



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



*Modelo de evolución de línea de costa
IH-MOOSE considerando distintos
enfoques de transporte de sedimentos*

Trabajo realizado por:

Carlos Muñoz Taboada

Dirigido:

Mauricio González Rodríguez

Camilo Jaramillo Cardona

Titulación:

**Máster Universitario en
Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2024

TRABAJO FINAL DE MASTER

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

RESUMEN

El manejo y planificación de las zonas costeras requiere herramientas avanzadas que permitan predecir con precisión la evolución de la línea de costa, una variable sujeta a procesos dinámicos como la erosión, sedimentación, mareas y olas. El presente trabajo evalúa el desempeño del modelo IH-MOOSE, un modelo tendente al equilibrio, aplicado a la Playa de Collaroy-Narrabeen, Australia, para predecir la evolución de la línea de costa a lo largo de 40 años (1979-2019). El estudio se centra en la evaluación de tres enfoques de transporte de sedimentos cross-shore (transversal) integrados en IH-MOOSE: Yates et al. (2009), Miller et al. (2004) y Lim et al. (2022)

Para la evaluación, se siguió una metodología en la que se analizaron los resultados del modelo IH-MOOSE al considerar diferentes enfoques para el transporte de sedimentos, combinando la forma en planta de la playa y la rotación de la playa. La evaluación de los resultados se realizó a través de métricas como el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación de Pearson (ρ) y el índice de habilidad (Skill Index). Los resultados muestran que el modelo IH-MOOSE con el enfoque YA09 es el que mejor predice la evolución de la línea de costa, presentando un RMSE de 11.8 m y una correlación de 0.59, lo que indica una alta correspondencia entre los datos medidos y modelados. En cambio, los enfoques MD04 y L22 presentaron mayores dificultades para predecir el transporte, con RMSE ligeramente más altos (12.4 m y 12.3 m, respectivamente).

En cuanto a la comparación entre los distintos enfoques, se encontró que YA09 es más eficiente ya que requiere menos datos de entrada, lo que lo hace una opción más adecuada para estudios con disponibilidad limitada de información detallada. Los enfoques MD04 y L22, aunque útiles para capturar tendencias generales, requieren más datos de entrada y mostraron una menor capacidad para predecir la evolución costera en escenarios con alta variabilidad sedimentaria.

Este estudio proporciona una base sólida para futuras investigaciones en la modelación de la evolución de la línea de costa, proponiendo mejoras en la calibración de los modelos y la consideración de otros enfoques para mejorar la precisión en playas dinámicas. Además, se sugiere explorar la integración de otros modelos de transporte de sedimentos y la optimización del desempeño de IH-MOOSE.

ABSTRACT

Coastal zone management and planning require advanced tools that can accurately predict shoreline evolution, a variable subject to dynamic processes such as erosion, sedimentation, tides, and waves. This study evaluates the performance of the IH-MOOSE model, an equilibrium-based model applied to Collaroy-Narrabeen Beach, Australia, to predict shoreline evolution over 40 years (1979–2019). The study focuses on assessing three cross-shore sediment transport approaches integrated into IH-MOOSE: Yates et al. (2009), Miller et al. (2004), and Lim et al. (2022).

The evaluation followed a methodology that analyzed the results of the IH-MOOSE model by considering different sediment transport approaches, combining the shoreline planform and beach rotation. The performance was assessed using metrics such as the root mean square error (RMSE), Pearson correlation coefficient (ρ), and Skill Index. The results show that the IH-MOOSE model with the YA09 approach provides the best prediction of shoreline evolution, with an RMSE of 11.8 m and a correlation of 0.59, indicating a strong correspondence between measured and modeled data. In contrast, the MD04 and L22 approaches encountered greater challenges in predicting sediment transport, with slightly higher RMSE values (12.4 m and 12.3 m, respectively).

When comparing the different approaches, YA09 was found to be more efficient as it requires fewer input data, making it a more suitable option for studies with limited availability of detailed information. The MD04 and L22 approaches, although useful for capturing general trends, require more input data and demonstrated a lower capacity to predict shoreline evolution in scenarios with high sediment variability.

This study provides a solid foundation for future research on shoreline evolution modeling, proposing improvements in model calibration and the consideration of alternative approaches to enhance accuracy in dynamic beach environments. Additionally, it is suggested to explore the integration of other sediment transport models and the optimization of IH-MOOSE's performance.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

ÍNDICE

1	Introducción	7
1.1	Objetivos.....	9
1.2	Organización del documento.....	9
2	Metodología	11
2.1	Introducción	11
2.2	Cross-shore	13
2.2.1	Modelo YA09	13
2.2.2	Modelo MD04	15
2.2.3	Modelo L22.....	16
2.3	Modelo de forma en plan de equilibrio.....	17
2.3.1	Modelo parabólico Hsu y Evans (1989).....	17
2.4	Modelo de rotación	19
2.4.1	Modelo JA21.....	19
3	Zona de estudio y datos de entrada a los modelos	22
3.1	Localización	22
3.2	Definición de línea de costa	23
3.3	Clima marítimo	25
3.3.2	Nivel del mar	27
3.4	Datos de entrada a los modelos.....	28
4	Resultados	29
4.1	JA21	31
4.2	IH-MOOSE con YA09.....	32
4.3	IH-MOOSE con MD04	36
4.4	IH-MOOSE con L22	38
5	Discusión	41
5.1	Comparativa de resultados frente a Jaramillo et al. (2021)b.....	41
5.2	Desempeño del modelo IH-MOOSE con diferentes enfoques de transporte cross-shore	42
5.3	Análisis de la metodología: enfoques alternativos	43
5.4	Limitaciones y consideraciones del modelo IH-SET	44
6	Conclusiones y futuras líneas de investigación	45
	Bibliografía	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del modelo IH-MOOSE.....	13
Figura 2. Relación biunívoca entre energía y su correspondiente posición de la costa. Los puntos indican las mediciones, el azul representa la acreción y el rojo la erosión. Figura tomada de Yates et al. (2009).....	14
Figura 3. Esquema de definición de la evolución de la línea de costa según el cambio del nivel del mar debido a la marea de meteorológica y el Set-up. Figura tomada de Miller y Dean, (2004).	16
Figura 4. Tasa de cambio en la orientación de la línea de costa $dasdt$ (ver escala de colores), en función de la dirección promedio de las olas entre observaciones $\langle\theta(^{\circ}N)\rangle$ y la orientación inicial de la línea de costa $\alpha s(^{\circ}N)$. La línea negra sólida es la relación de equilibrio más precisa, es decir, el EWDF. (Para la interpretación de las referencias al color en esta leyenda de la figura, se remite al lector a la versión web de este artículo). Figura Tomada de Jaramillo et al. (2021)b.	20
Figura 5. Mapa de localización de la zona de estudio en la costa Este de Sidney. En la imagen de la izquierda se representa el punto GOW y en la imagen de la derecha se muestra la Playa de Narrabeen incluyendo los perfiles de monitorización y una línea de costa de referencia....	23
Figura 6. Perfiles 1, 2, 4, 6 y 8 a lo largo de la Playa de Narrabeen durante el periodo de 1979 a 2019.....	25
Figura 7. Histograma de altura de ola significativa y periodo de pico.	26
Figura 8. Diagrama box-plot estacional de Hs y Tp.	26
Figura 9. Rosa direccional de altura de ola significativa anual (izquierda) y Rosa direccional de periodo de pico anual (derecha).	27
Figura 10. Serie temporal de marea astronómica.....	28
Figura 11. Evolución de orientación de costa en la Playa de Narrabeen. En la parte superior se muestra el resultado del modelo de evolución de la orientación de la línea de costa utilizando el modelo de JA21, mientras que en la parte inferior se muestra el forzamiento.	32
Figura 12. Evolución de la posición de la línea de costa medidas frente a las modeladas para el perfil PF4, utilizando la formulación de YA09 para el desplazamiento cross-shore. En la parte superior se presenta la energía incidente en la playa, seguido de los resultados obtenidos en este estudio para el periodo 1979-2019 y en la parte inferior los obtenidos por Jaramillo et al. (2021)b.	33
Figura 13. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa utilizando YA09 para el transporte de sedimento cross-shore (periodo 1979-2019)	35
Figura 14. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa obtenidos por Jaramillo et al. (2021)b (periodo 1979-2015).	36
Figura 15. Evolución de la posición de la línea de costa medidas frente a las modeladas para el perfil PF4, utilizando la formulación de MD04 para el desplazamiento cross-shore. En la parte superior se presenta la energía incidente en la playa, seguido de los resultados obtenidos en este estudio.	37
Figura 16. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa utilizando MD04 para el transporte de sedimento cross-shore.	38
Figura 17. Evolución de la posición de la línea de costa medidas frente a las modeladas para el perfil 4, utilizando la formulación de L22 para el desplazamiento cross-shore.	39
Figura 18. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa utilizando L22 para el transporte de sedimento cross-shore.	40

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla resumen de los inputs y parámetros de calibración de los modelos utilizados en el estudio.....	21
Tabla 2. Parámetros de ajuste del modelo (RMSE, ρ , RP, MSS, NS) junto con los de calibración ($L+$, $L-$, a, b) para JA21.....	32
Tabla 3. Resumen de las estadísticas cuantitativas y parámetros de calibración para los distintos modelos seleccionados.	40

1 Introducción

La línea de costa es una región de vital importancia tanto ecológica como socioeconómicamente. Las zonas costeras albergan diversos ecosistemas, desde marismas hasta dunas y playas, que desempeñan funciones cruciales en el turismo y en la protección de la costa. Además, estas áreas son fundamentales para el desarrollo urbano y turístico, proporcionando espacios para la recreación, el comercio y la residencia. Sin embargo, la franja costera es también una de las más dinámicas y vulnerables del planeta, sujeta a la acción de procesos naturales como las mareas, las olas y las corrientes, así como a la influencia de actividades humanas que incluyen la urbanización, la construcción de infraestructuras y la explotación de recursos.

La erosión costera es uno de los problemas más acuciantes en las zonas costeras. El avance del mar y la pérdida de tierras afectan a miles de comunidades alrededor del mundo, poniendo en riesgo vidas humanas, propiedades y ecosistemas. Este fenómeno se podría ver agravado por el cambio climático, contribuyendo al aumento del nivel del mar y a la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos. La gestión de las costas, por tanto, requiere de herramientas avanzadas que permitan predecir la evolución de la línea de costa y diseñar estrategias de mitigación y adaptación adecuadas. Los modelos de evolución costera son instrumentos esenciales en este ámbito, proporcionando predicciones basadas en la comprensión de los procesos físicos y sedimentarios que conforman y transforman las playas.

Para anticipar los cambios en las costas, los ingenieros y gestores disponen de varias herramientas. Tradicionalmente, los modelos se han clasificado en tres tipos principales: empíricos, analíticos y numéricos, dependiendo de la complejidad de las ecuaciones que emplean y de su forma de resolución. Dentro de la categoría de modelos numéricos, existen numerosos ejemplos en la literatura científica. Entre las diferentes clases de modelos que simulan la evolución costera, destacan los modelos *multi-line* (p.ej., Perlin y Dean, 1983; Hanson y Larson, 2000), los modelos *one-line* (p.ej., Pelnard-Considère, 1956; Hanson y Kraus, 1991) y los modelos combinados (p.ej., Vitousek et al., 2017; Robinet et al., 2017).

Además, existen los modelos de evolución tendentes al equilibrio, o Equilibrium-Based

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Shoreline Evolution Modelos (EBSEM), que son los más simples y destacan por su capacidad para reproducir la evolución costera a medio y largo plazo con un bajo coste computacional. Hay varios ejemplos en la literatura: algunos asumen que la posición de la línea de costa es un punto que avanza o retrocede a lo largo del perfil de la playa (p.ej., Mole et al., 2012; Davidson et al., 2013); otros consideran que la posición de la línea de costa es la distancia promedio a lo largo de un tramo monitoreado de la playa (p.ej. Stokes et al., 2015; Yates et al., 2009). Finalmente, hay modelos que tratan la posición de la línea de costa como la distancia promedio a lo largo de toda la playa, asumiendo un comportamiento lineal (p.ej., Jara et al., 2015).

Respecto a la variación en la orientación de la playa, existen principalmente dos enfoques. El modelo de Turki et al. (2013) propuso una formulación semiempírica basada en la hipótesis de que la tasa de erosión costera está directamente relacionada con la energía del oleaje incidente. Por otro lado, Jaramillo et al. (2020b) desarrolló un modelo que asume que la rotación de la playa es inducida por la potencia y dirección de las olas entrantes.

En la investigación realizada por Jaramillo et al. (2021)a, se presentó la propuesta de modelo de evolución de costa denominado Model Of Shoreline Evolution o IH-MOOSE, que fue calibrado y validado en la bahía de Collaroy-Narrabeen, Australia, durante el periodo tiempo comprendido entre 1979 y 2015. El IH-MOOSE es un modelo tendente al equilibrio que define la evolución de la línea de costa en playas encajadas. Abarca una escala temporal que va desde meses hasta décadas, lo que permite analizar los cambios a medio-plazo en áreas altamente dinámicas. El IH-MOOSE se distingue por su complejidad reducida, combinando tres enfoques clave: el movimiento de la costa debida al transporte de sedimentos transversal o también conocido como transporte *cross-shore*, el movimiento de rotación de la costa debido a transporte longitudinal o *longshore* y la definición de la forma en planta de la playa siguiendo una expresión parabólica.

El estudio de Jaramillo et al. (2021)a incluyó una configuración inicial del modelo IH-MOOSE, utilizando una propuesta única para representar el cambio costero causado por el transporte transversal o *cross-shore* y otra para el movimiento de rotación. Sin embargo, se identificó la necesidad de evaluar el desempeño del modelo con diversas combinaciones de modelos de partida para mejorar la predicción del transporte de sedimentos. Por ello, la presente investigación se propone explorar la metodología del

IH-MOOSE considerando diferentes modelos de partida.

A diferencia de otros modelos existentes, el enfoque propuesto en este estudio destaca por su simplicidad al no requerir la división de la playa en transectos, una característica que reduce significativamente el tiempo de cálculo.

Este análisis no solo permitirá identificar las mejores prácticas y recomendaciones para la aplicación del modelo IH-MOOSE en estudios futuros, sino que también proporcionará una base sólida para mejoras y desarrollos futuros en la modelación del transporte de sedimentos en entornos costeros.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de la presente investigación es evaluar el desempeño del modelo IH-MOOSE considerando diversas combinaciones de modelos de partida, con el fin de determinar cuál presenta el mejor desempeño.

A continuación, se detallan los objetivos específicos:

- Evaluar el desempeño del modelo IH-MOOSE en la Playa de Collaroy-Narrabeen considerando 40 años de evolución de costa en el periodo de estudio comprendido entre 1979 y 2019.
- Identificar fortalezas y debilidades de cada configuración del modelo IH-MOOSE considerando distintas variaciones de los modelos de partida.

1.2 Organización del documento

Con el objetivo de facilitar la redacción del informe, el presente documento se ha organizado en capítulos del siguiente modo:

Capítulo 1. Introducción, donde se ofrece una breve revisión del estado del arte, se expone la motivación del estudio, y se establecen tanto el objetivo general como los objetivos específicos del proyecto, seguido por la estructura del documento.

Capítulo 2. Metodología: en esta sección se describen los modelos seleccionados y se detallan las características específicas de cada uno, junto con los métodos utilizados para evaluarlos.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Capítulo 3. Descripción de la zona de estudio y datos de entrada a los modelos, en la que se describe de forma global los elementos morfológicos más relevantes de la zona de estudio en su configuración actual y pasada, así como las características de la dinámica marina y los datos de entrada para el modelo.

Capítulo 4. Resultados, donde se exponen los principales resultados obtenidos, a partir de los cuales se puede realizar la comparación entre los distintos modelos.

Capítulo 5. Discusión, exposición y comentarios de los resultados, a partir de los cuales se presenta una comparación entre los distintos modelos.

Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

2 Metodología

A continuación, se presenta la metodología seguida en este estudio, en la cual se ha utilizado la herramienta IH-MOOSE (Jaramillo et al., 2021a), desarrollada por el Grupo de Ingeniería y Gestión de la Costa del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, IHCantabria.

2.1 Introducción

El presente trabajo se centra en el estudio de la metodología del modelo propuesto por Jaramillo et al. (2021a) denominado Model Of Shoreline Evolution o IH-MOOSE, un modelo tendente al equilibrio que define la evolución de la línea de costa en playas encajadas. Abarca una escala temporal que va desde meses hasta décadas, lo que permite analizar los cambios a medio-plazo en áreas altamente dinámicas. El IH-MOOSE se distingue por su complejidad reducida, combinando tres enfoques clave: el movimiento de la costa debida al transporte de sedimentos transversal o también conocido como transporte *cross-shore*, el movimiento de rotación de la costa debido a transporte longitudinal o *longshore* y la definición de la forma en planta de la playa siguiendo una expresión parabólica. En la Figura 1 se muestra la metodología para este modelo.

La aplicación del modelo IH-MOOSE resulta preferible en entornos costeros donde se mantiene la conservación del balance de sedimentos. Sin embargo, es importante destacar que en la propuesta inicial del IH-MOOSE se contempla la posibilidad de utilizar una variación del modelo de Yates et al. (2009) desarrollada por Jaramillo et al. (2020), para simular el transporte *cross-shore* en áreas con ganancias o pérdidas netas de sedimento.

Tal como se presenta en la Figura 1, el primer paso para utilizar el modelo IH-MOOSE es obtener los datos iniciales, seleccionar los casos representativos de oleaje en aguas profundas y, posteriormente, propagar el oleaje hacia la costa y reconstruir las series de oleaje en los puntos de interés. A continuación, se calcula el desplazamiento de sedimentos perpendicular a la línea de costa, es decir, el movimiento *cross-shore*. En la propuesta inicial presentada por Jaramillo et al. (2021a) se empleó el modelo *cross-shore* propuesto por Yates et al. (2009), sin embargo, en la presente investigación se recurre a distintas propuestas de modelos *cross-shore* que se explicarán en el siguiente apartado.

El tercer paso consiste en generar las parábolas correspondientes al desplazamiento *cross-*

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

shore seguido por el cálculo del movimiento de rotación de la línea de costa. Por último, se rotan las parábolas y se comparan los resultados con los datos medidos.

Específicamente, se evaluarán metodologías propuestas por diversos investigadores: para el transporte *cross-shore*, se considerarán los enfoques de Lim et al., (2022); Miller y Dean, (2004); Yates et al., (2009).; para el transporte *long-shore* se considerará únicamente el enfoque de Jaramillo et al. (2021)b . A través de esta comparación, se pretende identificar las fortalezas y limitaciones de cada enfoque, así como su aplicabilidad.

Los modelos seleccionados para el análisis *cross-shore* y de rotación en este estudio se han ejecutado utilizando el software IH-SET, una herramienta en desarrollo por el Grupo de Ingeniería y Gestión de la Costa de IHCantabria, en el marco del Plan Complementario de Ciencias Marinas.

Común a todas las ejecuciones, se ha utilizado el algoritmo de optimización global llamado SCE-UA (*shuffled complex evolution method*), desarrollado en la Universidad de Arizona. Esta técnica de optimización ha sido muy exitosa en la calibración de modelos hidrológicos y es aplicable a una amplia variedad de campos (Duan et al., 1992, 1993, 1994).

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

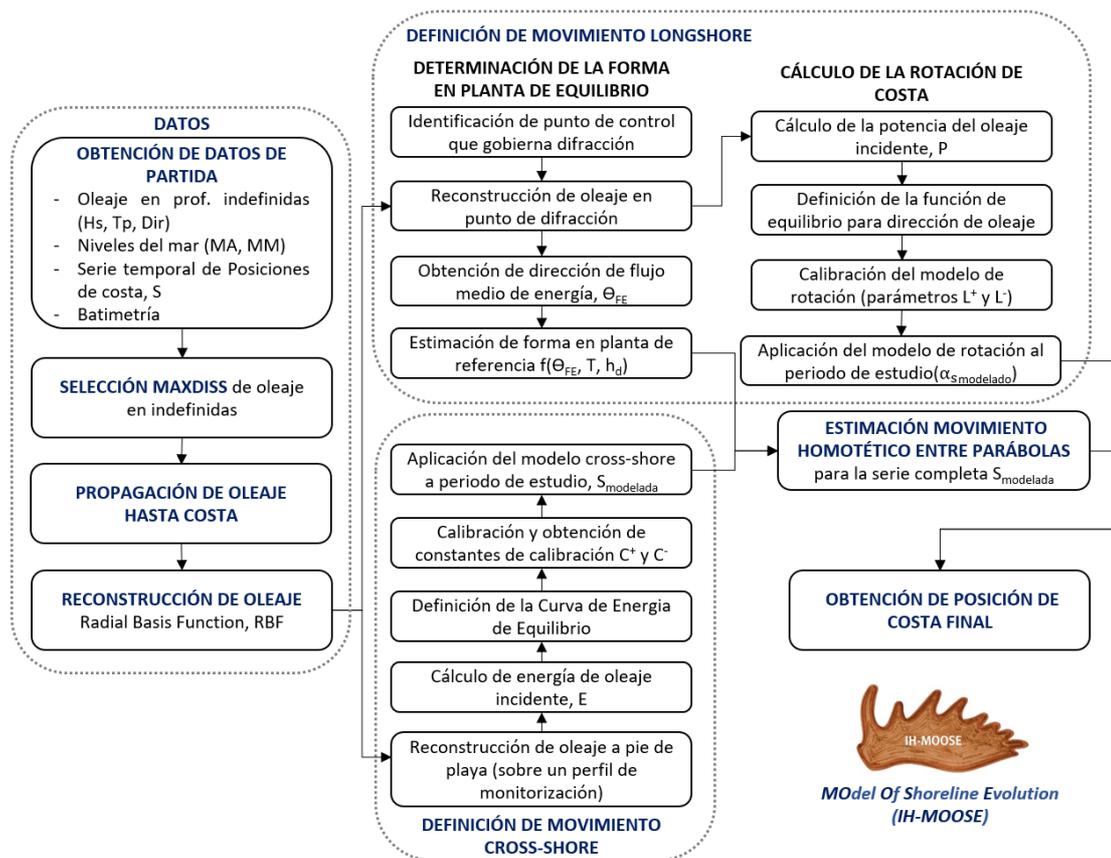


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo IH-MOOSE.

2.2 Cross-shore

En este apartado se describen las distintas propuestas de modelos de evolución de posición de línea de costa tendentes al equilibrio para reproducir el movimiento debido al transporte *cross-shore* que se han seleccionado para el estudio.

2.2.1 Modelo YA09

Yates et al., (2009) propusieron un modelo de evolución de la línea de costa conocido como YA09, que se basa en una ecuación cinética de primer orden para reproducir la evolución de costa considerando la energía del oleaje como único forzamiento. La ecuación que gobierna esta ecuación cinética se define de la siguiente manera:

$$\frac{\partial S(t)}{\partial t} = C^{\pm} \cdot E^{1/2} (E - E_{eq}(S))$$

[1]

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Donde,

$E = Hs^2$, es la energía de las olas entrantes.

E_{eq} es la energía de las olas en equilibrio correspondiente a la posición actual de la línea de costa.

$S(t)$ es la posición de la línea de costa en el tiempo (t).

S_{eq} la posición de costa en el tiempo (t).

C^\pm los parámetros libres, C^+ acreción y C^- erosión.

Yates et al., (2009) propusieron una función lineal para definir la posición de equilibrio (ver Figura 2) de la siguiente forma:

$$S_{eq} = \frac{E - b}{a}$$

[2]

Donde,

a y b son parámetros de calibración que cumplen con la función de equilibrio energético.

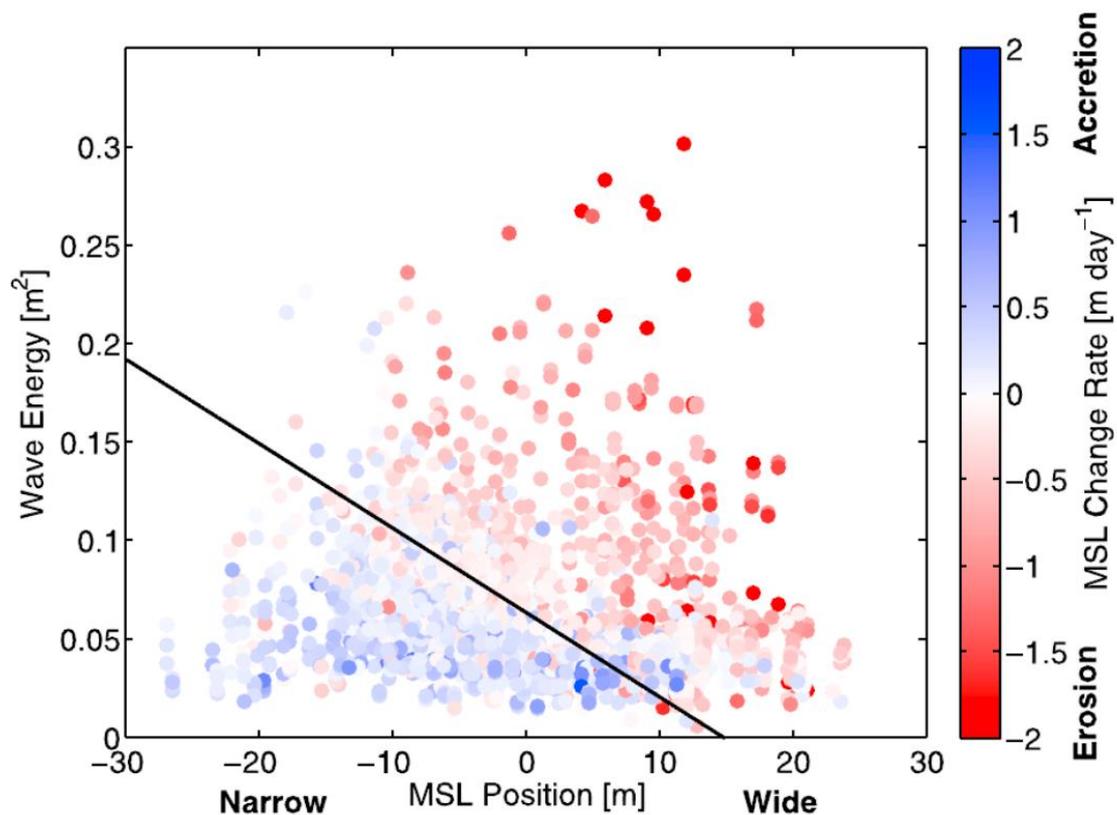


Figura 2. Relación biunívoca entre energía y su correspondiente posición de la costa. Los puntos indican las mediciones, el azul representa la acreción y el rojo la erosión. Figura tomada de Yates et al. (2009).

2.2.2 Modelo MD04

Miller y Dean (2004) resolvieron numéricamente la forma integral del modelo propuesto por Kriebel y Dean (1993), evaluando la respuesta del perfil de la playa a las variaciones del nivel del mar debidas a la combinación de la marea astronómica, la marea meteorológica y la configuración del oleaje. La expresión diferencial propuesta por Miller y Dean (2004) es:

$$\frac{dy(t)}{dt} = k(y_{eq}(t) - y(t))$$

[3]

Donde,

$y(t)$ es la posición de línea de costa en el momento t .

$y_{eq}(t)$ es la posición de equilibrio de la línea de costa determinada por la energía.

k es una constante que rige la velocidad a la que la costa se aproxima al equilibrio.

Miller y Dean (2004) propusieron una ecuación de cambio de equilibrio de la línea de costa con respecto al cambio en el nivel del mar.

$$S_{eq} = -W^*(t) \left(\frac{0.068H_b + S}{B + 1.28H_b} \right)$$

[4]

Donde,

H_b es altura de ola en rotura

S es el cambio en el nivel del mar local

B es la altura de berma

W^* el ancho de la zona activa de surf

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

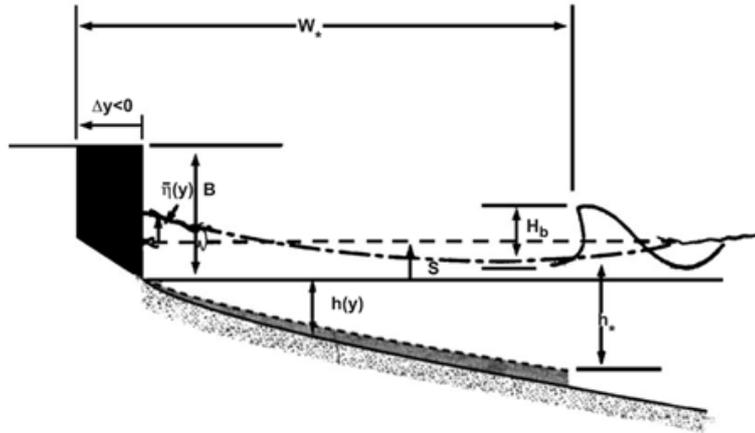


Figura 3. Esquema de definición de la evolución de la línea de costa según el cambio del nivel del mar debido a la marea de meteorológica y el Set-up. Figura tomada de Miller y Dean, (2004).

2.2.3 Modelo L22

Lim et al., (2022) analizaron el comportamiento horizontal de los sedimentos en suspensión durante tormentas para derivar una ecuación diferencial ordinaria que describe los cambios temporales en la posición de la línea de costa. La ecuación gobernante derivada tiene una forma matemática similar al modelo empírico actual.

Lim et al., (2022) derivaron el modelo de evolución de la línea de costa basado en el concepto del comportamiento horizontal de los sedimentos en suspensión de la siguiente manera:

$$\frac{\partial S(t)}{\partial t} = k_r \left(\frac{E_b}{a_r} - S(t) \right)$$

[5]

Donde,

$S(t)$ es la posición de línea de costa en el tiempo t .

E_b la energía del oleaje incidente.

k_r , a_r los factores de recuperación y respuesta de la playa.

Además, propusieron una mejora del modelo al tener en cuenta el efecto del aumento del nivel del mar debido a las olas, de la siguiente manera:

$$S_{total} = S + \mu H_b$$

[6]

Donde,

H_b es la altura de ola en rotura

μ es un parámetro libre por el efecto del set-up

2.3 Modelo de forma en plan de equilibrio

2.3.1 Modelo parabólico Hsu y Evans (1989)

El modelo parabólico propuesto por Hsu y Evans (1989) se basa en la teoría de equilibrio estático, que se aplica cuando una bahía ha alcanzado un estado casi completo de erosión, con un aporte de sedimentos insignificante o nulo. En este estado, el único parámetro de entrada relevante es la oblicuidad del oleaje en relación con la línea de control, que conecta el punto de difracción en el cabo más cercano con el extremo más alejado de la playa.

La forma de la bahía, según este modelo, se describe mediante una ecuación parabólica, que depende de dos factores geométricos principales:

- El ángulo de oblicuidad de las olas que llegan desde mar abierto.
- La línea de control, que une el cabo más cercano con el extremo opuesto de la playa.

En este contexto, la ecuación parabólica que describe la forma de la bahía es:

$$R = R_0 \left(C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta} + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \right)$$

[7]

Donde

R_0 es la longitud de la línea de control que une el punto de difracción ascendente con el punto de control de la costa descendente.

β es la oblicuidad de la ola, es decir, es decir, el ángulo entre la cresta de la onda incidente y la línea de control.

C_1, C_2, C_3 son coeficientes que dependen de la oblicuidad de la onda, β .

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El radio, R, se mide desde el punto de difracción hasta cualquier ubicación en la costa parabólica en un ángulo, θ , medido desde la cresta de la ola oblicuidad de la ola, β .

La oblicuidad de la onda, β , se define como:

$$\beta = 90^\circ - \alpha_{min} \quad [8]$$

El ángulo α_{min} es una función de la distancia adimensional de la playa a la longitud de onda X/L en el punto de difracción. La expresión analítica propuesta por González y Medina (2001) es adoptada para la estimación de α_{min} :

$$\alpha_{min} = \arctan \left[\frac{\left(\frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^2 X}{2L} \right)^{1/2}}{x/l} \right] \quad [9]$$

Donde,

β_r es una constante adimensional.

La longitud de onda de escala calcula utilizando la profundidad media del agua a lo largo del frente de onda cerca del punto de control, h_d , y el período medio de onda asociado con la altura de onda que excede 12 horas al año, H_{s12} , conocido como T_{s12} (Gonzalez y Medina, 2001):

$$L = \frac{gT_{s12}^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h_d}{L} \right) \quad [10]$$

Las tres constantes C están relacionadas con el ángulo de referencia β (Hsu y Evans 1989). Numéricamente, estos coeficientes pueden expresarse mediante polinomios de cuarto orden de la siguiente manera:

$$C_0 = 0.0707 - 0.0047\beta + 0.000349\beta^2 - 0.00000875\beta^3 + 0.00000004765\beta^4$$

$$C_1 = 0.9536 - 0.0078\beta + 0.0004879\beta^2 - 0.0000182\beta^3 + 0.0000001281\beta^4$$

$$C_2 = 1 - C_0 - C_1$$

[11]

Finalmente, la orientación del frente de onda en el punto de difracción corresponde con el frente de la dirección del flujo de energía media de las ondas, Θ_{FE} , en el área del punto de control (González y Medina, 2001).

Este modelo establece que la forma de la bahía está controlada por la interacción entre las olas oblicuas y la geometría del cabo. Si las olas inciden de manera más perpendicular, la bahía será más estrecha; mientras que, si llegan con un ángulo más oblicuo, la bahía será más ancha y abierta.

2.4 Modelo de rotación

En este apartado se describe la metodología utilizada para el cálculo de evolución de orientación de la línea de costa o movimiento de rotación de playa.

2.4.1 Modelo JA21

Jaramillo et al. (2021)b propusieron un modelo de rotación de la línea de costa tendente al equilibrio, que resulta en un método sencillo y eficaz para predecir las variaciones de orientaciones de la línea de costa en el medio-largo plazo. La orientación de la línea de costa la consideran como el ángulo entre la línea perpendicular al ajuste de regresión lineal de los datos y el norte geográfico. Este modelo, denominado en este estudio como JA21 asume que las orientaciones de la línea de costa dependen de la potencia y dirección del oleaje incidente mediante la siguiente ecuación cinética:

$$\frac{\partial \alpha_s(t)}{\partial t} = L^\pm \cdot P(-\alpha_{seq})$$

[12]

$$\frac{\partial \alpha_s(t)}{\partial t} = L^\pm \cdot P \Delta \alpha_s(\theta)$$

[13]

Donde,

donde $\alpha_s(t)$ es la orientación de la línea de costa ($^\circ$) en el tiempo t

P es la potencia de la ola incidente $P = H_s^2 \cdot T_p$

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

L^\pm : las constantes proporcionales, donde L^+ indica la rotación de la línea de costa en el sentido de las agujas del reloj y L^- indica la rotación en sentido contrario de las agujas del reloj.

$\Delta\alpha_s(\theta)$ es el desequilibrio en la orientación de la línea de costa:

$$\Delta\alpha_{seq}(\theta) = \alpha_s - \alpha_{seq} \quad [14]$$

Donde α_{seq} es la orientación de la línea de costa en equilibrio asintótico, asumida como una relación lineal entre la orientación de la línea de costa en equilibrio y la dirección de las olas incidentes:

$$\alpha_{seq} = \frac{\theta - b'}{a'} \quad [15]$$

Donde a' (-) y b' (°) son parámetros empíricos

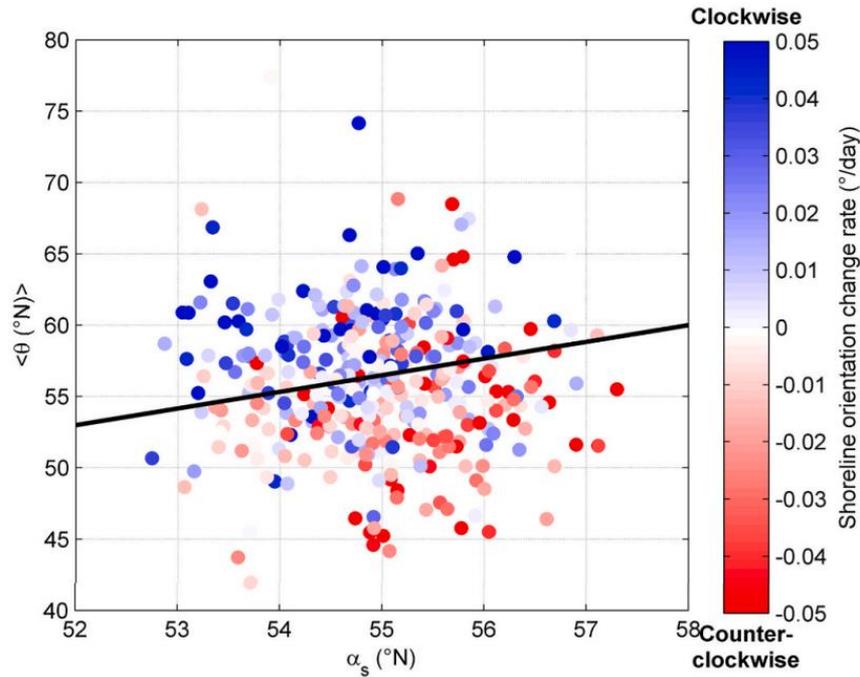


Figura 4. Tasa de cambio en la orientación de la línea de costa $\frac{d\alpha_s}{dt}$ (ver escala de colores), en función de la dirección promedio de las olas entre observaciones $\langle\theta(^{\circ}N)\rangle$ y la orientación inicial de la línea de costa $\alpha_s(^{\circ}N)$. La línea negra sólida es la relación de equilibrio más precisa, es decir, el EWDF. (Para la interpretación de las referencias al color en esta leyenda de la figura, se remite al lector a la versión web de este artículo). Figura Tomada de Jaramillo et al. (2021)b.

**MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

A continuación, se adjunta la tabla resumen con los inputs y parámetros de calibración de cada modelo *cross-shore*.

Tabla 1. Tabla resumen de los inputs y parámetros de calibración de los modelos utilizados en el estudio.

Modelo	Input	Parámetros de calibración
YA09	Serie temporal de posición de línea de costa E	a b C ⁺ : indica acreción de sedimentos C ⁻ : indica erosión
MD04	Serie temporal de posición de línea de costa Hs Altura de berma Nivel del mar	K: parámetro de calibración para la velocidad a la que la costa se acerca al equilibrio
L22	Serie temporal de posición de línea de costa E	Kr,ar μ

3 Zona de estudio y datos de entrada a los modelos

Este apartado presenta una descripción general de la localización y morfología de la zona estudio. El objetivo es destacar aquellos elementos que condicionan tanto la dinámica marina como la sedimentaria. Así también, se presenta una caracterización del clima marítimo y los datos de entrada de los modelos.

3.1 Localización

La costa este de Sídney, Australia incluye formaciones rocosas significativas como los cabos de North y South Head, que enmarcan la entrada al puerto de Sídney. Estas formaciones geológicas no solo proporcionan un paisaje característico, sino que también juegan un papel crucial en la dinámica costera de la región. Los cabos actúan como puntos de anclaje que influyen en las corrientes y el transporte de sedimentos, lo cual afecta directamente a las playas circundantes y sus patrones de erosión y sedimentación.

La costa Este de Sídney, en Nueva Gales del Sur, es una región geográficamente diversa que se extiende desde Palm Beach en el norte hasta Cronulla en el sur. Esta franja costera incluye una variedad de playas y cabos que son importantes tanto desde el punto de vista ecológico como recreativo. La Playa de Collaroy-Narrabeen descrita en este estudio como simplemente Playa de Narrabeen, es la playa objeto de estudio de la presente investigación.

La Playa de Narrabeen es conocida por su arena de cuarzo fino y su susceptibilidad a la erosión costera y la rotación de la playa debido a las variaciones en el clima de oleaje. Este fenómeno es estudiado intensivamente para entender los patrones de oscilación y recuperación de la playa.

La Playa de Narrabeen se encuentra orientada al Este, tiene una longitud de 3.6 km y está limitada por Narrabeen Head al norte y por Long Reef al sur. El tamaño medio de grano es fino ($D_{50}=0.3$ mm). De acuerdo a Harley et al., (2011) existen interacciones mínimas de sedimentos entre la playa, la laguna y las playas adyacentes, de manera que el sedimento contenido dentro de la ensenada puede considerarse un sistema cerrado.

En la Figura 5, se muestra el mapa de localización de la zona de estudio, que incluye tanto

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

la ubicación del punto de reanálisis de oleaje, *Global Ocean Waves*, GOW (ver sección 3.3), como los cinco perfiles topográficos medidos a lo largo de la Playa de Narrabeen. A partir de estos perfiles se han obtenido los datos de posición de línea de costa en este estudio, permitiendo así un análisis detallado de los cambios en el litoral y los procesos de erosión y sedimentación que ocurren en la región.

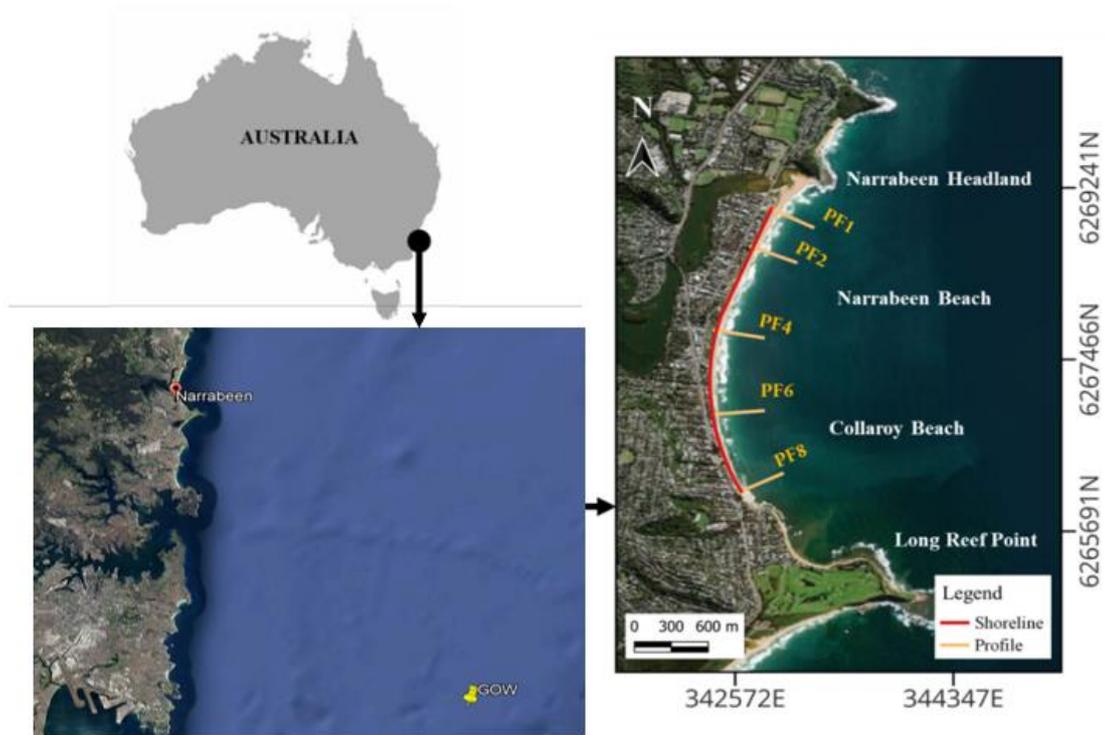


Figura 5. Mapa de localización de la zona de estudio en la costa Este de Sydney. En la imagen de la izquierda se representa el punto GOW y en la imagen de la derecha se muestra la Playa de Narrabeen incluyendo los perfiles de monitorización y una línea de costa de referencia.

3.2 Definición de línea de costa

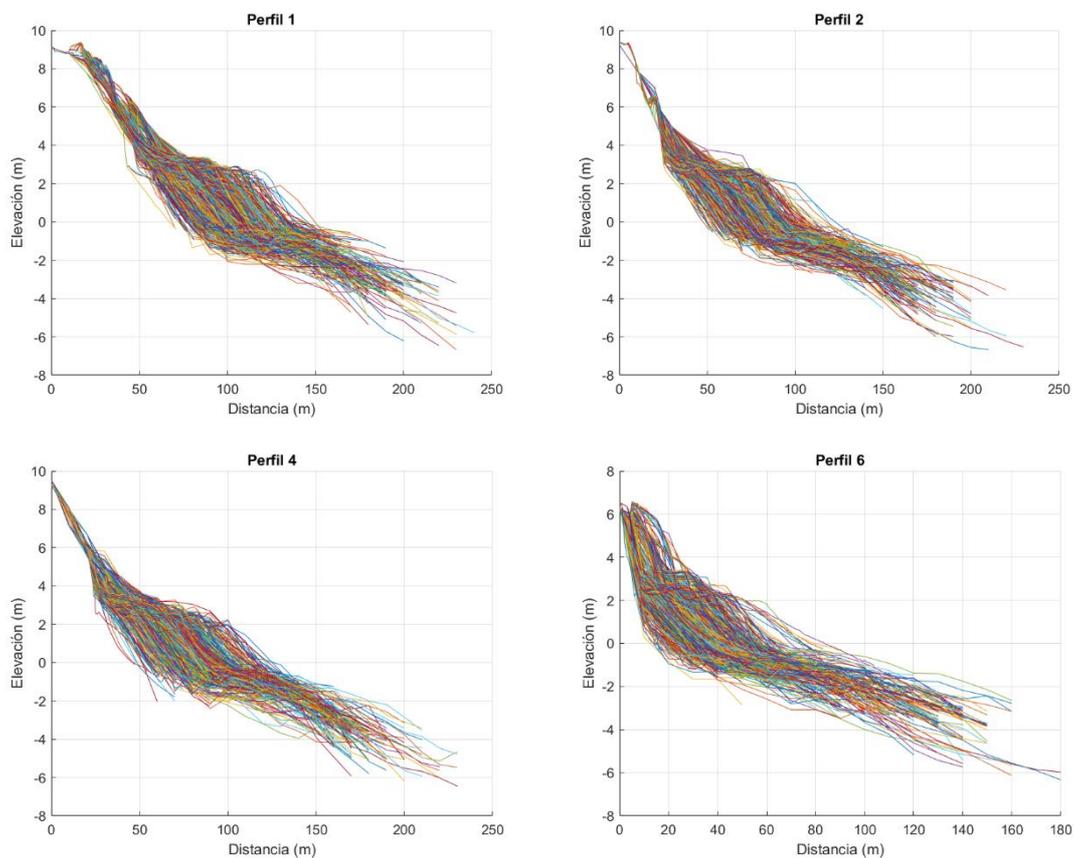
La línea de costa se entiende como la interfaz agua-tierra o el límite que separa el mar de la tierra. Este límite es dinámico y cambia con el tiempo debido a varios factores naturales y antrópicos, como las mareas, las olas, la sedimentación y la erosión. Es una característica geográfica fundamental para estudios costeros y marinos, así como para la planificación y gestión del territorio. Existen distintas formas de determinarla, aunque lo importante en la definición de la línea de costa es que una vez definido el indicador de posición de línea de costa, éste debe ser homogéneo en toda la serie temporal (Boak & Turner, 2005). En el presente estudio, el indicador de posición de la línea de costa empleado es $Z=0$ m, lo que proporciona una base uniforme para el análisis a lo largo del tiempo.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para analizar la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo, se han obtenido una serie de perfiles transversales perpendiculares a la costa en distintas localizaciones. Estos perfiles permiten evaluar los cambios en la elevación del terreno, facilitando la caracterización de los procesos de erosión y sedimentación que afectan la morfología costera.

Los datos de cada perfil se han recogido a lo largo de una serie temporal que abarca varios momentos diferentes, permitiendo así un análisis comparativo de la dinámica costera. Los perfiles, representados en función de la distancia desde la costa y la elevación del terreno, muestran variaciones significativas tanto en los sectores emergidos como en las zonas de playa sumergida.

La Figura 6 ilustra los perfiles de elevación correspondientes al periodo de 1979 a 2019, donde se puede observar la dinámica de la costa en relación con procesos de erosión, acreción y cambios topográficos.



MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

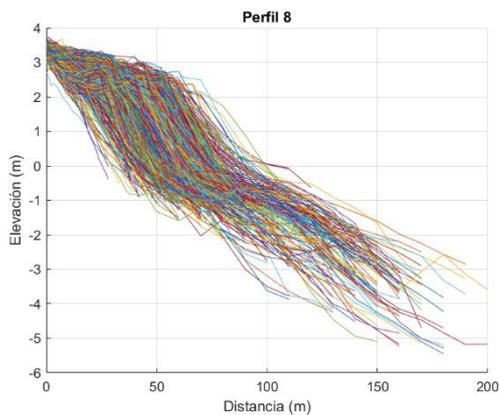


Figura 6. Perfiles 1, 2, 4, 6 y 8 a lo largo de la Playa de Narrabeen durante el periodo de 1979 a 2019.

3.3 Clima marítimo

En este apartado se caracteriza el clima marítimo que condiciona la zona de estudio y el nivel del mar. Los forzamientos empleados en este estudio provienen de una serie temporal de oleaje obtenida a partir de un punto de reanálisis en profundidades indefinidas, perteneciente a las bases de datos meteoceánicas IH-Data desarrolladas por IHCantabria. El punto GOW (*Global Ocean Waves*) seleccionado se encuentra geográficamente ubicado en la latitud 34°S y longitud 151.5°E (Figura 5). Los datos de oleaje son de carácter horario y abarcan un período temporal comprendido entre 1979 y 2019. La serie temporal incluye variables como la altura significativa de ola (H_s), el período pico (T_p) y la dirección del oleaje (θ).

3.3.1. Régimen medio

La distribución del régimen medio de cualquier variable climática representa la probabilidad de no excedencia de un valor particular de la variable en un periodo de tiempo igual a un año medio. En términos de altura de ola significativa, la distribución del régimen medio es la distribución estadística que representa el tiempo (en porcentaje) en un año medio en el cual la altura de ola significativa no excede un valor particular.

3.3.1.1 Análisis omnidireccional univariado

Las siguientes figuras muestran los histogramas de altura de ola significativa y periodo de pico. Las alturas de ola más frecuentes se sitúan en el intervalo $1 < H_s$ (m) 2, mientras que los periodos de pico más frecuentes se encuentran en el intervalo $8 < T_p$ (s) 10.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

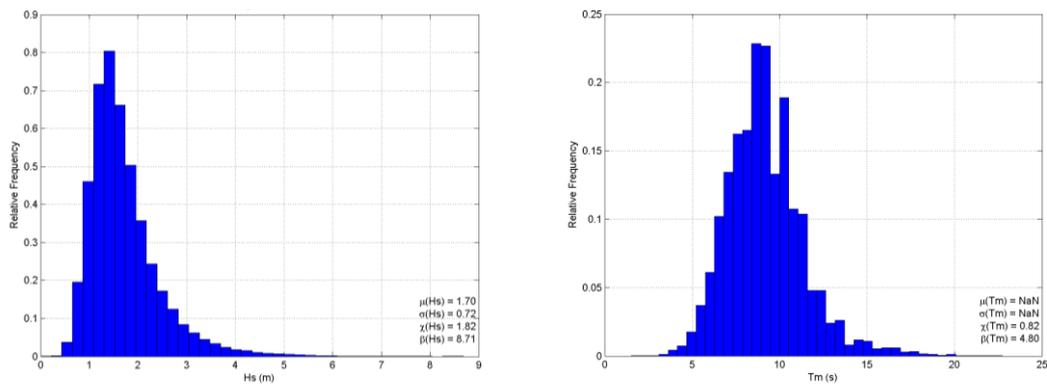


Figura 7. Histograma de altura de ola significativa y periodo de pico.

La Figura 8 muestra los diagramas box-plot de altura de ola, periodo de pico de procedencia en un año medio. De acuerdo a la serie temporal de oleaje, las alturas de ola más energéticas tienen lugar en el periodo entre abril y junio. El valor más alto de altura de ola tiene un valor de $H_s = 8.7$ m, mientras que los periodos de pico medios se sitúan en torno a los 9 s, siendo el máximo valor registrado 22.7 s.

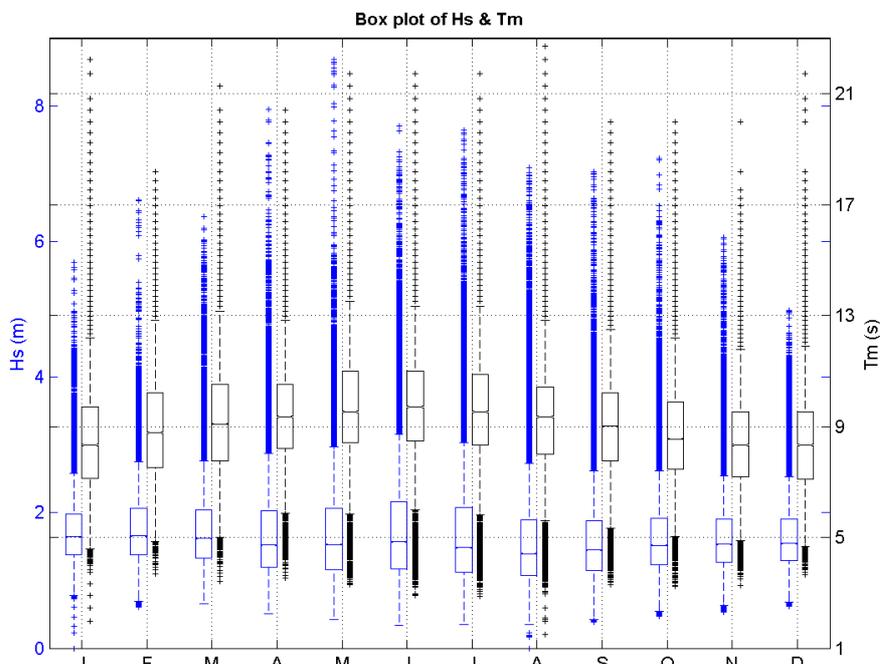


Figura 8. Diagrama box-plot estacional de Hs y Tp.

La H_{s12} , altura de ola significativa correspondiente a una probabilidad de no excedencia de 0.99863, que es considerado el valor no superado más de 12 horas al año, tiene un valor de 5.76 m. Mientras que el H_{s50} , altura de ola significativa, con una probabilidad de excedencia de 0.5 es de 1.55 m.

3.3.1.2 Análisis bivariado

Para mostrar la distribución direccional de los parámetros más importantes del oleaje se han elaborado rosas de altura de ola y periodo de pico (Figura 9). Las siguientes figuras muestran que el oleaje de la zona proviene principalmente de las direcciones S, SSE y ENE.

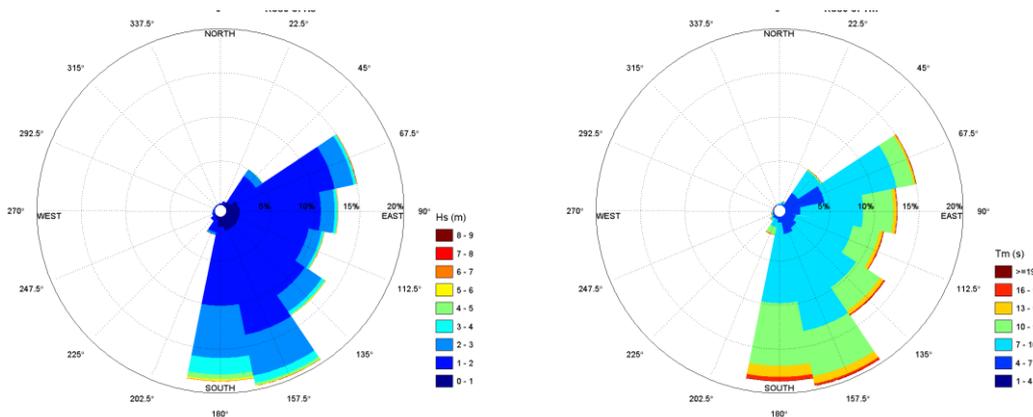


Figura 9. Rosa direccional de altura de ola significativa anual (izquierda) y Rosa direccional de periodo de pico anual (derecha).

3.3.2 Nivel del mar

Para analizar el nivel del mar, se ha recurrido a la serie temporal de marea astronómica *Global Ocean Tides* (GOT), perteneciente a las bases de datos meteoceánicas IH-Data desarrolladas por IHCantabria. Para la determinación del nivel del mar, generalmente se considera la suma de la marea meteorológica y la marea astronómica. Sin embargo, en este caso específico, únicamente se dispone de datos de marea astronómica, lo que limita el análisis a este componente del nivel del mar.

La carrera de marea en la zona de estudio es aproximadamente de 2 m, por lo que es una zona mesomareal (Figura 10). El máximo nivel se corresponde con el +1.10 m y el mínimo se corresponde con -0.93 m.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

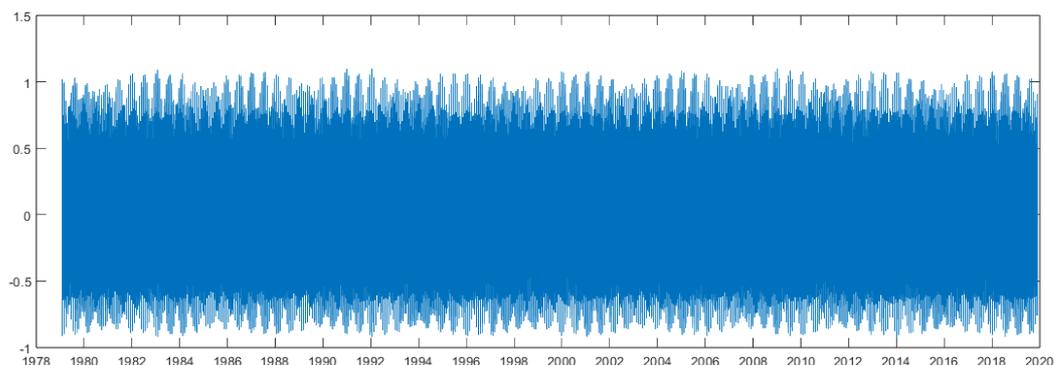


Figura 10. Serie temporal de marea astronómica.

3.4 Datos de entrada a los modelos

A partir de las series temporales descritas anteriormente de oleaje (punto GOW) y de marea astronómica (punto GOT), se derivan los datos de entrada requeridos por los modelos de evolución de línea de costa (Tabla 1).

Para realizar la comparación, se cuenta con un conjunto de datos sobre la posición de la línea de costa, obtenidos con una frecuencia mensual. Este registro de la dinámica costera incluye múltiples observaciones por mes. Por otro lado, también se dispone de datos de orientación de la playa. Ambas bases de datos abarcan el mismo periodo, con registros que se extienden desde 1979 hasta 2019.

4. Resultados

Esta sección presenta los principales resultados obtenidos del modelo IH-MOOSE, considerando distintos modelos de partida para reproducir el movimiento *cross-shore*; YA09, MD04 y L21 en la Playa de Narrabeen. Por otro lado, según la metodología descrita en el apartado 2.3 y 2.4, el resultado del modelo en forma en planta de equilibrio utiliza únicamente la metodología de Hsu y Evans (1989), mientras que el de rotación utiliza la propuesta de Jaramillo et al. (2021)b.

El rendimiento se evalúa utilizando el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación, ρ , el índice de habilidad (Skill index), s , el índice de Nash-Sutcliffe (NS) y el índice de Habilidad del Error Absoluto Medio (MSS).

El RMSE mide las diferencias entre los datos medidos y los valores predichos por el modelo. En general, cuanto menor es el RMSE, más precisa es la predicción del modelo en comparación con la medición.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{predicted} - x_{measured})^2}{n}}$$

[16]

Donde,

i y N representan cada dato y el tamaño total de la muestra, respectivamente.

El coeficiente de correlación ρ mide la relación lineal entre el modelo y los datos medidos. Puede tomar valores entre -1 y 1. El ρ se puede clasificar como una “correlación lineal positiva perfecta” ($\rho = 1.0$), “correlación lineal positiva fuerte” ($1.0 > \rho \geq 0.8$), “correlación lineal positiva moderada” ($0.8 > \rho \geq 0.4$), “correlación lineal positiva débil” ($0.4 > \rho \geq 0$), “sin correlación” ($\rho = 0$), “correlación lineal negativa débil” ($0.0 > \rho \geq -0.4$), “correlación lineal negativa moderada” ($-0.4 > \rho \geq -0.8$), “correlación lineal negativa fuerte” ($-0.8 > \rho \geq -1.0$) y “correlación lineal negativa perfecta” ($\rho = -1.0$).

$$\rho = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

[17]

Donde $x_i, \bar{x}, y_i, \bar{y}$, representan los valores observados, la media de los valores observados, los valores predichos y la media de los valores predichos, respectivamente.

El índice de habilidad, s , es una medida estandarizada del grado de error en la predicción del modelo, que varía entre 0 y 1; un valor de s igual a 1 indica una concordancia perfecta entre las dos series, mientras que un valor de 0 se asocia con una discrepancia total.

$$s = 1 - \frac{\sum |x - x_m|^2}{\sum (|x - \bar{x}_m| + |x_m - \bar{x}_m|)^2}$$

[18]

Donde los datos modelados son x e y , y los medidos, x_m .

El índice NS (Nash-Sutcliffe) es un indicador normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos observados. El valor de NS puede oscilar entre $-\infty$ y 1. Un valor de NS igual a 1 indica una coincidencia perfecta entre las predicciones del modelo y los datos observados. Un valor de NS igual a 0 implica que el resultado del modelo es equivalente a la media de los valores observados, mientras que un valor negativo señala que la media observada es un mejor predictor que el modelo

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

[19]

Donde n, O_i, P_i y \bar{O} representan el número de observaciones, los valores observados, los valores predichos y la media de los valores observados, respectivamente.

El MSS, es otra métrica que se puede utilizar para comparar el rendimiento de un modelo de pronóstico con un modelo base o de referencia. Destaca cuánto mejor o peor se desempeña un modelo en comparación. Un MSS de 1 indica una predicción perfecta, cero indica que la predicción no es mejor que el modelo de referencia, y un valor negativo indica que la predicción es peor que el modelo de referencia."

$$MSS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}$$

[20]

Donde F_i representa el valor pronosticado por el modelo que se está evaluando, O_i representa los valores observados, y C_i representa el valor pronosticado por el modelo de referencia.

4.1 JA21

A continuación, se presenta el desempeño del modelo de rotación JA21. En la Figura 11, la gráfica superior muestra el rendimiento del modelo en términos de rotación, mientras que la gráfica inferior muestra los forzamientos correspondientes para el periodo comprendido entre 1979 y 2019.

Los puntos negros representan los datos medidos, mientras que la línea roja representa los datos modelados. El modelo desarrollado demuestra una capacidad robusta para predecir con precisión la orientación de la playa en los periodos analizados. En particular, su desempeño es notablemente efectivo entre los años 1996 y 2012. A partir de 2014, se observa una rotación más pronunciada de la playa, tendencia que el modelo sigue de manera consistente. De igual manera, durante el intervalo comprendido entre 1988 y 1992, el modelo captura con éxito los cambios de mayor magnitud en la orientación, mostrando su capacidad para identificar variaciones abruptas.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

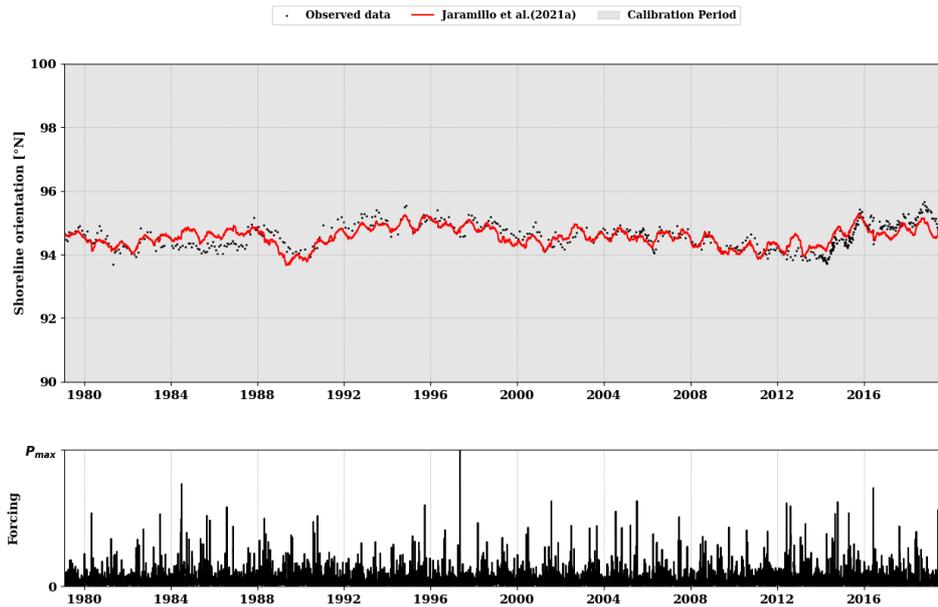


Figura 11. Evolución de orientación de costa en la Playa de Narrabeen. En la parte superior se muestra el resultado del modelo de evolución de la orientación de la línea de costa utilizando el modelo de JA21, mientras que en la parte inferior se muestra el forzamiento.

Los parámetros de ajuste del modelo (RMSE, ρ , RP, MSS, NS) junto con los de calibración ($L+$, $L-$, a, b) se muestran en laTabla 1 Tabla 2:

Tabla 2. Parámetros de ajuste del modelo (RMSE, ρ , RP, MSS, NS) junto con los de calibración ($L+$, $L-$, a, b) para JA21.

	RMSE	ρ	RP	MSS	NS	$L+$	$L-$	a	b
	(°)					(m^2h^{-2})	(m^2h^{-2})		(°)
JA21	0.27	0.7616	0.58	0.27	0.58	1.06E-06	4.93E-07	8.18	-650

Cabe señalar que en este estudio se empleó el período completo de datos como fase de calibración. Esto significa que se llevó a cabo una búsqueda de los parámetros óptimos de ajuste para cada modelo a lo largo de todo el período de estudio.

4.2 IH-MOOSE con YA09

En este apartado se presentan los resultados obtenidos con el modelo IH-MOOSE utilizando el modelo de evolución de posición de línea de costa tendente al equilibrio YA09 para el transporte *cross-shore* de sedimentos en el perfil PF4.

Primeramente, se muestra el desempeño del modelo *cross-shore* y posteriormente se

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

presenta el resultado consolidado del modelo IH-MOOSE integrando *cross-shore*, rotación y forma en planta.

En la Figura 12, se presenta en el panel superior la energía del oleaje incidente, considerado como forzamiento del modelo. A continuación, el resultado obtenido en este estudio empleando el periodo entre 1979 y 2019, mientras que en el panel inferior se presenta el resultado obtenido en la publicación de Jaramillo et al. (2021)b para el periodo de estudio 1979 a 2015, como referencia.

Ambas gráficas muestran que el modelo es capaz de reproducir la tendencia general de los datos de mediciones. Sin embargo, en ambos casos hay momentos donde el modelo parece subestimar o sobrestimar las posiciones, especialmente en puntos de valores extremos. Los puntos de mediciones de los últimos años (2016-2019) tienen mayor dispersión que los años anteriores.

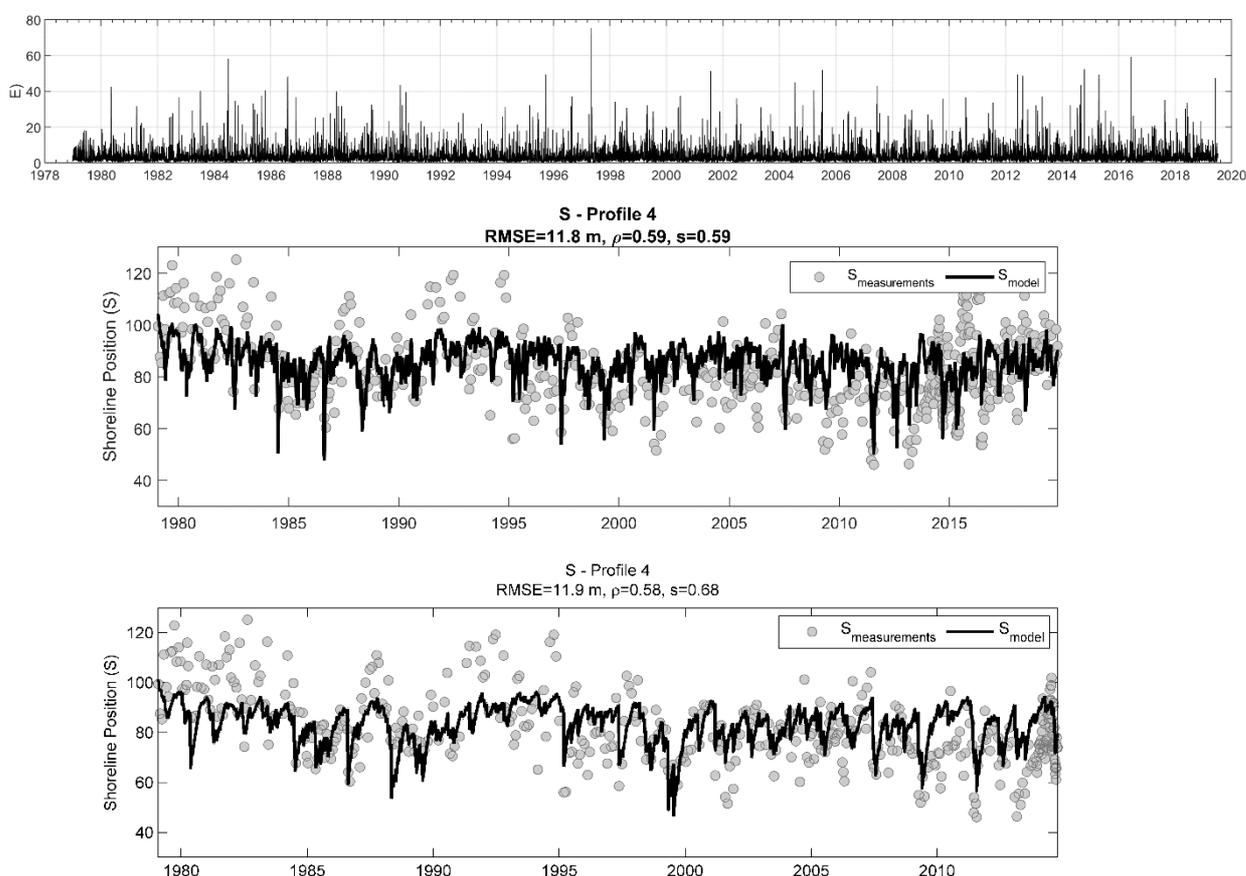


Figura 12. Evolución de la posición de la línea de costa medidas frente a las modeladas para el perfil PF4, utilizando la formulación de YA09 para el desplazamiento *cross-shore*. En la parte superior se presenta la energía incidente en la playa, seguido de los resultados obtenidos en este estudio para el periodo 1979-2019 y en la parte inferior los obtenidos por Jaramillo et al. (2021)b.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La ligera diferencia obtenida en el valor del RMSE indica que el error de predicción del modelo no ha variado significativamente con la extensión de los datos hasta 2019, con lo cual, el modelo se ajusta de manera similar en ambos periodos.

El coeficiente de correlación en ambos es muy cercano, 0.59 frente a 0.58 obtenido para el periodo hasta 2019; lo que indica que la correlación entre los datos medidos y los resultados del modelo sigue siendo bastante consistente a lo largo del tiempo. En cuanto al skill score se ha registrado un incremento, de 0.58 a 0.68.

Los parámetros libres del modelo, C+ (acreción) y C- (erosión), tienen valores de 0.0093 y 0.00078 $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, lo que indica una mayor tendencia hacia la acreción que a la erosión en la playa, sugiriendo que el sistema costero ha experimentado un crecimiento neto de sedimentos. Los parámetros a y b tienen valores de 0.046 y 6.083 m.

En la Figura 13 se muestran los resultados integrados en el IH-MOOSE encontrados en el presente estudio. En esta figura se presenta la evolución de las posiciones de la línea de costa medidas frente a las posiciones modeladas para los cinco perfiles de playa a lo largo de Narrabeen, así como el error cuadrático medio, el coeficiente de correlación y el índice de habilidad. Estos parámetros permiten cuantificar la precisión del modelo y su capacidad para reproducir fielmente la dinámica observada de la línea de costa en los distintos perfiles estudiados.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo IH-MOOSE logró predecir correctamente la evolución de la línea de costa en todos los perfiles de playa analizados. El desempeño más destacado se observó en el extremo norte, en el perfil PF1 y en la zona central de la playa PF4. En contraste, el rendimiento menos satisfactorio, en términos tanto del índice de habilidad como del error cuadrático medio (RMSE), se registró en el perfil PF2.

La Figura 14 muestra los resultados de Jaramillo et al. (2021)b. En ambas gráficas, el modelo logra reproducir de manera adecuada la tendencia general de las mediciones. En ambos casos, se observan ligeras discrepancias en la estimación de los valores extremos (máximos y mínimos), con sobrestimaciones y subestimaciones principalmente en las obtenidas en este estudio. En general, los resultados obtenidos hasta el periodo de 2015 muestran una ligera mejora en la precisión global del modelo. Con la ampliación del rango temporal, se aprecia un aumento en la dispersión de los datos medidos, aunque las

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

tendencias generales permanecen similares. El perfil PF2 sigue siendo el que presenta un ajuste menos preciso, mientras que los perfiles PF1 y PF4 muestran el mejor desempeño del modelo.

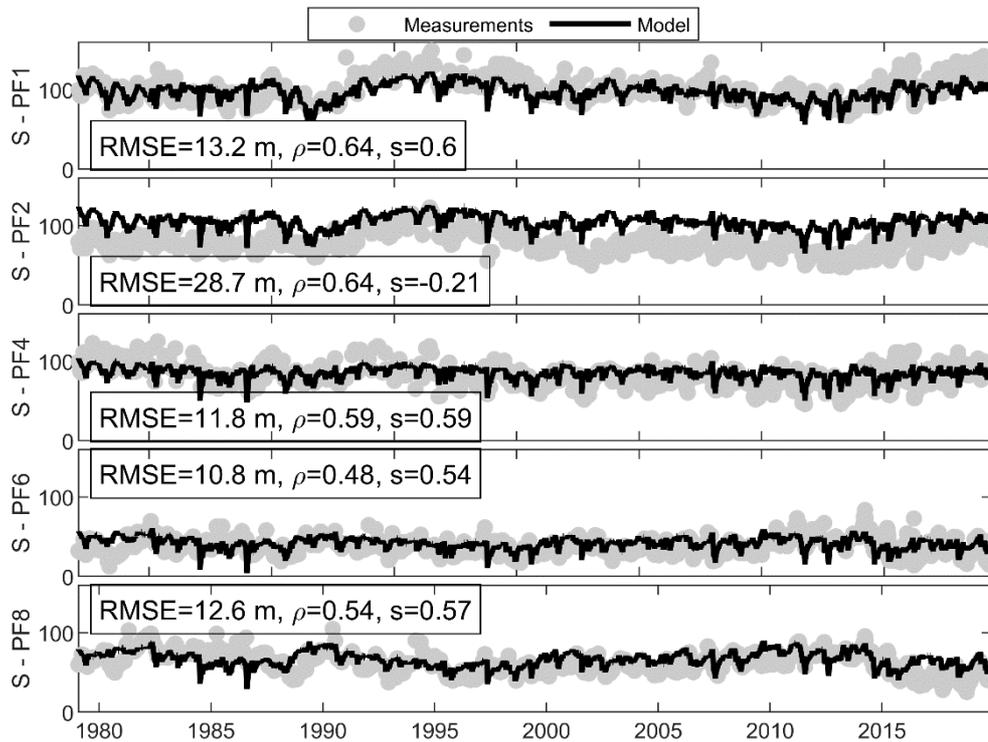


Figura 13. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa utilizando YA09 para el transporte de sedimento cross-shore (periodo 1979-2019)

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

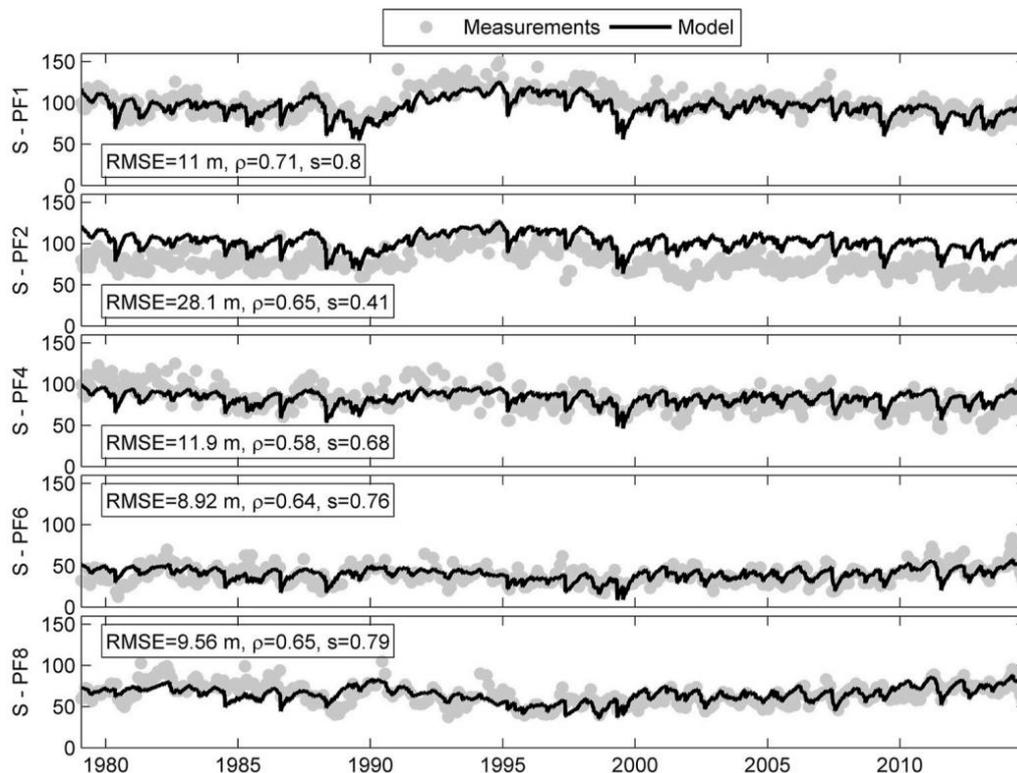


Figura 14. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa obtenidos por Jaramillo et al. (2021)b (periodo 1979-2015).

4.3 IH-MOOSE con MD04

En esta sección se presenta el desempeño del IH-MOOSE utilizando MD04 para el transporte *cross-shore*.

En la Figura 15 se muestra el desempeño de Miller & Dean (2004) en el PF4. Se puede observar que existe mayor dificultad para predecir los eventos más extremos, especialmente para los procesos de acreción.

El modelo sigue adecuadamente la tendencia general de las mediciones, aunque se observan algunas discrepancias, especialmente en los valores extremos. A pesar de esto, la correlación es moderada ($\rho=0.53$), lo que indica que el modelo captura las variaciones de manera razonable. Los datos medidos presentan una mayor dispersión en ciertos periodos, particularmente a principios de los años 80 y hacia el final del periodo (después de 2015), siendo incapaz de representarlos.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

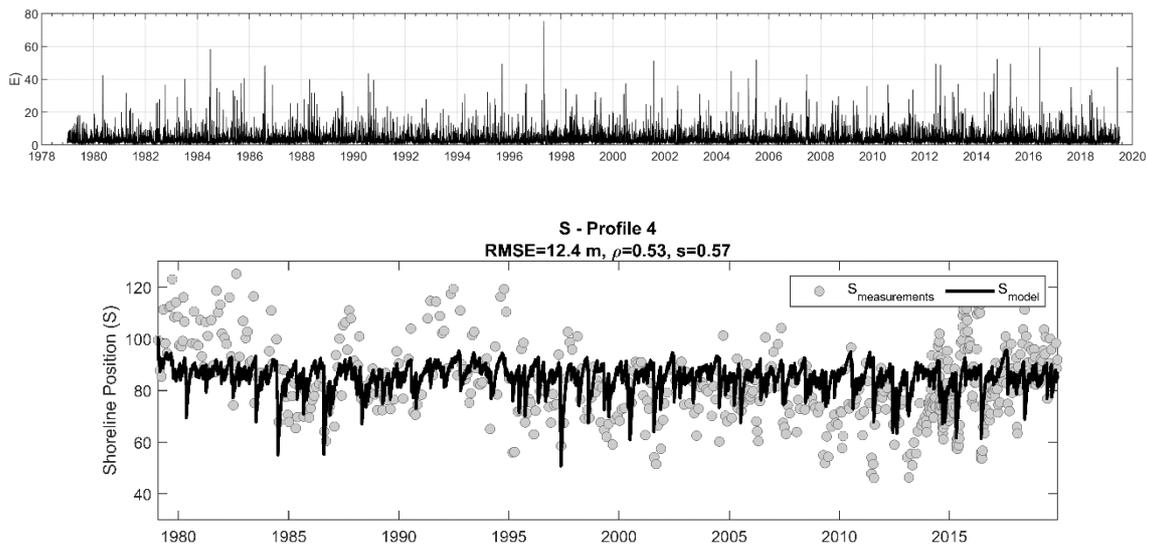


Figura 15. Evolución de la posición de la línea de costa medidas frente a las modeladas para el perfil PF4, utilizando la formulación de MD04 para el desplazamiento cross-shore. En la parte superior se presenta la energía incidente en la playa, seguido de los resultados obtenidos en este estudio.

El modelo presenta un RMSE de 12.4 m, que corresponde al mayor valor entre los casos analizados, indicando una desviación más pronunciada entre las predicciones del modelo y las mediciones. El coeficiente de correlación ($\rho=0.53$) también es ligeramente inferior al obtenido en el perfil YA09, lo que sugiere una menor capacidad del modelo para capturar la variabilidad de los datos medidos en este perfil. Del mismo modo, s , refleja un ajuste más débil.

Los parámetros libres del modelo, $C+$ (acreción) y $C-$ (erosión), tienen valores de 0.0008 y $0.01 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, lo que indica una mayor tendencia hacia la erosión que a la acreción en la playa.

El modelo es capaz de reproducir la tendencia general, aunque con mayor dificultad en los valores extremos y en periodos de alta dispersión, particularmente hacia el inicio y final de la serie temporal.

En la Figura 16 se representa el resultado final una vez integrada todos los resultados en el IH-MOOSE. A diferencia de YA09, PF4 y PF6 mostraron el mejor ajuste, mientras que PF2 presentó el desempeño más deficiente, cabe destacar que durante toda la secuencia el modelo sobreestima los resultados.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

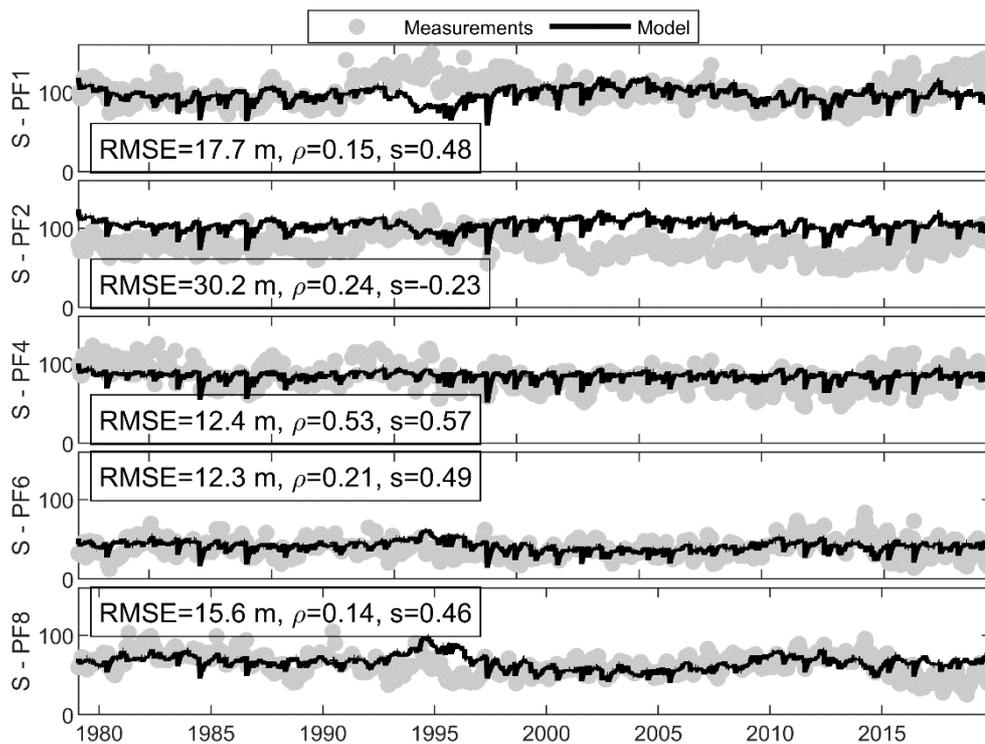


Figura 16. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa utilizando MD04 para el transporte de sedimento cross-shore.

4.4 IH-MOOSE con L22

A continuación, se detalla el desempeño del modelo IH-MOOSE utilizando el enfoque L22 para el transporte *cross-shore*. Los resultados del modelo, que describe la evolución de la posición de la línea de costa tendiendo al equilibrio L22, se presenta en la Figura 17. Esta figura muestra los resultados obtenidos para el transporte *cross-shore* de sedimentos en el perfil PF4.

Tal como se presenta en la Figura 17, el modelo es capaz de captar las tendencias a lo largo del tiempo, particularmente en el intervalo comprendido entre 1985 y 1995. Tiene la capacidad de identificar eventos extremos, se observa que sus estimaciones tienden a subestimar los valores observados en la primera mitad del periodo de estudio. A partir de 2014, con una mayor dispersión de datos, el modelo muestra una mejora en la simulación de la tendencia general. Sin embargo, a pesar de esta mejora en la representación de la tendencia, el modelo tiene dificultades en la estimación precisa de los valores extremos.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

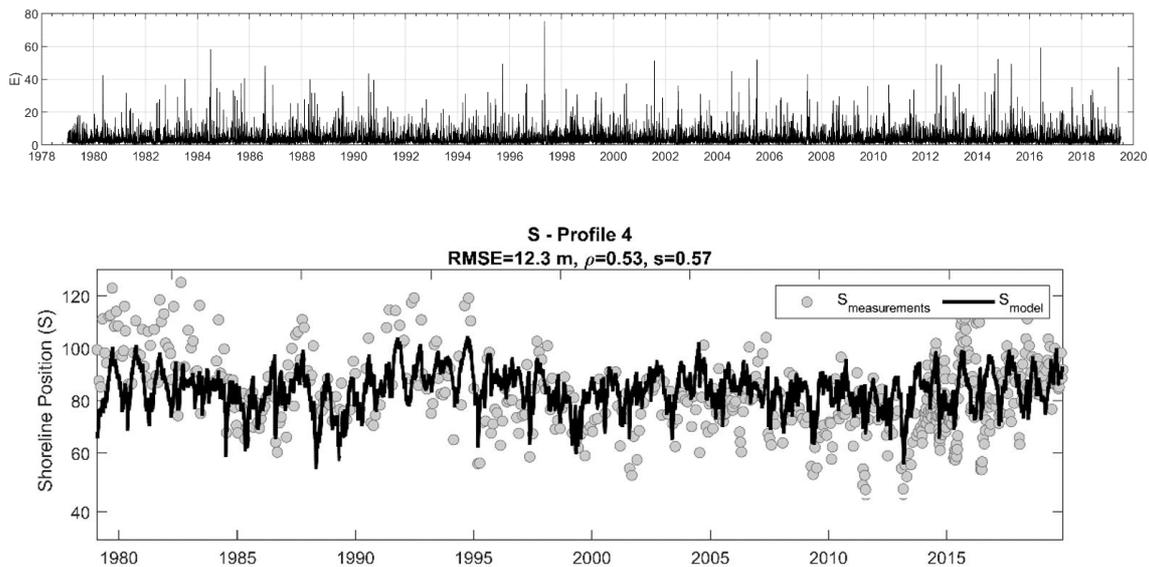


Figura 17. Evolución de la posición de la línea de costa medidas frente a las modeladas para el perfil 4, utilizando la formulación de L22 para el desplazamiento cross-shore.

El análisis de los resultados obtenidos revela un RMSE de 12.3 m, un coeficiente de correlación de 0.53, y una pendiente de la línea de ajuste (s) de 0.57. Estos resultados son prácticamente equivalentes a los obtenidos en el estudio de MD04.

En cuanto a los parámetros de calibración del modelo, se ha determinado un valor de kr de 0.00869 d^{-1} , que corresponde al factor de recuperación de la playa, y un valor de μ de 0.0155, asociado al parámetro libre de set-up.

En la Figura 18 se representa el resultado final una vez integrada todos los resultados en el IH-MOOSE. Tal como se observa, el modelo logra representar correctamente la evolución de la línea de costa. Los perfiles PF1, PF4 y PF8 mostraron el mejor desempeño. En contraste, el perfil PF2 presentó el rendimiento más bajo, sobreestimando significativamente los datos medidos, particularmente en la segunda mitad del periodo de registro. Es importante señalar que tanto el PF1 como el PF2 presentan mayores picos en sus resultados, mientras que los perfiles PF6 y PF8, en cambio, presentan una tendencia más estable y menos variable.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

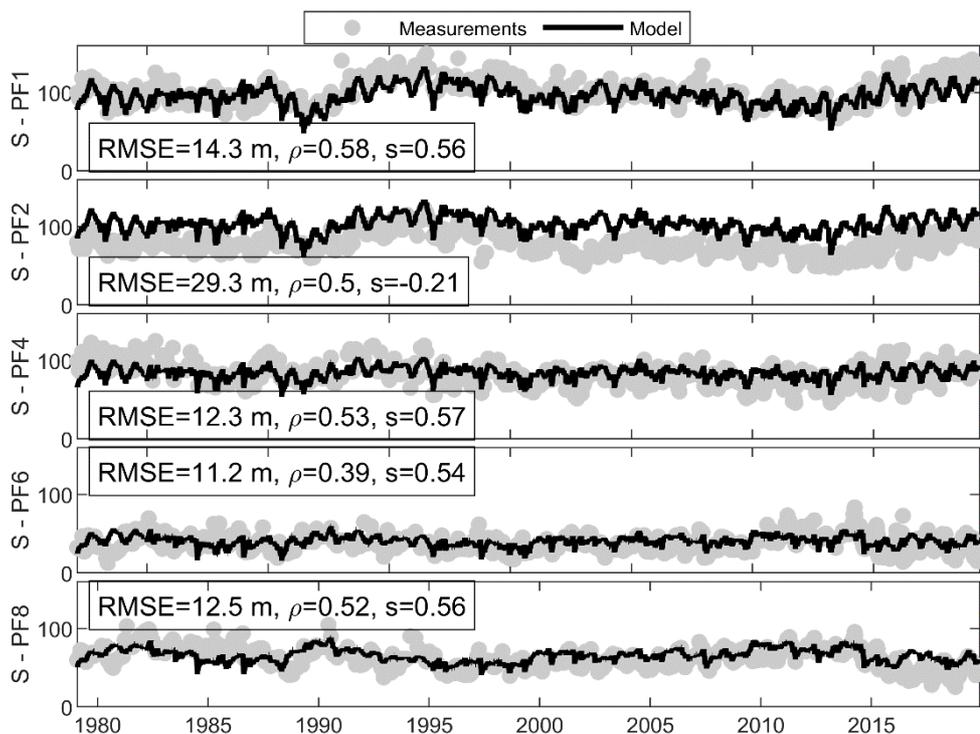


Figura 18. Evolución de las posiciones de la línea de costa medidas versus modeladas para los cinco perfiles de playa utilizando L22 para el transporte de sedimento cross-shore.

A continuación, se muestra en la Tabla 3 con un resumen de los datos estadísticos cuantitativos y los parámetros de calibración para cada uno de los modelos.

Tabla 3. Resumen de las estadísticas cuantitativas y parámetros de calibración para los distintos modelos seleccionados.

	RMSE (m)	ρ	s	RP	MSS	NS	C^+ ($m^{-2}s^{-1}$)	C^- ($m^{-2}s^{-1}$)	a	b (m)	kr	μ (d^{-1})
YA09	11.8	0.59	0.59	0.34	0.51	0.34	0.00933	1.06E-06	0.0461	6.083	-	-
MD04	12.4	0.53	0.57	0.28	0.40	0.27	0.000254	0.009996	-	-	-	-
L22	12.3	0.53	0.57	0.38	0.45	0.28	-	-	-	-	0.0087	0.0155

5. Discusión

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante el modelo IH-MOOSE para predecir la evolución de la línea de costa en la Playa de Narrabeen. Se comparan diferentes metodologías de transporte de sedimentos *cross-shore*, evaluando su desempeño y precisión, y se discuten las limitaciones del modelo en relación con la variabilidad temporal y espacial de los datos.

5.1 Comparativa de resultados frente a Jaramillo et al. (2021)b.

En el presente estudio, los resultados obtenidos utilizando el modelo IH-MOOSE con la metodología de transporte de sedimentos *cross-shore* YA09, comparan favorablemente con los obtenidos por Jaramillo et al. (2021)b, aunque con ligeras diferencias. Mientras que Jaramillo et al. (2021)b analizó el periodo de 1976-2015, la extensión de los datos hasta 2019 en el presente estudio ha permitido obtener una visión más amplia de los procesos costeros, incorporando más variabilidad temporal. La diferencia principal radica en la metodología de calibración y en los datos adicionales utilizados, lo que puede haber influido en las variaciones observadas en la posición de la línea de costa.

Los resultados del presente estudio muestran que el modelo IH-MOOSE logra predecir de manera efectiva la evolución de la línea de costa en la Playa de Narrabeen, Australia. Las pequeñas diferencias en las métricas, como el error cuadrático medio (RMSE), son indicativas de un ajuste adecuado, aunque aún existen áreas de mejora. En particular, la capacidad del modelo para capturar eventos extremos y variaciones abruptas en la orientación de la costa es destacable. Esto es coherente con las conclusiones de Jaramillo et al (2021)b, quienes también encontraron que el modelo IH-MOOSE es eficaz para predecir tendencias generales.

No obstante, al extender el rango temporal, se observa una mayor dispersión en los datos medidos, lo que sugiere que la precisión del modelo podría disminuir ligeramente cuando se incluye un mayor número de años. Sin embargo, los valores de correlación se mantienen sólidos, lo que indica que el modelo sigue siendo útil y confiable para la simulación de la evolución costera.

5.2. Desempeño del modelo IH-MOOSE con diferentes enfoques de transporte cross-shore

El modelo IH-MOOSE fue evaluado utilizando tres enfoques de transporte *cross-shore* diferentes: YA09, MD04 y L22. Los resultados obtenidos con cada modelo se compararon para evaluar su capacidad de predecir el movimiento de sedimentos a lo largo del perfil PF4 y otros perfiles en la Playa de Narrabeen.

- **YA09:** El modelo de Yates et al. (2009) mostró un desempeño destacado en la simulación de la evolución costera, con un RMSE de 11.8 m, lo que refleja un error relativamente bajo en comparación con los demás enfoques. Además, su coeficiente de correlación (0.59) sugiere una fuerte correspondencia entre los datos modelados y los medidos. A la hora de integrar todos los resultados con IH-MOOSE, se observan los mejores resultados, teniendo el mejor desempeño en el PF1, mientras que el peor ajuste se encuentra en el PF2.

Cabe destacar su simplicidad en comparación a los otros dos autores analizados. Los requerimientos de entrada lo convierten en una herramienta eficaz, facilitando la simulación en playas con poca información detallada. Sin embargo, es importante señalar que este modelo presenta limitaciones en los extremos del rango temporal, donde tiende a subestimar o sobrestimar las posiciones de la línea de costa. Estas discrepancias, aunque no significativas en el conjunto general, sugieren que una calibración más precisa de los parámetros de erosión y acreción podría mejorar sustancialmente la precisión de las predicciones en escenarios de mayor variabilidad.

- **MD04:** El modelo de Miller y Dean (2004) se ajusta de manera razonable a los datos medidos, a la hora de predecir eventos extremos, particularmente los relacionados con procesos de acreción presenta mayor dificultad. Si bien puede ofrecer una estimación razonable de la evolución costera en condiciones normales, cuando se trata de fenómenos más impredecibles y de gran magnitud, sus predicciones se vuelven menos precisas y confiables. A pesar de un coeficiente de correlación ligeramente inferior (0.53) y un RMSE más alto (12.4 m), el modelo MD04 sigue siendo útil, pero menos preciso en comparación

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

con YA09. El desempeño del IH-MOOSE muestra una ligera disminución del ajuste, especialmente en rangos temporales donde la variabilidad de los datos es alta. El mejor ajuste fue en el PF4 y el PF6. Al igual que con YA09, el peor ajuste se encuentra en el PF2.

Es importante destacar que para este cálculo de transporte *cross-shore*, el modelo requiera mayor cantidad de datos de entrada que YA09, lo cual podría dificultar su uso en zonas con poca disponibilidad de datos, tales como el nivel del mar, el D_{50} o la altura de berma.

- **L22:** Utilizando el enfoque propuesto por Lim et al. (2022), ha mostrado un desempeño similar al de MD04, con un RMSE de 12.3 m y una correlación moderada (0.53). Aunque es capaz de captar tendencias generales y eventos extremos con mayor exactitud que MD04. Aun así, el modelo L22 muestra una mejora en la representación de la tendencia general a partir de 2014, cuando los datos presentan mayor dispersión. El desempeño del IH-MOOSE muestra un resultado positivo y homogéneo en los perfiles PF1, PF4 y PF8. Al igual que es todos los casos anteriores el PF2 sigue siendo el que muestra peor ajuste.

5.3. Análisis de la metodología: enfoques alternativos

En este estudio, se evaluaron modelos de transporte de sedimentos *cross-shore* con la herramienta IH-SET, pero también se podrían haber considerado otros enfoques metodológicos. Por ejemplo, el uso de modelos de rotación, que simulan los cambios en la orientación de la playa, podría proporcionar una visión complementaria. Adicionalmente, se podrían haber utilizado diferentes expresiones de ajuste para la forma en planta de la playa, como el modelo parabólico de Hsu y Evans (1989).

El uso de diferentes enfoques de ajuste para la forma en planta, que no fueron explorados en detalle en este estudio, podría generar resultados más precisos en la simulación de la evolución de la costa en áreas complejas. Esto sería especialmente útil en playas donde los procesos sedimentarios son más variables y las características geomorfológicas juegan un papel clave en la dinámica costera.

5.4. Limitaciones y consideraciones del modelo IH-SET

La herramienta IH-SET, ofrece varias opciones para la calibración de los modelos. Se probaron diferentes métodos de calibración, y los mejores resultados se obtuvieron utilizando el método SCE-UA (*shuffled complex evolution method*). El uso de métodos más avanzados de calibración podría resultar en ajustes más precisos.

A pesar de los buenos resultados obtenidos, este estudio enfrenta ciertas limitaciones, principalmente derivadas de las simplificaciones realizadas en los modelos y las herramientas utilizadas. La principal mejora sería explorar otros enfoques de modelado para el transporte de sedimentos y la forma en planta de la playa. Además, la incorporación de nuevos datos y el uso de enfoques más detallados para la calibración del modelo podrían mejorar su precisión, particularmente en la predicción de eventos extremos.

6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este último apartado, se exponen las conclusiones obtenidas a partir del análisis realizado sobre el desempeño del modelo IH-MOOSE en la Playa de Collaroy-Narrabeen. Se presentan las fortalezas y debilidades de las distintas configuraciones del modelo, evaluando los enfoques de transporte de sedimentos *cross-shore* utilizados, y aspectos clave para mejorar la precisión en la simulación de la evolución costera.

- El modelo IH-MOOSE ha demostrado ser eficaz en la predicción de la evolución de la línea de costa de la Playa de Collaroy-Narrabeen a lo largo de un periodo de 40 años. Al extender el rango temporal hasta 2019, se logró incorporar una mayor variabilidad temporal, lo que permitió evaluar el desempeño del modelo en condiciones más diversas y complejas. Los resultados indican que IH-MOOSE es capaz de capturar tanto las tendencias generales y en menor medida los eventos extremos y las variaciones abruptas. A pesar de una ligera disminución en la precisión en comparación con el estudio de Jaramillo et al. (2021)a, los resultados obtenidos utilizando el enfoque YA09 para el transporte de sedimentos *cross-shore* en el periodo 1979-2019 mantienen valores sólidos de correlación. Las pequeñas diferencias en las métricas, como el error cuadrático medio (RMSE), indican un ajuste adecuado, aunque hay áreas que podrían mejorarse, particularmente en la calibración de los parámetros para escenarios con mayor variabilidad.
- De los tres enfoques de transporte de sedimentos *cross-shore* evaluados dentro del modelo IH-MOOSE —YA09 (Yates et al., 2009), MD04 (Miller y Dean, 2004) y L22 (Lim et al., 2022)— cada uno presenta fortalezas y debilidades específicas.:
 - El modelo YA09 destaca por su desempeño general, con un RMSE de 11.8 m y un coeficiente de correlación de 0.59, lo que indica una buena correspondencia entre los datos modelados y medidos. Además, su simplicidad y eficiencia lo hacen ideal para su aplicación en playas con

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

información limitada, ya que requiere menos datos de entrada y obtiene mejores resultados que el resto. Es importante destacar que fue el que obtuvo mejores resultados.

- Con el modelo MD04 mostró fortalezas como su ajuste razonable en condiciones normales, adaptándose bien a los datos medidos durante periodos de estabilidad, y tuvo su mejor desempeño en los perfiles PF4 y PF6. Sin embargo, también presentó debilidades importantes, como su menor precisión en la predicción de eventos extremos, particularmente los relacionados con fenómenos de acreción y de gran magnitud. Además, requiere más datos de entrada (nivel del mar, D_{50} , altura de berma), lo que puede limitar su uso en áreas con poca disponibilidad de datos. Su precisión general fue menor en comparación con YA09, con un coeficiente de correlación de 0.53 y un RMSE de 12.4 m.
- Con el modelo L22 fue capaz de capturar tendencias en periodos con mayor dispersión, mejorando la representación de la tendencia general a partir de 2014, y mostró mayor exactitud en la predicción de eventos extremos en comparación con MD04 y YA09. También obtuvo resultados homogéneos en múltiples perfiles, incluyendo los perfiles PF1, PF4 y PF8. No obstante, al igual que con MD04, es necesaria una mayor cantidad de datos de entrada.
- Al integrar todos los resultados en el IH-MOOSE, el desempeño en el perfil PF2 presentaron mayores dificultades, indicando que podría ser necesaria una consideración adicional de las características locales o una calibración más detallada. Mientras que el perfil PF1 presentó mejores resultados.
- Para futuras investigaciones, es importante mejorar los métodos de calibración para optimizar el desempeño de los modelos, además de explorar el uso del IH-MOOSE con otras propuestas de modelos de rotación, como el de Turki et al. (2013), y expresiones de forma en planta de equilibrio. La combinación de estas metodologías permitirá abordar las limitaciones observadas y obtener una visión más precisa de los patrones de sedimentación y erosión en playas como Collaroy-Narrabeen.

Bibliografía

- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. In *Journal of Coastal Research* (Vol. 21, Issue 4, pp. 688–703). <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Davidson, M. A., Splinter, K. D., & Turner, I. L. (2013). A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coastal Engineering*, 73, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.002>
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour Res* 28, 1015–1031. <https://doi.org/10.1029/91WR02985>
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V.K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* ELSEVIER *Journal of Hydrology*.
- Duan, Q.Y., Gupta, V.K., Sorooshian, A.S., Dixon, L.C.W. (1993). Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Short, A. D., & Ranasinghe, R. (2011). A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(4). <https://doi.org/10.1029/2011JF001989>
- 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.
- Lim, C., Kim, T. K., & Lee, J. L. (2022). Evolution model of shoreline position on sandy, wave-dominated beaches. *Geomorphology*, 415. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108409>
- Miller, J. K., & Dean, R. G. (2004). A simple new shoreline change model. *Coastal Engineering*, 51(7), 531–556. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.05.006>
- Mole, M. A., Davidson, M. A., Turner, I. L., Splinter, K. D., Goodwin, I. D., & Short, A. D. (2012). Modelling multi-decadal shoreline variability and evolution. *Int. Conf. Coast. Eng.* 2009. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.98>
- Pelnard-Considere, R. (1956). Essai de theorie de l'evolution 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.
- Robinet, A., Castelle, B., Idier, D., Marieu, V., Splinter, K. D., & Harley, M. D. (2017). On a Reduced Complexity Shoreline Model Combining Cross-Shore and Alongshore Processes. *Coast. Dyn.* 1853–1862.
- Stokes, C., Davidson, M., & Russell, P. (2015). Observation and prediction of three-dimensional morphology at a high-energy macrotidal beach. *Geomorphology*, 243, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.024>
- Turki, I., Medina, R., Coco, G., & Gonzalez, M. (2013a). An equilibrium model to predict shoreline rotation of pocket beaches. *Mar. Geol.* 346, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.08.002>
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Limber, P., Erikson, L., & Cole, B. (2017). A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 782–806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>
- Yates, M. L., Guza, R. T., & O'Reilly, W. C. (2009). Equilibrium shoreline response:

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA IH-MOOSE CONSIDERANDO
DISTINTOS ENFOQUES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Observations and modeling. Journal of Geophysical Research: Oceans, 114(9).
<https://doi.org/10.1029/2009JC005359>