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

ESTUDIO DEL RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA DEL LITORAL ANDALUZ POR EFECTO DEL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Trabajo realizado por:
Arnau Garcia Tort

Dirigido:
Ernesto Mauricio González
Paula Gomes Da Silva

Titulación:
Máster Universitario en Costas y Puertos

Santander, septiembre 2022

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1- Estado del arte 3
1.2- Objetivos 4
1.3- Estructura del documento 4
2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA 7
2.1- Descripción de la zona de estudio 7
2.1.1- Localización y características 7
2.2- Datos de partida 8
2.2.1- Dinámicas marinas 8
2.2.2- Proyecciones de aumento del nivel medio del mar (AR6 – IPCC) 11
2.2.3- Topografía y características morfológicas de los perfiles de playa 12
2.2.4- Tasas de erosión (REDIAM) 16
2.2.5- Líneas de costa de los estuarios de Andalucía (REDIAM) 17
2.3 Características del clima marítimo en Andalucía 18
2.4- Evolución histórica 19
3. METODOLOGÍA GENERAL DE CÁLCULO DEL RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA 21
3.1. Identificación de procesos y factores relevantes 21
3.2. Metodología de cálculo 22
3.3. Hipótesis y premisas 23
3.4. Limitaciones de cálculo 24
4. RESULTADOS 25
4.1 Retroceso de la línea de costa para mantener el perfil de equilibrio (RPerfil) 26
4.1.1 Retroceso de la línea de costa calculado con la Regla de Bruun (RBruun) 26
4.1.2 Retroceso por cambios en la disposición de la arena del perfil para rellenar la playa seca (RBerma) 26
4.1.3 Adaptaciones según las características específicas de cada perfil 27
4.1.3.1 Adaptación para perfiles con laja (h_L, W_L) 27
4.1.3.2 Adaptación a perfiles con muro o acantilado 27
4.1.3.3 Adaptación a perfiles con duna 28
4.1.4 Resultados de RBruun, RBerma y RPerfil 29
4.2 Retroceso de la línea de costa debido otros factores 37
4.2.1. Retroceso por pérdida de arena para rellenar estuarios (REstuario) 37
4.2.2 Estuarios dominados por marea en la costa de Andalucía 37
4.2.3. Adaptación en perfiles con transporte longitudinal 40
4.2.4. Resultados de Restuario 42
4.2.5 Retroceso o avance por factores NO relacionados al ANMM (RnoANMM) 43
4.2.6 Resultados de RnoANMM 43
4.3 Retroceso total de la línea de costa empleando la Regla de Bruun y modelos adaptados (Rtotal) 45
5. DISCUSIÓN 50
6. CONCLUSIONES 55
6.1 Futuras líneas de investigación 56
7. REFERENCIAS 59
8. ANEJO 62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquematización de la Regla de Bruun que predice el retroceso de la línea de costa debido a la subida del nivel medio del mar.

Figura 2. Detalle de la zona o dominio de estudio.

Figura 3. Mallas regionales utilizadas para la propagación de los datos de oleaje.

Figura 4. Datos de proyecciones del ANMM en dos puntos de la costa andaluza (Cádiz y Almería).

Figura 5. Perfiles establecidos a lo largo de las playas de la costa de Andalucía.

Figura 6. Esquematización de perfiles de playa de Huelva y Almería y los respectivos parámetros de forma del perfil.

Figura 7. Ejemplo una de las lajas rocosas identificadas en un perfil de Cádiz.

Figura 8. Altura del primer cordón de dunas, en dos perfiles de la costa andaluza.

Figura 9. Tasas de erosión calculadas a lo largo de la costa andaluza para el período de 2001 a 2013 (REDIAM).

Figura 10. Líneas de costa de los principales estuarios dominados por marea de la zona de estudio.

Figura 11. Esquema de la problemática del volumen de la berma identificado (adaptado de Rosati et al., 2013)

Figura 12. Esquema de los parámetros utilizados en el cálculo de R Perfil en los perfiles con duna (adaptado de Rosati et al., 2013) y visualización de un cordón dunar (MDT).

Figura 13. Resultados de R_Bruun calculados para los dos primeros escenarios de ANMM considerados (E1 y E2). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_3.

Figura 14. Resultados de R_Bruun calculados para los dos segundos escenarios de ANMM considerados (E3 y E4). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_4.

Figura 15. Resultados de R_Berma calculados para los dos primeros escenarios de ANMM considerados (E1 y E2). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_3.

Figura 16. Resultados de R_Berma calculados para los dos segundos escenarios de ANMM considerados (E3 y E4). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_4.

Figura 17. Resultados de R_Perfil calculados para los dos primeros escenarios de ANMM considerados (E1 y E2). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_3.

Figura 18. Resultados de R_Perfil calculados para los dos segundos escenarios de ANMM considerados (E3 y E4). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_4.

Figura 19. Área de los estuarios de los ríos Guadiana y Carreras, Piedras, Tinto y Odiel y Guadalquivir, y línea de costa de las playas adyacentes.

Figura 20. Área de los estuarios de los ríos San Pedro, Sancti Petri, Barbate, Palmones y Guadarranque, y línea de costa de las playas adyacentes.

Figura 21. Línea de costa digitalizada pertenceciente a 1985 y parámetros utilizados para el cálculo del transporte litoral en la zona de la Flecha del Rompido, Huelva.

Figura 22. Resultados de R_Estuario calculados para los dos primeros escenarios de ANMM considerados (E1 y E2). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_3.

Figura 23. Resultados de R_Estuario calculados para los dos segundos escenarios de ANMM considerados (E3 y E4). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_4.

Figura 24. Resultados de R_noANMM estimado para los años horizontes de 2050 y 2100. Valores calculados con base en las tasa de erosión en cada perfil. Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas más adelante en la Tabla 3 y la Tabla 4.

Figura 25. Resultados de R_Total calculados para los dos primeros escenarios de ANMM considerados (E1 y E2). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_3.

Figura 26. Resultados de R_Total calculados para los dos segundos escenarios de ANMM considerados (E3 y E4). Las flechas indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla_4.

Figura 27. Ejemplo de valores de R_total (Q50) y las respectivas incertidumbres (Q5 y Q95) calculados en 10 playas tipo de la costa andaluza.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escenarios considerados en el cálculo del retroceso de la línea de costa.

Tabla 2. Principales estuarios dominados por marea de la costa andaluza: características de los estuarios de las playas adyacentes.

Tabla 3. Valores de R_tt, sus componentes y respectivos rangos de incertidumbres en 10 playas de la costa Andaluza. Valores calculados con base en el aumento del NMM del escenario SSP2-4.5. Valores con * indican que el rango de retroceso considerando las incertidumbres alcanza todo el ancho de playa. El porcentaje presentado entre paréntesis en R_Bruun indica qué parte de R_tt es explicada por la regla de Bruun.

Tabla 4. Valores de R_tt, sus componentes y respectivos rangos de incertidumbres en 10 playas de la costa Andaluza. Valores calculados con base en el aumento del NMM del escenario SSP5-8.5. Valores con * indican que el rango de retroceso considerando las incertidumbres alcanza todo el ancho de playa.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar gracias a mi familia, en especial a mis padres y hermana por su amor incondicional, paciencia, sabiduría, esfuerzo y sacrificio en todos estos años de duro trabajo.

A mi hermano Albert, gracias por guiarme en el camino, por hablarme de este máster y de Santander y sobre todo gracias por tu apoyo, consejo, ayuda y dedicación, sin ti este año hubiera sido muy distinto, no creo que pueda agradecer lo suficiente todo lo que has hecho por mí.

Dar las gracias a ustedes, miembros de IHCantabria, docentes y compañeros de trabajo por darme la oportunidad de crecer a su lado tanto académicamente como en la faceta personal. Gracias por formarme tan bien como han sabido hacerlo, les estaré eternamente agradecidos. Una especial mención a mis dos tutores de este Trabajo de Fin de Máster, el doctor Mauricio González y Paula Gomes da Silva por el apoyo, la ayuda y dedicación con la que han tutelado y guiado el trabajo, así como al doctor y director de IHCantabria Raúl Medina Santamaria por haber podido tener el privilegio de trabajar con él durante el desarrollo del proyecto que precedió a este trabajo.

Resumen

El presente trabajo de fin de máster surge como parte del proyecto “Estudio del Efecto de Bruun en distintos tramos de la costa andaluza” desarrollado por el grupo de Ingeniería y Gestión de la Costas de IHCantabria. Dentro de las actividades de este proyecto, el trabajo de fin de máster tiene por objetivo principal el análisis del retroceso de la línea de costa a lo largo del litoral andaluz, empleando como premisa inicial la Regla de Bruun y considerando distintos escenarios de aumento de nivel del mar (ANMM), propuestos por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Además, en esta tesina también se identifican y cuantifican los factores relevantes no considerados en el modelo clásico de Bruun y se evalúan tanto las incertidumbres como las limitaciones asociadas a dicha formulación.

Los siguientes factores y procesos fueron identificados como relevantes en la costa andaluza, y fueron incluidos en el cálculo del retroceso:

- Características de perfiles con laja.
- Efecto del tipo del trasdós en la evolución del perfil.
- Efecto de la demanda de sedimentos para mantener el equilibrio de la forma de los estuarios tras el ANMM.
- Efecto de factores y procesos que no están relacionados con el ANMM.

Se optó por tomar como años horizonte, los años 2050 y 2100 ya que abarcan una ventana temporal que cubre de medio a largo plazo y permiten conocer el esperable retroceso asociado al área de estudio durante los próximos 80 años.

Los resultados de retroceso de la línea de costa obtenidos teniendo en cuenta los diversos factores y procesos relevantes en la costa Andaluza indican que gran parte del litoral (725 de los 1281 perfiles analizados, un 56.6% del total), sufrirá una erosión de al menos 25 metros hasta el año 2100 en el peor de los escenarios considerados. Pese a esta tendencia general, se identificaron 17 perfiles (1.3% del total) en los que se observa la situación contraria, es decir, un avance de la línea de costa en todos los horizontes evaluados. Un ejemplo de ello es el caso de la playa del Charcón, en Málaga. Casos de avance de la línea de costa están relacionados principalmente con tasas de erosión positiva de la línea de costa (input de arena al perfil) y suficientemente altas para compensar el retroceso previsto por el ANMM.

La cantidad del retroceso total explicada por la Regla de Bruun varía en cada playa, aunque en la mayoría de los perfiles el retroceso calculado con dicha regla representó

más del 50% del retroceso total. Eso se observó en más de 900 de los 1281 perfiles analizados en todos los escenarios.

Abstract

This master's thesis is part of the project "Study of the Bruun Effect in different sections of the Andalusian coast" developed by the Coastal Engineering and Management group of IHCantabria. Within the activities of this project, the main objective of the master's thesis is the analysis of the shoreline retreat along the Andalusian coast, using the Bruun's Rule as an initial approach and considering different scenarios of sea level rise (ANMM), proposed by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). In addition, this research identifies and quantifies the relevant factors which were not considered by the classical Bruun's model and evaluates the uncertainties and limitations associated to this formulation.

The following factors and processes were identified as relevant on the Andalusian coast, and were included in the shoreline retreat calculation:

- Characteristics of profiles with rocky shores.

- Effect of the type of backshore on profiles' evolution.

- Effect of sediment demand to maintain the equilibrium shape of estuaries after sea level rises.

- Effect of factors and processes that are not related to the sea level rise.

The years 2050 and 2100 were chosen as the horizon years, as they cover a time window spanning from the medium to long term and allow us to estimate the expected retreat associated with the study area over the next 80 years.

The results of shoreline retreat considering the different factors and processes relevant to the Andalusian coast indicate that major part of the coastline (725 of the 1281 profiles analysed, 56.6% of the total) will suffer an erosion of at least 25 metres by the year 2100 in the worst-case scenario. Despite this general trend, in 17 profiles (1.3% of total) the opposite situation is observed, i.e., an advance of the coastline in all evaluated horizons, an example of this is the case of the Charcón beach in Málaga. Those cases of shoreline advance are related to positive shoreline erosion rates (sand input to the profile) with values high enough to compensate the retreat due to the sea level rise.

The amount of total retreat explained by Bruun's Rule depends on the beach we are looking at, although in most of the evaluated profiles the retreat calculated using the Bruun's Rule represented more than 50% of the total regression. This was observed in more than 900 of all the 1281 profiles analysed for all scenarios.

Capítulo 1 - Introducción

1. INTRODUCCIÓN

El persistente y acelerado ascenso del nivel medio del mar (ANMM) junto a las consecuencias que implica dicho aumento para las zonas costeras, puede tener un impacto significativo a nivel mundial debido a los riesgos de erosión e inundación que conlleva. Las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera derivan en un incremento global de las temperaturas, un aumento del nivel del mar y un consecuente retroceso de la línea de costa, además de afectar a otros procesos costeros importantes. En los próximos años se espera un ascenso del nivel medio del mar global de aproximadamente entre 0.4 y 4 mm al año (Tsimplis, Spada, Marcos, & Flemming, 2011) por lo que se prevé que pueda llegar a tener serios efectos en la mayoría de las playas del mundo (Vousdoukas et al., 2020). En España, según el último informe del Ministerio para la Transición Ecológica, se prevé que la cota de inundación pueda aumentar entre un 3 y un 8% respecto a los niveles actuales, para el 2040 como consecuencia del ANMM.

De acuerdo con la conocida como “Regla de Bruun”, tras el aumento del nivel medio del mar, el perfil de playa tiende a responder a esa perturbación tratando de regresar a su estado de equilibrio natural, preservando generalmente la forma media y las mismas profundidades que tenía antes de dicho aumento. Eso significa que el perfil va a tender a buscar un desplazamiento del lecho hacia arriba para compensar este aumento. El volumen de arena necesario para rellenar esa subida del perfil proviene de la playa, lo que resulta en un desplazamiento del perfil hacia tierra y, consecuentemente, en un retroceso de la línea de costa. Teniendo eso en cuenta, Bruun (1962) propuso un modelo de equilibrio simplificado capaz de estimar el retroceso de la línea de costa por efecto del ANMM en base unos parámetros de forma del perfil (véase Figura 1).

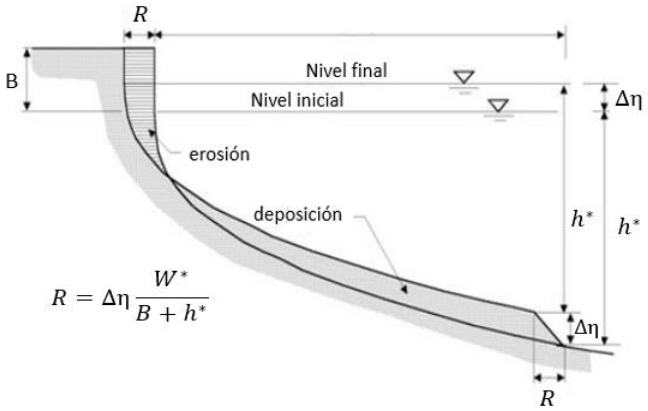


Figura 1 - Esquematización de la Regla de Bruun que predice el retroceso de la línea de costa debido a la subida del nivel medio del mar. S es el incremento del nivel medio del mar, B es la altura de la berma, h es la profundidad de cierre, R es el desplazamiento del perfil (y de la línea de costa) resultante.*

La Regla de Bruun ha sido altamente empleada en la literatura científica en estudios donde se analizan el impacto del ANMM en playas y sistemas costeros. Su brevedad, sencillez y simplicidad de parámetros, facilitan mucho su comprensión y hacen que sea una formulación muy práctica de cara a la investigación. Pese a tener ciertas ventajas, también presenta una serie de limitaciones que restringen considerablemente su aplicabilidad a morfologías complejas o irregulares, como es el caso de algunos tramos de la costa andaluza. Se considera, por ejemplo, un perfil medio de equilibrio en el cual no se tiene en cuenta la variación en la forma del perfil debido a cambios estacionales (perfil de invierno y verano) o debido a otros eventos puntuales de erosión por temporal. Además, se asume que todos los cambios en el perfil ocurren por el aumento lento y progresivo del NMM, lo que lleva a cambios en el muy largo plazo en la playa, sin tener en cuenta el aporte o salida de sedimentos del sistema por transporte longitudinal a la costa, por transporte eólico o por las descargas fluviales.

Con este trabajo se pretende analizar el retroceso de la línea de costa debido al ascenso del nivel medio del mar a escala de medio-largo plazo, es decir, del orden de decenas de años, en distintos tramos representativos de la costa andaluza, la cual debido a su morfología presenta ciertas zonas especialmente vulnerables frente a estos efectos de ANMM. Además, en esta tesina también se identifican y cuantifican los factores importantes no considerados en el modelo clásico de Bruun y el cálculo del retroceso aplicando modelos adaptados para incluir el efecto de dichos factores en las estimaciones.

De este modo, el análisis resultante permitirá proponer una formulación más completa, donde se complementan las carencias presentes en la formulación clásica de la Regla de Bruun y se añaden y plantean otras nuevas consideraciones, metodologías y formulaciones en la estimación del retroceso final de la línea de costa por efecto del ascenso del nivel del mar. En específico, el modelo planteado considera las variaciones características de perfiles con laja rocosa, el efecto que tiene el tipo de trasdós en la evolución del perfil, el efecto de la demanda de sedimentos para mantener el equilibrio de la forma de los estuarios, entre otros factores y procesos que no están relacionados con el ANMM.

1.1 - Estado del Arte

A lo largo de las últimas décadas, se han propuesto diferentes metodologías para analizar el efecto del cambio climático (CC) en la erosión costera. Muchos de estos estudios se basaron en la aplicación de la Regla de Bruun (Bruun, 1962), que predice el desplazamiento del perfil de playa hacia arriba y hacia tierra como respuesta al ANMM.

Dadas las limitaciones e hipótesis mencionadas anteriormente, muchos expertos han cuestionado la aplicabilidad de la Regla de Bruun para la cuantificación de procesos físicos relevantes (p. ej. Cooper and Pilkey, 2004, Cooper et al., 2020). Otros autores han tratado de adaptar la formulación para suplir o mejorar las carencias de la misma (p. ej. Rosati et al., 2013, Dean y Houston, 2016, Atkinson et al., 2018, Beuzen et al., 2018) los cuales incluyen en la formulación las fuentes y sumideros de sedimento, además del retroceso añadido que supone el rellenar la berma de sedimento una vez retrocede el perfil.

Otros estudios recientes presentaron enfoques que consideran la redistribución de sedimentos que tiene lugar en las bahías y estuarios, tras el ANMM. Al igual que sucede con el perfil de playa, los estuarios también tratan de regresar a su nuevo estado de equilibrio, produciendo una redistribución de los sedimentos próximos a la bocana, tratando de recuperar sus caudales y calados estables. Esta redistribución supone un incremento de la erosión de las playas adyacentes al estuario, que proporcionan el sedimento necesario para dicha redistribución. Toimil et al. (2020a) propuso una metodología que permite tener en cuenta el volumen necesario de sedimentos para rellenar el estuario de sedimentos y la aplicó a estuarios del Cantábrico.

Con relación a la obtención de las variables climáticas en este tipo de estudios, las recientes revisiones de la literatura científica plantean que lo más adecuado para trabajos de esta índole son estructuras o enfoques de tipo "*top-down*", en los cuales la información climática debe ser procesada en distintos niveles, generalmente desde un enfoque global a una escala regional o local. Uno de los principales factores a considerar en este tipo de análisis es la incertidumbre asociada al cálculo. Este efecto de cascada debe hacerse cuidadosamente, debido a que la información climática, al ser procesada y pasar de un nivel a otro, puede amplificar considerablemente el error o la incertidumbre asociada.

Los métodos que implican la consideración de conjuntos (p.ej., de escenarios, modelos o parámetros de modelos) permiten profundizar más en la incertidumbre que los

modelos puramente probabilísticos, al considerar el mencionado efecto cascada en los enfoques top-down.

1.2 - Objetivos

El objetivo de este trabajo es hacer un el análisis a largo plazo del retroceso de la línea de costa debido al ANMM en todo el litoral andaluz.

Para llevar a cabo esta tarea se detallaron los siguientes objetivos específicos:

- Entender como el ascenso del nivel del mar se traduce en un retroceso de la línea de costa, en las playas del litoral de Andalucía, definiendo todos los factores y dinámicas relevantes implicadas en el proceso.
- Plantear nuevas formulaciones alternativas y/o complementarias a la Regla de Bruun, tratando de suplir sus carencias.
- Identificar las zonas críticas de retroceso por ANMM en el largo plazo en la costa andaluza.

1.3 - Estructura del documento

El contenido de este trabajo se presenta de la siguiente forma:

Capítulo 1. Introducción: Se introducen la problemática objeto de estudio, las motivaciones, objetivos generales y específicos del estudio, así como las limitaciones y particularidades de la formulación y modelos utilizados.

Capítulo 2. Zona de estudio y datos de partida: Se describen la localización y características del área de estudio, así como las dinámicas marinas, entre otros datos utilizados en el trabajo. Por último, se describe brevemente el clima marítimo y se realiza la contextualización histórica de la zona de estudio.

Capítulo 3. Metodología: Se recogen la descripción de la metodología general utilizada, las consideraciones, hipótesis y limitaciones halladas en el desarrollo de la tesina, así como la descripción de los modelos adaptados y formulaciones empleadas.

Capítulo 4. Resultados: Se presentan las formulaciones propuestas, los pasos para el cálculo de cada una de las componentes del retroceso de la línea de costa y los datos resultantes. Finalmente, se presentan los resultados de retroceso total de la línea de costa (suma de todas las componentes del retroceso) a lo largo de la costa andaluza. Consideramos que las formulaciones propuestas y la metodología para la aplicación de las mismas son más bien un resultado importante del trabajo.

Capítulo 5. Discusión: Se comentan, valoran y justifican los valores o resultados presentados en el capítulo anterior.

Capítulo 6. Conclusiones: A modo de valoración final, se hace un resumen de los puntos más destacados, hallados a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Capítulo 7. Bibliografía: Se presentan las referencias citadas en el estudio.

Capítulo 8. Anejos: Se presenta el anejo del clima marítimo.

Capítulo 2 - Zona de estudio y datos de partida

2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA

Este capítulo presenta una descripción del área de estudio y de sus rasgos característicos, además de la evolución histórica y la transformación de los usos que se dan al litoral andaluz. Además, se detallan las fuentes de datos e información de partida disponible en esta zona y que se utilizaron para el desempeño de este proyecto.

2.1 - Descripción de la zona de estudio

2.1.1 - Localización y características

Este trabajo tiene como área de estudio las playas de la costa de la Comunidad Autónoma de Andalucía, la cual se encuentra situada al sur de la península ibérica en una latitud entre los 36° y los 38°44' N. Cuenta, además, con un total de 910 km de costa, lo que le sitúa como la cuarta comunidad con mayor recorrido litoral (López Ontiveros, 2003). Debido a su extensión, sus costas están bañadas tanto por las aguas oceánicas del Atlántico (Huelva, Sevilla, Cádiz) como las marítimas del Mediterráneo (Cádiz, Málaga, Granada y Almería) (véase la Figura 2).

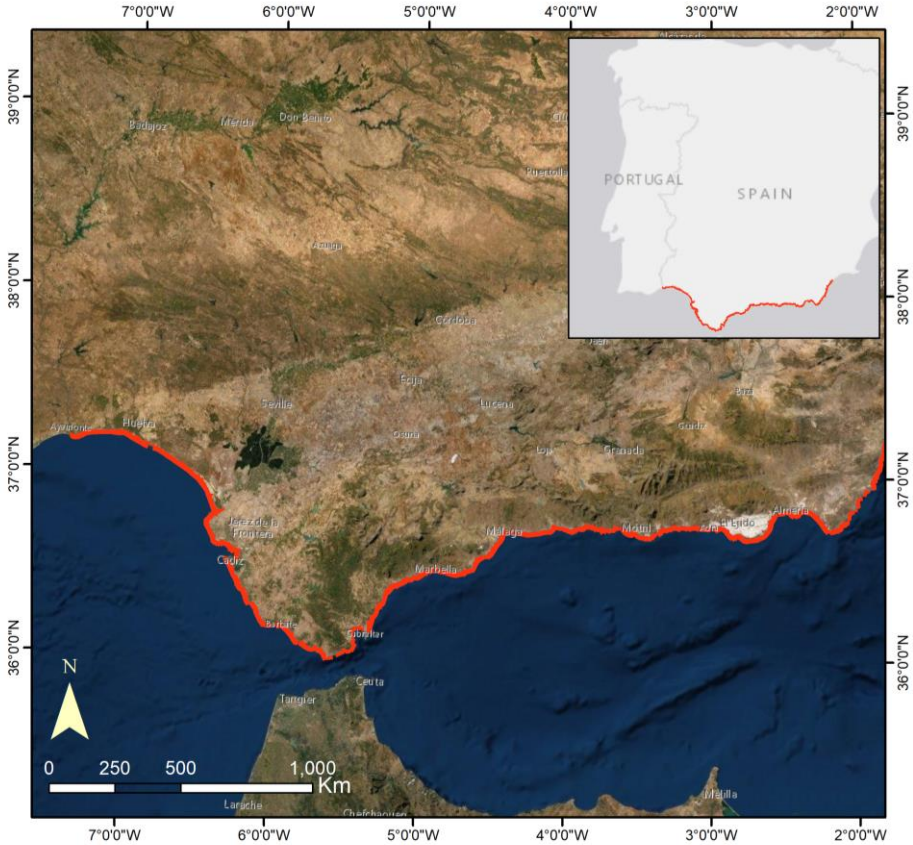


Figura 2 - Detalle de la zona o dominio de estudio.

El litoral de Andalucía contiene una gran riqueza y variedad al presentar una diversidad de tipologías costeras. Algunas de ellas son playas abiertas, completamente expuestas, mientras que otras son playas encajadas, lo cual es determinante en la estimación del transporte de sedimentos y deriva litoral. Las características morfológicas de los perfiles de playa dependen mucho del tipo de entorno en el que se encuentre ubicada la playa en cuestión. Presenta una destacable variabilidad en los perfiles de playa, lo cual provoca que exista una gran diversidad de formas y extensiones. Además, en algunos casos, el perfil se encuentra limitado por la presencia de lajas rocosas, muros o acantilados, en cuyos casos es necesario adaptar la forma y modelización de los mismos.

Algunas playas cercanas a las desembocaduras de estuarios presentan dinámicas específicas relacionadas al transporte de sedimentos entre playa, bocana y el interior de los estuarios.

2.2 - Datos de partida

2.2.1 - Dinámicas marinas

Las dinámicas marinas consideradas en este trabajo son: el oleaje, la marea, (meteorológica y astronómica) y el nivel del mar.

Los datos relativos al clima marítimo, presentados en detalle en el Anejo I, pertenecen a 2 bases de datos diferentes: GOW (Global Ocean Waves), GOT (Global Ocean Tides). Ambas disponen de un registro datos climáticos continuos y homogéneos. En total se seleccionaron un total de 12 puntos a lo largo de la zona de estudio, con una resolución espacial de 0.25º.

Oleaje:

En este estudio se ha empleado el Hindcast de oleaje de alta resolución DOW2-Andalucía (Downscaling Ocean Waves 2 - Andalucía). Dicha base de datos fue desarrollada por IHCantabria a través de un downscaling dinámico del producto global GOW2 (Global Ocean Waves), una base de datos generada a partir de la aplicación del modelo numérico WaveWatchIII (WWIII, Tolman, 1991).

Dicha base de datos consiste en series temporales de los estados de mar representados por parámetros representativos de oleaje como la altura significante de olas (Hs), el período de pico (Tp) y la dirección media del oleaje (θ_{FM}).

Las series fueron obtenidas con mallas de 100 m de resolución (véase Figura 3), presentan resolución temporal horaria y cubren todo el período de 1979 hasta la actualidad, al ser una base de datos actualizable.

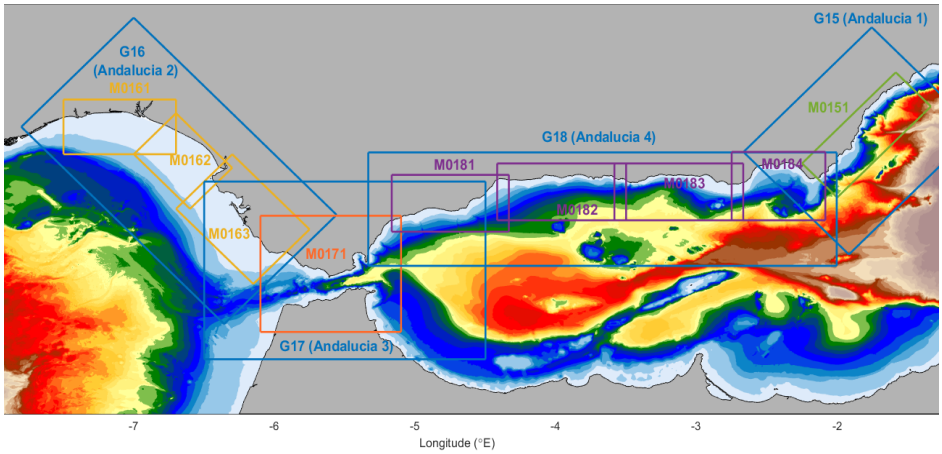


Figura 3 - Mallas regionales utilizadas para la propagación de los datos de oleaje hasta la costa del litoral andaluz.

Las series de oleaje han sido validadas con medidas instrumentales procedentes de las boyas Puertos del Estado (REDEXT y REDCOS).

- REDEXT: Se trata de la Red de Boyas de Aguas Profundas. Las boyas de esta red están fondeadas lejos de la línea de costa a gran profundidad (al menos 200 metros), por lo que sus medidas no están limitadas por condicionantes locales. Representan observaciones representativas del oleaje en un tramo de costa.

- REDCOS: Es la Red de Boyas Costeras. Estas boyas se colocan a menos de 100 metros de profundidad, cerca de la costa. Están afectadas por el perfil de costa cercano, así como por los efectos del fondo sobre el oleaje, por lo que sólo son representativas de las proximidades de la boya.

Se utilizó el modelo numérico de tercera generación SWAN (Simulating WAves Nearshore, Booij et al., 1999) para llevar a cabo el proceso de downscalling y propagar el oleaje desde profundidades indefinidas hasta la costa. Este modelo numérico está basado en la ecuación de acción de onda, la cual promedia la fase de la onda, permitiendo simular correctamente los procesos de refracción, asomeramiento, disipación por fondo, rotura, interacciones no lineales y generación de oleaje por acción del viento.

Para las simulaciones con el modelo SWAN se utilizaron como forzamientos, además de los datos GOW, los campos de viento del reanálisis atmosférico global ERA5 interpolado a 0. 1º de resolución espacial y las variaciones del nivel del mar debidas a

la marea astronómica y a la marea meteorológica. La combinación de todos estos elementos ha permitido generar una base de datos de estados de mar con una resolución espacial de aproximadamente ~1 km (0,01º) y resolución temporal horaria.

Nivel del mar:

Se define como nivel del mar (NM) la posición media de la superficie libre una vez filtradas las oscilaciones de onda corta y onda larga asociadas al oleaje. Una vez filtradas dichas oscilaciones, las restantes son causadas por movimientos de largo periodo asociados a la meteorología y a los movimientos astronómicos. La oscilación del nivel medio del mar, asociada a la evolución de los sistemas meteorológicos, tiene carácter aleatorio y se denomina marea meteorológica. El conjunto de oscilaciones del NMM asociadas a los movimientos astronómicos tienen carácter determinista y se le denomina marea astronómica. La combinación de las estadísticas de ambas mareas es lo que se determina el régimen del nivel del mar.

Los valores de nivel del mar aplicados en las tareas que se describen en este documento se han obtenido de la combinación de la serie de marea astronómica con la serie de marea meteorológica, las cuales se describen a continuación.

Marea meteorológica (Global Ocean Surge - *GOS*):

La marea meteorológica (MM) es la variación del nivel del mar, producida por los cambios de presión y del viento que actúan sobre la superficie marina. En este proyecto se utilizó la base de datos de marea meteorológica GOS (Global Ocean Surges), con una resolución espacial de 0.064º x 0.114º y resolución temporal horaria. Esta base de datos engloba resultados de simulaciones históricas de marea meteorológica (1979 – 2017), generadas con el modelo numérico ROMS (Regional Ocean Model System) (A.Shchepetkin y J.McWilliams, 2005). ROMS es un modelo oceánico tridimensional que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds utilizando la aproximación de Boussinesq.

Para las simulaciones, se utilizaron forzamientos de viento procedentes del reanálisis atmosférico global ERA5, interpolados a 0.1º de resolución espacial.

Marea astronómica (Global Ocean Tides - *GOT*):

Los datos de marea astronómica a lo largo de la costa andaluza se obtuvieron de la base de datos GOT (Global Ocean Tides). Esta base de datos proporciona series temporales horarias de marea astronómica a lo largo de todo el planeta.

La marea astronómica se genera a partir de las constantes armónicas derivadas del modelo de mareas mundial TPXO09, desarrollado por la Universidad Estatal de Oregón (Egbert et al. 1994, Egbert y Erofeeva, 2002). La base de datos de TPXO09 incluye ocho constantes primarias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), dos largos períodos constituyentes (Mf, Mm) y 3 constituyentes armónicas no lineales (M4, MS4, MN4), comprendidas entre el periodo (1979 – 2017) y de resolución 1/30º para zonas costeras, y de 1/6º para el resto del océano.

2.2.2 - Proyecciones de aumento del nivel medio del mar (AR6 – IPCC)

Los datos de las proyecciones de Aumento del Nivel Medio del Mar (ANMM) se obtuvieron a partir de las bases de datos de publicadas en el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022). Dicho informe considera un conjunto de cinco nuevos escenarios, conocidos como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP), en los cuales se aportan datos con diferentes proyecciones climáticas y de las emisiones futuras.

Se incluyen escenarios “optimistas” con emisiones muy bajas (SSP1-1.9), bajas (SSP1-2.6), intermedias (SSP2-4.5), y otros más “pesimistas” con emisiones altas (SSP3-7.0) y muy altas (SSP5-8.5). En este estudio se utilizaron solamente las intermedias (SSP2-4.5) y muy altas (SSP5-8.5) como condiciones más desfavorables. De este modo, trabajando en con el peor de los supuestos, se entiende que se obtienen los retrocesos máximos esperables, de manera que no pueda haber valores de retroceso superiores a los presentados en el escenario SSP5-8.5.

De las series de proyecciones de ANMM se optó por tomar un intervalo o banda de confianza, para poder determinar la incertidumbre relacionada a las proyecciones provenientes de diferentes modelos climáticos. Para ello, se utilizaron los valores referentes al percentil 5% (Q5), 50% (Q50) y 95% (Q95) en los años horizontes de 2050 y 2100. Se optó por estos dos años horizonte dado que permiten cubrir de forma razonable la ventana temporal del medio-largo plazo.

Los valores de Q5 y Q95 representan la mínima y máxima incertidumbre del ANMM y permiten estimar todo el rango posible de cambios en la línea de costa debido a la subida del nivel medio del mar. Los resultados de las proyecciones de ANMM para estos dos escenarios, en los mencionados años horizonte 2050 y 2100 serán posteriormente utilizados en el capítulo de resultados para el cálculo del retroceso asociado a la línea de costa del litoral andaluz.

A continuación, en la Figura 4, se presentan ejemplos de los valores obtenidos para los dos escenarios considerados (SSP2-4.5 y (SSP5-8.5), con sus respectivas bandas de confianza, en 2 puntos de la costa andaluza.

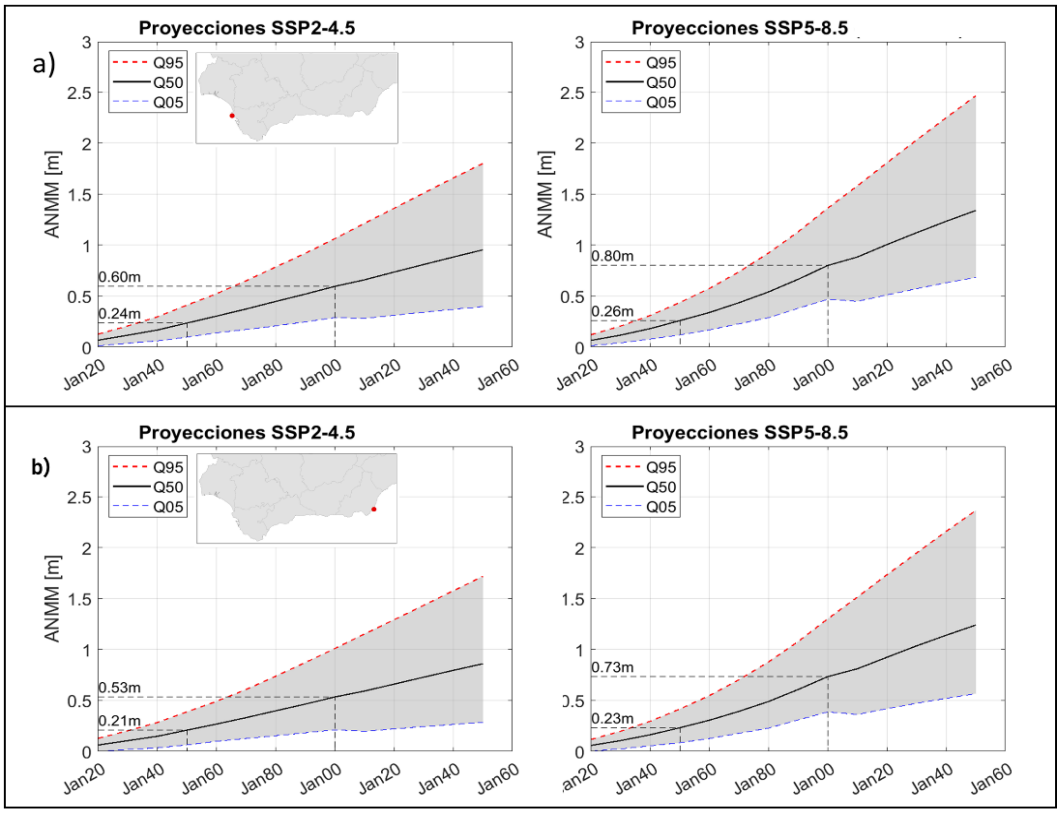


Figura 4 - Datos de proyecciones del ANMM en un punto de la costa de Cádiz (a) y un punto de la costa de Almería (b). Q05, Q50 y Q95 son los valores de los percentiles 5%, 50% y 95% de las proyecciones.

2.2.3 - Topografía y características morfológicas de los perfiles de playa

Para los cálculos de retroceso de la línea de costa se emplearon parámetros referentes a la morfología de una serie de perfiles a lo largo del litoral andaluz.

Se definieron 1281 perfiles de playa a lo largo de toda la costa y se obtuvieron los datos de topografía y batimetría en cada uno de ellos. Cada uno de los perfiles se trazó de forma perpendicular a la línea de costa, extendiendose lo suficiente como para contener el tramo del perfil activo, es decir, desde el frente de playa hasta la profundidad de cierre.

Los 1281 perfiles se repartieron de manera homogénea a lo largo del litoral andaluz, cubriendo Almería con 317 perfiles, el tramo de Granada con 99 perfiles, y las comunidades de Málaga, Cádiz y Huelva con 301, 343 y 221 perfiles respectivamente (véase Figura 5).

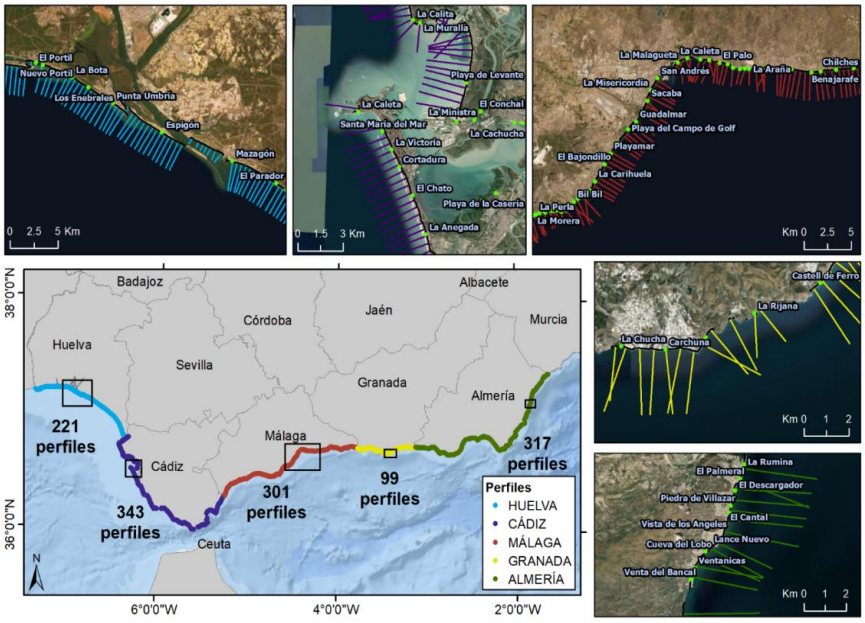


Figura 5 - Perfiles establecidos a lo largo de las playas de la costa de Andalucía.

De la base de datos de REDIAM [1], se obtuvieron 2 líneas de costa, utilizadas de manera directa o indirecta para la obtención del resto de parámetros y características morfológicas. En primer lugar, se ha utilizado la línea llamada "fisiográfica" para definir el límite exterior de la playa seca. Para su obtención se han utilizado cuatro criterios de digitalización que definen la costa desde una perspectiva geomorfológica: 1) última marca húmeda de la marea en formaciones litorales sedimentarias expuestas a mar abierto (playas), 2) límite de la marea más baja (entre todas las ortos disponibles) para estuarios y red mareal, 3) límite externo de infraestructuras para todo tipo de infraestructuras en contacto directo con el mar y 4) base de acantilados para formaciones rocosas conectadas directamente con el mar. En segundo lugar, se ha empleado la línea llamada “línea de costa de erosión” que define el límite interior de la playa seca. Esta línea costera se ha trazado siguiendo (en los tramos de playa) el contacto entre la playa seca y la duna costera cuando esta existe o en el límite superior de la playa seca observable cuando la duna no está presente. Esta versión es de utilidad para el cálculo de tasas de avance/retroceso de la línea costera (tasas de erosión costera .

[1] Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) es el instrumento que reúne, produce y difunde información actualizada sobre el medio ambiente en Andalucía y es uno de los primeros Sistemas de Información Ambiental compartido de Europa. Catalogo REDIAM - Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía (cica.es)

A continuación se describen los datos obtenidos en cada perfil:

- La topografía de los perfiles de playa: fue obtenida a partir de un modelo digital del terreno generado por IHCantabria en el estudio previo (IHCantabria - CAGPyDS, 2021).
- El valor de altura de la berma (B), la profundidad de cierre (h*) y la distancia de esta hasta la línea de costa (W*) en cada perfil: el valor de B se obtuvo como la cota ubicada justo en el inicio del perfil (intersección del mismo perfil con la línea de costa *LCFisiográfica* de REDIAM), que en playas corresponde a la línea de pleamar (última marca húmeda) donde normalmente está ubicada la berma.

Para obtener la h* se empleó la ecuación 1, correspondiente a la formulación de Birkemeier (1985), y se identificó h* en los perfiles topográficos, teniendo como cero la línea de bajamar. Finalmente, W* se obtuvo verificando la distancia entre la línea de costa y h* en la topografía de los perfiles (véanse los ejemplos de la Figura 6).

$$\mathbf{h} * = 1.75 \cdot \mathrm{Hs}_{12} - 57.9 \cdot \left(\frac{\mathrm{Hs}^2}{\mathrm{g}} \cdot \mathrm{Ts}_{12}\right) \qquad [\mathbf{1}]$$

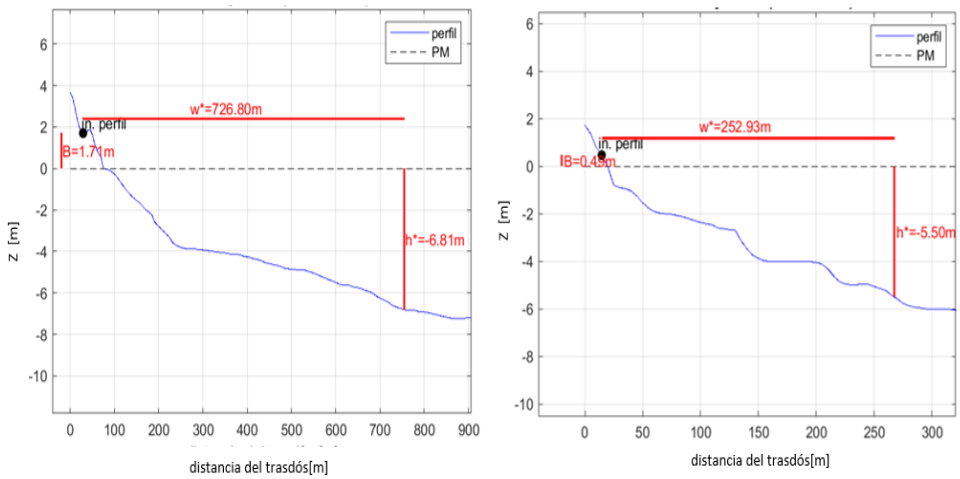


Figura 6 - Esquematización de perfiles de playa de Huelva (izquierda) y Almería (derecha) y los respectivos parámetros de forma del perfil.

- La profundidad de la laja rocosa (hL) y la distancia desde la misma hasta la línea de costa (WL): La laja fue identificada en los perfiles mediante un análisis visual de imágenes de satélite (véase Figura 7).

En aquellos perfiles en que la laja no era evidente en las imágenes, la misma fue identificada como el tramo llano más largo del perfil sumergido.

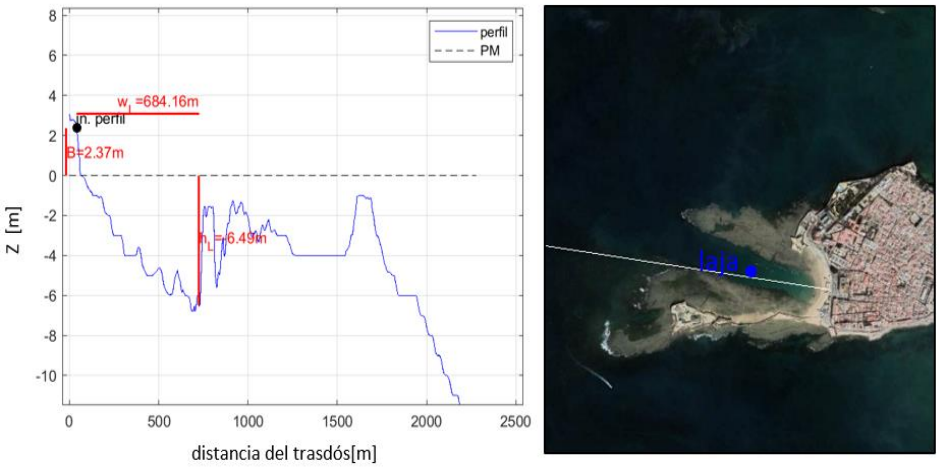


Figura 7- Ejemplo de laja identificada en un perfil de Cádiz (gráfico de la izquierda) después de una inspección visual basada en imágenes de satélite de la zona (imagen de la derecha).

- <u>El ancho de la playa seca en cada perfil:</u> se ha calculado como la distancia entre la máxima pleamar y la línea de costa *LC_Erosión* (representa el pie de duna, muro o acantilado).
- La <u>información del tipo de trasdós</u>: esta información está inclusa en las tablas de atributos de las líneas de costa de REDIAM y permitió identificar el tipo de trasdós en cada perfil como: i) trasdós de dunas ii) muros o acantilados.
- <u>Altura del primer cordón de dunas (Hd)</u>: esta información se obtuvo a partir de la topografía de aquellos perfiles en que se ha identificado la presencia de dunas. Con base al MDT, se identificó el primer cordón dunar en cada perfil y Hd fue calculada como la cota máxima del cordón a partir del pie de la duna (véanse ejemplos en la Figura 8).

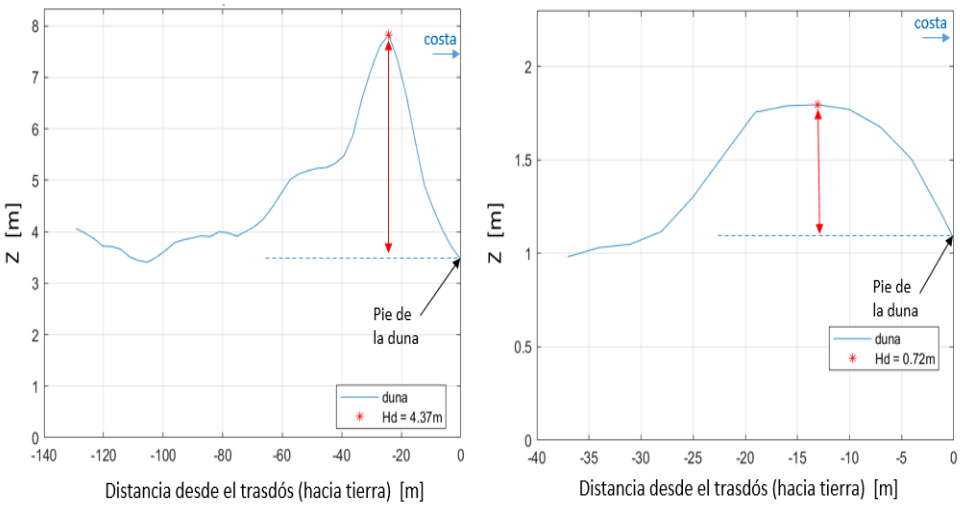


Figura 8 - Altura del primer cordón de dunas (Hd) en dos perfiles de la costa andaluza.

2.2.4 – Tasas de erosión (REDIAM)

En la base de datos de REDIAM también están disponibles diferentes valores de tasas de erosión (m/año), calculadas para todo el litoral andaluz. Estas fueron calculadas en puntos distribuidos cada 50 metros con base a líneas de costa digitalizadas de ortofotos comprendidas entre el 1956 y el 2013. En específico, este estudio, se emplearon las tasas de erosión calculadas para el período de 2001 a 2013.

Se eligieron dichos valores por que representan un período suficientemente reciente para representar la tendencia que ha habido durante la última década (13 años, véase Figura 9) y a la vez, suficientemente corto como para no incluir efectos de erosión por ANMM en el pasado. Eso permite entender la evolución que, durante el medio-largo plazo han ido sufrido las playas de Andalucía debido a procesos no relacionados con el ANMM.

Dentro de la misma base de datos, se incluye un artículo publicado en el Informe de Medio Ambiente (IMA) del año 2011 sobre tramos concretos del litoral de especial interés en cuanto a su dinámica costera en referencia a las tasas calculadas en una versión anterior en los periodos 1956-1977 y 1977-2007. Tras realizar un análisis comparativo, se comprobó que dichos valores de tasa de erosión presentan el mismo orden de magnitud y correspondían bien con los obtenidos por Gomes da Silva et al. (2022) empleando también líneas de costa que incluyen datos más recientes (hasta el 2020).

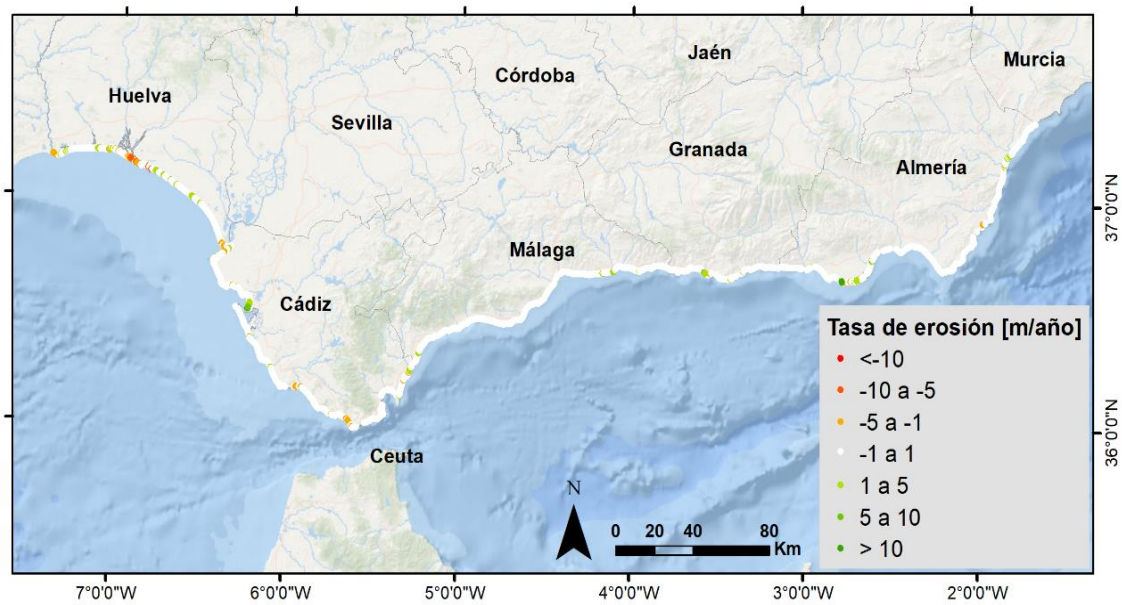


Figura 9- Tasas de erosión calculadas a lo largo de la costa andaluza para el período de 2001 a 2013 (REDIAM).

2.2.5 - Líneas de costa de los estuarios de Andalucía (REDIAM)

De la misma base de datos de REDIAM, anteriormente mencionada, también se han obtenido líneas de costa de los principales estuarios dominados por marea de la costa andaluza (Figura 10).

Figura 10 - Líneas de costa (marcadas en verde) de los estuarios dominados por marea considerados en este estudio.

Dicha información se utilizó para estimar las dimensiones y morfologías de los estuarios analizados, así como para cuantificar el valor de los retrocesos asociados a estos estuarios por efecto del ANMM comentado anteriormente.

2.3 – Características del clima marítimo en Andalucía

El clima marítimo de la costa de Andalucía presenta notables diferencias debido a la diversidad climática que presenta en sus extremos, al estar afectada en parte por el Océano Atlántico y por otra parte el Mar Mediterráneo. Entremedias se encuentra el estrecho de Gibraltar, zona donde convergen ambas masas de agua dando lugar a una zona muy dinámica debido a su morfología y a la confluencia de intensos vientos y corrientes. La climatología de esta zona permite un mayor desarrollo del oleaje alcanzándose las mayores alturas de ola, debido a la intensificación de los forzamientos mencionados (García de Pedraza, 1991).

El oleaje de la costa andaluza en aguas profundas muestra por lo general dos componentes principales, una proveniente del Oeste y otra del Este, ya que por el norte y sur se encuentra limitada por los continentes. La componente de poniente, característica de la parte Atlántica, acostumbra a ser más intensa que la de levante, eso sumado al amplio fetch que ofrece el Atlántico Norte, promueve la generación de oleajes más energéticos y de mayor magnitud. El oleaje medio oscila entre unos 0.6 y 1.2 m de altura de ola significante, encontrándose las mayores magnitudes en la zona atlántica próxima al estrecho de Gibraltar, donde se alcanzan máximos de hasta 7.58 m de altura de ola significante (véase Anejo I, Punto 3).

Con respecto al periodo del oleaje, el periodo de pico fluctúa entre los 5.4 y 9.6 s y también concentra los mayores valores en torno al estrecho de Gibraltar. La intensidad del oleaje, tanto altura de ola como periodo, disminuye al alejarse del estrecho, especialmente en el litoral mediterráneo, donde debido a la morfología de cuello de botella del estrecho, muchas de las dinámicas marinas y componentes direccionales quedan filtradas, dejando pasar una menor cantidad de energía.

Respecto a la marea, hay una clara disminución del rango mareal desde la parte Atlántica a la Mediterránea, con rangos medios de 2.2 m en Huelva y de 0.12 m en Almería, con máximos en estas zonas de hasta 3.7 m y 0.2 m respectivamente.

Para poder caracterizar debidamente la variedad existente en el área de estudio, se seleccionaron 9 puntos de control repartidos a lo largo de la costa Andaluza, tratando de escoger aquellas ubicaciones representativas de cada una de las tipologías costeras existentes. El resumen de los resultados y datos referentes al clima marítimo se encuentran recogidos en el Anejo I, al final de este documento.

2.4 - Evolución histórica

Los cambios paleogeográficos que han afectado históricamente al litoral y la costa de Andalucía han estado siempre ligados a diferentes forzamientos, tales como cambios climáticos, variación relativa del nivel del mar, eventos energéticos puntuales (tsunamis y temporales marítimos) y por la actividad humana. Las fluctuaciones en los ciclos climáticos han sido particularmente importantes, ya que controlan la frecuencia con la que dichos temporales marítimos erosivos azotan la costa.

A mediados del siglo XX comienza en Andalucía el crecimiento del turismo como principal motor económico. Su ubicación geográfica y climatología hacen de la comunidad andaluza, uno de los destinos más cálidos y con mayor número de horas de sol de Europa, lo cual, sumado a las abundantes playas, suponen las condiciones idóneas para el desarrollo desmesurado del turismo de “sol y playa” (Fernández Tabales, 2003). Con el paso del tiempo, toda esta presión antrópica y urbanística, ha ido transformando el litoral andaluz hasta llegar a la situación y conFiguración actual.

A lo largo del litoral andaluz son muchos los indicadores, tanto geológicos como arqueológicos, de la erosión y el retroceso histórico de estos ambientes costeros naturales (Alonso et al. 1997).

En la documentación histórica es posible hallar referencias desde al menos el siglo XII relativas a que la antigua ciudad de Cádiz fue “tragada por el mar” (véase al respecto Martínez, 1974: 69), tradición que se ha ido mantenido a lo largo de los siglos (Alonso et al., 1997; Campos, 1992). Tanto los tsunamis como los grandes temporales son eventos de muy alta energía que han contribuido históricamente a transformar la morfología costera. Como efecto de ello, en las marismas gaditanas y cordones litorales se pueden encontrar marcas tanto de escarpes erosivos recientes, como de grandes depósitos sedimentarios de alta energía formados por acumulaciones de bloques y gravas de gran calibre, asociados a cantos perforados e imbricados hacia tierra (Benavente et al., 2000; Gracia et al., 2008).

Recientemente, el forzamiento que causó mayor grado de transformación e impacto en la costa andaluza es el conjunto de construcciones y actividades que suponen la presión de la población humana. Como ejemplo de ello, en la zona de Punta Umbría, Huelva, se construyó el enorme espigón de Juan Carlos I el cual tiene actualmente más de 12 km de longitud, y que se ha tenido que ir prolongando con los años al no satisfacer las necesidades para las cuales fue diseñado.

Capítulo 3 – Metodología general

3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA

En este capítulo se presenta la metodología general empleada para el cálculo del retroceso de la línea de costa teniendo en cuenta la Regla de Bruun y otros procesos no considerados en la misma

3.1 - Identificación de procesos y factores relevantes

Como se ha mencionado anteriormente, la Regla de Bruun tiene una serie de limitaciones debido a procesos que dicho modelo no tiene en cuenta pero que también pueden ser relevantes de cara al retroceso de la línea de costa. Algunos ejemplos de estas limitaciones son:

- La Regla de Bruun asume que el perfil de playa en cuestión se encuentra en equilibrio dinámico y que el clima marítimo se mantiene constante en el largo plazo, condiciones que no siempre ocurren. Esta hipótesis implica que la formulación no sea aplicable en determinados ámbitos o situaciones, entre los que se pueden citar i) playas donde se verifica un cambio en el perfil medio de equilibrio, resultando en cambio en la pendiente del perfil, ii) en costas afectadas por fuentes y sumideros, salientes y desembocaduras, o estructuras rígidas como acantilados, arrecifes u obras costeras que no permitan el desplazamiento del perfil.
- La regla solo tiene en cuenta el volumen necesario para rellenar la zona entre la línea de costa y la profundidad de cierre, y no contempla el volumen de arena necesario para rellenar la playa seca (volumen de la berma) tras la subida del perfil por el aumento del NMM: en este caso, la arena pasa del perfil sumergido a la playa seca y, cuanta más arena sea necesaria en este proceso, más se amplifica el retroceso, especialmente en playas anchas y con bermas altas, en las que dicho volumen es significativamente importante.
- La Regla de Bruun no tiene en cuenta el volumen de arena aportado al perfil cuando el retroceso causa la erosión del pie de la duna y la arena de esta zona pasa al perfil sumergido: este factor reduce el retroceso de la línea de costa calculado con la Regla de Bruun ya que pasa a haber más arena disponible en el sistema. Los perfiles de playa en Andalucía tienen diferentes tipos de trasdós, algunos con dunas y otros con muro o acantilado. Esta característica puede influenciar la evolución de la línea de costa en los casos en que el retroceso alcance el trasdós de la playa.

- Tampoco se tiene en cuenta el volumen de arena necesario para rellenar los estuarios que también van a buscar volver a su forma y profundidades de equilibrio tras el aumento del NMM: Parte de la arena necesaria para rellenar los estuarios viene de las playas adyacentes, algo que también amplifica la erosión tras el ascenso del NMM.
- Muchas de las playas de Andalucía están conectadas a estuarios (especialmente las playas de la costa Atlántica) por lo que se espera una intensificación del proceso erosivo por la subida del nivel del mar en estas playas.

A lo largo del litoral andaluz hay una gran diversidad de playas con morfologías costeras diferentes, en muchas de las cuales la Regla de Bruun en su versión genuina, no es suficiente para explicar la totalidad de los procesos que las gobiernan.

3.2 - Metodología de cálculo

Teniendo en cuenta dichas limitaciones, Toimil et al. (2017) planteó una metodología para incluir el efecto de otros factores en el análisis del impacto del ANMM en playas encajadas del Cantábrico.

Partiendo de ese estudio de Toimil et al. (2017), se ha planteado una nueva metodología que tiene en cuenta los procesos y características relevantes citados arriba en la costa de Andalucía.

La metodología consiste en estimar el retroceso individual resultante de cada proceso identificado como relevante en base a fórmulas de equilibrio adaptadas de Bruun. Finalmente, el retroceso total ($R_{_Total}$) se obtiene sumando cada uno de los valores:

$$[\, R_{total} = R_{Perfil} + R_{Estuario} + R_{No_ANMM} \,] \qquad [2]$$

donde;

- R_{Perfil} : es el retroceso de la línea de costa para compensar la demanda de sedimentos para mantener la forma de equilibrio del perfil. Se calcula como la suma del R_{Bruun} que es el retroceso calculado únicamente con la Regla de Bruun y R_{Berma}, que es el retroceso adicional por rellenar la playa seca (volumen de la berma) del perfil.
- $R_{Estuario}$: es el retroceso adicional por pérdida de sedimentos para rellenar los estuarios.

- R_{No_ANMM} : es el retroceso/avance ocasionado por factores no relacionados con el ANMM.

Para la aplicación de los modelos de equilibrio se han considerado los siguientes escenarios en el cálculo de cada una de las componentes de R_{total} (véase tabla 1).

Tabla 1 - Escenarios considerados en el cálculo del retroceso de la línea de costa.

	Escenario IPCC	Año horizonte
E1	SSP2-4.5	2050
E2	SSP2-4.5	2100
E3	SSP5-8.5	2050
E4	SSP5-8.5	2100

En los siguientes capítulos se presentan los detalles del cálculo de cada una de las componentes del retroceso total.

3.3 - Hipótesis y premisas

El cálculo del retroceso de la línea de costa basado en modelos de equilibrio se hace en base a las siguientes premisas:

- El ANMM ($\Delta\eta$) es la única perturbación que sufrirá cambios en el futuro. Aunque el cambio climático puede afectar otras dinámicas como el oleaje y la marea meteorológica en algunas zonas del globo, un análisis detallado de los datos derivados de las proyecciones del AR6 (IPCC, 2022) permitió comprobar que los cambios en dichas dinámicas en el futuro no serán significativos a lo largo de la costa andaluza. Por ello, es coherente asumir que las alteraciones derivadas del cambio climático en la morfología de la costa de Andalucía en el futuro se darán principalmente debido los cambios en el NMM.
- Se asume que las playas y los estuarios considerados aquí tienen una forma de equilibrio media que puede ser representada por los parámetros de forma de cada modelo y que estos parámetros no se verán alterados en un futuro.
- Se asume también que las tendencias actuales de cambio debido a factores no climáticos se mantendrán inalteradas, hasta los años horizonte de los análisis, 2050 y 2100.

3.4 - Limitaciones de cálculo

La falta de datos o el no cumplimiento de las hipótesis básicas de los modelos empleados aquí, no permiten estimar el retroceso de la línea de costa en 80 de los 1281 perfiles establecidos inicialmente en el proyecto. En específico:

El cálculo realizado del retroceso de la línea de costa demanda tener información topo-batimétrica de toda la extensión del perfil (desde la duna hasta la profundidad de cierre), por lo que no se ha realizado el cálculo en los perfiles que no cumplían esta condición.

Los perfiles ubicados en la zona de desembocadura de estuarios no presentan las mismas características de los perfiles típicos de playas para los cuáles se han desarrollado los modelos de equilibrio. Por ello, los perfiles ubicados en zonas de desembocadura no fueron considerados en estos análisis.

Capítulo 4 - Resultados

4.1- RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA PARA MANTENER EL PERFIL DE EQUILIBRIO (R_{Perfil})

En este capítulo se describen los pasos para el cálculo de la primera componente del retroceso: R_{Perfil}, que trata de estimar el retroceso debido a cambios en la disposición de la arena en el perfil para que se mantenga la forma de equilibrio tras el ascenso del NMM.

Como se detalla en el apartado de metodología, esta variable se calcula como la suma del retroceso de la Regla de Bruun y el retroceso adicional por la demanda de volumen de arena para rellenar berma de la playa, este último calculado con el modelo de Rosati et al. (2013).

4.1.1- Retroceso de la línea de costa calculado con la Regla de Bruun (R_{Bruun})

El cálculo del retroceso de la línea de costa con la Regla de Bruun se hace aplicando la siguiente fórmula:

$$R_{Bruun} = \Delta\boldsymbol{\eta}\,\frac{\boldsymbol{W}^*}{(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{h}^*)} \qquad [3]$$

donde;

$\Delta\eta$: Aumento del NMM en el futuro

B: Altura de la berma

h^*: Profundidad de cierre del perfil

W^*: Distancia entre la línea de cota de pleamar y la profundidad de cierre.

4.1.2- Retroceso por cambios en la disposición de la arena del perfil para rellenar la playa seca (R_{Berma})

Para mantener la forma de la berma durante el retroceso del perfil, la zona detrás de ésta debe estar repleta de arena, de lo contrario, se amplifica el retroceso de línea de costa. Con base en eso, Rosati et al. (2013) presentaron una adaptación de la Regla de Bruun que permite calcular el retroceso adicional según el volumen necesario para rellenar la berma tras el ANMM (véanse ecuaciones 4 y 5):

$$R_{Berma} = \frac{V_{Berma}}{B+h^*} \qquad [4]$$

$$V_{Berma} = \Delta\eta(L - R_{Bruun}) \qquad [5]$$

donde *L* es la anchura o longitud de la playa seca (véase Figura 11).

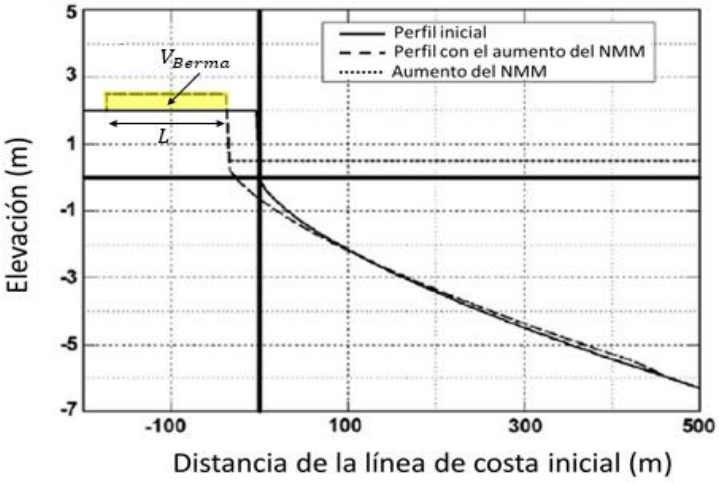


Figura 11 - Esquema de la problemática del volumen de la berma identificado (adaptado de Rosati et al., 2013)

4.1.3- Adaptaciones según las características específicas de cada perfil

4.1.3.1- Adaptación para perfiles con laja (h_L, W_L)

En aquellos perfiles en que se observa la presencia de una laja rocosa en profundidades menores que la profundidad de cierre *h**, el volumen disponible de arena en el perfil es menor, ya que el sedimento está confinado en la zona hacia tierra de la laja.

En este caso, se ajusta la fórmula de Bruun (1962) y de (Rosati et al., 2013) y el retroceso es calculado empleando h_L y W_L en lugar de con *h** y *W** en las ecuaciones 4 y 5, donde h_L y W_L son la profundidad de la laja y la distancia que esta se encuentra de la línea de pleamar.

4.1.3.2- Adaptación para perfiles con muro o acantilado

En perfiles con estructuras duras o rígidas en la zonas de trasdós de la playa, tales como muros o acantilados, el retroceso estará limitado a la anchura de la playa seca (L) hasta dichas estructuras.

Para tener en cuenta este factor se limitó el retroceso de $R._{Bruun}$ y $R._{Berma}$ bajo las siguientes condiciones:

- $R_{Bruun} = R_{Bruun}$ *si se cumple* $R_{Bruun} < L$
- $R_{Bruun} = \mathrm{L}$ *si se cumple* $R_{Bruun} \geq L$
- $R_{Berma} = 0$ *si se cumple* $R_{Bruun} = L$

- $R_{Berma} = R_{Berma}$ *si se cumple* $R_{Perfil} < L$
- $R_{Berma} = L - R_{Bruun}$ *si se cumple* $R_{Perfil} \geq L$

4.1.3.3- Adaptación a los perfiles con duna

Por otro lado, en perfiles con dunas, la erosión puede ocurrir hasta zonas más allá de la línea del trasdós. En este caso, se asume que el volumen erosionado de la duna pasa a la parte activa (sumergida) del perfil de playa, lo cual supone un aporte extra de volumen de arena al sistema y eso resulta en una reducción del retroceso final de la línea de costa.

Por eso, en los perfiles con presencia de dunas, R *Perfil* se ha calculado como:

$$R_{Perfil} = \frac{\Delta\eta\, W^* - (R_{Bruun} + R_{Berma} - L) * Hd}{h* + B} \qquad [6]$$

donde Hd es la altura máxima del primer cordón dunar.

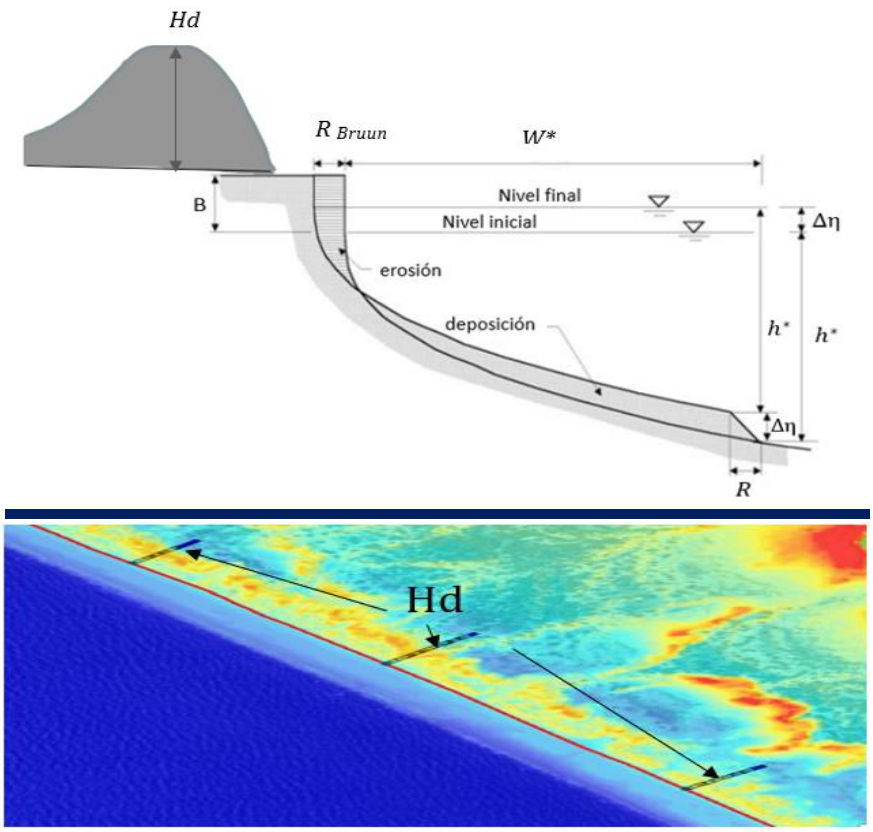


Figura 12 - Esquema de los parámetros utilizados en el cálculo de R Perfil en los perfiles con duna (adaptado de Rosati et al., 2013) y visualización de un cordón dunar (MDT).

4.1.4- Resultados de R *Bruun*, R *Berma* y R *Perfil*

En las siguientes Figuras se han representado los retrocesos asociados al percentil del 50% de ANMM para los 4 escenarios considerados en este estudio (ver escenarios en la Tabla 1).

En particular, en la Figura 13, Figura 15 y Figura 17 se han representado los valores de R_{Bruun}, R_{Berma} y R_{Perfil} respectivamente estimados para los años horizonte 2050 y 2100 considerando el escenario de cambio climático SSP2-4.5 (E1 y E2, respectivamente);

Por otro lado, en la Figura 14, Figura 16 y Figura 18 se muestran los resultados correspondientes a esos mismos años, pero considerando el escenario de cambio climático más desfavorable según IPCC SSP5-8.5 (E3 y E4 respectivamente).

Con el fin de facilitar la visualización de los resultados, se ha decidido representar los resultados en dos líneas paralelas, donde la más próxima a la costa (arriba) representa el retroceso en 2050 y la más alejada (abajo) el correspondiente a 2100.

Respecto a los resultados presentes en dichas Figuras cabe destacar los siguientes puntos:

I. Como se puede apreciar en las Figura 13 y Figura 14, los valores altos de R_{Bruun} están fuertemente relacionados con la pendiente de la playa que define el volumen de arena del perfil, ya que son los perfiles más largos y tendidos los que demandan grandes cantidades de sedimento de la playa para volver a la forma de equilibrio tras el ANMM. Eso explica los altos valores de retroceso obtenidos en algunos de los perfiles de la provincia de Huelva. Dichos perfiles están caracterizados por ser llanos y extensos, es decir, son perfiles que presentan altos valores de *W** (perfiles largos) y valores bajos de pendiente.

II. Los resultados de R_{Berma} presentes en la Figura 15 y Figura 16 ponen en manifiesto la importancia de hacer el análisis teniendo en cuenta los mencionados efectos de relleno de la playa seca. Los perfiles sin dato de R_{Berma} son un indicativo de que R_{Bruun} ha consumido toda la playa seca disponible, por lo que no ocurre ningún retroceso adicional para rellenar la berma (ya no hay playa seca que rellenar).

III. En el resto de los casos, la mayor parte de los resultados indicó un incremento en el retroceso menor que 5 m para poder rellenar la playa seca. Por ejemplo, para el peor

escenario (E4), de los 1201 perfiles analizados 418 presentaron valores de R_{Berma} mayor que cero y, de estos, 386 presentan valores menores que 5m. Sin embargo, aunque es menos frecuente, existen zonas donde el retroceso alcanza el orden de decenas de metros. Eso ocurre en 19 perfiles de los 1281 perfiles analizados.

IV. Finalmente, respecto a los valores de R_{Perfil} (Figura 17 y Figura 18), estos son semejantes a los obtenidos en R_{Bruun}, de modo que se entiende que los procesos considerados en la Regla de Bruun parecen ser dominantes y gobiernan mayormente el retroceso del perfil.

V. En algunos perfiles, sin embargo, los valores de R_{Berma} superaron los valores de R_{Bruun} (18 perfiles en el peor escenario E4). Eso puede ocurrir en aquellos perfiles cortos, con playas anchas y/o en zonas en que la altura de la berma es elevada. En los perfiles de playas con estas características, el volumen para rellenar el desplazamiento del perfil sumergido es menor que el volumen necesario para rellenar la berma en la playa seca.

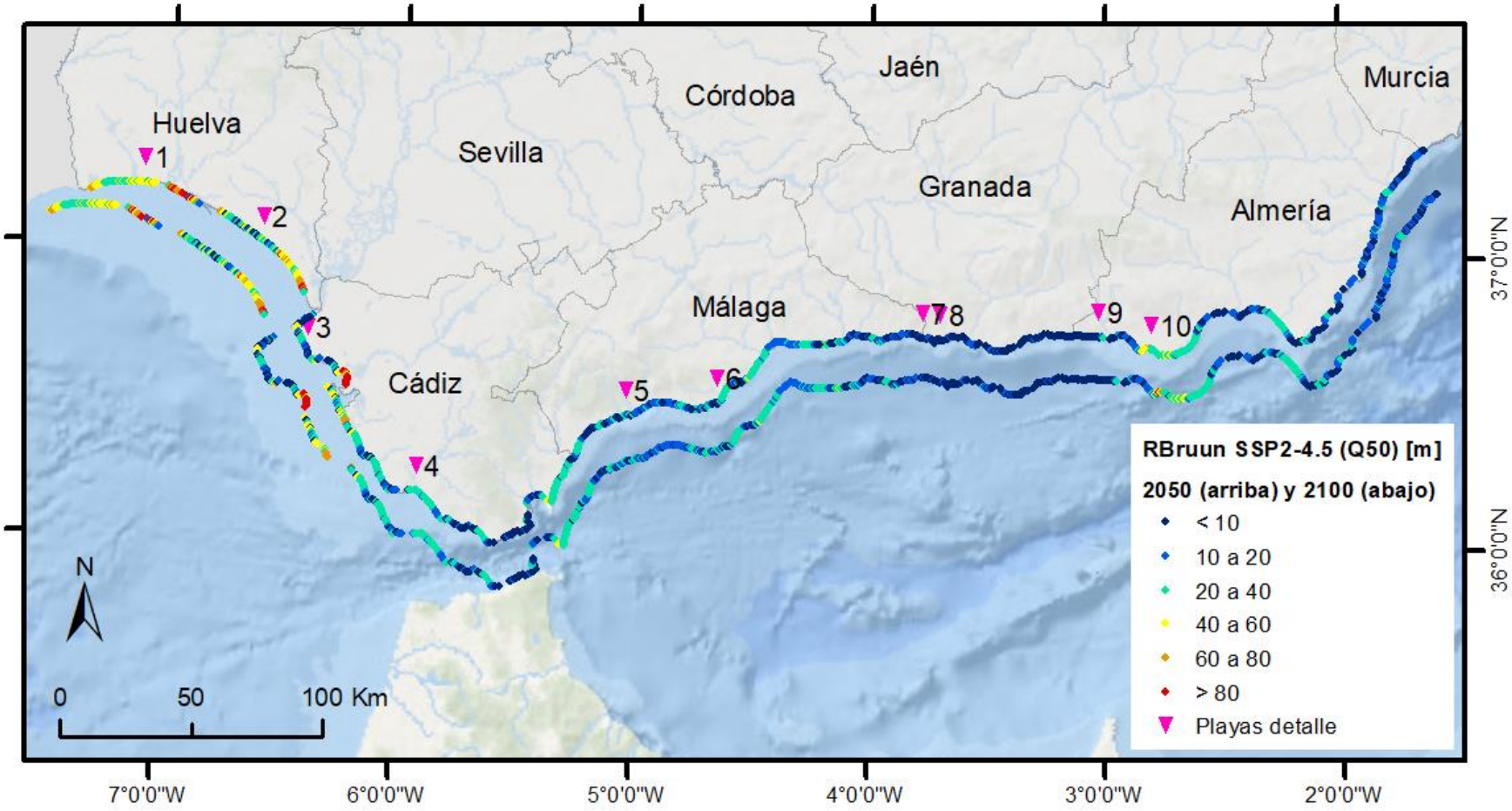


Figura 13 - Valores de R_{Bruun} calculados para los escenarios E1 y E2. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en el ejemplo de la Tabla 3

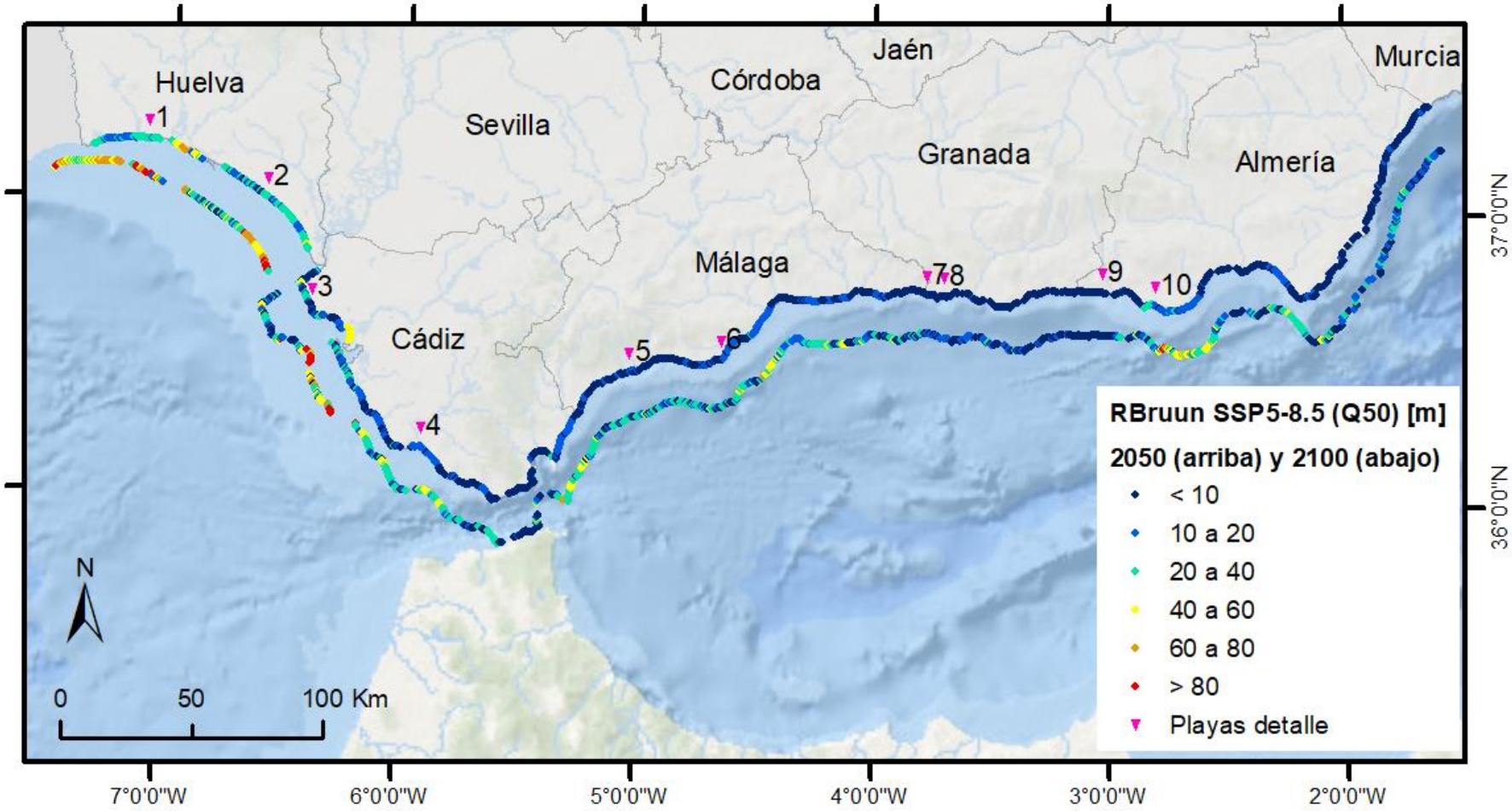


Figura 14 - Valores de R_{Bruun} calculados para los escenarios E3 y E4. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas más adelante en la Tabla 4.

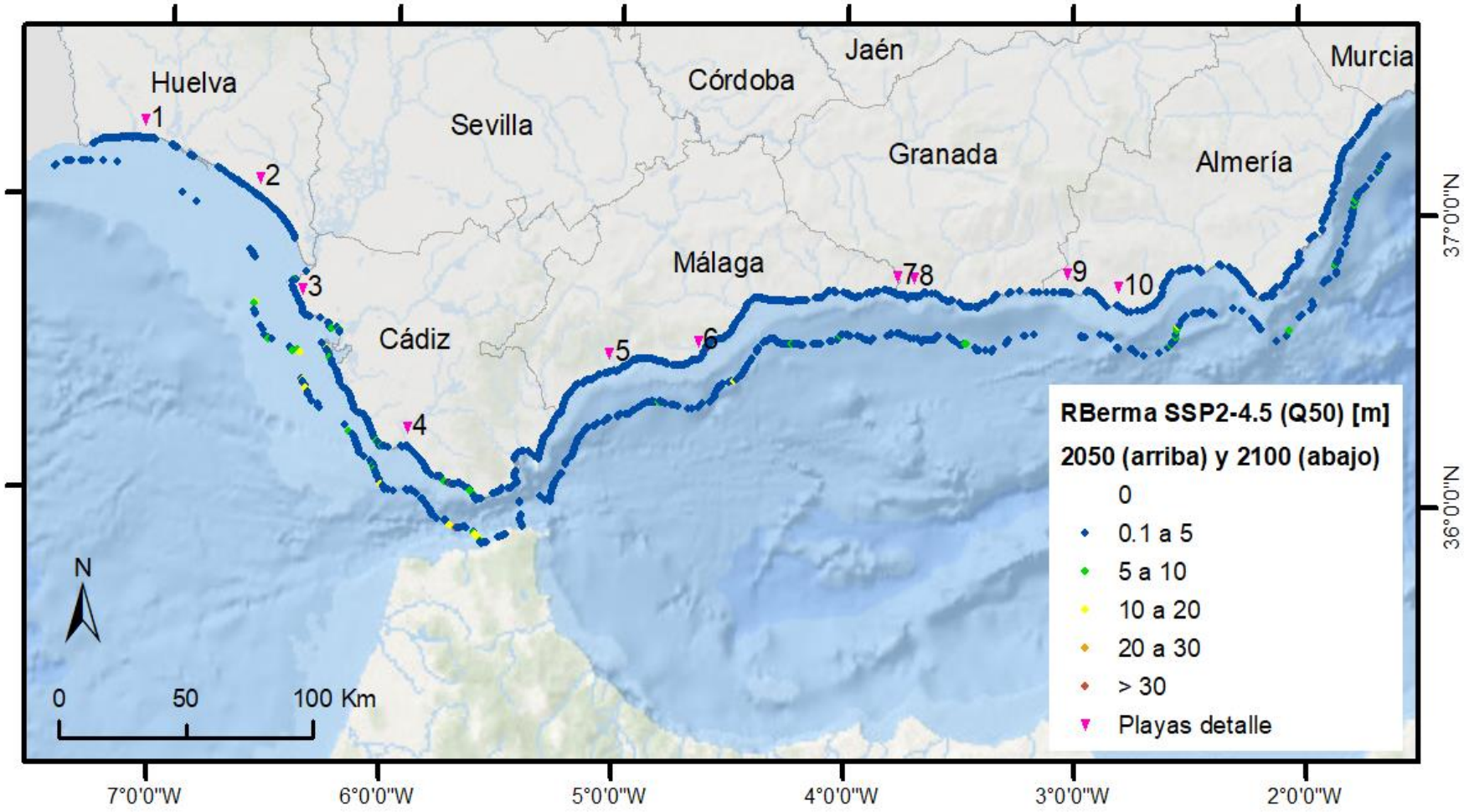


Figura 15 - Valores de R_{Berma} calculados para los escenarios E1 y E2. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en el ejemplo de la Tabla 3.

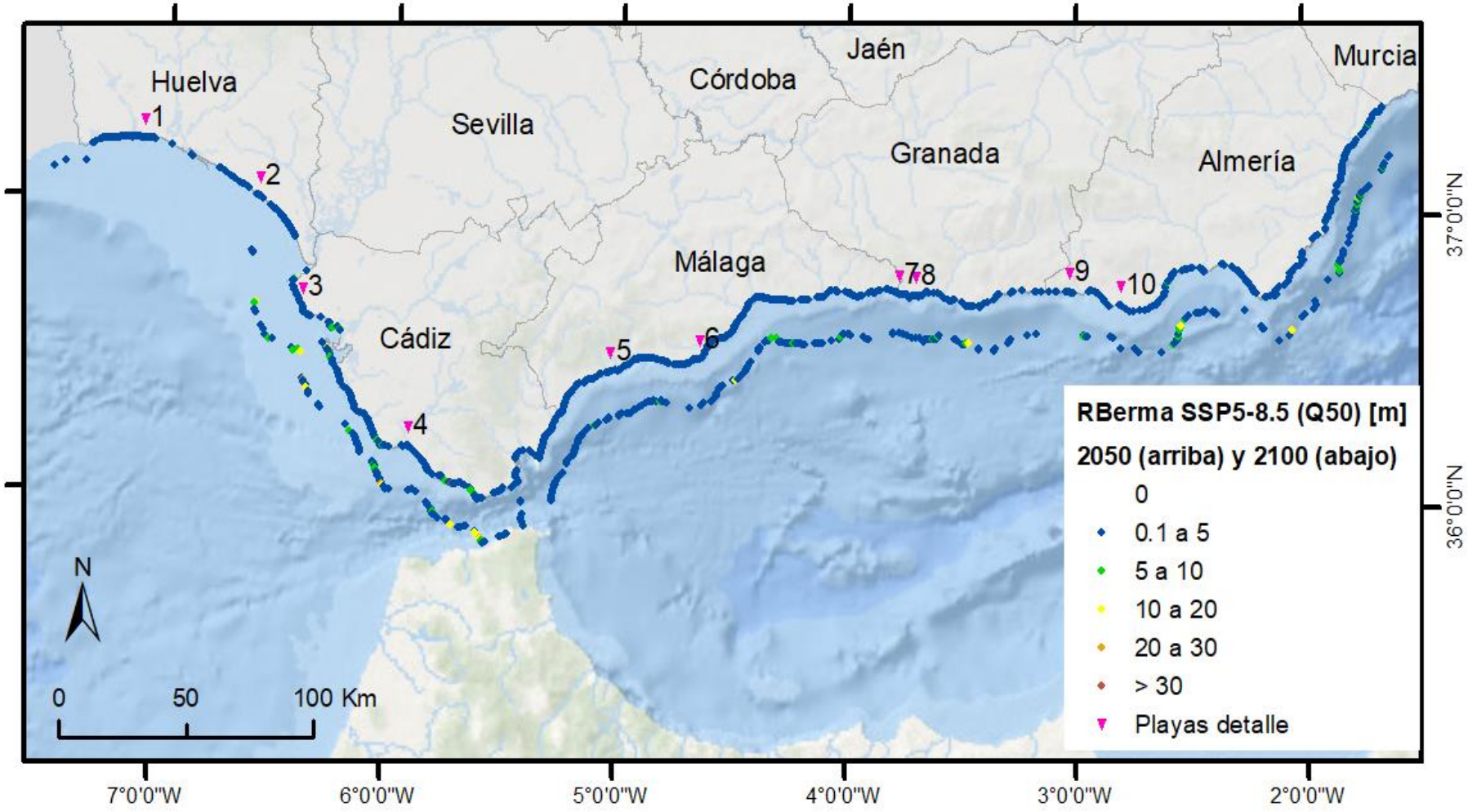


Figura 16 - Valores de R Berma calculados para los escenarios E3 y E4. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en el ejemplo de la Tabla 4

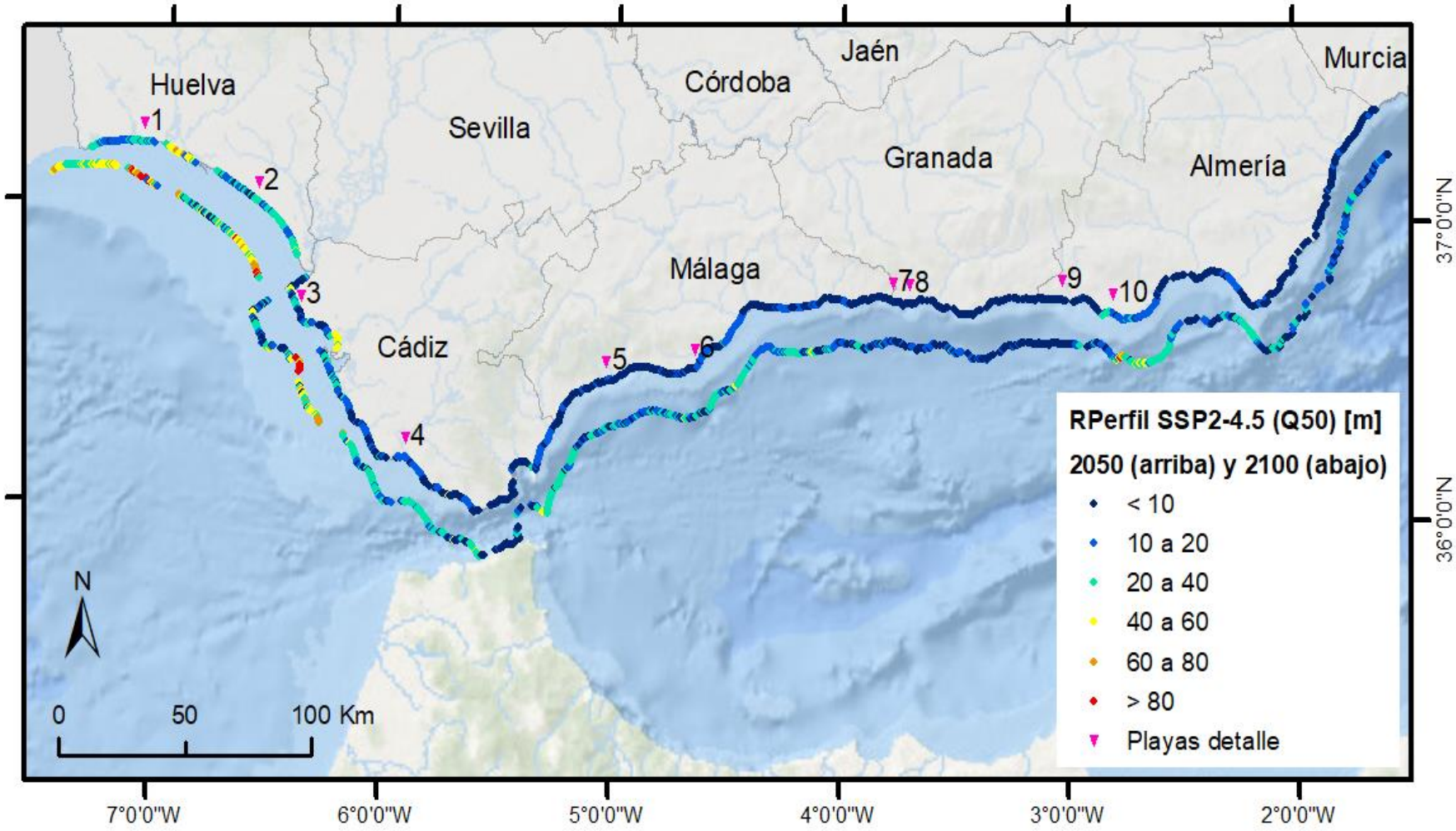


Figura 17 - Valores de R Perfil calculados para los escenarios E1 y E2. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en el ejemplo de la Tabla 3.

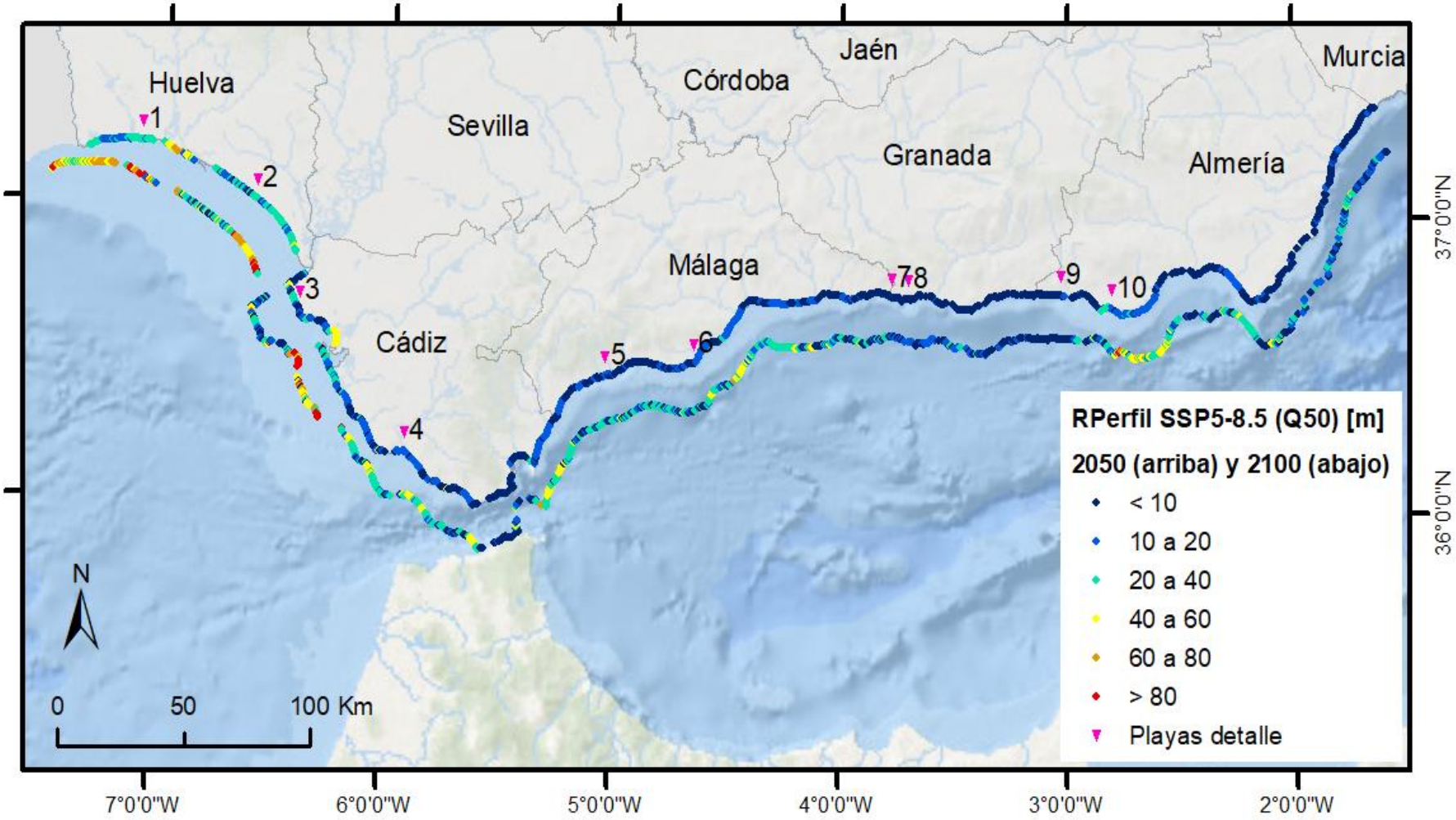


Figura 18 - Valores de R Perfil calculados para los escenarios E3 y E4. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en el ejemplo de la Tabla 4.

4.2 - RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA DEBIDO OTROS FACTORES

De acuerdo con la metodología descrita en el apartado 3.2, en este capítulo se presentan los detalles del cálculo de las otras dos componentes del retroceso total de la línea de costa: $R_{Estuario}$ y R_{No_ANMM},

4.2.1- Retroceso por pérdida de arena para rellenar los estuarios ($R_{Estuario}$)

Para el cálculo del retroceso de la línea de costa debido a las pérdidas de volumen de arena para mantener la forma de equilibrio de los estuarios tras la subida del NMM, se tomó como punto de partida el método aplicado por Toimil et al. (2017). En ese trabajo, los autores proponen el cálculo de $R_{Estuario}$ para estuarios dominados por la marea, teniendo como base al volumen de arena necesario para que el estuario vuelva a su estado natural de equilibrio (ΔV_e) y a la longitud de las playas adyacentes (l), (véanse ecuaciones 7 y 8).

$$R_{Estuario} = \frac{\Delta V_e}{l\,(B+h^*)} \qquad [7]$$

El cálculo de (ΔV_e) se hace a partir de modelos empíricos de equilibrio que tratan de establecer relaciones directas entre diferentes parámetros de los estuarios.

En específico se aplica la siguiente relación:

$$\Delta V_e = A_e * (\Delta\eta - \alpha) \qquad [8]$$

donde;

A_e es el área del estuario (m2)

$\Delta\eta$ es el aumento del NMM (m)

α es el incremento de los bajos interiores (m)

4.2.2- Estuarios dominados por marea en la costa de Andalucía

Se entiende por estuario dominado por marea, aquel en el que el forzamiento que predomina tanto la morfología como la hidrodinámica del mismo es el flujo periódico de ascenso y descenso de la marea. Este tipo de estuarios muestran la típica geometría en forma de embudo que caracteriza aquellos sistemas costeros en los que hay una influencia apreciable de las mareas.

Esta disminución exponencial del ancho del estuario en dirección hacia tierra es el resultado de la disminución del flujo de marea entrante que va perdiendo fuerza conforme avanza hacia adentro de la desembocadura.

Las ecuaciones 7 y 8 son aplicables a estuarios dominados por marea, por lo que el cálculo de $R_{Estuario}$ se hizo para los perfiles de las playas adyacentes a los 9 estuarios de Andalucía que presentaban dicha característica.

Los estuarios considerados en este trabajo son:

- Guadiana
- Carreras
- Piedras
- Tinto y Odiel
- Guadalquivir
- San Pedro
- Sancti Petri
- Barbate Palmones
- Guadarranque

El cálculo del área de estos estuarios se hizo a partir de las líneas de costa de los mismos, disponibles en la base de datos de REDIAM.

Se consideraron “playas adyacentes” aquellas playas con conectividad hidráulica directa, es decir, conectadas directamente (sin barreras físicas) con el estuario en cuestión. Algunas playas son adyacentes a más de un estuario al mismo tiempo, por lo que, se van a ver afectadas por el mencionado efecto del ANMM en ambos estuarios.

La Figura 19 y la Figura 20 presentadas a continuación, muestran el polígono del área de los estuarios considerados (marcado en verde), además de la línea de costa de las playas adyacentes (en rojo).

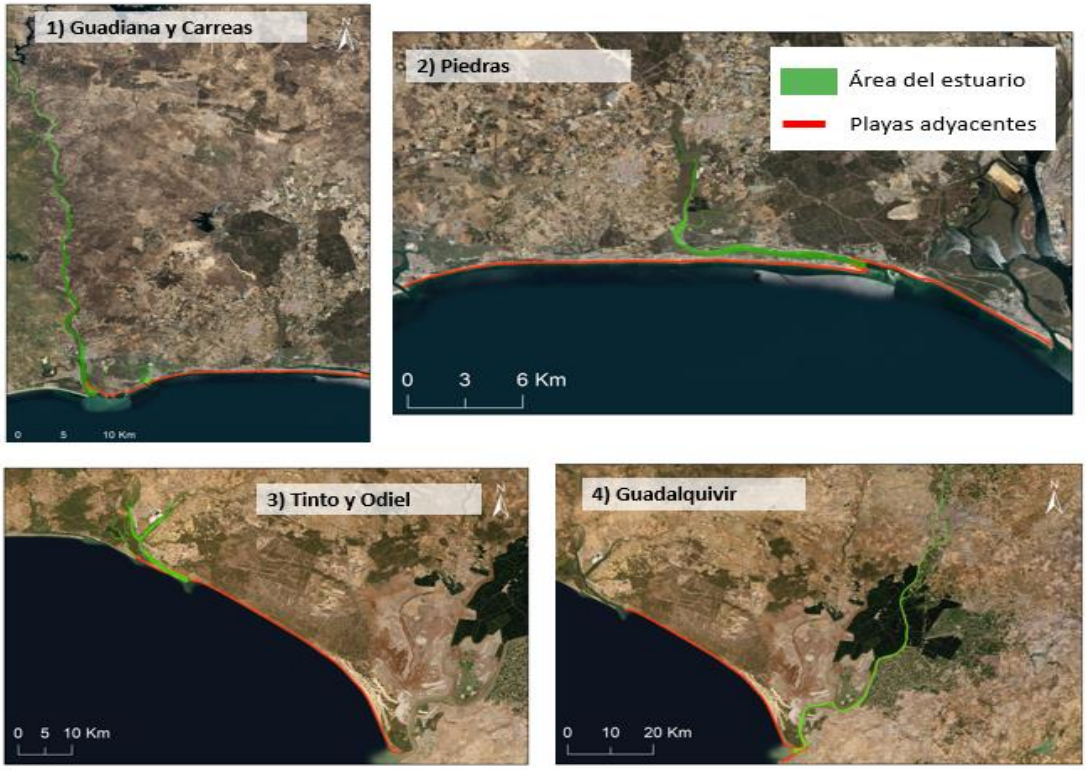


Figura 19 - Área de los estuarios de los ríos Guadiana y Carreras, Piedras, Tinto y Odiel y Guadalquivir, y línea de costa de las playas adyacentes.

Figura 20 - Área de los estuarios de los ríos San Pedro, Sancti Petri, Barbate, Palmones y Guadarranque, y línea de costa de las playas adyacentes.

A continuación, se presenta un resumen de las playas y los parámetros de cada estuario, los cuales se encuentran recogidos en la Tabla 2.

Tabla 2 - Principales estuarios dominados por marea de la costa andaluza: características de los estuarios de las playas adyacentes.

Estuario	Playas adyacentes	Área del estuario (A_e) [m²]	Longitud de las playas adyacentes (l) [m]
Guadiana y Carreras	San Bruno, Los Horaganes, Gaviota, Central, Icona, Urbasur, La Antilla, Santa Pura, Nueva Umbría	1.7×10^7	3.3×10^4
Piedras	Gaviota, Central, Icona, Urbasur, La Antilla, Santa Pura, Nueva Umbria, Nuevo Portil, El Portil, La Bota, Los Enebrales, Punta Umbría.	4.5×10^6	3.8×10^4
Tinto y Odiel	Espigón, Mazagón, El Parador, Rompeculos, Castilla, Matalascañas, Doñana,	2.3×10^7	7.0×10^4
Guadalquivir	Mazagón, El Parador, Rompeculos, Castilla, Matalascañas, Doñana, Bonanza, La Jara, Montijo.	4.2×10^7	6.8×10^4
San Pedro	Valdelagrana, Levante, Calita de la Bocana del Río	1.2×10^6	6.9×10^3
Sancti-Petri	Camposoto, El Castillo, Sancti-Petri, Punta de las Piedras, La Barrosa, EL Puerco, Roche, Calas del Poniente	2.7×10^6	1.9×10^4
Barbate	El Carmen, Canillos, Zahara de los Atunes, Atlanterra	3.0×10^5	1.3×10^4
Palmones	El Rinconcillo, Los Palmones	6.4×10^5	3.7×10^3
Guadarranque	Guadarranque	1.8×10^5	1.7×10^3

Para la aplicación del modelo empírico utilizado aquí, es necesario conocer la tasa de crecimiento de la cota de los bajos interiores de los estuarios, parámetro muy dependiente de los aportes sedimentarios del río. Este parámetro también puede estimarse a través de datos de batimetría de detalle de la zona del estuario. Ante la ausencia de datos de detalles sobre la aportación de arena a los bajos y sobre la batimetría de los estuarios en cuestión, en este estudio se aplicaron valores de α obtenidos a partir de cálculos realizados anteriormente por IHCantabria en otros estuarios dominados por marea en España (valores de α calculados en el Cantábrico). Se adoptaron los valores de α =0.22 para los cálculos del horizonte 2050 y α =0.42 para los cálculos del horizonte 2100.

4.2.3- Adaptación en perfiles con transporte longitudinal

El retroceso de la línea de costa por pérdida de arena al estuario puede ser atenuado si ocurre entrada y acumulación de arena en el sistema a través del transporte litoral (*TL*). En ese caso, el (ΔV_e) es menor y puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$\Delta V_e = A_e * (\Delta\eta - \alpha) - TL * \Delta t_{horizonte} \qquad [9]$$

Ese es el caso, por ejemplo, de la zona de la Fecha del Rompido, Huelva. En esta zona se observa un avance hacia oeste de la flecha debido al transporte litoral.

Como se puede apreciar en la fotografía inferior, la flecha ha avanzado 590 m entre los años de 1985 y 2020. Considerando un ancho del puntal igual a 250 m (Figura 21) y una profundidad de cierre igual 7.5 m (h* local con relación a la pleamar), se puede calcular el volumen de arena aportado a esta zona en el período de 35 años y la tasa de transporte litoral que es de aproximadamente 3,2 x 10^4 m^3/año.

Se ha empleado ese valor para estimar el retroceso de la línea de costa en los perfiles de las playas de la Flecha del Rompido.

Figura – 21 Figura superior, línea de costa digitalizada de 1985. Parámetros utilizados para el cálculo del TL en la zona de la Flecha del Rompido

4.2.4- Resultados de $R_{Estuario}$

Los valores de $R_{Estuario}$ fueron calculados en 252 perfiles. La Figura 22 y Figura 23 presentan los resultados obtenidos para cada escenario.

En playas adyacentes a estuarios y donde la relación $A_e\ /I$ es pequeña el retroceso observado fue menor (p.ej. los estuarios de Barbate, Palmones y Guadarranque) comparado con aquellas adyacentes a estuarios con áreas grandes (p. ej. Guadiana, Tinto y Odiel y Guadalquivir).

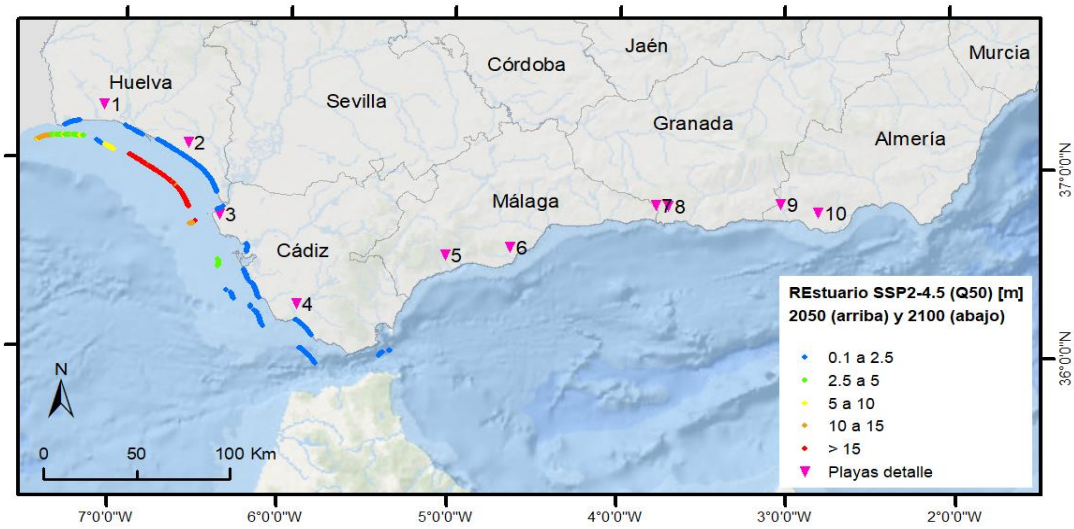


Figura 22 - Valores de $R_{Estuario}$ calculados para los escenarios E1 y E2. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en el ejemplo de la Tabla 3.

Observando los resultados se aprecia que la diferencia se ve amplificada en los horizontes de largo plazo (2100), llegando a valores superiores a los 15 metros de retroceso.

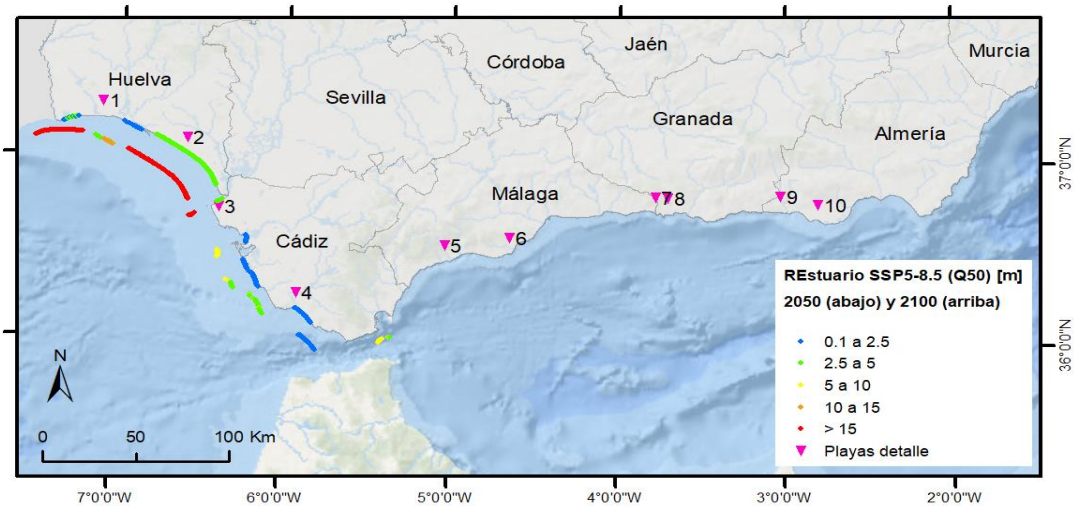


Figura 23 - Valores de $R_{Estuario}$ calculados para los escenarios E3 y E4. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas más adelante en la Tabla 4.

4.2.5- Retroceso o avance por factores no relacionados al ANMM ($R\ no\ ANMM$)

La última componente del cálculo trata de incluir todos aquellos procesos que afectan la evolución de la línea de costa, que no son el resultado de un aumento en el ANMM. Para eso se utilizaron las anteriormente citadas tasas de erosión provenientes de la base de datos de REDIAM.

Las tasas calculadas en base a líneas de costa de 2001 a 2013 fueron seleccionadas para esta aplicación, ya que son las tasas más actuales y comprenden un período largo lo suficiente para captar variaciones de largo plazo en la línea de costa, pero lo suficientemente cortas para no incluir el efecto del aumento del NMM en el pasado.

Aquí, se asume que dichas tasas de erosión representan todos los procesos no relacionados con el aumento del NMM y que se mantendrán constantes hasta los años horizonte seleccionados (2050 y 2100).

A partir de dichas tasas de erosión, el R_{noNMM} se calcula según la siguiente expresión:

$$\Delta V_e = TE * \Delta t_{horizonte} \qquad [10]$$

4.2.6- Resultados de (R no ANMM)

En este apartado se presentan los resultados R_{noNMM} a lo largo de la costa andaluza en 2050 y 2100. Un análisis visual de los resultados nos permite identificar aquellas zonas críticas en las que hay un problema grave de erosión y que se va a ver agravado en el futuro de continuar con la dinámica actual.

Ejemplos de zonas con esta problemática son las playas de Matalascañas en Huelva, la punta de Los Toruños en Cádiz y la playa de Levante de Almerimar en Almería. Todos estos sitios han sido reportados como zonas problemáticas de erosión en estudios anteriores, y en este estudio también se han identificado como puntos críticos de erosión (CEDEX, 2013; Gomes da Silva et al., 2022; MITECO, 2019).

A continuación, (véase la Figura 24, página siguiente) se presentan los resultados con la misma estructura que los resultados anteriores utilizando una paleta de colores que permite identificar rápidamente las zonas críticas en cuanto a tasa de erosión.

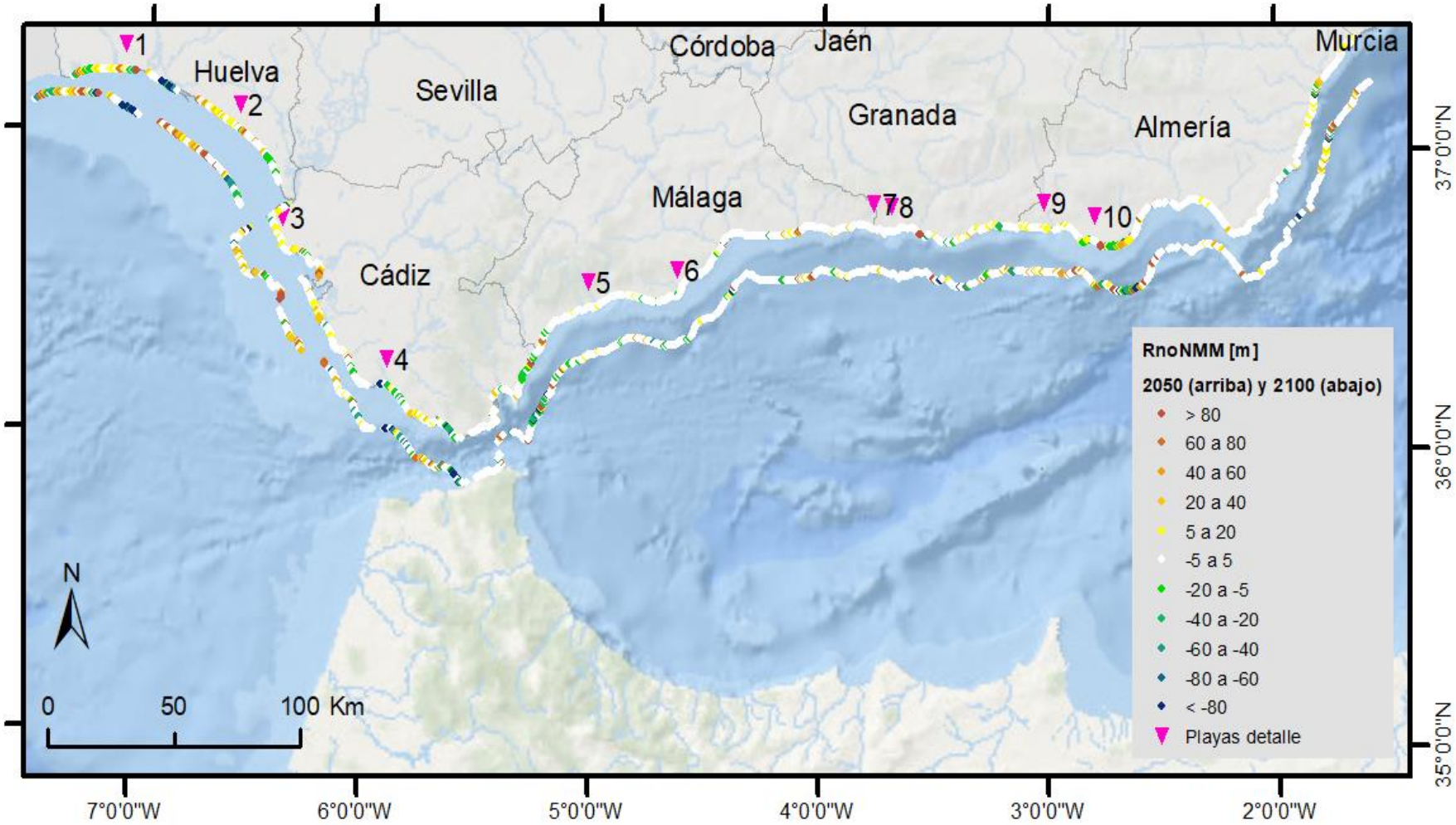


Figura 24 - R_noANMM estimado para los años horizontes de 2050 y 2100. Valores calculados con base en las tasa de erosión en cada perfil. Valores negativos indican avance de la línea de costa hacia mar. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas más adelante en la Tabla 3 y la Tabla 4.

4.3- RETROCESO TOTAL DE LA LÍNEA DE COSTA EMPLEANDO LA REGLA DE BRUUN Y MODELOS ADAPTADOS (R total)

Una vez calculados los retrocesos de la línea de costa debidos a los diferentes procesos, es posible determinar el retroceso total, R_{total}, como la suma de los diferentes retrocesos (véase metodología en el apartado 3.2).

En las Figuras 25 y 26 presentadas a continuación, se muestran los valores de retroceso total obtenidos para los escenarios E1 y E2 en la Figura 25 y en la Figura 26, los escenarios E4 y E5. Las tablas 3 y 4 presentan los valores de R_{total} calculados para los 4 escenarios considerados en el presente informe a lo largo de diez perfiles de playa característicos de la zona de estudio. Los valores de retroceso oscilan desde unos pocos metros (p. ej. puntos blancos en de la costa Málaga, Granada y Almería) a valores mayores que 100 m (p. ej. puntos rojos en la costa de Huelva, Cádiz y Almería).

Como ejemplo de los valores obtenidos en el cálculo de R_{total}, la Figura 27 presenta dichos valores y sus respectivas bandas de confianza (Q5, Q50, Q95) en 10 perfiles de playa de la costa de Andalucía (perfiles indicados con las flechas rosadas en los mapas anteriores).

Estos perfiles presentan características diferentes con relación al tipo de trasdós, a la presencia/ausencia de lajas e incluyen playas expuestas y encajadas. Se observa un incremento importante en el retroceso total de la línea de costa en el horizonte de largo plazo con valores superiores a 100 metros en el peor escenario (p. ej. Nueva Umbría - 2100 SSP5-8.5). Los percentiles Q5 y Q95 llegan a superar valores de ± 2x el valor calculado con Q50.

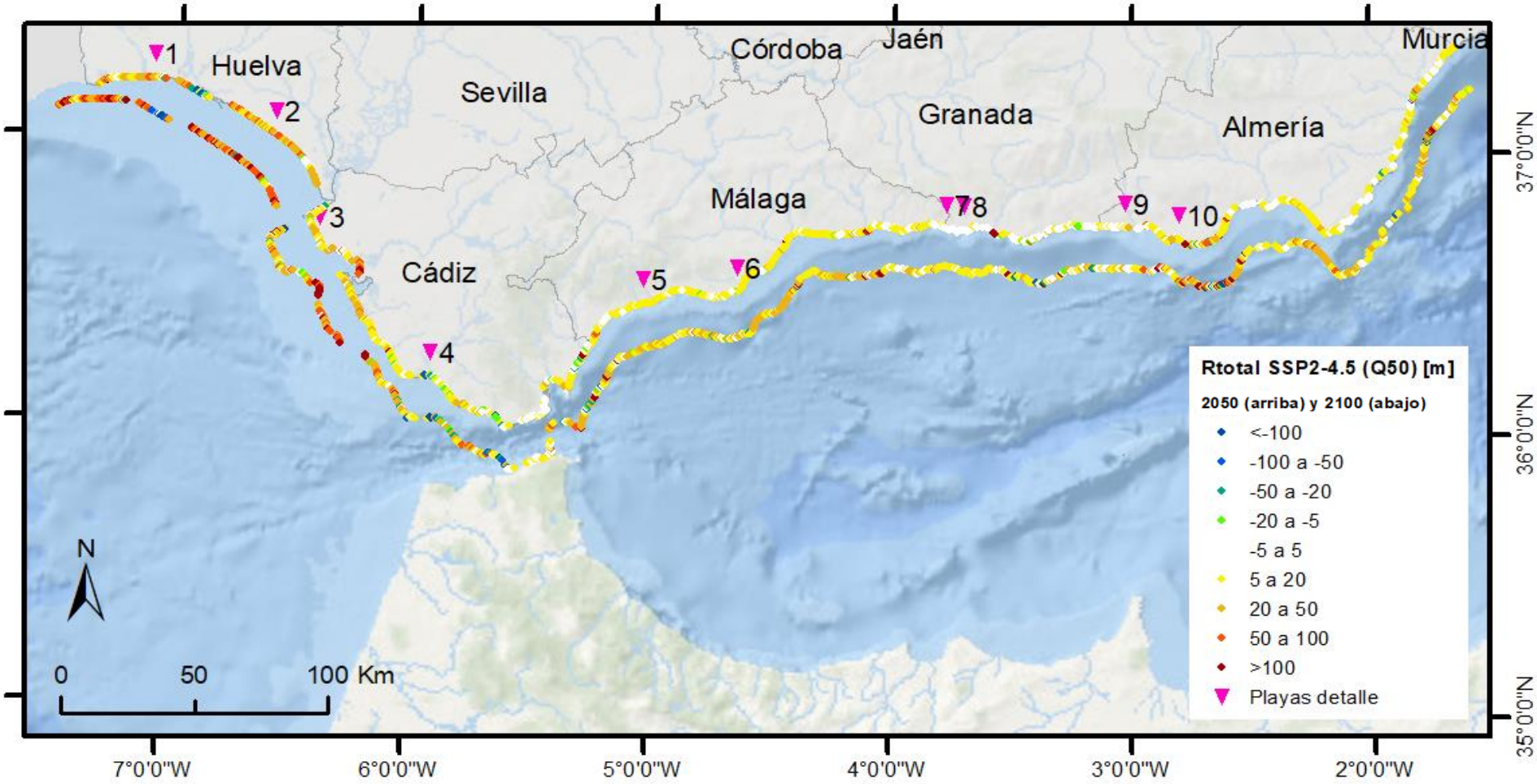


Figura 25 - Valores de R total calculados para los escenarios E1 y E2. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla 3.

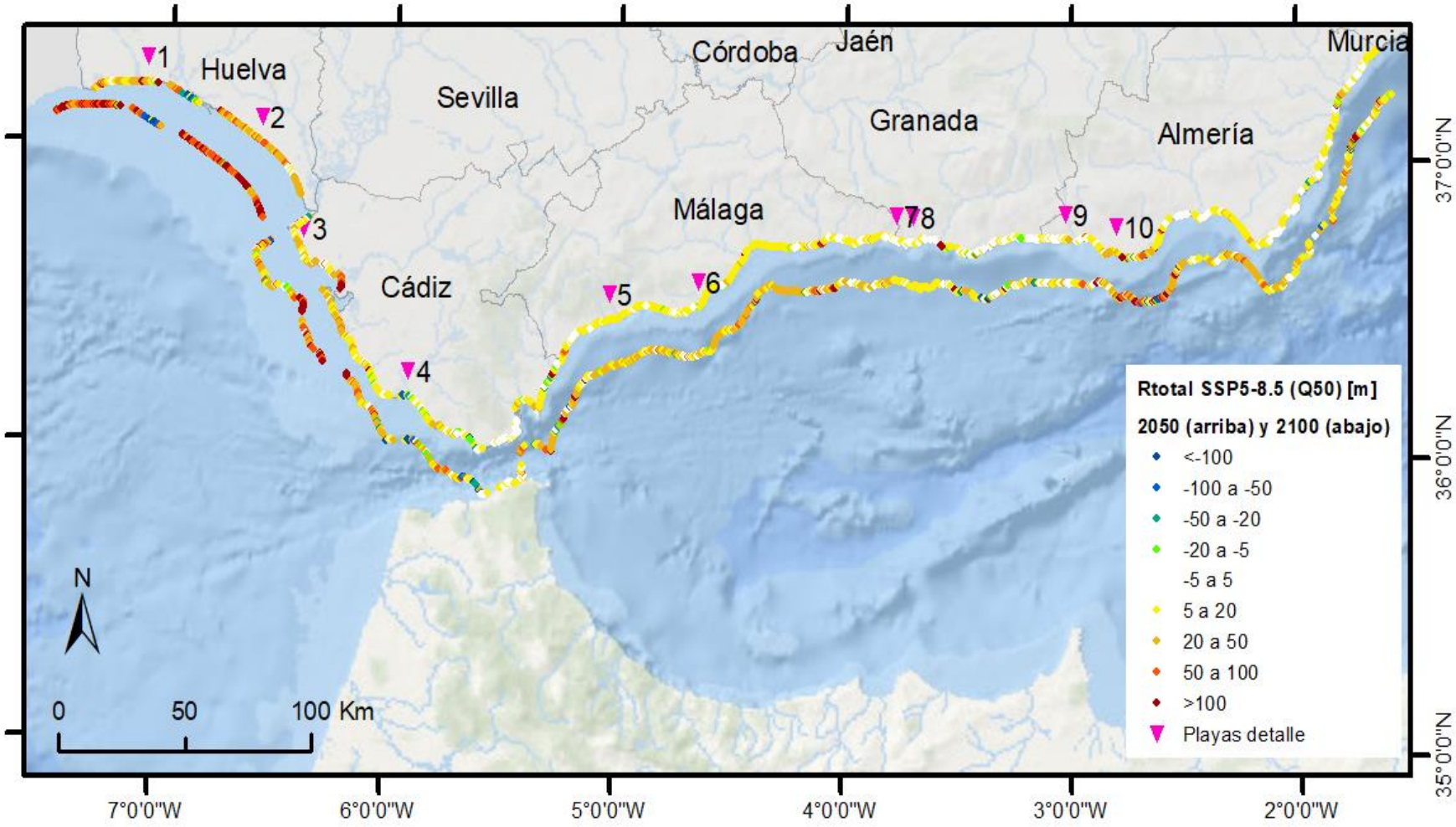


Figura 26 - Valores de R total calculados para los escenarios E3 y E4. Las flechas fucsia indican la ubicación de las playas detalladas en la Tabla 4.

R. Total [m]	2050 SSP2 4.5			2050 SSP5 8.5			2100 SSP2 4.5			2100 SSP5 8.5		
	Q5	Q50	Q95	Q5	Q50	Q95	Q5	Q50	Q95	Q5	Q50	Q95
1. Nueva Umbría (HU p.54)	7.48	29.95	55.87	11.28	33.69	59.71	36.4	78.93	144	62.51	107.9	164.4
2. Matalascañas (HU p.154)	-1.61	23.61	55.39	2.57	27.87	58.28	16.45	55.71	98.33	44.45	74.44	125.9
3. Aguadulce (CA p.268)	0.97	2.24	3.68	1.18	2.45	3.88	2.69	4.98	7.31	4.1	6.17	8.07
4. El Carmen (CA p.420)	5.46	13.95	24.41	6.89	15.29	25.99	16.68	34.27	45.71	27.47	45.02	46.52
5. El Saladillo (MA p.618)	6.96	13.73	22.22	8.21	14.89	23.48	21.36	35.87	48.61	30.08	45.13	48.61
6. El Charcón (MA p.693)	-8.78	-6.65	-4.64	-8.42	-6.34	-4.39	-23.02	-20.01	-19.55	-21.08	-19.3	-19.55
7. Cantarriján (GR p.866)	0	3.58	8.03	1.59	4.22	7.41	0	8.84	20.16	6.95	12.63	20.85
8. San Cristóbal (GR p.880)	0	4.05	9.15	1.79	4.78	8.42	0	10.08	23.46	7.89	14.48	24.31
9. Poniente (AL p.985)	10.18	13.52	17.53	10.69	14.05	18.13	28.04	35.17	44.66	31.92	39.27	49.87
10. Poniente Almerimar (AL p.1026)	3.22	10.51	19.26	4.35	11.66	20.55	10.54	26.09	46.86	18.99	35.06	58.96

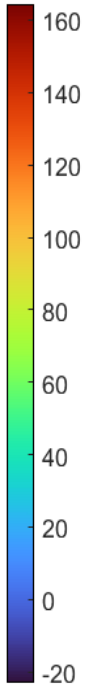


Figura 27 - Ejemplo de valores de R_total (Q50) y las respectivas incertidumbres (Q5 y Q95) calculados en 10 playas de la costa andaluza.

Capítulo 5 - Discusión

5. DISCUSIÓN

Con el objetivo de identificar qué parte del retroceso total se debe a cada uno de los procesos considerados en nuestros análisis, se presenta en la Tabla 3 y la Tabla 4 un desglose de los retrocesos obtenidos en estos 10 perfiles tipo, en cada escenario evaluado (E1,E2,E3 y E4).

Estos resultados de detalle nos permiten sacar algunas conclusiones:

- La cantidad del retroceso total explicada por la Regla de Bruun (porcentajes entre paréntesis) varía de playa a playa, aunque en la mayoría de los perfiles R_{Bruun} representó más del 50% del retroceso total. Eso se observó en más de 900 perfiles en todos los escenarios analizados.

- En las playas afectadas por estuarios y que a la vez se ven afectada por un transporte litoral importante, $R_{Estuario}$ puede presentar valores negativos, especialmente para los escenarios de corto plazo (2050 - E1 y E3). El retroceso negativo representa un avance de la línea de costa, e indica que el transporte litoral que aporta sedimento a estas playas supera la demanda de sedimento para rellenar el estuario.

- La playa de Aguadulce solo está afectada por los cambios para mantener el perfil de equilibrio. En esta playa de perfil corto y con presencia de laja rocosa, el retroceso por R_{Bruun} representa un 52% y R_{Berma} representa un 45% del retroceso total. Eso indica que el retroceso necesario para rellenar la berma puede ser tan relevante cuanto el retroceso calculado con la Regla de Bruun en perfiles con estas características.
- Hay perfiles en que se observa un avance de la línea de costa en todos los horizontes. Este es el caso de la playa del Charcón, en Málaga. En esta playa, los valores de R_{noANMM} son negativos (tasas de erosión indican avance de la línea de costa) y dominan los cambios en este perfil.
  Eso demuestra la importancia de tenerse en cuenta factores no derivados del aumento del NMM (no relacionados con el cambio climático) a la hora de definir los cambios en el futuro.

- Los valores de Q5 y Q95 indican variaciones en la posición de la línea de costa de hasta ± 2 veces el valor calculado con la mediana (Q50) debido a incertidumbres en los valores de aumento del NMM en las proyecciones de los

modelos climáticos. Dichas incertidumbres son relevantes y deben ser consideradas en el cálculo del retroceso de la línea de costa en todos los horizontes futuros.

*Tabla 3 - Valores de R_{tt}, sus componentes y respectivos rangos de incertidumbres en 10 playas de la costa Andaluza. Valores calculados con base en el aumento del NMM del escenario SSP2-4.5. Valores con * indican que el rango de retroceso considerando las incertidumbres alcanza todo el ancho de playa. El porcentaje presentado entre paréntesis en R_{Bruun} indica qué parte de R_{tt} es explicada por la regla de Bruun.*

Playa	L (m)	2050 (E1)					2100 (E2)				
		R_{Bruun} (m) [Q5 – Q95]	R_{Perfil} (m) [Q5 – Q95]	$R_{Estuario}$ (m) [Q5 – Q95]	R_{noNMM} (m)	R_{total} (m) [Q5 – Q95]	R_{Bruun} (m) [Q5 – Q95]	R_{Perfil} (m) [Q5 – Q95]	$R_{Estuario}$ (m) [Q5 – Q95]	R_{noNMM} (m)	R_{total} (m) [Q5 – Q95]
1. Nueva Umbría (HU)	27.4	**22.3 (74%)** [9.0 – 36.5]	**22.4** [9.2 – 36.5]	**-1.8** [-11.3–10.3]	**9.3**	**29.9*** [7.2 – 56.1]	**49.7 (45%)** [27.4 –83.6]	**49.7** [27.4 – 83.6]	**35.6** [-15.8 – 35.6]	**24.8**	**110.1*** [36.4 –144.0]
2. Matalascañas (HU)	37.6	**21.1 (89%)** [8.5 – 37.1]	**21.4** [8.8 – 37.1]	**1.3** [-11.3–17.3]	**0.9**	**23.6** [-1.6 – 55.3]	**37.6 (67%)** [25.9 – 37.6]	**37.6** [26.2 -37.6]	**15.7** [-12.1 – 58.3]	**2.4**	**55.7*** [16.5 – 98.3]
3. Aguadulce (CA)	8.3	**1.2 (55%)** [0.5 – 2.1]	**2.2** [1.0 – 3.7]	-	**0.0**	**2.2** [1.0 – 3.7]	**3.0 (60%)** [1.4 – 5.3]	**5.0** [2.7 – 7.3]	-	**0**	**5.0** [2.7 – 7.3]
4. El Carmen (CA)	44.0	**13.1 (94%)** [5.4 – 22.9]	**13.9** [5.8 – 23.9]	**0.03** [-0.3 – 0.5]	**0.0**	**13.9** [5.5 – 24.4]	**33.1 (97%)** [16.1 – 44.0]	**33.8** [17.1 – 44.0]	**0.4** [-0.4 –1.7]	**0**	**34.2** [16.7 – 45.7]
5. El Saladillo (MA)	36.6	**8.7 (64%)** [2.3 – 16.9]	**9.2** [2.5 – 17.7]	-	**4.5**	**13.7** [7.0– 22.2]	**23.2 (65%)** [8.8 – 36.6]	**23.9** [9.4 – 36.6]	-	**12**	**35.9** [21.4 – 48.6]
6. El Charcón (MA)	6.9	**1.5 (-23%)** [0.5 – 2.8]	**3.3** [1.1 – 5.3]	-	**-9.9**	**-6.6** [-8.8 – -4.6]	**3.9 (-20%)** [1.6 – 6.9]	**6.4** [3.4 – 6.9]	-	**-26.4**	**-20.0** [-23.0 – -19.5]
7. Cantarriján (GR)	23.1	**3.0 (83%)** [0 – 7.05]	**3.6** [0 – 8.0]	-	**0**	**3.6** [0 – 8.0]	**7.8 (87%)** [0 – 19.6]	**8.8** [0 – 20.2]	-	**0**	**8.8** [0 – 20.2]
8. San Cristóbal (GR)	53.5	**2.7 (68%)** [0 – 6.2]	**4.0** [0 – 9.1]	-	**0**	**4.0** [0 – 9.1]	**6.9 (68%)** [0 – 17.2]	**10.1** [0 – 23.5]	-	**0**	**10.1** [0 – 23.5]
9. Poniente (AL)	40.6	**3.7 (27%)** [1.1 – 7.0]	**4.8** [1.5 – 8.8]	-	**8.7**	**13.5** [10.2 – 17.5]	**9.6 (27%)** [3.8 – 18.2]	**12.0** [4.8 – 21.5]	-	**23.2**	**35.2** [28.0 – 44.7]
10. Poniente Almerimar (AL)	51.6	**9.5 (90%)** [2.9 – 17.7]	**10.5** [3.2 – 19.3]	-	**0**	**10.5** [3.2 – 19.3]	**24.4 (93%)** [9.5 – 46.2]	**26.1** [10.5 – 46.9]	-	**0**	**26.1** [10.5 – 46.9]

*Tabla 4 - Valores de R_{tt}, sus componentes y respectivos rangos de incertidumbres en 10 playas de la costa Andaluza. Valores calculados con base en el aumento del NMM del escenario SSP5-8.5. Valores con * indican que el rango de retroceso considerando las incertidumbres alcanza todo el ancho de playa.*

Playa	L (m)	2050 (E3)					2100 (E4)				
		R_{Bruun} (m) [Q5 – Q95]	R_{Perfil} (m) [Q5 – Q95]	$R_{Estuario}$ (m) [Q5 – Q95]	R_{noNMM} (m)	R_{total} (m) [Q5 – Q95]	R_{Bruun} (m) [Q5 – Q95]	R_{Perfil} (m) [Q5 – Q95]	$R_{Estuario}$ (m) [Q5 – Q95]	R_{noNMM} (m)	R_{total} (m) [Q5 – Q95]
1. Nueva Umbría (HU)	27.4	**24.5 (69%)** [11.2 – 38.6]	**24.6** [11.4 – 38.6]	**-0.2** [-9.5 – 11.9]	**9.3**	**35.5*** [11.2 – 59.8]	**65.0 (60%)** [41.1 – 83.6]	**65.0** [41.1 – 83.6]	**18.2** [3.4 – 56.0]	**24.8**	**108.0*** [69.3 – 164.4]
2. Matalascañas (HU)	37.6	**23.2 (83%)** [10.6 – 37.6]	**23.5** [10.9 –37.6]	**3.4** [-9.2 – 19.8]	**0.9**	**27.8** [2.6 – 58.3]	**37.6 (51%)** [37.6 – 37.6]	**37.6** [37.6 – 37.6]	**34.4** [4.4 – 85.9]	**2.4**	**74.4*** [44.4 – 125.9]
3. Aguadulce (CA)	8.3	**1.3 (52%)** [0.6 – 2.2]	**2.5** [1.2 –3.9]	-	**0.0**	**2.5** [1.2 – 3.9]	**4.0 (65%)** [2.3 – 6.81]	**6.2** [4.1 – 8.1]	-	**0**	**6.2** [4.1 – 8.1]
4. El Carmen (CA)	44.0	**14.3 (94%)** [6.7 – 24.5]	**15.2** [7.2 – 25.4]	**0.1** [-0.3 – 0.6]	**0.0**	**15.3** [6.9 – 26.0]	**44.0 (98%)** [26.4 – 44.0]	**44.0** [27.3 – 44.0]	**1.0** [0.1 – 2.5]	**0**	**45.0*** [27.4 – 46.5]
5. El Saladillo (MA)	36.6	**9.8 (66%)** [3.4 – 18.2]	**10.4** [3.7 – 19.0]	-	**4.5**	**14.9** [8.2 – 23.5]	**32.8 (73%)** [17.3 – 36.6]	**33.1** [18.1 – 36.6]	-	**12.0**	**45.1*** [30.1 – 48.6]
6. El Charcón (MA)	6.9	**1.7 (-27%)** [0.6 – 3.0]	**3.6** [1.5 – 5.5]	-	**-9.9**	**-6.3** [-8.4 – -4.4]	**5.3 (-28%)** [2.8 – 6.9]	**7.1** [5.3 – 6.9]	-	**-26.4**	**-19.3** [-21.1 – -19.5]
7. Cantarriján (GR)	23.1	**3.6 (86%)** [1.3 – 6.5]	**4.2** [1.6 – 7.4]	-	**0**	**4.2** [1.6 – 7.4]	**11.5 (91%)** [6.1 – 20.4]	**12.6** [7.0 – 20.9]	-	**0**	**12.6** [7.0 – 20.9]
8. San Cristóbal (GR)	53.5	**3.2 (67%)** [1.2 – 5.7]	**4.8** [1.8 – 8.4]	-	**0**	**4.8** [1.8 – 8.4]	**10.1 (70%)** [5.3 – 17.9]	**14.5** [7.9 – 24.3]	-	**0**	**14.5** [7.9 – 24.3]
9. Poniente (AL)	40.6	**4.2 (30%)** [1.5 – 7.5]	**5.3** [2.0 – 9.4]	-	**8.7**	**14.0** [10.7 – 18.1]	**13.2 (34%)** [6.9 – 23.5]	**16.1** [8.7 – 26.7]	-	**23.2**	**39.3** [31.9 – 49.9]
10. Poniente Almerimar (AL)	51.6	**10.5 (90%)** [3.9 – 18.9]	**11.7** [4.3 – 20.6]	-	**0**	**11.7** [4.3 – 20.6]	**33.5 (95%)** [17.4 – 59.0]	**35.1** [19.0 – 59.0]	-	**0**	**35.1** [19.0 – 59.0]

Capítulo 6 - Conclusiones

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto y aplicado una metodología para el cálculo del retroceso de la línea de costa debido al ANMM y a otros factores en la costa de Andalucía. El cálculo se hizo aplicando la regla de Bruun y modelos adaptados para tener en cuenta factores y procesos no considerados en la citada regla.

Los siguientes factores y procesos fueron identificados como relevantes en la costa andaluza, y fueron incluidos en el cálculo del retroceso:

- Características de perfiles con laja;
- Efecto del tipo del trasdós en la evolución del perfil ;
- Efecto de la demanda de sedimentos para mantener el equilibrio de la forma de los estuarios tras la subida del NMM;
- Efecto de factores y procesos que no están relacionados con la subida del NMM.

De los resultados alcanzados se obtienen las siguientes conclusiones:

- La metodología empleada en este estudio se basa en trabajos anteriores desarrollados en playas del litoral Cantábrico. Se han adaptado los métodos para una aplicación a las playas expuestas y encajadas del litoral andaluz teniendo en cuenta características específicas de las playas de la zona y los datos disponibles. Aunque sencillo y basado en modelos empíricos de equilibrio, el método es útil para identificar puntos críticos y tener una primera estimación de los cambios en el futuro. Además, el método es novedoso y puede servir de base para estudios futuros en costas con características semejantes.

- Un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con la regla de Bruun y aquellos obtenidos de los modelos adaptados permitió comprobar que, en muchos casos, la regla de Bruun no es capaz de explicar la totalidad del retroceso en la línea de costa.

- Hay perfiles en que se observa un avance de la línea de costa en todos los horizontes. Valores negativos de cambios (avance de la línea de costa) indican que los procesos no relacionados con el cambio climático son importantes y pueden llegar a ser dominantes en algunos perfiles. Eso demuestra la importancia de tener en cuenta factores no climáticos a la hora de definir los cambios en el futuro.

- Un análisis inicial empleando los valores del percentil Q5 y Q95 de las proyecciones de ANMM permitió inferir la incertidumbre en el cálculo del retroceso de la línea de costa para cada uno de los escenarios seleccionados. Existen, sin embargo, otras fuentes de incertidumbre en el cálculo del retroceso de la línea de costa que deben ser exploradas.
- Los resultados obtenidos aquí sirven de base para futuros estudios, en los que se pretende explorar el uso de modelos alternativos a Bruun (p. ej. modelos basados en procesos) para obtener el retroceso de la línea de costa.

6.1 – Futuras líneas de investigación

En este apartado se pretenden resaltar aquellos puntos no explorados en este trabajo y que deben ser considerados en estudios futuros.

1. En este estudio se cuantificaron las incertidumbres relacionadas con el empleo de diferentes modelos climáticos (Q5 y Q95), sin embargo, existen otras fuentes de incertidumbres que todavía necesitan ser exploradas como: i) incertidumbre relacionada a cambios en la forma del perfil de equilibrio; ii) incertidumbres asociadas a la definición de los parámetros del perfil, iii) incertidumbre asociada a los valores de ANMM o a las mismas limitaciones de la formulación.
2. No se han explorado los cambios en la línea de costa por el ANMM en perfiles de desembocadura y estuarios. Dichos perfiles tienen características que no cumplen con las premisas de los perfiles de equilibrio empleados aquí, y el empleo de abordajes alternativos que permitan una estimación del retroceso en estos entornos debe ser explorado en el futuro.
3. La estimación de $R_{Estuario}$ se hizo sin considerar cambios en el área del estuario tras el ANMM. Para tener en cuenta dichas variaciones es necesario disponer de un modelo digital de terreno de detalle en las inmediaciones del estuario, dato que no se disponía para este estudio.
4. Se emplearon valores de tasas de crecimiento de la cota de los bajos de los estuarios obtenidas para otros estuarios de España. Idealmente, en el futuro, dichas tasas deben ser calculadas para los estuarios de Andalucía en base a datos de batimetría de detalle.
5. El objetivo de este trabajo fue el cálculo del retroceso de la línea de costa empleando la regla de Bruun y variantes de la misma. Sin embargo, dicho abordaje presenta una serie de limitaciones, como el hecho de no considerar variaciones en la forma

del perfil, o el efecto que la secuencia de temporales puede tener en los cambios en el largo plazo. En futuros estudios, se puede explorar la aplicación de abordajes alternativos a Bruun, como por ejemplo el empleo de modelos numéricos simplificados (p. ej. Enríquez et al, 2019 y Ribas et al, 2022) para el cálculo del retroceso por el aumento del NMM y por la acción del oleaje.

Capítulo 7 – Bibliografía

7. REFERENCIAS

Alonso, C., Gallardo, M., Martí, J., Gracia, F.J., Ghersi, F. y Alzaga, M., (1997): "La sismotectónica de época histórica y su influencia en la Bahía de Cádiz". En XXIV Congreso Nacional de Arqueología 4, pp. 651-660. Cartagena.

Atkinson, A.L., Baldock, T.E., Birrien, F., Callaghan, D.P., Nielsen, P., Beuzen, T., Turner, I.L.,Blenkinsopp, C.E., Ranasinghe, R., (2018). Laboratory investigation of the Bruun Rule and beach response to sea level rise. *Coastal Engineering*. 136:183–202. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.003

A.F. Shchepetkin, J.C. McWilliams / Ocean Modelling 9 (2005) 347–404 Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California at Los Angeles, 405 Hilgard Avenue, Los Angeles, CA 90024-1567, *United States, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002*

Benavente, J., Gracia, F.J., Martínez, J.A., Reyes, J.L., Anfuso, G. y Alonso, C., 2000: "Riesgos litorales en la Bahía de Cádiz". En J.R. DE ANDRÉS – F.J. Gracia: Geomorfología Litoral. Procesos activos. Monografías de la S.E.G. nº 7, I.T.G.E. y Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, pp. 219-225. Cádiz.

Beuzen, T., Turner, I.L., Blenkinsopp, C.E., Atkinson, A., Flocard, F., Baldock, T.E. (2018) Physical model study of beach profile evolution by sea level rise in the presence of seawalls. *Coast. Eng*. 136, 172–182. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.12.002

Birkemeier, W. A. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, *3*(111), 598–602.

Birkemeier, W.A., Nicholls, R.J., Lee, G., 1999. Storms, storm groups and nearshore morphologic change. In: *Proceedings of Coastal Sediments*. 99. pp. 1109–1112.

Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research* 104: doi: 10.1029/98JC02622. issn: 0148-0227.

Bruun, P. M. (1962). Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, *88*(1), 117–132.

Campos, M.L., (1992): El riesgo de tsunamis en España. Análisis y valoración geográfica. Monografías Instituto Geográfico Nacional, 9. Madrid.

CEDEX. (2013). *Estudio de la dinámica litoral, defensa y propuesta de mejora en las playas con problemas: Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir*. https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estra-sosten-guadiana-guadalquivir_final_vprensa_tcm30-163208.pdf

Cooper, J.A.G., Masselink, G., Coco, G., Short, A.D., Castelle, B., Rogers, K., Anthony, E., Green, A.N., Kelley, J.T., Pilkey, O.H., Jackson, D.W.T. (2020) Sandy beaches can survive sea‐level rise. *Nature Climate Change*, 10: 993‐

995 (2020). https://doi.org/10.1038/s41558 - 020 - 00934 - 2

Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 2001. *Coastal Processes with Engineering* Applications. Cambridge. www.cambridge.org/0521495350.

Dean, R.G., Houston, J.R. (2016). Determining shoreline response to sea level rise. *Coastal engineering*, 114:1–8. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.03.009

Egbert, G.D., Bennett, A.F. and Foreman, M.G.G. (1994). TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. Journal of Geophysical Research 99: doi: 10.1029/94JC01894. issn: 0148-0227.

Egbert, G.D., & Erofeeva, S.Y. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 183-204.

Fernández Tabales, A. (2003). Actividades y espacios turísticos. In A. López Ontiveros, Geografía de Andalucía (pp. 723-749). Barcelona: Ariel Geografía.

García de Pedraza, L. (1991). Características de los vientos en la zona del Estrecho de Gibraltar. Calendario meteorológico, 188-201.

Gomes da Silva, P., Martínez Sánchez, J., Beck, A.-L., Taji, A., & Medina, R. (2022). On the use of satellite information to detect coastal change: Demonstration case on the coast of Spain. *ESSOAr*, https://doi.org/10.1002/essoar.10511027.1.

Gracia, F.J., 2008: “Geomorfología y estratigrafía del Pleistoceno y Holoceno en la banda Atlántica de Cádiz”. En J. RAMOS (ed.): La ocupación prehistórica de la campiña litoral y banda atlántica de Cádiz. Arqueología Monografías, Junta de Andalucía, pp. 53-68.

IHCantabria - CAGPyDS. (2021). Informe E1: Caracterización de los perfiles en la costa andaluza. In *Estudio del Efecto Bruun en distintos tramos de la Costa Andaluza*.

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (B. R. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (ed.); p. 3673). Cambridge University Press.

López Ontiveros, A. (2003). El territorio andaluz. In A. López Ontiveros, Geografía de Andalucía (pp. 35-78). Barcelona: Ariel Geografía.

Martínez, P., (1974): “Perfil del Cádiz hispano-árabe”. Caja de Ahorros, Cádiz.

MITECO. (2019). *Estrategias para la protección costera en las provincias de Cádiz, Málaga y Almería considerando los efectos del cambio climático*. https://ihfiles.ihcantabria.com/index.php/s/kXe27jL4pY7gka7

Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V., Woodroffe, C.D., Hay, J. (2008). Climate change and coastal vulnerability assessment: scenarios for integrated assessment. *Sustainability Science* Sci 3: 89–102. https://doi.org/10.1007/s11625 - 008 - 0050 - 4

Nicholls, R.J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A.T., Meyssignac, B., Hanson, S.E., Merkens, J., Fang, J. (2021) A global analysis of subsidence, relative sea ‐ level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change.* 11:338–342. https://doi.org/10.1038/s41558 ‐ 021 ‐ 00993 ‐ z

Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Secretaría General de Medio Ambiente, Agua y Cambio Climático. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible

Rosati, J. D., Dean, R. G., & Walton, T. L. (2013). The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology*, *340*, 71–81. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.04.018

Toimil, A., Losada, I. J., Camus, P., & Díaz-Simal, P. (2017). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coastal Engineering*, *128* (November 2016), 106–122. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004

Toimil, A., Camus, P., Losada, I.J., Le Cozannet, G., Nicholls, R.J., Idier, D., Maspataud, A. (2020a) *Climate change* ‐ driven coastal erosión modelling in template Sandy beaches: Methods and uncertainty treatment. Earth ‐ Science Reviews. 202: 103110.

Toimil, A., Losada, I.J., Nicholls, R.J., Dalrymple, R.A., Marcelo, J.F.S. (2020b) Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: a review. *Coastal Engineering*, 156: 103611.

Tolman, H. L., 1991: A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. J. Phys. Oceanogr., 21 , 782–797.

Tsimplis, M. N.; Spada, G.; Marcos, Marta CSIC ORCID; Flemming, N. *Elsevier* Global and Planetary Change 76: 63- 76 (2011) http://hdl.handle.net/10261/58723

V. Alonso, F. Calafat, V. Simbor, Introducció, Caplletra. Revista Internacional de Filologia; Caplletra 22 (Primavera 1997); 9 URL https://www.scipedia.com/public/Alonso_et_al_1997a

Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, *10*(3), 260–263. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0

Yoshida, J., Udo, K., Takeda, Y., Mano, A., 2013. Potential impact of climate change at five Japanese beaches. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E., O'Hare, T.J. (Eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England). Journal of Coastal Research. 65. pp. 2185– 2190.

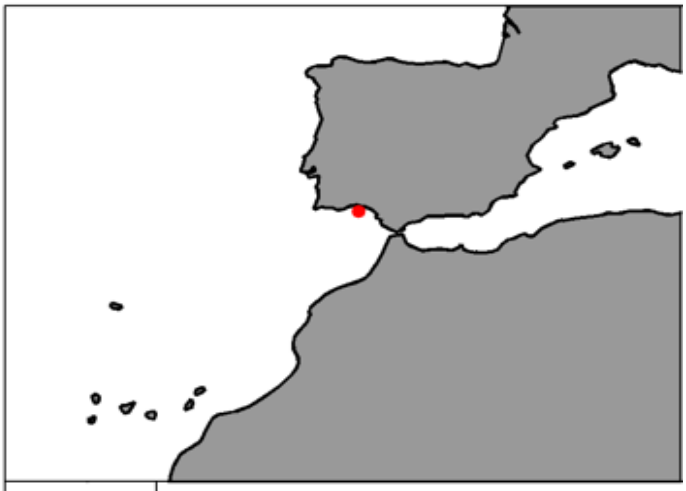
Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A. (2014) Coastal systems and low ‐ lying areas. In: Field, C.B. (Ed.), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, NY, USA, pp. 361–409.

Capítulo 8 – Anejo

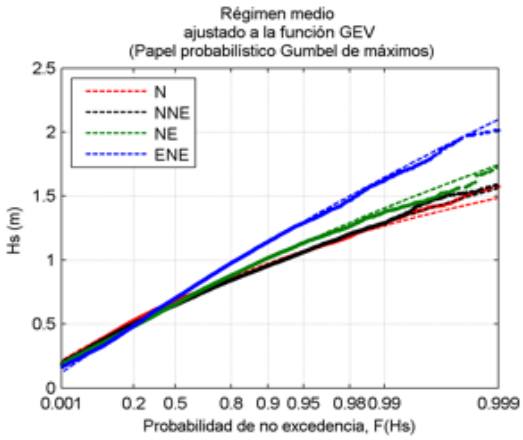
ANEJO I

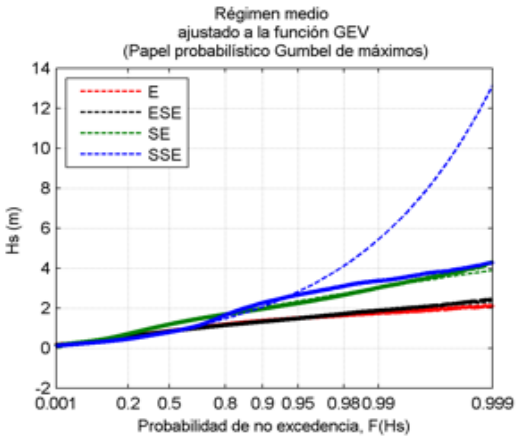
Clima Marítimo

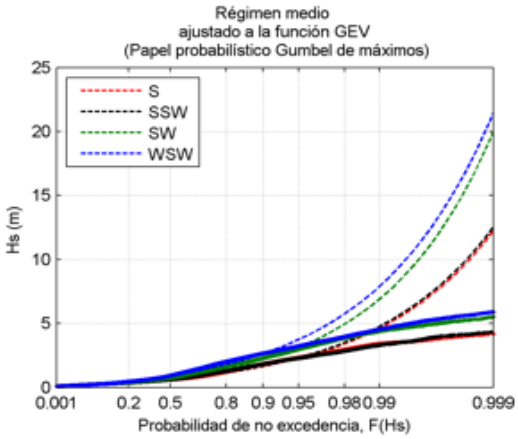
Punto 1-

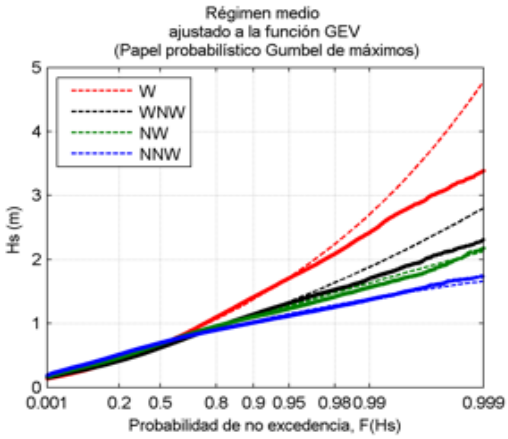


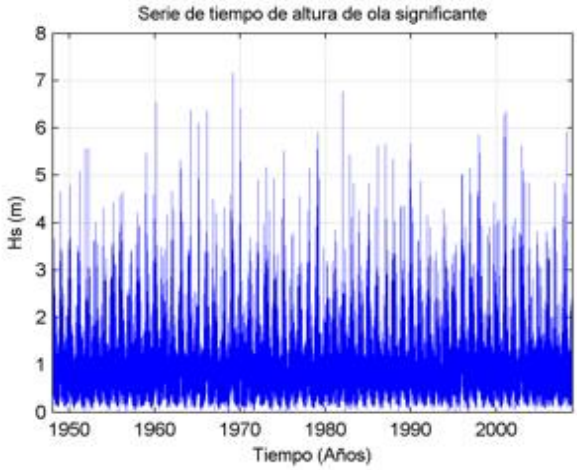
Oleaje DOW	Latitud: 36.9 ° Longitud: -7.2 °
Periodo	01/02/1948 : 31/12/2008

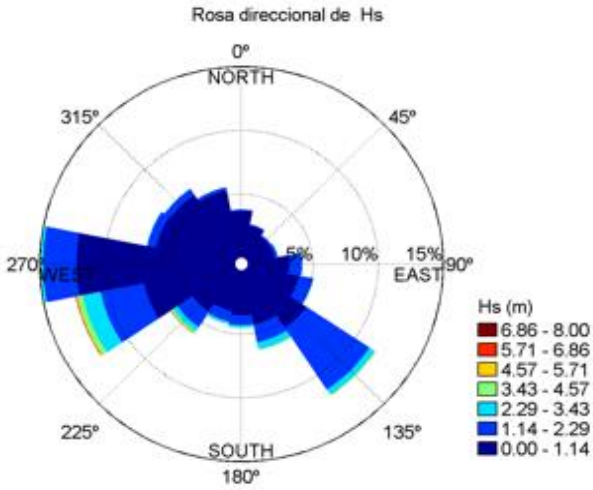


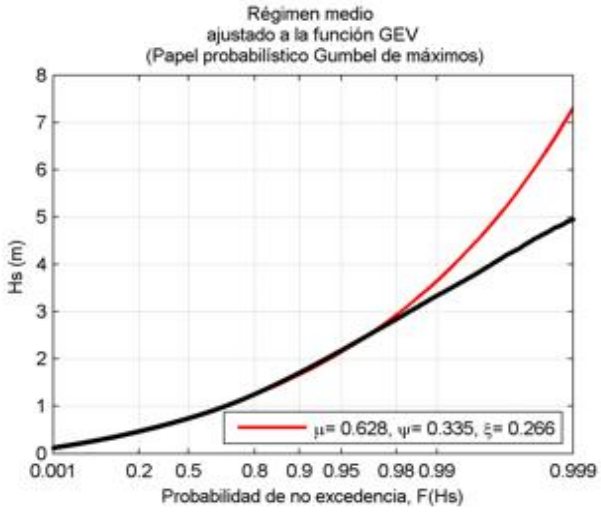






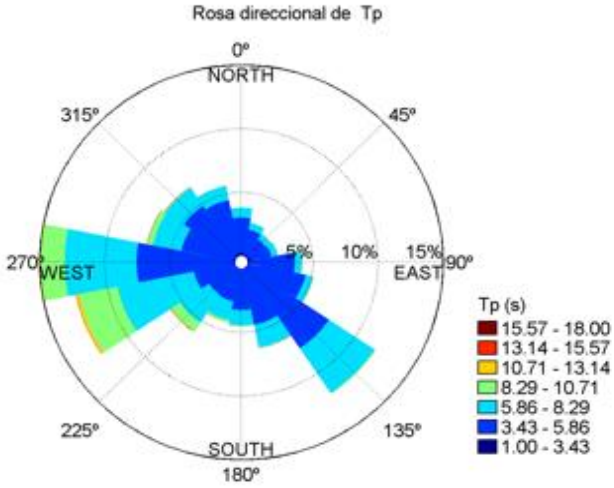




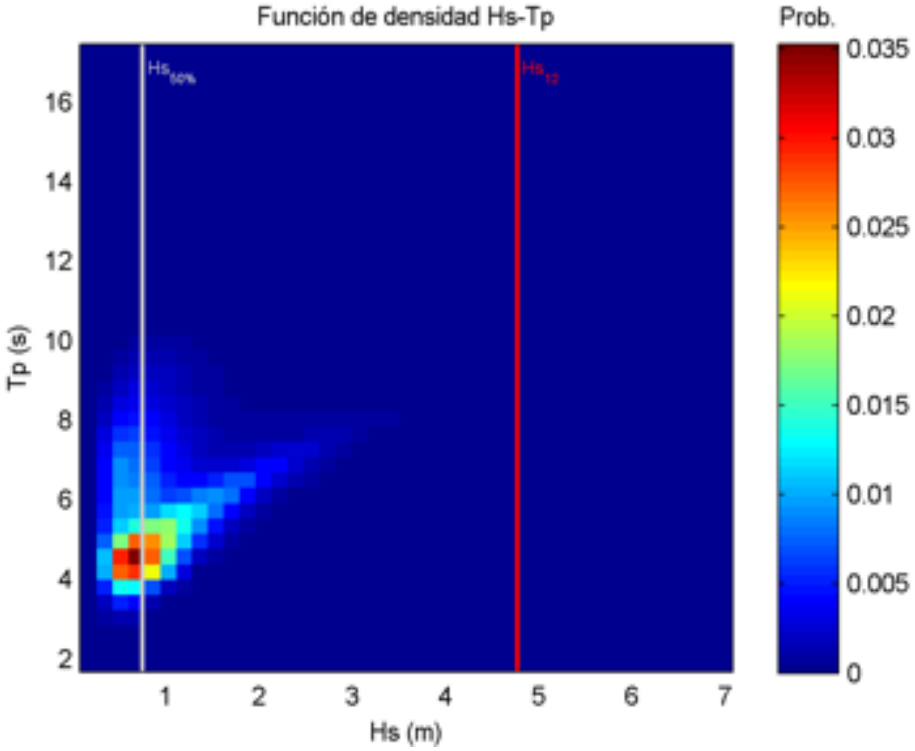


$$F(x;\mu,\psi,\xi) = \exp\left(-\left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\psi}\right)\right)^{-1/\xi}\right)$$

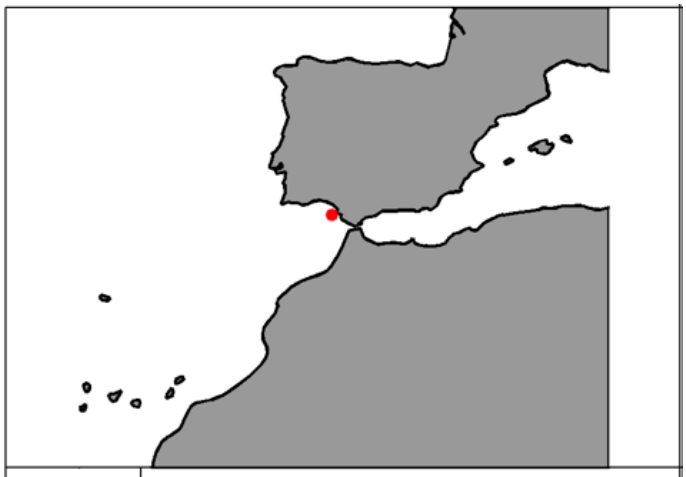
$$x(F;\mu,\psi,\xi) = \mu - \frac{\psi}{\xi}\left(1-(-ln(F))^{-\xi}\right)$$



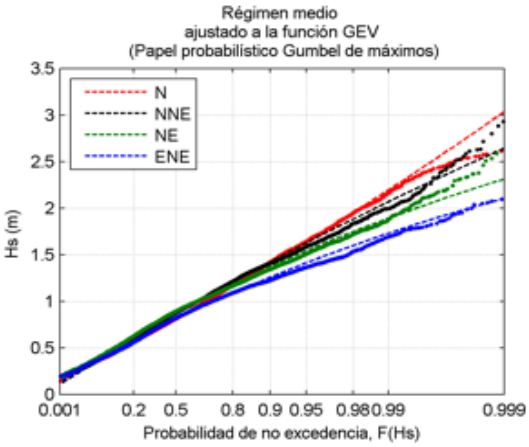
Tp (s) \ Hs (m)	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	Total (%)
1 - 4	10.23	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.52
4 - 7	48.34	20.15	2.20	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	70.71
7 - 10	9.79	4.10	2.63	1.10	0.18	0.02	0.00	0.00	17.81
10 - 13	0.12	0.39	0.11	0.11	0.13	0.06	0.01	0.00	0.95
13 - 16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Total (%)	68.48	24.93	4.96	1.23	0.31	0.08	0.01	0.00	-

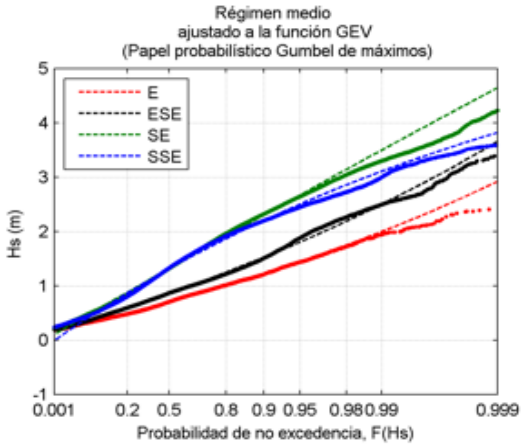

Función de densidad Hs-Tp
Prob.
Tp (s)
Hs (m)
16
14
12
10
8
6
4
2
1
2
3
4
5
6
7
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0

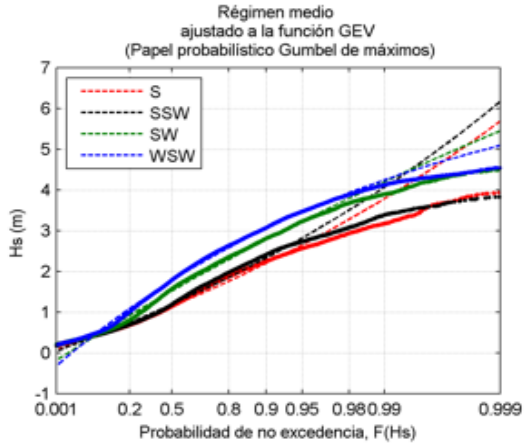
Punto 2-

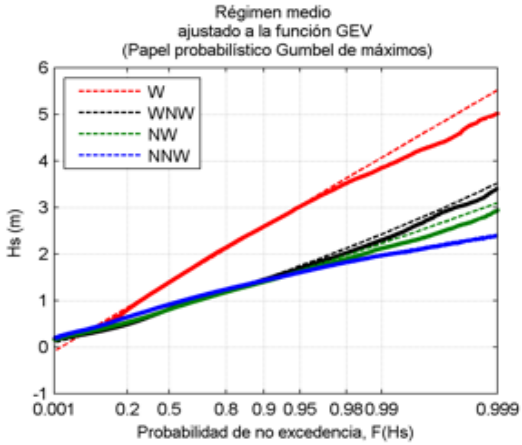


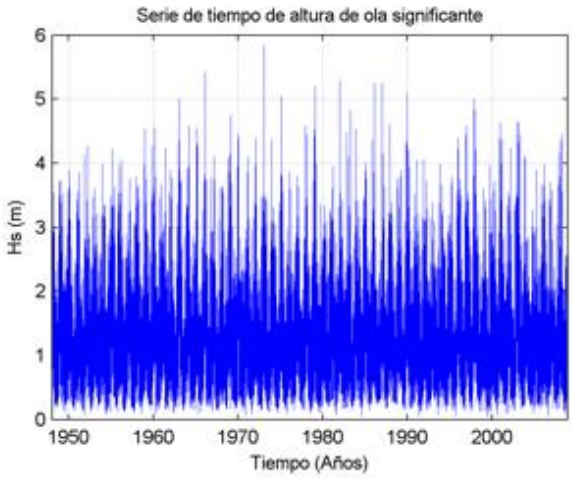
Oleaje DOW	Latitud: 36.5 º Longitud: -6.7 º
Periodo	01/02/1948 : 31/12/2008

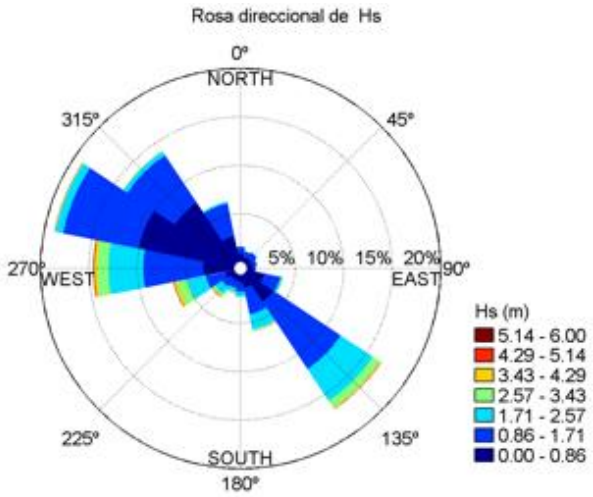


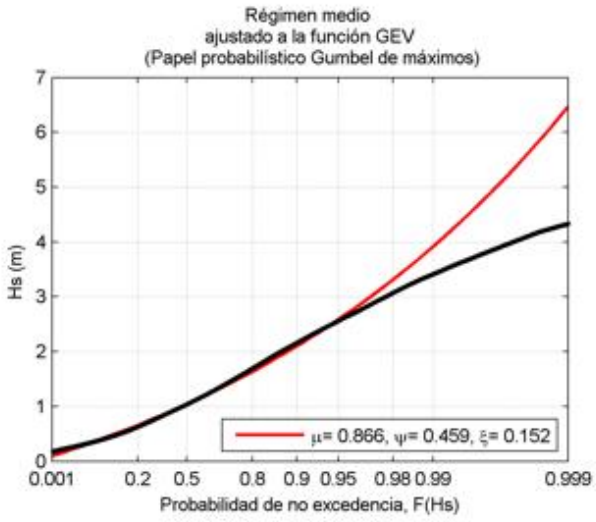






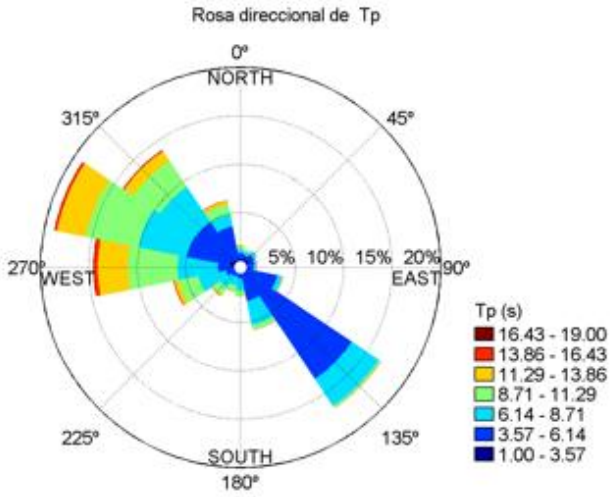




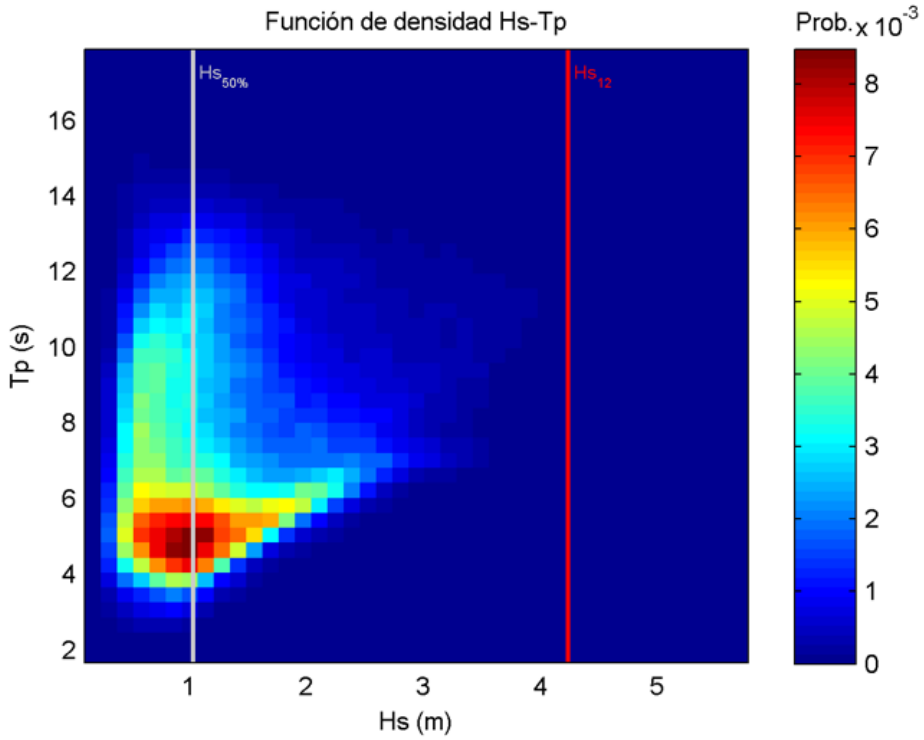


$$F(x;\mu,\psi,\xi) = \exp\left(-\left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\psi}\right)\right)^{-1/\xi}\right)$$

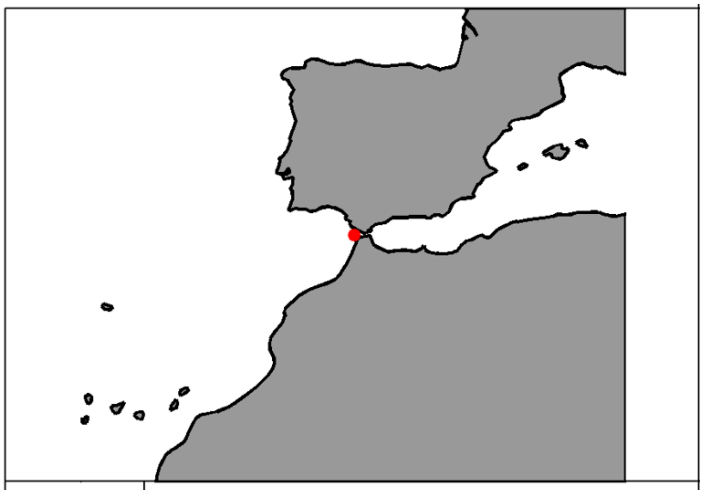
$$x(F;\mu,\psi,\xi) = \mu - \frac{\psi}{\xi}\left(1-(-ln(F))^{-\xi}\right)$$



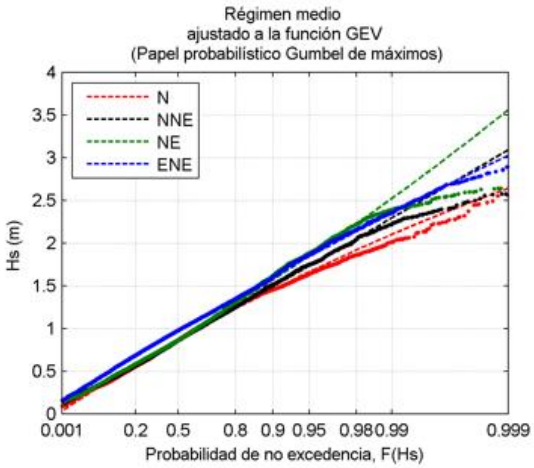
Tp (s) \ Hs (m)	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	Total (%)
1 - 4	4.20	1.09	0.01	0.00	0.00	0.00	5.29
4 - 7	22.07	20.48	4.11	0.20	0.02	0.00	46.88
7 - 10	13.18	10.48	4.48	0.88	0.02	0.00	29.05
10 - 13	6.72	7.00	1.82	0.79	0.13	0.00	16.47
13 - 16	0.82	0.91	0.28	0.15	0.07	0.01	2.24
16 - 19	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.07
Total (%)	47.01	39.99	10.72	2.03	0.24	0.02	-

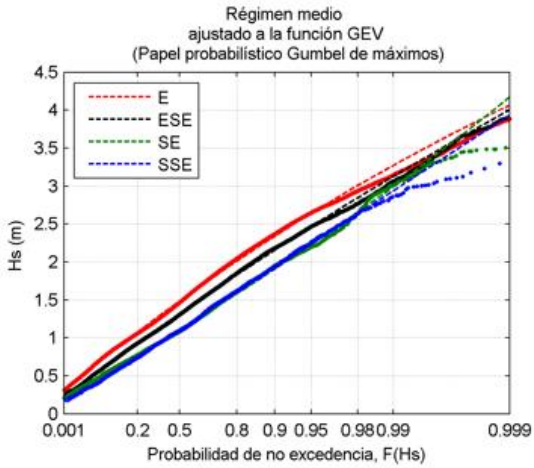

Función de densidad Hs-Tp
Prob. x 10^-3
Hs50%
Hs12
Tp (s)
Hs (m)
16
14
12
10
8
6
4
2
1
2
3
4
5
8
7
6
5
4
3
2
1
0

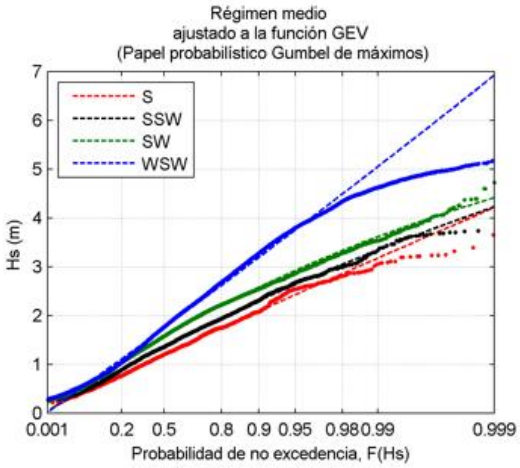
Punto 3-

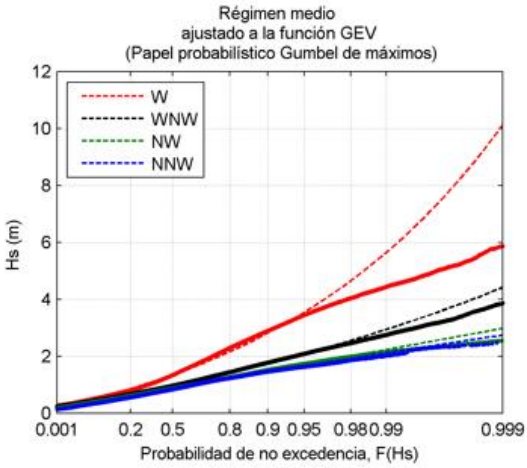


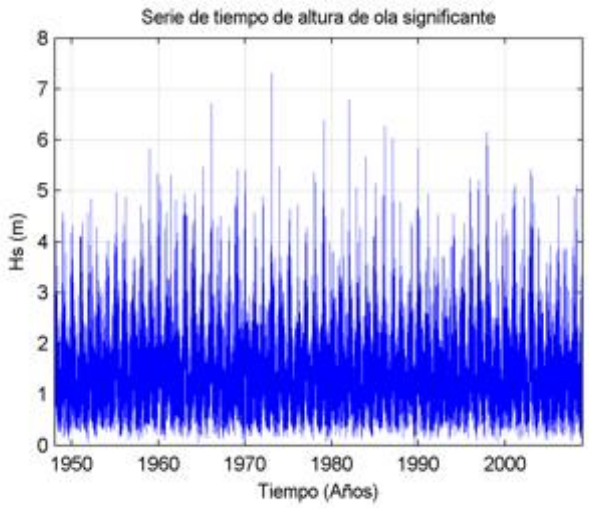
Oleaje DOW	Latitud: 36.0 º Longitud: -6.0 º
Periodo	01/02/1948 : 31/12/2008

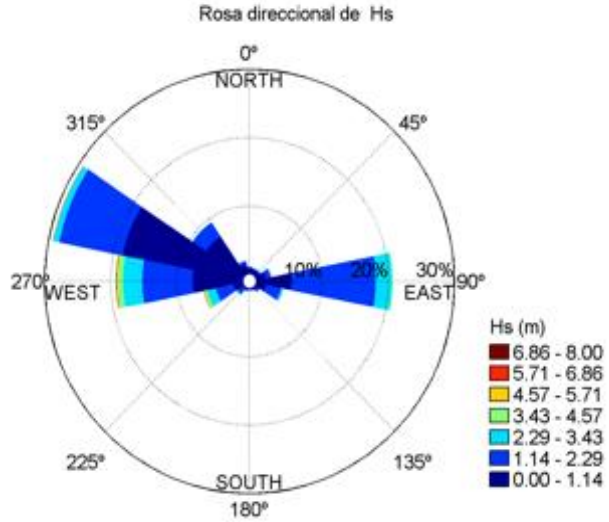


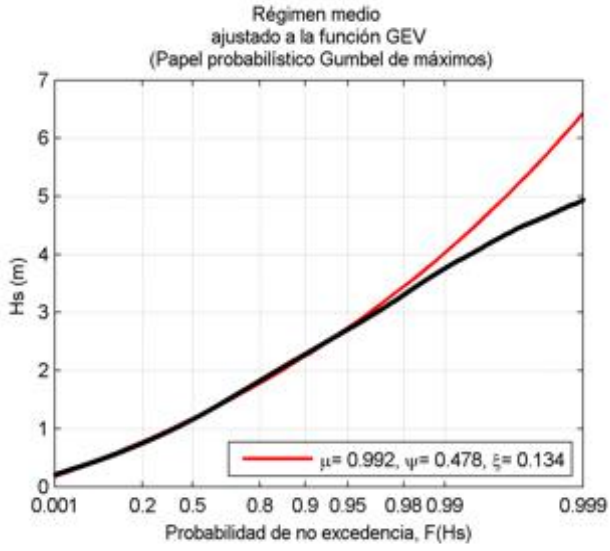






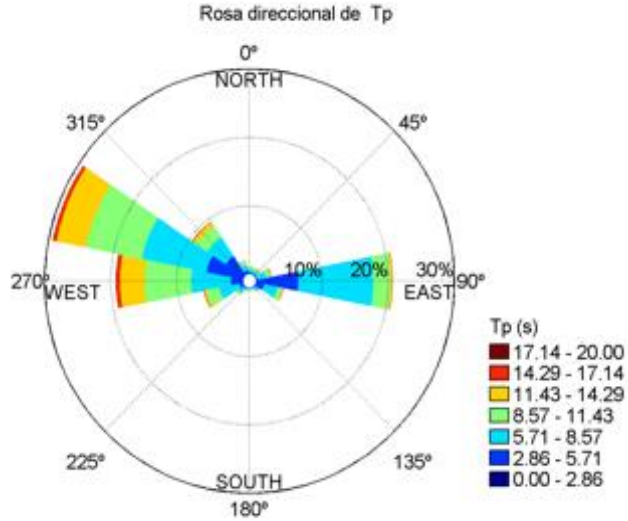




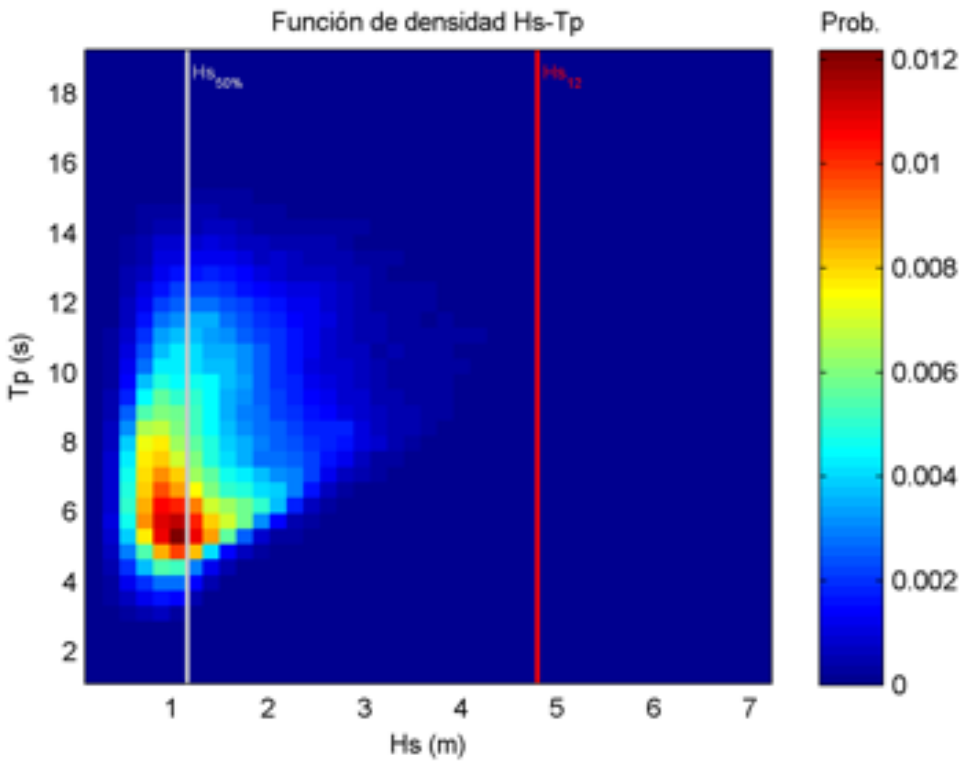


$$F(x;\mu,\psi,\xi) = \exp\left(-\left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\psi}\right)\right)^{-1/\xi}\right)$$

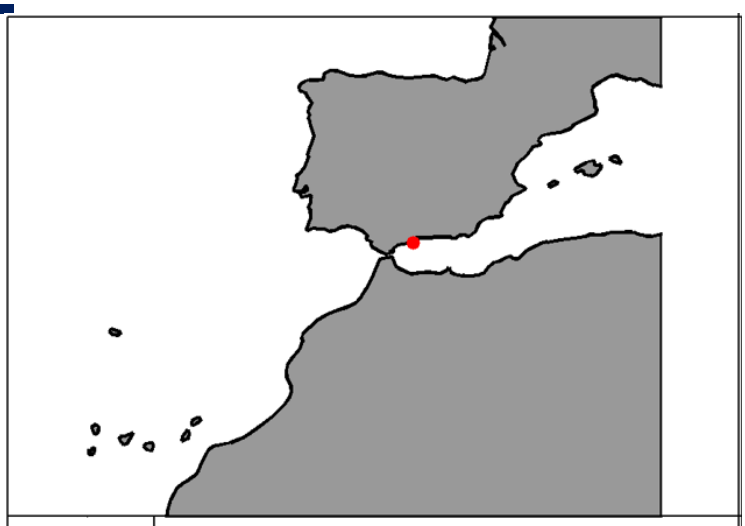
$$x(F;\mu,\psi,\xi) = \mu - \frac{\psi}{\xi}\left(1-(-ln(F))^{-\xi}\right)$$



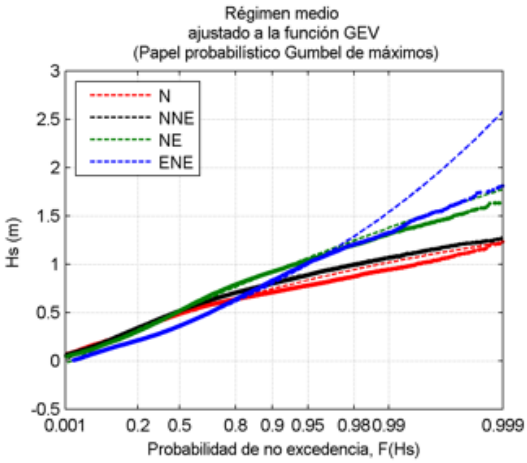
Tp (s) \ Hs (m)	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	Total (%)
0 - 4	1.59	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.01
4 - 8	24.08	24.68	4.61	0.36	0.01	0.00	0.00	0.00	53.74
8 - 12	11.01	17.20	6.22	1.56	0.36	0.02	0.00	0.00	36.38
12 - 16	1.58	3.65	1.65	0.55	0.21	0.05	0.01	0.00	7.70
16 - 20	0.03	0.05	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.17
Total (%)	38.30	46.00	12.53	2.49	0.59	0.07	0.02	0.00	-

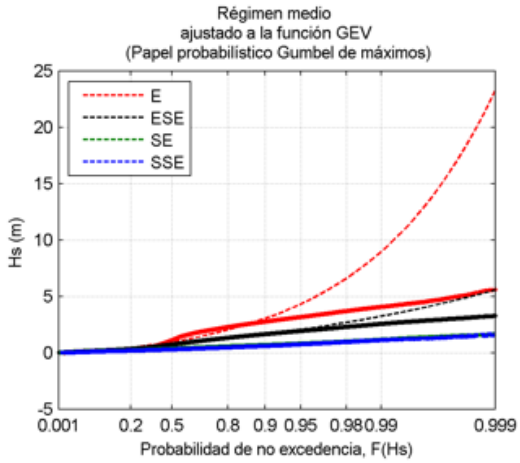

Función de densidad Hs-Tp
Prob.
Tp (s)
Hs (m)
18
16
14
12
10
8
6
4
2
1
2
3
4
5
6
7
0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0

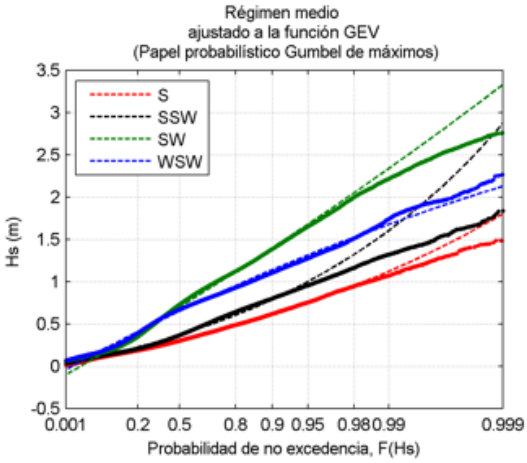
Punto 4-

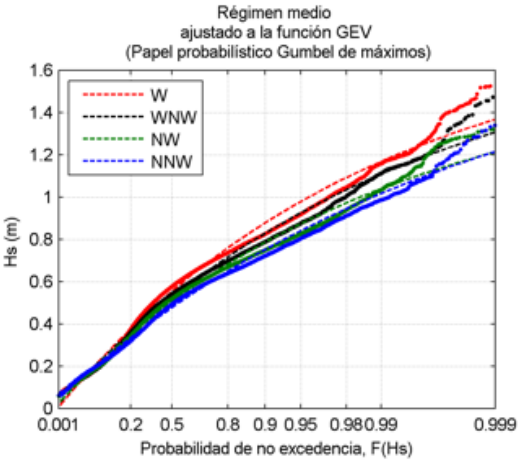


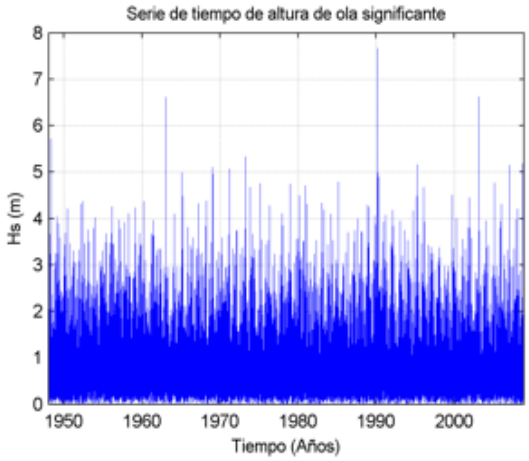
Oleaje DOW	Latitud: 36.5 º Longitud: -4.5 º
Periodo	01/02/1948 : 31/12/2008

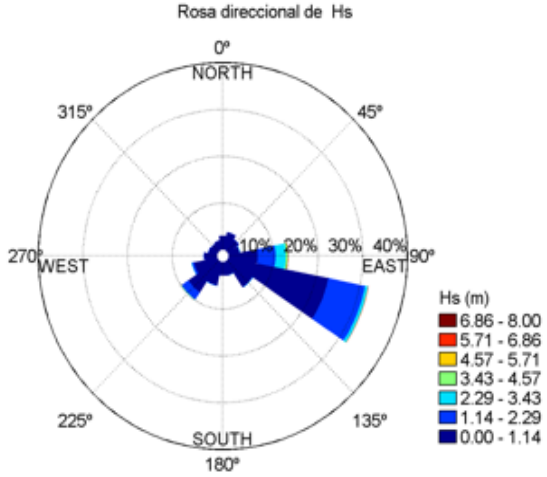


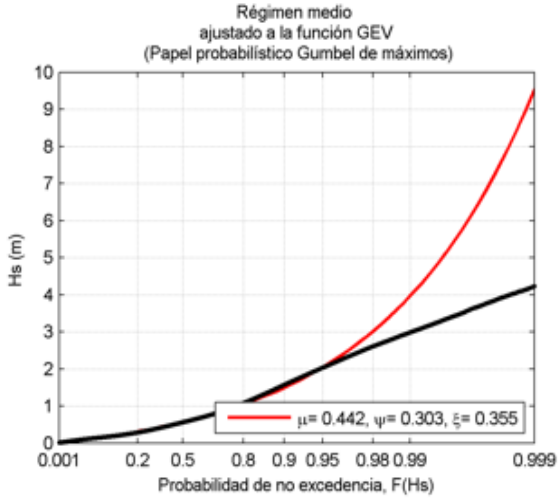






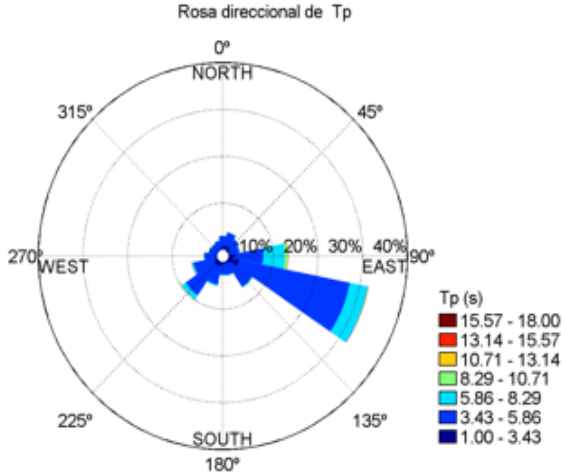




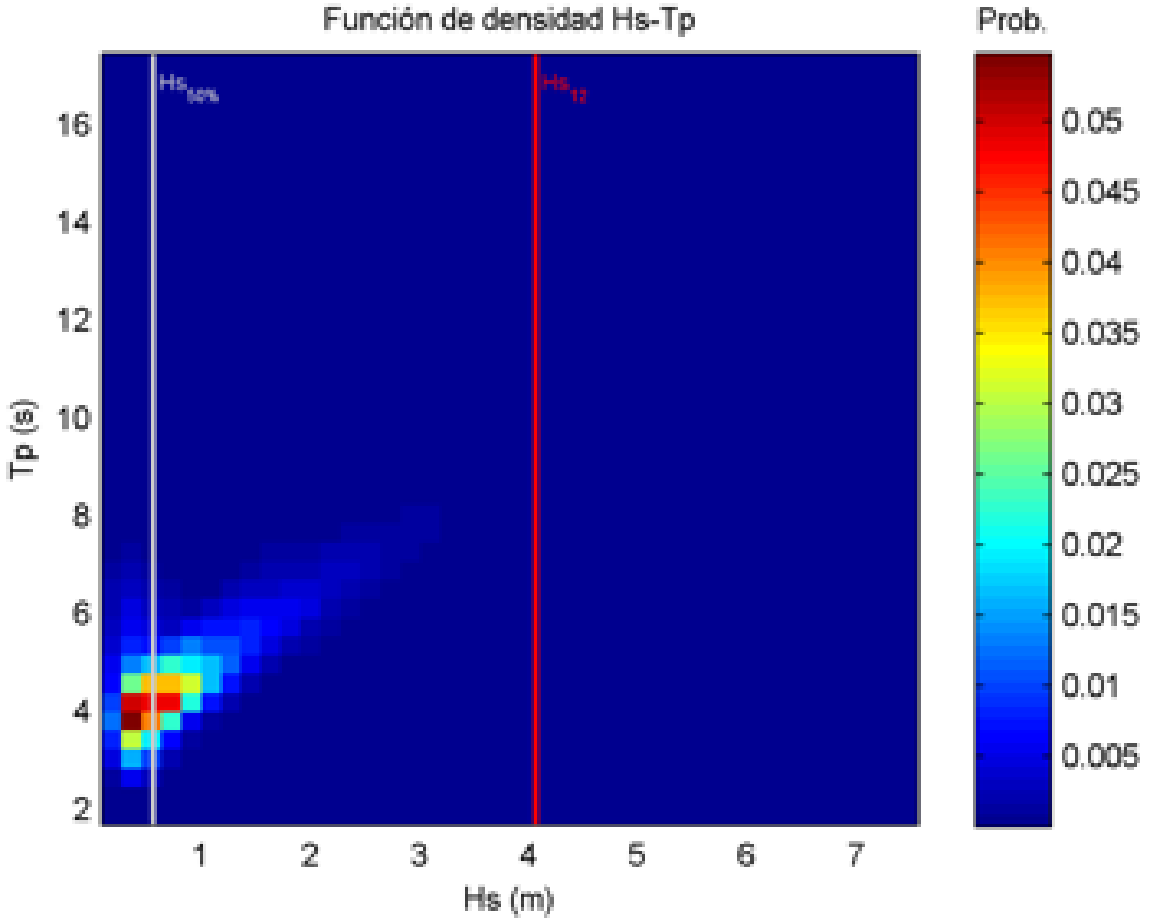


$$F(x;\mu,\psi,\xi) = \exp\left(-\left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\psi}\right)\right)^{-1/\xi}\right)$$

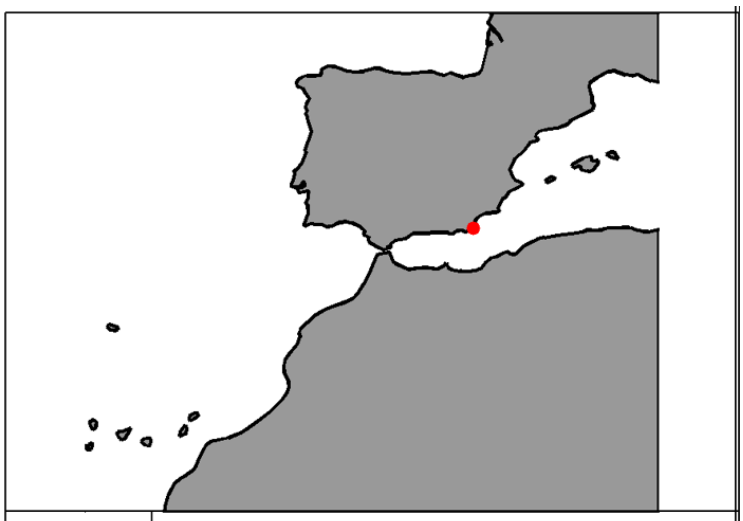
$$x(F;\mu,\psi,\xi) = \mu - \frac{\psi}{\xi}\left(1-(-ln(F))^{-\xi}\right)$$



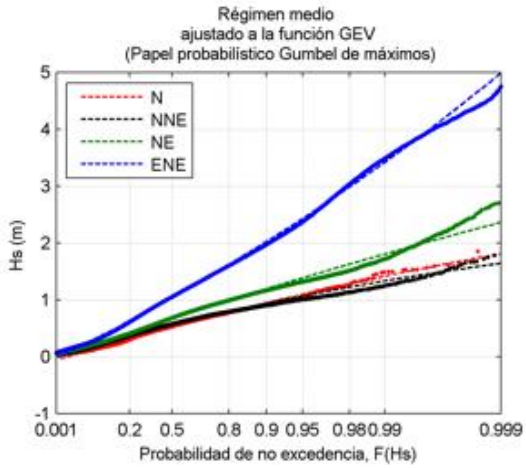
Tp (s) \ Hs (m)	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	Total (%)
1 - 4	34.29	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.59
4 - 7	42.30	16.88	2.46	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	61.66
7 - 10	0.49	0.39	1.88	0.81	0.10	0.00	0.00	0.00	3.67
10 - 13	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.07
13 - 16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total (%)	77.08	17.58	4.35	0.83	0.13	0.02	0.01	0.00	-

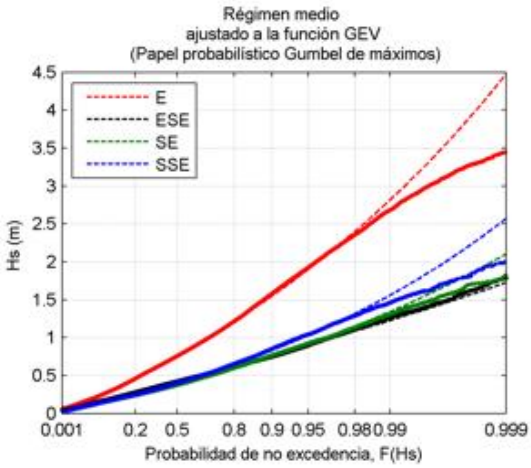

Función de densidad Hs-Tp
Prob.
Tp (s)
Hs (m)
16
14
12
10
8
6
4
2
1
2
3
4
5
6
7
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005

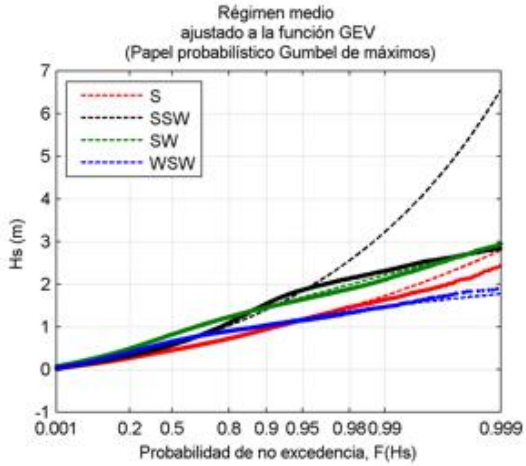
Punto 5-

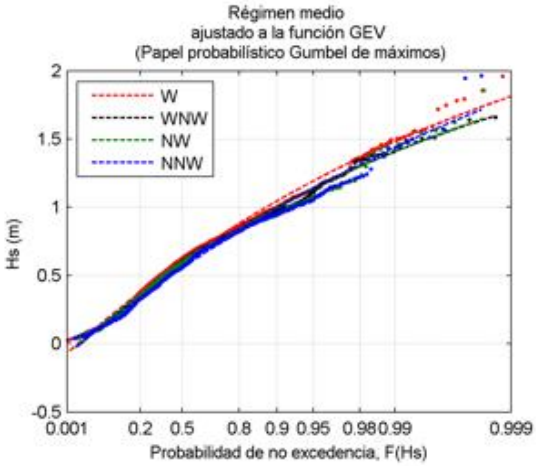


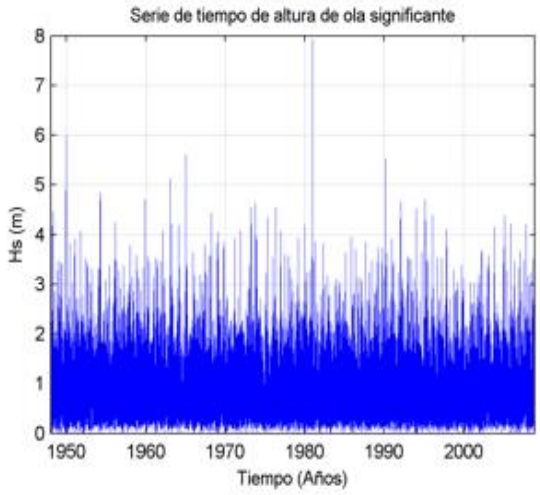
Oleaje DOW	Latitud: 36.9 º Longitud: -1.8 º
Periodo	01/02/1948 : 31/12/2008

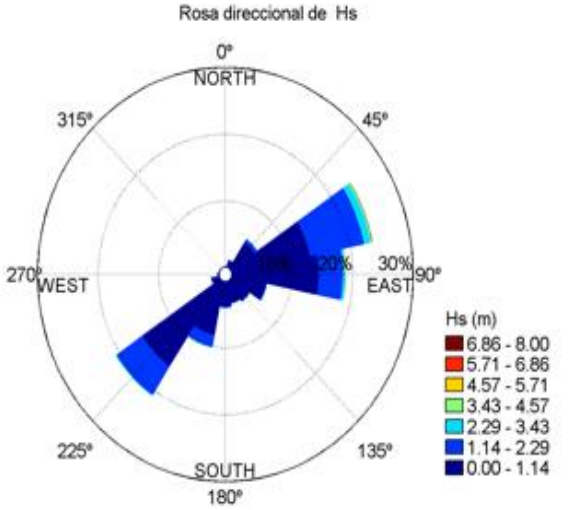


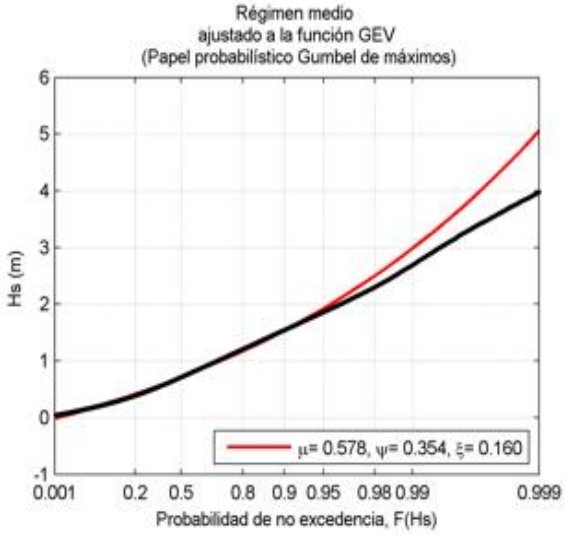






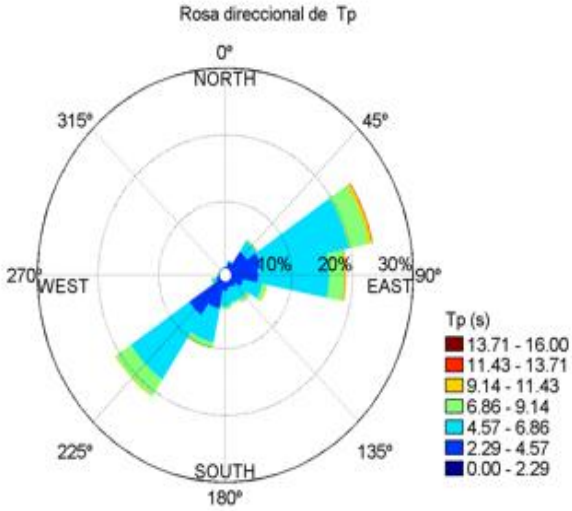




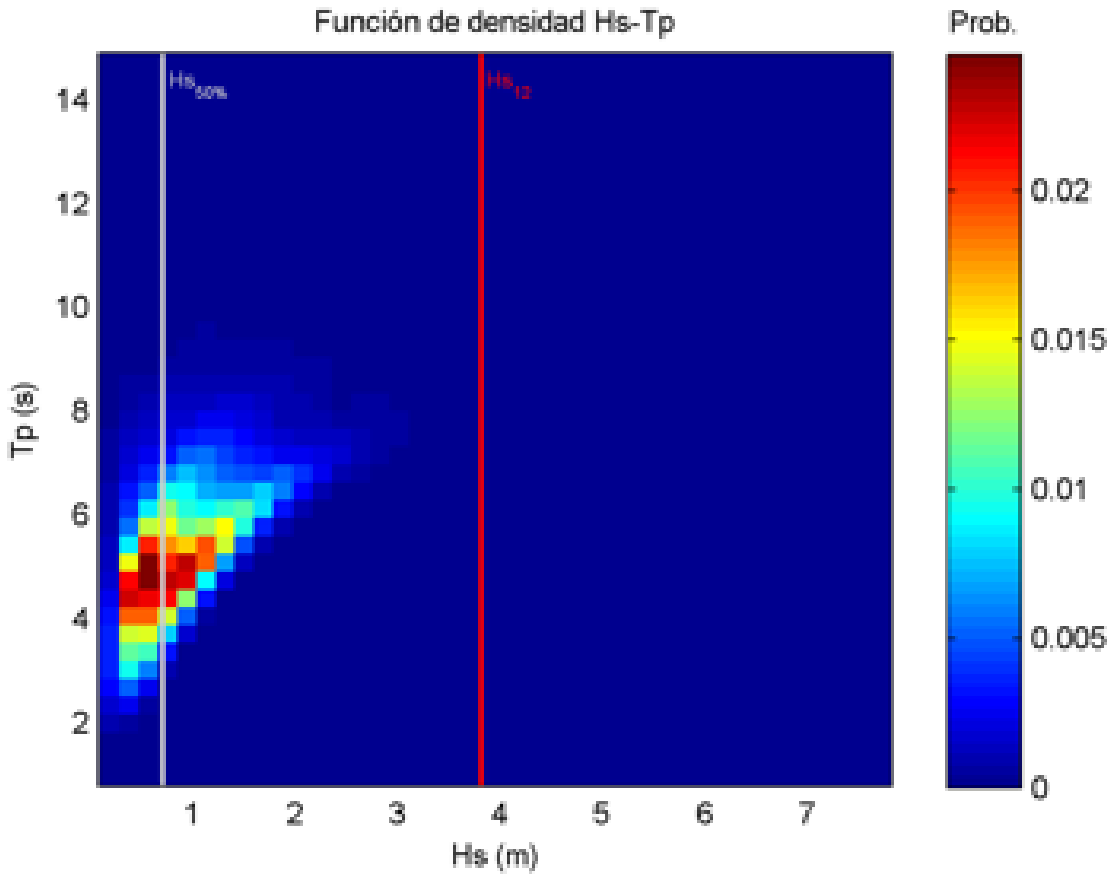


$$F(x;\mu,\psi,\xi) = \exp\left(-\left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\psi}\right)\right)^{-1/\xi}\right)$$

$$x(F;\mu,\psi,\xi) = \mu - \frac{\psi}{\xi}\left(1-(-ln(F))^{-\xi}\right)$$



Tp (s) \ Hs (m)	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	Total (%)
0 - 3	3.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.63
3 - 6	54.96	12.99	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	67.98
6 - 9	10.57	13.28	2.89	0.43	0.04	0.00	0.00	0.00	27.21
9 - 12	0.20	0.59	0.23	0.09	0.04	0.02	0.00	0.00	1.16
12 - 15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Total (%)	69.36	26.86	3.16	0.52	0.08	0.02	0.00	0.00	-


Función de densidad Hs-Tp
Prob.
Tp (s)
Hs (m)
14
12
10
8
6
4
2
1
2
3
4
5
6
7
0.02
0.015
0.01
0.005
0