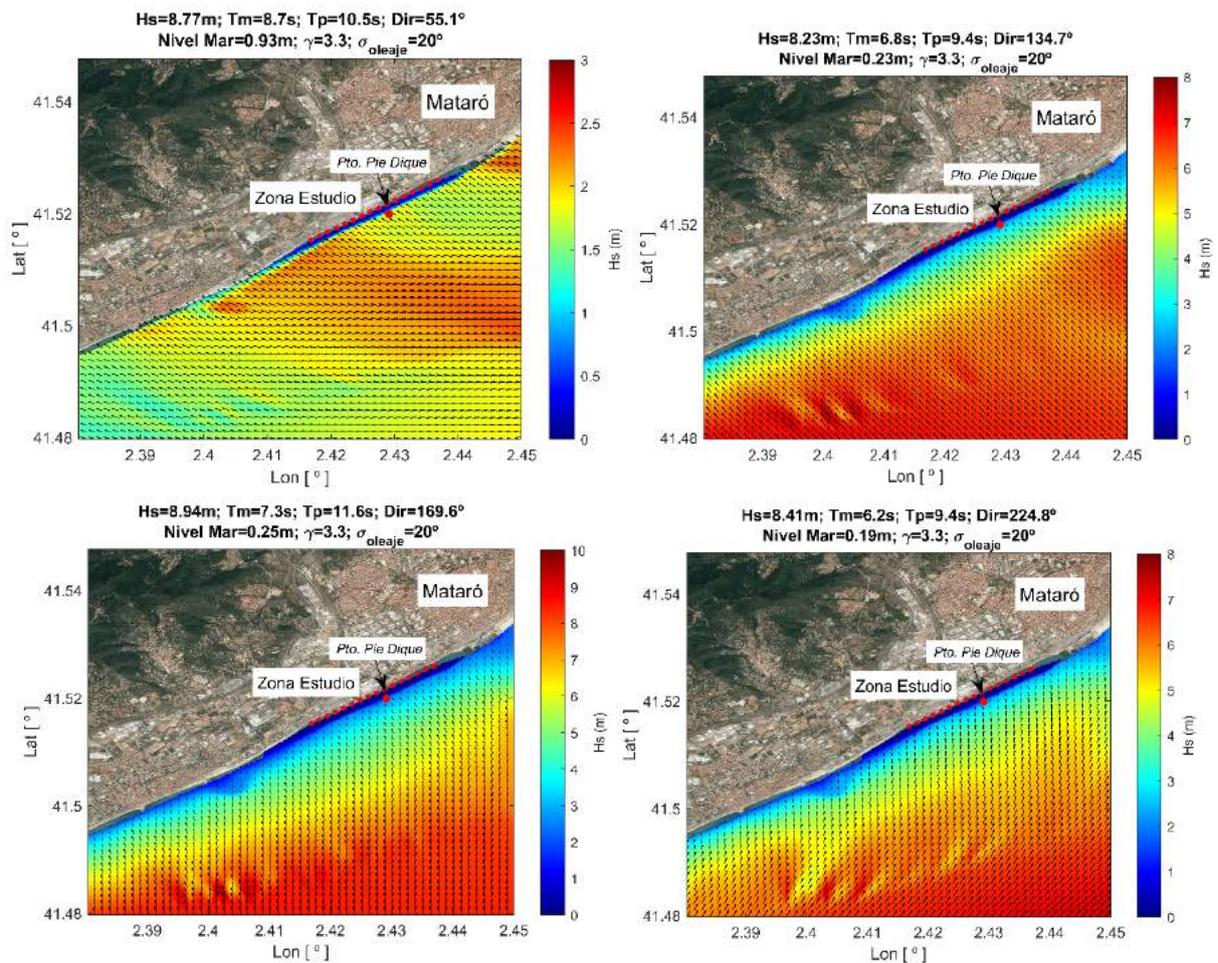


Figura 52 Propagación numérica del oleaje mediante el modelo SWAN. Se representan situaciones de temporal proveniente del noreste (panel superior izquierda); sureste (panel superior derecha); sur (panel inferior izquierda) y suroeste (panel inferior derecha).

Finalmente, se aplica la técnica estadística de reconstrucción basada en las funciones de base radial RBFs. Con ellas se transfiere, de forma eficiente y sin simulaciones numéricas adicionales, la totalidad de las bases de datos en aguas abiertas, tanto de los eventos sintéticos extremos, como de las proyecciones horarias de los modelos. El resultado es una nueva base de datos con las variables H_s , T_m , T_p , Dir , NM a pie de dique (2 metros).

- Periodo de referencia histórico: 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 8760 (estados de mar horarios anuales) series horarias de oleaje y nivel a pie de dique. 5 (modelos climáticos) x 10.000 (vidas útiles sintéticas) x 50 (años vida útil) x 12 (estados de mar extremos anuales) series mensuales del régimen extremal de oleaje y nivel a pie de dique.
- 4 periodos futuros: 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 8760 (estados de mar horarios anuales) x 10 (ANMMs) series horarias de oleaje y nivel a pie de dique. 5 (modelos climáticos) x 10.000 (vidas útiles sintéticas) x 50 (años vida útil) x 12 (estados de mar extremos anuales) x 10 (ANMMs) series mensuales del régimen extremal de oleaje y nivel a pie de dique.

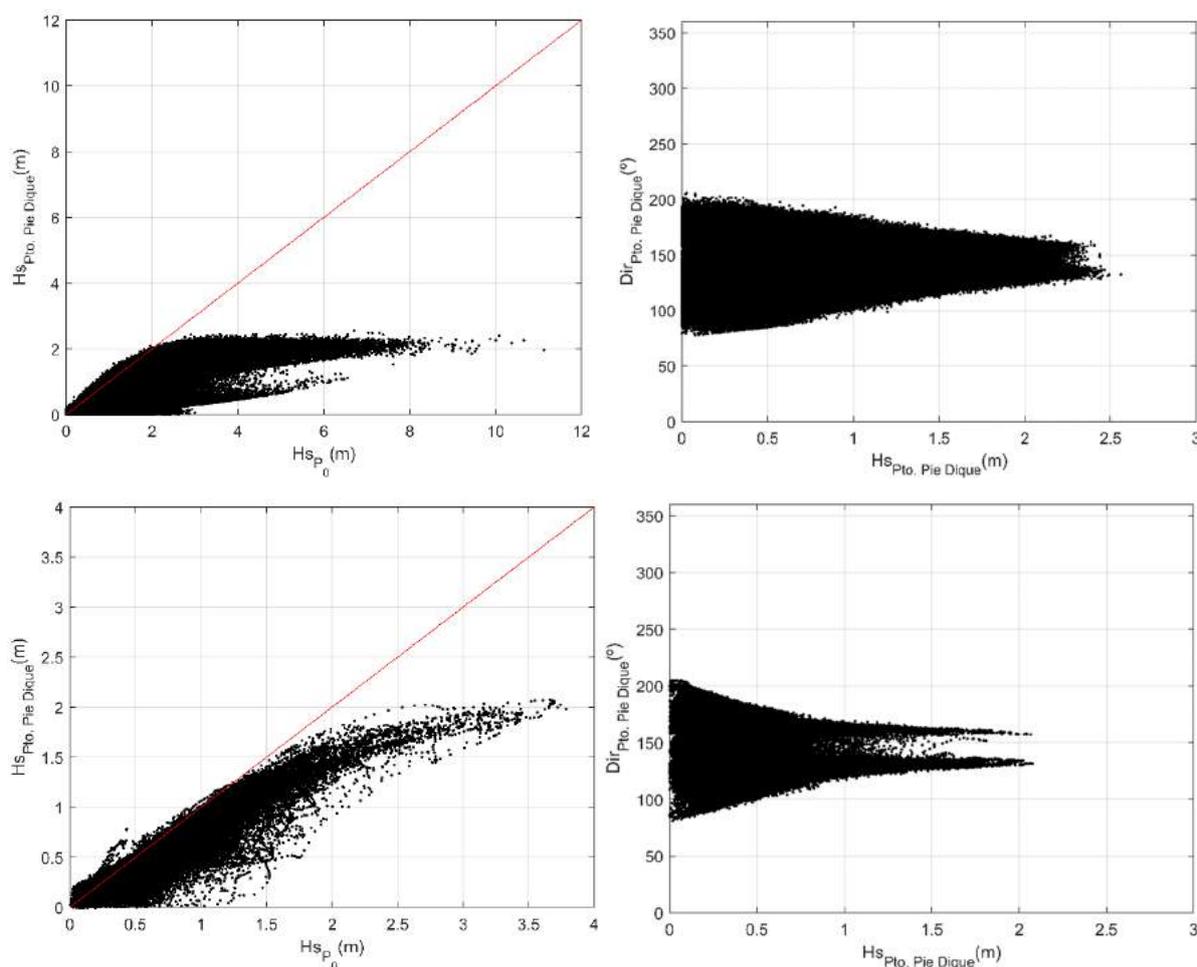


Figura 53 Reconstrucción del oleaje a pie de dique de los eventos sintéticos extremos (paneles superiores) y de las proyecciones dinámicas (paneles inferiores). Modelo climático EART para el periodo de referencia 2026-2045 en el escenario RCP8.5 ANMM5. Se representa la relación de transferencia de la altura de ola significativa (paneles de la izquierda) y el comportamiento bivariado H_s - Dir a pie de dique (paneles de la derecha).

La Figura 53 muestra el resultado de la reconstrucción de la altura de ola significativa y la dirección de procedencia del oleaje en el modelo EART, para el periodo de referencia 2026-2045, en el escenario RCP8.5 y para el primer decil equiprobable de ANMM. Fijándose en los paneles superiores, se observa como los eventos extremos con mayor altura de ola significativa se encuentran acotados por rotura en torno a $H_s=2\text{m}$. Así mismo, y, dada la refracción que experimenta un oleaje tan cercano a costa, el oleaje más extremo incide prácticamente perpendicular a la costa (perpendicular a la línea de costa 140 grados). Un resultado similar se observa en la reconstrucción de las proyecciones horarias (paneles inferiores), con la salvedad de que aquellos oleajes menos energéticos sufren una menor transformación.

Evaluación de impactos

La evaluación de los impactos estructurales, funcionales y operacionales en la Aproximación I tiene por objeto determinar las funciones de densidad de los modos de fallo y parada, siguiendo los criterios técnicos marcados por la normativa española ROM, para así cuantificar como varía su grado de cumplimiento en el tiempo con la variabilidad climática de largo plazo.

Definidos los requerimientos técnicos de la obra, se cuantifican los impactos inducidos por la acción del oleaje y nivel, atendiendo a la separación entre modos de parada y modos de fallo hidráulico.

En cuanto a los modos de parada, se ha definido el rebase sobre la infraestructura ferroviaria como el único mecanismo con capacidad para parar las operaciones. Dicho rebase se evalúa a través del caudal de rebase medio en el estado de mar, aplicando las ecuaciones 36 a 40 e introduciendo, como forzamiento climático, las proyecciones horarias propagadas a pie de dique.

Siguiendo los tres criterios ROM de verificación de los objetivos operativos, se cuantifica la operatividad anual; el número de paradas y la duración máxima de cada parada. Esto se realiza cruzando las series temporales horarias de rebase con el umbral de rebase operativo ($q_{\text{umbral,ELO}}=0.001\text{ l/s/m}$). Así pues, en el periodo de referencia histórico, se obtienen 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 3 (Criterios operativos) verificaciones operativas anuales. En los 4 periodos futuros, 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 10 (ANMMs) x 3 (Criterios operativos) es el número de parámetros descriptores del modo de parada. Agregando los resultados por periodo de referencia y escenario climático y asumiendo resultados equiprobables para los 5 modelos climáticos y 10 deciles de ANMMs, se obtiene la caracterización probabilista de los requerimientos operativos de proyecto (Figura 54).

Tomando como referencia los umbrales ROM, recomendados para una obra de estas características, y tras comprobar que en el periodo de referencia histórico la estructura cumpliría plenamente los tres criterios operativos, se obtiene que la obra tiende a una menor capacidad operativa en el tiempo, con peores resultados en el escenario RCP8.5 que en el RCP4.5.

Analizando individualmente cada uno de los criterios, se tiene que, desde el punto de vista de la operatividad mínima anual, a pesar de empeorar, sigue siendo superior al umbral ROM. No obstante, esto no ocurre ni para el número medio de paradas anuales, ni para la duración máxima de una parada. Ambos criterios muestran una fuerte inoperatividad en cualquiera de los escenarios futuros.

En el caso del tercer criterio operativo, dicha inoperatividad se produciría en el medio plazo (2026-2045), tanto en el RCP4.5, como en el RCP8.5.

Una vez descritas las funciones de densidad en cada periodo de referencia/escenario climático y criterio operativo, se obtiene la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, calculada como el área bajo la curva en la región de inoperatividad ($p < \text{Umbral ROM}$; $N_m > \text{Umbral ROM}$; $D_m > \text{Umbral ROM}$).

Estos resultados se muestran en la Tabla 6 y permiten disponer de una herramienta objetiva y basada en la teoría de la probabilidad para la toma de decisiones. Los resultados proyectan que la obra tendría una probabilidad superior al 80% de ser inoperativa por incumplimiento de la duración máxima de las paradas operativas en el medio plazo, para cualquiera de los dos escenarios climáticos futuros, mientras que en el largo plazo esta probabilidad ascendería al 100%.

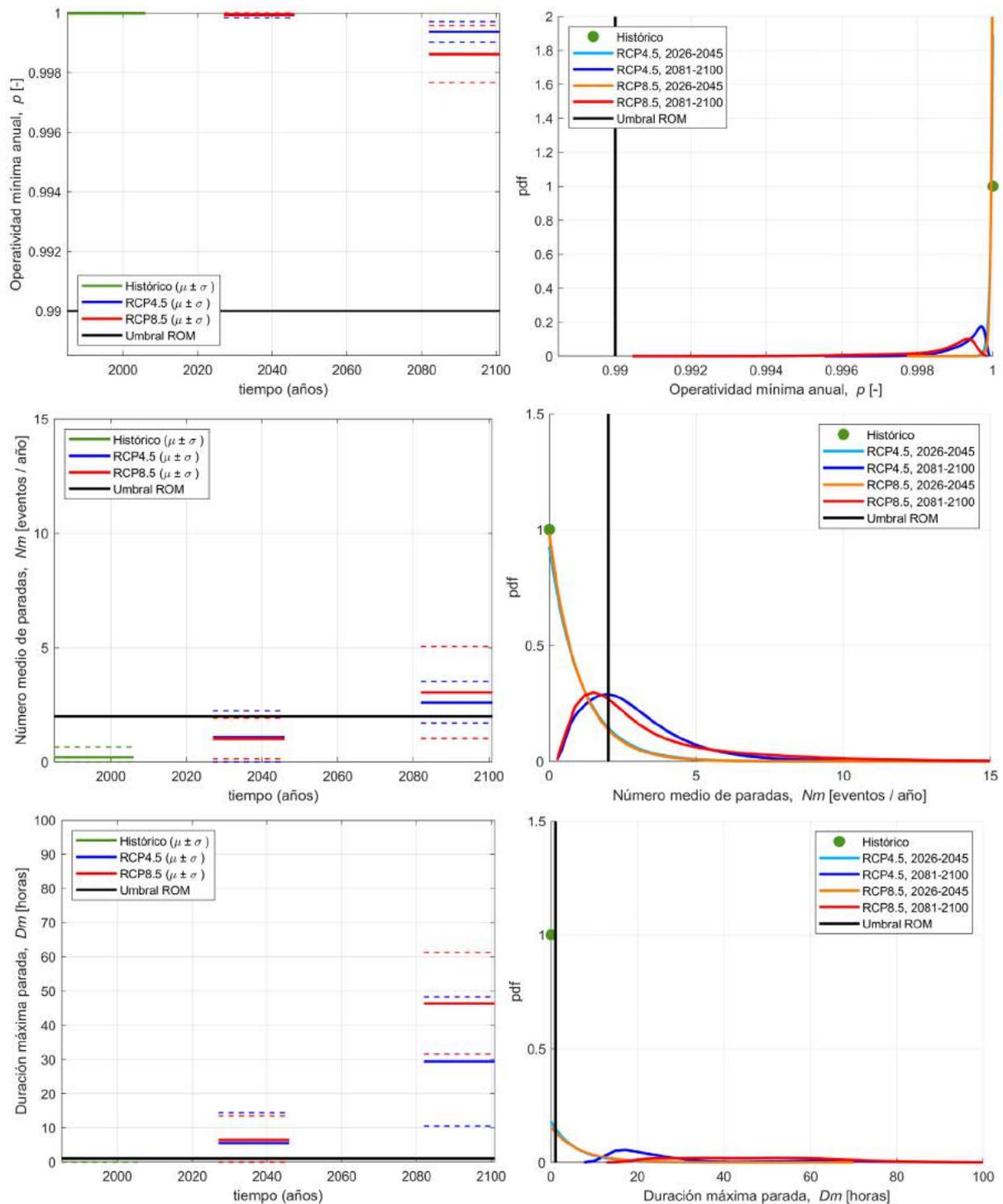


Figura 54 Proyección de los impactos operativos según los tres criterios ROM (Operatividad mínima anual, paneles superiores; número medio de paradas, paneles centrales; duración máxima parada, paneles inferiores.

Se representan agregados por periodo de análisis y escenario climático asumiendo modelos equiprobables.

Paneles de la izquierda: Evolución temporal de los criterios de diseño operativos. Paneles de la derecha:

Funciones de densidad de los criterios de diseño operativos. Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático

Los modos de fallo hidráulicos son consecuencia del exceso de carga hidráulica sobre las piezas del manto exterior, lo que produce el desplazamiento de éstas y el exceso de rebase con capacidad de dañar el equipamiento ferroviario. El primero es el único modo de fallo analizado del estado límite último y el segundo corresponde al estado límite de servicio. Para ambos se emplea los mismos estados de mar sintéticos a pie de dique para su verificación, evaluándose, para el primero, el valor del parámetro de daño, S , y, para el segundo, el caudal medio de rebase, q .

El modo de fallo *daño en el equipamiento portuario* se cuantifica a través de las ecuaciones 33 a 36. En este caso el único criterio ROM a verificar es la probabilidad de fallo del ELU $P_{f_{ELU}}$, calculada como la probabilidad de que el parámetro de daño, S , máximo en la vida útil, exceda el valor de diseño ($S_{umbral} = 0.5$ *Inicio de Avería*). Para ello, en cada una de las 10.000 NVUs sintéticas de cada periodo / escenario / modelo se computa el valor máximo individual, S_{crit} , de las series mensuales de 50 años del parámetro de daño. Con ello se tiene que el número de valores descriptores del parámetro de daño, S_{crit} , en el periodo de referencia histórico, es de 5 (modelos climáticos) x 10.000 (vidas útiles sintéticas); mientras que en los 4 periodos futuros es de 5 (modelos climáticos) x 10.000 (vidas útiles sintéticas) x 10 (ANMMs). Esta gran cantidad de datos permite representar de forma fiable sus funciones de densidad, considerando las incertidumbres climáticas, estructurales y de respuesta hidrodinámica de la estructura (Figura 55, paneles superiores).

Los resultados agregados, por periodo de referencia y escenario climático, y asumiendo que son equiprobables para los 5 modelos climáticos y los 10 deciles de ANMMs, permiten caracterizar probabilísticamente la evolución temporal de los requerimientos estructurales de proyecto del ELU (Figura 55, panel inferior izquierda).

Tomando como referencia los umbrales ROM, recomendados para una obra de estas características, y tras comprobar que en el periodo de referencia histórico la estructura cumpliría plenamente los criterios estructurales de diseño, se comprueba que estos tienden a una menor estabilidad hidráulica en el tiempo, con resultados similares para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Es necesario resaltar que los resultados obtenidos indican que la obra dejaría de cumplir los criterios de diseño de este estado límite en el medio plazo (2026-2045) para ambos escenarios climáticos, empeorando la situación en el horizonte de largo plazo (2081-2100) para los dos escenarios.

Similares conclusiones se obtienen para el tiempo medio entre fallos, calculado como la inversa de la tasa de fallo anual del periodo/escenario y modelo analizado (Figura 55, panel inferior derecha). En cualquiera de los 4 escenarios climáticos futuros obtenidos como combinación de periodo de análisis y RCPs, la probabilidad de fallo media del ELU se proyecta con valores superiores al umbral de 0.01, marcado por la ROM (Tabla 6). En el RCP4.5 (2026-2045) sería del 0.0202; en el RCP4.5 (2081-2100) del 0.1288; en el RCP8.5 (2026-2045) del 0.0222; y en el RCP8.5 (2081-2100) del 0.1326. En cuanto al valor del periodo medio entre fallos, que puede compararse con el valor del periodo de retorno de diseño ($T_{f_{ELU}} = 4975$ años), en el RCP4.5 (2026-2045) se obtiene aproximadamente de 2500 años; en el RCP4.5 (2081-2100) 200 años; en el RCP8.5 (2026-2045) aproximadamente 2400 años; y en el RCP8.5 (2081-2100) es inferior a los 200 años.

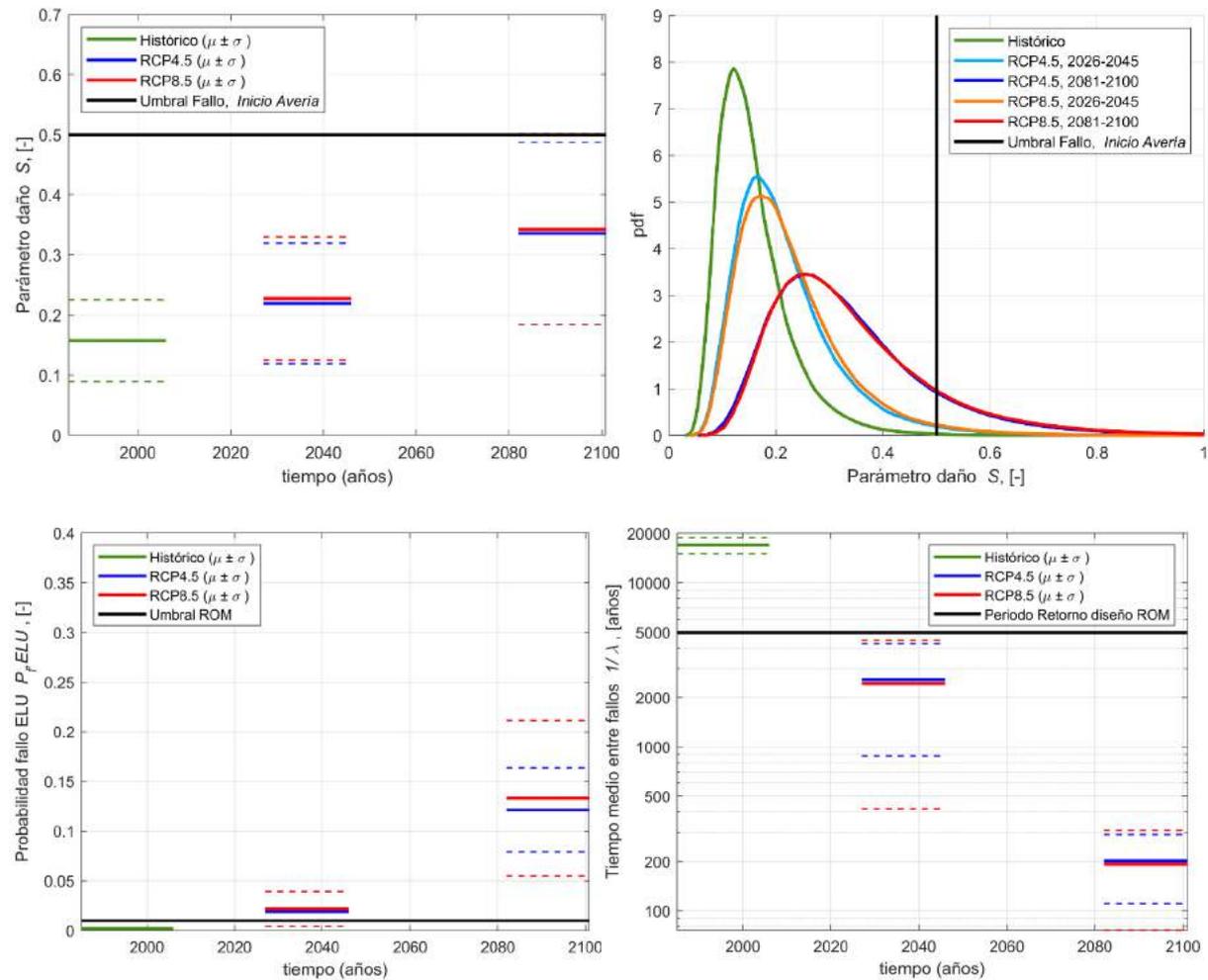


Figura 55 Proyección de los impactos del Estado límite Último. Se representan agregados por periodo de referencia y escenario climático, asumiendo modelos equiprobables. Modo de fallo hidráulico del desplazamiento de las piezas del manto caracterizado por su evolución temporal (panel superior izquierda) y sus funciones de densidad (panel superior derecha). Evolución de los criterios ROM, probabilidad de fallo del ELU (panel inferior izquierda) y del tiempo medio entre fallos (panel inferior derecha). Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático

El modo de fallo en el equipamiento ferroviario se cuantifica a través de las ecuaciones 36 a 40. En este caso el único criterio ROM a verificar es la probabilidad de fallo del ELS $P_{f,ELS}$, calculada como la probabilidad de que la tasa de rebase máxima en la vida útil exceda el valor de diseño ($q_{umbral} = 1 \text{ l/s/m}$). Para ello, en cada una de las 10.000 NVUs sintéticas de cada periodo/escenario/modelo se calcula el valor máximo individual, q_{crit} , de las series mensuales de 50 años de caudal de rebase. Con ello se tiene que, los valores descriptores del parámetro de rebase q_{crit} , son 5 (modelos climáticos) x 10.000 (vidas útiles sintéticas) en el periodo de referencia histórico; y 5 (modelos climáticos) x 10.000 (vidas útiles sintéticas) x 10 (ANMMs) en los 4 periodos futuros.

El gran número de datos permite, de nuevo, representar con alta fiabilidad sus funciones de densidad considerando las incertidumbres climáticas, estructurales y de respuesta hidrodinámica de la estructura (Figura 56, paneles superiores).

Los resultados agregados por periodo de referencia y escenario climático y asumiendo que son equiprobables para los 5 modelos climáticos y los 10 deciles de ANMMs, permiten caracterizar probabilísticamente la evolución temporal de los requerimientos estructurales de proyecto del ELS (Figura 56, panel inferior izquierda).

Tomando como referencia los umbrales ROM, recomendados para un obra de estas características, y tras comprobar que en el periodo de referencia histórico la estructura cumpliría plenamente los criterios estructurales de diseño, se tiene que éstos no experimentarían variación en ninguno de los periodos de análisis y escenarios climáticos futuros, si bien, la tasa de rebase vería incrementada su magnitud (Tabla 6).

Similares conclusiones se derivan del análisis del periodo medio entre fallos (Figura 56, panel inferior derecha).

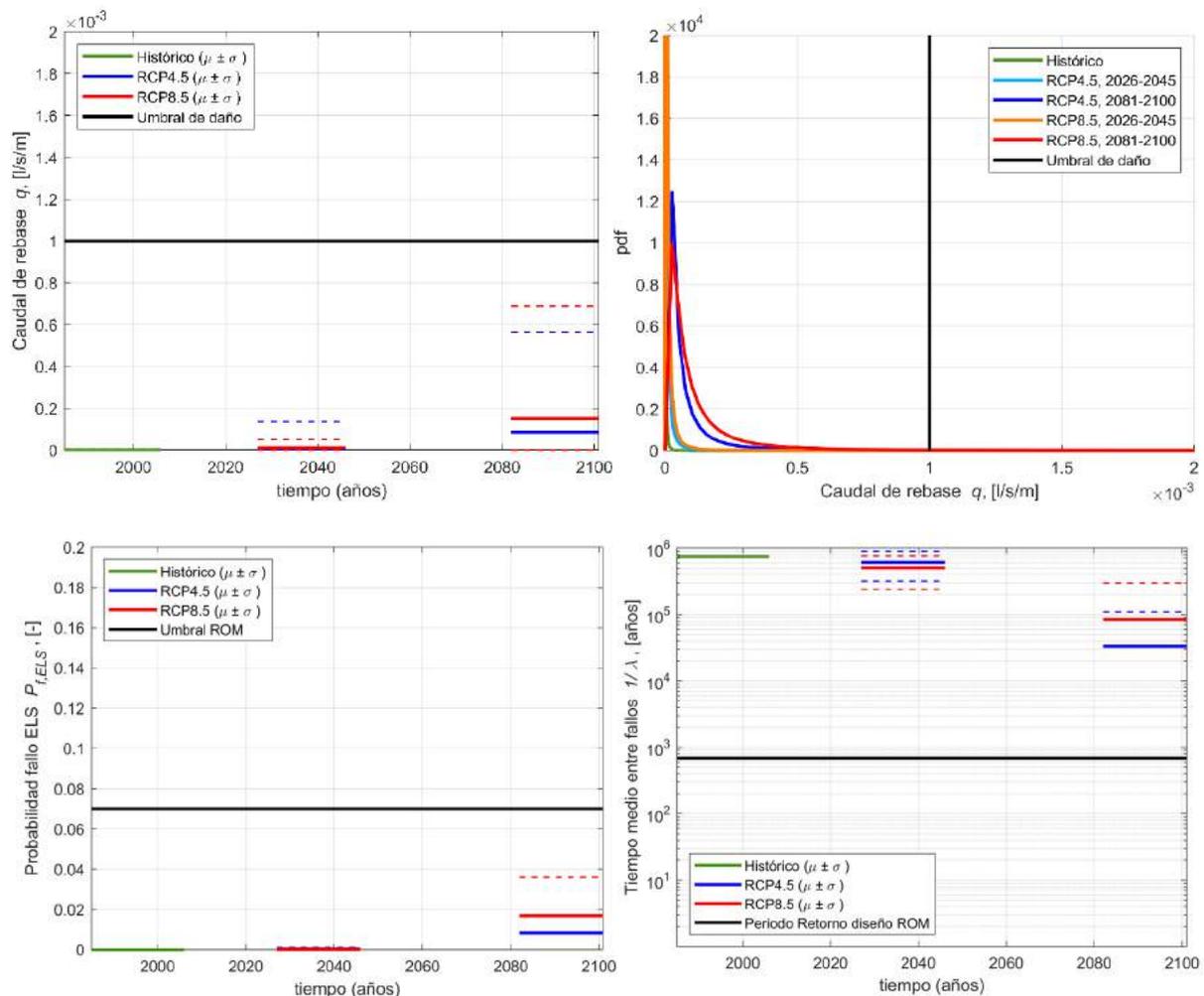


Figura 56 Proyección de los impactos del Estado límite de Servicio. Se representan agregados por periodo de y escenario climático asumiendo modelos equiprobables. Modo de fallo hidráulico del daño sobre el equipamiento ferroviario por rebase caracterizado por su evolución temporal (panel superior izquierda) y sus funciones de densidad (panel superior derecha). Evolución de los criterios ROM, probabilidad de fallo del ELS (panel inferior izquierda) y del tiempo medio entre fallos (panel inferior derecha). Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático

	Criterio ROM	Prob. Incumplimiento Criterio ROM
ELO	Operatividad mínima anual, $p = 0.99$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000
	Número medio de paradas anuales, $Nm = 2$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.1569
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.6392
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.1407
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.6182
	Duración máxima parada, $Dm = 1h.$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.8354
RCP4.5, 2081-2100 = 1.0000		
RCP8.5, 2026-2045 = 0.8570		
RCP8.5, 2081-2100 = 1.0000		
ELU	Probabilidad de fallo conjunta, $P_{f,ELU} = 0.01$	Histórico = 0.0022
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0202
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.1288
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0222
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.1326
ELS	Probabilidad de fallo conjunta, $P_{f,ELS} = 0.07$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000

Tabla 6 Resumen de los impactos del cambio climático desde el punto del estado límite operativo (ELO), de servicio (ELS) y último (ELU). Se representa la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, agregando los resultados por periodo de referencia y escenario climático (modelos equiprobables).

2.5.2. Aproximación II

La aproximación metodológica II se caracteriza por el empleo de técnicas de más sencilla aplicación para dar cumplimiento a la evaluación de los impactos del cambio climático en las estructuras costeras atendiendo a la normativa técnica española ROM.

Downscaling simplificado

A diferencia de la Aproximación I, en este caso se realiza primeramente la transferencia del oleaje hasta la zona de estudio y seguidamente se definen los regímenes extremales y medios. Dicha propagación simplificada se realiza obteniendo los coeficientes de asomeramiento, refracción y el límite de rotura de cada uno de los estados de mar a propagar.

Para ello, además de conocer el calado de 2 metros al que se propaga, hay que fijar la profundidad en el punto principal de aguas profundas ($h = 81$ m) y la pendiente del fondo ($\tan \beta = 1/100$). Aplicando las ecuaciones 20 a 22, se derivan las series temporales horarias de los parámetros de interés, teniendo en cuenta la modificación que experimenta la altura de ola y la dirección del oleaje. Aunque el procedimiento de propagación es diferente, desde el punto de vista del régimen medio, la cantidad de datos obtenidas a pie de dique es igual a la Aproximación I.

- Periodo de referencia histórico: 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 8760 (estados de mar horarios anuales) series horarias de oleaje y nivel a pie de dique.
- 4 periodos futuros: 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 8760 (estados de mar horarios anuales) x 10 (ANMMs) series horarias de oleaje y nivel a pie de dique.

Para el régimen extremal, se deben construir los N+40N ajustes con las variables climáticas de interés a pie de dique, manteniendo la dependencia entre las variables. Fijando el periodo de retorno del temporal de cálculo en 4975 años para el ELU y 690 años para el ELS, aplicando la ecuación 23, se obtienen las variables de diseño para cada uno de los periodos de referencia, escenario y modelo climáticos.

Por tanto, con N=5 (modelos climáticos), se obtienen las variables [Hs, Tp, Tm, NM] de los 205 temporales de cálculo del ELU (Tabla 7 a Tabla 10) y los 205 temporales de cálculo del ELS (Tabla 11 a Tabla 14).

Las alturas de ola significativa (Tabla 7 para el ELU; Tabla 11 para el ELS) y niveles del mar (Tabla 10 para el ELU; Tabla 14 para el ELS) se obtienen del ajuste GEV univariado, empleando la banda de confianza superior del 90% y la estima central, respectivamente.

En el caso del nivel del mar, además es necesario sumar la influencia del ANMM si se analiza un escenario futuro.

Se observa como ambas variables experimentan una evolución creciente en el tiempo, siendo altamente notable en el caso del nivel del mar. En cuanto a los periodos de pico (Tabla 8 para el ELU; Tabla 12 para el ELS) y medio (Tabla 9 para el ELU; Tabla 13 para el ELS), se observa un ligero descenso en el tiempo, si bien los resultados son altamente modelo-dependientes. Con todo ello, el régimen extremal se caracteriza por:

- Periodo de referencia histórico: 5 (modelos climáticos) x 2 (Estados límites) temporales de cálculo con las variables [Hs, Tp, Tm, NM].
- 4 periodos futuros: 5 (modelos climáticos) x 10 (ANMMs) x 2 (Estados límites) temporales de cálculo con las variables [Hs, Tp, Tm, NM].

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
CNRM_his_1985_2005	1,56										
EART_his_1985_2005	1,55										
HADG_his_1985_2005	1,78										
IPSL_his_1985_2005	1,52										
MEDC_his_1985_2005	1,59										
CNRM_rcp45_2026_2045		1,46	1,46	1,45	1,44	1,45	1,47	1,46	1,47	1,46	1,49
EART_rcp45_2026_2045		1,50	1,51	1,51	1,49	1,51	1,50	1,51	1,53	1,52	1,56
HADG_rcp45_2026_2045		1,62	1,67	1,68	1,68	1,69	1,69	1,66	1,67	1,64	1,68
IPSL_rcp45_2026_2045		1,52	1,54	1,56	1,56	1,58	1,57	1,58	1,58	1,58	1,57
MEDC_rcp45_2026_2045		1,51	1,52	1,53	1,54	1,54	1,54	1,54	1,56	1,56	1,56
CNRM_rcp45_2081_2100		1,50	1,51	1,51	1,53	1,53	1,53	1,54	1,54	1,55	1,55
EART_rcp45_2081_2100		1,86	1,87	1,88	1,88	1,87	1,88	1,88	1,89	1,89	1,91
HADG_rcp45_2081_2100		1,63	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,63	1,63	1,65	1,63
IPSL_rcp45_2081_2100		1,61	1,62	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,64	1,63	1,63
MEDC_rcp45_2081_2100		1,97	1,95	1,99	1,99	1,98	1,99	1,99	1,98	1,97	1,97
CNRM_rcp85_2026_2045		1,56	1,55	1,55	1,55	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,58
EART_rcp85_2026_2045		1,44	1,44	1,45	1,45	1,45	1,45	1,46	1,46	1,46	1,47
HADG_rcp85_2026_2045		1,56	1,55	1,53	1,50	1,51	1,54	1,56	1,53	1,53	1,54
IPSL_rcp85_2026_2045		1,84	1,86	1,86	1,87	1,87	1,89	1,87	1,88	1,92	1,91
MEDC_rcp85_2026_2045		1,58	1,58	1,59	1,60	1,60	1,61	1,57	1,58	1,61	1,62
CNRM_rcp85_2081_2100		1,81	1,80	1,82	1,82	1,80	1,82	1,82	1,82	1,82	1,86
EART_rcp85_2081_2100		1,57	1,57	1,59	1,58	1,60	1,58	1,61	1,62	1,61	1,46
HADG_rcp85_2081_2100		1,60	1,60	1,61	1,62	1,62	1,62	1,62	1,63	1,63	1,33
IPSL_rcp85_2081_2100		1,57	1,58	1,59	1,59	1,59	1,61	1,62	1,62	1,63	1,66
MEDC_rcp85_2081_2100		1,65	1,66	1,67	1,68	1,69	1,69	1,68	1,69	1,69	1,70

Tabla 7 Altura de ola significativa H_s (m) del temporal de cálculo (ELU) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 4975 años.

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
CNRM_his_1985_2005	15,57										
EART_his_1985_2005	10,92										
HADG_his_1985_2005	18,10										
IPSL_his_1985_2005	12,12										
MEDC_his_1985_2005	15,40										
CNRM_rcp45_2026_2045		10,23	10,19	9,99	9,97	9,99	10,03	9,98	9,99	9,84	10,08
EART_rcp45_2026_2045		11,72	11,50	10,73	10,24	10,35	10,23	10,38	10,55	10,30	11,42
HADG_rcp45_2026_2045		12,54	14,92	15,04	14,47	14,63	14,91	12,55	12,67	11,87	12,58
IPSL_rcp45_2026_2045		16,22	17,45	17,90	17,00	18,52	17,91	18,28	17,50	17,32	16,39
MEDC_rcp45_2026_2045		12,36	12,74	12,51	12,47	12,19	12,30	12,37	12,58	12,49	12,14
CNRM_rcp45_2081_2100		9,14	9,11	9,19	9,41	9,37	9,37	9,43	9,43	9,42	9,45
EART_rcp45_2081_2100		15,65	15,08	14,23	14,21	14,08	14,42	13,96	13,18	13,37	12,97
HADG_rcp45_2081_2100		10,37	10,29	10,17	10,16	10,16	10,13	10,11	10,16	10,26	10,03
IPSL_rcp45_2081_2100		10,29	10,29	10,20	10,27	10,33	10,22	10,14	10,24	10,27	10,01
MEDC_rcp45_2081_2100		12,74	12,56	12,90	13,03	12,90	12,91	12,85	12,59	12,44	12,34
CNRM_rcp85_2026_2045		15,06	13,16	13,15	12,69	13,05	12,91	12,70	12,47	12,46	12,26
EART_rcp85_2026_2045		9,57	9,57	9,61	9,52	9,51	9,50	9,53	9,49	9,57	9,55
HADG_rcp85_2026_2045		9,36	9,27	9,28	9,28	9,29	9,29	9,26	9,23	9,22	9,23
IPSL_rcp85_2026_2045		15,17	15,23	15,03	15,67	15,45	16,08	14,60	15,05	16,96	15,65
MEDC_rcp85_2026_2045		11,50	11,05	11,07	11,46	11,00	11,17	10,73	10,74	10,92	10,99
CNRM_rcp85_2081_2100		11,23	11,08	11,19	11,11	10,94	11,00	10,80	10,69	10,66	10,77
EART_rcp85_2081_2100		9,66	9,65	9,72	9,67	9,75	9,57	9,65	9,73	9,52	8,37
HADG_rcp85_2081_2100		10,94	10,81	10,91	10,92	10,87	10,78	10,64	10,62	10,60	7,11
IPSL_rcp85_2081_2100		9,06	9,10	9,15	9,12	9,11	9,17	9,10	9,10	9,15	9,28
MEDC_rcp85_2081_2100		10,39	10,41	10,43	10,59	10,64	10,68	10,35	10,39	10,33	10,14

Tabla 8 Periodo de pico T_p (s) del temporal de cálculo (ELU) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 4975 años.

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
CNRM_his_1985_2005	12,45										
EART_his_1985_2005	8,74										
HADG_his_1985_2005	14,48										
IPSL_his_1985_2005	9,70										
MEDC_his_1985_2005	12,32										
CNRM_rcp45_2026_2045		8,19	8,15	7,99	7,97	7,99	8,03	7,99	7,99	7,87	8,06
EART_rcp45_2026_2045		9,37	9,20	8,58	8,19	8,28	8,18	8,31	8,44	8,24	9,13
HADG_rcp45_2026_2045		10,03	11,94	12,03	11,58	11,70	11,93	10,04	10,13	9,49	10,06
IPSL_rcp45_2026_2045		12,98	13,96	14,32	13,60	14,81	14,33	14,62	14,00	13,86	13,11
MEDC_rcp45_2026_2045		9,89	10,19	10,01	9,97	9,75	9,84	9,89	10,07	9,99	9,71
CNRM_rcp45_2081_2100		7,31	7,29	7,35	7,52	7,50	7,49	7,54	7,54	7,54	7,56
EART_rcp45_2081_2100		12,52	12,06	11,38	11,37	11,26	11,54	11,16	10,54	10,69	10,38
HADG_rcp45_2081_2100		8,30	8,23	8,14	8,12	8,13	8,10	8,09	8,13	8,21	8,02
IPSL_rcp45_2081_2100		8,23	8,23	8,16	8,22	8,26	8,18	8,11	8,19	8,21	8,01
MEDC_rcp45_2081_2100		10,20	10,05	10,32	10,42	10,32	10,32	10,28	10,07	9,95	9,87
CNRM_rcp85_2026_2045		12,05	10,53	10,52	10,15	10,44	10,33	10,16	9,98	9,97	9,81
EART_rcp85_2026_2045		7,66	7,66	7,69	7,62	7,61	7,60	7,62	7,59	7,66	7,64
HADG_rcp85_2026_2045		7,49	7,42	7,42	7,42	7,43	7,43	7,41	7,38	7,38	7,38
IPSL_rcp85_2026_2045		12,13	12,18	12,02	12,54	12,36	12,87	11,68	12,04	13,57	12,52
MEDC_rcp85_2026_2045		9,20	8,84	8,86	9,17	8,80	8,94	8,59	8,60	8,74	8,79
CNRM_rcp85_2081_2100		8,98	8,87	8,96	8,89	8,75	8,80	8,64	8,55	8,53	8,62
EART_rcp85_2081_2100		7,73	7,72	7,78	7,74	7,80	7,65	7,72	7,78	7,62	6,70
HADG_rcp85_2081_2100		8,76	8,64	8,73	8,74	8,70	8,62	8,51	8,50	8,48	5,69
IPSL_rcp85_2081_2100		7,25	7,28	7,32	7,30	7,29	7,34	7,28	7,28	7,32	7,42
MEDC_rcp85_2081_2100		8,31	8,32	8,35	8,48	8,52	8,54	8,28	8,31	8,26	8,11

Tabla 9 Período medio T_m (s) del temporal de cálculo (ELU) para cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Período de retorno 4975 años.

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
CNRM_his_1985_2005	0,63										
EART_his_1985_2005	0,66										
HADG_his_1985_2005	0,98										
IPSL_his_1985_2005	0,67										
MEDC_his_1985_2005	0,64										
CNRM_rcp45_2026_2045		0,58	0,59	0,61	0,63	0,64	0,64	0,65	0,66	0,66	0,67
EART_rcp45_2026_2045		0,88	0,89	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97
HADG_rcp45_2026_2045		0,83	0,84	0,87	0,89	0,89	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93
IPSL_rcp45_2026_2045		0,54	0,56	0,58	0,60	0,60	0,61	0,61	0,63	0,63	0,64
MEDC_rcp45_2026_2045		0,60	0,61	0,64	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70
CNRM_rcp45_2081_2100		1,27	1,30	1,35	1,34	1,34	1,34	1,36	1,39	1,39	1,43
EART_rcp45_2081_2100		1,16	1,19	1,25	1,23	1,23	1,23	1,26	1,28	1,28	1,33
HADG_rcp45_2081_2100		1,77	1,80	1,82	1,83	1,83	1,85	1,86	1,88	1,88	1,93
IPSL_rcp45_2081_2100		1,42	1,45	1,51	1,50	1,49	1,49	1,52	1,55	1,54	1,59
MEDC_rcp45_2081_2100		1,64	1,67	1,72	1,71	1,71	1,71	1,73	1,76	1,76	1,81
CNRM_rcp85_2026_2045		0,66	0,68	0,68	0,69	0,71	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75
EART_rcp85_2026_2045		1,32	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,38	1,39	1,40	1,42
HADG_rcp85_2026_2045		0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88
IPSL_rcp85_2026_2045		1,15	1,17	1,18	1,18	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23	1,24
MEDC_rcp85_2026_2045		0,77	0,78	0,79	0,80	0,82	0,83	0,83	0,83	0,84	0,86
CNRM_rcp85_2081_2100		1,22	1,23	1,26	1,27	1,30	1,31	1,34	1,38	1,40	1,45
EART_rcp85_2081_2100		1,11	1,12	1,15	1,16	1,20	1,21	1,23	1,27	1,29	1,34
HADG_rcp85_2081_2100		1,03	1,04	1,06	1,07	1,09	1,11	1,14	1,16	1,18	1,25
IPSL_rcp85_2081_2100		1,14	1,15	1,18	1,18	1,22	1,23	1,26	1,30	1,31	1,36
MEDC_rcp85_2081_2100		1,39	1,40	1,43	1,43	1,47	1,48	1,51	1,55	1,56	1,61

Tabla 10 Nivel del mar NM (m) del temporal de cálculo (ELU) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Período de retorno 4975 años.

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
_CNRM_his_1985_2005	1,51										
_EART_his_1985_2005	1,49										
_HADG_his_1985_2005	1,64										
_IPSL_his_1985_2005	1,48										
_MEDC_his_1985_2005	1,52										
_CNRM_rcp45_2026_2045		1,44	1,44	1,43	1,43	1,43	1,45	1,44	1,45	1,44	1,47
_EART_rcp45_2026_2045		1,49	1,49	1,48	1,47	1,48	1,47	1,48	1,50	1,49	1,53
_HADG_rcp45_2026_2045		1,59	1,63	1,64	1,64	1,65	1,65	1,63	1,64	1,61	1,65
_IPSL_rcp45_2026_2045		1,49	1,51	1,53	1,53	1,54	1,54	1,55	1,55	1,55	1,55
_MEDC_rcp45_2026_2045		1,49	1,50	1,51	1,52	1,52	1,52	1,52	1,53	1,54	1,54
_CNRM_rcp45_2081_2100		1,49	1,50	1,50	1,52	1,52	1,52	1,53	1,53	1,54	1,55
_EART_rcp45_2081_2100		1,78	1,79	1,81	1,81	1,80	1,81	1,82	1,82	1,83	1,85
_HADG_rcp45_2081_2100		1,60	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,60	1,61	1,62	1,61
_IPSL_rcp45_2081_2100		1,59	1,60	1,60	1,61	1,61	1,61	1,61	1,62	1,62	1,62
_MEDC_rcp45_2081_2100		1,86	1,85	1,88	1,89	1,88	1,89	1,89	1,89	1,88	1,89
_CNRM_rcp85_2026_2045		1,53	1,53	1,53	1,53	1,54	1,55	1,55	1,55	1,55	1,56
_EART_rcp85_2026_2045		1,42	1,42	1,43	1,43	1,43	1,43	1,44	1,44	1,44	1,45
_HADG_rcp85_2026_2045		1,52	1,51	1,50	1,48	1,49	1,51	1,52	1,51	1,51	1,52
_IPSL_rcp85_2026_2045		1,70	1,71	1,71	1,72	1,73	1,74	1,73	1,74	1,76	1,76
_MEDC_rcp85_2026_2045		1,55	1,54	1,55	1,57	1,55	1,57	1,54	1,54	1,56	1,57
_CNRM_rcp85_2081_2100		1,76	1,75	1,78	1,77	1,76	1,78	1,79	1,79	1,78	1,82
_EART_rcp85_2081_2100		1,56	1,57	1,58	1,58	1,60	1,58	1,60	1,62	1,61	1,46
_HADG_rcp85_2081_2100		1,59	1,60	1,61	1,61	1,61	1,62	1,62	1,63	1,63	1,33
_IPSL_rcp85_2081_2100		1,56	1,57	1,59	1,58	1,59	1,61	1,61	1,62	1,63	1,65
_MEDC_rcp85_2081_2100		1,63	1,65	1,65	1,66	1,67	1,68	1,67	1,68	1,68	1,69

Tabla 11 Altura de ola significativa H_s (m) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 690 años.

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
_CNRM_his_1985_2005	13,57										
_EART_his_1985_2005	10,31										
_HADG_his_1985_2005	15,29										
_IPSL_his_1985_2005	11,64										
_MEDC_his_1985_2005	13,02										
_CNRM_rcp45_2026_2045		10,04	10,01	9,86	9,85	9,87	9,89	9,84	9,84	9,72	9,91
_EART_rcp45_2026_2045		11,44	11,25	10,54	10,09	10,19	10,09	10,25	10,38	10,16	11,14
_HADG_rcp45_2026_2045		12,04	13,65	13,69	13,32	13,44	13,62	12,06	12,14	11,56	12,10
_IPSL_rcp45_2026_2045		14,61	15,34	15,55	15,07	15,89	15,63	15,77	15,43	15,29	14,76
_MEDC_rcp45_2026_2045		11,56	11,81	11,66	11,61	11,45	11,52	11,58	11,74	11,66	11,46
_CNRM_rcp45_2081_2100		9,14	9,11	9,18	9,40	9,37	9,36	9,43	9,43	9,42	9,45
_EART_rcp45_2081_2100		13,93	13,59	13,10	13,11	13,01	13,24	12,99	12,48	12,58	12,37
_HADG_rcp45_2081_2100		10,33	10,26	10,15	10,14	10,14	10,11	10,09	10,14	10,24	10,02
_IPSL_rcp45_2081_2100		10,23	10,22	10,14	10,22	10,28	10,18	10,11	10,21	10,24	10,00
_MEDC_rcp45_2081_2100		12,04	11,94	12,19	12,31	12,25	12,28	12,23	12,05	11,94	11,89
_CNRM_rcp85_2026_2045		13,73	12,33	12,33	12,00	12,29	12,19	12,07	11,92	11,92	11,84
_EART_rcp85_2026_2045		9,57	9,57	9,60	9,52	9,50	9,50	9,52	9,49	9,57	9,55
_HADG_rcp85_2026_2045		9,33	9,26	9,26	9,27	9,28	9,27	9,25	9,22	9,22	9,22
_IPSL_rcp85_2026_2045		13,39	13,35	13,26	13,68	13,53	13,85	13,00	13,24	14,32	13,59
_MEDC_rcp85_2026_2045		10,98	10,65	10,67	10,92	10,62	10,73	10,43	10,44	10,56	10,60
_CNRM_rcp85_2081_2100		10,93	10,84	10,92	10,86	10,72	10,78	10,61	10,52	10,49	10,60
_EART_rcp85_2081_2100		9,66	9,65	9,71	9,66	9,74	9,57	9,65	9,72	9,52	8,37
_HADG_rcp85_2081_2100		10,91	10,78	10,89	10,90	10,86	10,77	10,63	10,61	10,59	7,11
_IPSL_rcp85_2081_2100		9,05	9,09	9,13	9,11	9,10	9,16	9,09	9,09	9,14	9,26
_MEDC_rcp85_2081_2100		10,34	10,36	10,39	10,55	10,60	10,64	10,33	10,37	10,31	10,13

Tabla 12 Periodo de pico T_p (s) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Periodo de retorno 690 años.

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
_CNRM_his_1985_2005	10,85										
_EART_his_1985_2005	8,25										
_HADG_his_1985_2005	12,23										
_IPSL_his_1985_2005	9,31										
_MEDC_his_1985_2005	10,41										
_CNRM_rcp45_2026_2045		8,03	8,01	7,89	7,88	7,90	7,91	7,88	7,87	7,78	7,93
_EART_rcp45_2026_2045		9,16	9,00	8,43	8,07	8,15	8,07	8,20	8,31	8,13	8,91
_HADG_rcp45_2026_2045		9,63	10,92	10,95	10,66	10,76	10,90	9,65	9,71	9,25	9,68
_IPSL_rcp45_2026_2045		11,69	12,28	12,44	12,06	12,71	12,51	12,61	12,34	12,23	11,81
_MEDC_rcp45_2026_2045		9,25	9,45	9,32	9,29	9,16	9,22	9,26	9,39	9,33	9,17
_CNRM_rcp45_2081_2100		7,31	7,29	7,35	7,52	7,49	7,49	7,54	7,54	7,53	7,56
_EART_rcp45_2081_2100		11,14	10,87	10,48	10,49	10,41	10,59	10,39	9,98	10,07	9,90
_HADG_rcp45_2081_2100		8,27	8,21	8,12	8,11	8,12	8,09	8,07	8,12	8,19	8,02
_IPSL_rcp45_2081_2100		8,18	8,17	8,11	8,17	8,22	8,14	8,09	8,17	8,20	8,00
_MEDC_rcp45_2081_2100		9,63	9,56	9,75	9,85	9,80	9,82	9,79	9,64	9,55	9,51
_CNRM_rcp85_2026_2045		10,98	9,86	9,86	9,60	9,83	9,75	9,66	9,54	9,54	9,47
_EART_rcp85_2026_2045		7,65	7,65	7,68	7,61	7,60	7,60	7,62	7,59	7,65	7,64
_HADG_rcp85_2026_2045		7,46	7,41	7,41	7,42	7,42	7,42	7,40	7,38	7,37	7,38
_IPSL_rcp85_2026_2045		10,71	10,68	10,61	10,94	10,82	11,08	10,40	10,59	11,46	10,87
_MEDC_rcp85_2026_2045		8,78	8,52	8,53	8,73	8,50	8,59	8,35	8,35	8,45	8,48
_CNRM_rcp85_2081_2100		8,74	8,67	8,73	8,69	8,58	8,62	8,49	8,41	8,39	8,48
_EART_rcp85_2081_2100		7,72	7,72	7,77	7,73	7,80	7,65	7,72	7,78	7,62	6,70
_HADG_rcp85_2081_2100		8,73	8,63	8,71	8,72	8,69	8,61	8,51	8,49	8,48	5,69
_IPSL_rcp85_2081_2100		7,24	7,27	7,31	7,29	7,28	7,32	7,27	7,27	7,31	7,41
_MEDC_rcp85_2081_2100		8,27	8,29	8,31	8,44	8,48	8,52	8,27	8,29	8,25	8,10

Tabla 13 Período medio T_m (s) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de estudio, escenarios y modelos climáticos. Período de retorno 690 años.

	NO ANMM	ANMM 1	ANMM 2	ANMM 3	ANMM 4	ANMM 5	ANMM 6	ANMM 7	ANMM 8	ANMM 9	ANMM 10
_CNRM_his_1985_2005	0,58										
_EART_his_1985_2005	0,60										
_HADG_his_1985_2005	0,80										
_IPSL_his_1985_2005	0,59										
_MEDC_his_1985_2005	0,59										
_CNRM_rcp45_2026_2045		0,57	0,58	0,61	0,62	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67
_EART_rcp45_2026_2045		0,79	0,80	0,82	0,84	0,85	0,85	0,85	0,87	0,87	0,88
_HADG_rcp45_2026_2045		0,79	0,80	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
_IPSL_rcp45_2026_2045		0,54	0,55	0,57	0,59	0,60	0,60	0,61	0,62	0,62	0,63
_MEDC_rcp45_2026_2045		0,58	0,60	0,62	0,64	0,65	0,65	0,65	0,67	0,67	0,68
_CNRM_rcp45_2081_2100		1,13	1,16	1,21	1,20	1,19	1,20	1,22	1,25	1,25	1,29
_EART_rcp45_2081_2100		1,07	1,10	1,15	1,14	1,13	1,14	1,16	1,19	1,19	1,23
_HADG_rcp45_2081_2100		1,37	1,39	1,42	1,42	1,43	1,45	1,46	1,47	1,48	1,53
_IPSL_rcp45_2081_2100		1,22	1,25	1,31	1,29	1,29	1,29	1,32	1,34	1,34	1,39
_MEDC_rcp45_2081_2100		1,33	1,36	1,41	1,40	1,40	1,40	1,43	1,45	1,45	1,50
_CNRM_rcp85_2026_2045		0,64	0,65	0,66	0,67	0,69	0,70	0,70	0,71	0,71	0,73
_EART_rcp85_2026_2045		1,04	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,14
_HADG_rcp85_2026_2045		0,74	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	0,81	0,82	0,84
_IPSL_rcp85_2026_2045		0,93	0,95	0,96	0,97	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01	1,03
_MEDC_rcp85_2026_2045		0,72	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79	0,80	0,82
_CNRM_rcp85_2081_2100		1,16	1,17	1,19	1,20	1,24	1,25	1,27	1,31	1,33	1,38
_EART_rcp85_2081_2100		1,08	1,09	1,12	1,13	1,16	1,17	1,20	1,24	1,26	1,31
_HADG_rcp85_2081_2100		1,01	1,02	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,14	1,16	1,23
_IPSL_rcp85_2081_2100		1,09	1,11	1,13	1,14	1,18	1,19	1,21	1,25	1,27	1,32
_MEDC_rcp85_2081_2100		1,26	1,28	1,30	1,31	1,35	1,36	1,38	1,42	1,44	1,49

Tabla 14 Nivel del mar NM (m) del temporal de cálculo (ELS) en cada uno de los periodos de análisis, escenarios y modelos climáticos. Período de retorno 690 años.

Evaluación de impactos

La evaluación de los impactos estructurales, funcionales y operacionales en la Aproximación II tiene por objeto determinar el cumplimiento/no cumplimiento de los modos de fallo y parada, de acuerdo con los criterios técnicos de la ROM, cuantificando como varía el grado de cumplimiento de éstos como consecuencia de la variabilidad climática de largo plazo. A diferencia de la Aproximación I, aquí únicamente se considera la incertidumbre resultado de aplicar 5 modelos climáticos diferentes en cada uno de los periodos de análisis y escenarios climáticos. Definidos los requerimientos técnicos de la obra, se cuantifican los impactos inducidos por la acción del oleaje y nivel, atendiendo a la separación entre modos de parada y modos de fallo hidráulico.

En cuanto a los modos de parada, la metodología para su evaluación es la misma a la descrita en la Aproximación I. Así pues, habiéndose definido el rebase sobre la infraestructura como el único mecanismo que puede inducir una parada de las operaciones, se evalúa, hora a hora, la tasa de rebase en cada uno de los periodos de análisis/escenarios/modelos climáticos aplicando las ecuaciones 36 a 40. Para ello, se hace uso de las proyecciones de oleaje y nivel a pie de dique.

Introduciendo los valores deterministas de los parámetros, siguiendo el método de diseño, se cruzan las series de rebase con el umbral de rebase operativo ($q_{\text{umbral,ELO}}=0.001$ l/s/m).

En el periodo de referencia histórico, se obtienen 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 3 (Criterios operativos) valores de verificaciones operativas anuales. En los 4 periodos de futuros, el número de parámetros descriptores del modo de parada son 5 (modelos climáticos) x 20 (años) x 10 (ANMMs) x 3 (Criterios operativos). Agregando los resultados por periodo de análisis y escenario climático y asumiendo resultados equiprobables para los 5 modelos climáticos y 10 deciles de ANMMs, se obtiene la caracterización probabilista de los requerimientos operativos de proyecto (Figura 57).

Tomando como referencia los umbrales ROM, recomendados para una obra de estas características, y tras comprobar que en el periodo de referencia histórico la estructura cumpliría plenamente los tres criterios operativos, se obtiene una tendencia a una menor capacidad operativa en el tiempo, con peores resultados en el escenario RCP8.5 que en el RCP4.5, al igual que para la Aproximación I.

Analizando individualmente cada uno de los criterios, los resultados muestran que la operatividad mínima anual, a pesar de empeorar, sigue siendo superior al umbral recomendado por la ROM. No obstante, esto no ocurre ni para el número medio de paradas anuales, ni para la duración máxima de una parada, con resultados muy similares. En ambos casos se tiene que en el medio plazo (2026-2045) se registraría una ligera inoperatividad solamente en el RCP8.5. En el largo plazo (2081-2100), en ambos escenarios climáticos se obtendría un incremento notable de la inoperatividad para ambos criterios.

Así pues, descritas las funciones de densidad, con la única incertidumbre asociada a las 5 diferentes fuentes de forzamiento climático en cada periodo de análisis, escenario y criterio operativo, se obtiene la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, calculada como el área bajo la curva en la región de inoperatividad ($p < \text{Umbral ROM}$; $N_m > \text{Umbral ROM}$; $D_m > \text{Umbral ROM}$).

Los resultados se muestran en la Tabla 15 y permiten disponer de una herramienta objetiva y basada en la teoría de la probabilidad para la toma de decisiones. Los resultados proyectan que la obra tendría una probabilidad inferior al 2% de ser inoperativa en el medio plazo, mientras que en el largo plazo esta probabilidad ascendería al 20%.

Los modos de fallo hidráulicos son consecuencia del exceso de carga hidráulica sobre las piezas del manto exterior, lo que produce el desplazamiento de éstas y el exceso de rebase con capacidad de dañar el equipamiento ferroviario. El primero es el único modo de fallo analizado del estado límite último y el segundo corresponde al estado límite de servicio. Para ambos se emplean los temporales de cálculo (uno por cada modelo perteneciente a un periodo de referencia y escenario climático, evaluándose, para el primero, el valor del parámetro de daño, S , y, para el segundo, el caudal medio de rebase, q).

El modo de fallo daño en el equipamiento portuario se cuantifica a través de las ecuaciones 33 a 36. En este caso el único criterio ROM a verificar es la probabilidad de fallo del ELU $P_{f_{ELU}}$, calculada como la probabilidad de que el parámetro de daño, S , máximo en la vida útil exceda el valor de diseño ($S_{umbral} = 0.5$ *Inicio de Avería*).

Para ello, en cada uno de los temporales de cálculo de cada periodo/escenario/modelo climático del ELU ($T_r=4975$ años), se calcula el valor correspondiente de daño, S . Con ello, los valores descriptores del parámetro de daño, S , son 5 (modelos climáticos) en el periodo de referencia histórico; y 5 (modelos climáticos) x 10 (ANMMs) en los 4 periodos futuros. En este caso, las funciones de densidad del parámetro de daño quedan descritas con un número de datos muy inferior en comparación con los utilizados en la Aproximación I. Además, las funciones de densidad únicamente recogen las diferencias existentes entre los modelos climáticos a través de los diferentes temporales de cálculo. Estos resultados agregados por periodo de análisis y escenario climático se muestran en la Figura 58.

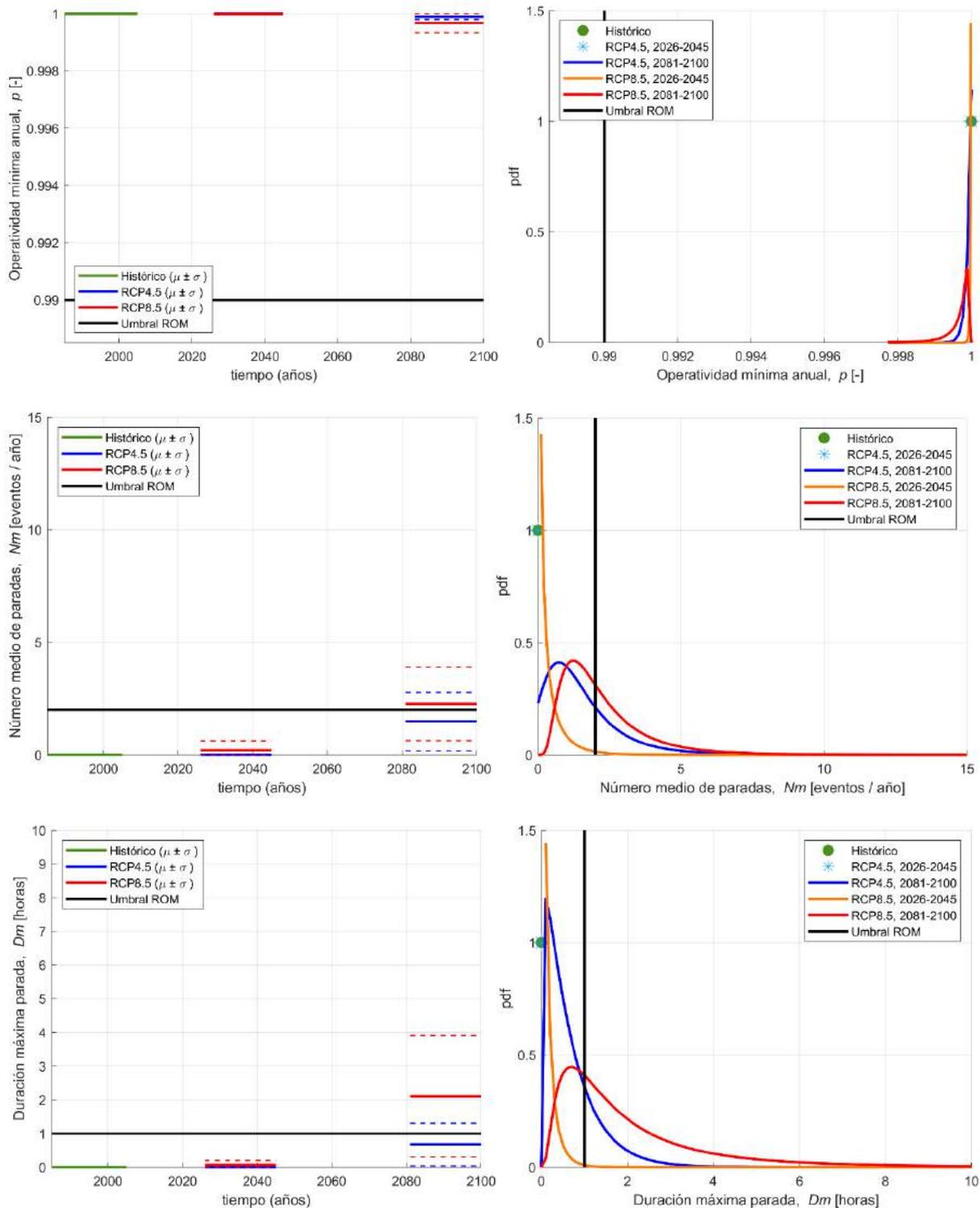


Figura 57 Proyección de los impactos operativos según los tres criterios ROM (Operatividad mínima anual, paneles superiores; Número medio de paradas, paneles centrales; Duración máxima parada, paneles inferiores). Se representan agregados por periodo de análisis y escenario climático asumiendo modelos equiprobables.

Paneles de la izquierda: Evolución temporal de los criterios de diseño operativos. Paneles de la derecha:

Funciones de densidad de los criterios de diseño operativos. Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático.

Tomando como referencia los umbrales ROM y tras comprobar que en el periodo de referencia histórico la estructura cumpliría plenamente los criterios estructurales de diseño, se obtiene que no se experimentaría un incumplimiento de los criterios de diseño en ninguno de los periodos de análisis y escenarios climáticos futuros, si bien, el parámetro de daño se incrementa, siendo superior en el RCP8.5, tanto en el medio como en el largo plazo (Tabla 15).

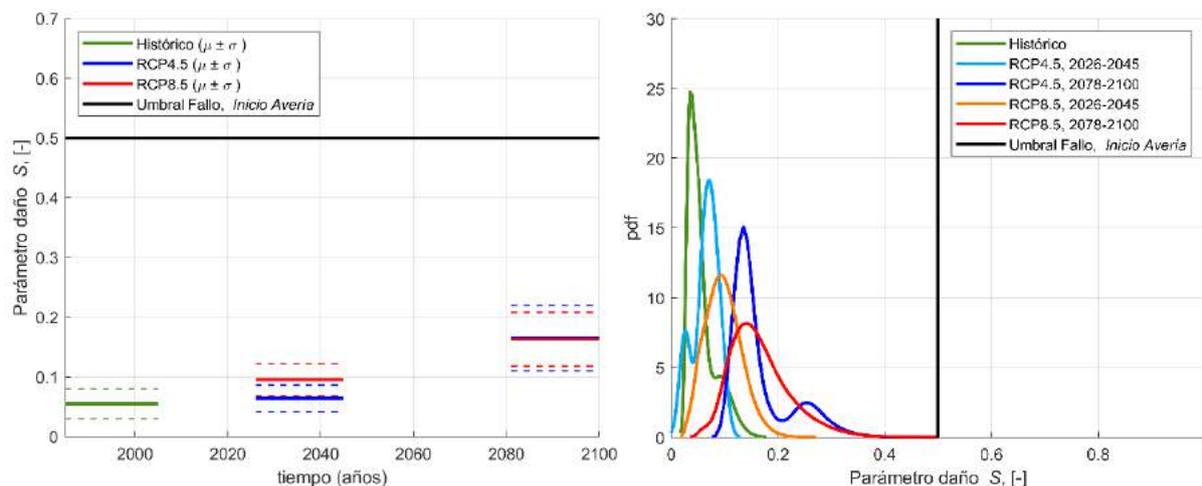


Figura 58 Proyección de los impactos del Estado límite Último. Se representan agregados por periodo de análisis y escenario climático, asumiendo modelos equiprobables. Modo de fallo hidráulico del desplazamiento de las piezas del manto caracterizado por su evolución temporal (panel izquierdo) y sus funciones de densidad (panel derecho). Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático.

El modo de fallo en el equipamiento ferroviario se cuantifica a través de las ecuaciones 36 a 40. En este caso el único criterio ROM a verificar es la probabilidad de fallo del ELS Pf_{ELS} , calculada como la probabilidad de que la tasa de rebase máxima en la vida útil exceda el valor de diseño ($q_{umbral} = 1 \text{ l/s/m}$).

Para ello, en cada uno de los temporales de cálculo del ELS ($Tr=690$ años) se computa el valor del caudal de rebase, q . Con ello, se tiene 5 (modelos climáticos) valores descriptores del parámetro de rebase, q en el periodo de referencia históricos; y 5 (modelos climáticos) \times 10 (ANMMs) valores en los 4 periodos futuros. Nuevamente, esto lleva a una caracterización de las funciones de densidad más pobre que en la Aproximación I puesto que además únicamente recogen la incertidumbre asociada a los 5 modelos climáticos. Estos resultados, agregados por periodo de análisis y escenario climático se muestran en la Figura 59.

Tomando como referencia los umbrales ROM y tras comprobar que en el periodo de referencia histórico la estructura cumpliría plenamente los criterios funcionales de diseño, se obtiene que los criterios no experimentarían variación en ninguno de los periodos de estudio y escenarios climáticos futuros, si bien, la tasa de rebase ve incrementada su magnitud (Tabla 15).

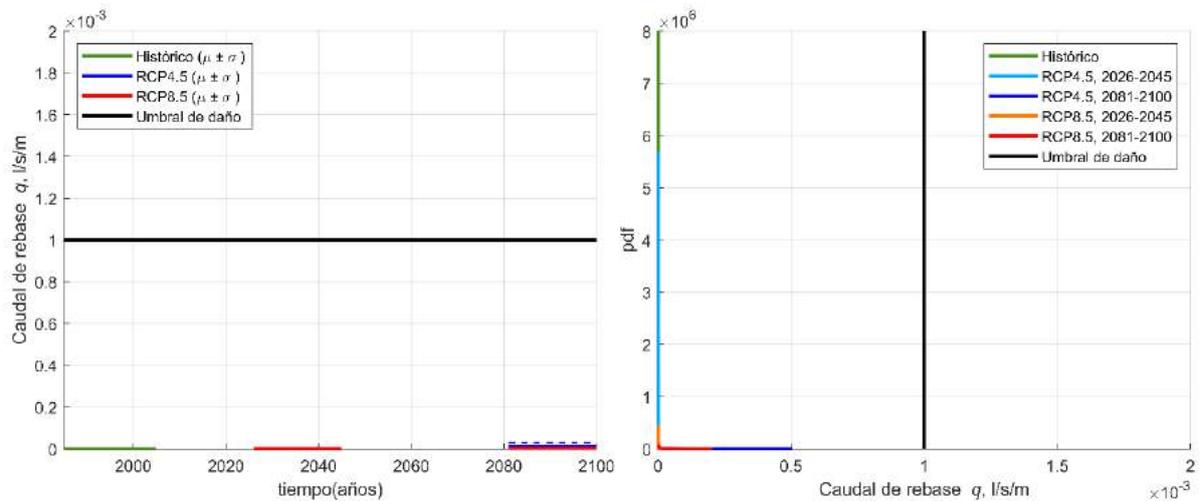


Figura 59 Proyección de los impactos del Estado límite de Servicio. Se representan agregados por periodo de análisis y escenario climático, asumiendo modelos equiprobables. Modo de fallo hidráulico del daño sobre el equipamiento ferroviario por rebase caracterizado por su evolución temporal (panel izquierdo) y sus funciones de densidad (panel derecho). Para los periodos analizados, se muestra el resultado para cada uno de los modelos mediante su media y \pm su desviación típica para incluir la incertidumbre asociada a cada modelo climático

	Criterio ROM	Prob. Incumplimiento Criterio ROM
ELO	Operatividad mínima anual, $p = 0.99$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000
	Número medio de paradas anuales, $Nm = 2$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.2656
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0202
RCP8.5, 2081-210 = 0.4292		
Duración máxima parada, $Dm = 1h.$	Histórico = 0.0000	
	RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000	
	RCP4.5, 2081-2100 = 0.2196	
	RCP8.5, 2026-2045 = 0.0064	
	RCP8.5, 2081-2100 = 0.6502	
ELU	Probabilidad de fallo conjunta, $P_{f,ELU} = 0.01$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.0001

	Criterio ROM	Prob. Incumplimiento Criterio ROM
ELS	Probabilidad de fallo conjunta, $P_{f,ELS} = 0.07$	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000

Tabla 15 Resumen de los impactos del cambio climático desde el punto del estado límite operativo (ELO), de servicio (ELS) y último (ELU). Se representa la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, agregando los resultados por periodo de referencia y escenario climático (modelos equiprobables).

2.5.3. Comparación y discusión de los resultados obtenidos

La aplicación de las Aproximaciones I y II a la protección costera de la línea ferroviaria de cercanías C-1 Barcelona-Mataró-Maçanet, a su paso por la localidad de Mataró en la costa del Maresme, ha permitido cuantificar los impactos esperables del cambio climático sobre sus requerimientos estructurales, funcionales y operativos de forma probabilística. No obstante, debido a las diferencias en las técnicas que emplean cada una de las aproximaciones, existen diferencias en los resultados obtenidos. Tomando como referencia la Aproximación I por la mayor sofisticación de sus métodos y la fiabilidad de sus resultados, la Aproximación II tiende a infraestimar de los impactos.

A continuación, se analizan las posibles causas, así como aquellos criterios de la normativa ROM más susceptibles de presentar diferencias en función de la aproximación empleada.

Los resultados finales obtenidos en cada uno de los criterios normativos se muestran en la Tabla 16, resaltándose aquellos criterios que, en determinados periodos de análisis y escenarios climáticos, presentan diferencias notables entre ambas aproximaciones. Como se puede observar, éstas se encuentran en: el número medio de paradas anuales; en la duración máxima de una parada del estado límite operativo y en la probabilidad de fallo del estado límite último, por un exceso de daño en el manto exterior.

Comenzando por los criterios operativos, ya que la única diferencia está en la metodología de propagación hasta pie de dique, dos son los aspectos que determinan las diferencias entre el downscaling híbrido (Aproximación I) y el downscaling analítico (Aproximación II). Por un lado, los gradientes espaciales de altura de ola debidos a la existencia de zonas de concentración/divergencia de la energía producidos por cambios batimétricos locales. Por el otro, el efecto que el tratamiento de la rotura tiene en zonas de reducido calado como la del punto objetivo.

El primer aspecto se muestra en la Figura 52, panel superior izquierdo, en el que el oleaje de procedencia noreste incide en la costa con poca uniformidad espacial debido a la plataforma horizontal existente a 20 metros de profundidad (Figura 44). Esta estructura batimétrica tiene importantes consecuencias en el resultado de la propagación debido a su proximidad a la costa y a la zona de estudio, no siendo considerada en la Aproximación II en la que se ha hecho la hipótesis de batimetría recta y paralela.

El segundo de los aspectos que puede explicar las diferencias es el tratamiento de la rotura, resuelta numéricamente en la Aproximación I y empleando formulaciones semi-empíricas en la Aproximación II. El efecto del diferente tratamiento de la rotura en los resultados se hace patente en el panel izquierdo de la Figura 60, en el que se ha utilizado como ejemplo el caso del modelo climático EART, para el periodo de referencia 2026-2045, en el escenario RCP8.5 y el ANMM5. La comparación entre las alturas de ola significativa obtenidas con una y otra aproximaciones, a través de un diagrama de dispersión, muestra como la Aproximación I proporciona mayores alturas de ola para cualquier oleaje. Para valores pequeños de H_s las diferencias son razonables. Sin embargo, se acentúan a partir de $H_s=1.3$ aproximadamente, quedando los valores de la Aproximación II muy acotados en el entorno de los 1.5 m, mientras que en la Aproximación I se alcanzan alturas de ola de hasta 2 metros. De hecho, estas diferencias condicionan totalmente los dos criterios operativos analizados. Téngase en cuenta que el número de eventos de parada y su duración máxima son altamente dependientes de que, estado de mar a estado de mar, se compute una tasa de rebase inoperativa y, por lo tanto, altamente dependientes del valor de la altura de ola significativa individual de cada estado de mar. Dicho aspecto no es relevante en el primero de los criterios, la operatividad anual, al estar promediada en el año.

El criterio del estado límite último, con notables diferencias entre las dos aproximaciones, es el desplazamiento de las piezas del manto exterior. En este caso, además de las diferencias en la propagación del oleaje hasta profundidades someras, que afecta no solo a la altura de ola significativa sino también a la obtención de $H_{2\%}$, debe añadirse la metodología para la definición del régimen extremal.

En la Aproximación I se generan miles de estados de mar sintéticos con el objetivo de solicitar la obra bajo toda la casuística probable de eventos extremos, barriendo todas las posibles combinaciones de $[H_s, T_p, T_m, NM]$, incluso para eventos con una probabilidad de ocurrencia muy baja. En cambio, en la Aproximación II se define únicamente un temporal de cálculo con relaciones nominales entre variables.

No obstante, dado que el régimen extremal a pie de dique es esperable que se encuentre altamente condicionado por la rotura, dichos eventos extremos deberían tender a converger en una asíntota horizontal con un valor constante para cualquier periodo de retorno. Esto se muestra en el panel derecho de la Figura 60. Efectivamente, tal y como se ha explicado, ambas metodologías tienden a un valor constante, siendo la cota superior en la Aproximación I de $H_s=2\text{m}$ y en la Aproximación II de $H_s=1.5\text{ m}$. Por lo tanto, a pesar de que la metodología para la definición del régimen extremal sea distinta, todo parece indicar que la propagación de los eventos extremos hasta la costa y la caracterización de la rotura es la causa principal de divergencia entre ambas aproximaciones.

También es necesario destacar que pueden surgir diferencias en el estudio de la interacción oleaje-estructura, pudiendo resultar que en la Aproximación I se estudien eventos con una muy baja probabilidad de ocurrencia, con unos parámetros estructurales y del modelo de ajuste muy poco conservadores, mientras que en la Aproximación II éstos se establecen a partir de los valores de diseño, es decir, del lado de la seguridad.

En cualquier caso, y una vez analizadas e identificadas las limitaciones propias en la aplicación de cada una de las metodologías, se puede concluir que ambas ofrecen similares tendencias en la evaluación de los impactos del cambio climático, así como en los criterios normativos críticos sobre los que habría que aplicar medidas de adaptación. Por tanto, la Aproximación II puede ser empleada para realizar un análisis preliminar que sirva para identificar probabilísticamente criterios críticos en cada uno de los periodos de análisis y escenarios climáticos. La Aproximación I, más compleja, se utilizaría para cuantificar dichos impactos de forma más precisa y fiable.

	Criterio ROM	Prob. Incumplimiento Criterio ROM (APROXIMACIÓN I)	Prob. Incumplimiento Criterio ROM (APROXIMACIÓN II)
ELO	Operatividad mínima anual, $p = 0.99$	Histórico = 0.0000	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000	RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000	RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000	RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000	RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000
	Número medio de paradas anuales, $Nm = 2$	Histórico = 0.0000	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.1569	RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.6392	RCP4.5, 2081-2100 = 0.2656
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.1407	RCP8.5, 2026-2045 = 0.0202
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.6182	RCP8.5, 2081-2100 = 0.4292
	Duración máxima parada, $Dm = 1h.$	Histórico = 0.0000	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.8354	RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 1.0000	RCP4.5, 2081-2100 = 0.2196
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.8570	RCP8.5, 2026-2045 = 0.0064
		RCP8.5, 2081-2100 = 1.0000	RCP8.5, 2081-2100 = 0.6502
ELU	Probabilidad de fallo conjunta, $P_{f,ELU} = 0.01$	Histórico = 0.0022	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0202	RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.1288	RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0222	RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.1326	RCP8.5, 2081-2100 = 0.0001
ELS	Probabilidad de fallo conjunta, $P_{f,ELS} = 0.07$	Histórico = 0.0000	Histórico = 0.0000
		RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000	RCP4.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000	RCP4.5, 2081-2100 = 0.0000
		RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000	RCP8.5, 2026-2045 = 0.0000
		RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000	RCP8.5, 2081-2100 = 0.0000

Tabla 16 Comparación de resultados de los impactos del cambio climático para los estados límite operativo (ELO), de servicio (ELS) y último (ELU) aplicando la Aproximación I y Aproximación II. Se representa la probabilidad de incumplimiento de los criterios ROM, agregando los resultados por periodo de análisis y escenario climático (modelos equiprobables). Se resaltan aquellos escenarios con diferencias notables entre ambas aproximaciones.

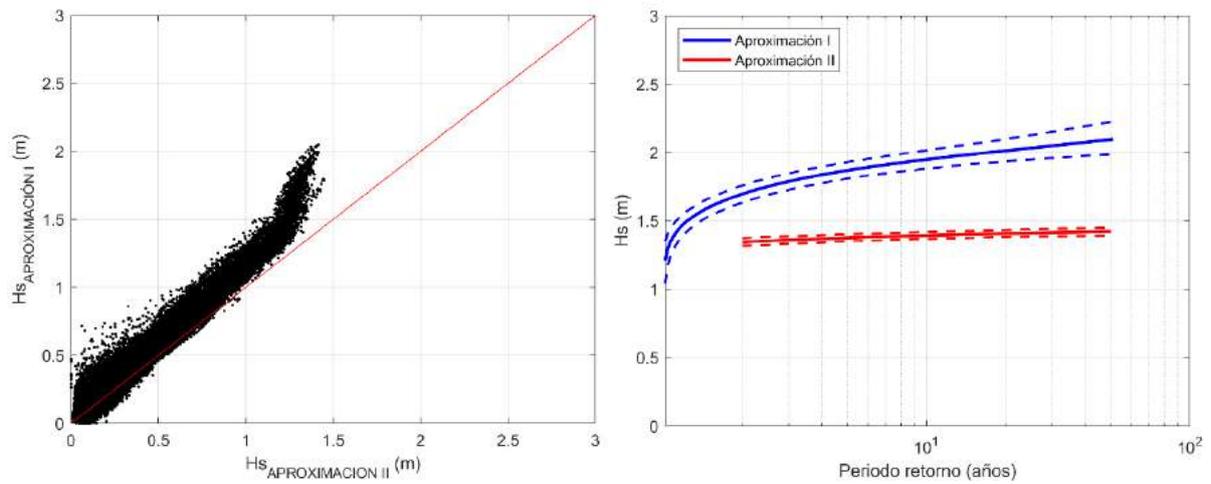


Figura 60 Diferencias entre la Aproximación I y la Aproximación II en la propagación del oleaje (panel izquierdo) y en la obtención del régimen extremal a pie de dique (panel derecho). Modelo climático EART para el periodo de análisis 2026-2045 en el escenario RCP8.5 y el decil ANMM5.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

En este documento se ha presentado la metodología para la evaluación de los impactos del cambio climático en las estructuras costeras del litoral español, cuyo objetivo es cuantificar probabilísticamente la incidencia de los cambios de largo plazo en el clima sobre los criterios de diseño, atendiendo a la categorización de la normativa española ROM (integridad estructural, funcionalidad y operatividad).

La metodología propuesta se elabora para dar cumplimiento a las directivas de la estrategia de adaptación al cambio climático en la costa española, y particularmente en lo relativo a obras protección del litoral. Lo propuesto en el presente documento resulta de inmediata aplicación en el litoral español, permitiendo caracterizar los potenciales impactos del cambio climático en las estructuras costeras. En comparación con lo expuesto en las guías y recomendaciones de otros países, resaltar que la metodología presentada destaca por (1) la incorporación de los cambios en todas las variables climáticas con capacidad de impactar en las infraestructuras costeras (no únicamente el ANMM); (2) las realizaciones climáticas históricas y futuras reales resultado de obtener una caracterización climática multi-modelo (no proyecciones basadas en escenarios de cambio climático); y (3) la incorporación del conjunto de incertidumbres existentes dentro del análisis, desde los resultados de los modelos de circulación hasta la evaluación de los impactos. Dicho grado de sofisticación permite que la metodología española destaque entre las existentes en la acción por el clima. Así mismo, ésta no destaca únicamente como plan estatal sino que los métodos y técnicas propuestas resultan altamente novedosas en vista de la literatura científico-técnica internacional existente principalmente debido a (1) la evaluación conjunta de los criterios estructurales, funcionales y operativos; (2) el marcado carácter probabilista; (3) el uso combinado de técnicas estadísticas y numéricas de última generación y (4) el empleo de proyecciones dinámicas en lugar de escenarios estáticos de cambio climático.

Para cumplir este objetivo, se han desarrollado dos aproximaciones con diferente nivel de complejidad que se han aplicado en un caso piloto en la costa del Maresme. Ambas aproximaciones constan de tres módulos, que abarcan: la definición de las características de la obra de estudio, incluyendo el tramo costero en el que se localizan; la definición de las dinámicas relevantes en su ubicación; y la cuantificación de los cambios en los criterios de diseño resultado de la interacción de las dinámicas con la estructura.

La diferencia esencial entra las dos aproximaciones se centra en la definición de las dinámicas en la posición de la estructura, empleando técnicas estadísticas y numéricas, de última generación, en la Aproximación I, y formulaciones simplificadas en la Aproximación II.

Para su correcta aplicación debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- El primer módulo (Definición del caso de estudio) es común a ambas aproximaciones. En este se recopila la información correspondiente a caracterización de la obra a considerar, aplicable tanto en obras de nueva construcción como en ya existentes: Descripción del problema, escala espacial, escala temporal y configuración geométrica de la obra. Con ello se pretende conocer los modos de fallo y parada a estudiar, así como los mecanismos desencadenadores de los impactos con afección en la estabilidad, funcionalidad y operatividad. Conocidas por el usuario estas cuestiones, se procede a recopilar la información relativa al montaje del caso (información batimétrica, dinámicas marinas y características estructurales/geométricas de a obra). Este primer módulo sienta las bases de diseño y permite decidir, con base en la relevancia económico-ambiental de la obra y a la dificultad del caso de estudio, cuál de las dos aproximaciones es adecuado emplear. Siguiendo la categorización propuesta por la ROM 1.0-09, en este trabajo se propone aplicar la Aproximación I y la Aproximación II según lo dispuesto en la Tabla 17, con base en el carácter general del tramo. No obstante, y sin pérdida de generalidad de lo dispuesto en la Tabla 17, se recomienda aplicar la Aproximación II como método de análisis preliminar, reservando la Aproximación I para una mayor exactitud de los resultados.

		ISA			
		<i>No significativo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy Alto</i>
IRE	<i>Bajo</i>	Apr. II	Apr. II	Apr. I	Apr. I
	<i>Medio</i>	Apr. II	Apr. II	Apr. I	Apr. I
	<i>Alto</i>	Apr. I	Apr. I	Apr. I	Apr. I

Tabla 17 Método de resolución recomendado según el carácter general del tramo. Adaptado de ROM 1.0-09.

- El segundo módulo (Downscaling del oleaje) transfiere el oleaje desde el punto representativo en aguas abiertas hasta la localización a pie de dique de la obra estudio y caracteriza el resto de las dinámicas en la zona de estudio (marea astronómica, meteorológica y aumento del nivel medio del mar). Atendiendo a la separación entre modos de fallo (desencadenados por eventos del régimen extremal) y modos de parada (desencadenados por eventos del régimen medio) el objetivo de este módulo es disponer de la información climática de ambos regímenes en la zona de estudio. En la Aproximación I se ha desarrollado un método estadístico multivariado y no estacionario que permite generar sintéticamente miles de estados de mar con el objetivo de solicitar la obra con eventos de muy baja probabilidad de ocurrencia, pero probables. En la Aproximación II se ha desarrollado un método estadístico multivariado que permite definir el temporal de cálculo de diseño a partir de las series temporales de las dinámicas relevantes en la localización de la obra. Analizando las ventajas e inconvenientes de aplicar uno u otro método para la caracterización del régimen extremal, la Aproximación I requiere un alto conocimiento y manejo de las técnicas de la teoría de la probabilidad, así como de los métodos estadísticos multivariados. A esto debe sumarse el disponer de los recursos computacionales suficientes para la simulación sintética de miles de estados de mar por cada periodo de análisis, escenario climático y modelo de proyecciones climáticas. A

cambio, se consigue una excelente representación del régimen extremal, combinando todas las incertidumbres existentes en cada modelo climático. En cambio, la Aproximación II, resulta más asequible en cuanto a su aplicación, dado que emplea técnicas de extremos univariados, conectando la dependencia entre variables a través de relaciones de dependencia analíticas, y definiendo un único evento de cálculo en cada periodo de estudio, escenario climático y modelo sin necesidad de hacer uso de la simulación numérica. Estas simplificaciones implican una representación menos fiable del régimen extremal incluyendo en el análisis únicamente la incertidumbre asociada a contar con diferentes modelos climáticos. En cuanto a la caracterización del régimen medio incidente, atendiendo a las características de las series temporales horarias a pie de dique, el resultado final en ambas aproximaciones es idéntico. No obstante, en la Aproximación I, éstas se han obtenido combinando técnicas estadísticas y numéricas para la propagación del oleaje, permitiendo tener en cuenta las particularidades de la zona de estudio en la transformación del oleaje hasta la costa, mientras que en la Aproximación II este proceso se simplifica bajo la hipótesis de batimetría recta y paralela y el empleo de formulaciones analíticas y semi-empíricas de propagación de oleaje. Analizando nuevamente las ventajas e inconvenientes de ambas aproximaciones, citar que en la Aproximación I es necesario tener un conocimiento previo de los modelos numéricos de propagación del oleaje. Así mismo, a pesar de que la aplicación del algoritmo MAXDISS permite reducir el número de casos a simular numéricamente, hay que considerar la disponibilidad de recursos computacionales para su ejecución. Por otra parte, a pesar de que la Aproximación II requiere de un menor conocimiento de las técnicas de propagación del oleaje hay que considerar las limitaciones que esta simplificación incorpora y que efecto pueden tener en resultados finales. En este sentido, cabe destacar que casos de estudio con batimetría altamente no-uniforme y abrupta puede conducir a resultados erróneos, así como aquellos en los que los procesos no lineales asociados a la rotura del oleaje condicionen totalmente su interacción con la obra.

- El tercer módulo (Evaluación de impactos) cuantifica probabilísticamente los cambios en los criterios estructurales, funcionales y operativos en cada uno de los periodos de análisis y escenarios climáticos, tomando como referencia el grado de cumplimiento bajo las condiciones climáticas actuales. Continuando con la separación entre modos de fallo hidráulicos y modos de parada, las diferencias en la obtención del régimen extremal incidente implica diferencias en los resultados de los impactos estructurales y funcionales. En la Aproximación I, el análisis de miles de vidas útiles sintéticas, compuesta cada una por cientos de estados de mar extremos. requiere nuevamente de un alto conocimiento de las técnicas estadísticas y de simulación numérica mediante Monte Carlo. En cambio, en la Aproximación II, dicho análisis se lleva a cabo siguiendo el método basado en el análisis de un temporal de cálculo representativo del ELU o ELS. No obstante, a pesar de que los resultados finales son equiparables, en tanto en cuanto ambos se basan en una representación probabilística de los impactos a través de las funciones de densidad de los modos analizados, cabe mencionar que las funciones de densidad obtenidas con la Aproximación I incorporan la incertidumbre existente entre modelos climáticos, la propia de cada uno de los modelos y la correspondiente a la respuesta de la obra ante la acción del oleaje. En cambio, la Aproximación II, únicamente

incorpora la primera de las incertidumbres (modelo a modelo). En cualquier caso, ambos métodos son una herramienta de gran utilidad en la toma de decisiones a la hora de evaluar los impactos del cambio climático en las obras, permitiendo identificar y cuantificar aquellos criterios de diseño y mecanismos más susceptibles de verse afectados por la variabilidad climática de largo plazo. Con todo ello, se pone a disposición de los gestores una herramienta objetiva que permite localizar en el tiempo las posibles medidas de adaptación para el mantenimiento de los criterios de diseño. En este sentido, cabe destacar que, en la Aproximación I, resultado de la simulación sintética a escala mensual, se puede caracterizar la evolución de las funciones de densidad de las probabilidades de fallo y del tiempo medio entre fallos, destacando esta última variable por ser de fácil interpretación y capacidad para transmitir las consecuencias del cambio climático a la sociedad. En cuanto a los modos de parada, dado que la información climática del régimen medio es similar en ambas aproximaciones y a que las formulaciones para el cómputo de las paradas son las mismas, ambas aproximaciones llevan a resultados similares, con la única diferencia del método de propagación empleado.

En vista de las conclusiones aquí presentadas y de los resultados obtenidos en el caso piloto, se recomienda aplicar la Aproximación I cuando la obra tenga una relevancia alta. Su aplicación requiere un muy alto conocimiento de las técnicas estadísticas, de simulación y de análisis estructural, funcional y operativo de las obras. En caso de que la obra tenga una relevancia menor, la Aproximación II resulta adecuada para la cuantificación de los impactos del cambio climático. Adicionalmente, la Aproximación II puede emplearse como un análisis preliminar, identificando mecanismos y elementos críticos ante los cambios en la sollicitación climática. Posteriormente, la Aproximación I se puede utilizar para cuantificar de forma más exacta los cambios en los criterios de diseño. Se obtienen así indicadores totalmente probabilísticos de las repercusiones estructurales, funcionales y operativas, lo que es una base esencial para seleccionar opciones de adaptación y el instante más adecuado para su implementación, para así mantener los estándares de diseño.

REFERENCIAS

Anderson, D., Rueda, A., Cagigal, L., Antolínez, J.A.A., Méndez, F.J., Ruggiero, P. Time-varying emulator for short and long-term analysis of coastal flood hazard potential (2019) Journal of Geophysical Research: Oceans, 124 (12), 9209–9234. DOI:10.1029/2019JC015312.

Antolínez, J.A.A., Méndez, F.J., Camus, P., Vitousek, S., González, E.M., Ruggiero, P., Barnard, P. A multiscale climate emulator for long-term morphodynamics (MUSCLE-morpho). (2016) Journal of Geophysical Research: Oceans, 121 (1), 775–791. <http://dx.doi.org/10.1002/2015JC011107>.

Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen A third-generation wave model for coastal regions: Part I, Model description and validation (1999) Journal of Geophysical Research: Oceans, C4, 104, 7649-7666, DOI: 10.1029/98JC02622.

Burcharth, H.F., Lykke Andersen, T., Lara, J.L. Upgrade of coastal defence structures against increased loadings caused by climate change: A first methodological approach (2014) Coastal Engineering, 87, pp. 112-121. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.12.006

Campos, Á., García-Valdecasas, J.M., Molina, R., Castillo, C., Álvarez-Fanjul, E., Staneva, J. Addressing long-term operational risk management in port docks under climate change scenarios-A Spanish case study (2019) Water (Switzerland), 11 (10), art. no. 2153. DOI: 10.3390/w11102153

Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas (2011) Coastal Engineering, 58 (9), pp. 851-862. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.007

Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Tomas, A., Izaguirre, C. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas (2013) Coastal Engineering, 72, pp. 56-68. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2012.09.002

Camus, P., Losada, I.J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., Pérez, J. Statistical wave climate projections for coastal impact assessments (2017) Earth's Future, 5 (9), pp. 918-933. DOI: 10.1002/2017EF000609

Camus, P., Tomás, A., Díaz-Hernandez, G., Rodríguez, B., Izaguirre, C., Losada, I.J. Probabilistic assessment of port operation downtimes under climate change. (2019) Coastal Engineering, 147, pp.12-24, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.01.007.

Castillo, C., Mínguez, R., Castillo, E., Losada, M.A. An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to composite breakwaters (2006) Coastal Engineering, 53 (1), pp. 1-25. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.09.016

Chhetri, P, Corcoran, J, Gekara, V, Corbitt, B, Wickramasinghe, N, Jayatilleke, G, Basic, F, Scott, H, Manzoni, A & Maddox, C, Functional resilience of port environs in a changing climate – Assets and operations. Work Package 2 of Enhancing the resilience of seaports to a changing climate report series (2013), National Climate Change Adaptation Research Facility, 118 pp

Chini, N., Stansby, P.K. Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise (2012) *Coastal Engineering*, 65, pp. 27-37. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2012.02.009

Climate Change Adaptation Report, UK (2016 Update) *Climate Change Act.2008*

Delta Plan on Spatial Adaptation (2019) *Dutch government*

Eldrup, M.D.; Lykke-Andersen, T.; Burcharth, H Desk Study Tools for Upgrade of Breakwaters against Increased Loadings Caused by Climate Change. (2019) *Proceedings of the 8th Coastal Structures International Conference, CSt19*. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_006

EurOtop. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. 2 ed. (2018) www.overtopping-manual.com

Galiatsatou, P., Makris, C., Prinos, P. Optimized reliability-based upgrading of rubble mound breakwaters in a changing climate (2018) *Journal of Marine Science and Engineering*, 6 (3) DOI: 10.3390/jmse6030092

Goda, Y. Random seas and design of maritime structures (2000) *Advanced series on ocean engineering*, 15, World Scientific, Singapore

Kong, D, Setunge, S, Molyneaux, T, Zhang, G & Law, D, Structural resilience of core port infrastructure in a changing climate. Work Package 3 of Enhancing the resilience of seaports to a changing climate report series (2013), *National Climate Change Adaptation Research Facility*, 172 pp.

Lara, J.L., Lucio, D., Tomas, A., Di Paolo, B., Losada, I.J. High-resolution time-dependent probabilistic assessment of the hydraulic performance for historic coastal structures: Application to Luarca Breakwater (2019) *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377 (2155). DOI: 10.1098/rsta.2019.0016

Lira-Loarca, A., Cobos, M., Losada, M.Á., Baquerizo, A. Storm characterization and simulation for damage evolution models of maritime structures (2020) *Coastal Engineering*, 156. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.103620

Longuet-Higgins M.S. On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field (1983) *Proceedings of the Royal Society*–258 <https://doi.org/10.1098/rspa.1983.0107>

Lucio, D.; Lara, J.L.; Tomás, A.; Losada, I.J. Probabilistic hydraulic design of non-conventional breakwaters in shallow water conditions (2019) *Proceedings of the 8th Coastal Structures International Conference, CSt19*. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_027

Lucio, D., Tomas, A., Lara, J.L., Camus, P., Losada, I.J. Stochastic modeling of long-term wave climate based on weather patterns for coastal structures applications (2020) *Coastal Engineering*, 161, 103771, DOI:10.1016/j.coastaleng.2020.103771.

McEvoy, D, Mullett, J, Millin, S, Scott, H & Trundle, A, Understanding future risks to ports in Australia. Work Package 1 of Enhancing the resilience of seaports to a changing climate report series (2013), *National Climate Change Adaptation Research Facility*, 77 pp.

National Climate Adaptation Strategy 'Adapting with Ambition' (2016) *Dutch government*

National Plan for Adaptation to the impacts of Climate Change, Japón (2015)

PIANC 178-2020 Climate change adaptation planning for ports and inland waterways (2020) *The World Association for Waterborne Transport Infrastructure* ISBN: 978-2-87223-001-3

Planning for Climate Change Impacts at U.S. Ports (2008), *U.S Environmental Protection Agency*

Procedures to evaluate sea level change: Impacts, Responses and adaptation (2019) *U.S. Army Corps of Engineers*

ROM 0.3-91. Acción climática para el Proyecto de las Obras Marítimas y Portuarias: Oleaje. (1991) *Puertos del Estado*. ISBN: 847433814X.

ROM 0.0-01. Procedimiento General y Bases de Cálculo en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. (2001) *Puertos del Estado*. ISBN: 84-88975-30-9.

ROM 1.0-09. Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (2009) *Puertos del Estado*. ISBN: 978-84-88975-73-7.

ROM 1.1-18. Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de diques de abrigo (2018) *Puertos del Estado*. ISBN: 978-84-88740-11-3.

Rueda, A., Camus, P., Tomás, A., Vitousek, S., Méndez, F.J. A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator based on weather patterns (2016) *Ocean Modelling*, 104, pp. 242-251. DOI: 10.1016/j.oceomod.2016.06.008.

Scott, H, McEvoy, D, Chhetri, P, Basic, F & Mullett, Climate change adaptation guidelines for ports. Enhancing the resilience of seaports to a changing climate report series (2013), *National Climate Change Adaptation Research Facility*, 28 pp.

Sierra, J.P., Casas-Prat, M., Virgili, M., Mösso, C., Sánchez-Arcilla, A. Impacts on wave-driven harbour agitation due to climate change in Catalan ports (2015) *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15 (8), pp. 1695-1709. DOI: 10.5194/nhess-15-1695-2015

Sierra, J.P., Casanovas, I., Mösso, C., Mestres, M., Sánchez-Arcilla, A. Vulnerability of Catalan (NW Mediterranean) ports to wave overtopping due to different scenarios of sea level rise (2016) *Regional Environmental Change*, 16 (5), pp. 1457-1468. DOI: 10.1007/s10113-015-0879-x.

Sierra, J.P., Genius, A., Lionello, P., Mestres, M., Mösso, C., Marzo, L. Modelling the impact of climate change on harbour operability: The Barcelona port case study (2017) *Ocean Engineering*, 141, pp. 64-78. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.06.002

Slangen, A.B.A., Carson, M., Katsman, C.A., van de Wal, R.S.W., Köhl, A., Vermeersen, L.L.A., Stammer, D. Projecting twenty-first century regional sea-level changes (2014) *Climatic Change*, 124 (1-2), pp. 317-332. DOI: 10.1007/s10584-014-1080-9

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger Jr., A.H. Empirical parameterization of setup, swash, and runup (2006) *Coastal Engineering*, 53 (7), pp. 573-588. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.12.005

Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española (2019). Contrato de servicios para la elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española

Toimil, A., Losada, I.J., Nicholls, R.J., Dalrymple, R.A., Stive, M.J.F. Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review (2020) Coastal Engineering, 156. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.103611

Tomás, A.; Álvarez de Eulate, M.F.; Barajas, G.; Lara, J.L.; Rodríguez de Segovia, M.F.; Losada, I.J.; Esteban, F.; A new methodology to simulate three-dimensional hydraulic loads on a vertical breakwater along its life cycle. (2019) Proceedings of the 8th Coastal Structures International Conference, CSt19. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_023

van Gent, Marcel & Smale, Alfons & Kuiper, Coen. Stability of Rock Slopes with Shallow Foreshores (2003). Coastal Structures 2003 - Proceedings of the Conference. DOI:10.1061/40733(147)9.

van der Meer, J. Rock slopes and gravel beaches under wave attack (1988). PhD thesis, TUDelft.

Wilby, R.L. and Dessai, S. Robust adaptation to climate change. (2010) Weather, 65: pp. 180-185. DOI: 10.1002/wea.543

ANEXO I: EMULADOR DEL RÉGIMEN EXTREMAL

Considerando que cada una de las 4N+N series continuas de las variables climáticas de interés son representativas y homogéneas para el periodo de referencia y escenario climático analizado, se construyen los 4N+N emuladores climáticos siguiendo los siguientes pasos metodológicos, mostrados en la Figura 61.

5B-I.0.I. Pre-proceso y selección máximos mensuales

1. Recolección series temporales horarias de las proyecciones dinámicas con las R variables de interés.
2. Obtención de las muestras extremas R -dimensionales a escala mensual.

5B-I.0.II. Modelo estadístico multivariado y no-estacionario

1. Ajuste de las funciones de distribución marginal de las d variables ($d \leq R$) a escala mensual.
2. Ajuste de las cópulas Gaussianas d -dimensionales a escala mensual.
3. Ajuste de los modelos de regresión heterocedástico para las $R-d$ variables de interés a escala mensual.
4. Ajuste del emulador de marea astronómica independientemente de las R variables a escala mensual.

5B-I.0.III. Simulación climática sintética

1. Definición de las NVU a simular para cuantificar p_i de la infraestructura.
2. Generación sintética de los NVU $\times V_m \times 12$ eventos extremos multivariados.
3. Combinación de cada uno de los eventos extremos con las proyecciones de los 10 ANMMs anuales.

Figura 61 Metodología para la construcción de los 4N+N emuladores climáticos descriptores del régimen extremal, así como la simulación de eventos sintéticos extremos. NVU se refiere al número de vidas útiles sintéticas, cada una con una vida útil V_m .

5B-I.0.I. Pre-proceso y selección de eventos máximos mensuales con las variables climáticas de interés para el modelo, periodo de referencia y escenario climático analizado.

En primer lugar, se selecciona un modelo climático perteneciente a un determinado escenario de emisiones y un periodo objetivo (histórico de referencia o futuro). Hay que remarcar que los pasos explicados a continuación para la caracterización del régimen extremal deben de repetirse 4N+N veces.

En segundo lugar, se recolectan las series temporales horarias con las R variables climáticas de interés (a partir de las proyecciones dinámicas), comprobando que tengan la misma longitud y que abarquen años completos. Tomando como ejemplo un determinado modelo climático del escenario RCP8.5 en el periodo futuro 2081-2100, se recopilan las proyecciones horarias de las variables H_s , T_m , T_p , Dir y MM . Una vez agrupada la información climática, en tercer lugar, para cada uno de los meses y años se selecciona un evento extremo conformado por las R variables climáticas de interés. Ello permite construir 12 muestras (ya que se trabaja a escala mensual) R -dimensionales, de tamaño igual al número de años de la base de datos, asegurando que se mantiene la correlación entre variables, puesto que la selección se basa en un criterio de concomitancia de máximos. En este caso, se propone como indicador de severidad se define por el nivel del mar en profundidades indefinidas, compuesto por la suma de la componente de marea meteorológica y del oleaje (Ec.31). La contribución de ambas componentes como proxy de eventos extremos e impactos en la costa ha sido empleado en Rueda et., 2016., destacando que en la contribución del oleaje se considera únicamente la componente del set-up (proporcional a la altura de ola significativa y la longitud de onda en profundidades indefinidas, Stockdon et al. 2006). El evento extremo seleccionado es el máximo de dicho indicador en el mes,

identificándose las variables de interés en el instante de tiempo correspondiente, k . Posteriormente se repite el proceso en cada i mes y j año de la base de datos, obteniendo las muestras $R_{i,j}$ que permiten la caracterización multivariada y no-estacionaria del régimen extremal. El procedimiento completo se muestra en la Figura 62.

$$\max (MM_k + 0.016 \sqrt{Hs_k(L_0)_k}) \Rightarrow R_{i,j} = \{Hs_k; Tm_k; Tp_k; Dir_k; MM_k\} \quad (Ec. 31)$$

Pre-proceso y selección de eventos máximos (Ejemplo de un determinado 4N+N emulador climático)

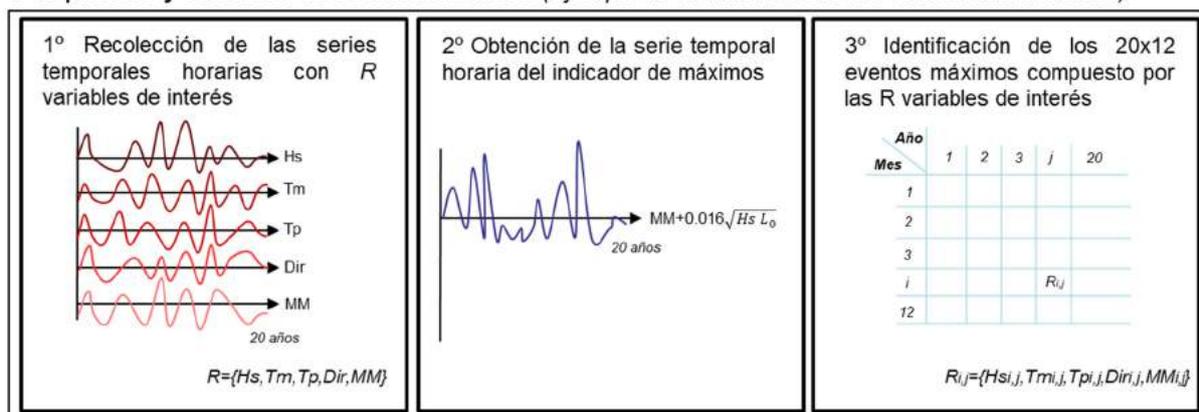


Figura 62 Metodología para la obtención de las muestras R -dimensionales a escala mensual.

5B-I.0.II. Construcción del modelo multivariado de extremos a escala mensual para el modelo, periodo de referencia y escenario climático analizado.

A continuación, obtenidos los 12 conjuntos de datos extremales (uno por cada mes i), se construye el modelo estadístico que permite, mediante simulación sintética, la caracterización multivariada de los eventos extremos, así como la inferencia de eventos probables, pero no registrados en las bases de datos. Continuando con el ejemplo de la selección realizada para un determinado modelo climático del escenario RCP8.5 en el periodo futuro 2081-2100, el objetivo es caracterizar el carácter multidimensional de cada uno de las doce R_i muestras, formadas cada una de ellas por j valores de las variables Hs, Tm, Tp, Dir y MM . Definiendo el modelo mes a mes, se consigue que dicha caracterización multivariada sea no-estacionaria, pues considera los cambios dentro del año de la intensidad de las variables del estado de mar. Para ello se emplea la técnica de las cópulas (Figura 63), que permite la caracterización de conjuntos de datos no independientes sea cual sea la función de distribución marginal de cada variable individual. Es decir, la función de distribución conjunta $F_{Hs_i, Tm_i, MM_i, Dir_i}(Hs, Tm, MM, Dir)$ en cada uno de los doce meses queda descrita por las funciones de distribución marginal $F_{Hs_i}(Hs)$, $F_{Tm_i}(Tm)$, $F_{MM_i}(MM)$ y $F_{Dir_i}(Dir)$ mediante la función cópula C_i .

$$F_{Hs_i, Tm_i, MM_i, Dir_i}(Hs, Tm, MM, Dir) = C_i (F_{Hs_i}(Hs), F_{Tm_i}(Tm), F_{MM_i}(MM), F_{Dir_i}(Dir)) \quad (Ec. 32)$$

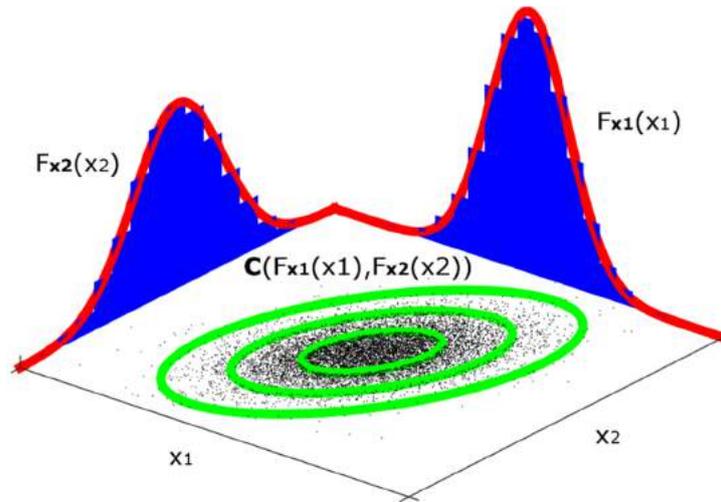


Figura 63 Cópula bidimensional para modelar la función de distribución conjunta de las variables x_1 y x_2 , con funciones de distribución marginal $F_{x_1}(x_1)$ y $F_{x_2}(x_2)$.

Dicha técnica se ha aplicado con asiduidad para la caracterización multivariada de eventos climáticos inductores, entre otros, de inundación fluvial y costera, erosión y en el análisis de estructuras costeras (Antolínez et al., 2016, Rueda et al., 2016, Anderson et al., 2019). En el caso específico de su aplicación para el análisis de obras de protección costera, según Lucio et al., 2020, los modelos cópula 4-dimensionales se construyen con las variables [Hs, Tm, MM y Dir] para cada subconjunto mensual R_i , en el que las tres primeras variables se definen mediante la función de distribución paramétrica generalizada de extremos (GEV, Ec.33 a Ec.35) ajustando para cada una los parámetros localización μ_x , escala φ_x y forma ξ_x . La dirección de procedencia del oleaje por la función de distribución empírica (ECDF, Ec.36).

$$F_{Hs_i}(Hs) \sim GEV_{Hs_i}(Hs; \mu_{Hs_i}, \varphi_{Hs_i}, \xi_{Hs_i})$$

$$= \exp \left\{ - \left[1 + \xi_{Hs_i} \left(\frac{Hs - \mu_{Hs_i}}{\varphi_{Hs_i}} \right) \right]^{-1/\xi_{Hs_i}} \right\} \quad (Ec. 33)$$

$$F_{Tm_i}(Tm) \sim GEV_{Tm_i}(Tm; \mu_{Tm_i}, \varphi_{Tm_i}, \xi_{Tm_i})$$

$$= \exp \left\{ - \left[1 + \xi_{Tm_i} \left(\frac{Tm - \mu_{Tm_i}}{\varphi_{Tm_i}} \right) \right]^{-1/\xi_{Tm_i}} \right\} \quad (Ec. 34)$$

$$F_{SS_i}(MM) \sim GEV_{MM_i}(MM; \mu_{MM_i}, \varphi_{MM_i}, \xi_{MM_i})$$

$$= \exp \left\{ - \left[1 + \xi_{MM_i} \left(\frac{MM - \mu_{SS_i}}{\varphi_{MM_i}} \right) \right]^{-1/\xi_{MM_i}} \right\} \quad (Ec. 35)$$

$$F_{Dir_i}(Dir) \sim ECDF_{Dir_i}(Dir) \quad (Ec. 36)$$

A la hora de seleccionar cuál es la función cópula C_i más adecuada para describir los forzamientos climáticos que interactúan con las obras de protección del litoral, es necesario considerar que dichos forzamientos tienen un carácter altamente multivariado. Por ello, es necesario modelar los patrones de correlación existentes entre las 4 variables.

Entre las funciones cópula existentes en el estado del arte (cópulas arquimedianas, asimétricas, elípticas, etc.), se propone emplear cópulas Gaussianas, pertenecientes a la familia de las cópulas elípticas, como un compromiso entre la dificultad matemática que supone la dimensión espacial del análisis y una correcta modelización de la estructura de dependencia entre las variables. Así pues, la función cópula mensual C_i de las variables [Hs, Tm, MM y Dir], cuyas funciones de distribución marginal se transforman en la distribución uniforme normal $U_i=(u_{Hsi}, u_{Tmi}, u_{MMi}, u_{Diri})$ en el intervalo $(0,1)^4$ con la matriz de correlación definida por el coeficiente de correlación de Spearman Γ_i , puede definirse según la ec.37 en la que $\phi^{-1}(\cdot)$ denota la inversa de la función de distribución normal y ϕ_{Γ_i} representa la función de distribución normal conjunta de las 4 variables.

$$C_{\Gamma_i}(u) = \phi_{\Gamma_i}(\phi^{-1}(u_{Hsi}), \phi^{-1}(u_{Tmi}), \phi^{-1}(u_{MMi}), \phi^{-1}(u_{Diri})) \quad (Ec. 37)$$

El periodo de pico T_p , se modela mediante un modelo de regresión dependiente del periodo medio. El motivo principal por el cual no se ha incluido el periodo de pico en la función cópula es la alta relación existente entre éste y el periodo medio. Esta relación permite inferir correctamente el periodo de pico a partir del periodo medio, sin necesidad de incrementar el espacio muestral de las funciones cópula. No obstante, y siguiendo el marcado carácter probabilista de la metodología, se ha empleado un modelo heterocedástico como mecanismo de regresión entre variables (Ec.38). Este consiste en modelar la dependencia entre ambas variables a través de la función de distribución normal, $N(\mu, \sigma)$ de T_p condicionada a T_m , mediante sendos ajustes potenciales donde a_1, b_1 y a_2, b_2 son parámetros de ajuste cuyos valores aparecen, a modo de ejemplo, en la Figura 64. Así pues, en lugar de establecer una relación determinista entre ambas variables, ésta se modela mediante la función de distribución que recoge la variabilidad de los periodos de pico existente para cada periodo medio. Dado que la dependencia entre ambas variables obedece a una relación de procesos físicos, independientemente del mes del año, dicho ajuste se realiza a escala anual.

$$T_p \sim F_{T_p}(T_p; f(T_m)) \sim N(\mu, \sigma) \sim N(a_1 T_m^{b_1}, a_2 T_m^{b_2}) \quad (Ec. 38)$$

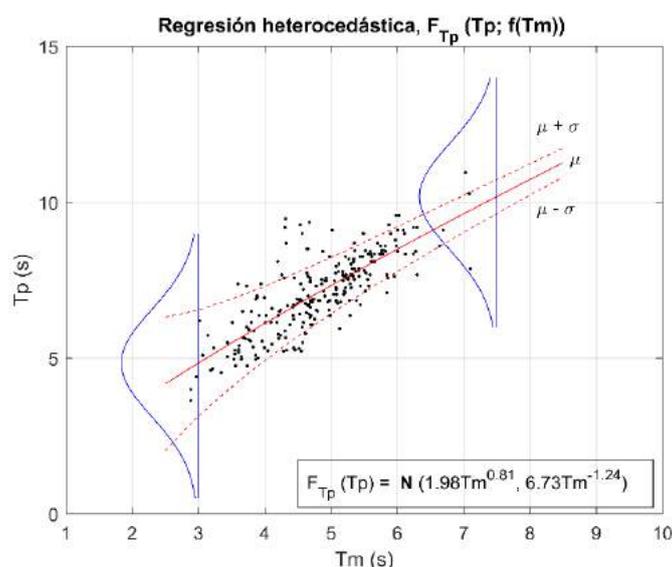


Figura 64 Regresión heterocedástica para el modelo probabilista de caracterización del periodo de pico, T_p función del periodo medio, T_m . Los parámetros de la función de distribución normal F_{T_p} se obtienen mediante modelos potenciales dependientes del periodo medio.

Finalmente, la contribución al nivel del mar de la marea astronómica se modela, a escala mensual, de manera totalmente independiente a las variables de oleaje y marea meteorológica. El motivo para realizar un emulador independiente del anteriormente descrito es doble. Por una parte, dicho emulador puntual se realiza en una localización en aguas profundas en la que el nivel del mar no condiciona el oleaje. Por otra parte, es conocido que la marea astronómica puede considerarse determinista e independiente del resto de forzamientos climáticos. Así pues, se construye un emulador mensual que recoge la modulación existente dentro del año para el periodo temporal analizado, por ejemplo, las mareas vivas y muertas estacionales. La representatividad de todo el abanico posible de estados de mar combinados con diferentes niveles según la época del año, queda asegurada mediante la simulación numérica de una gran cantidad de forzamientos sintéticos como se explica en el siguiente apartado.

5B-I.0.III. Simulación climática sintética para el modelo, periodo de referencia y escenario climático analizado

Una vez construido el emulador climático representativo del modelo climático GCM/RCM, periodo de de tiempo (histórico de referencia o futuro) y escenario climático (RCP) considerados, se pueden realizar miles de simulaciones sintéticas de los parámetros de oleaje y nivel, asegurando la dependencia estadística entre ellos, así como con la época del año en el que suceden. En el caso concreto de las infraestructuras costeras, en las que previamente se ha definido el carácter general del tramo y, por lo tanto, la probabilidad máxima de fallo p_f en la vida útil V_m (ver apartado 2 de la metodología: Definición de las infraestructuras costeras), el número de vidas útiles NVU a simular con $12 \times V_m$ forzamientos climáticos, debe ser aquel que asegure una adecuada representatividad de la probabilidad de fallo, pues ésta se aproxima mediante simulación numérica empleando la técnica de Monte Carlo (Ec.39). Es decir, un mayor número de simulaciones proporciona una mayor precisión en la estimación de la probabilidad de fallo. El número necesario se incrementará a medida que disminuya el valor de la probabilidad de fallo. Sabiendo que dicha probabilidad se determina con base en el

número de vidas útiles en las que se ha producido el fallo N_f respecto al número total de vidas útiles simuladas NVU , esta puede estimarse como:

$$Pf = \frac{N_f}{NVU} \quad (Ec. 39)$$

Considerando que N_f sigue una distribución binomial de media μ_{pf} y desviación típica σ_{pf} , se puede llegar a la expresión que liga el número NVU de vidas útiles a simular en función de la precisión requerida para la estimación de p_f , a través del coeficiente de variación CV_{pf} (Ec.40). Si se considera adecuado un error relativo objetivo del 10% en su estimación, y por lo tanto un $CV_{pf}=0.1$, una medida fiable de la probabilidad de fallo del orden del 0.01 requiere, al menos, de 10.000 NVUs sintéticas.

$$CV_{Pf} = \frac{\sigma_{Pf}}{\mu_{Pf}} = \frac{\sqrt{1 - Pf}}{\sqrt{NVU Pf}} \rightarrow NVU = \frac{1 - Pf}{CV_{Pf}^2 Pf} \quad (Ec. 40)$$

Con todo ello, en el punto localizado en aguas profundas próximo a la localización de la protección litoral a analizar, se simulan $NVU \times V_m \times 12$ eventos multivariados con las variables [Hs, Tm, Tp, MM, Dir, MA], representativos del clima en el modelo, periodo de referencia y escenario analizado. El primer evento sintético corresponde al año 1 de V_m de la realización 1 de NVU en enero, obtenido simulando aleatoriamente los valores F_{Hs} , F_{Tm} , F_{Dir} , F_{MM} a partir de la cópula correspondiente al primer mes del año. Posteriormente, y entrando de forma inversa en cada una de las cuatro funciones de distribución marginal de dicho mes se obtiene la magnitud de [Hs,Tm,MM,Dir] del primer evento sintético. El periodo de pico se obtiene aleatoriamente de la función de distribución Normal, con media y desviación obtenidas a partir del ajuste heterocedástico una vez se conoce el valor de Tm. En cuanto a la marea astronómica se simula independientemente a partir del emulador de marea astronómica, sabiendo que el mes es enero y el año pertenece al periodo de referencia analizado. Dicho procedimiento se repite mes a mes para cada uno de los V_m años de las NVU realizaciones (Figura 65).

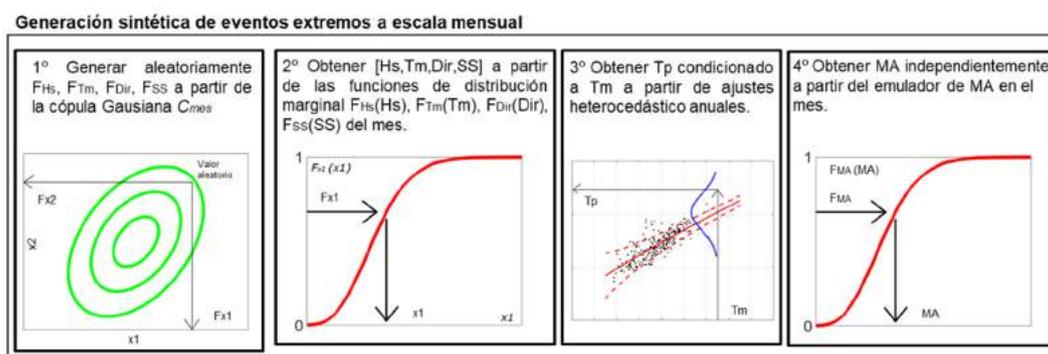


Figura 65 Metodología para la simulación sintética de eventos extremos multivariados a escala mensual.

Finalmente, cada uno de estos eventos se combina con los 10 deciles anuales de ANMM correspondientes al periodo y escenario climático analizado, con el fin de considerar la influencia de este sobre la propagación del oleaje hasta la localización de la estructura, así como sobre su interacción con ésta.

