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

EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE PLAYA DE LA PLAYA DE MAZAGÓN

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Trabajo realizado por:
Ángela González del Campo

Dirigido:
Raúl Medina Santamaría
Jara Martínez Sánchez

Titulación:
Máster Universitario en Ingeniería Costera y Portuaria

Santander, octubre de 2017

RESUMEN

Dado el valor ecológico de las costas, así como las funciones que brindan a la recreación y a la protección del litoral ante la acción del mar, resulta necesario el estudio de su evolución para comprender su comportamiento y así poder asegurar su preservación.

Esta evolución ha sido el objeto de estudio de diversos autores, de manera que se han desarrollado modelos para su predicción. Los denominados modelos heurísticos derivan de una ecuación cinética proporcional al desequilibrio existente, bien sea en términos energéticos como los propuestos por Yates et al. (2009), Davidson et al. (2013), y Jara et al. (2015); o en términos de la posición de la línea de costa como los de Kriebel y Dean (1993), Miller y Dean (2004), entre otros.

El presente trabajo final de máster tiene como objetivo analizar el funcionamiento de la playa de Mazagón, en la provincia de Huelva (España), con el estudio de la evolución de su línea de costa, viendo si esta responde a los procesos transversales a la costa (cross-shore) que los modelos heurísticos reproducen.

Esta playa se encuentra en el Golfo de Cádiz, tiene una longitud de 9.000 m y un ancho medio de 80 m, presenta arena dorada y fina, sus aguas son tranquilas y su función principal es la de balneario.

El oleaje tiene dos componentes principales en mar abierto: la del sureste y la del suroeste, esta última, además de ser más frecuente, tiene mayor intensidad. Por otra parte, la carrera de marea media es de alrededor de 3 m, por lo que se trata de una zona de tipo mesomareal.

En este trabajo, el estudio de la evolución de la línea de costa se ha realizado mediante un modelo de tipo heurístico basado en los procesos cross-shore, fruto de la combinación de los modelos propuestos por Yates et al. (2009) y Jara et al. (2015), los cuales se introducen a continuación.

El modelo desarrollado por Yates et al. (2009), consiste en un modelo tendente al equilibrio que se basa en establecer una correlación entre la energía del oleaje y la posición de equilibrio de la línea de costa. Esta correlación tiene forma lineal y se obtiene

empíricamente incluyendo sus parámetros de forma entre los parámetros de calibración del modelo. Este fue calibrado en playas de California, en Estados Unidos, donde la carrera de marea varía de 1,00 m, en mareas muertas, a 2,50 m en mareas vivas.

En el modelo desarrollado por Jara et al. (2015) se propone una correlación distinta, al asumir un perfil de equilibrio biparabólico. Esta correlación, en lugar de ser lineal como en el caso de Yates et al. (2009), se asemeja a una parábola. Los parámetros que la definen se pueden calcular a partir de algunas características de playa, los denominados invariantes. Este modelo se validó en la playa de Nova-Icaria, ubicada en la ciudad de Barcelona, España, donde la variación del nivel del mar en esta playa es de aproximadamente 0,45 m, valor característico del Mar Mediterráneo, que cataloga las playas de su litoral en el tipo micromareal.

La base para la calibración del modelo será el análisis de un registro histórico de perfiles medidos en la playa, a partir de los cuales se ha extraído la línea de costa, con la que también se procederá a validar los resultados obtenidos.

El forzamiento es el oleaje incidente, en términos de energía en rotura, en forma de momento espectral de orden cero (m_{0b}). Este se obtiene a partir del oleaje en un punto DOW cercano, mediante propagación lineal asumiendo batimetría recta y paralela y nivel del mar constante.

Después de un análisis de sensibilidad de la curva de energía de equilibrio en la playa de Mazagón, se deduce que es demasiado sensible a los cambios de los invariantes, por lo que para la calibración del modelo se recurre a un ajuste similar al propuesto por Yates et al. (2009) pero en lugar de una correlación lineal, se establece una correlación parabólica.

Una vez preparado el modelo se obtienen resultados hasta el año 2015 y se comparan con las medidas obtenidas a partir de los perfiles de playa. Se observa que el modelo reproduce de forma aceptable la variación de la línea de costa, pero que en ocasiones no representa la acreción o erosión esperada.

Para encontrar el motivo de esta discrepancia se analiza la presencia de barras en el perfil de la playa, la influencia de los estados morfodinámicos y el efecto de la marea.

Se deduce que la presencia de barras puede alterar la medida de la posición de la línea de costa, también que para estados de playa disipativos la correlación entre el modelo y las medidas del registro es superior que para los estados más reflejantes y, por último, que el efecto de la marea resulta despreciable.

Por otro lado, se considera que los procesos longitudinales (long-shore), no tenidos en cuenta en el modelo cross-shore, pueden tener influencia en el perfil, y por tanto en la medida de la línea de costa.

Para concluir, al final de este trabajo se plantean una serie de análisis que podrían llevarse a cabo en futuros estudios.

Palabras clave: Perfil de playa, línea de costa, modelo heurístico, Yates et al. (2009), Jara et al. (2015), curva de energía de equilibrio, marea, procesos cross-shore.

ABSTRACT

Given the ecological value of coastal areas, as well as the functions they provide to recreation and protection of the coastline from the sea, it is necessary to study their evolution to understand their behavior and thus to ensure their preservation.

This evolution has been the subject of study of several authors, therefore many models have been developed for its prediction. The so-called heuristic models come from a kinetic equation proportional to the existing imbalance, either in energetic terms such as those proposed by Yates et al. (2009), Davidson et al. (2013), and Jara et al. (2015); or in terms of the position of the coastline, as those proposed by Kriebel and Dean (1993), or Miller and Dean (2004).

The present final master's project aims to analyze Mazagón beach, in Huelva (Spain), with the study of the evolution of its coastline, seeing if it responds the cross-shore processes that heuristic models reproduce.

This beach is located in the Gulf of Cadiz, it is 9,000 metres long and 80 metres width, it has golden and fine sand, its waters are calm and its main function is the spa.

Waves in open sea have two main components: Southeast and Southwest, this one, is more frequent and also more intense. On the other hand, the average tide range is around 3 metres, so it is considered as a mesotidal zone.

In this project, the study of the evolution of the coastline has been done through a heurisctic model based on cross-shore precesses, resulting from the combination of the models proposed by Yates et al. (2009) and Jara et al. (2015), which are introduced below.

The model developed by Yates et al. (2009), is an equilibrium model based on establishing a correlation between wave energy and the equilibrium position of the coastline. This correlation is linear and it is obtained empirically by including its shape parameters between the calibration parameters of the model. It was calibrated at the South of California, in the United States, where the tide range goes from 1.00 to 2.50 metres at neap and spring tides, respectively.

The model developed by Jara et al. (2015) proposes a different correlation, assuming a bi-parabolic profile. This correlation, instead of being linear as in the one proposed by Yates et al. (2009), is a parable. The parameters that define it can be calculated from some beach characteristics, the so-called "invariants". This model was validated at Nova-Icaria beach, located in the city of Barcelona, Spain, where the tidal range is approximately 0.45 metres, a characteristic value of the Mediterranean Sea, which catalogs the beaches of its coast as microtidal.

The basis for the calibration of the model will be the analysis of a historical record of beach profiles measured at Mazagón beach, the coastline has been extracted from them, with which the results will be validated.

The forcing for the model is the incident wave, in terms of energy at breaking, in the form of a zero-order spectral wave moment (m_{0b}). Obtained from DOW waves, by linear propagation assuming straight and parallel bathymetry and constant sea level.

After a sensitivity analysis of the Equilibrium Energy Function in Mazagon, it is deduced that it is too sensitive to the changes of the invariants, reason why, for the calibration of the model, an adjustment similar to the one proposed by Yates et al. (2009) is used, but instead of a linear correlation, a parabolic correlation is established.

Once the model is prepared, results are obtained until August 2015, and they are compared with the measurements obtained from the beach profiles. It is observed that the model reproduces moderately the variation of the coastline, but sometimes it does not represent the expected accretion or erosion.

To find the reasons why, the presence of bars in the bech profile is analyzed, as well, the influence of the morphodynamic states and the effect of the tide.

To sum up, the presence of bars may alter the measure of the position of the coastline, for dissipative beach states the correlation between the model and the measurements is higher than for the reflective states, and the effect of the tide is negligible.

On the other hand, it is considered that longshore processes, not taken into account in the cross-shore model, may have influence in the profile, and therefore in the measurement of the coastline.

At the end of this paper, a series of future analysis are proposed.

Key words: Beach profile, coastline, heuristic models, Yates et al. (2009), Jara et al. (2015), Equilibrium Energy Function, tide, cross-shore processes.

MEMORIA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Objetivos 3
1.2 Organización del documento 3
2. ZONA DE ESTUDIO 5
2.1 Localización y características 5
2.2 Historia 6
2.3 Clima 7
3. BASES DE DATOS 9
3.1 Clima marítimo 9
3.2 Perfiles de playa 10
4. MODELOS DE EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA 14
4.1 Yates et al. (2009) 15
4.2 Jara et al. (2015) 17
4.3 Datos de partida del modelo 21
4.3.1 Forzamiento: oleaje 21
4.3.2 Datos observados 24
4.3.2.1 Nivel de referencia 24
4.3.2.2 Evolución de la línea de costa 26
5. CALIBRACIÓN DEL MODELO 28
5.1 Los invariantes del perfil de playa 28
5.1.1 Influencia del tamaño de grano 31
5.1.2 Influencia del volumen de sedimento (Vs) 32
5.1.3 Influencia de la posición del punto de cierre del perfil activo (hc, xc) 32
5.2 Correlación energía - posición 33
5.3 Calibración de las constantes erosión - acreción 36
6. RESULTADOS 39
6.1 Resultados de la modelización de la línea de costa 39
6.2 Efecto de la presencia de barras 42
6.3 Efecto del estado morfodinámico 43
6.4 Efecto de la marea 45
6.5 Procesos long-shore y variabilidad estacional 47
7. CONCLUSIONES 49
8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 51
9. BIBLIOGRAFÍA 52

1. INTRODUCCIÓN

Desde los principios de la humanidad, comenzando por las comunidades nómadas y pasando por las primeras comunidades sedentarias en el Neolítico, los seres humanos han procurado instalarse en las cercanías del agua, bien a lo largo de los ríos o en la costa. De hecho, muchas de las ciudades importantes del mundo crecieron a lo largo de las orillas de ríos y mares, como es el caso de Barcelona, Londres, Nueva York, Río de Janeiro, Lisboa, Calcuta o Shanghai.

Los primeros poblados costeros se desarrollaron atraídos por la productividad de los ecosistemas presentes en la zona, y con la mejora de la navegación, se convirtieron en núcleos de gran importancia política y comercial. La importancia del agua como medio de transporte y como recurso económico muestra que el agua fue decisiva en la determinación de la organización espacial y la distribución de los asentamientos humanos.

En la actualidad, a pesar de que tan solo un 8% de la superficie terrestre corresponde a áreas costeras, dos tercios de las grandes ciudades se localizan en la costa, albergando aproximadamente al 70% de la población mundial (ver figura 1).

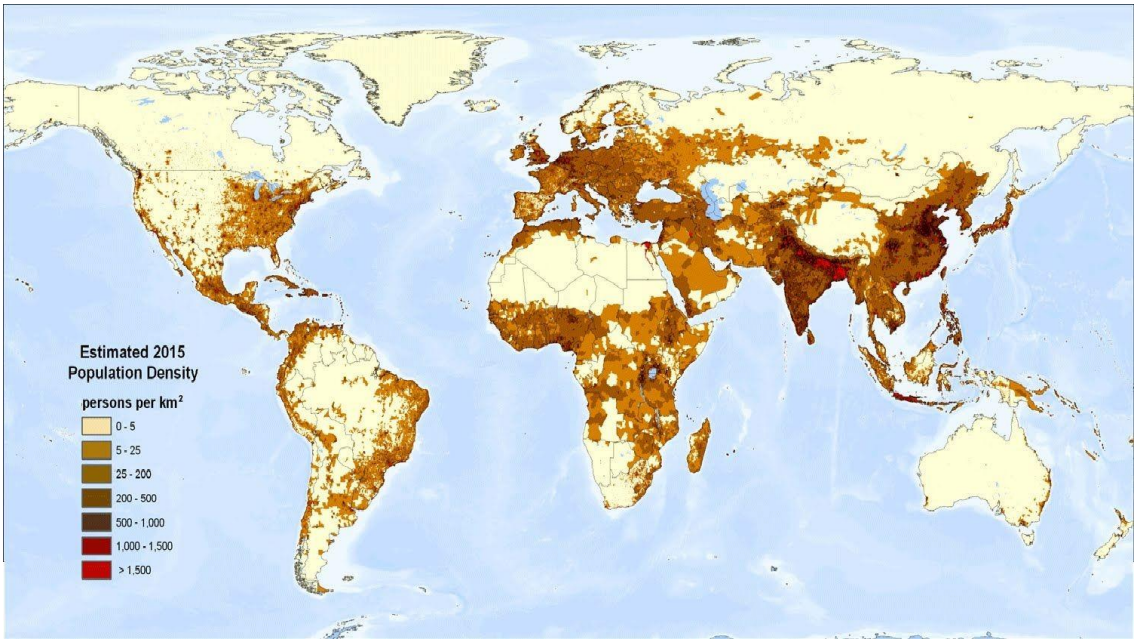


Figura 1: Densidad de población mundial

A lo largo de la historia, el hombre se ha visto obligado a adaptarse constantemente a los cambios de su entorno, desarrollando mecanismos para enfrentarse a las adversidades que se presentaban, con el objetivo de mejorar las condiciones de vida.

Muchos de los cambios sufridos en las zonas costeras en los últimos tiempos son debidos al factor antrópico, relacionados con el crecimiento demográfico y la consiguiente densificación urbanística (ver figura 2), lo cual las convierte en una zona notablemente vulnerable.

Dado su valor ecológico, así como las funciones que brindan a la recreación y a la protección del litoral ante la acción del mar, resulta necesario el estudio de evolución de las costas para comprender su comportamiento y así poder asegurar su preservación.

Figura 2: Villa de Laredo (Cantabria) 1945/2010 y La Manga (Murcia) 1975/2010

El análisis de la evolución de la línea de costa es un elemento clave para entender la variabilidad en la tendencia acreción-erosión de las playas y así acometer la evaluación, seguimiento y gestión del medio ambiente costero.

La evolución de la línea de costa en el tiempo ha sido el objeto de estudio de diversos autores, de manera que se han desarrollado modelos para su predicción. Los denominados modelos heurísticos derivan de una ecuación cinética proporcional al desequilibrio existente, bien sea en términos energéticos como los propuestos por Yates et. al (2009), Davidson, Splinter y Turner (2013), y Jara et al. (2015); o en términos de la

posición de la línea de costa como los propuestos por Kriebel y Dean (1993), o Miller y Dean (2004), entre otros.

En el presente trabajo fin de máster se pretende analizar el funcionamiento de la playa de Mazagón, en la provincia Huelva (España), con el estudio de la evolución de su línea de costa mediante un modelo de tipo heurístico, fruto de la combinación de los modelos propuestos por Yates et al. (2009) y Jara et al. (2015).

La base para la calibración de este modelo será el análisis de un registro histórico de perfiles medidos en dicha playa, a partir de los cuales se ha extraído la línea de costa, con la que también se procederá a validar los resultados obtenidos.

A lo largo de este documento se presentarán ambos modelos, la metodología empleada y, posteriormente, los resultados conseguidos.

1.1 Objetivos

El objetivo general del presente proyecto es evaluar la evolución de la línea de costa en la playa de Mazagón, Huelva, y ver si esta responde a los procesos transversales a la costa (cross-shore), que los modelos heurísticos reproducen.

Para lograrlo, se han formulado los siguientes objetivos específicos:

• Extraer la posición de la línea de costa a partir de las medidas del perfil de playa disponibles.

• Calibrar un modelo heurístico de evolución basado en los procesos cross-shore.

• Validación y discusión de los resultados obtenidos.

1.2 Organización del documento

Con el fin de describir el procedimiento desarrollado, este documento se ha organizado en unos capítulos, los cuáles quedan distribuidos de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción. Donde se introduce la motivación del estudio, se plantean tanto el objetivo general como los objetivos específicos del proyecto y finalmente se presenta la organización del documento.

Capítulo 2. Zona de estudio. Se describe la localización, así como las características físicas principales.

Capítulo 3. Bases de datos. Donde se presentan los datos de partida empleados: clima marítimo y mediciones del perfil de la playa.

Capítulo 4. Modelos de evolución de la línea de costa. Donde se presentan los modelos estudiados, y se presentan los datos necesarios para su aplicación en la playa de Mazagón. Se describe brevemente el tratamiento de los datos de oleaje y la extracción de la posición de la línea de costa a partir de los perfiles medidos.

Capítulo 5. Calibración del modelo. En el que se presenta la correlación de la posición de la línea de costa con la energía incidente, y donde, a partir de las posiciones de línea de costa medidas, se calibra el modelo de evolución propuesto.

Capítulo 6. Resultados. Se presentan y analizan los resultados obtenidos de la de la modelización de la posición de la línea de costa, incluyendo una discusión sobre los mismos.

Capítulo 7. Conclusiones. Donde se presentan las conclusiones generadas, basándose en los resultados obtenidos en el estudio.

Capítulo 8. Futuras líneas de investigación. Donde, a partir de los desarrollos del proyecto, se proponen futuros planteamientos de investigación.

Capítulo 9. Bibliografía. Donde se detalla la documentación consultada, así como las referencias citadas en el texto.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1 Localización y características

La playa objeto de estudio se encuentra en el suroeste de España (ver panel izquierdo figura 3), en la localidad de Mazagón, perteneciente a la provincia de Huelva, Andalucía. La población residente en dicha ciudad en la temporada de invierno ronda los 2.600 habitantes, mientras que con la llegada del verano esta cifra aumenta de forma espectacular hasta los 35.000.

La playa de Mazagón es una de las más vírgenes del litoral andaluz, se desarrolla a lo largo del frente urbano de Mazagón. Hacia el Este continúa en su estado natural, bordeada por un acantilado arenoso sobre el que se localiza un valioso sistema dunar.

Presenta unas coordenadas geográficas medias de latitud 37º6’18.28’’N y longitud 6º49’14.31’’W y una orientación general WNW-ESE, dentro del Golfo de Cádiz (ver panel derecho figura 3).

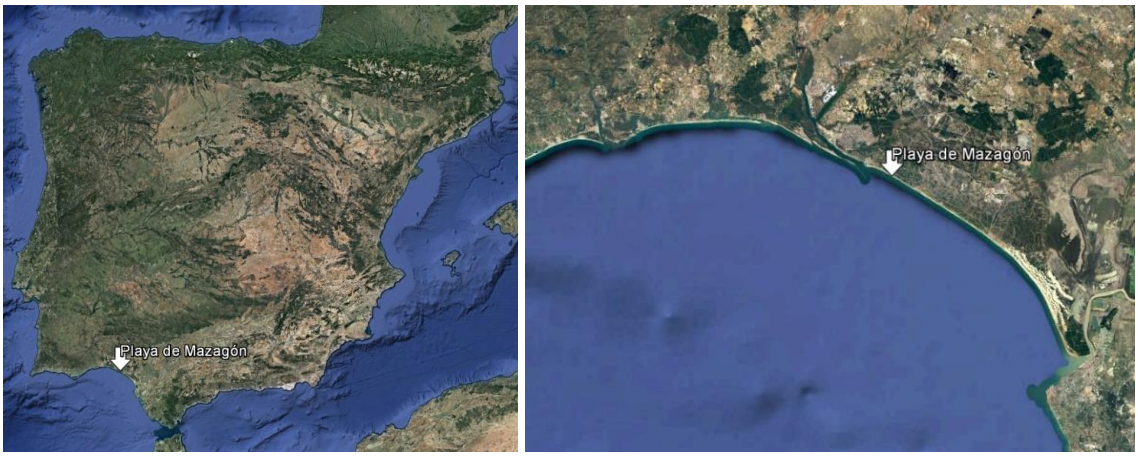


Figura 3: Localización de la playa estudiada

En particular, el estudio se centra en esta zona situada al Este del Puerto Deportivo de la localidad, el cual puede verse en la parte izquierda de la siguiente figura.

Figura 4: Puerto de Mazagón a la izquierda y Torre del Loro a la derecha

La playa cuenta con 9.000 m de longitud (Guía de Playas, MAPAMA), desde el Puerto Deportivo hasta la Torre del Loro o Torre del Río Oro (ver panel derecho figura 4), una de las once almenaras construidas durante el siglo XVII que aún se conservan en el litoral onubense. Esta separa la playa de Mazagón de la popular playa de Matalascañas. Su ancho medio de 80 m, aunque resulta muy variable (ver figura 5). Está formada por arena dorada fina ($D_{50} \approx 0{,}28$ mm), sus aguas son tranquilas y su uso principal es el de balneario.

Figura 5: Vista de la playa de Mazagón

2.2 Historia

En 1981 fue construido el dique Juan Carlos I, que lleva al Faro de Punta Canaleta, a fin de frenar el depósito de arena en la desembocadura de los ríos que impedía el paseo de los barcos. El dique, que provoca la difracción del oleaje, provocó una acumulación de

sedimento que se puede observar en el panel izquierdo de la figura 4.

Por otro lado, durante las últimas décadas, la playa de Mazagón ha sufrido un fuerte proceso de erosión y regresión de la línea de costa. Algunos estudios, como el realizado en 1979 por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), han tenido como objeto analizar las causas de este proceso erosivo y evaluar el ritmo de dicha recesión.

2.3 Clima

La zona de estudio posee un clima del tipo mediterráneo marítimo, con una precipitación media anual de unos 505 milímetros y vientos reinantes del suroeste y dominantes del suroeste.

El oleaje tiene dos componentes principales en mar abierto: la del sureste y la del suroeste (ver figura 6). La primera es consecuencia de los vientos de levante mientras que la componente suroeste está producida por los vientos de poniente, los cuales pueden ser bastante intensos, y además, tener un amplio fetch, lo que explica la fuerza de esta componente que, además de ser más frecuente que la del sureste, tiene mayor intensidad.

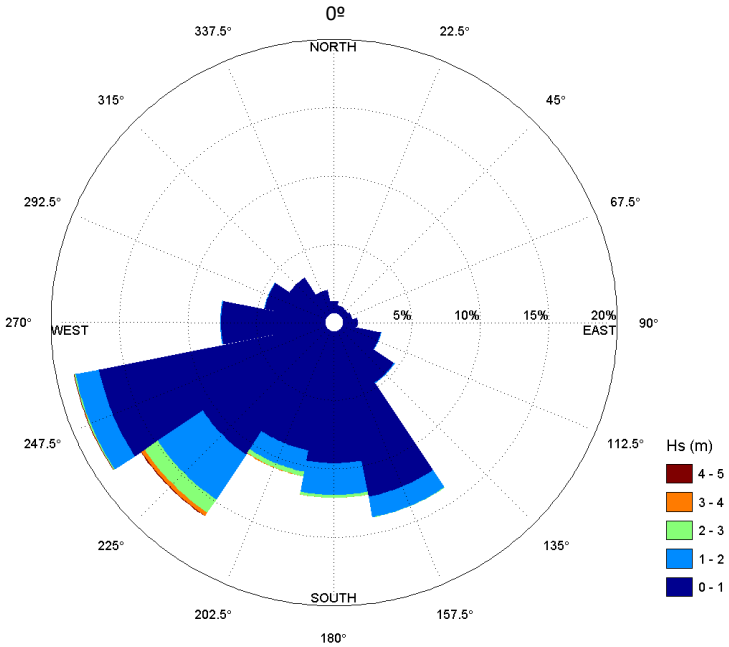


Figura 6: Rosa de direcciones de oleaje (punto DOW)

La carrera de marea media anual se estima en 3,23 metros, situándose el nivel medio a 2,02 metros sobre la referencia del cero del puerto de Huelva. Las corrientes en este puerto están ocasionadas por las mareas en combinación con las corrientes fluviales de los ríos Tinto y Odiel. La máxima velocidad registrada en la canal durante las mareas vivas equinocciales es de 5 nudos, mientras que, en las mareas muertas, la velocidad máxima no llega a 1 nudo.

El transporte sólido litoral, de gran importancia en la costa onubense, tiene una dirección neta de oeste a este debido a la componente suroeste del oleaje. No obstante, este transporte queda obstaculizado en diferentes puntos a causa de las regulaciones de las cuencas de los ríos Guadiana, Piedras, Tinto y Odiel y la construcción de diques en las desembocaduras del Guadiana y del Odiel (ver figura 7). Estos obstáculos han ido originando un déficit sedimentario que actualmente es más acusado en las playas situadas a levante del dique del Odiel (dique Juan Carlos I), en especial en la playa de Mazagón.

Figura 7: Vista de la costa onubense

3. BASES DE DATOS

Para la elaboración de este estudio se ha contado con datos de reanálisis de clima marítimo, pertenecientes a la base de datos IHData, y con mediciones reales del perfil de la playa desde 1998.

3.1 Clima marítimo

La base de datos DOW (Downscaled Ocean Waves) es una base de datos de reanálisis del oleaje en aguas someras a lo largo de todo el litoral español, que proporciona datos horarios de altura de ola, dirección y periodo desde 1948 hasta 2015.

DOW se crea mediante un aumento de la resolución (downscaling) de la base de reanálisis GOW (Global Ocean Waves). Se trata de un downscaling híbrido, puesto que combina modelos de propagación de oleaje (downscaling dinámico) con técnicas matemáticas y estadísticas (downscaling estadístico).

De esta manera, se solucionan las limitaciones que presenta la base de datos de reanálisis GOW:

- Discrepancias cuantitativas respecto a las mediciones disponibles del oleaje (mediciones de satélites).
- Pobre definición del oleaje en aguas someras debido a una escasa resolución espacial y a que no se reproducen las transformaciones que sufre el oleaje debidas a su interacción con la batimetría.

Para solucionar la primera limitación se lleva a cabo una calibración direccional del oleaje en base a datos de satélite, y posteriormente, se propaga el oleaje de la base de datos GOW, desde aguas profundas hasta aguas someras. Finalmente, una vez construida la base de datos DOW, esta es validada mediante la información instrumental de boyas.

La base de datos de marea meteorológica GOS (Global Ocean Surges) contiene la

reconstrucción histórica de tormentas en la región de Europa y contiene datos desde 1979 hasta 2014. Esta base de datos se ha realizado utilizando el Sistema Regional de Modelos Oceánicos (ROMS), desarrollado por Universidad de Rutgers, un modelo que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes promedidadas de Reynolds utilizando el balance de momento hidrostático vertical y la aproximación de Boussinesq.

La marea astronómica es un proceso determinista que se puede reproducir a partir de las componentes armónicas extraídas de una señal medida. La base de datos GOT (Global Ocean Tides) incluye ocho enlaces principales (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), dos largos (Mf, Mm), y 3 constituyentes no lineales (M4, MS4, MN4) armónicos, proporcionados en una red global de 1440 x 721 puntos, con una resolución total de 1/4 grados. Esta información se utiliza para reconstruir las series horarias de la marea en cualquier lugar del mundo utilizando la herramienta t_tide.

3.2 Perfiles de playa

Se dispone de 199 perfiles de playa obtenidos en las campañas mensuales de medida del perfil intermareal de la playa de Mazagón. Estas son realizadas por la Fundación Leonardo Torres Quevedo (Universidad de Cantabria) para el seguimiento del recubrimiento de la tubería del gasoducto del Campo Poseidón (conectado con la planta de R.I.P.S.A.) en el tramo de unión con la costa (ver figura 8), desde diciembre de 1998.

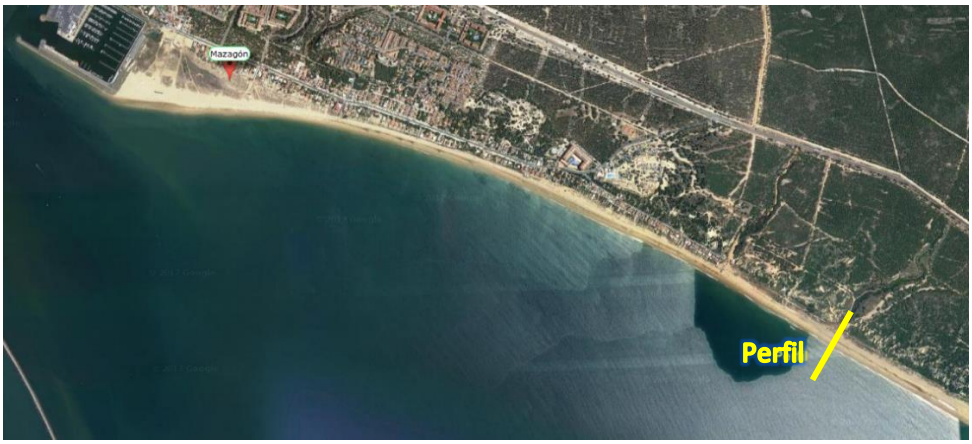


Figura 8: Ubicación del perfil

En la figura 9 se presentan los perfiles desde diciembre de 1998 hasta mayo de 2017.

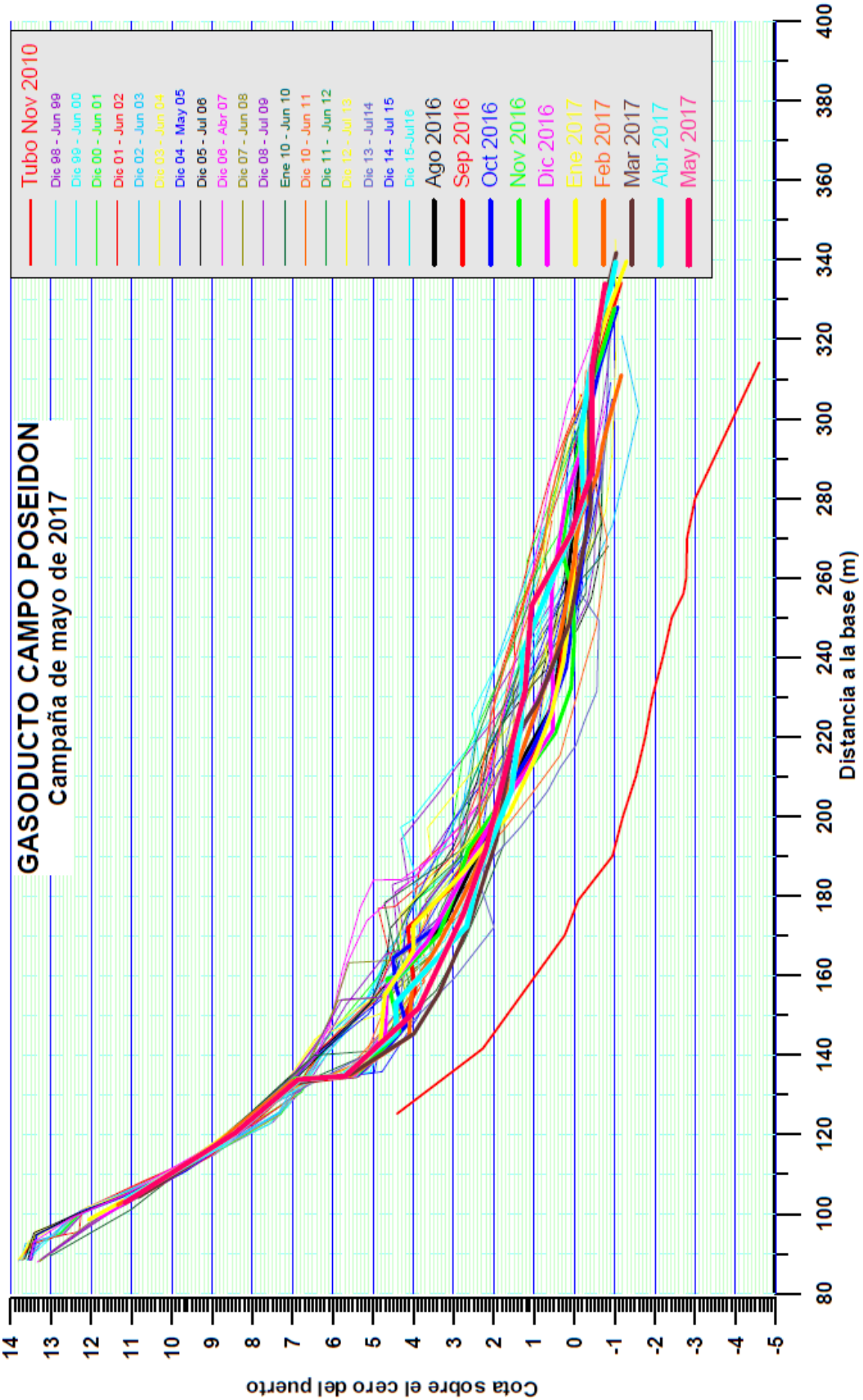


Figura 9: Perfiles medidos de 1998 a 2017

De estos datos, se pueden sacar: el perfil medio (representado en amarillo en la figura 10), las variaciones máximas al perfil medio (en rojo), y las variaciones mínimas al perfil medio (en verde).

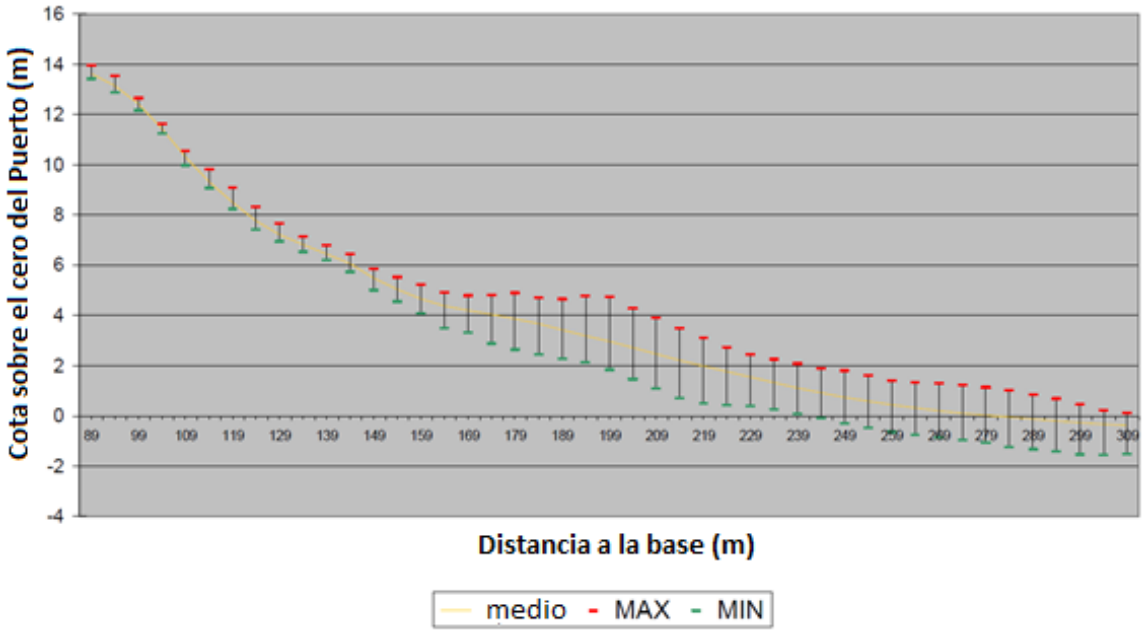


Figura 10: Variaciones mínimas y máximas al perfil medio

La campaña de seguimiento consiste en 10 perfilados de la zona intermareal al año, de septiembre a junio, ambos incluidos. La separación entre campañas es, aproximadamente de un mes y deben realizarse en marea baja viva. Los datos de cada campaña serán los correspondientes a las distancias y cotas con respecto al Cero del Puerto de Huelva a lo largo de la traza del gasoducto.

Las especificaciones de la toma de datos son las siguientes:

- Rango de medida: Desde la cota +10 hasta la cota 0 con respecto al Cero de Huelva.
- Resolución horizontal mínima: 5 m. Se tomarán además todos los puntos de cambio de pendiente: pie de duna, escarpes, borde de la berma, pie del frente de playa, canaletas y barras.
- Precisión horizontal mínima: 5 cm.

– Precisión vertical mínima: 2 cm. Se utilizará una placa de apoyo para el jalón.

En la composición fotográfica de la figura 11 se muestra el estado general de la playa en la zona supervisada. En línea amarilla de trazos se muestra la alineación aproximada del gasoducto en su entronque con la playa. En la parte de playa seca pueden observarse los beach cusps que conforman el borde de la berma de invierno, formada por temporales anteriores, mientras que del lado del mar de esta berma se encuentra la canaleta formada por la formación de la nueva berma.

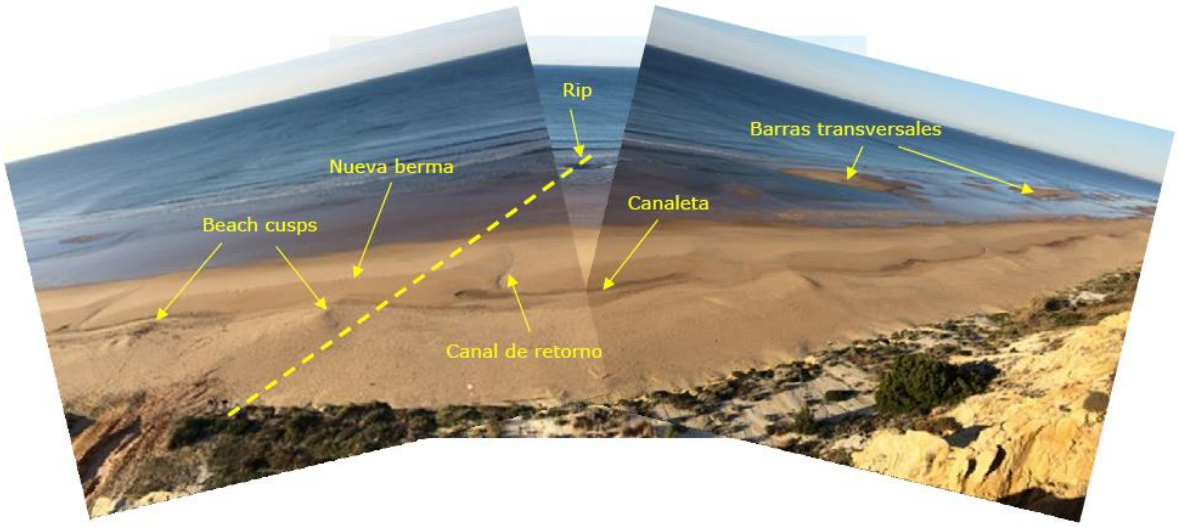


Figura 11: Vista de la playa desde el acantilado y algunas de sus formas más relevantes.

4. MODELOS DE EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Dada la tridimensionalidad de los procesos comprendidos en una playa y teniendo en cuenta la variedad de escalas espaciales y temporales en estos, se hace complejo el análisis de la evolución de las costas. Por ello, se asume la hipótesis de ortogonalidad para poder estudiar por separado los procesos longitudinales (planta) y los procesos transversales (perfil).

Por consiguiente, se puede separar el transporte litoral de sedimentos en una componente paralela a la línea de costa (transporte longitudinal) y otra perpendicular a la misma (transporte transversal).

Este trabajo se centra en el análisis de la evolución de la línea de costa derivada del transporte transversal de sedimento. Este transporte genera cambios en el perfil de la playa, y estos se ven reflejados en la posición de la línea de costa.

El transporte transversal de sedimentos puede ser hacia la costa o en dirección al mar, generando acreción u erosión en la costa respectivamente. La erosión se produce cuando el oleaje incidente es más energético que el oleaje de equilibrio asociado a la posición actual de la línea de costa y la acreción cuando es menos energético, tendiendo en cada caso hacia una posición de equilibrio (ver figura 12).

Figura 12: Movimientos asociados al oleaje

En la literatura encontramos numerosos modelos basados en este concepto de equilibrio y que reproducen los movimientos de la línea de costa debidos al transporte transversal de sedimentos entre los que se encuentra el propuesto por Yates et al. (2009) y el propuesto por Jara et al. (2015), que se explican a continuación.

4.1 Yates et al. (2009)

Este modelo fue validado en playas del sur de California (Estados Unidos), donde la carrera de marea varía de 1,00 m, en mareas muertas, a 2,50 m en mareas vivas, y está dirigido al estudio de la evolución de la posición de la línea de costa debido al transporte de sedimentos a lo largo del perfil sumergido, pero sin evaluar el cambio en la forma del perfil de playa.

Usando como forzamiento la energía del oleaje, se modela la evolución de la línea de costa en el corto plazo mediante la siguiente ecuación cinética proporcional al desequilibrio en términos energéticos:

$$\frac{dS}{dt} = C^{\pm} E^{1/2} \Delta E$$

Donde:

S: posición de la línea de costa.

$\frac{dS}{dt}$: velocidad de cambio en la posición de la línea de costa en el tiempo, t.

$E^{1/2}$ factor de ponderación energético que evita cambios no físicos.

$C^{\pm}$: constante de proporcionalidad de acreción, C+, cuando ΔE < 0, u erosión, C-, cuando ΔE > 0.

ΔE: desequilibrio energético, el cual se expresa mediante la siguiente formulación.

$$\Delta E\ (S) = E - Eeq(S)$$

Siendo E la energía incidente y E_{eq} la energía de equilibrio que corresponde a la línea de

costa (S), es por tanto necesario encontrar una correlación entre la energía del oleaje y la posición de la línea de costa de equilibrio producida por dicha energía. Esta correlación se propone en Yates et al. como una relación lineal de energía de equilibro de la playa de la siguiente forma:

$$Eeq\ (S) = aS + b$$

En donde S es la posición inicial de la línea de costa y a y b son los parámetros de calibración del modelo. Esta energía (E_{eq}), representada por la línea negra de la figura 13, separa el oleaje que genera erosión del que genera acreción, donde se observa cómo la velocidad de cambio de la línea de costa resulta mayor cuanto más se aleja de la energía de equilibrio.

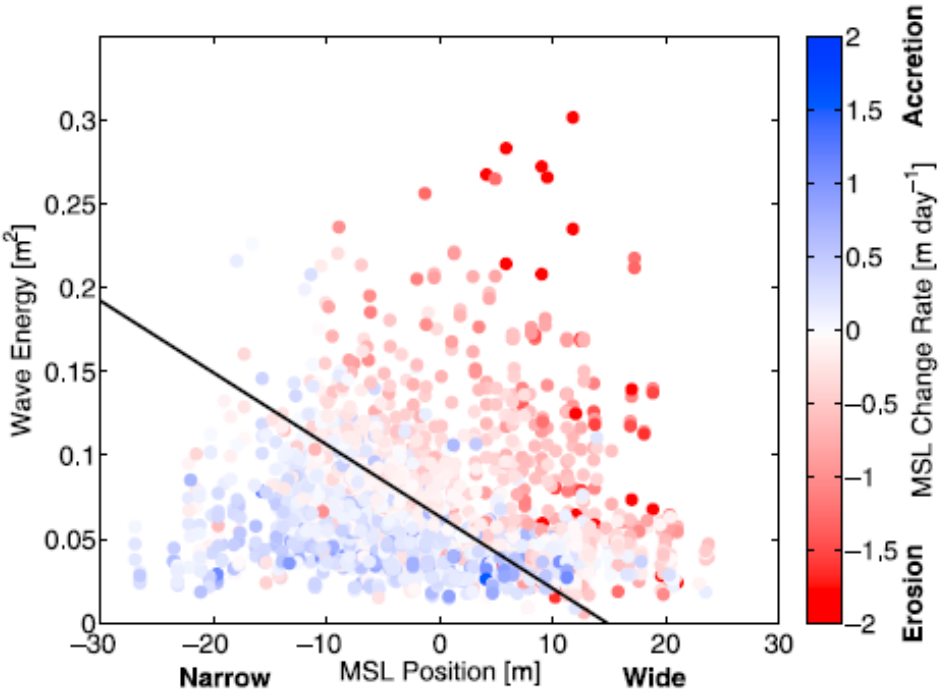


Figura 13: Velocidad de cambio de la línea de costa frente a E_{eq} en la playa de Torrey Pines, California

Asumiendo que la energía es constante en un estado de mar e integrado en la ecuación inicial, los autores obtuvieron el siguiente modelo:

$$S\ (t) = (S_0 - S_{eq})e^{-aC \pm E^{\frac{1}{2}}\Delta t} + S_{eq}$$

En donde S_0 es la posición inicial de la línea de costa en el instante $t=t_0$, a partir de la cual se obtiene la posición de la línea de costa al comenzar el siguiente estado de mar (S_i),

en el instante $t_i = t_0 + \Delta t$. Para determinar la evolución en el siguiente estado de mar, la posición inicial a considerar será la final del anterior, y así sucesivamente, logrando hacer aplicable el modelo al medio plazo.

Por tanto, el modelo se define como una sucesión de N estados de mar caracterizados por sus correspondientes alturas de ola en rotura ($H_{b,i}$, i=1,…,N), asumiendo la hipótesis de oleaje estacionario durante cada estado de mar de la serie (t).

Por último, se resalta que la implementación del modelo requiere de numerosos cálculos para calibrar los cuatro parámetros libres (C+, C-, a y b).

4.2 Jara et al. (2015)

El modelo de evolución de la línea de costa desarrollado por Jara et al. (2015) resulta de incorporar un perfil de equilibrio teórico para la playa al modelo de Yates et al (2009). Este fue validado en la playa micromareal de Nova-Icaria, en Barcelona (España), donde la variación del nivel del mar en esta playa es de aproximadamente 0,45 m, valor característico del Mar Mediterráneo, que cataloga las playas de su litoral en el tipo micromareal.

La ecuación cinética de partida es igual a la propuesta por Yates prescindiendo del factor de ponderación energética:

$$\frac{dx_r(t)}{dt} = C^{\pm} \cdot (m_{0b} - m_{0b}^{\infty}(x_r))$$

Donde:

$x_r(t)$: posición de la línea de costa en el instante "t", t ϵ [0, Δt]. Siendo Δt la duración del estado de mar.

m_{0b}: momento espectral de orden 0 del oleaje en rotura asociado al estado de mar del oleaje incidente.

$m_{0b}^{\infty}(xr)$: m_{0b} de equilibrio para la posición x_r.

$C^{\pm}$: Coeficientes de calibración del modelo; C+ corresponde a procesos de acreción y C- a procesos de erosión.

El modelo considera un perfil teórico de equilibrio de tipo biparabólico (Iribarren (1958), y Bernabeu (2003)). Este puede obtenerse a partir de ciertas características físicas de la playa, que permanecerán constantes a lo largo del estudio (los denominados "invariantes del perfil"), y del oleaje incidente.

El perfil se muestra en la siguiente figura:

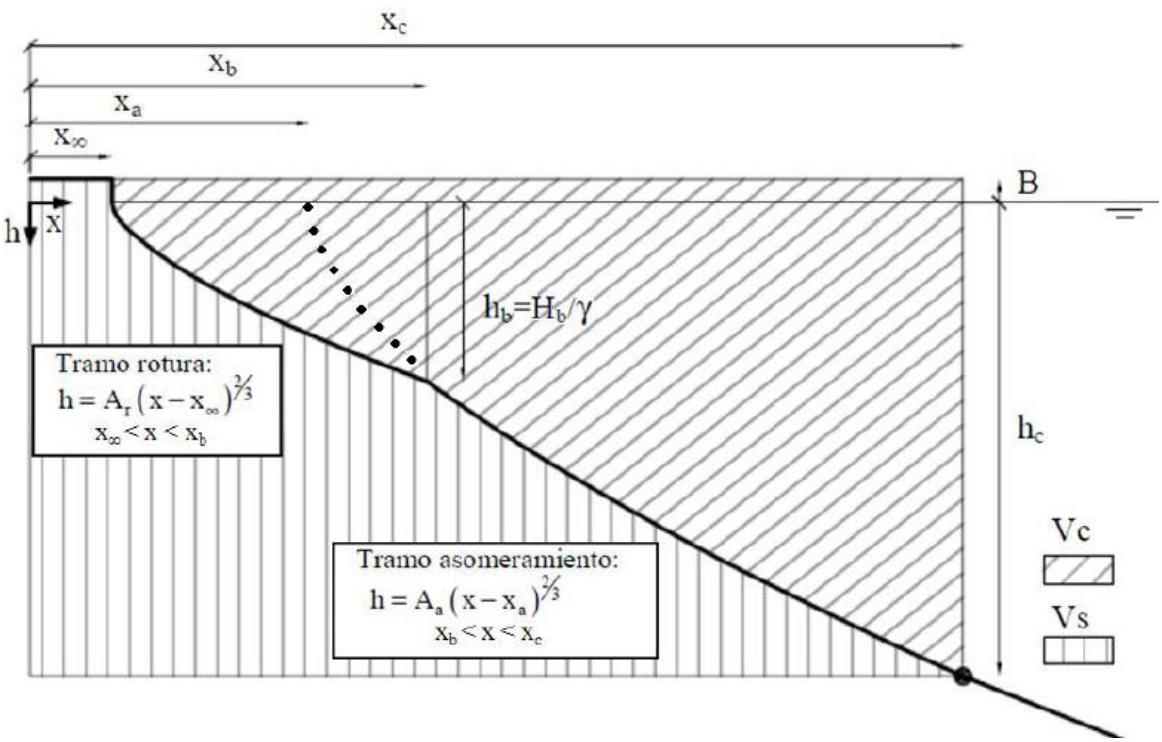


Figura 14: Variables de partida del modelo evolutivo (Martínez et al. 2015)

Donde:

h: profundidad de cada punto del perfil.

x: posición horizontal de cada punto del perfil.

El perfil presenta las siguientes variables:

x_∞: posición horizontal de la parábola de rotura en el origen (h=0) o posición de la línea de costa en el equilibrio.

x_a: posición horizontal de la parábola de asomeramiento en el origen (h=0).

A_a: parámetro de escala de la parábola de asomeramiento.

A_r: parámetro de escala de la parábola de rotura.

h_b: profundidad de rotura.

x_b: posición horizontal del punto de rotura.

Y los siguientes invariantes, que son datos conocidos:

B: altura de la berma.

D_{50}: tamaño de grano de sedimento.

h_c: profundidad de cierre.

x_c: posición horizontal del punto de cierre.

V_s: volumen de sedimento.

V_c: volumen de agua (complementario al V_s) ($V_c = x_c \cdot h_c - Vs$).

Estableciendo la conservación del volumen de sedimento (V_s), la condición de paso por el punto de cierre (xc,hc); la condición de acuerdo entre los dos tramos en (x_b, h_b) y considerándose (wf es la velocidad de caída de grano, función a su vez del tamaño de grano, D_{50} (Dean, 1987)) se reducen los cuatro grados de libertad del perfil (x_∞, A_r ,x_a, A_a) a uno solo (x_∞).

La siguiente ecuación expresa la posición de la línea de costa en el equilibrio (x_∞), en función de la profundidad de rotura en el perfil (h_b) y los invariantes (V_c, B, D_{50}, h_c y x_c):

$$x_\infty = x_c - \frac{h_b^{\frac{3}{2}}}{A_r} - \frac{V_c - \frac{\frac{3}{5} h_b^{\frac{5}{2}} + B h_b^{\frac{3}{2}}}{A_r^{\frac{3}{2}}}}{\frac{3}{5} \cdot \frac{h_c^{\frac{5}{2}} - h_b^{\frac{5}{2}}}{h_c^{\frac{3}{2}} - h_b^{\frac{3}{2}}} + B}$$

Para eliminar el grado de libertad restante se expresa la energía en función de constantes conocidas y la profundidad de rotura:

$$m_{0b} = F(x_\infty) \begin{cases} m_{0b} = (\frac{\gamma}{4{,}004})^2 \cdot h_b^2 \\ x_\infty = x_c - \frac{h_b^{\frac{3}{2}}}{A_r} - \frac{V_c - \frac{\frac{3}{5} h_b^{\frac{5}{2}} + B h_b^{\frac{3}{2}}}{A_r^{\frac{3}{2}}}}{\frac{3}{5} \cdot \frac{h_c^{\frac{5}{2}} - h_b^{\frac{5}{2}}}{h_c^{\frac{3}{2}} - h_b^{\frac{3}{2}}} + B} \end{cases}$$

Las dos ecuaciones anteriores permiten conocer la posición a la que tiende la línea de costa, dados un oleaje incidente conocido y los invariantes de la playa. De igual forma, permite obtener una correlación paramétrica entre la posición de la línea de costa de equilibrio (x_∞) y su correspondiente energía (m_{0b}). que permite integrar la ecuación diferencial de partida a partir de una aproximación lineal para cada estado de mar considerado.

$$x_r(t) = x_0 - x_\infty e^{-C^{\pm} \cdot a_i (t - t_0)} + x_\infty$$

Hasta este punto, el modelo desarrollado es de aplicación únicamente en el corto plazo, por lo cual, siguiendo el mismo procedimiento planteado en el procedimiento descrito por Yates et al. (2009), se hace extensible el uso del modelo al medio plazo al discretizar el periodo de estudio en intervalos de tiempo en los que las características del oleaje puedan considerarse estacionarias, es decir, en estados de mar.

Ambos modelos han sido formulados para playas micro y mesomareales, en donde no

se consideran los efectos de la marea en la variación de la posición de la línea de costa.

4.3 Datos de partida del modelo

A continuación, se relata el tratamiento previo de los datos llevado a cabo para emplear el modelo propuesto. En un primer lugar se habla del forzamiento del modelo y, en segundo lugar, de los datos observados.

4.3.1 Forzamiento: oleaje

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el forzamiento del modelo es el oleaje incidente, en términos de energía en rotura, en forma de momento espectral de orden cero (m_{0b}).

El oleaje en el frente de la playa de Mazagón se obtiene a partir de la base de datos de un punto DOW (Downscaled Ocean Waves). En la figura 15 se muestra la localización del punto próximo a la zona de estudio, el cual cuenta con información de altura de ola significante, periodo de pico y dirección media del oleaje. Corresponden a datos con periodicidad horaria desde el 1 de febrero de 1948 hasta el 31 de agosto del año 2015.

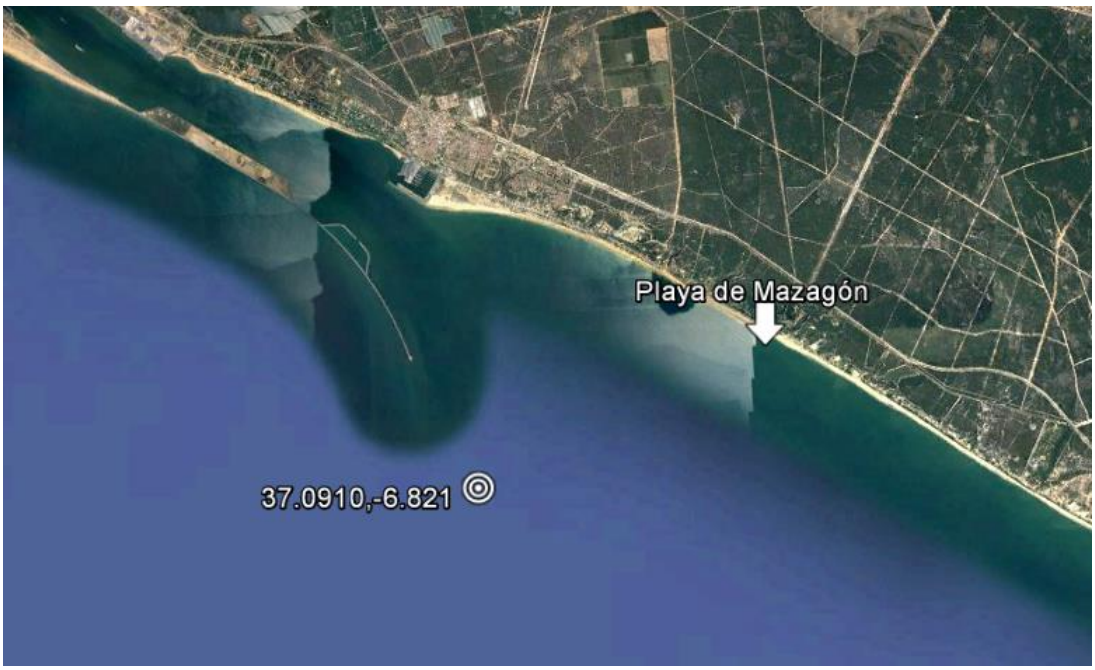


Figura 15: Localización del punto DOW

A partir del oleaje en el punto DOW se obtiene m_{0b} mediante la propagación lineal del oleaje asumiendo batimetría recta y paralela y nivel del mar constante.

La altura de ola H en una profundidad h puede estimarse a partir de la altura de ola H_0 (punto DOW) en su respectiva h_0, de acuerdo con la siguiente formulación:

$$H = H_0 \cdot K_s \cdot K_r$$

Donde:

K_s : coeficiente de asomeramiento.

K_r: coeficiente debido a la refracción.

El asomeramiento es debido a la constricción del flujo de energía al propagarse el oleaje en profundidades intermedias y reducidas; mientras que la refracción es debida a los cambios de celeridad de las ondas al propagarse oblicuamente a la batimetría.

Para calcular el coeficiente de asomeramiento (K_s), se tiene que:

$$K_s = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}}$$

Donde C_g corresponde a la celeridad de grupo del oleaje y se obtiene a partir de la siguiente formulación:

$$C_g = \frac{C}{2} \cdot (1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)})$$

Donde:

C: es la celeridad de la onda, entendida como la relación entre la longitud (L) y el período de pico (T_p):

$$C = \frac{L}{T_p}$$

L: es la longitud de onda a una profundidad h, en donde se asume que el periodo del oleaje T_p, se conserva durante la propagación, para lo cual es posible utilizar la ecuación

de dispersión numérica:

$$L = \frac{gT_p^2}{2\pi} tanh \frac{2\pi h}{L}$$

k: es el número de onda, correspondiente a:

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Por otro lado, el coeficiente de refracción del oleaje es dependiente del ángulo de incidencia inicial (θ_0) y final (θ), en h_0 y h respectivamente.

$$K_r = \sqrt{\frac{cos\theta_0}{cos\theta}}$$

Formulación que se calcula tras emplear la ley de Snell, con la cual se puede conocer el ángulo de incidencia del oleaje en h, partiendo de unas condiciones dadas en h_0.

$$\frac{sen\theta}{C} = \frac{sen\theta_0}{C_0}$$

En la presente investigación, se asume que la altura de ola de momento de orden 0, H_{m0}, es proporcional a la profundidad local, h, según una constante de proporcionalidad, γ, la cual es de un valor de 0,6 para oleaje irregular, según Thornton y Guza (1983).

$$H_{m0} = \gamma \cdot h$$

Para obtener finalmente la altura de ola significante en rotura (H_b), se sigue la hipótesis de que el proceso es de banda estrecha; con lo cual se puede asimilar a la altura de ola del momento espectral de orden 0, H_{m0} El momento de orden 0 en rotura (m_{0b}) se obtendría tal como sigue:

$$m_{0b} = \frac{H_{m0}}{4{,}004}^2 \cong \frac{H_b}{4{,}004}^2$$

Una vez propagado el oleaje desde el punto DOW hasta la rotura, se tiene que las máximas alturas de ola en rotura logran superar en algunos casos los 3 m, pero las alturas más frecuentes no llegan a los 0,50 m. Las direcciones predominantes son del WSW y del SSE, tal como se observa en la rosa de oleajes de la siguiente figura:

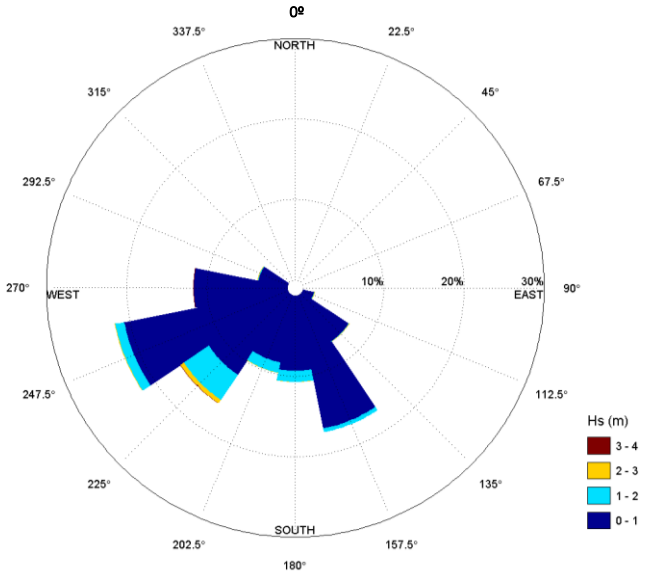


Figura 16: Rosa de oleajes en rotura

4.3.2 Datos observados

La posición de la línea de costa es el dato con el que se podrá calibrar y validar el modelo, y para su definición es necesario establecer primero el nivel de referencia y posteriormente extraer la medida de los perfiles de la playa de Mazagón.

En los siguientes subapartados se define el nivel de referencia y se explica el proceso seguido para la extracción de la línea de costa.

4.3.2.1 Nivel de referencia

El mareógrafo de Huelva (código de estación: 3326) pertenece a la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) y cuenta con información de niveles de marea desde 1997 (ver figura 17).

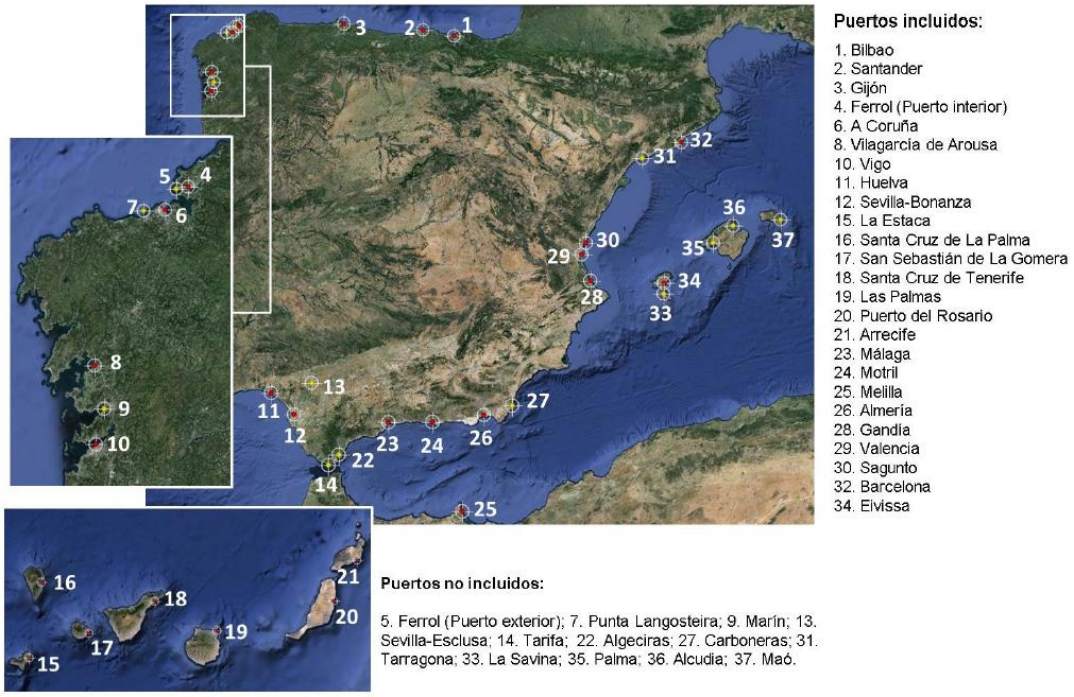


Figura 17: Puertos con estaciones pertenecientes a la REDMAR (2014)

La estación se sitúa dentro del puerto de Mazagón, tal y como se observa en la siguiente figura, donde también se describen los niveles característicos (en el panel derecho).

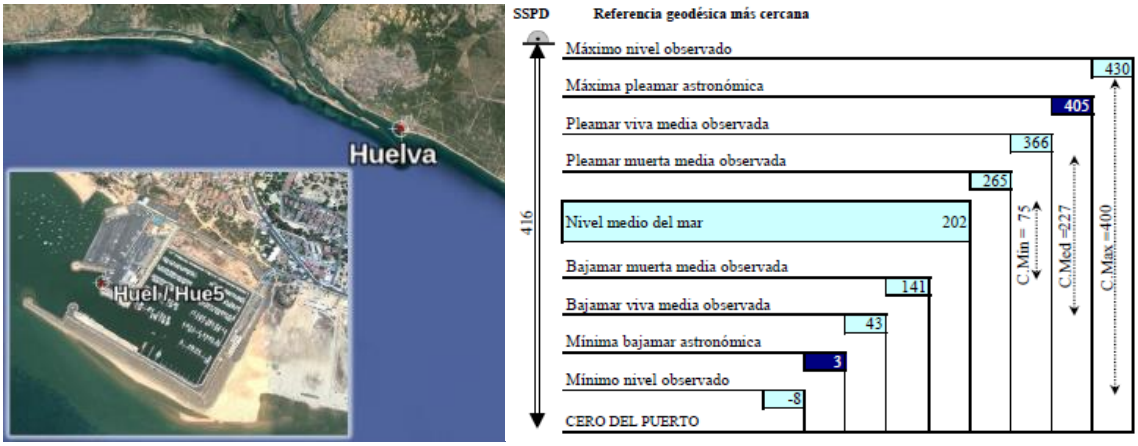


Figura 18: Ubicación y niveles de referencia (Puertos del Estado)

A partir de los datos registrados por el mareógrafo, se observa claramente que las oscilaciones máximas entre bajamar y pleamar no llegan a los 4 m, tratándose por tanto de un régimen mesomareal.

Aunque el nivel del mar no se emplea como forzamiento del modelo, como se verá a continuación, su definición es importante a efectos de definir la línea de costa.

4.3.2.2 Evolución de la línea de costa

Por otro lado, para la calibración del modelo resulta necesario conocer la evolución de la línea de costa. En este caso, su evolución es obtenida a partir de los perfiles de playa medidos en la playa de Mazagón.

Con estas medidas se procede a calcular la posición promedio de la línea de costa en pleamar (cota 3,23 m sobre el nivel de referencia) a lo largo de los 18 años de datos. Se Posteriormente, en el capítulo de resultados, se evaluará el efecto de esta cota en el modelo.

En la figura 19 puede observarse que la posición de la línea de costa varía mucho a lo largo del tiempo, con diferencias que llegan a los 20 metros. Además, la serie muestra una fuerte tendencia de retroceso, fruto de los procesos longitudinales a la costa. Si se compara la posición media de los primeros años con la posición media de los últimos años se puede estimar un retroceso de al menos 30 metros en menos de dos décadas. En esta figura también se muestra la expresión de la recta de tendencia, obtenida mediante un análisis de regresión lineal.

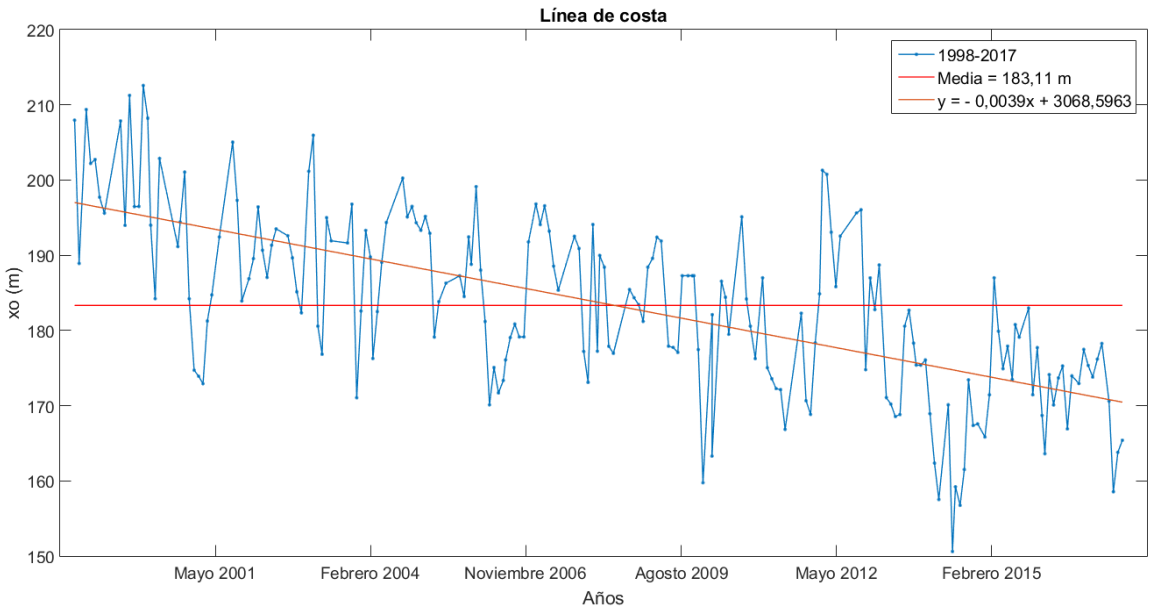


Figura 19: Posición de la cota 3,23 m respecto a la referencia (1998-2017)

Dada la necesidad de eliminar esta tendencia para la aplicación del modelo, ya que este no tiene en cuenta los procesos longitudinales, tan solo los procesos transversales a la costa, se recurre a un proceso de diferenciación. Este consiste en tomar una diferencia regular, es decir, en calcular la diferencia entre cada dato y el anterior:

$$\nabla y_t = y_t - y_{t-1}$$

De esta manera se pierde por tanto el primer dato de la serie, el de diciembre de 1998.

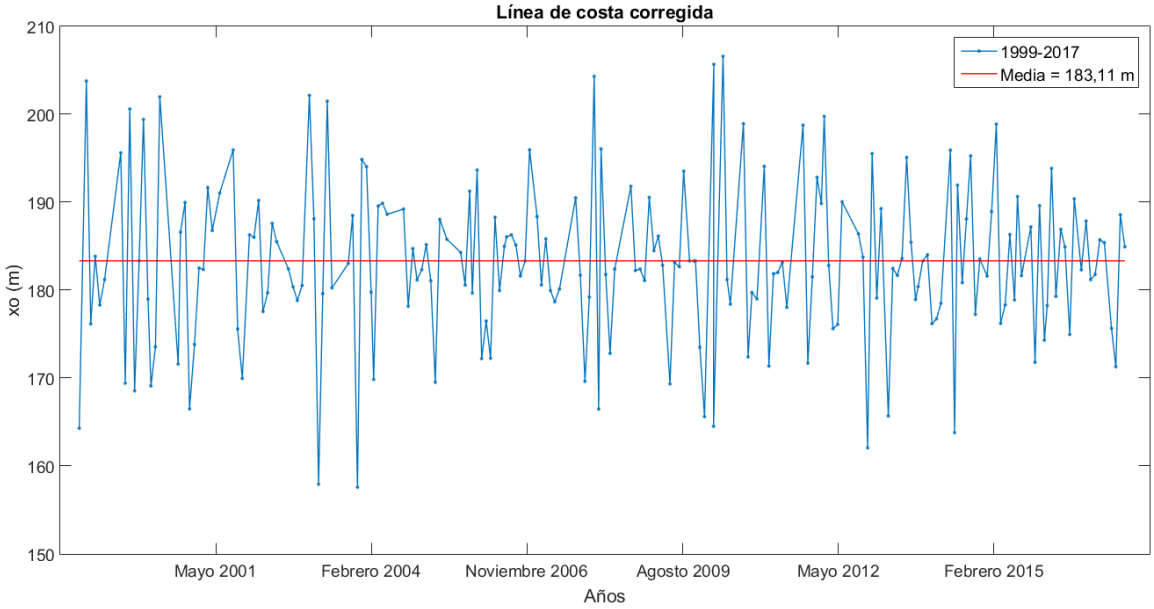


Figura 20: Posición de la cota 3,23 m respecto a la referencia (1999-2017) con la tendencia corregida

En la figura 20 se muestra la serie corregida, que conserva el mismo valor medio que la serie anterior, 183,11 m, pero sin la tendencia que mostraba. La cual será empleada para la calibración del modelo y su posterior validación en el capítulo de resultados.

5. CALIBRACIÓN DEL MODELO

En el presente apartado se evalúa la correlación entre la energía del oleaje incidente y la posición de la línea de costa, seguido de calibración de las constantes de erosión y acreción para la aplicación del modelo cross-shore en la playa de Mazagón.

5.1 Los invariantes del perfil de playa

Para definir la curva de la energía de equilibrio en el modelo de Jara et al. (2015) se necesita conocer ciertas características físicas de la playa, los anteriormente llamados "invariantes del perfil". Los cuales permanecen constantes durante todo el periodo de estudio, y son los siguientes:

• El tamaño medio de grano del sedimento de la playa (D_{50}) y su ángulo de rozamiento interno (ϕ).

• La altura de la berma de la playa seca (B).

• La cota de la línea de costa (Nivel de referencia).

• El punto de cierre del perfil (x_c, h_c).

• El volumen de sedimento contenido en el perfil activo (V_s).

En el caso de la playa de Mazagón se considera un D_{50} = 0,28 mm y un ϕ = 35°, valor medio utilizado habitualmente en arenas. Además, la altura de berma se considera igual a 2,00 m.

Por otro lado, para establecer el punto de cierre es necesario definir la profundidad de cierre del perfil activo. Esta se entiende como el límite a partir del cual las fluctuaciones estacionales del perfil son despreciables. Para su cálculo se emplea la formulación propuesta por Hallermeier en 1981:

$$h_c = 2{,}28\, H_s - 68{,}5 \left(\frac{H_s^2}{gT^2}\right)$$

Donde:

g: aceleración debida a la gravedad.

H_s: altura de ola excedida sólo 12 horas al año.

T: periodo correspondiente al valor de H_s.

En la figura 21 se muestra la evolución de la profundidad de cierre calculada en la playa de Mazagón, para los 68 años de datos DOW disponibles. En esta se puede observar que la variación máxima llega a los 4,00 metros y el valor medio de toda la serie evaluada es de 6,40 m.

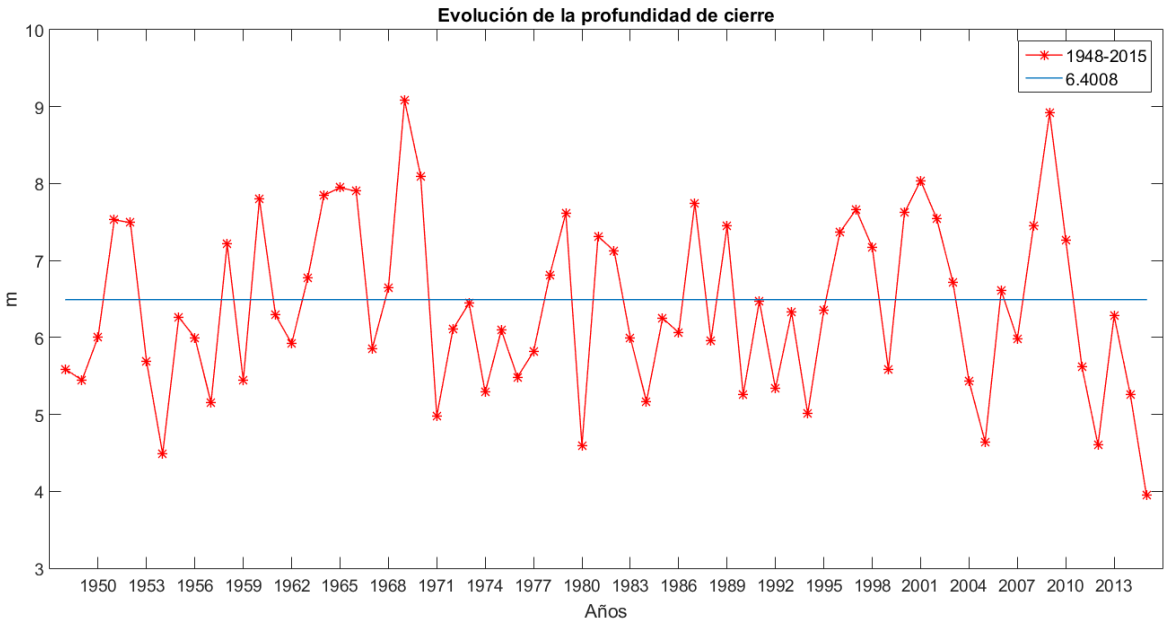


Figura 21: Evolución de la profundidad de cierre (1948-2015)

Por tanto, la posición de cierre, x_c, se define como la distancia media entre la batimétrica correspondiente a la profundidad de cierre y la línea de referencia. Para obtenerla se dispone de datos de batimetría en el perfil de la playa desde el año 2013 hasta el año 2017 (ver figura 22).

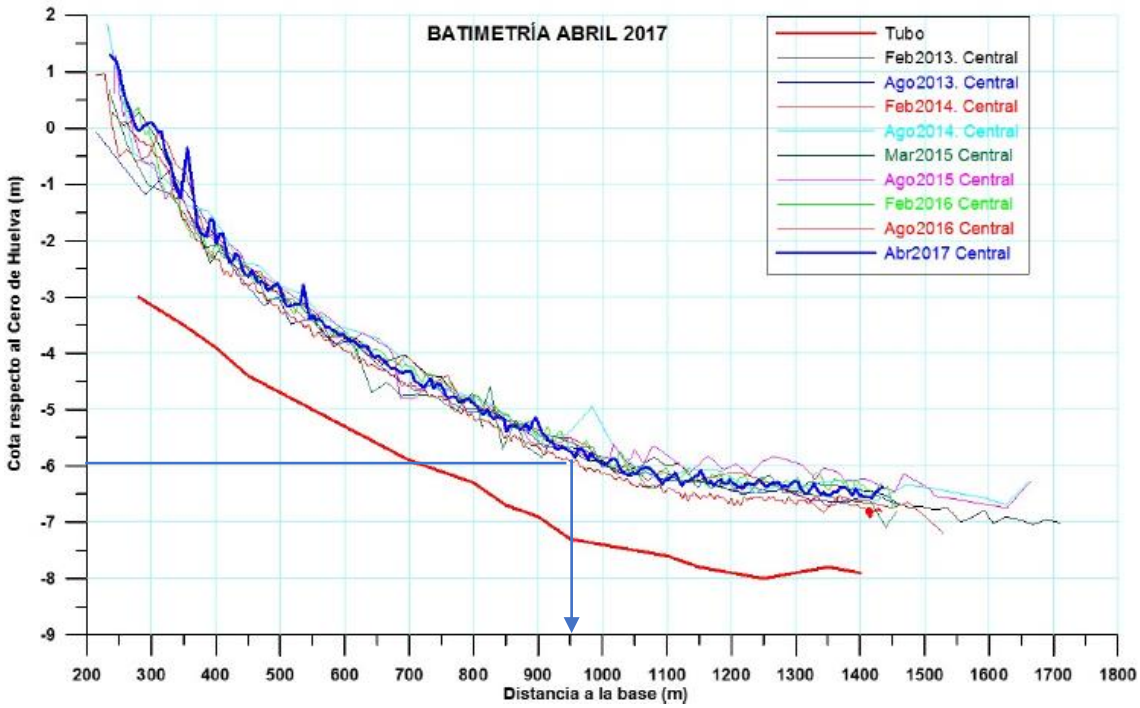


Figura 22: Perfiles de las batimetrías desde febrero de 2013

Puesto que la profundidad de cierre está referida a la Bajamar Máxima Viva Equinoccial (B.M.V.E.) y los datos de batimetría al cero del puerto de Huelva, es necesario restar la diferencia entre estas (0,43 m) a la profundidad de cierre, para así obtener la posición de cierre x_c = 950 m.

En el caso de la playa de Mazagón, como se ve en la figura anterior, los cambios a esta profundidad son aún significantes, llegando a variar hasta más de 50 cm a una distancia x_c = 1.500 m. Por consiguiente, se ve que la formulación propuesta por Hallermeier (1981) infravalora este dato, pero se desconoce si para los procesos cross-shore queda bien definida y estos cambios son consecuencia de los procesos de long-shore.

Dada la importancia que tiene la curva de energía de equilibrio a la hora de reproducir los movimientos de la línea de costa se considera necesario entender su comportamiento. Con este fin, se realiza un análisis de sensibilidad de algunos de los invariantes del perfil de playa sobre esta.

5.1.1 Influencia del tamaño de grano

Para estudiar la influencia del tamaño del sedimento se compara el valor de D_{50} característico de la playa (D_{50} = 0,28 mm) con un material más grueso (D_{50} = 0,29 mm) y con otro más fino (D_{50} = 0,27 mm).

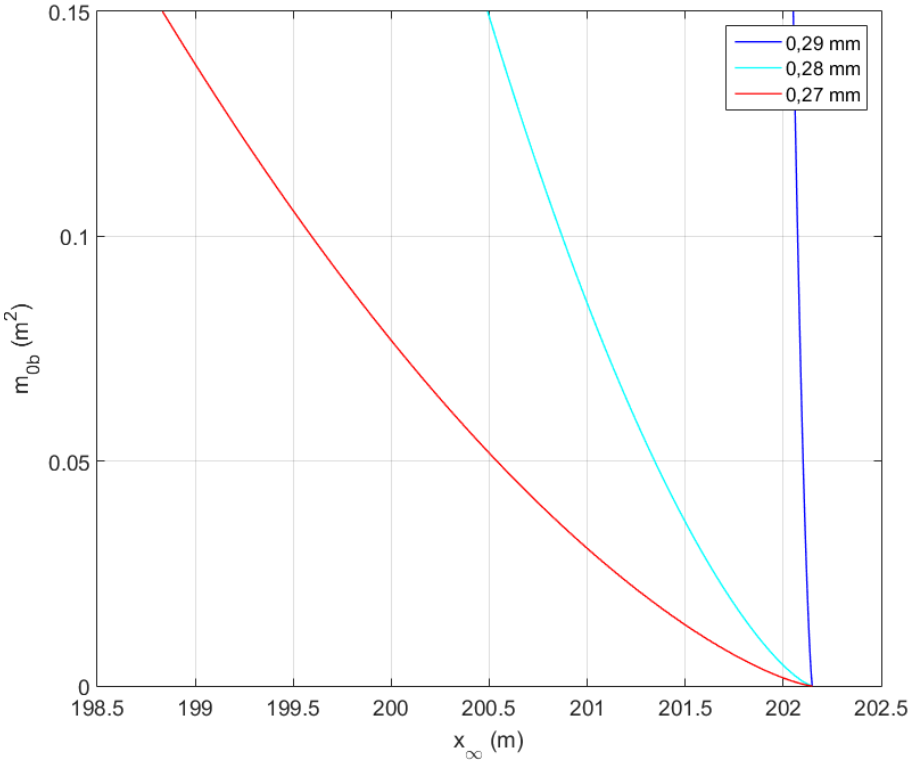


Figura 23: Influencia del D_{50} en la curva de energía de equilibrio

En la figura 23 se puede observar que el cambio es muy significativo con tan solo 0,01 mm de diferencia. Con un tamaño de grano mayor (azul oscuro) la playa resulta más rígida, es decir, con una menor variación en la posición de la línea de costa. En cambio, con un tamaño de sedimento menor (rojo), la playa resulta más flexible, y por tanto la variación en la posición de la línea de costa es mayor.

Además, se observa que el máximo avance de la línea de costa, x_∞ máximo, sigue constante para los tres tamaños estudiados. Esto se debe a que depende únicamente de los invariantes B, x_c, h_c y V_s.

5.1.2 Influencia del volumen de sedimento (Vs)

Por otro lado, se estudia la influencia del volumen de sedimento, el cual está relacionado con la posición de máximo avance de la línea de costa, x_∞ máximo. Los tres casos comparados son: 202,15 m (valor máximo de las mediciones), 220 m y 180 m.

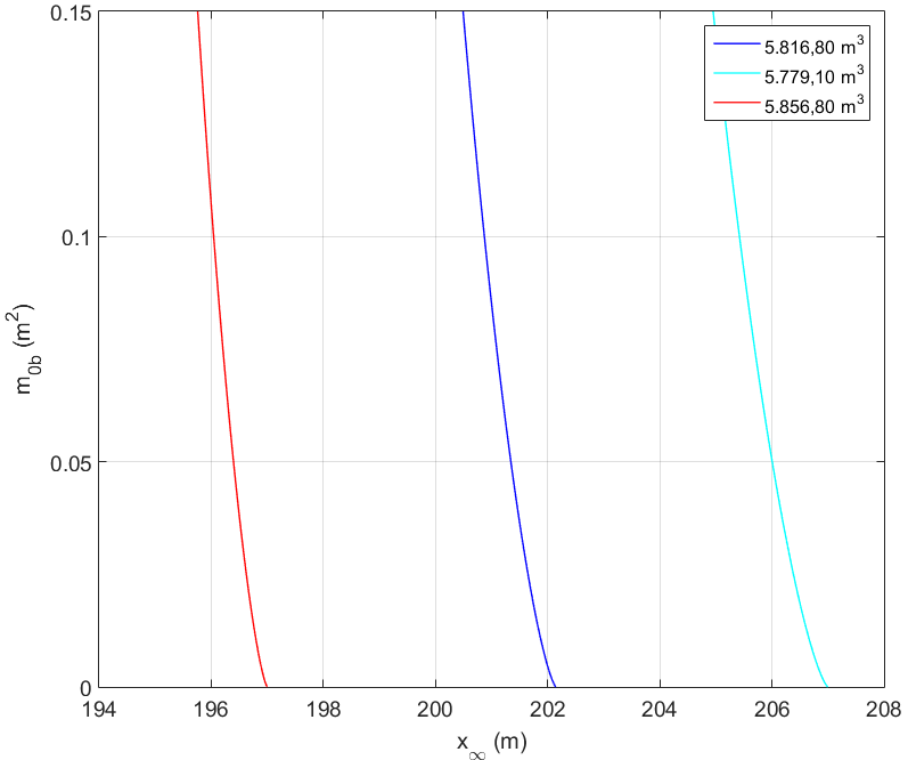


Figura 24: Influencia de Vs en la curva de energía de equilibrio

En la figura anterior se observa que un cambio en el volumen de sedimentos de alrededor de un 0,70% se reproduce en una traslación de aproximadamente 5 m en la curva de energía de equilibrio.

5.1.3 Influencia de la posición del punto de cierre del perfil activo (hc, xc)

Por último, se estudia la influencia de la posición del punto de cierre del perfil activo. Los valores que lo definen, profundidad (h_c) y distancia de cierre (x_c), están ligados según la batimetría de la zona.

Para conocer esta influencia se compara el punto definido en el proyecto (xc = 950 m,

hc = 6,40 m) con otros dos puntos, uno asociado a una distancia de 1.000 m y otro asociado a una distancia de 900 m.

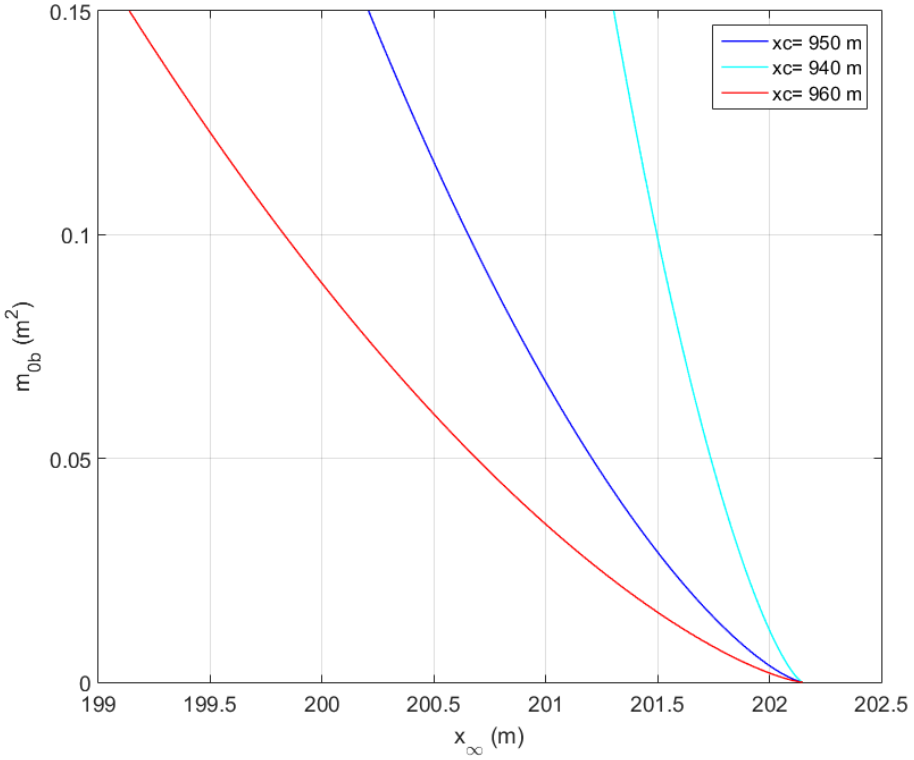


Figura 25: Influencia del punto de cierre (xc, hc) en la curva de energía de equilibrio

En la figura 25 se observa que cuanto mayor sea la distancia la playa resulta más flexible, por lo que la variación en la posición de la línea de costa es mayor. Por el contrario, con una distancia menor, la playa resulta más rígida, es decir, presenta una menor variación en la posición de la línea de costa.

De este apartado se concluye que existe demasiada incertidumbre con la curva de energía de equilibrio y, por tanto, para su calibración se empleará el método de Yates et al. (2009).

5.2 Correlación energía - posición

Para la calibración de la curva, por tanto, no se emplearán los invariantes del perfil, sino que se realiza un ajuste similar al propuesto por Yates et al. (2009) pero en lugar de una correlación lineal se establece una correlación parabólica. El procedimiento seguido se

explica a continuación.

Una vez establecido un periodo de calibración con suficientes datos, en este caso 2 años (2003-2004), se calcula la velocidad de cambio de la línea de costa como:

$$Vel_{cambio} = \frac{dS}{dt}$$

Donde:

S: posición de la línea de costa.

t: tiempo.

Esta tasa queda representada en la figura 19 con puntos rojos para erosión y puntos azules para acreción (Yates et al. (2009)).

Por otro lado, se calcula la energía del oleaje asociada a partir de la altura de ola en rotura como:

$$E = \frac{H_b^2}{4{,}004^2}$$

Con estos datos se procede a ajustar la curva, de forma que separe los puntos rojos de los azules. Para ello:

- Se establecen los valores de los extremos, considerando nula la energía para el avance máximo, siendo tangente horizontal en el origen, y máxima para el avance mínimo.

- Estos valores máximo y mínimo deben ser incrementado y reducido respectivamente para ampliar el rango que alcanza el potencial, dado que, generalmente, la duración del estado de mar considerado (Δt) no será suficiente para que el sistema evolucione hasta el equilibrio. Por tanto, al finalizar el mismo la posición verdaderamente alcanzada (x_r) será inferior a la de equilibrio (x_∞), como se muestra en la siguiente figura:

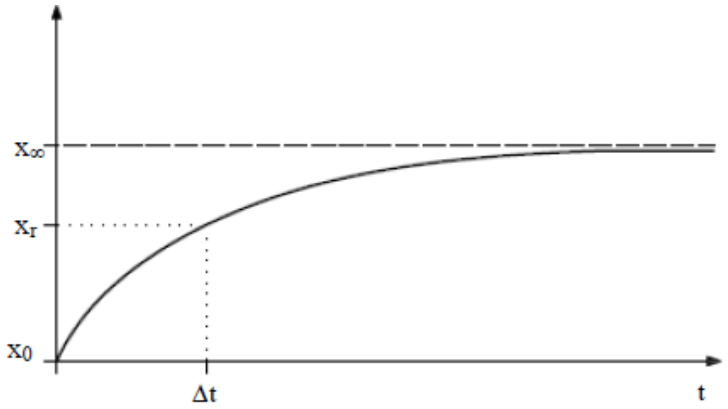


Figura 26: Esquema del modelo de evolución

Con estas consideraciones se ha obtenido una parábola con la siguiente ecuación:

$$m_{0b} = 1{,}7646 \cdot 10^{-5}\, x_{\infty}^{2} - 6{,}9578 \cdot 10^{-3}\, x_{\infty} + 0{,}68586$$

En la figura 27 se presenta en negro la correlación propuesta entre la energía del oleaje y la posición de la línea de costa de equilibrio derivada de dicha energía, junto con la parábola resultante de aplicar el método propuesto por Jara et al. (2015), en verde, pudiendo comprobar que el rango de posiciones de esta última es muy reducido. En la figura se observa, además, que los registros de los oleajes presentes no son muy energéticos, la mayoría no llegan a los 0,05 m^2, y tan sólo dos superan los 0,10 m^2.

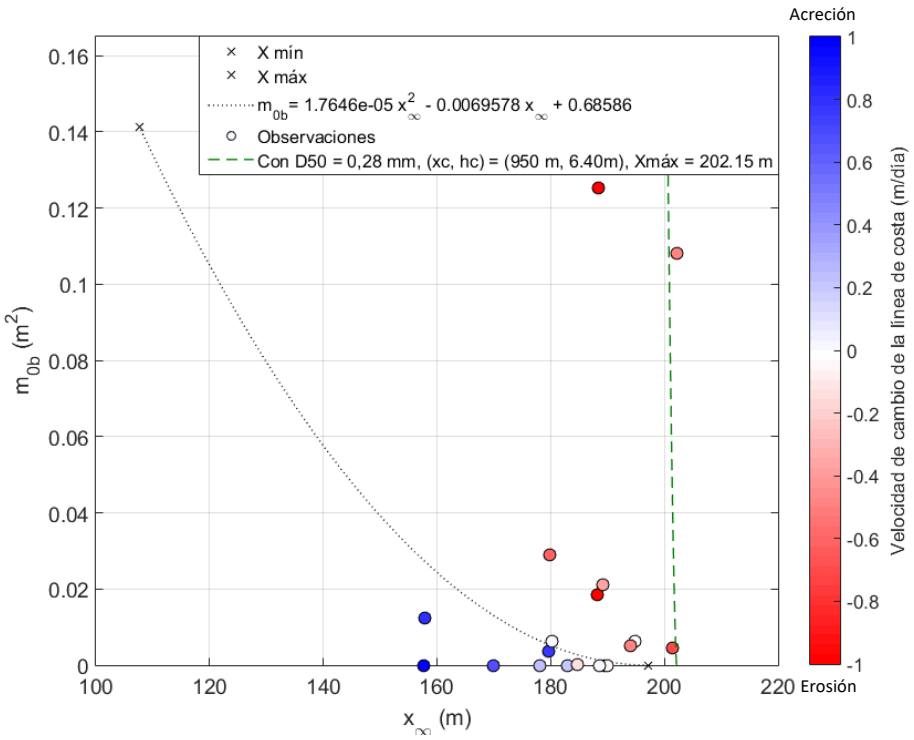


Figura 27: Curva de energía del oleaje – posición de la línea de costa

5.3 Calibración de las constantes erosión - acreción

Finalmente, es necesario calibrar las constantes del modelo: el coeficiente correspondiente a los procesos de acreción (C+), y el correspondiente a los procesos de erosión (C-).

Para poder relacionar el comportamiento del modelo con las posiciones de la línea de costa medidas, se recurre al cálculo del error cuadrático medio (RMSE), de forma que el mejor ajuste corresponde al mínimo error. Se emplea la siguiente formulación:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(Pt_i - x_r t_i)^2}{n}}$$

Donde:

P: son las posiciones de la línea de costa obtenidas a partir de las mediciones del perfil de playa.

x_r: son las posiciones generadas mediante el modelo.

En la figura 28 se muestran los resultados de la optimización de las constantes de calibración con el cálculo del RMSE.

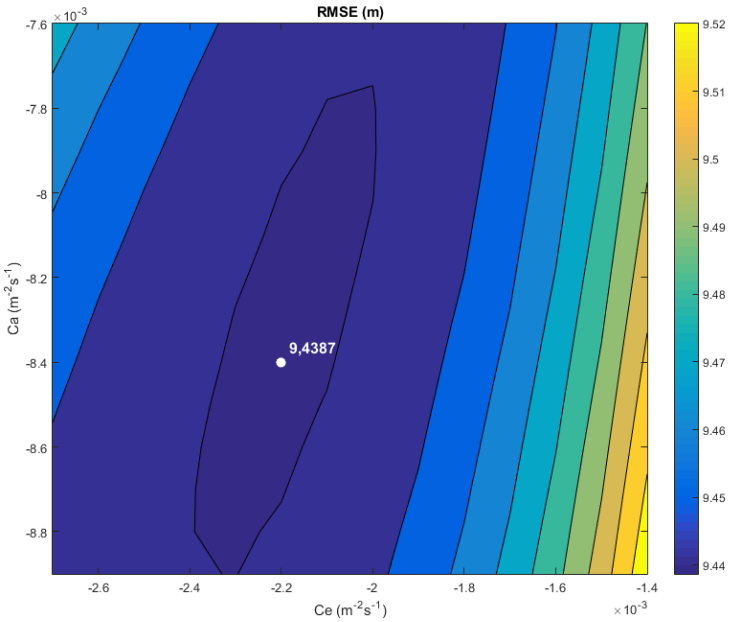


Figura 28: Error cuadrático medio (RMSE) del proceso de calibración

Con una constante de erosión, Ce, de -0,0022 $m^{-2}s^{-1}$ y una constante de acreción, Ca, de -0,0084 $m^{-2}s^{-1}$, se obtiene un error mínimo de 9,44 m.

A partir de estos valores se obtienen los siguientes resultados para el periodo de calibración (véase figura 29), y posteriormente se ha simulado la serie completa (véase capítulo de resultados).

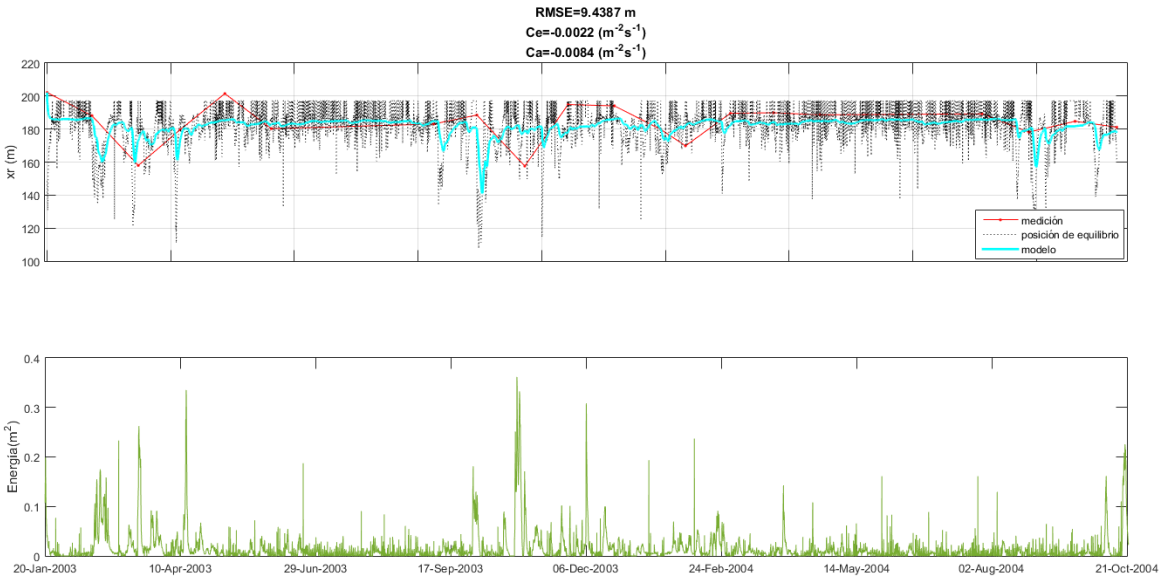


Figura 29: Comparación modelo-medición y energía del oleaje (periodo de calibración)

En esta figura se presentan las posiciones a las que tiende el equilibrio en cada momento (x_∞) junto con la posición modelada (x_r) y la medida del registro. Se puede apreciar claramente cómo el modelo representa una variación estacional, con periodos de retroceso debidos al oleaje más energético durante los meses de invierno, y periodos de avance durante los meses de verano, los cuales resultan menos energéticos.

En el panel inferior de la figura 29 se muestra ver la energía del oleaje asociada a la posición de la línea de costa, donde se puede ver cómo los picos de energía se corresponden con retrocesos de la línea de costa.

Por otro lado, para evaluar la correlación entre las medidas y el modelo, en la figura 30, se presenta el gráfico de dispersión para este intervalo. En esta figura se observa que los datos están repartidos en el gráfico, pero que la mayoría se encuentran cercanos a la bisectriz, lo que indica que existe correlación entre los datos medidos y los modelados.

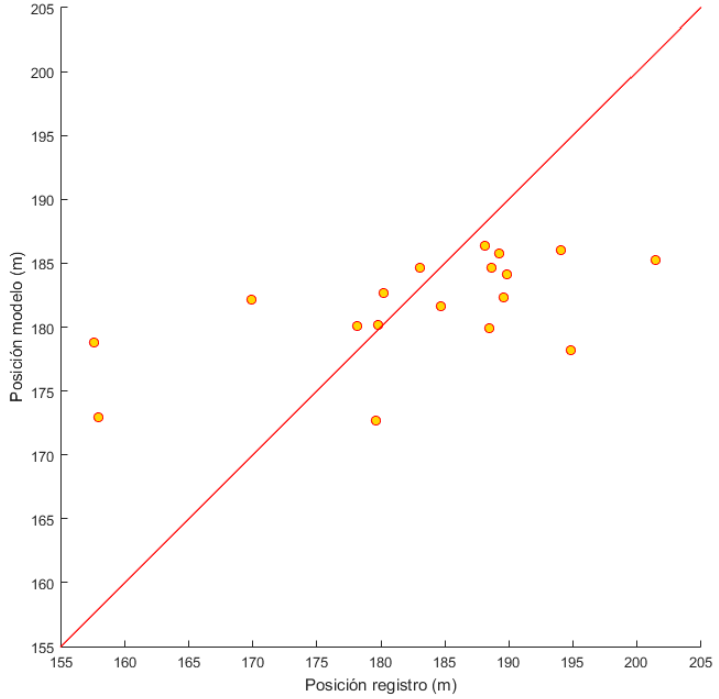


Figura 30: Gráfico de dispersión modelo-registro

Para calcular esta correlación se recurre al coeficiente de Pearson, un índice que mide el grado de variación entre distintas variables relacionadas linealmente, como:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde:

σ_{xy}: es la covarianza de x,y.

σ_x: es la desviación típica de la variable x.

σ_y: es la desviación típica de la variable y.

Y se ha obtenido un valor para este coeficiente de 0,63, valor que, según el rango establecido (ver figura 31) permite considerar esta como una correlación buena.

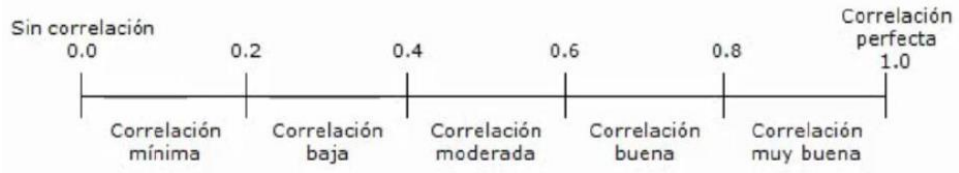


Figura 31: Rango de correlación de Pearson

6. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran, en un primer apartado, los resultados obtenidos de la modelización de la línea de costa, y en los siguientes, algunas comprobaciones llevadas a cabo para entender estos resultados.

6.1 Resultados de la modelización de la línea de costa

A continuación, se muestran los resultados de la modelización de la posición de la línea de costa en la playa de Mazagón mediante la aplicación del modelo.

En la figura 32 se presentan la posición modelada junto con la posición medida desde enero de 1999 hasta agosto de 2015.

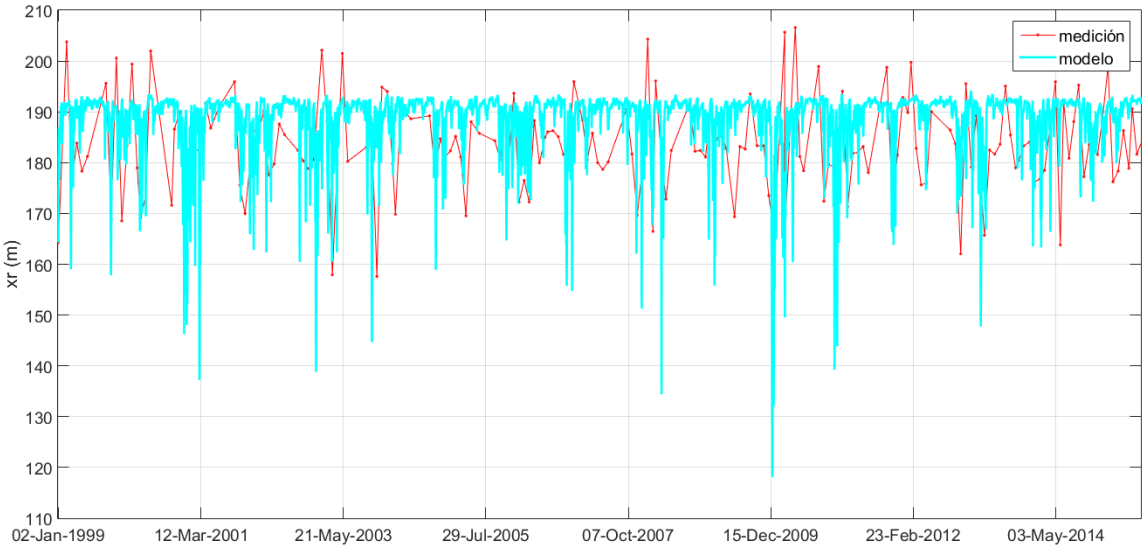


Figura 32: Resultado del modelo y posición de equilibrio (1999-2015)

En la serie completa se aprecia también la variación estacional vista en el periodo de calibración, con secuencias de acreción y de erosión, siendo estas últimas más rápidas e intensas. Además, se observa que la mayoría de las medidas se concentran entre los 170 y 190 metros, desde la referencia, pero varias de estas medidas son inferiores a 160 m, llegando a un mínimo de 120 m. Dado que el avance máximo fue establecido en 198 m para la calibración, el modelo no podrá superar nunca esta medida.

Una de las cosas a tener en cuenta es que se dispone de una medida al mes, la correspondiente a la bajamar más viva, por lo que quedan sin representar los procesos de pequeña escala. En cambio, el modelo sí representa estos procesos, ya que los datos de oleaje son horarios.

Por esto, en la figura 33 se muestra la comparación sólo para los instantes en los que se dispone de medida real.

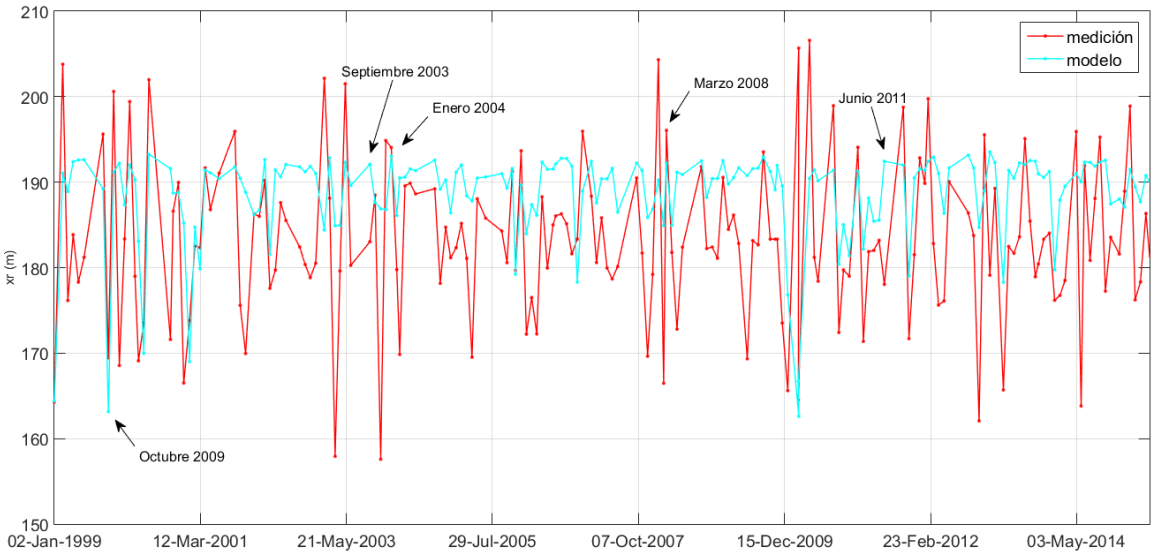


Figura 33: Comparación modelo – registro de medidas (1999-2015)

Se observa que el modelo, representado en azul, se sitúa por encima del registro medido, en rojo, pero que, aunque esté desplazado, tiene la misma tendencia. Se puede ver cómo cambian paralelamente, y en algunos momentos apenas existe diferencia.

Cabe destacar cómo en octubre de 2009 el modelo se aproximan notablemente a la medida del registro, así como en enero de 2004. También destaca cómo representa a la perfección el movimiento de la línea de costa en marzo de 2006.

En cambio, en septiembre de 2003 se ve cómo el valor del modelo es muy superior y que, en el siguiente dato, el valor es inferior, cuando debería ser mayor. De la misma manera, en junio de 2011 el valor de la distancia disminuye mientras que el registro muestra un aumento.

El modelo no tiene un rango de variación tan amplio y hay momentos en los que no llega

a la acreción o erosión que presenta el registro de medidas. Este supera los 200 m en varias ocasiones, mientras que los máximos en el modelo tan sólo llegan a los 192 m.

Por otra parte, se puede ver con más detalle cómo la acreción, que se corresponde con un aumento de la distancia desde la referencia, es un proceso más lento que la erosión, que se corresponde con una reducción de dicha distancia.

El error cuadrático medio también se ha calculado para la serie completa, resultando de 108,49 m, valor considerablemente mayor que los 9,44 m del periodo de calibración.

A modo de comparativa entre modelo y registro se presenta el gráfico de dispersión en la siguiente figura.

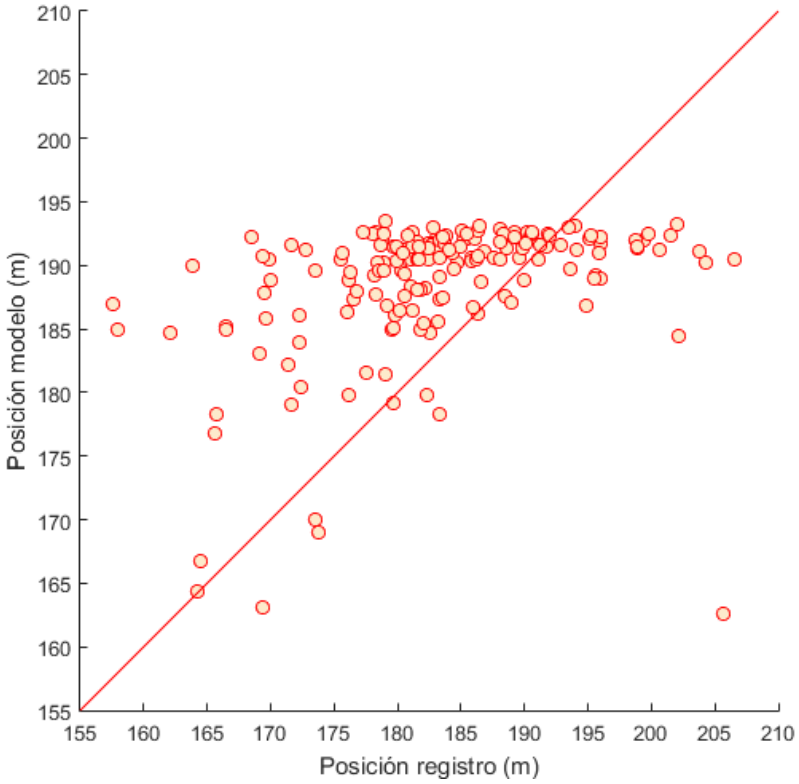


Figura 34: Gráfico de dispersión modelo-registro

En este gráfico se observa que los datos están muy repartidos y que, aunque algunos se encuentran sobre la bisectriz, la mayoría se localizan a ambos lados de esta. También se puede ver que el modelo no llega a los 195 m, mientras que el registro supera los 205 m, de lo que se deduce que el modelo no representa bien el avance de la línea de costa visible en las medidas.

El coeficiente de correlación de Pearson para la serie completa es de 0,38, que, como se veía en el apartado de calibración (figura 31), se corresponde con una correlación baja.

Con el fin de comprender los resultados, en los siguientes apartados, se analizan las posibles causas de esta discordancia.

6.2 Efecto de la presencia de barras

Tras analizar los resultados de la modelación y observar que, según las mediciones disponibles, hay momentos en los que el modelo no alcanza a representar la erosión o la acreción esperada, en este apartado se estudia la relación de la diferencia entre las medidas con el perfil de la playa, para poder encontrar una justificación.

En la figura 35 se muestra la diferencia entre la posición de la línea de costa sacada del registro de medidas y la posición obtenida con el modelo. Se observa que el rango de variación está en los ±12 m, pero destaca el dato de marzo de 2010, donde la diferencia supera los 40 m.

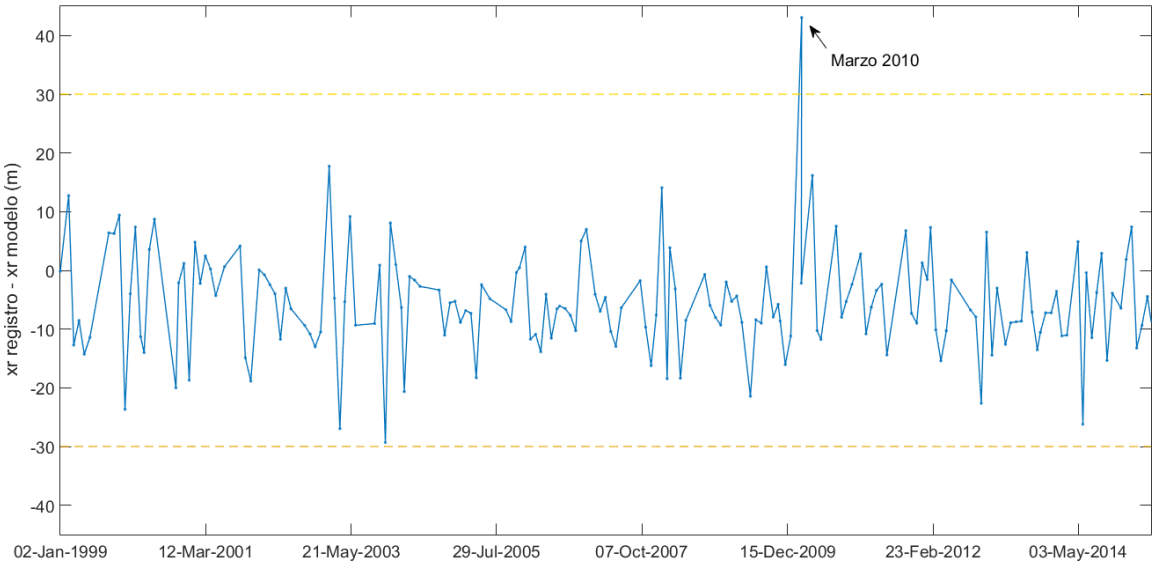


Figura 35: Diferencia entre registro y modelo (1999-2015)

Para esta fecha, en la figura 36, se presentan el perfil medido:

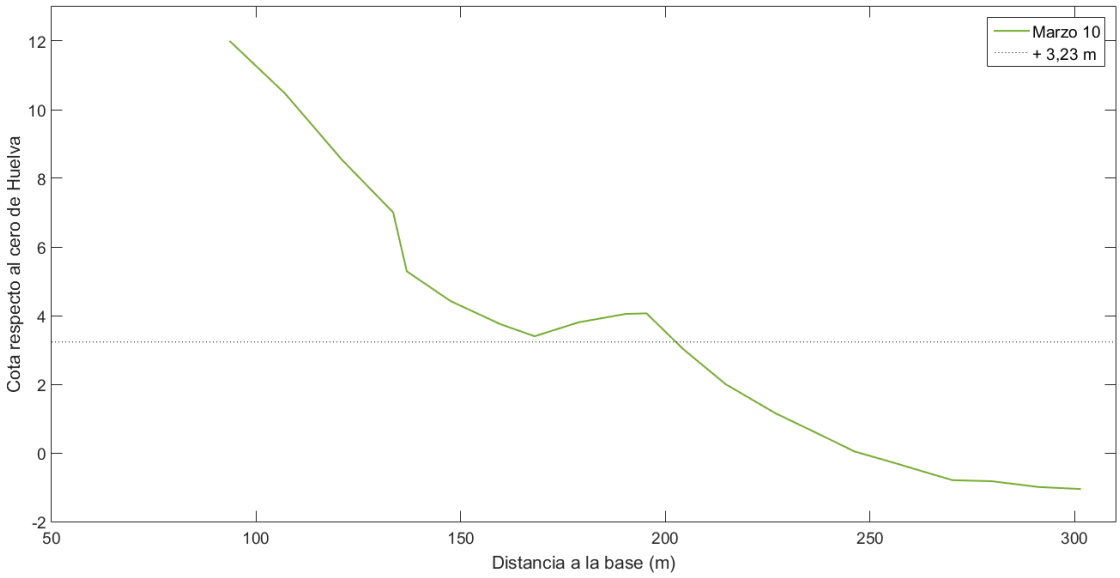


Figura 36: Perfiles correspondientes a las fechas con mayor diferencia medida-modelo

Como se ha descrito en el capítulo 2, y puede verse en la figura anterior, el perfil de la playa se caracteriza por la presencia de barras, las cuales están constantemente en movimiento.

El perfil de marzo de 2010 es un claro ejemplo de la importancia de estas, ya que presenta una barra de unos 30 m de longitud, la cual provoca que la distancia hasta la línea de costa (tomando como referencia la cota +3,23 m) pase 160 a 200 m medidos desde la referencia.

6.3 Efecto del estado morfodinámico

Los modelos de evolución morfodinámica de playas tratan de determinar la relación existente entre la morfología tridimensional de una playa con la dinámica del oleaje y el tipo de sedimento.

Las distintas formas de las playas se concretan mediante una serie de estados tipo, mientras que la dinámica y el tipo de sedimentos se integran mediante uno o varios parámetros adimensionales. Estos modelos están basados en la observación y ordenación de los diferentes estados de playa y permiten predecir la distribución de estados de una playa, conocida la distribución de las acciones del oleaje y el tipo de sedimento.

Para definir la influencia del oleaje y del tipo del sedimento en el estado de playa, se emplea el parámetro adimensional de velocidad de caída del grano, Ω, Dean (1973):

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s T}$$

Donde:

H_b: es la altura de ola significante en rotura (m).

T: es el periodo de pico en rotura (s).

ω_s: es la velocidad de caída del sedimento (m/s).

El valor de este parámetro resulta mayor en el caso de playas energéticas o que tienen un sedimento fino, playas disipativas, y por el contrario resulta menos en el caso de playas de tipo reflejante, con oleaje menos energético o sedimento grueso.

A partir de este, se pretende evaluar el efecto del estado morfodinámico de la playa en el modelo:

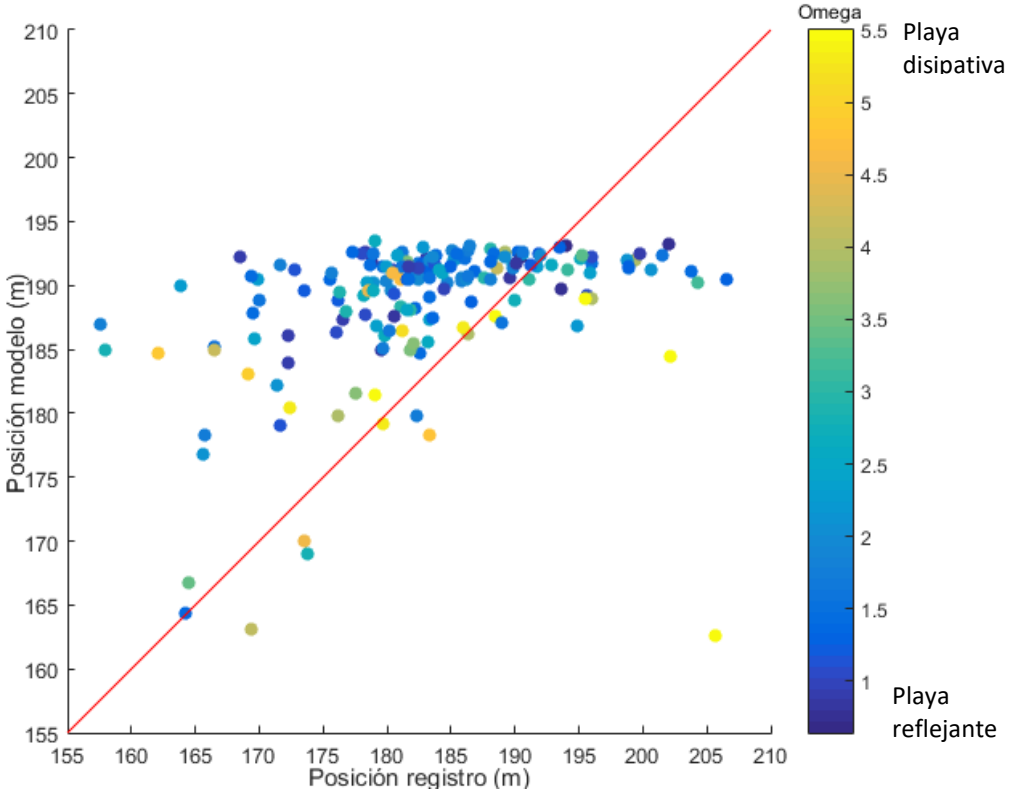


Figura 37: Gráfico de dispersión modelo-registro con su correspondiente valor de Ω

A partir de este gráfico se puede observar que los estados más disipativos están mejor modelados, ya que se encuentran más próximos a la bisectriz y repartidos a ambos lados de esta. En cambio, los estados reflejantes, en su mayoría, están al mismo lado, es decir que se sobrevaloran sistemáticamente con el modelo.

6.4 Efecto de la marea

Uno de los aspectos estudiados a lo largo de este trabajo fin de máster es el efecto de la marea en el perfil de playa. En las playas sin marea el perfil se desarrolla para un nivel medio fijo, de modo que la influencia de la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje se concentra en una sección reducida del perfil, el frente de playa.

El efecto de la marea en la morfodinámica de las playas con una carrera de marea importante fue resumido por Masselink y Short (1993) en los siguientes puntos:

1. El incremento de la carrera de marea relativa disminuye la velocidad con que se producen los procesos de transporte y cambio de morfología de la playa, dado que cada parte del perfil intermareal sólo está sometida durante un porcentaje del tiempo a la acción dinámica del oleaje, y la energía de éste debe repartirse sobre una mayor longitud del perfil.

2. El incremento de la carrera de marea relativa produce un incremento de la importancia relativa de los procesos de asomeramiento sobre los de rotura y ascenso-descenso, lo que se traduce en pendientes de playa inferiores.

3. En las playas intermedias, pequeñas carreras de marea relativas inhiben la formación de los estados de barra longitudinal y seno, y de barra y playa rítmicas, favoreciendo la formación del estado de barra transversal y corriente de retorno (ver Vidal, Losada, Medina, y Losada, 1995). En todo caso la topografía de las barras es menos acentuada y, en general, sólo son activas en las proximidades de la bajamar. Incrementos aún mayores de la carrera de marea en las playas intermedias llevan a la desaparición por completo de las barras, generando un tipo de playa denominado por Masselink y Short como ultradisipativas. En las

playas disipativas, el aumento de la carrera de marea relativa provoca la desaparición de los sistemas de barras, llegándose a perfiles ultradisipativos. En las playas reflejantes, el incremento de la carrera de marea lleva a perfiles de playa con terraza de bajamar, bastante disipativos en marea media y baja.

4. Las corrientes de retorno y las corrientes de resaca de las playas intermedias aumentan en las proximidades de la bajamar, disminuyendo o desapareciendo completamente en pleamar.

5. En las playas con carreras de marea grandes, o en las proximidades de entradas a los estuarios, las corrientes paralelas a la playa de carácter cíclico debidas a la dinámica mareal pueden jugar un papel importante en la dinámica del transporte longitudinal de sedimentos, especialmente en la parte baja de la zona intermareal.

Teniendo en cuenta esto, en las playas con marea, la posición de la línea de costa varía constantemente, siendo su morfología dependiente tanto de la altura de ola como del rango de marea.

Para poder aplicar el modelo a playas de tipo macromareal, el oleaje debe ser propagado desde el punto DOW considerando un nivel del mar variable, asociado a cada estado de mar teniendo en cuenta tanto la marea astronómica como la meteorológica.

Con el fin de comprender el efecto de la marea en el caso de estudio, en la playa de Mazagón, se comprobó la diferencia producida en la línea de costa si se varía la cota de referencia. Para ello, se obtuvieron las líneas de costa a partir de las medidas de los perfiles para las cotas de 1,50, 2,00 y 3,00 m, presentadas en la siguiente figura.

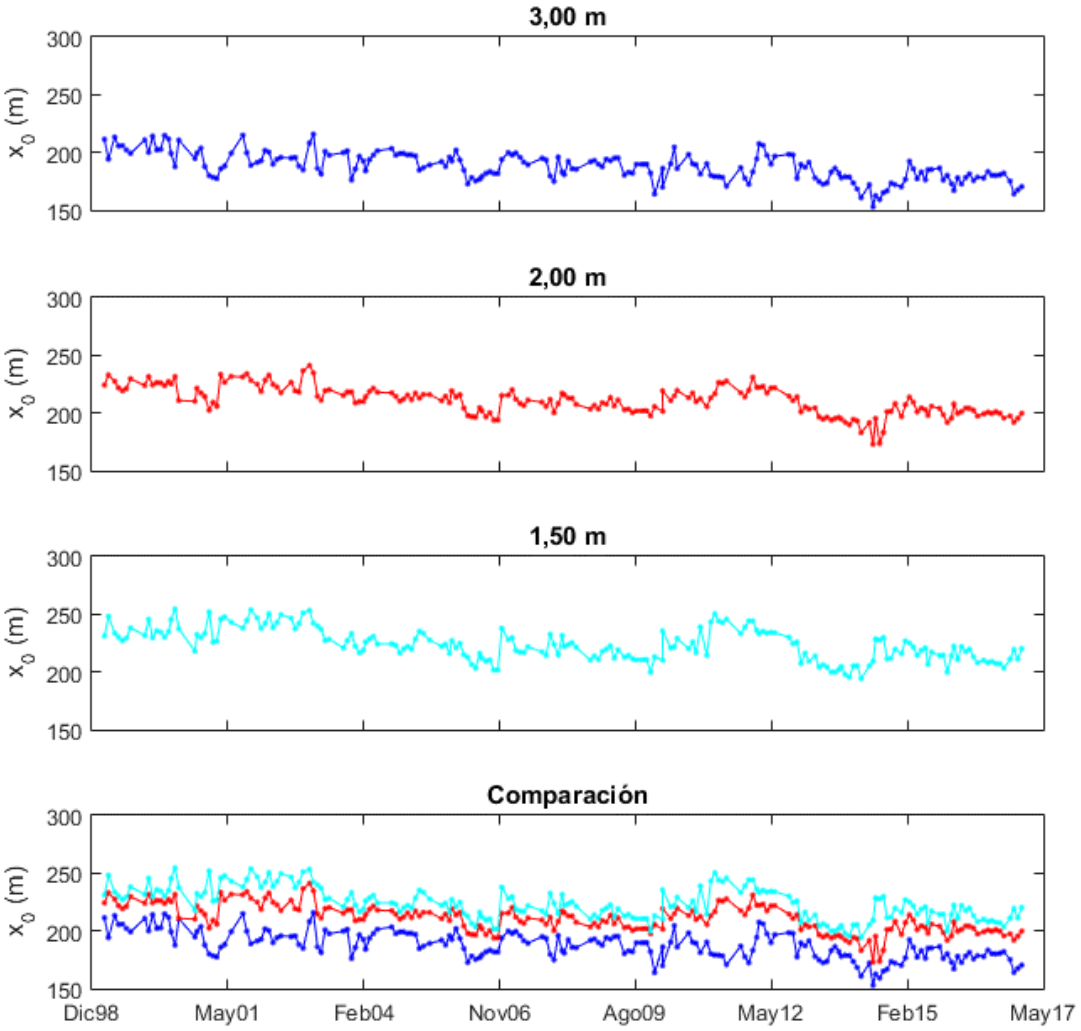


Figura 38: Evolución de la línea de costa 1998-2017

Se observa que la distancia desde el punto de referencia resulta menor cuanto mayor es la cota, pero que la línea de costa varía de la misma forma (avanza-retrocede) en las tres situaciones. Tan sólo se observa alguna diferencia a mediados del año 2011 y a principios del 2015.

Por tanto, el efecto de la marea no es significativo para el proceso estudiado, siendo suficiente la evaluación de la línea de costa en pleamar. Además, se verifica la consideración de la playa de Mazagón como mesomareal.

6.5 Procesos long-shore y variabilidad estacional

El oleaje en la zona estudiada tiene predominancia suroeste, con lo que se ha obtenido el flujo medio de 215º con respecto al Norte. Como puede verse en la figura 39, este

flujo no es del todo perpendicular a la línea de costa, por lo que se producen corrientes longitudinales que pueden provocar transporte de sedimento a lo largo de la playa. Por tanto, como último punto, se contempla el posible efecto que tienen los procesos longitudinales a la costa.

Figura 39: Dirección del flujo medio en la playa de Mazagón

Las fotografías de la zona (ver figura 11) muestran la presencia de barras crescénticas que viajan longitudinalmente función de la dirección del oleaje.

Este movimiento de las barras genera una señal en la posición cross-shore que lógicamente no puede ser determinada por un modelo bidimensional.

Si bien se tiene constancia de que ese movimiento existe, no es posible con los datos de un solo perfil su caraterización ni evaluación.

Por tanto, la variación estacional del transporte longitudinal podría ser uno de los motivos por los que hay instantes en los que el modelo no llega a la erosión o acreción esperada.

7. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las principales conclusiones encontradas durante la elaboración del trabajo.

Tras el tratamiento previo de los datos se concluye que:

- La playa de Mazagón está sufriendo un fuerte retroceso, estimado en 30 m durante los últimos 20 años.
- La formulación de Hallermeier que permite calcular la profundidad de cierre del perfil de playa subestima este dato.

En cuanto a la calibración:

- Tras analizar el efecto de los invariantes en el modelo propuesto por Jara et al. (2015) se comprueba que este es muy sensible a los cambios.
- Se observa que un tamaño de grano mayor la playa resulta más rígida, es decir, con una menor variación en la posición de la línea de costa, y que, con un tamaño de sedimento menor, la playa resulta más flexible, y por tanto la variación en la posición de la línea de costa es mayor.
- También se observa que cuanto mayor sea la distancia al punto de cierre la playa resulta más flexible, mientras que, con una distancia menor, la playa resulta más rígida.
- Por tanto, en la playa de Mazagón no resulta aplicable el modelo propuesto por Martínez et al. (2015), por lo que se la curva de energía de equilibrio se calibra con el método de Yates et al. (2009).

Y en cuanto a los resultados:

- El modelo reproduce de forma aceptable la variación de la línea de costa, pero en ocasiones no representa la acreción o erosión esperada.

- El perfil de la playa presenta barras cuyo movimiento puede alterar la medida de la posición de la línea de costa.

- Para estados de playa disipativos la correlación modelo-medición es superior que para los estados más reflejantes.

- El efecto de la marea en el caso del perfil de la playa de Mazagón resulta despreciable, aunque puede ser relevante en casos puntuales.

- El efecto de los procesos longitudinales no se tiene en cuenta en el modelo cross-shore, pero estos pueden tener influencia en el perfil, y por tanto en la medida de la línea de costa.

- Se podría mejorar la calibración si se incluyesen en el algoritmo los cuatro parámetros de la parábola de energía de equilibrio, para lo que se requieren conocimientos más avanzados. Como, por ejemplo, en "Optimization by Simulated Annealing" de Kirkpatrick et al. (1983).

Este trabajo fin de máster deja en el aire una serie de análisis que podrían llevarse a cabo en futuros estudios, los cuales se relacionan en el siguiente capítulo.

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Durante el desarrollo del presente trabajo fin de máster se han planteado una serie de posibles nuevas líneas de trabajo, a saber:

- Mejorar el método de calibración incluyendo los parámetros de la parábola de la EEF (Equilibrium Energy Function).
- Introducir la variación del nivel del mar variable como forzamiento del modelo heurístico de cross-shore.
- Aplicar el modelo de Jara et al. (2015) de evolución de la línea de costa en otras playas de tipo mesomareal, como la playa de Mazagón, para evaluar su empleabilidad.
- Analizar el movimiento de las barras presentes en la playa.
- Realizar un balance sedimentario de la playa de Mazagón para ver el efecto de los procesos longitudinales a la costa (long-shore), para así tener en cuenta esta componente que no se ha considerado en el presente estudio, y así mejorar los resultados de la modelación. Por ejemplo, con un modelo tipo one-line.

9. BIBLIOGRAFÍA

Jara M.S.; M. González; R. Medina, 2015. *SHORELINE EVOLUTION MODEL FROM A DYNAMIC EQUILIBRIUM BEACH PROFILE.* (Coastal Engineering vol. 99, págs. 1–14).

Instituto de Hidráulica Ambiental (Universidad de Cantabria), 2017. *SEGUIMIENTO DEL RECUBRIMIENTO DE LA TUBERÍA DEL GASODUCTO DEL CAMPO POSEIDÓN EN EL TRAMO DE ENTRONQUE CON LA COSTA. (Informe de la campaña nº199)*.

M. L. Yates; R. T. Guza; W. C. O'Reilly, 2009. *EQUILIBRIUM SHORELINE RESPONSE: OBSERVATIONS AND MODELING*. (Journal of Geophysical Research vol. 114, C09014).

M. A. Davidson; K. D. Splinter; I. L. Turner, 2013. *A SIMPLE EQUILIBRIUM MODEL FOR PREDICTING SHORELINE CHANGE.* (Coastal Engineering vol. 73, págs. 191–202).

L. D. Wright; A.D. Short, 1984. *MORPHODYNAMIC VARIABILITY OF SURF ZONES AND BEACHES: A SYNTHESIS. (Mar. Geol. 56, págs. 93-118).*

R. Iribarren, 1958. *INFORME ACERCA DE LA DEFENSA DE LAS COSTAS Y PLAYAS DE LA CIUDAD DE CARTAGENA (COLOMBIA).*

A. M. Bernabeu: R. Medina; C. Vidal, 2003. *WAVE REFLECTION ON NATURAL BEACHES: AN EQUILIBRIUM BEACH PROFILE MODEL.* (Estuarine, Coastal and Shelf Science vol. 57, págs. 577–585).

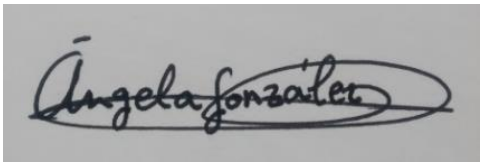
G.I.O.C. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (Universidad de Cantabria). *DOCUMENTO TEMÁTICO. REGENERACIÓN DE PLAYAS.* (Libro publicado por Ministerio de Medio Ambiente Dirección General de Costas).

C. Vidal; M. A. Losada; R. Medina; I. Losada, 1995. *MODELOS DE MORFODINÁMICA DE PLAYAS.* (Ingeniería del Agua vol. 2 Núm. Extraordinario, págs. 55-74).

Universidad Complutense de Madrid, 2013. *MODELIZACIÓN CON DATOS DE SERIES TEMPORALES.* (Apuntes de la asignatura “Econometría” para el Grado en Economía, tema 6).

S. Kirkpatrick; C. D. Gelatt; M. P. Vecchi, 1983. *OPTIMIZATION BY SIMULATED ANNEALING.* (Science, New Series, vol. 220, págs. 671-680).

Santander, octubre de 2017

La autora del trabajo:

Ángela González del Campo