



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

**APLICACIÓN DE UN MODELO DE
EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA
TENDENTE AL EQUILIBRIO A LA
EVOLUCIÓN DE PLAYAS EN LA
ESCALA DEL LARGO PLAZO**

Realizado por:

Juan Jesús Viadero Andrés

Dirigido por:

Raúl Medina Santamaría

Camilo Jaramillo Cardona

Titulación:

Máster Universitario en Costas y Puertos

Santander, noviembre de 2019

TRABAJO FIN DE MÁSTER

RESUMEN

El presente trabajo fin de máster surge a raíz de un dictamen elaborado en 2010 por IH-Cantabria a petición de la Autoridad Portuaria de Bilbao, cuyo objetivo era determinar la influencia de los temporales del período 2006-2009 en la morfología de la playa de La Arena (Bizkaia).

Los autores del informe compararon la situación ocurrida en la playa de La Arena con la sucedida en otras playas del País Vasco a través de imágenes satelitales. Este análisis mostró similitudes en la respuesta de todas las playas, concluyendo dicho dictamen que la situación de erosión se debía principalmente a la variabilidad del oleaje y la persistencia de temporales que sufrieron en general las playas de la costa Cantábrica.

Tras analizar la correlación entre los parámetros del oleaje (altura de ola, periodo, energía y frecuencia de temporales) y la posición que presentaba la línea de costa, y no encontrar una vinculación directa, surgieron una serie de dudas, como la incertidumbre de ser el oleaje el forzador principal de ese movimiento, o si la historia de la evolución de la playa condicionaba la falta de esa correlación.

Posteriormente, entre los años 2009 y 2015 se han desarrollado varios modelos de evolución de la línea de costa basados en el equilibrio, que expresan una relación biunívoca entre la energía del oleaje, la posición de la línea de costa y la historia de esta evolución (Yates et al. 2009; Davidson et al. 2010; 2013; Castelle et al. 2014; Jara et al. 2015, etc.). La bondad de estos modelos a ofrecer una respuesta aproximada de la evolución que sigue la línea de costa ha sido validada en la escala del corto plazo, sin quedar demostrado que su comportamiento en el largo plazo resulte igualmente válido.

Bajo estas dos premisas y utilizando la información disponible en el momento en que fue realizado el dictamen, el objetivo de este trabajo consiste en analizar y evaluar el comportamiento del modelo de evolución propuesto por Yates et al. (2009), al ser aplicado en el largo plazo.

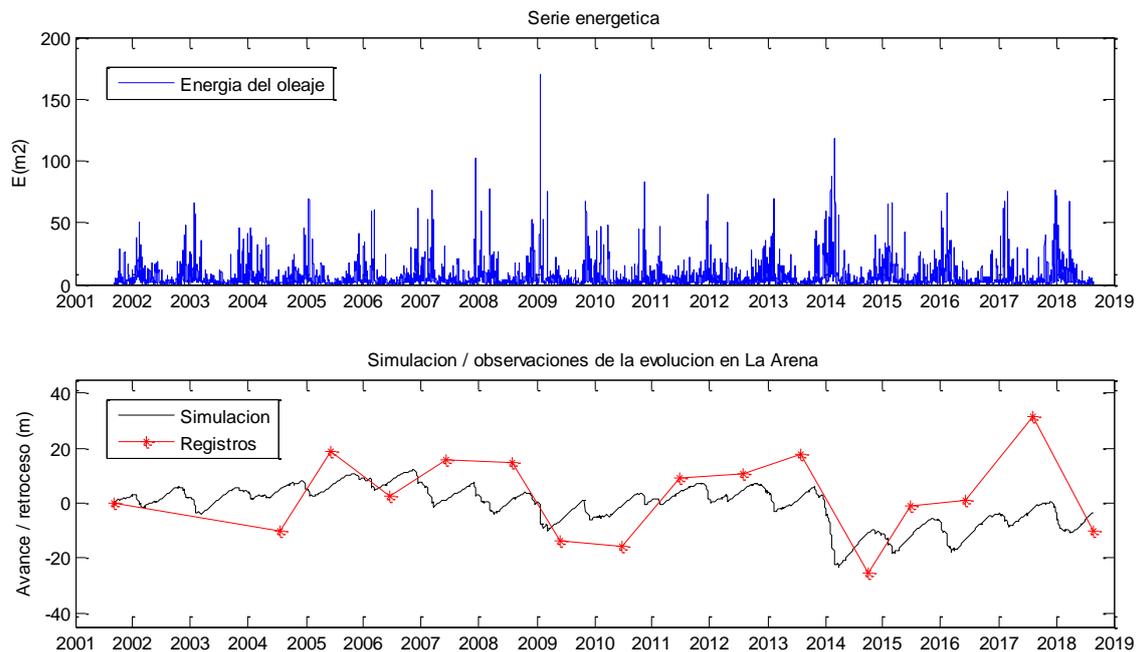
Para ello, se han seleccionado seis de las playas analizadas en el dictamen de 2010, caracterizadas todas ellas por estar abiertas al oleaje, afectadas por un clima marítimo muy energético y ser macromareales.

Como forzamiento del modelo se ha utilizado el oleaje en profundidades indefinidas en términos de energía horaria. Para la calibración y validación se ha obtenido una línea de costa anual entre

el 2001 y el 2018 a partir de imágenes satelitales, tratadas con la herramienta de información geográfica ArcGIS.

Una vez obtenidos los resultados del modelo, las posiciones de la línea de costa simuladas se comparan con las posiciones observadas en las imágenes y se concluyen varios aspectos:

- Existe una gran incertidumbre a la hora de medir la posición de la línea de costa a partir de imágenes satelitales.
- El modelo reproduce de forma aceptable la tendencia que sigue la evolución de la línea de costa a largo plazo.
- La energía del oleaje es el principal mecanismo forzador en la variabilidad que sufre la línea de costa incluso en el largo plazo.
- El modelo no reproduce de forma fiable la variabilidad estacional.
- Factores adicionales a la energía del oleaje (que no son contemplados por el modelo), como son la presencia de barras transversales o el efecto de la marea, determinan en gran medida la posición de la línea de costa.



Serie de la energía del oleaje comparada con la evolución de la línea de costa observada en la playa de La Arena (Bizkaia) y la simulada por el modelo.

ABSTRACT

This master's degree project arose from a report developed by IH-Cantabria in 2010 at the request of the Port Authority of Bilbao, whose objective was to determine the influence of storm waves in the period 2006-2009 on the morphology of La Arena beach (Bizkaia).

The authors of the report compared the situation on La Arena beach with that on other beaches in the Basque Country using satellite images. This analysis showed similarities in the response of all the beaches, concluding that the situation of erosion was mainly due to the variability of the waves and the persistence of storms suffered in general by the beaches of the Cantabrian coast.

After analysing the correlation between the wave parameters (wave height, period, energy and frequency of storms) and the shoreline position, and not finding a direct link, a series of doubts emerged, such as the uncertainty of the waves being the main force behind this movement, or whether the history of the beach evolution conditioned the lack of this correlation.

Subsequently, between 2009 and 2015 several shoreline evolution models based on equilibrium conditions have been developed, which express a biunivocal relationship between wave energy, coastline position and the history of this evolution (Yates et al. 2009; Davidson et al. 2010; 2013; Castelle et al. 2014; Jara et al. 2015, etc.). The goodness of these models to offer an approximate response of the evolution that follows the coastline has been validated in the short-term scale, without demonstrating that their behavior in the long term is equally valid.

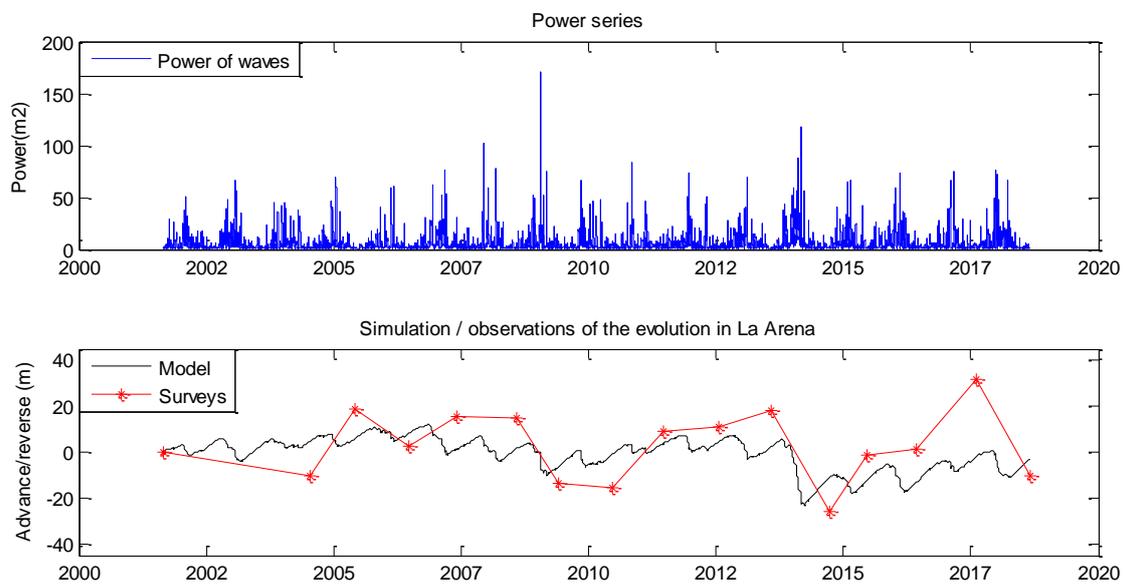
Under these two premises and using the information available at the time the report was made, the aim of this work is to analyse and evaluate the behaviour of the evolution model proposed by Yates et al., (2009), when applied in the long term.

To this end, six of the beaches analysed in the 2010 report have been selected, all of them characterised by being exposed to the incoming waves, affected by a very energetic maritime climate and being macrotidal.

Hourly time series of energy of deep water conditions have been considered as model forcing. In order to calibrate and validate the selected model, an annual coastline has been obtained between 2001 and 2018 from satellite images treated with the ArcGIS geographic information tool.

Once the model results are obtained, the simulated shoreline positions are compared with the positions observed in the images and several aspects are concluded:

- There is relevant uncertainty when measuring shoreline position from satellite imagery.
- The model reproduces in an acceptable way the trend that follows the evolution of the coastline in the long term.
- Wave energy is the main forcing mechanism in the variability that the coastline suffers even in the long term.
- The model does not reliably reproduce seasonal variability.
- Factors additional to wave energy (which are not covered by the model), such as the presence of sandbars or the tide effect, largely determine the shoreline position.



Series of wave energy compared with the evolution of the coastline observed at La Arena beach (Bizkaia) and that simulated by the model.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Motivación	11
1.2. Objetivos	14
1.3. Estado del arte	14
1.4. Información utilizada	17
1.4.1. Dinámicas marinas	17
1.4.2. Imágenes satelitales	17
1.5. Organización del estudio.....	18
2. ZONA DE ESTUDIO.....	19
2.1. Localización	19
2.2. Características de las playas seleccionadas	20
2.3. Dinámicas marinas	20
2.3.1. Oleaje	21
2.3.2. Marea astronómica	25
3. METODOLOGÍA.....	26
3.1. Obtención de la línea de costa.....	27
3.1.1. Líneas de costa	27
3.1.2. Línea base.....	30
3.1.3. Transectos	30
3.1.4. Extracción de indicadores	31
3.2. Modelo numérico.....	32
4. LÍNEA DE COSTA	37
5. RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO	41
5.1. Correlación entre la energía del oleaje y la posición de la línea de costa en el equilibrio	41
5.2. Calibración de las constantes de acreción y erosión	43

5.3.	Simulación continua de la evolución de la línea de costa.....	45
5.4.	Simulación discreta de la evolución de la línea de costa	47
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
6.1.	Aspectos singulares.....	50
6.2.	Discusión y posibles fuentes de error	51
7.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	57
8.	REFERENCIAS.....	60
	ANEXO I. PLAYAS ANALIZADAS.....	63
	ANEXO II. DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE REANÁLISIS DEL OLEAJE GOW.....	70

Índice de figuras

<i>Figura 1. Portada y conclusiones del dictamen elaborado por IH-Cantabria a petición de la Autoridad Portuaria de Bilbao.</i>	12
<i>Figura 2. Comparación de la situación ocurrida en la playa de La Arena con la sucedida en otras playas del País Vasco (obtenidas del dictamen de 2010).</i>	13
<i>Figura 3. Mapa de la Península Ibérica. Al norte, limitado por un rectángulo blanco, el área de estudio.</i>	19
<i>Figura 4. Mapa del área de estudio, con la localización de las playas.</i>	20
<i>Figura 5. Rosa de oleaje.</i>	21
<i>Figura 6. Diagrama de correlación Hs-Tm.</i>	22
<i>Figura 7. Función de distribución de Hs.</i>	22
<i>Figura 8. Función de distribución acumulada de Hs.</i>	23
<i>Figura 9. Altura de ola y energía del oleaje durante el periodo de estudio.</i>	23
<i>Figura 10. Frecuencia de ocurrencia de estados de mar con Hs superior a un valor.</i>	24
<i>Figura 11. Función de densidad de la marea astronómica.</i>	25
<i>Figura 12. Función de distribución de la marea astronómica.</i>	25
<i>Figura 13. Organigrama que describe la metodología.</i>	26
<i>Figura 14. Ubicación de la línea de costa en la interfaz arena seca - húmeda.</i>	28
<i>Figura 15. Posición de la línea de costa; Izq. Usuarios de la playa. Dcha. Depósito de algas.</i>	29
<i>Figura 16. Líneas de costa formando una única entidad.</i>	29
<i>Figura 17. Línea de base o baseline creada por el usuario.</i>	30
<i>Figura 18. Transectos cada 50 m generados a partir de la baseline.</i>	31
<i>Figura 19. Intersecciones entre los transectos y las diferentes líneas de costa.</i>	32
<i>Figura 20. Velocidad de cambio de la posición de la línea de costa frente a la posición inicial de la línea y a la energía media del oleaje entre mediciones, tomada de Yates et al. (2009).</i>	33
<i>Figura 21. Posiciones de la línea de costa registradas para cada playa respectivamente.</i>	37
<i>Figura 22. Avances y retrocesos medidos en la línea de costa (a).</i>	38
<i>Figura 23. Avances y retrocesos medidos en la línea de costa (b).</i>	39
<i>Figura 24. Correlación entre la energía del oleaje y la posición de la línea de costa en el equilibrio.</i>	42
<i>Figura 25. Calibración de las constantes de acreción y erosión.</i>	44
<i>Figura 26. Simulación continua de la evolución que produce el modelo junto con las observaciones medidas.</i>	46
<i>Figura 27. Simulación de la evolución de la línea de costa en la playa de Zarautz.</i>	47
<i>Figura 28. Simulación discreta de la evolución que produce el modelo junto con las observaciones medidas.</i>	48
<i>Figura 29. Paseo marítimo construido sobre la playa en la playa de Zarautz. Línea de costa observada en 2007.</i>	52
<i>Figura 30. Estado morfodinámico intermedio en La Arena y Barinetxe (2014).</i>	53
<i>Figura 31. Nivel de marea astronómica.</i>	54

<i>Figura 32. Nivel de marea astronómica en la fecha de las observaciones de 2005 y 2009.</i>	54
<i>Figura 33. Serie de la energía del oleaje comparada con la evolución de la línea de costa observada y la simulada por el modelo en la playa de La Arena.</i>	57
<i>Figura 34. Playa de la Arena (Muskitz).</i>	64
<i>Figura 35. Playa Barinetxe (Sopelana).</i>	65
<i>Figura 36. Playa Arrietara (Sopelana).</i>	66
<i>Figura 37. Playa de Bakio (Bakio).</i>	67
<i>Figura 38. Playa Laga (Lagaburu).</i>	68
<i>Figura 39. Playa de Zarautz (Zarautz).</i>	69

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Ejemplo de diferentes ecuaciones cinéticas de equilibrio que gobiernan los modelos de evolución de la línea de costa.</i>	15
<i>Tabla 2. Rango de correlación de Pearson.</i>	36
<i>Tabla 3. Distancias medidas desde la referencia para cada año.</i>	40
<i>Tabla 4. Valores de los parámetros que proporcionan un mejor ajuste a la recta de equilibrio.</i>	43
<i>Tabla 5. Valores de las constantes de acreción y erosión.</i>	45
<i>Tabla 6. Error medio cuadrático y coeficiente Pearson entre observaciones y modelo.</i>	49
<i>Tabla 7. Características de la playa de La Arena.</i>	64
<i>Tabla 8. Características de la playa Barinetxe.</i>	65
<i>Tabla 9. Características de la playa Arrietara.</i>	66
<i>Tabla 10. Características de la playa de Bakio.</i>	67
<i>Tabla 11. Características de la playa Laga.</i>	68
<i>Tabla 12. Características de la playa de Zarautz.</i>	69

1. INTRODUCCIÓN

Este primer capítulo sirve como introducción al entorno de la evolución de las playas, buscando una reflexión en cuanto a la variabilidad que acusa la posición de la línea de costa y los factores que la determinan.

Se comenzará planteando la motivación a la realización de este estudio, consistiendo esta en una exposición de las causas que han llevado a su ejecución.

A continuación, se enuncian los objetivos que se pretenden conseguir, acompañados de un repaso a la literatura actual.

Posteriormente, se presenta la información que se ha utilizado para lograr los objetivos establecidos.

Por último, se establece la estructura del documento, indicando brevemente que se puede encontrar en cada capítulo del informe.

1.1. Motivación

En mayo de 2010 la Autoridad Portuaria de Bilbao se dirigió al Instituto de Hidráulica Ambiental (IH-Cantabria), al objeto de realizar un análisis que pudiera determinar las causas del retroceso que la línea de costa de la playa de La Arena, en Bizkaia, venía mostrando en los últimos años.

Como respuesta a esa solicitud, IH-Cantabria redactó el “DICTAMEN SOBRE LA EXCEPCIONALIDAD DEL OLEAJE EN EL PERIODO 2005-2009 Y SU INFLUENCIA EN LA MORFOLOGÍA DE LA PLAYA DE LA ARENA, BIZKAIA” (ver Figura 1).



Figura 1. Portada y conclusiones del dictamen elaborado por IH-Cantabria a petición de la Autoridad Portuaria de Bilbao.

En ausencia de un modelo conceptual y numérico que ayudase a determinar ese retroceso, los autores del informe analizaron la evolución de los últimos años de la playa de La Arena, buscando una correlación entre los parámetros del oleaje (altura de ola, periodo, energía y frecuencia de temporales) y la posición que presentaba la línea de costa.

Tras no encontrar una correlación directa entre ambos fenómenos, surgieron una serie de dudas, como la incertidumbre de ser el oleaje el principal forzador de ese movimiento, o si la historia de la evolución de la playa condicionaba la falta de esa correlación entre oleaje y posición de la línea de costa.

El equipo del IH-Cantabria, haciendo uso de las herramientas que disponía en aquel momento, analizó y determinó la evolución de la playa de La Arena por medio de fotografías aéreas, explicando su relación con las características del oleaje sucedido en cada periodo analizado.

Como resultado final, tras comparar la situación ocurrida en la playa de La Arena con la sucedida en otras playas del País Vasco y Asturias, se mostraron similitudes en sus respuestas ante los temporales de esos últimos años, explicando de esta manera la situación de erosión que sufrieron en general las playas de la costa Cantábrica.



Figura 2. Comparación de la situación ocurrida en la playa de La Arena con la sucedida en otras playas del País Vasco (obtenidas del dictamen de 2010).

Posteriormente, entre los años 2009 y 2015 se desarrolla un importante conjunto de modelos de evolución de la línea de costa basados en el equilibrio, que expresan una relación directa entre la energía del oleaje, la posición de la línea de costa y la historia de esta evolución (Yates et al. 2009; Davidson et al. 2010; 2013; Castelle et al. 2014; Jara et al. 2015, etc.).

Estos modelos, que se explicaran con más detalle en el apartado 1.3. Estado del arte, han sido desde entonces utilizados en multitud de playas de todo el mundo, siempre calibrados con una importante cantidad de datos de gran resolución, en un periodo de tiempo corto (desde semanas a pocos años) que permite una correcta calibración de sus parámetros libres.

La bondad de estos modelos a ofrecer una respuesta aproximada de la evolución que sigue la línea de costa ha sido validada en la escala del corto plazo, sin quedar demostrado que su comportamiento en el largo plazo resulte igualmente válido a día de hoy.

Bajo este contexto, el presente trabajo fin de máster combina los dos antecedentes expuestos, tratando de optimar la respuesta a la problemática de la Autoridad Portuaria, haciendo uso de las técnicas disponibles en la actualidad y que han sido desarrolladas con posterioridad a la redacción de dicho dictamen.

1.2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo consiste en analizar y evaluar el comportamiento de un modelo de evolución de línea de costa tendente al equilibrio (en concreto, el propuesto por Yates et al., 2009) al ser aplicado en el largo plazo.

Concretamente se desea conocer si el modelo, validado en el corto plazo, es capaz de representar la evolución que sigue la línea de costa en un periodo de decenas de años, basándose en la disponibilidad de imágenes satelitales con la que se contaba en el momento en que fue redactado el dictamen sobre la playa de La Arena.

Para llevar a cabo el objetivo general se hace necesario cumplir una serie de objetivos específicos:

- Establecer y aplicar un criterio de ubicación de la línea de costa a partir de imágenes satelitales.
- Aplicar el modelo de evolución propuesto por Yates et al. (2009) a las playas seleccionadas.
- Evaluar la eficacia del modelo a partir de los resultados obtenidos.
- Presentar las diferencias que resultan de comparar los resultados ofrecidos por el modelo con los datos medidos.

1.3. Estado del arte

Según Jaramillo et al. (2019), en la literatura actual, existe una extensa lista de diferentes tipos de modelos que simulan la evolución de la línea de costa:

- Modelos multilínea (por ejemplo: Bakker, 1970; Perlin y Dean, 1979; 1983; Hanson y Larson, 2000).
- Modelos de una línea o *one-line* (por ejemplo: Pelnard-Considerere, 1956; Hanson y Kraus, 1991; Dabees y Kamphuis, 1998).
- Modelos de equilibrio (por ejemplo: Kriebel y Dean, 1993; Yates et al., 2009; Davidson et al., 2010; 2013; Jara et al., 2015)
- Modelos combinados (por ejemplo: Vitousek et al., 2017; Robinet et.al, 2017; 2018).

El coste computacional de los modelos morfodinámicos basados en procesos (Van Rijn et al., 2003) impide su aplicación a cambios morfológicos plurianuales o incluso interanuales. Por el contrario, los modelos de evolución de la línea de costa tendentes al equilibrio son

computacionalmente eficientes y pueden aplicarse para investigar cambios morfológicos a largo plazo (Davidson y Turner, 2009).

A continuación, se expone un resumen de la literatura más actualizada relacionada con los modelos de evolución de posición de línea de costa tendentes al equilibrio, presentado recientemente por Jara et al. (2018) en el artículo científico *“Time-Varying Beach Memory Applied to Cross-Shore Shoreline Evolution Modelling”*.

En la literatura se pueden encontrar modelos tendentes al equilibrio capaces de predecir la evolución de la línea de costa correspondiente al transporte de sedimentos *cross-shore*. La mayoría de ellos se rigen por diferentes versiones de una ecuación cinética (ver Tabla 1) que relaciona la tasa de cambio de la línea de costa hacia el estado de equilibrio con el estado existente de desequilibrio.

Tabla 1. Ejemplo de diferentes ecuaciones cinéticas de equilibrio que gobiernan los modelos de evolución de la línea de costa.

Modelo de evolución	Ecuación de gobierno para la velocidad de cambio de la línea de costa
Kriebel y Dean (1993)	$\frac{dS(T)}{dT} = K \times (\Delta S)$ (Ec. 1)
Yates et al. (2009)	$\frac{dS(T)}{dT} = C^{\pm} \times E^{\frac{1}{2}} \times (\Delta E)$ (Ec. 2)
Davidson et al. (2010)	$\frac{dS(T)}{dT} = C^{\pm} \times \Omega^k \times (\Delta \Omega)$ (Ec. 3)

En las ecuaciones cinéticas de la Tabla 1, $S(T)$ es la posición de la línea de costa en el momento T , $\frac{dS(T)}{dT}$ es la derivada de la posición de la línea de costa respecto del tiempo, o lo que es lo mismo, la velocidad de cambio de la línea de costa, E es la energía del oleaje, Ω es el parámetro adimensional de velocidad de caída de grano (Wright y Short, 1984), y k , K y C^{\pm} son parámetros libres (el superíndice más [+] significa acreción, mientras que el superíndice menos [-] representa erosión).

En la ecuación 1 de la Tabla 1, ΔS es la diferencia entre la posición instantánea de la línea de costa S y una posición teórica de equilibrio S_{eq} .

El parámetro de velocidad de cambio constante K de la ecuación 1 conduce a un enfoque no es apropiado en los casos de medio y largo plazo, cuando pueden ocurrir una sucesión de eventos con diferentes escalas de tiempo. Miller y Dean (2004) investigaron diferentes formas de variación temporal de la tasa K en combinación con la ecuación 1, pero ninguno de los parámetros surgió como la mejor alternativa, así que sugirieron mantener constante K hasta que fueran desarrollados otros parámetros de velocidad más apropiados.

En contraste, la no linealidad de las ecuaciones 2 y 3 en la Tabla 1 permite una escala de tiempo variable incluso cuando el parámetro de velocidad de cambio C^\pm permanezca constante.

En las ecuaciones 2 y 3 de la Tabla 1, ΔE y $\Delta \Omega$ representan el desequilibrio existente en términos de energía del oleaje o del parámetro adimensional de velocidad de caída de grano, E y Ω , respectivamente. Este desequilibrio es la diferencia entre las condiciones actuales y un forzamiento de equilibrio teórico, E_{eq} y Ω_{eq} , que no causaría ningún cambio (por ejemplo, $\Delta E = E - E_{eq}$ y $\Delta \Omega = \Omega - \Omega_{eq}$).

Por lo tanto, la determinación de tal condición de equilibrio es una piedra angular de todos los modelos basados en las citadas ecuaciones. De hecho, es notable que, en la literatura, el concepto de equilibrio es ampliamente aplicado para abordar el problema de comportamiento de diversas características de la playa, como la migración de la barra de arena *cross-shore* (por ejemplo, Pape et al., 2010; o Plant et al., 1999), la elevación de la playa (por ejemplo, Ludka et al., 2015), o la tridimensionalidad de la playa (por ejemplo: Stokes et al., 2015).

En la literatura se pueden encontrar dos enfoques principales para determinar la condición de equilibrio en el marco de los modelos de evolución de la línea de costa *cross-shore*.

- Como una función de la posición de la línea costa (por ejemplo: Yates et al., 2009).
- A través de una ponderación promediada de las condiciones anteriores (por ejemplo: Wright et al., 1985).

Los detalles relevantes del modelo propuesto por Yates et al., (2009) se exponen en el apartado dedicado a la descripción del modelo numérico incluido en el capítulo 3. Metodología.

En resumen, la lógica detrás de todos estos modelos es que la línea de costa evoluciona hacia una posición de equilibrio de acuerdo a una ecuación cinética en la que la velocidad de cambio es proporcional a la diferencia entre una condición de equilibrio teórico y las condiciones actuales.

La combinación de esta ecuación diferencial de gobierno con diferentes expresiones del "forzamiento de equilibrio" en una correlación con la posición actual de la línea de costa o con una media ponderada de las condiciones de oleaje precedentes, origina este conjunto de modelos basados en el equilibrio.

En estos modelos, tomando S_0 como posición de partida de la línea de costa, la ola incidente llevaría a una posición de equilibrio si las condiciones del oleaje se mantuvieran constantes el tiempo suficiente. Como la duración del estado del mar es limitada, la línea de la costa evoluciona de S_0 a una posición intermedia S , de acuerdo con la ecuación que gobierna la

velocidad de cambio. Esta lógica se repite iterativamente para cada estado del mar en el período de modelado para obtener una serie temporal de posiciones S .

1.4. Información utilizada

Para llevar a cabo el presente estudio se hace necesaria la siguiente información:

- Por un lado, se necesita conocer el clima marítimo en la zona de estudio, más concretamente el oleaje que afecta a las playas de estudio y la marea astronómica.
- Por otro lado, la calibración del modelo requiere de información espacial de la posición de la línea de costa en diferentes fechas.

1.4.1. Dinámicas marinas

Debido a que todas las playas analizadas están expuestas directamente al oleaje, sin presencia de accidentes geográficos que perturben su propagación, se parte de conocer el oleaje en profundidades indefinidas. Para ello se recurre a un punto de reanálisis desarrollado por IH-Cantabria, GOW “Global Ocean Waves” (Reguero et al., 2012) en las proximidades de la zona de estudio. Este punto de reanálisis contiene información con resolución horaria de los parámetros más importantes que definen el oleaje: altura de ola significativa, periodo significativo y dirección del oleaje. Esta serie de datos, proporcionada por IH-Cantabria, ha sido calibrada y validada desde 1948 hasta la actualidad (ver Anexo II). Para la realización de este estudio se utiliza la serie temporal comprendida entre 2001 y 2018.

Por otro lado, con el fin de conocer la componente astronómica, se hace uso de otro punto de reanálisis también desarrollado por IH-Cantabria, en este caso GOT “Global Ocean Tide”, el cual contiene información sobre el rango de marea astronómica durante el periodo de análisis 2001 - 2018.

1.4.2. Imágenes satelitales

Se dispone de un total de 101 imágenes (entre 16 y 17 para cada una de las playas) tomadas anualmente entre 2001 y 2018 (entre mayo y septiembre), con una resolución de 25 cm/píxel.

Estas imágenes han sido obtenidas a partir de la restitución fotogramétrica de fotografías aéreas estereoscópicas y proporcionan información espacial de la línea de costa. La fuente de datos corresponde a la galería de ortofotos históricas existentes de los siguientes vuelos:

- 2001-2002. Vuelo realizado por el Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).
- 2004-2018. Vuelo fotogramétrico del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Estas son de acceso público y se encuentran disponibles en la base de datos *geo.euskadi.eus* así como en la página del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

1.5. Organización del estudio

La estructura del documento se ha distribuido en los siguientes epígrafes:

- 1. Introducción. Se describe la motivación y se enuncian los objetivos que se persiguen. Posteriormente se hace un breve repaso al estado del arte. A continuación, se encuentra la información utilizada y por último se presenta la organización del estudio.
- 2. Zona de estudio. En este apartado se localiza la zona de estudio y se describen las características más importantes de las playas seleccionadas. Este capítulo concluye con la definición en detalle de las dinámicas marinas.
- 3. Metodología. En primer lugar, se expone el procedimiento para la obtención de la línea de costa. En segundo lugar, se describe la aplicación del modelo numérico propuesto por Yates et al. (2009).
- 4. Línea de costa. Se presentan los resultados obtenidos tras la digitalización y el análisis de los indicadores de las líneas de costa.
- 5. Resultados del modelo numérico. Se exponen los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo.
- 6. Análisis de resultados y discusión. Se presenta una descripción de los aspectos más relevantes observados en el capítulo 5 y se acompaña una discusión.
- 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación. Por último, se establecen las conclusiones a las que se llega tras el estudio y se proponen futuras líneas de investigación.

2. ZONA DE ESTUDIO

En este apartado se presenta la ubicación y las características de la zona sobre la que se desarrolla este trabajo. En primer lugar, se localiza la zona de estudio y se comentan las características generales de la unidad fisiográfica. En segundo lugar, se definen las dinámicas marinas que afectan al lugar.

2.1. Localización

El tramo de costa objeto de estudio se encuentra en el norte de España y corresponde al litoral de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Considerando la costa norte de la Península Ibérica en su totalidad, el litoral vasco se caracteriza por ser extremadamente rocoso y con abundantes acantilados y rasas, debido a la proximidad de su paralela Cordillera Cantábrica. Esta costa también se caracteriza por la presencia de numerosas rías y por la formación de puntales y largos arenales que forman barreras arenosas. La Figura 3 muestra la localización de la zona de estudio dentro de la península Ibérica, mientras que la Figura 4, con mayor detalle, nos ayuda a ubicar las playas objeto de estudio.



Figura 3. Mapa de la Península Ibérica. Al norte, limitado por un rectángulo blanco, el área de estudio.



Figura 4. Mapa del área de estudio, con la localización de las playas.

2.2. Características de las playas seleccionadas

Las playas escogidas para ser sometidas al modelo tienen varios aspectos en común, entre los que destacan los siguientes:

- Se encuentran directamente expuestas al oleaje.
- Su configuración geométrica se puede considerar encajada lateralmente (sin existir pérdida o ganancia neta de arena debido a gradientes en el transporte longitudinal de sedimentos).
- En sus proximidades no existen salientes que provoquen difracción del oleaje.
- Aunque unas más que otras, su forma en planta se puede considerar rectilínea.

Estas características que comparten todas las playas las hacen apropiadas para ser utilizadas por un modelo de evolución y representar, en principio, la evolución de su línea de costa de manera aproximada.

En el Anexo 1 se describen las playas y se detallan las particularidades y propiedades de cada una. Las características geométricas y morfológicas que se presentan han sido obtenidas de la Guía de playas facilitada por el Ministerio para la Transición Ecológica.

2.3. Dinámicas marinas

A continuación, se presenta el clima marítimo gobernante en la zona de estudio a partir de las condiciones del oleaje en profundidades indefinidas y de las características de la marea astronómica que afecta a las playas.

2.3.1. Oleaje

Para la implementación del modelo de evolución se parte de conocer el oleaje como único forzamiento, establecido este en condiciones de energía (potencia al cuadrado de la altura de ola). Por lo tanto, conocido el oleaje lejos de la costa, no se precisa recurrir a la técnica de *downscaling* para propagarlo a una de menor profundidad, debido a que las condiciones en mar adentro representan por sí solas la variabilidad del potencial energético del oleaje en términos de proporcionalidad temporal.

Tras analizar la serie temporal completa, el oleaje manifestado durante el periodo de estudio (2001-2018) queda representado por las figuras que se muestran a continuación.

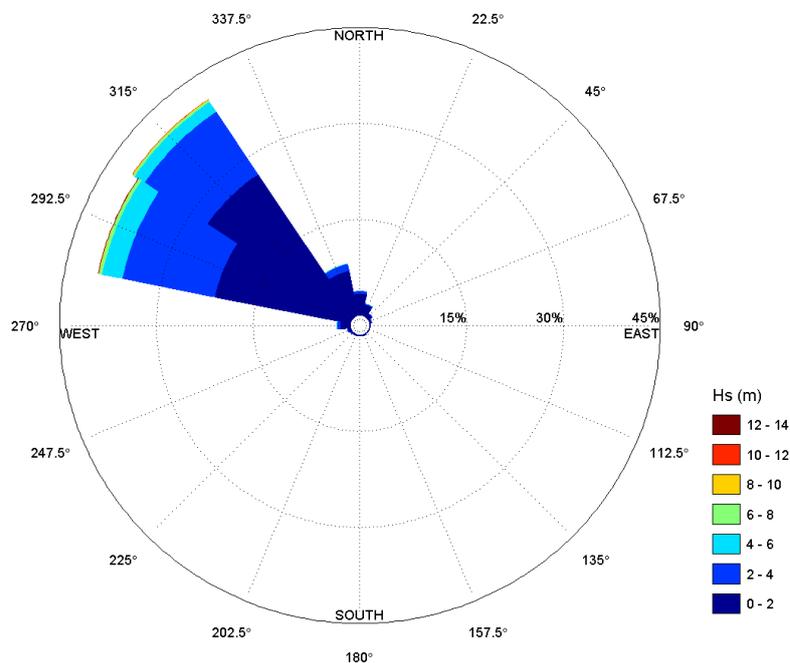


Figura 5. Rosa de oleaje.

En la Figura 5 se observa como la rosa de oleajes muestra una clara tendencia hacia las componentes del Noroeste. Los oleajes más frecuentes proceden del NWW y NW, siendo estos últimos los reinantes y dominantes.

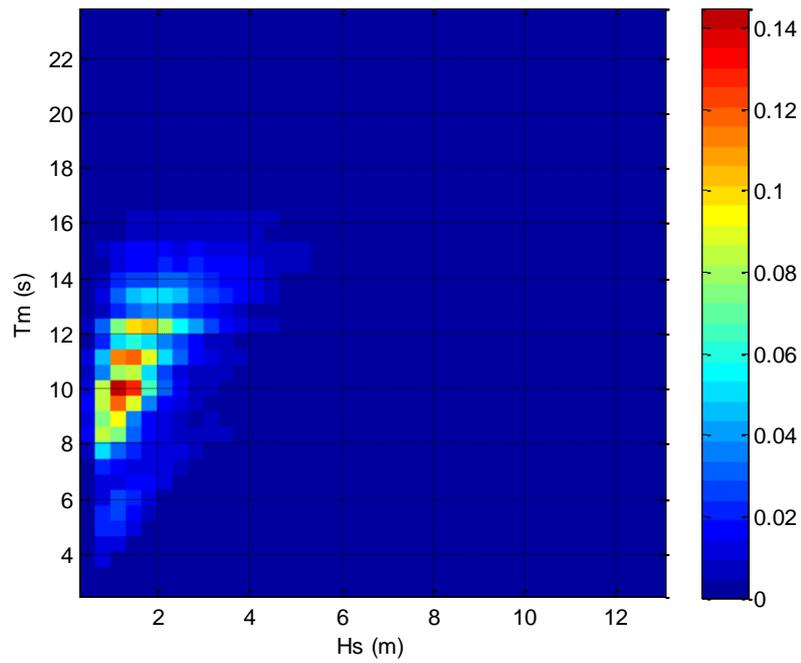


Figura 6. Diagrama de correlación Hs-Tm.

En cuanto al periodo del oleaje, su rango de valores más frecuentes se encuentra entre 8 y 13 s (ver Figura 6), siendo su media ligeramente superior a 11 s.

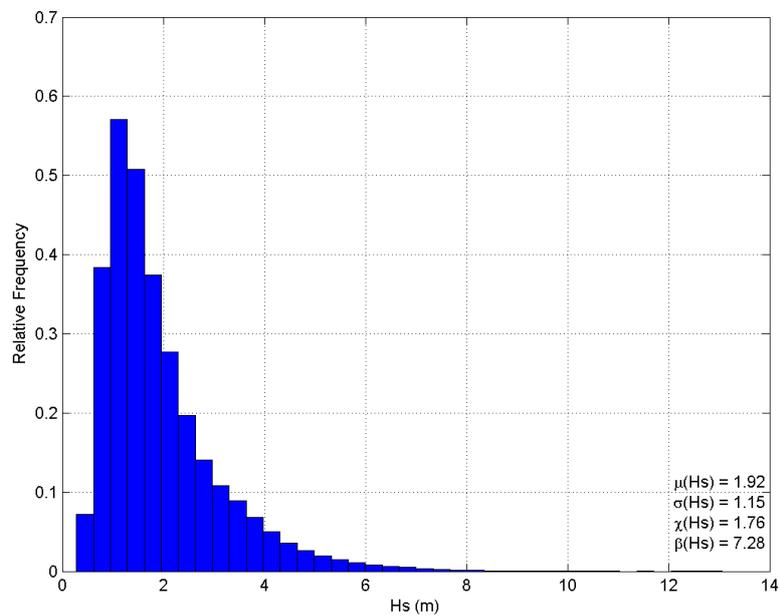


Figura 7. Función de distribución de Hs.

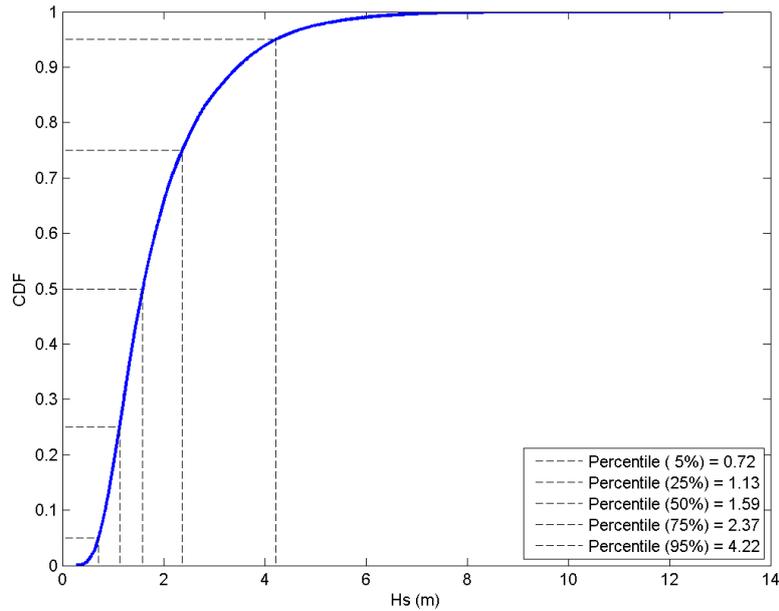


Figura 8. Función de distribución acumulada de Hs.

En la Figura 7 se puede comprobar como la media de oleajes no supera los 2 m (exactamente 1,92 m) y como en ocasiones excepcionales, la altura significativa alcanza valores superiores a 12 m. Por su parte, la Figura 8 muestra como la mayor parte de oleajes (90 %) se encuentra en un rango de valores entre 0,72 y 4,22 m. Esta altura de ola de 4,22 m solo es superada el 5 % del tiempo.

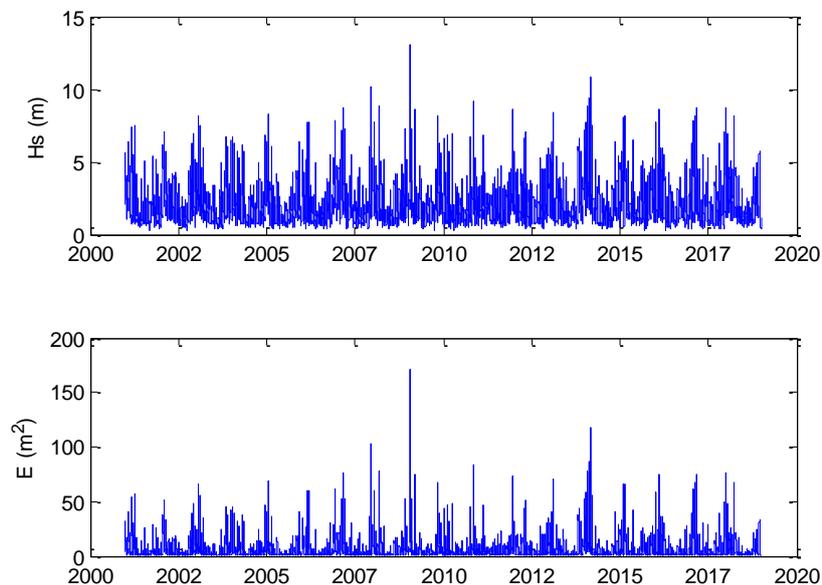


Figura 9. Altura de ola y energía del oleaje durante el periodo de estudio.

La Figura 9 representa la serie temporal de altura de ola (arriba) y energía de oleaje (abajo), calculada esta última como el cuadrado de la primera. En ambas gráficas se observa como los

oleajes más energéticos se produjeron en el año 2009, ocurriendo mayor frecuencia de temporales durante el invierno 2013-2014.

Con el fin de diferenciar los años hidrometeorológicos (del 1 de septiembre al 31 de agosto del siguiente) en los que se producen mayores oleajes, se presenta la Figura 10 que muestra la ocurrencia de estados de mar con altura de ola significativa superior a valores desde 5 m hasta 10 m.



Figura 10. Frecuencia de ocurrencia de estados de mar con Hs superior a un valor.

De nuevo se comprueba la excepcionalidad de los oleajes ocurridos los inviernos 2007-2008, 2008-2009 y 2013-2014, en cuanto a frecuencia de ocurrencia de estados de mar altamente energéticos.

2.3.2. Marea astronómica

A partir de la información contenida en el punto GOT, se obtienen las funciones de densidad y distribución para el régimen de nivel de marea astronómica, las cuales se presentan en la Figura 11 y la Figura 12 respectivamente.

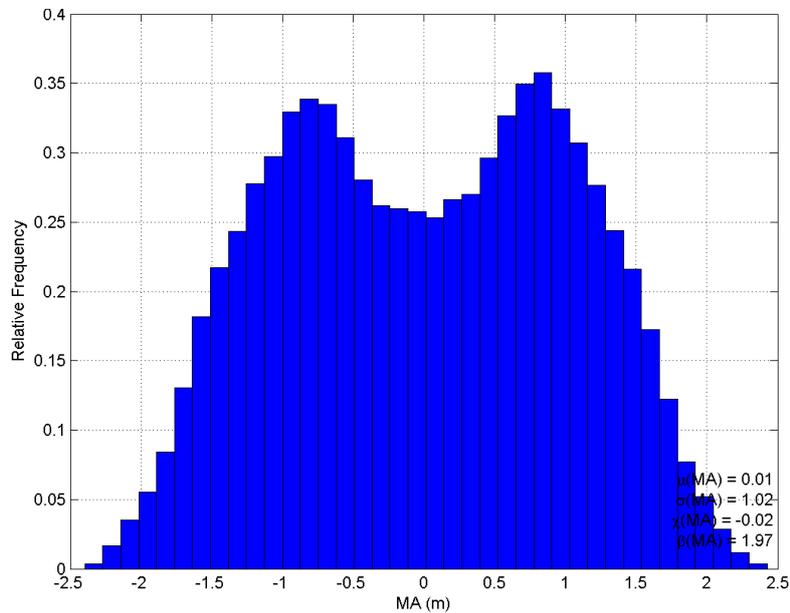


Figura 11. Función de densidad de la marea astronómica.

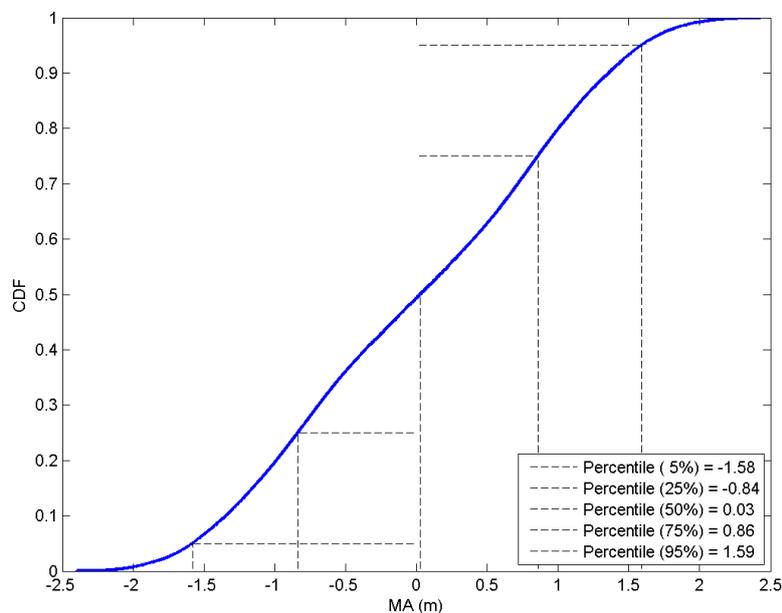


Figura 12. Función de distribución de la marea astronómica.

Tal como se observa, se evidencia claramente la presencia de bajamar y pleamar con oscilaciones máximas ligeramente inferiores a los 5 m, presentándose un régimen macromareal (Davies, 1964).

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el proceso que se ha seguido para alcanzar los objetivos propuestos. En primer lugar, se desarrolla el procedimiento utilizado para obtener la posición de la línea de costa a partir de las imágenes satelitales disponibles. Posteriormente, se expone el modelo Yates et al. (2009) y se describe su aplicación al caso de estudio. El siguiente diagrama de flujo representa la secuencia de operaciones desarrolladas durante la realización del trabajo.

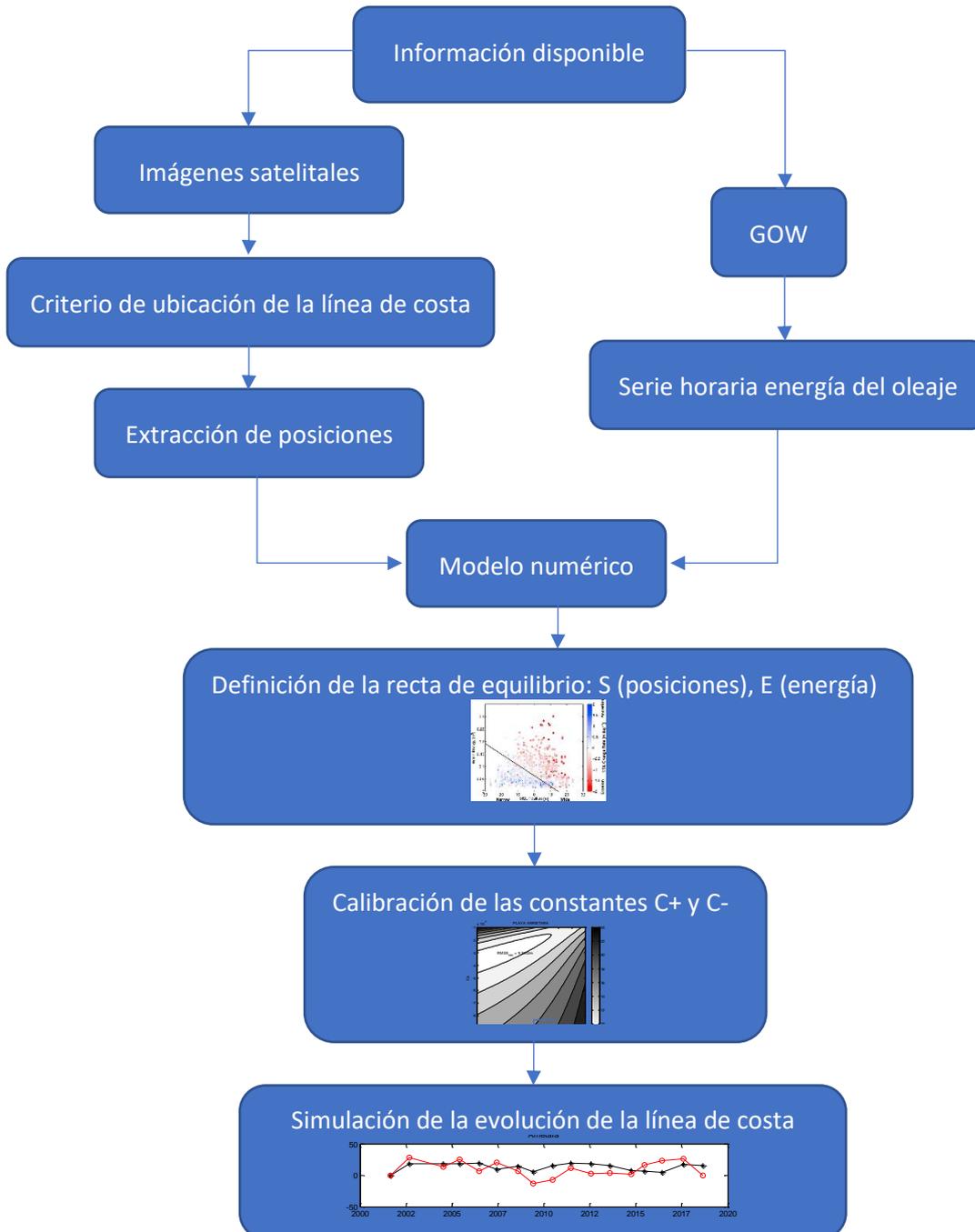


Figura 13. Organigrama que describe la metodología.

3.1. Obtención de la línea de costa

En este subcapítulo se explican los criterios que se han seguido para localizar y posicionar la línea de costa y los procesos necesarios para convertirlas a formato digital.

Del Río (2007) propone el uso de un indicador de posición para delimitar la línea de costa, que puede ser la línea de pleamares, el pie de duna o la separación entre arena seca y arena húmeda. Por otro lado, según Leceta (2009), la elección de un criterio único para la identificación de la línea de costa desde fuentes aéreas y satelitales se convierte en un requisito indispensable para una adecuada representación temporal de la línea de costa.

Con el objetivo de ubicar la línea de costa, se hace necesario definir el proceso que se utiliza para determinar su posición en cada una de las imágenes disponibles. En este trabajo, la definición de la línea de costa se realiza en base a las marcas visibles que deja el agua sobre la planta de la playa. El criterio por el cual se determina la posición de la línea de costa consiste en tomar como tal posición la marca de arena húmeda que dejó la última pleamar (ver Figura 14). La razón de que se utilice tal indicador es que este es claramente perceptible en todas las imágenes, pudiendo así definir una línea de costa homogénea.

Sin embargo, como cualquier criterio para establecer la ubicación de la línea de costa, este acompaña una gran limitación. Las playas del litoral cantábrico son macromareales, por lo que la distancia en planta entre bajamar y pleamar puede llegar a ser de decenas de metros. Siendo conocida la fecha en la que fueron tomadas las imágenes, es posible determinar la carrera de marea que había en cada toma. Otro aspecto a considerar en playas con rango macromareal es la presencia de factores que podrían afectar a la definición de tal línea, como por ejemplo el tiempo que tarda la arena en secarse. A pesar de estas limitaciones, la distinción entre zona seca y zona húmeda es evidente en todas las imágenes.

Una vez definido el criterio para ubicar la línea de costa, se describe el procedimiento que se ha llevado a cabo para digitalizar el conjunto de líneas de costa. A continuación, se muestra lo propio para la playa de La Arena, sirviendo este caso como ejemplo para el resto de las playas.

3.1.1. Líneas de costa

Ubicar la posición de la línea de costa requiere hacer uso de una herramienta SIG de análisis espacial. Para la realización de este trabajo se utiliza el sistema ArcGIS 10 que permite analizar la información geográfica contenida en las imágenes. El levantamiento de la línea de costa ha

sidido realizado manualmente por el autor del presente trabajo fin de máster, dibujando una línea poligonal sobre esa interfaz de arena seca-mojada, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Ubicación de la línea de costa en la interfaz arena seca - húmeda.

El proceso se repite para cada una de las imágenes disponibles (17 líneas de costa para cada playa, excepto para La Arena, con 16 líneas).

Durante el desarrollo de la tarea de digitalización, para las imágenes que implicaban mayor confusión, se ha hecho uso de otros criterios de fotointerpretación para garantizar un posicionamiento adecuado de esta línea, siguiendo criterios geométricos o características físicas como son la ubicación de la primera línea de usuarios de la playa o la ubicación de algas o bolos depositadas por la última pleamar (ver Figura 15).



Figura 15. Posición de la línea de costa; Izq. Usuarios de la playa. Dcha. Depósito de algas.

Este procedimiento manual, encarece notablemente el método de obtención de la posición de la línea de costa, además de generar resultados que se ven inevitablemente alterados por la subjetividad del sujeto que traza la línea poligonal. Adicionalmente, también hay que añadir los errores propios en la restitución por efectos de escala. En cualquier caso, aún con los inconvenientes señalados anteriormente, esta información nos permite definir en grandes escalas, cuál es el comportamiento y las tendencias de la línea de costa.

Atendiendo a los criterios definidos más arriba y tras digitalizar todas las líneas de costa, se obtiene, para cada playa, una capa con líneas de costa para cada uno de los días de los que se tienen datos (ver Figura 16).



Figura 16. Líneas de costa formando una única entidad.

Para determinar la evolución, se ha utilizado la herramienta *Digital Analysis Shoreline System (DSAS)* versión 4.0, implementada como complemento del software ArcMap. DSAS lo desarrolla *United States Geology Service (USGS)* y permite el análisis de las líneas de costa a partir de varios

parámetros estadísticos. El complemento DSAS se basa en utilizar las líneas de costa referenciadas espacial y temporalmente para calcular parámetros de variabilidad entre ellas. Para poder llevar a cabo el análisis, se precisan, tal y como señalan Thieler et al. (2009) los siguientes tres elementos básicos.

3.1.2. Línea base

Línea que se construye por el usuario y marca la referencia a partir de la cual se trazan los transectos utilizados para medir la posición de las líneas de costa. En este estudio la línea base (*baseline* a partir de aquí), se creó como un nuevo *shapefile* de polilínea y se dibujó aproximadamente 50 m tierra adentro (*on-shore*) en cada playa analizada.



Figura 17. Línea de base o *baseline* creada por el usuario.

3.1.3. Transectos

Son proyecciones perpendiculares a la línea de base, distribuidas a lo largo de la misma a intervalos constantes que son definidos por el usuario. En el presente estudio se trabajó con transectos de 300 m de longitud y con una separación de 50 m entre cada transecto. Estos transectos nos permitirán medir las diferencias de distancia registradas entre las intersecciones con las diferentes líneas de costa y la línea base.



Figura 18. Transectos cada 50 m generados a partir de la baseline.

3.1.4. Extracción de indicadores

Una vez se obtienen todos los atributos necesarios para llevar a cabo el análisis con DSAS, lo que se obtiene es un compendio de líneas de costa referenciadas espacial y temporalmente que son cruzadas por cada uno de los transectos determinados que surgen de la *baseline*, previamente construida. Atendiendo al cumplimiento de todos los requerimientos expuestos, DSAS permite obtener distintos parámetros estadísticos ofrecidos en forma de tabla de datos por el mismo software.

De los diferentes estadísticos que ofrece, se ha estimado que el que más se ajusta a los objetivos determinados es la información de las intersecciones entre las líneas de costa y los transectos. El campo "*Distancias*", incluido en dichas tablas, expresa la longitud que existe entre la *baseline* y cada una de las líneas de costa que cruzan cada transecto. De este modo, para cada transecto se obtienen varios valores resultantes de medir la distancia desde la *baseline*, a lo largo de los transectos, hasta cada una de las líneas que intersecan los mismos; se obtienen los valores de la distancia de intersección *baseline*/líneas de costa. A partir de los valores resultantes, para cada línea de costa se obtiene el valor medio de todos los transectos.

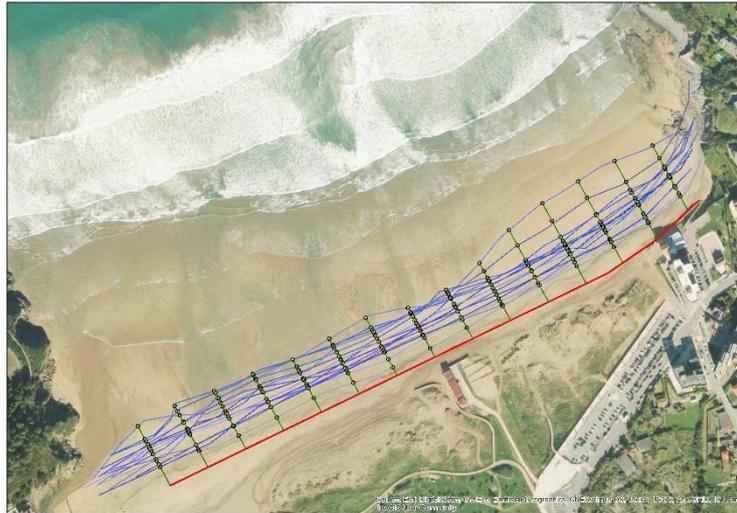


Figura 19. Intersecciones entre los transectos y las diferentes líneas de costa.

Tras repetir el proceso para las cinco playas restantes y realizar un análisis de los indicadores obtenidos, en el capítulo 4. Línea de costa, se procede a detallar los resultados finales obtenidos.

3.2. Modelo numérico

Del conjunto de modelos que se citan en el estado del arte, en este estudio se utiliza el modelo propuesto por Yates et al. (2009), cuyos fundamentos se explican en lo sucesivo. Este fue validado en playas del sur de California, 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.

Los autores, siguiendo a Wright et al. (1985), desarrollaron un modelo dinámico de evolución de la línea de costa impulsado por la energía del oleaje, basado en la siguiente ecuación cinética:

$$\frac{dS(t)}{dt} = C^{\pm} E^{1/2} (E - E_{eq})$$

en el que la velocidad de cambio de la posición de la línea de costa, S , es proporcional al desequilibrio energético existente entre la situación actual, E , y la posición de equilibrio, E_{eq} , ponderando este desequilibrio con la energía del sistema mediante $E^{1/2}$. El factor de ponderación $\frac{1}{2}$ sobre la energía que llega a la playa fue obtenido empíricamente como el que responde a un ajuste ligeramente mejor en comparación con otras ponderaciones. El término C^{\pm} es una constante de proporcionalidad que representa los procesos de erosión y acreción.

Yates et al. (2009) propusieron una función biunívoca lineal entre la energía del oleaje incidente (E) y la posición de costa (S), para definir la condición de equilibrio. Esto conduce a dos parámetros libres (a y b) que se obtienen como la mejor línea de ajuste a la energía media de las olas observadas, sin causar ningún cambio en la posición de la línea de costa.

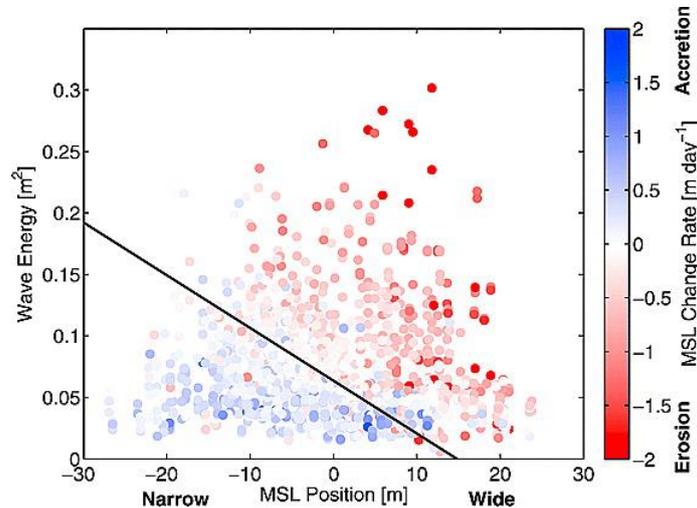


Figura 20. Velocidad de cambio de la posición de la línea de costa frente a la posición inicial de la línea y a la energía media del oleaje entre mediciones, tomada de Yates et al. (2009).

En la Figura 20 se muestran las observaciones (puntos de color) junto a la recta de mejor ajuste (línea en color negro) a partir de la que se establece la siguiente relación entre la energía de equilibrio y su correspondiente posición de la línea de costa y viceversa:

$$E_{eq}(S) = aS + b$$

$$E(S) = aS_{eq} + b$$

En su metodología, añaden 2 parámetros de ajuste a su modelo de evolución. Estos parámetros, propios de cada playa, también fueron ajustados empíricamente a las playas de su investigación. Debido a la asimetría entre los procesos de erosión y acreción, la constante C^\pm , adquiere un valor diferente en el caso de la erosión, C^- , que, de la acreción, C^+ .

Asumiendo que la energía es una función constante en un estado de mar e integrando la ecuación cinética superior, Yates et al. (2009) obtuvieron el siguiente modelo, en el que la posición de la línea de costa se acerca exponencialmente al equilibrio, tal y como sugieren estudios previos (Swart, 1974, Larson y Kraus, 1989, y otros):

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

donde S_0 es la posición de la línea de costa en el instante inicial y S_{eq} la posición en el equilibrio a la que tiende el sistema forzado con una energía del oleaje E .

Este modelo en realidad es una ley cinética de primer orden en el que la velocidad de relajación, $\alpha C^{\pm} E^{1/2}$, es proporcional a la energía del oleaje incidente y resulta análogo al desarrollo por Kriebel et al. (1991), un método de convolución para evaluar la evolución del perfil de playa sujeta a un forzamiento constante.

El modelo propuesto inicialmente únicamente era aplicable al corto plazo, debido a que su desarrollo se hizo siguiendo la hipótesis de oleaje estacionario. Para extender su aplicación al medio plazo, Yates et al. (2009) hicieron uso de un algoritmo numérico repetitivo en el que la posición inicial de cada estado de mar coincide con la posición final del anterior con un paso de tiempo de 1 hora (duración del estado de mar). Los autores resaltan que no es adecuado introducir como forzamiento del modelo la energía del oleaje promediada, puesto que los picos erosivos producidos por los temporales tienen lugar en una escala temporal del orden de horas y de esta manera se suavizarían excesivamente.

A pesar de que el modelo propuesto por Yates et al., 2009 ha sido aplicado con posterioridad a otras playas (Yates et al., 2011), aún no se han establecido relaciones entre los parámetros del modelo (a, b, C+ y C-) y las características físicas de la playa.

Cabe señalar que los numerosos pasos de tiempo del algoritmo recursivo (8760 pasos de tiempo/año) así como la alta dimensionalidad de los parámetros de ajuste complican notablemente la calibración del modelo.

En cuanto a la aplicación del modelo al caso en cuestión, se hace uso de un código generado en la herramienta MATLAB con el fin de simplificar la cantidad de cálculos necesarios. Los inputs que alimentan al modelo son:

- Serie temporal de altura de ola significativa (Hs) con resolución horaria para el periodo de estudio (2001 – 2018).
- Vector con las distancias de avance/retroceso obtenidos con la herramienta DSAS. (16-17 valores cada playa). Esta fuente de datos sirve para calibrar el modelo.

Durante la realización del trabajo, se han probado diferentes periodos de calibración (primera mitad, segunda mitad, primer tercio, segundo tercio y último tercio de la serie temporal 2001-2018). Los parámetros del modelo que se muestran en este documento han sido calibrados con la primera mitad del periodo (2001-2009) y se ha utilizado la segunda mitad (2010-2018) como validación.

A partir de las medidas observadas durante el periodo de calibración, se ubica la recta de equilibrio que mejor ajuste a la nube de puntos y se extraen los parámetros a y b (ver Figura 24).

Cabe decir que esta recta de equilibrio se calibra en base a las observaciones sin requerir del conocimiento de las características físicas de la playa.

Tras este paso se calibran las constantes correspondientes a los procesos de acreción (C^+) y 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 medio cuadrático (RMSE), de forma que el mejor ajuste se corresponda con el mínimo error. Para ello, se hace uso de la siguiente formulación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (St_i - xt_i)^2}{n}}$$

donde St_i son las posiciones de la línea de costa generadas por el modelo y xt_i son las posiciones obtenidas a partir de las mediciones. Mediante un proceso de optimización se reduce el RMSE hasta el valor mínimo posible (ver Figura 25).

Una vez obtenida la pareja de valores que logre el mínimo RMSE para el periodo 2001-2009, se resuelve la ecuación cinética de primer orden para todo el periodo de estudio, resultando un vector horario con las posiciones de la línea de costa simuladas por el modelo.

Finalmente se interpretan los resultados proporcionados por el modelo y se someten a juicio comparándolos con las observaciones registradas para concluir la evaluación del modelo y dar respuesta a los objetivos planteados inicialmente.

A fin de comprobar la idoneidad del modelo se recurre al coeficiente de Pearson, expresado por la siguiente ecuación:

$$\rho_{St,xt} = \frac{\sigma_{Stxt}}{\sigma_{St}\sigma_{xt}}$$

donde σ_{Stxt} es la covarianza entre St y xt , σ_{St} es la desviación típica de la variable St y σ_{xt} es la desviación típica de la variable xt . Este índice que mide el grado de variación entre distintas variables relacionadas linealmente, en este caso, posiciones medidas de la línea de costa y posiciones simuladas por el modelo para las mismas fechas. El rango de correlación de Pearson se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Rango de correlación de Pearson.

Coeficiente	Interpretación
$\rho = 1$	Correlación perfecta
$0,8 < \rho < 1$	Muy alta
$0,6 < \rho < 0,8$	Alta
$0,4 < \rho < 0,6$	Moderada
$0,2 < \rho < 0,4$	Baja
$0 < \rho < 0,2$	Muy baja
$\rho = 0$	Sin correlación

4. LÍNEA DE COSTA

Tras haber analizado y cuantificado los avances y retrocesos que ha sufrido la línea de costa, en este apartado se presentan los resultados de esas variaciones que representa la movilidad de la costa durante el periodo de estudio. La Figura 21 muestra la variabilidad interanual registrada de la posición de la costa entre los años 2001 y 2018 para cada playa respectivamente.



Figura 21. Posiciones de la línea de costa registradas para cada playa respectivamente.

La información contenida en la Figura 21 se hace más visual en la Figura 23, la cual presenta, para cada una de las seis playas, esos avances y retrocesos medidos a partir de la referencia inicial. Cabe destacar que los tramos rectos que se dibujan entre dos registros (marcados con círculos en la Figura 22 y la Figura 23), no reflejan la variación real de la línea de costa, puesto que los registros son anuales y entre ellos la línea de costa no permanece inmóvil. Sin embargo, el motivo de esta representación reside en facilitar la interpretación de esta variación poniendo de manifiesto los años en los que predomina el avance o el retroceso (neto) de la línea de costa.

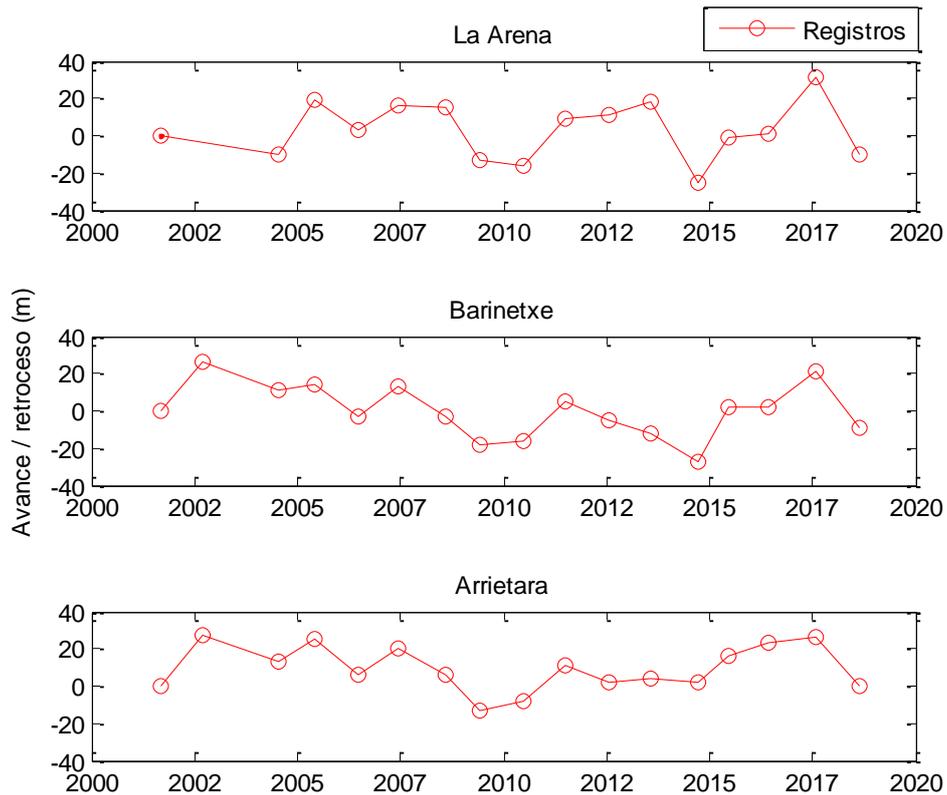


Figura 22. Avances y retrocesos medidos en la línea de costa (a).

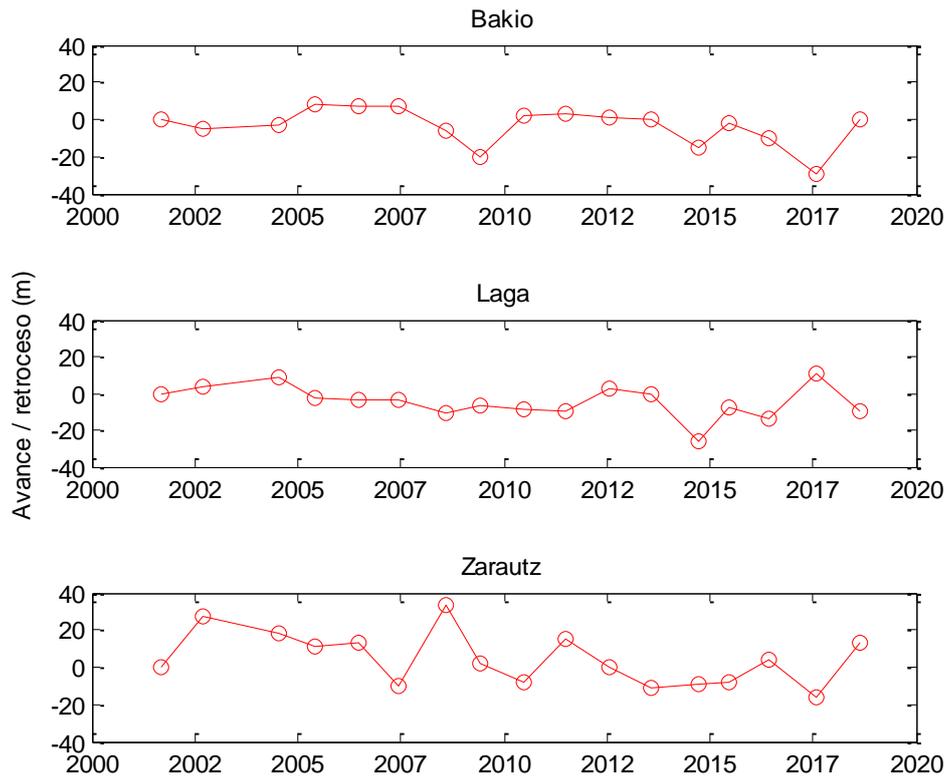


Figura 23. Avances y retrocesos medidos en la línea de costa (b).

Como se puede observar en la Figura 22 y la Figura 23, el rango de variación observado es similar para las seis playas, situándose entre los 58 m (playa de La Arena) y los 36 m (playa Laga). Analizando el conjunto de las imágenes, se intuyen a simple vista 2 periodos en los que la línea de costa retrocede en todas las playas, siendo estas medidas registradas los años 2009-2010 y 2014. Este retroceso coincide con los inviernos ampliamente energéticos que se mencionaban en el apartado de dinámica marina.

Del mismo modo, los periodos en los que destaca un avance neto sobre la línea de costa también se repiten en todas las playas, siendo remarcables los años 2005, 2011 y 2015.

Por último, la información contenida en la Figura 21, la Figura 22 y la Figura 23, se detalla en la Tabla 3, donde se muestra la distancia desde la línea de referencia (posición inicial) a la posición media de la línea de costa para cada año, representando los avances netos en verde y los retrocesos netos en rojo.

Tabla 3. Distancias medidas desde la referencia para cada año.

Avances y retrocesos de la línea de costa con respecto a la primera posición observada (m)						
Fecha / playa	La Arena	Barinetxe	Arrietara	Bakio	Laga	Zarautz
2-septiembre-2001	0	0	0	0	0	0
10-septiembre-2002	Sin dato	25,83	27,65	-4,66	3,39	26,99
16-julio-2004	-10,25	10,92	13,63	-2,83	8,82	18,28
2-junio-2005	18,82	14,29	25,28	7,92	-2,68	10,79
18-junio-2006	2,59	-2,53	6,32	7,04	-3,38	13,52
5-junio-2007	15,80	13,64	19,82	6,68	-3,64	-9,63
31-julio-2008	14,94	-3,48	5,97	-5,86	-10,66	33,01
28-mayo-2009	-13,56	-17,84	-12,81	-20,28	-6,88	2,29
23-junio-2010	-15,78	-16,08	-7,82	2,10	-8,77	-8,47
25-junio-2011	9,09	4,87	10,97	3,40	-10,19	15,68
24-julio-2012	10,74	-4,91	2,43	1,44	2,55	0,37
31-julio-2013	17,97	-12,12	3,56	-0,04	-0,18	-11,43
27-septiembre-2014	-25,60	-26,85	1,88	-14,82	-25,94	-9,33
21-junio-2015	-1,04	2,06	16,41	-2,15	-7,92	-8,54
8-junio-2016	1,02	1,97	23,02	-10,62	-13,86	4,04
5-agosto-2017	31,73	21,13	26,03	-29,80	10,85	-16,51
27-agosto-2018	-10,15	-9,21	-0,28	-0,09	-10,10	13,39
Amplitud	57,32	52,68	40,46	37,72	36,79	49,52

5. RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos tras aplicar el modelo Yates et al. (2009). En primer lugar, se presentan los diagramas de correlación entre la energía del oleaje y la posición observada de la línea de costa durante el periodo de calibración para cada una de las seis playas. En segundo lugar, se muestran las gráficas resultantes de la calibración de los parámetros C^+ y C^- . Por último, se representa el resultado de la simulación junto con los registros de la posición de línea de costa observados; primero para el periodo de estudio completo y después para las fechas en que la posición de la línea de costa fue observada.

5.1. Correlación entre la energía del oleaje y la posición de la línea de costa en el equilibrio

La Figura 24 muestra las observaciones de la línea de costa junto con la recta de mejor ajuste de cada playa. Cada diagrama contiene ocho puntos de color (excepto La Arena, siete puntos) correspondientes a las posiciones medidas en las imágenes en el periodo 2001-2009. El hecho de no visualizar la totalidad de los puntos se debe a que, en algún caso, la velocidad de cambio de la posición de la línea de costa, $\frac{dS(t)}{dt}$, tiene un valor próximo a cero (rango de color blanco), motivo que dificulta una correcta ubicación de la recta de equilibrio.

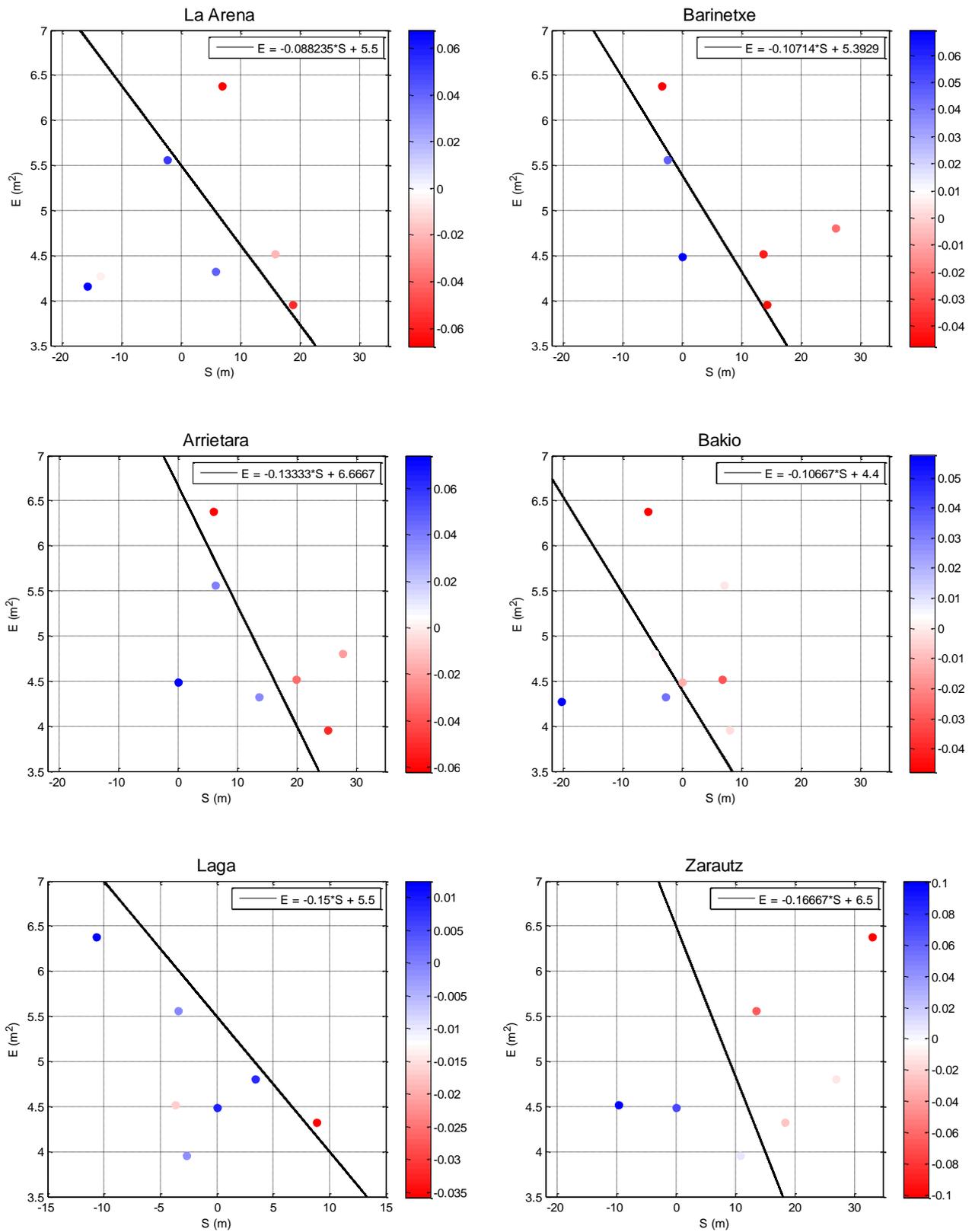


Figura 24. Correlación entre la energía del oleaje y la posición de la línea de costa en el equilibrio.

Se observa que la media de energía del oleaje entre mediciones se encuentra siempre entre 3 y 8 m². Por su parte, las variaciones en la posición de la línea de costa se sitúan en todos los casos entre los -30 (retrocesos) y +35 m (avances).

Al margen de lo anterior, lo primero que llama la atención en la Figura 24 es la heterogeneidad en la distribución de los puntos en cada diagrama. Para algunas playas, como La Arena, Barinetxe y Arrietara, esa distribución marca una fuerte correlación entre la posición observada y la energía de los oleajes, apreciándose una clara separación de los puntos rojos y los azules. En el caso de Laga, las posiciones pertenecientes al periodo de calibración se deben casi en su totalidad a posiciones medidas en retroceso. Además, un punto rojo (posición medida en avance), se sitúa en la zona de erosión, lo que implicará una merma en la correcta simulación del modelo. Por su parte, la escala de color en la playa de Zarautz llega a velocidades mayores que el resto, provocando que el modelo simule los procesos de erosión y acreción a mayor velocidad.

A continuación, la Tabla 4 presenta los valores que muestran un mejor ajuste de la recta de equilibrio.

Tabla 4. Valores de los parámetros que proporcionan un mejor ajuste a la recta de equilibrio.

Parámetro	La Arena	Barinetxe	Arrietara	Bakio	Laga	Zarautz
a (m)	-0,088	-0,107	-0,133	-0,107	-0,15	-0,167
b (m ²)	5,5	5,39	6,67	4,4	5,5	6,5

Al comparar los valores obtenidos, se puede observar como el valor que define la pendiente de la recta de equilibrio (parámetro a) se sitúa entre -0.88 y 1.33×10^{-1} para las cuatro primeras playas, incrementándose este valor hasta 1.5 y 1.67×10^{-1} para Laga y Zarautz respectivamente.

5.2. Calibración de las constantes de acreción y erosión

La Figura 25 manifiesta la búsqueda de los valores para las constantes Ca (acreción) y Ce (erosión) que proporcionen el menor error medio cuadrático durante el periodo de calibración.

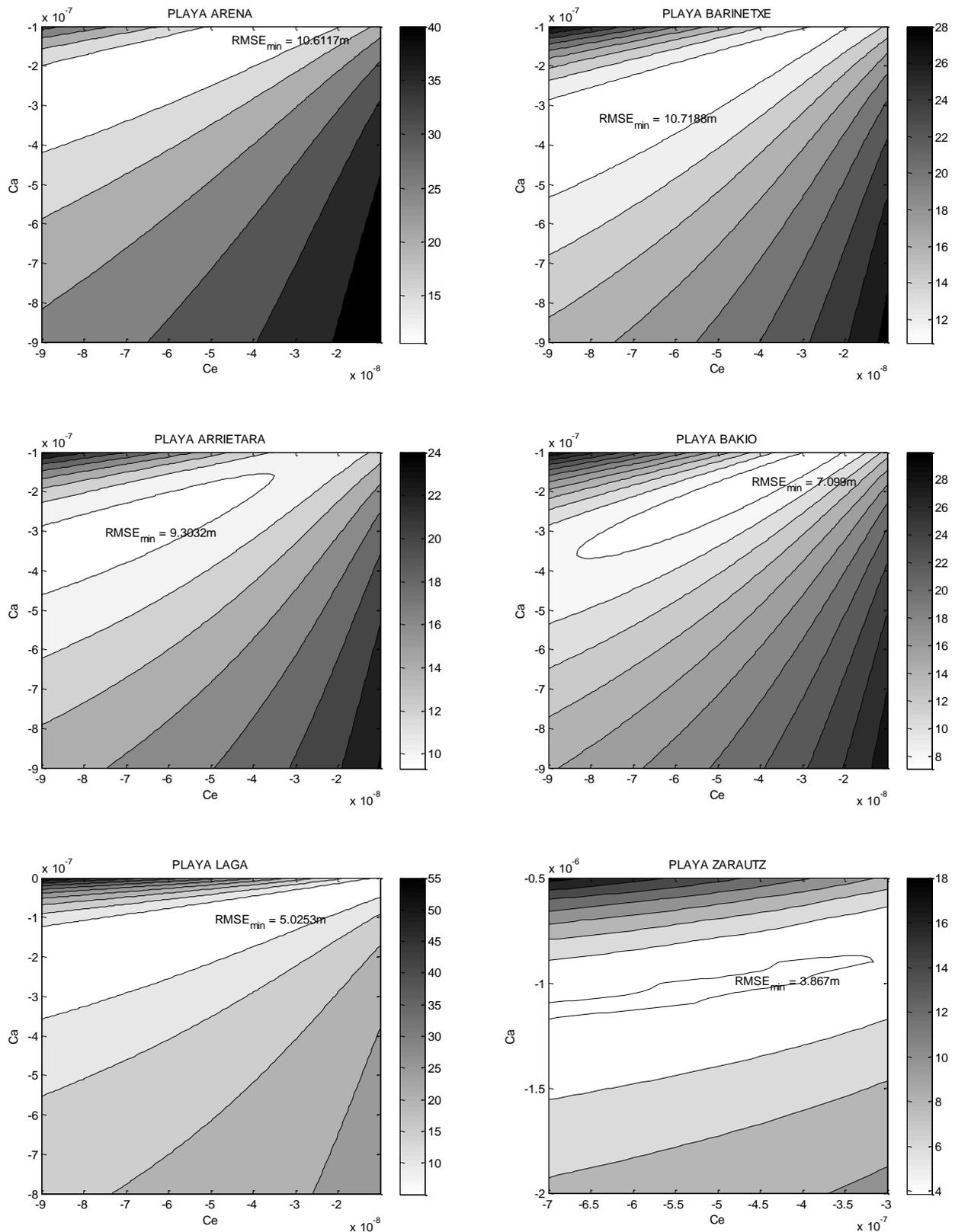


Figura 25. Calibración de las constantes de acreción y erosión.

Como se puede observar, el RMSE mínimo entre los resultados del modelo y las observaciones para el periodo de calibración, varía mucho de unas playas a otras, situándose entre los 3 m para

las playas con mejor ajuste y los 11 m para las que no ajustan tan bien. En cuanto al rango de variación máxima entre posiciones observadas para ese periodo va desde 23 hasta 49 m.

Por otro lado, el valor de los parámetros de erosión y acreción que proporciona ese mínimo error es muy próximo para todas las playas salvo Zarautz, donde estas constantes se sitúan un orden de magnitud por debajo del resto (ver Tabla 5).

Tabla 5. Valores de las constantes de acreción y erosión.

Parámetro	La Arena	Barinetxe	Arrietara	Bakio	Laga	Zarautz
C^+ ($m^{-1} s^{-1}$)	$-1,4 * 10^{-7}$	$-3,4 * 10^{-7}$	$-3,1 * 10^{-7}$	$-1,8 * 10^{-7}$	$-1,1 * 10^{-7}$	$-1 * 10^{-6}$
C^- ($m^{-1} s^{-1}$)	$-4,5 * 10^{-8}$	$-7,8 * 10^{-8}$	$-7,5 * 10^{-8}$	$-4,2 * 10^{-8}$	$-4,9 * 10^{-8}$	$-4,8 * 10^{-7}$

La Tabla 5 pone de manifiesto la asimetría existente entre los procesos de erosión y acreción, produciéndose en todas las playas la erosión más lenta que la acreción. Para las cinco primeras playas, el orden de magnitud 10^{-7} para la constante de acreción y 10^{-8} para la de erosión, indica que la velocidad con la que se mueve su línea de costa es inferior a lo que ocurre en la playa de Zarautz.

5.3. Simulación continua de la evolución de la línea de costa

La Figura 26 representa el resultado de la evolución de la línea de costa tras haber simulado el modelo (línea de color negro) con los parámetros de mejor ajuste, junto con las posiciones registradas en las imágenes satelitales (asteriscos de color rojo).

Tal como se indicó anteriormente, el periodo 2001-2009 ha sido utilizado como calibración para obtener los valores de las constantes mientras que la validación se ha realizado en el resto del periodo (2010-2018).

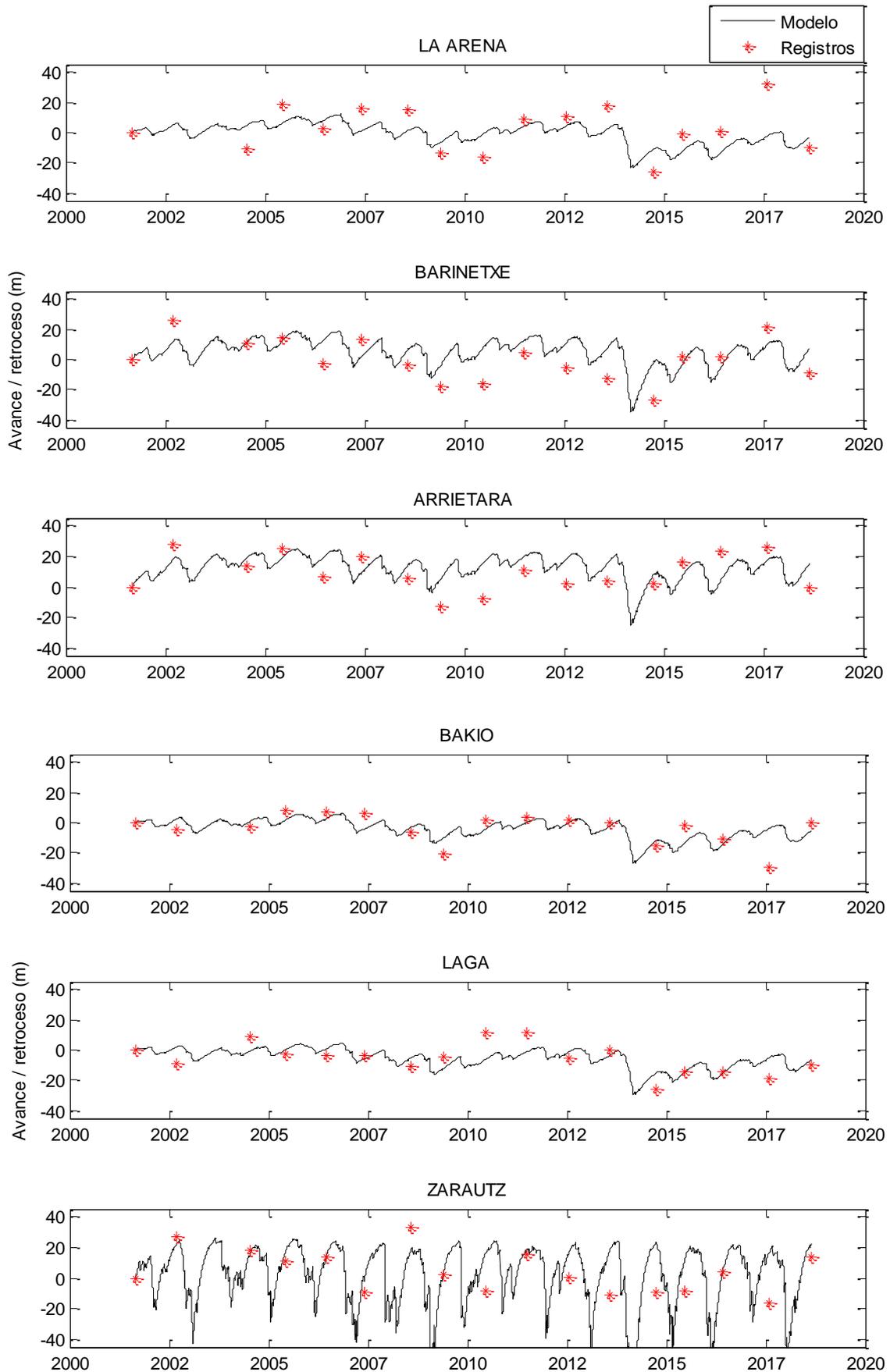


Figura 26. Simulación continua de la evolución que produce el modelo junto con las observaciones medidas.

Es evidente que existe una diferencia entre las primeras 5 gráficas y la correspondiente a la playa de Zarautz. La Figura 27 muestra la evolución que proporciona el modelo para esta playa en el rango de variación completo, llegando posiciones más retranqueadas que las alcanzadas por el modelo en el resto de las playas (rango de variación 130 m).

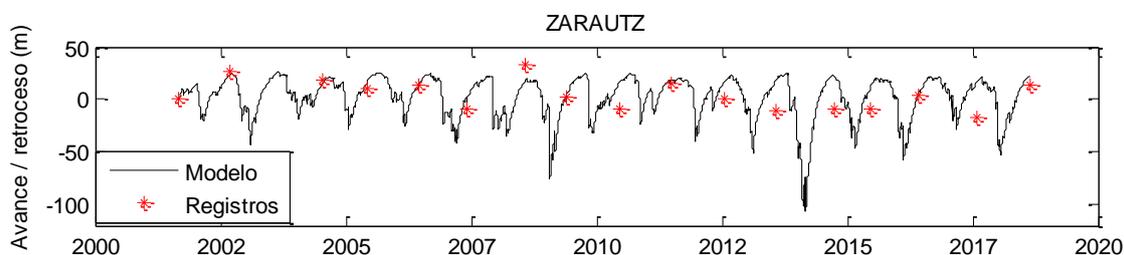


Figura 27. Simulación de la evolución de la línea de costa en la playa de Zarautz.

Se puede observar el buen comportamiento del modelo durante el periodo de calibración, coincidiendo las posiciones del modelo con las posiciones observadas. Por el contrario, durante el periodo de validación esta coincidencia deja de producirse considerablemente.

En el siguiente capítulo, en el cual se incluyen las discusiones, se trata de buscar una justificación a la diferencia entre la playa de Zarautz y el resto de las playas.

5.4. Simulación discreta de la evolución de la línea de costa

A continuación, la Figura 28 muestra los resultados de evolución de línea de costa que ofrece el modelo representando únicamente las posiciones simuladas para las fechas en las que se conoce la posición real de la línea de costa. Esta representación permite una mejor interpretación de la correlación entre simulación y mediciones, eliminando la evolución estacional de la línea de costa.

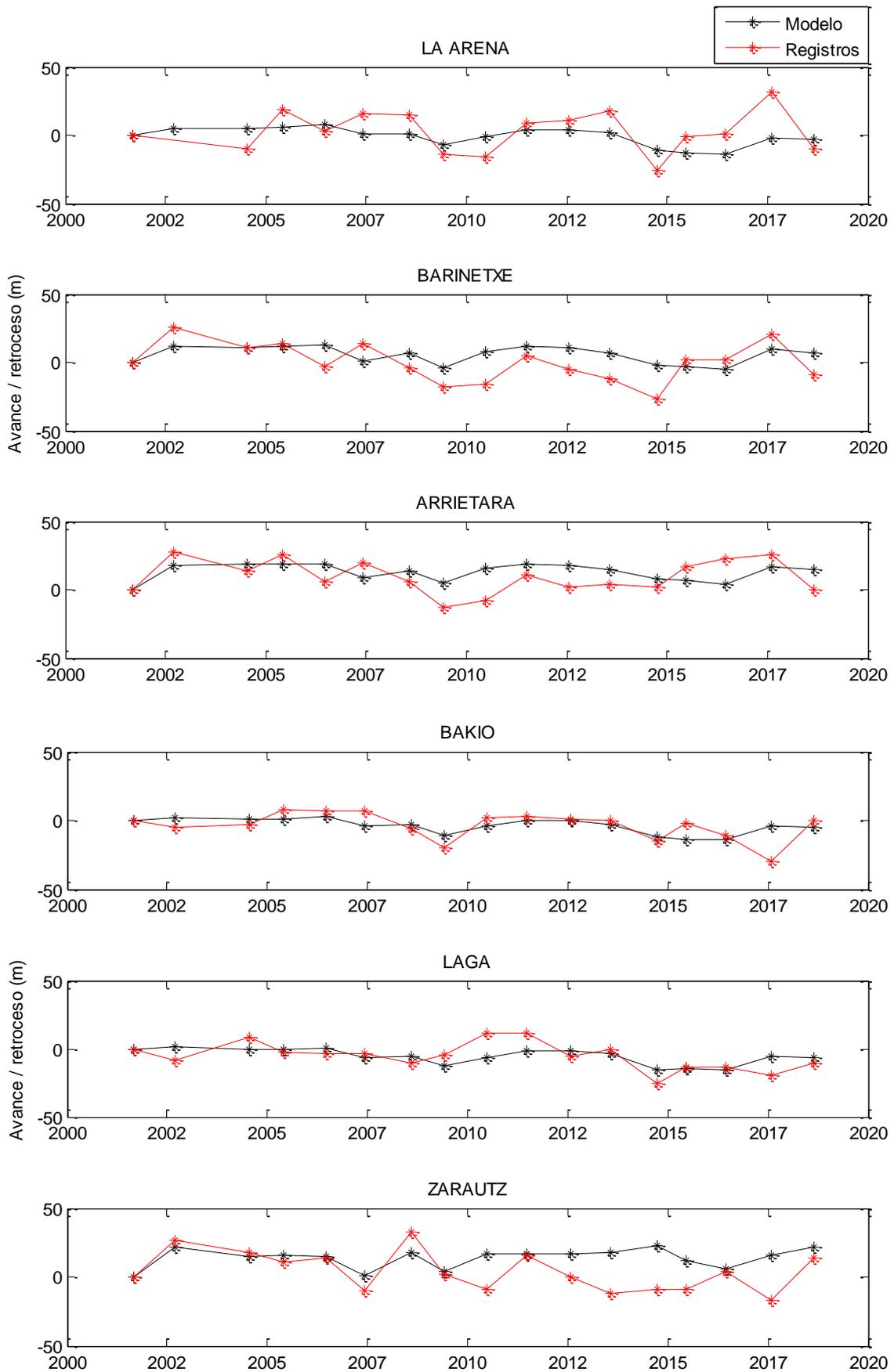


Figura 28. Simulación discreta de la evolución que produce el modelo junto con las observaciones medidas.

En la Figura 28 se puede observar cómo, de manera general, el modelo reproduce de forma aceptable la tendencia que sigue la evolución de la línea de costa en el largo plazo. La Tabla 6 da una idea sobre la capacidad del modelo a la hora de predecir la evolución de la línea de costa.

Tabla 6. Error medio cuadrático y coeficiente Pearson entre observaciones y modelo.

	La Arena	Barinetxe	Arrietara	Bakio	Laga	Zarautz
RMSE (m) (calibración)	10,61	10,72	9,30	7,10	5,02	3,87
RMSE (m) (validación)	14,54	13,75	12,40	8,62	8,12	16,75
Coficiente ρ (calibración)	0,164	0,407	0,497	0,391	0,295	0,812
Coficiente ρ (validación)	0,426	0,406	0,231	0,487	0,560	0,284

Parece lógico pensar que el error cometido por el modelo aumente al comparar aquellas posiciones para las cuales los valores no han sido calibrados. Así, el error aumenta cerca de un 30% en el periodo de validación sobre el de calibración. Para el caso de Zarautz, este valor se incrementa por cuatro.

Respecto al coeficiente de Pearson, en una situación normal, este debería disminuir al considerar un periodo mayor debido a que los parámetros no han sido calibrados para todo el espacio temporal. Esto solo ocurre en la mitad de las playas (Barinetxe, Arrietara y Zarautz), mientras que, en la otra mitad (La Arena, Bakio y Laga) el valor de la correlación entre modelo y observaciones aumenta durante la validación. Este aumento se debe a que, curiosamente, las observaciones en el periodo 2010-2018 tienen una mayor coherencia con los oleajes de ese periodo.

Como mostraba la Tabla 2, valores de ρ entre 0,4 y 0,6 (La Arena, Barinetxe, Bakio y Laga) reproducen las observaciones con una calidad moderada. Sin embargo, la correlación en Arrietara y Zarautz es baja acercándose a muy baja (ρ entre 0,2 y 0,4).

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo contiene un análisis de los resultados obtenidos, incluyendo una discusión al respecto. Adicionalmente, este capítulo recoge una lista con las fuentes de error que han podido influir en los resultados.

6.1. Aspectos singulares

A continuación, se presenta una lista con los aspectos más significativos encontrados en la Figura 26 y la Figura 28:

- a) El modelo no alcanza las posiciones más avanzadas y retranqueadas que se observaron en la línea de costa.
- b) En los años 2006 y 2007 en las playas La arena, Barinetxe y Arrietara, las gráficas muestran como las tendencias entre modelo y observaciones se cruzan, cosa que no ocurre con el resto de las playas.
- c) Las posiciones retranqueadas observadas en La Arena, Barinetxe y Arrietara en los años 2009 y 2010 no son alcanzadas por el modelo.
- d) Los temporales ocurridos en el invierno del 2014 están representados en la Figura 26. Sin embargo, en la Figura 28, se comprueba que el modelo no alcanza la posición retranqueada que se midió en las playas La Arena, Barinetxe, Laga y Zarautz.
- e) En el verano de 2017 el modelo produce un avance de la línea de costa con respecto a la posición del año anterior. En la Figura 23 se distinguían tres playas medidas con avances y las tres restantes medidas en retroceso.
- f) En la Figura 26 existe una diferencia entre el comportamiento del modelo para la playa de Zarautz y el resto de las playas. Esta diferencia también se aprecia en la Tabla 5, donde los valores de las constantes C^+ y C^- son un orden de magnitud mayor, provocando que el modelo se mueva en un rango de distancias mayor.

6.2. Discusión y posibles fuentes de error

Hasta ahora se ha expuesto la comparación entre la posición que ocupa la línea de costa simulada por el modelo y aquella observada en las playas, sin analizar las causas que expliquen las variaciones encontradas.

Antes de atribuir estos retranqueos exclusivamente a los efectos de la energía del oleaje, hay que considerar otros aspectos que pueden afectar a la variabilidad de su posición, como variaciones en la vertical del nivel del mar, ligadas por ejemplo a la marea astronómica, u otros factores que modifiquen la morfología de las playas y repercutan en la posición de esta línea.

A continuación, se detalla una justificación a los aspectos singulares señalados anteriormente.

- a) Las posiciones extremas observadas no son alcanzadas por el modelo debido a que la velocidad de acreción y erosión que proporcionan las constantes C^+ y C^- no son tan elevadas como para producir esas posiciones. Al disponer únicamente de posiciones observadas en verano, las posiciones más retranqueadas ocurridas durante los temporales del invierno no están registradas, siendo el rango de variación registrado inferior a 60 m, en cualquier caso. Por lo tanto, a la hora de calibrar las constantes de acreción y erosión que supongan menor error, el modelo trata de mantenerse en ese rango de variación, evitando posiciones extremas en las que no existe una referencia medida.
- b) El cruce entre la línea del modelo y las observaciones entre 2006 y 2007 es debido al avance registrado en las playas el año 2007. Según el modelo, la energía del oleaje hasta el 2007 es inferior al registrado hasta el 2006, por lo que este pronostica un avance de la línea de costa en ese periodo. Sin embargo, efectos locales como pueden ser estados disipativos intermedios no son contemplados por el modelo y pueden producir esa discrepancia entre observaciones y simulación.
- c) Al igual que ocurre con en punto anterior, efectos locales en la morfología de las playas u otros fenómenos no tenidos en cuenta por el modelo provocan que la línea de costa se sitúe más retranqueada en las observaciones que en la simulación. Sin embargo, a pesar de que el modelo no alcanza tal retroceso, se observa como produce una erosión generalizada en todas las playas el año 2009 con la posterior acreción el siguiente año. Considerando la evolución a largo plazo, el modelo sigue el mismo patrón que las observaciones, pronosticando posiciones retranqueadas los años en que las observaciones marcan un valle en la Figura 28.

- d) Según el modelo, estas playas deberían haber recuperado gran parte del avance de su línea de costa a fecha 27 de septiembre de 2014. Esto indica que la velocidad del proceso de acreción supuesta por el modelo es mayor que la que necesitan las playas tras un invierno muy energético.
- e) Este contraste se debe a efectos locales en la propagación del oleaje. Las tres primeras playas (La Arena, Barinetxe y Arrietara), ubicadas próximas entre sí, manifiestan posiciones observadas similares. Por el contrario, las tres playas situadas al Este (Bakio, Laga y Zarautz) presentan posiciones más dispares entre ellas, discrepancia que puede estar condicionada por el distanciamiento entre ellas.
- f) Tras el análisis del comportamiento del modelo en la playa de Zarautz, se concluye que la presencia del muro invalida las mediciones observadas en la playa. Este muro, que soporta el paseo marítimo de la playa y que fue construido sobre la línea de pleamar, se ve alcanzado por la marca de arena mojada (ver Figura 29) en varias de las fotografías analizadas, como evidencia la perteneciente a la imagen del año 2007 (años 2007, 2011, 2013, 2014, 2015 y 2017). Por este motivo, la evolución simulada para la línea de costa de la playa de Zarautz carece de confianza.

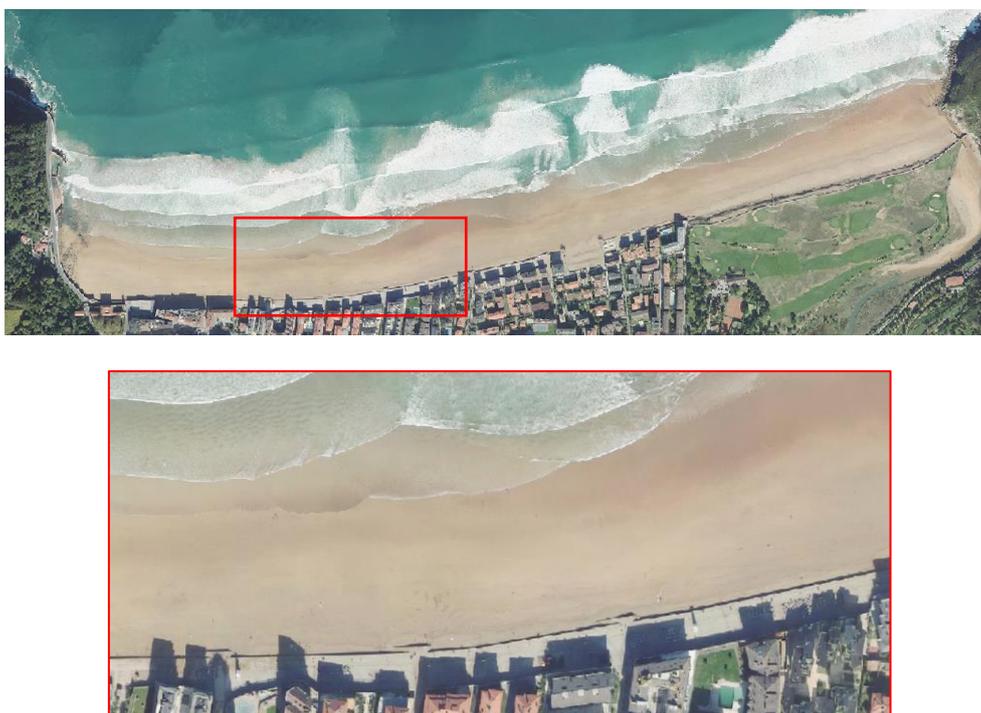


Figura 29. Paseo marítimo construido sobre la playa en la playa de Zarautz. Línea de costa observada en 2007.

Otro aspecto por considerar es la morfología de la zona intermareal de la playa. A pesar de no tener en cuenta el perfil de playa durante el estudio, la presencia de barras transversales hace que la principal hipótesis en que se basa el modelo se invalide (ver Figura 30). Esto es debido a

que el modelo, que se sirve del oleaje como único forzamiento, no contempla la morfología de la playa, basándose en la hipótesis de que la batimetría de la playa es recta y paralela. Por lo tanto, la presencia de cualquier formación arenosa que perturbe la propagación del oleaje infiere directamente en una correcta simulación del modelo.

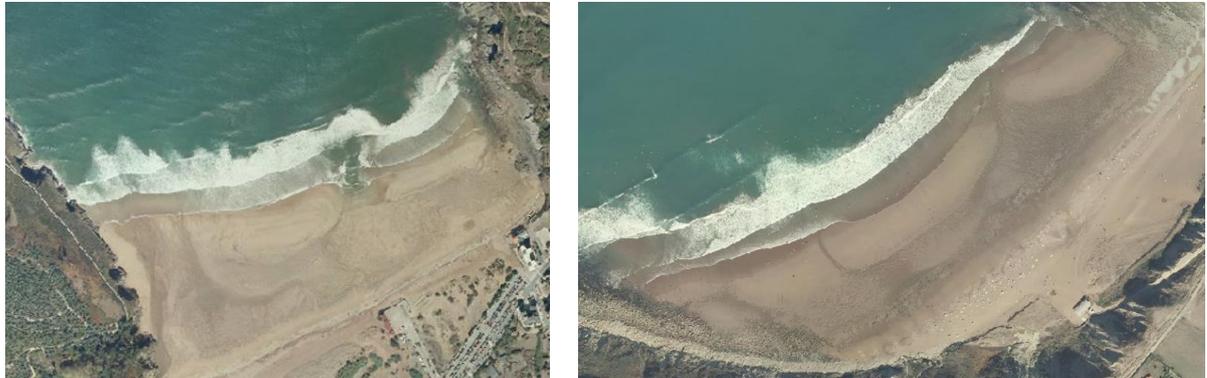


Figura 30. Estado morfodinámico intermedio en La Arena y Barinetxe (2014).

Este fenómeno, que provoca un perfil discontinuo en la longitud de la playa y no es contemplado por el modelo, invalida los resultados que el modelo infiere para esa fecha, en las que el modelo sitúa la línea de costa en una posición más avanzada que la registrada en las observaciones.

Por otro lado, tal como indicaba Vidal et al., (1995), la marea modifica la morfodinámica de la playa debido a un cambio en las condiciones hidrodinámicas de la misma. Mientras, Davis et al. (1984) y Masselink et al. (1993), enunciaban que la posición de la línea de costa varía constantemente, debido a que la morfología en una playa no es dependiente únicamente de la altura de ola absoluta o del rango de marea, sino de la combinación de ambos agentes.

Con el fin de comprender el efecto de la marea en la posición de la línea de costa, se comprueba la diferencia que produce el estado de la marea en la planta de una playa.

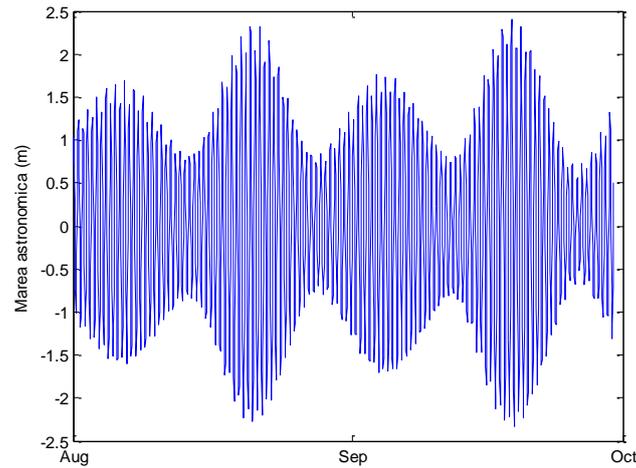


Figura 31. Nivel de marea astronómica.

La Figura 31 muestra la variación vertical del nivel del mar entre 0,7 y 2,4 m para una pleamar muerta y su consecutiva pleamar viva respectivamente. Para las playas estudiadas en este trabajo, una variación de 1,7 m en vertical, en planta puede suponer diferencias de entre 50 y 100 m.

Puesto que la marea astronómica es la misma para las seis playas, se analiza en qué nivel se encontraba esta para los años en que las observaciones se sitúan, o bien todas por encima o bien todas por debajo del modelo. La Figura 32 muestra dos ejemplos donde se dan coincidencias entre observaciones avanzadas con pleamares muertas (izquierda) y observaciones retranqueadas con pleamares vivas.

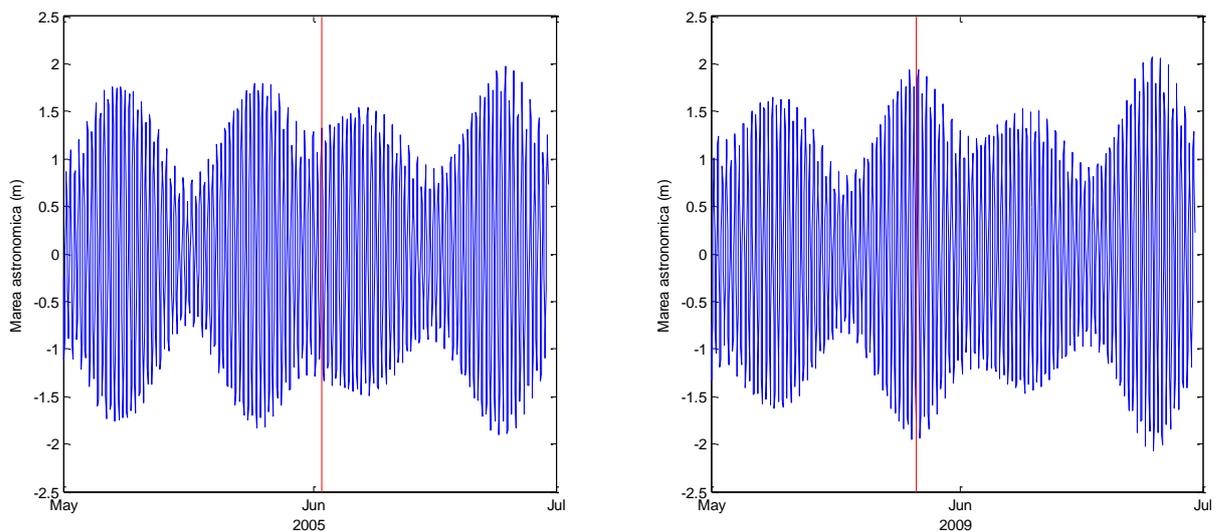


Figura 32. Nivel de marea astronómica en la fecha de las observaciones de 2005 y 2009.

Se observa en la Figura 32 (izq.) cómo el 2 de junio de 2005 el nivel de marea coincide con una marea muerta, dándose en 4 de las 6 playas (La Arena, Barinetxe, Arrietara y Bakio) una posición

observada más avanzada que la simulada por el modelo (ver Figura 28). Por el contrario, en la gráfica de la Figura 32 (dcha.), se evidencia cómo el 28 de junio de 2009 coincide una marea viva, registrándose ese día en 4 de las 6 playas (las mismas que para el caso anterior) una posición observada más retranqueada que la simulada por el modelo (ver Figura 28).

Por tanto, el efecto que tiene la marea en la posición de la línea de costa es un aspecto que resta competencia a la aplicabilidad del modelo Yates et al., (2009), siendo necesaria la implementación de la variabilidad del nivel del mar para corregir los errores que se deban a esta carencia.

Respecto a las posibles fuentes de error que afectan a los resultados, a continuación, se expone una lista con los errores consideradas durante el estudio que pueden dar lugar a una incorrecta ejecución del modelo y, por tanto, proporcionar una predicción de la evolución de la línea de costa que no se aproxime a la evolución real.

- El criterio de ubicación de la línea de costa empleado no considera que pueda haber varias marcas en la planta de la playa, debidas por ejemplo a las líneas de máximo avance en cada pleamar (en caso de disminuir el rango de marea de viva a muerta), o a elementos como bermas y escarpes producidos por los temporales, correspondiendo su vista en planta a una línea que puede dar lugar a confusión). Esta situación, que se da con frecuencia, dificulta la asignación homogénea de la misma línea durante todo el estudio.
- La propia subjetividad del autor al interpretar y digitalizar la línea de costa derivada de ese criterio.
- El modelo trabaja exclusivamente con la altura de ola en términos de energía. Los efectos que puedan tener otras características del oleaje no se contemplan, como pueden ser el periodo o la dirección. Tampoco se tiene en cuenta el nivel de marea meteorológica, aunque de menor rango que la marea astronómica, también afecta al nivel del mar en la zona de estudio.
- Los procesos longitudinales, no tenidos en cuenta en los modelos *cross-shore*, pueden tener influencia en el perfil, y por tanto en la medida de la línea de costa.
- Incluir en el estudio todas las líneas de costa observadas, incluso aquellas medidas anómalas de las que se pueda esperar que comprometan la bondad del modelo. Esto se puede solventar recurriendo a un proceso de filtrado a fin de eliminar aquellas observaciones que se desvíen ampliamente del comportamiento esperado.

- Las playas Barinetxe y Arrietara se caracterizan por consistir parte de su batimetría en una laja rocosa. Esta característica, al no estar contemplada por el modelo, puede generar posiciones diferentes a las observadas.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se presentan las principales conclusiones que se han obtenido durante la elaboración del presente trabajo fin de máster, incluyendo una serie de nuevas líneas de trabajo a fin de optimar la predicción del modelo en el largo plazo.

- El modelo reproduce de forma aceptable la tendencia que sigue la evolución de la línea de costa a largo plazo (ver Figura 33).

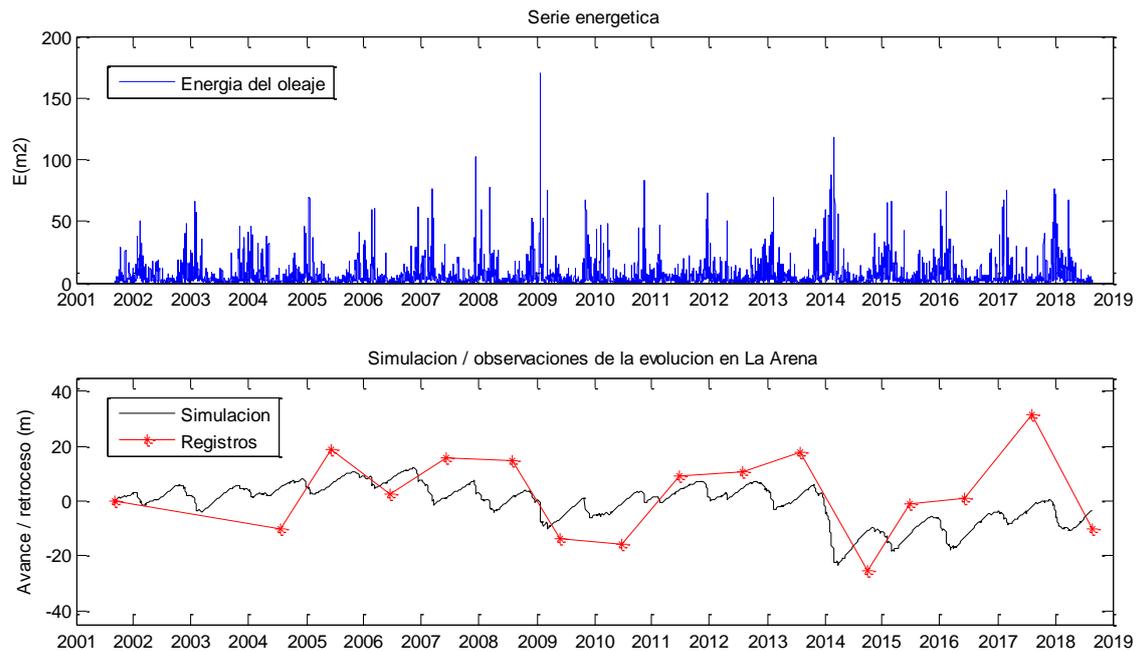


Figura 33. Serie de la energía del oleaje comparada con la evolución de la línea de costa observada y la simulada por el modelo en la playa de La Arena.

- La comparación a escala anual entre la evolución medida en las playas y la intensidad energética demuestra una coincidencia entre posiciones retranqueadas y años especialmente energéticos (ver Figura 33).
- El criterio de ubicación de la posición de la línea de costa propuesto se presenta como una aportación en el estudio de evolución de las playas.
- A la vista de los resultados, la energía del oleaje sigue siendo el principal mecanismo forzador en la variabilidad que sufre la línea de costa, incluso en el largo plazo.
- El modelo no reproduce de forma fiable la variabilidad estacional. Esta carencia radica fundamentalmente en la falta de información que se introduce al modelo. De las posiciones de línea de costa observadas, todas ellas fueron medidas en los meses de verano, por lo que el modelo no reconoce los máximos retrocesos que se pueden dar en la época de invierno (temporales más energéticos).

- El método de calibración manual de los parámetros a y b supone una subjetividad añadida debido a la escasez de datos con que se realiza la calibración.
- Los parámetros C^+ y C^- varían cuantiosamente dependiendo de lo bien que esté definida la energía de equilibrio.
- Estas constantes de acreción y erosión son muy parecidas para las 2 playas que se sitúan una a continuación de la otra (Barinetxe y Arrietara), por lo que se interpreta que las características morfológicas de la playa determinan directamente esos valores.
- La frecuencia de eventos extremos y la magnitud de estos ocurrida durante el invierno 2013-2014, fuerza al modelo a generar un importante retroceso a pesar de no disponer de observaciones vinculadas a temporales (ver Figura 26).
- Al disponer de una medida al año, al modelo le cuesta representar los procesos de pequeña escala. A pesar de ello, al ser forzado con frecuencia horaria, este indica retrocesos de la línea de costa con la ocurrencia de temporales.
- La presencia de barras transversales y estados morfodinámicos intermedios (como los observados en la Figura 30), alteran la medida de la posición de la línea de costa.
- El efecto de la marea resulta un factor determinante en la posición de la línea de costa si esta se ubica en la marca de agua que deja la última pleamar, sin incorporar al modelo la variación del nivel del mar (ver Figura 28 y Figura 32).

En cuanto a las futuras líneas de investigación, aquí se describe una serie de implementaciones que podrían optimizar el modelo:

- Con el fin de alcanzar un ajuste óptimo para la recta de energía de equilibrio en Figura 24, se puede incluir la memoria de la playa, la cual hace un promedio ponderado de la energía de los oleajes precedentes en función de su proximidad o lejanía al instante actual, empleando como pesos de la ponderación la función de memoria de la playa. Esta función decrece a medida que nos alejamos hacia atrás en el tiempo y pondera a los oleajes precedentes de tal modo que los oleajes pasados más antiguos tienen menor peso que los oleajes más recientes, Jara et al. (2018).
- Considerar un nivel del mar variable, asociado a cada estado de mar teniendo en cuenta tanto la marea astronómica como la meteorológica.
- A pesar de obtener un buen resultado utilizando el mismo forzamiento de oleaje para todas las playas, se espera que al seleccionar un oleaje en las proximidades de cada playa mejore el uso del oleaje que afecta a cada playa en concreto mejoraría la aplicabilidad del mismo al evitar fenómenos locales durante su propagación que no se han tenido en cuenta.

- Para que el modelo pueda representar la variabilidad estacional y las posiciones más retranqueadas de manera fiable, es necesario considerar mayor cantidad de líneas de costa asociadas a inviernos, de manera que este pueda caracterizar los periodos más energéticos.

8. REFERENCIAS

- **Bakker, W.T., (1970).** “The Dynamics of a Coast With a Groyne System”. 12th Conf. Coast. Eng. 6th, 115–120.
- **Castelle, B. et al., (2014).** “Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach”. Mar. Geol. 347, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.003>
- **Dabees, M.; Kamphuis, W.J., (1998).** “Online, a Numerical Model for Shoreline Change”. 26th Coast. Eng. Conf. 2668–2681. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/9780784404119.202>
- **Davidson, M. A.; Turner, I.L., (2009).** “A behavioral template beach profile model for predicting seasonal to interannual shoreline evolution”. J. Geophys. Res. 114, F01020. <https://doi.org/10.1029/2007JF000888>
- **Davidson, M. A., et al., (2010).** “Forecasting seasonal to multi-year shoreline change”. Coast. Eng. 57, 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.02.001>
- **Davidson, M. A., et al., (2013).** “A simple equilibrium model for predicting shoreline change”. Coastal Engineering, Volume 73, March 2013, Pages 191-202.
- **Davies, J.L. (1964).** “A morphogenic approach to world shorelines” Zeit. f. Geomorph., v. 8., p. 27-42.
- **Davis et al. (1984).** “What is a wave-dominated coast?” [Publicación periódica] / Marine Geology. - 1984. - Vol. 60. - págs. 313–329.
- **Del Río Rodríguez, L.; Gracia Prieto, F. (2008).** “Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa. Las Nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: Análisis de la evolución de playas y dunas.” Valencia, 2008, p.12-17.
- **Hanson, H.; Kraus, N., (1991).** “GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change”. Report 1.
- **Hanson, H.; Larson, M., (2000).** “Simulating coastal evolution using a new type of N-line model”. Coast. Eng. 2000 2808–2821.
- **Infraestructura de datos espaciales de Euskadi [On-line].** Eusko Jaurlaritz / Gobierno Vasco. geoEuskadi.eus // <https://www.geo.euskadi.eus>
- **Instituto Geográfico Nacional [On-line].** Centro Nacional de Información Geográfica de España. Comparador de ortofotos PNOA.
- **Jara, M. S., et al., (2015).** “Shoreline evolution model from a dynamic equilibrium beach profile”. Coastal Engineering, Volume 99, May 2015. Pages 1-14.

- **Jara, M.S., et al., (2018).** “Time-Varying Beach Memory Applied to Cross-Shore Shoreline Evolution Modelling”. *J. Coast. Res.* 345, 1256–1269. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-17-00041.1>
- **Jaramillo, C., et al., (2019).** “A shoreline evolution model considering the temporal variability of the beach profile sediment volume (sediment gain / loss)”. *Coast. Eng.* Submitted.
- **Kriebel, B. D. L.; Dean, R. G.; (1993).** “Convolution method for time-dependent beach-profile response”. 119, 204–226.
- **Masselink et al., (1993).** “The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model”. *Journal of Coastal Research.* - 1993. - 3 : Vol. 9. - pp. 785-800
- **Mínguez, R., et al., (2011).** “Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28, pp. 1466-1485.
- **Pelnard-Considere, R. (1956).** “Essai de theorie de l’évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets”. *Les Energies la Mer Compte Rendu Des Quatr. Journees L’hydraulique, Paris* 13, 14 15 Juin 1956; *Quest. III, Rapp.* 1, 74-1-10.
- **Perlin, M.; Dean, R. G. (1979).** “Prediction of beach planforms with littoral controls”. *Proc. 16th Coast. Eng. Conf. ASCE* 1818–1838.
- **Reguero, B. G., et al., (2012).** “A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards.” *Coastal Engineering*, Volume 65, July 2012, Pages 38-55.
- **Robinet, A., et al., (2017).** “On a reduced-complexity shoreline model combining cross-shore and alongshore processes”. *Coast. Dyn.* 1853–1862.
- **Robinet, A., et al., (2018).** “A reduced-complexity shoreline change model combining longshore and cross-shore processes: the LX-Shore model”. *Environ. Model. Softw.* 109, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.010>
- **Thieler, E. R., et al., (2009).** “The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0- an ArcGIS extension for calculating shoreline change” (No. 2008-1278). US Geological Survey.
- **Van Rijn, L., et al., (2003).** “The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models”. *Coast. Eng.* 47, 295–327. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5)
- **Vidal, C., et al., (1995).** “Modelos de morfodinámica de Playas”. (*Ingeniería del Agua* vol. 2 Núm. Extraordinario, págs. 55-74).

- **Vitousek, S., et al., (2017).** “A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change”. J. Geophys. Res. Earth Surf. 782–806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>
- **Yates, M. L., et al., (2009).** “Equilibrium shoreline response: Observations and modelling” J. Geophys. Res., 114, C09014.
- **Yates, M. L., et al., (2011).** “Equilibrium shoreline response of a high wave energy beach”. J. Geophys. Res., 116, C04014.

ANEXO I. PLAYAS ANALIZADAS

A continuación, se describen las playas sometidas a estudio en este trabajo fin de máster de oeste a este y se detallan las particularidades y propiedades de cada una. Con el fin de representar las características geométricas y morfológicas de las playas, para cada una de ellas se muestran dos imágenes aéreas: en la fotografía de la izquierda interesa ubicar la playa con respecto a los elementos presentes en sus proximidades (cabos, diques, paseos marítimos, etc.), mientras que a la derecha se representan los límites de la playa.

Los datos que acompañan a las figuras proceden del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España, concretamente de la Guía de playas de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar.

Playa de La Arena



Figura 34. Playa de la Arena (Muskitz).

Se localiza en el extremo oeste del litoral vasco, entre la punta El Castillo y Punta Lastra, perteneciendo a los términos municipales de Muskiz y Zierbena (provincia de Bizkaia).

A pesar de que recibe los aportes fluviales del río Barbadún que desemboca en su extremo oeste, no hay constancia de que reciba un aporte sedimentario significativo. Por su propia morfología, está expuesta a la acción del oleaje y a corrientes costeras debidas al viento y a la marea.

Tabla 7. Características de la playa de La Arena.

Longitud (m)	Anchura (m)			D ₅₀ (mm)	Orientación
	Mínima	Máxima	Diferencia		
960	90	350	260	Medio - fino	NNW

Playa Barinetxe



Figura 35. Playa Barinetxe (Sopelana).

Conocida como “*la salvaje*”, se encuentra ubicada entre los municipios de Sopelana y Getxo. Se trata de un arenal ventoso, de fuerte oleaje y alta ocupación en verano, abrazada por un alto acantilado cubierto de vegetación, rodeada de prados y huerta. Durante la bajamar queda al descubierto una formación geológica, la rasa mareal, en la zona de separación de Barinetxe y Arrietara. En esta playa se ha realizado una regeneración dunar, con la instalación de varios captadores de arena y plantación de vegetación para la fijación de la misma.

Tabla 8. Características de la playa Barinetxe.

Longitud (m)	Anchura (m)			D ₅₀	Orientación
	Mínima	Máxima	Diferencia		
752 m	80	260	180	Medio - fino	NW

Playa Arrietara



Figura 36. Playa Arrietara (Sopelana).

Se encuentra a continuación de la Playa Barinetxe, hacia el noreste. Su fachada litoral es semiurbana y cuenta con un muro vertical de protección sobre el que se asienta un paseo. Recibe un oleaje muy energético, siendo epicentro del surf en la zona. Se compone fundamentalmente de arena dorada en la zona intermareal y en la playa seca y presenta abundantes afloramientos rocosos en la playa sumergida. Es frecuente la disposición de una barra transversal ubicada en el centro de la playa.

Tabla 9. Características de la playa Arrietara.

Longitud (m)	Anchura (m)			D ₅₀ (mm)	Orientación
	Mínima	Máxima	Diferencia		
826	25	160	135	Medio- fino	NW

Playa de Bakio

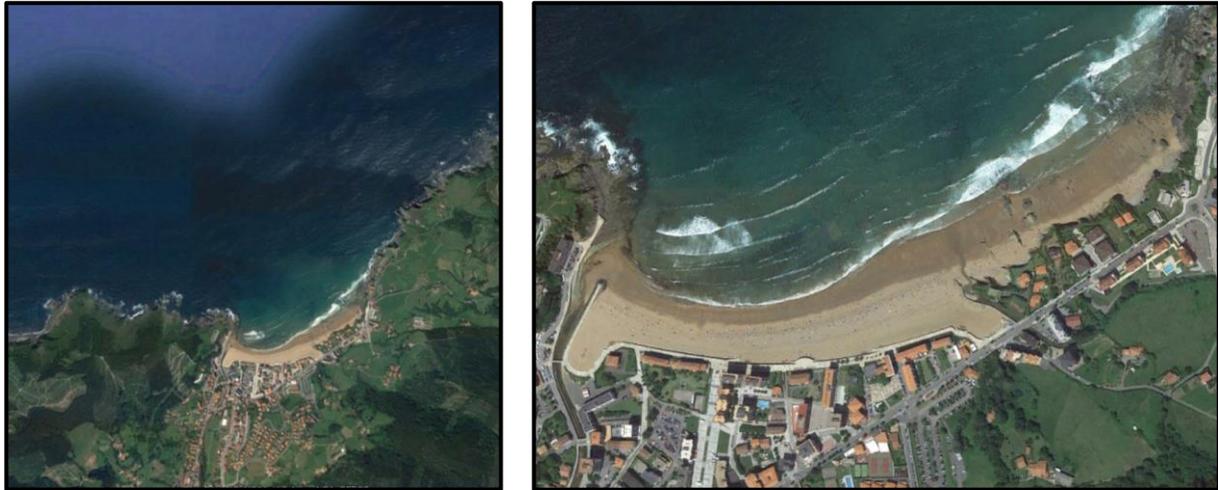


Figura 37. Playa de Bakio (Bakio).

Se trata de una playa urbana limitada al sur por un paseo marítimo. En cuanto a sus dimensiones, es la mayor de Vizcaya. Una serie de grandes rocas dividen la playa en dos partes. La influencia atlántica la confiere una forma cambiante, siendo disipativa y acumulativa de arenas, produciéndose corrientes y remolinos de distinta fuerza e intensidad a lo largo de la misma.

Tabla 10. Características de la playa de Bakio.

Longitud (m)	Anchura (m)			D ₅₀	Orientación
	Mínima	Máxima	Diferencia		
982	35	130	95	Fina	NNW

Playa de Laga



Figura 38. Playa Laga (Lagaburu).

Está ubicada en la reserva de Urdaibai, bajo el peñón del Cabo de Ogoño (279 m). La arena de Laga es de grano medio y de color dorado, formada en gran parte por restos de las conchas de invertebrados marinos. El tamaño del grano va aumentando en diámetro según nos acercamos a la zona Oeste de la playa, que es donde están situadas las rocas de las cuales proceden la mayoría de los restos de los invertebrados. Desde hace unos años, la diputación ha puesto en marcha un plan para la regeneración de dunas.

La playa no está urbanizada, aunque existe un restaurante y un par de viviendas, de las cuales está prevista su demolición en un futuro para la re-naturalización de la playa. En los meses de verano sufre una gran afluencia de visitantes.

Tabla 11. Características de la playa Laga.

Longitud (m)	Anchura (m)			D ₅₀	Orientación
	Mínima	Máxima	Diferencia		
574	75	240	165	Medio	N

Playa de Zarautz



Figura 39. Playa de Zarautz (Zarautz).

La playa de Zarautz se caracteriza por su situación en mar abierto y por tanto destaca su gran dinámica litoral. Las fuertes corrientes de oeste a este y el oleaje son los factores fundamentales de esta dinámica que es la encargada de transportar la fina arena de playa. Originalmente, el municipio de Zarautz era una gran bahía que se fue cerrando mediante una barra de arena quedando en su interior una laguna y al finalizar la última glaciación se formó una zona de marismas. Estas marismas fueron colmatándose hasta formarse una gran llanura de limos y arenas. En la actualidad la línea de playa se encuentra muy reducida, ya que las edificaciones han proliferado hacia el Norte, limitando la extensión de la playa.

La playa de Zarautz presenta mayor acumulación de arena en su parte oriental en parte debido a las propias corrientes de las aguas que distribuyen la arena, por lo que la topografía de la playa está en continuo cambio. En la zona occidental la pendiente es muy débil y en marea alta habitualmente queda toda la franja de playa sumergida bajo el agua durante al menos una hora.

Tabla 12. Características de la playa de Zarautz.

Longitud (m)	Anchura (m)			D ₅₀ (mm)	Orientación
	Mínima	Máxima	Media		
2500	-	-	80	0.25 – 0.40	NNW

ANEXO II. DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE REANÁLISIS DEL OLEAJE GOW

IH Cantabria ha generado numéricamente una base de datos horaria de oleaje de 72 años de duración (1948-2019) que cubre homogéneamente las costas de todo el territorio Español, con una resolución espacial de $1/16^{\circ} \times 1/16^{\circ}$. Dicho reanálisis, denominado GOW, “Global Ocean Waves”, (Reguero et al., 2012) se ha ejecutado con el modelo WaveWach III (Tolman, 2002) utilizando como forzamiento los vientos del SeaWindNCEP/NCAR (Menéndez et al., 2011). El reanálisis de vientos SeaWind-NCEP/NCAR es un downscaling dinámico horario de ~30 Km de resolución de viento y presión que IH Cantabria ha ejecutado con el modelo WRF-ARW 3.1.1 (Skamarock et al., 2008) con los forzamientos de NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996).

El modelo WaveWach III resuelve la ecuación de balance de densidad espectral. La hipótesis fundamental asumida por este modelo en la resolución numérica es que las propiedades del medio (corrientes y batimetría) así como las del campo de oleaje varían en el espacio y tiempo en escalas que son mucho mayores que una longitud de onda. Por lo tanto, una limitación del modelo es que no es capaz de simular los efectos de propagación del oleaje en profundidades reducidas.

Se ha calibrado la base de datos GOW con información instrumental de satélites. Para ello se ha utilizado una técnica de calibración no lineal basado en la agregación direccional de cuantiles (Mínguez et al., 2011).

