



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
CAMPO DISCIPLINARIO: INGENIERÍA DE COSTAS Y RÍOS

“MODELADO NUMÉRICO DE MORFODINÁMICA DE PLAYAS EN PRESENCIA DE ESPIGONES”

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ANA ESHAI GARCÍA SARABIA

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ALEC TORRES FREYERMUTH  
INSTITUTO DE INGENIERÍA,  
UNAM

SISAL, YUCATÁN AGOSTO 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Christian M. Appendini Albrechtsen

Secretario: Dra. Gabriela Medellín Mayoral

1<sup>er</sup>. Vocal: Dr. Alec Torres Freyermuth

2<sup>do</sup>. Vocal: Dr. Cecilia E. Enríquez Ortiz

3<sup>er</sup>. Vocal: Dr. José Carlos Patiño Pintado

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Sisal, Yucatán, México

**Dr. Alec Torres Freyermuth**

NOMBRE



---

FIRMA

## Resumen

La costa norte de Yucatán tiene una orientación aproximada Este-Oeste y se caracteriza por tener un oleaje asociado a las brisas marinas, con incidencia oblicua y proveniente del NE, la mayor parte del año. El transporte de sedimentos neto a lo largo de la costa es en dirección hacia el oeste. A pesar de las condiciones de baja energía existe un problema de erosión en varias zonas del litoral Yucateco y para mitigarlo se han implementado alternativas basadas en la implementación de estructuras costeras como rompeolas y espigones. Sin embargo, esta zona es altamente sensible a la presencia de cualquier estructura costera, generando efectos negativos (erosión) en playas corriente abajo de las estructuras. Es por ello importante el uso de modelos numéricos que ayuden a mejorar el diseño de las estructuras costeras considerando la dinámica costera en la región.

Este trabajo utiliza el modelo numérico XBeach para predecir la hidrodinámica en zona de rompientes y la morfodinámica en una playa aledaña a un espigón temporal en la zona de *swash* instalado en la costa norte de Yucatán durante condiciones de brisas marinas. Se utilizaron mediciones de campo de morfodinámica de playa asociada a la presencia y remoción de un espigón temporal obtenidos en el trabajo de Medellín et al. (2018). Estos mismos datos fueron implementados con el modelo numérico Delft 3D por López-Ramade et al. (2023). Sus resultados mostraron una buena reproducción de las variaciones en el oleaje y las corrientes, aunque los cambios morfológicos ante la colocación del espigón no mostraron cambios en la línea de costa, reproduciendo solamente la acreción corriente arriba en la parte sumergida de la playa ( $z < -0.2$  m).

En este trabajo se emplearon los modos estacionario y *surfbeat* del modelo XBeach para estudiar el impacto de un espigón en la morfología de playa. El modelo fue implementado en una batimetría de alta resolución (2 m x 2 m) para modelar la transformación del oleaje, hidrodinámica, y morfodinámica de la playa en períodos de 24 horas. Los resultados mostraron que ambos modos fueron capaces de reproducir la variabilidad del oleaje y las corrientes dentro de la zona de rompientes. Sin embargo, el modo *surfbeat* fue el modo que obtuvo una mejor comparación con las mediciones. Con respecto a la morfodinámica, se obtuvieron mejores resultados con el modo *surfbeat*, debido a su capacidad para modelar procesos en la zona *swash*, reproduciendo la acreción corriente arriba de la playa sumergida y emergida, aunque subestimó la erosión corriente abajo. Con este mismo modo, se obtuvo una buena representación de los cambios batimétricos después de la remoción del espigón, tanto para la playa sumergida como la emergida. Por otro lado, el modo estacionario no logró reproducir el avance de la línea de costa debido a las limitaciones para simular procesos en la zona de *swash*. Solamente fue capaz de reproducir una parte de la playa sumergida, lo que es consistente con los resultados de López-Ramade et al. (2023). La morfología de la playa con ambos modos de XBeach fue sensible a los parámetros asociados a la asimetría del oleaje (*skewness* y *asymmetry*) y la variación del nivel del mar asociada a la marea los cuales controlan el transporte de sedimentos. El modelo XBeach demostró ser un modelo con un potencial para el diseño de estructuras costeras cercanas a la costa bajo condiciones medias de oleaje. Sin embargo, es necesario mejorar su implementación para reproducir la erosión aledaña al espigón.

|

## Dedicatoria

*A mi padre, siempre serás mi fuerza ante cualquier adversidad.*

*Fue difícil pero lo logramos.*

*Te extraño y te quiero mucho.*

*Descansa en paz.*

*A mi madre y hermana por darme las fuerzas para no caer y seguir*

*continuando hasta lograrlo.*

*Las quiero mucho.*

# Agradecimientos

A mi padre, por su apoyo incondicional al inicio de esta etapa de mi vida. Aunque no estás en físico, siempre te llevo en mi corazón.

A mi madre y hermana por su apoyo, cariño y sabias palabras para lograr concluir esta etapa, que a pesar de la distancia estuvieron apoyándome.

A mi tutor y director de tesis el Dr. Alec Torres Freyermuth por su orientación, soporte, asesorías y apoyo académico que me brindo en todo el tiempo en que se realizó la tesis. Gracias por su paciencia para lograr concluirla.

A la Dra. Gabriela Medellín por la aportación de los datos para llevar a cabo esta investigación, también por sus comentarios y sugerencias en la revisión de mi tesis.

Agradezco al Dr. Christian Appendini, a la Dra. Cecilia Enríquez y al Dr. José Carlos Patiño, por aceptar ser parte de mi jurado y por cada uno de los comentarios, sugerencias y observaciones en la revisión de mi tesis.

También un agradecimiento al M. Eduardo López Ramade por proporcionarme sus datos, resolverme dudas acerca de ellos y por las asesorías proporcionadas.

A CONACyT por la beca proporcionada para realizar la maestría en Ingeniería Civil. Así como el apoyo financiero de los proyectos de CONACyT (CB-2016-284430) y PAPIIT DGAPA-UNAM (IN10221, IA101422) para la escritura de la tesis.

A Delft University of Technology por el desarrollo del modelo numérico de acceso libre XBeach.

Al Ing. Gonzalo Uriel Martín Ruiz, Ocean. Camilo Sergio Rendón Valdez, M. I. Juan Alberto Gómez Liera y al Dr. José López González por el apoyo técnico proporcionado.

Finalmente a mis amigos Luis Ángel Gallegos y José Fabián Estrada, gracias por sus ánimos y su apoyo en los días oscuros. A la futura Dr. Anlly por compartir sus conocimientos en modelación numérica y otros programas que de alguna manera colaboraron en la realización de este trabajo de investigación. A la familia Granados Caamal por su sincera amistad brindada y por abrirme las puertas de su casa aminorando el estar lejos de casa.

# ÍNDICE

<b>Resumen</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Planteamiento del problema</i>	3
1.2. <i>Objetivos</i>	4
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.3. <i>Antecedentes</i>	5
<b>Capítulo 2 Estado del arte</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Procesos de transporte</i>	7
2.2. <i>Estructuras costeras: espigones</i>	9
2.3. <i>Modelación numérica</i>	11
2.3.1. <i>Descripción del modelo: XBeach</i>	12
2.3.2. <i>Justificación del uso del modelo XBeach</i>	12
2.3.3. <i>Opciones hidrodinámicas</i>	12
2.3.4. <i>Formulaciones y procesos del modelo</i>	13
2.3.5. <i>Factor de aceleración morfológica</i>	18
2.3.6. <i>Modelación de estructuras costeras con XBeach</i>	18
<b>Capítulo 3 Zona de estudio</b>	<b>20</b>
3.1. <i>Localización</i>	20
3.2. <i>Clima marítimo</i>	20
3.3. <i>Mareas</i>	21
3.4. <i>Corrientes</i>	22
3.5. <i>Morfología de la playa de Sisal</i>	23
<b>Capítulo 4 Metodología</b>	<b>24</b>
4.1. <i>Datos del experimento</i>	24
4.2. <i>Implementación del modelo numérico XBeach</i>	28
4.2.1. <i>Dominio y mallado</i>	28
4.2.2. <i>Condiciones de forzamiento</i>	31
4.2.3. <i>Parámetros generales</i>	33
4.2.4. <i>Efecto de la propagación direccional del oleaje en 2D</i>	35
4.2.5. <i>Efecto del parámetro <i>single_dir</i></i>	37
4.2.6. <i>Índices de rendimiento</i>	37

<b>Capítulo 5 Resultados</b>	<b>39</b>
5.1 <i>Casos de calibración y validación</i>	39
5.1.1. Sensibilidad del parámetro del coeficiente de dispersión direccional s	39
5.1.2. Sensibilidad del parámetro single_dir	41
5.1.3. Validación hidrodinámica modo <i>surfbeat</i>	43
5.1.4. Validación hidrodinámica modo estacionario	45
5.2. <i>Validación morfodinámica</i>	47
5.2.1. Evolución de la topo-batimetría con modo <i>surfbeat</i>	47
5.2.2. Evolución de la topo-batimetría al remover el espigón	52
5.2.3. Evolución de la topo-batimetría con modo estacionario	53
<b>Capítulo 6 Discusión</b>	<b>57</b>
<b>Capítulo 7 Conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>Referencias</b>	<b>60</b>
<b>Apéndice: params.txt</b>	<b>65</b>

# Capítulo 1

## Introducción

La erosión de playas arenosas es un problema presente en las costas alrededor del mundo (Luijendijk et al., 2018). Este fenómeno puede ocurrir debido a perturbaciones naturales como ciclones, tormentas, o tsunamis. Las tormentas generan cambios importantes en la costa debido al incremento de la energía del oleaje y del nivel del mar. Dichos efectos son exacerbados debido a la variabilidad climática (Barnard et al., 2017) y el cambio climático. Sin embargo, la erosión también puede ser ocasionada por perturbaciones antropogénicas, como la urbanización, actividades económicas en la costa (construcción de zonas habitacionales y turísticas), colocación de estructuras, o degradación de los ecosistemas costeros (arrecifes, playas y dunas). Esta combinación de factores, tanto naturales como antropogénicos, ha provocado impactos negativos como la aceleración de la erosión costera (Vieira et al., 2020).

Otro fenómeno natural como las brisas marinas puede llegar a modificar la morfología y los procesos de la playa llegando a aumentar drásticamente las tasas de sedimentación. En sitios como en el suroeste de Australia las brisas marinas se comportan como pequeñas tormentas diarias, erosionando la cara de la playa por las tardes y acumulando arena durante el resto del día (Masselink & Pattiaratchi, 1998). En la costa norte del Estado de Yucatán, (México) estos fenómenos locales modifican la hidrodinámica (Torres-Freyermuth et al., 2017) y morfodinámica de la playa, llegando a ser importantes ante cualquier perturbación en la línea de costa como la colocación de estructuras costeras (Medellín & Torres-Freyermuth, 2019). Por otra parte, en esta zona a lo largo de las últimas décadas, se ha visto afectada por la erosión costera (Appendini et al., 2012). Por lo tanto, se han implementado diferentes alternativas como el uso de espigones (Tereszkiewicz et al., 2018), rompeolas sumergidos (Torres-Freyermuth et al., 2019) y rellenos de playa (Franklin et al., 2021; Medellín et al., 2015). Estas acciones aparentemente exitosas, con excepción de los rellenos de playas, ocasionan problemas de erosión en playas aledañas (Mendoza et al., 2022; Torres-Freyermuth et al., 2019).

El uso de cualquier tipo de estructura requiere del entendimiento de la hidrodinámica, transporte de sedimentos, y morfodinámica de playas asociada a su implementación. Lo anterior puede ser abordado a través de modelos físicos o numéricos, siendo una de las alternativas menos costosas el uso de herramientas de modelación numérica. Los modelos numéricos permiten predecir, modelar o encontrar soluciones a problemas complejos del entorno costero antes de la implementación física, teniendo como resultado un mayor conocimiento de todos los procesos que puedan llegar a incidir en dicha zona (Razak & Nor, 2018). Como medidas de mitigación al problema de erosión se han implementado diversas alternativas físicas como macro rellenos de playas (Luijendijk et al., 2017) e instalación de estructuras de protección costera rígidas como escolleras, espigones, diques o rompeolas. Desafortunadamente, en algunos casos, estas alternativas sólo han acelerado la problemática debido a su deficiente implementación (Mendoza et al., 2022).

En la costa norte de Yucatán existen pocos trabajos enfocados a modelar la hidrodinámica y morfodinámica de la playa ante la presencia de estructuras costeras. Algunos de los más destacados

son los trabajos de Ruiz-Martínez et. al (2016) y López-Ramade et. al (2023), ambos utilizaron el modelo numérico Delft 3D.

En años recientes se ha extendido el uso de modelos numéricos más sofisticados gracias al desarrollo del poder computacional. Un ejemplo es el uso del modelo numérico XBeach, desarrollado para simular procesos hidro-morfodinámicos durante eventos de tormentas. Este modelo cuenta con modos que permiten incluir procesos que ocurren en la zona de *swash* como el run-up. Dentro de los trabajos previos con este modelo empleando espigones están los trabajos de Gallop (2013) y Branson (2015) en una playa disipativa y dominada por brisas marinas, respectivamente.

El presente trabajo se centra en la evaluación del modelo XBeach para modelar la respuesta morfológica de la playa de Sisal, Yucatán, frente al impacto asociado a la instalación y remoción de un espigón impermeable durante condiciones de oleaje medio asociado a brisas marinas. Para ello, se utilizaron las mediciones con alta resolución espacial y temporal, de hidrodinámica y morfología de una playa natural obtenidas en el trabajo de Medellín et al. (2018).

## 1.1. Planteamiento del problema

La problemática de erosión en la costa norte de la península de Yucatán ha aumentado en los últimos 25 años, debido a la construcción de los puertos de abrigo que interrumpen el transporte litoral (Appendini et al., 2012; Franklin et al., 2021; González Legia et al., 2012). Una medida de mitigación, entre los habitantes de las zonas afectadas, consiste en la colocación de espigones (localmente conocidos como espolones). Sin embargo, este tipo de estructuras permiten el crecimiento de la playa corriente arriba a costa de acelerar la erosión en playas colindantes (corriente abajo). Una de las alternativas que se ha optado, a inicios de los 2000s, para tratar de mitigar y solucionar el problema de la erosión a largo plazo es por medio de la remoción de espigones y el uso de soluciones blandas como las estructuras hechas a base de geosintéticos (González Legia et al., 2012). No obstante, estas soluciones nunca van a sustituir un sistema de playa saludable, ya que la línea de costa en esta zona es altamente sensible a la presencia de estructuras debido a la oblicuidad del oleaje y al importante transporte litoral (González Legia et al., 2012; Torres-Freyermuth et al., 2017). Por lo que, es indispensable contar con herramientas de predicción validadas que sean capaces de predecir el impacto de la instalación y remoción de estructuras. Estudios previos, basados en las ecuaciones promediadas en la fase, presentan limitaciones para simular procesos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en la zona de *swash* dificultando de esta manera, la detección y análisis de los cambios morfológicos en la línea de costa. Por lo tanto, este trabajo pretende superar esta limitante a través de la implementación del modelo numérico XBeach, capaz de simular la hidrodinámica y morfodinámica en la zona *swash* (Roelvink et al., 2018).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo general de esta investigación es evaluar la capacidad del modelo numérico XBeach para la predicción de cambios rápidos en la morfología en una playa dominada por las brisas marinas.

#### **Objetivos específicos**

- Implementar el modelo XBeach en la playa de Sisal, Yucatán para las condiciones medidas durante el experimento realizado por Medellín et al. (2018).
- Calibrar el modelo numérico XBeach con observaciones de campo de la transformación del oleaje, hidrodinámica y morfodinámica de playa en presencia de un espigón.
- Validar el modelo con observaciones de campo de la morfodinámica de playas después de la remoción de la estructura.
- Identificar las limitaciones de XBeach para evaluar el impacto con estructuras costeras en la zona de estudio con mallas de alta resolución.

### 1.3. Antecedentes

La erosión en la costa norte de la península de Yucatán se ha incrementado a lo largo de los años debido al aumento de infraestructura y el desarrollo urbano en la costa (Meyer-Arendt, 2001). Esto ha ocasionado la degradación de la duna (Mendoza-González et al., 2021) y el aumento de estructuras costeras para el control de la erosión (Mendoza et al., 2022). Para preservar las playas, es común el uso de espigones utilizando diferentes materiales. Tradicionalmente se utilizaban espigones hechos de roca y madera, y más recientemente con sacos de arena y concreto (Tereszkiewicz et al., 2018). En el trabajo de Tereszkievicz et al. (2018) estas estructuras muestran una ineficiencia general en los más de 305 espigones que monitorearon, debido a que no hay una buena gestión en el mantenimiento.

Se han realizado diversos estudios de estructuras costeras en la zona en años recientes. Torres-Freyermuth et al. (2019) investigaron, utilizando mediciones *in situ* de alta resolución, la respuesta de la playa ante la presencia de rompeolas permeables (tipo *Reef Balls*) e impermeables (geotubos rellenos de arena) sumergidos durante un año. Los resultados indican que la efectividad de las estructuras del tipo impermeable es sensible a la longitud, tamaño y orientación; mientras que las estructuras del tipo permeable son menos invasivas por su alta transmisividad, con cambios moderados en la playa y una pequeña erosión en las áreas de corriente abajo. El estudio sugiere que los rompeolas impermeables han sido ineficientes para resolver el problema de erosión, ocasionando impactos negativos en playas aledañas.

Torres-Freyermuth et al. (2020) realizaron un experimento que consistió en la instalación de un espigón permeable de 15 m hecho con hexápodos de concreto. Las mediciones de los cambios morfológicos de la playa se realizaron con dos períodos diferentes, el primero duró 24 horas con condiciones de oleaje promedio (condiciones típicas de una brisa marina) y el segundo duró 60 días, con condiciones de oleaje promedio y extremo (turbonada - tormentas locales de corta duración). En el primer período, el ciclo de la brisa consiste en vientos suaves hacia el mar (brisa terrestre del SE) durante la mañana y vientos fuertes hacia tierra (brisa marina del NE). Las olas con dirección del NE generaron corrientes longitudinales hacia el oeste en la zona surf. En el segundo período la dirección del oleaje cambio entre NW-NE durante la turbonada y la brisa marina, respectivamente. Por lo cual el comportamiento fue diferente en ambos períodos: durante la brisa marina existió acreción en el lado este de la estructura (corriente arriba), en contraparte con la tormenta se revirtió la acumulación de sedimento al oeste de la estructura. Por otra parte, en el trabajo de Medellín et al. (2018) se estudió de igual manera el impacto de un espigón temporal impermeable con la misma longitud logrando acumular cerca de 70 m<sup>3</sup> corriente arriba (oeste de la estructura) durante un período de 24 horas. En ambos estudios se evaluó la capacidad de recuperación de la playa al remover el espigón temporal.

Con relación a los estudios previos de modelación numérica, Ruiz-Martínez et al. (2016) realizaron un estudio con el modelo Delft 3D considerando diferentes alternativas para la mitigación donde incluyeron rellenos de playa en conjunto con campos de espigones con forma I, T, Y y rompeolas, o solamente incluyendo relleno de playa. Los autores obtuvieron cambios morfodinámicos diferentes para cada caso. Por ejemplo, encontraron que los espigones lineales (15 m de longitud) con un espaciamiento longitudinal de 100 m retienen una gran cantidad de arena a corto plazo (4 meses). Sin embargo, este tipo de espigones no son tan efectivos a mediano y largo plazo (8 meses). Por

consiguiente, sugieren que el relleno de playa como una mejor alternativa, aunque puede llegar a ser una opción muy costosa si se realiza con mucha frecuencia. Los espigones en forma de T retienen una mayor cantidad de arena y conservan el material de un relleno de playa de manera más eficiente. Por lo tanto, hay que tener en cuenta que es importante realizar simulaciones con escenarios a corto, medio y largo plazo con estructuras de diferentes características tomando en cuenta el espaciamiento entre cada uno y la distancia a la que se encontrarán de la playa. Este trabajo no contó con mediciones de campo para la calibración y validación del modelo numérico Delft 3D utilizado.

López-Ramade et al. (2023) emplearon las mediciones de alta resolución de Medellín et al. (2018) para validar y calibrar el modelo hidrodinámico y morfodinámico Delft 3D. El modelo reproduce el impacto de la estructura corriente arriba incluido el cambio en el volumen de arena para el perfil sumergido. Sin embargo, los cambios morfológicos en la zona de *swash* y los cambios morfodinámicos corriente abajo no coincidieron con las mediciones de campo. La mayor limitación de este modelo fue reproducir los cambios de la posición de la línea de costa. Respecto a las velocidades de las corrientes longitudinales y transversales se sobreestimaron teniendo una limitación en simular los procesos de transporte de sedimentos en la zona de *swash*.

# Capítulo 2

## Estado del arte

### 2.1. Procesos de transporte

La rotura del oleaje induce corrientes longitudinales (i.e., paralelas a la línea de costa) y transversales (i.e., perpendiculares a la línea de costa) dentro de la zona de rompientes que transportan el sedimento en suspensión y por arrastre. La corriente longitudinal es generada por la rotura del oleaje con un ángulo de incidencia oblicuo a la costa (Davidson-Arnott, 2010). Las corrientes de resaca o *undertow* se generan en dirección transversal a la costa. Estas corrientes se generan debido a la conservación de masa dentro de la zona de rompientes (Bosboom & Stive, 2021; Pedrozo, 2011). Por otro lado, el oleaje tiene el potencial de transportar sedimento en aguas someras debido a la asimetría de las velocidades asociadas (Pedrozo, 2011). A continuación, se describen los dos modos de transporte.

#### ***Transporte de sedimento longitudinal***

La rotura del oleaje con un ángulo de incidencia oblicua, con respecto a la orientación de la línea de costa, genera transporte de sedimentos en función de la altura y dirección de aproximación del oleaje en rotura (Bosboom & Stive, 2021). Esto puede generar erosión y acreción de la costa en zonas aledañas a estructuras costeras debido a los gradientes inducidos en el transporte (Dean, 2004). El transporte de sedimento induce un crecimiento de playa corriente arriba (*updrift*), mientras que se erosiona la playa corriente abajo (*downdrift*) debido a la falta de sedimentos ante la presencia de espigones (Bosboom & Stive, 2021; Dean, 2004).

Una de las fórmulas más antiguas, aún ampliamente utilizada, para calcular el transporte longitudinal es la fórmula del CERC (Bosboom & Stive, 2021). La fórmula fue desarrollada por el Consejo de Investigación de Ingeniería Costera (CERC) de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). Esta fórmula estima el transporte de sedimentos longitudinal debido a la acción de las olas que se acercan a la costa con un ángulo de incidencia. Su forma más general es la siguiente:

$$S = \frac{K}{\rho g (s-1)(1-p)} (Enc)_b \cos\varphi_b \sin\varphi_b \quad \text{Ecuación [2.1]}$$

donde  $S$  es el volumen depositado de sedimentos transportados ( $m^3/s$ ),  $\rho$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ),  $s$  es la densidad relativa del sedimento,  $p$  es la porosidad,  $g$  es la gravedad,  $K$  es un coeficiente de calibración,  $E$  es la energía del oleaje,  $c$  es la velocidad de fase de las ondas,  $n$  es el radio entre velocidad de grupo y la velocidad de fase,  $\varphi$  es el ángulo de incidencia de la onda y  $b$  es el subíndice que hace referencia a las condiciones determinadas en el borde exterior de la zona de rotura.

Según la ecuación [2.1] la tasa de transporte de sedimento a lo largo de la costa  $S$  está en función del producto entre el flujo de energía  $(Enc)_b$  en el punto de rotura y el ángulo de incidencia del oleaje (i.e.,  $\cos\varphi_b \sin\varphi_b$ ).

La ecuación CERC se puede reescribir en términos de la altura de ola, sustituyendo  $E = \frac{1}{8} \rho g H_b^2$ .

Recordando que la rotura de ola en aguas someras es tal que  $n_b$  es igual a 1 y  $c \approx \sqrt{gh_b}$ , donde  $h_b$  es reemplazada por  $H_b/\gamma$ . El índice de rotura  $\gamma$  es igual a 0.78. Usando la siguiente relación  $2\cos\varphi_b\sin\varphi_b = \sin 2\varphi_b$ , la ecuación [1.1] se puede reescribir como:

$$S = \frac{k}{16(s-1)(1-p)} \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \sin 2\varphi_b H_b^{2.5} \quad \text{Ecuación [2.2]}$$

Para oleaje irregular, el coeficiente  $K$  depende del tipo de parámetro utilizado para representar la altura del oleaje en el punto de rotura (i.e. altura de ola media cuadrática  $H_{rms}$  o la altura significativa  $H_s$ ). La ecuación [2.2] es una forma práctica de la ecuación CERC. Considerando que algunos parámetros son constantes, la magnitud del transporte aumenta con el incremento del ángulo en el punto de rotura hasta alcanzar un máximo de  $\varphi_b = \pm 45^\circ$  (Bosboom & Stive, 2021).

### **Transporte de sedimento transversal a la costa**

El transporte transversal a la costa, inducido por oleaje, es el responsable de la formación de bancos de arena y cambios en los perfiles de playa. Estos cambios pueden ser lentos (años de duración) o pueden ocurrir rápido (horas) durante las tormentas (Van Rijn, 2013).

Cuando se presentan las tormentas, la intensa rotura de las olas en la cresta de la barra de arena generan corrientes con dirección hacia el mar (*offshore*) conocidas como corrientes de resaca (*undertow*), estas dan como resultado una erosión hacia la costa y una deposición mar adentro en la cresta de la barra de arena, provocando la migración *offshore* de las barras de arena (figura 2a) (Hoefel & Elgar, 2003; Pedrozo, 2011).

Por otro lado, otro factor importante que contribuye significativamente al transporte neto de arena a lo largo del perfil de playa es la asimetría del oleaje. Durante el asomeramiento, las olas comienzan a tener una forma no lineal (desviación de una forma sinusoidal en la que está basada la teoría lineal), volviéndose asimétricas a lo largo del eje horizontal (i.e., crestas con mayor amplitud que los valles), a esto se les conoce como *wave skewness* (en inglés) como se muestra en la figura 1. Conforme las olas se propagan hacia la costa, su forma se vuelve más asimétrica (i.e., crestas con menor longitud que los valles), alrededor del eje vertical hasta que se rompen, a estas olas se les denomina *asymmetric waves* (en inglés) (Hoefel & Elgar, 2003; van de Ven, 2018).

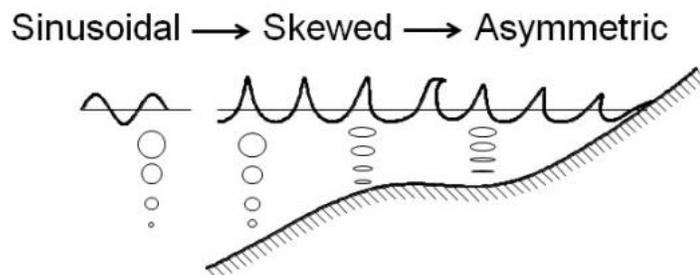


Figura 1. Propagación de las olas bajo la influencia del fondo. Tomada de Van de Ven (2018).

Debido a lo anterior, la migración de las barras de arena hacia la costa (*onshore*) se da cuando las olas pequeñas que no rompen en la barra se inclinan hacia adelante, generando una mayor aceleración del fluido. La aceleración sea vuelve asimétrica con dirección horizontal (*skewness*) obteniendo valores más grandes hacia tierra que hacia el mar, lo que ocasiona una erosión en la cresta de la barra hacia el mar y una depositación hacia la costa, dando lugar a la migración de la barra de arena (figura 2b) (Hoefel & Elgar, 2003; van de Ven, 2018).

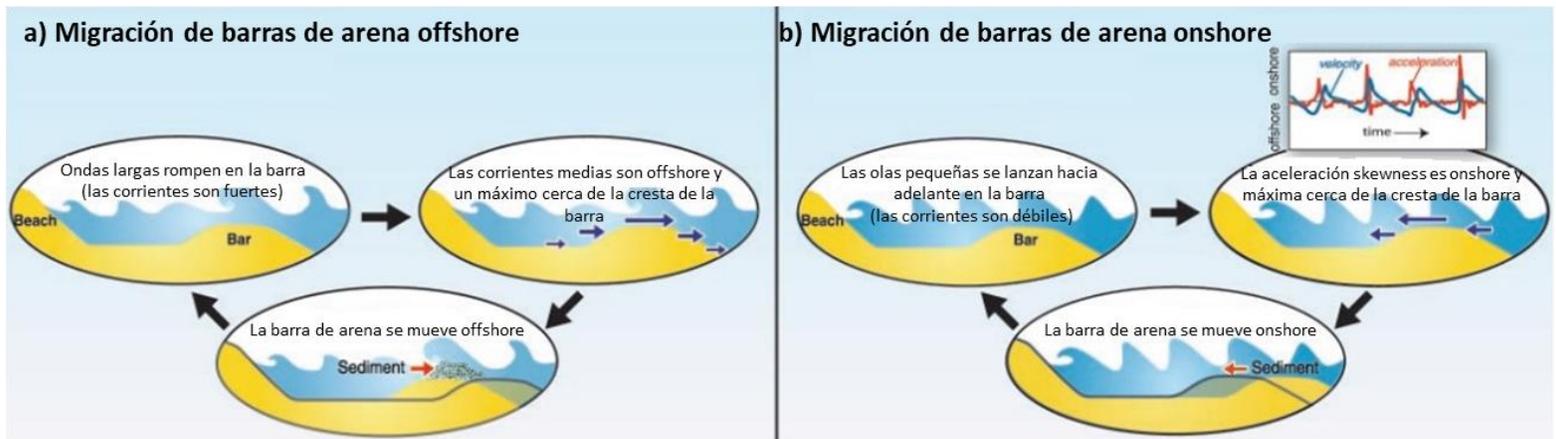


Figura 2. Esquema de la migración de barras de arena. a) Las olas largas durante las tormentas rompen en el banco de arena, impulsando una fuerte corriente transversal dirigida hacia el mar (*undertow*) b) Las olas pequeñas se lanzan hacia adelante en la barra. El agua se acelera rápidamente, formando una aceleración *skewness* con dirección hacia la costa.

Tomada de Hoefel & Elgar (2003).

## 2.2. Estructuras costeras: espigones

Los espigones son estructuras construidas de manera perpendicular a la línea de costa. Este tipo de estructuras se han utilizado ampliamente para proteger las playas de la erosión. Están diseñados para capturar arena del transporte litoral, promoviendo el incremento del ancho de la playa, o para prolongar la vida útil de los rellenos de playa (Bosboom & Stive, 2021; Dean, 2004). Como resultado de la elevación del fondo marino, las olas incidentes romperán más lejos de la costa. La zona de máxima disipación de la energía de las olas se traslada, consiguiendo una mejor protección de la línea de costa (Razak, 2015). Se puede colocar un solo espigón o se pueden utilizar varios para conformar un campo de espigones (Dhanak & Xiros, 2016). Estos funcionan mejor en zonas donde hay un fuerte transporte de sedimentos a lo largo de la costa (Dean, 2004). La arena se deposita en la zona de corriente arriba, generando un déficit de sedimento en la zona corriente abajo (Bosboom & Stive, 2021; Dhanak & Xiros, 2016), como se muestra en la figura 3.

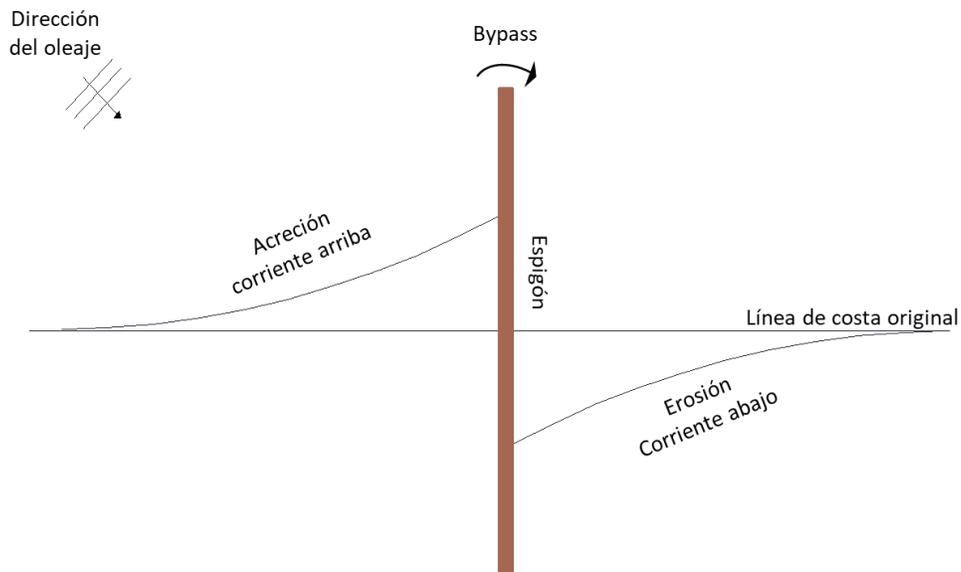


Figura 3. Esquema de un solo espigón que muestra los impactos de la acreción corriente arriba y erosión corriente abajo.

Los espigones pueden diseñarse con diferentes formas como la I, L, T o la Y para atrapar mejor los sedimentos (Ruiz-Martínez et al., 2016; Van Rijn, 2013). El ancho, la longitud y su elevación son parámetros importantes para su diseño. Los espigones cortos a veces suelen ser ineficientes, ya que no logran capturar suficiente arena. Los espigones demasiado largos pueden bloquear el paso del sedimento, provocando una grave erosión (Bosboom & Stive, 2021). Además de que la tasa de deposición contra el espigón debe ser igual a la tasa de erosión, por esta razón los espigones deben utilizarse con precaución (Dean, 2004; Ruiz-Martínez et al., 2016). Si no se tiene un diseño adecuado de este tipo de estructuras pueden provocar erosión corriente abajo y crear corrientes de resaca peligrosas aledañas a la estructura (Tereszkiewicz et al., 2018).

Se pueden identificar dos tipos principales de espigones, las estructuras impermeables de cresta alta y los permeables de baja elevación (Bosboom & Stive, 2021). Las estructuras impermeables de cresta alta se utilizan para mantener la arena dentro del compartimiento entre espigones contiguos. La línea de costa estará orientada perpendicularmente a la dirección del oleaje dominante. Por otro lado, las estructuras permeables de cresta baja se utilizan en playas donde se tiene un déficit de sedimentos y su función es reducir ligeramente la deriva litoral en la zona surf, creando una línea de costa más uniforme (Bosboom & Stive, 2021; Van Rijn, 2013).

## 2.3. Modelación numérica

Existen dos diferentes tipos principales de modelos de oleaje: i) los modelos que promedian la fase (*phase averaging models*) y ii) los modelos que resuelven la fase (*phase-resolving models*) (Peláez, 2015; Wong, 2016).

Los modelos que promedian la fase están basados en la ecuación de balance de acción o energía del oleaje. Hacen un estadístico sobre la superficie libre, utilizando el espectro de energía  $S(\sigma, \vartheta)$  o la acción de onda  $N(\sigma, \vartheta)$ , donde  $\sigma$  representa la frecuencia relativa en presencia de corrientes (Peláez, 2015).

Los modelos que resuelven la fase utilizan las ecuaciones de conservación de masa y momentum resolviendo el desplazamiento vertical de la superficie libre  $\eta(x, t)$  y las componentes de la velocidad horizontal y vertical ( $u$ ,  $v$  y  $w$ ). Requieren una resolución fina y una cuadrícula computacional lo suficientemente pequeña para resolver todas las longitudes de onda importantes. La resolución en la fase permite que los procesos como la refracción, difracción y dispersión se puedan resolver de manera satisfactoria. Este tipo de modelos resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes totalmente no lineales con o sin la suposición de perfil de velocidades horizontales en profundidad. Cuenta con dos clases principales de ecuaciones de gobierno: i) las ecuaciones de aguas poco profundas y ii) el tipo Boussinesq. Los modelos de aguas someras son adecuados para modelar la transformación del oleaje en la zona de rompientes debido que son para ondas no dispersivas. Por otro lado, los modelos de Boussinesq permiten modelar la dispersividad pero no resuelven bien la no linealidad del oleaje. El modo **XBeach- No hidrostático** calcula el flujo promediado en profundidad debido a las olas y las corrientes se calcula utilizando las ecuaciones no lineales de aguas someras (Peláez, 2015; Roelvink et al., 2015; Wong, 2016).

Dentro de los modelos que promedian la fase existe otro submodelo de aguas someras forzados a escala de grupo de olas. Este tipo de modelo es una combinación de resolución de fase y promediado en fase (Wong, 2016). Las ondas infragravitatorias (IG) se resuelven con las ecuaciones de aguas someras por resolución de fase, mientras que las olas *sea-swell* (SS) son promediadas por fase y se resuelven con la ecuación de balance de acción de onda (por ejemplo, **XBeach-Surfbeat**) (Peláez, 2015; Wong, 2016).

Los modos con que cuenta XBeach son tres: *Surfbeat*, No-hidrostático y Estacionario, en la sección 2.3.3 se especifican más sobre ellos.

### 2.3.1. Descripción del modelo: XBeach

El modelo XBeach (Roelvink et al. 2015) es un modelo numérico de código abierto bidimensional que utiliza diferencias finitas (promediado en profundidad). El modelo resuelve la propagación del oleaje, la hidrodinámica de la costa, y la morfodinámica de playas, además de la interacción con estructuras costeras (Vieira et al., 2020). Por lo tanto, este modelo permite predecir el comportamiento de la línea de costa en respuesta a la colocación de las estructuras costeras.

### 2.3.2. Justificación del uso del modelo XBeach

La selección del modelo XBeach con relación a otros modelos como Delft3D o el Mike 21, se debe a varias razones. Algunas de ellas son: (i) es un programa de código abierto que se puede descargar fácilmente desde el sitio web de XBeach (<https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>), (ii) es aplicable para modelos de pequeña escala, (iii) resuelve las ondas de infragravedad (IG) siendo que estas son importantes para el transporte de sedimentos, cambios batimétricos en la zona *swash* y en la formación de barras de arena (Thieler et al., 2000), (iv) es capaz de simular eficazmente los procesos de transporte de sedimento y morfodinámica de playas, (v) ha sido validado en playas disipativas (e.g. De Vet et al., 2015; Splinter & Palmsten, 2012; Cueto & Otero, 2020; Hewageengana & Canestrelli, 2021) y (vi) ha simulado el run up en playas arenosas disipativas con un enfoque morfodinámico de la playa (e.g. Stockdon et al., 2014; Palmsten & Splinter, 2016).

### 2.3.3. Opciones hidrodinámicas

XBeach cuenta con tres opciones hidrodinámicas:

1. **Modo estacionario:** resuelve las ecuaciones promediadas en profundidad, se desprecian las variaciones del grupo de ondas y las ondas IG. Puede utilizarse para modelar los cambios morfológicos durante condiciones de oleaje moderado (cuando las olas son generadas por un viento local). Resuelve los procesos de propagación de onda, dispersión direccional y refracción.
2. **Modo *surfbeat*:** resuelve las variaciones de onda corta (altas frecuencias) y las ondas largas (bajas frecuencias) asociadas a escala de grupo de ondas, incluyendo las ondas IG. Es una combinación de los modelos de fase promediada para ondas cortas (ondas SS) y de resolución de fase para ondas largas (envolvente y ondas IG) desarrollados para procesos cercanos a la costa. Este modo suele utilizarse cuando se quiere investigar los procesos que ocurren en la zona *swash*.
3. **Modo no-hidrostático:** se aplica una combinación de las ecuaciones no lineales de aguas someras con un término de corrección de presión, permitiendo que el modelo resuelva la propagación del oleaje ola a ola incluyendo la rotura y ascenso en la cara de la playa.

En la presente tesis solo se hará uso de las dos primeras opciones hidrodinámicas (modos estacionario y *surfbeat*) debido a que el modo no hidrostático tiene un costo computacional muy alto y no se ha realizado una validación exhaustiva de su capacidad para modelar la morfodinámica en playas arenosas.

Algunas de las diferencias más ilustrativas entre el modo estacionario y *surfbeat* se muestran en la figura 4. Se observa como en el modo *surfbeat* captura mejor la variación espacial del nivel medio del mar (set-down y set-up). Asimismo, es capaz de simular el run up en playas disipativas debido a que resuelve los grupos de ondas (ondas IG).

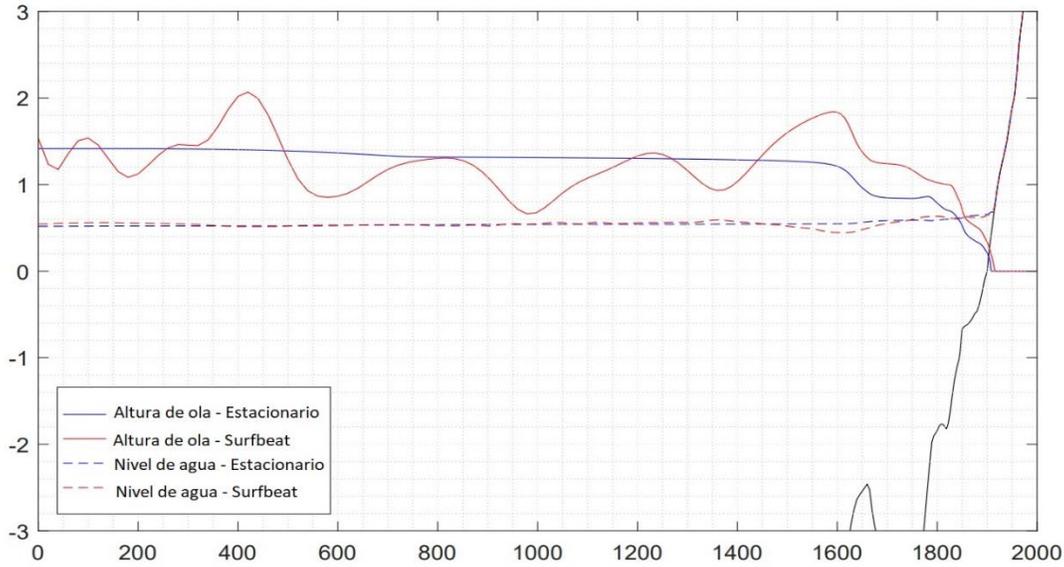


Figura 4. Ejemplo de la altura de ola y variaciones del nivel del agua como el set-down y set-up en modo estacionario y *surfbeat*. Extraído de Bart (2017).

### 2.3.4. Formulaciones y procesos del modelo

En esta sección del documento se presentan las formulaciones que implementa el modelo XBeach para los modos *surfbeat* y estacionario.

#### **Formulaciones para el modo *surfbeat***

##### **Ecuación de balance de acción de onda**

El modo *surfbeat* utiliza la ecuación de acción de balance para resolver los movimientos de las olas *sea-swell* en la escala temporal de un grupo de ondas. Se representa el espectro de frecuencia del oleaje por una única frecuencia representativa ( $f_{rep}$ ) y la ecuación de acción de balance está dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial C_{gx}A}{\partial x} + \frac{\partial C_{gy}A}{\partial y} + \frac{\partial C_{g\theta}A}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma}, \quad \text{Ecuación [2.3]}$$

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t, \theta)} \quad \text{Ecuación [2.4]}$$

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kh} \quad \text{Ecuación [2.5]}$$

donde  $A$  es la acción de onda,  $S_w$  es la densidad de energía de las olas (o variancia espectral),  $\sigma$  es la frecuencia de onda intrínseca,  $k$  es el número de onda,  $D_w$  es el término de disipación para explicar la rotura de la onda,  $C_{gx}$  es la velocidad de propagación de la acción de onda en dirección transversal,  $C_{gy}$  es la velocidad de propagación de la acción de onda en dirección longitudinal y  $C_{g\theta}$  es la velocidad de propagación de la acción de onda para la dirección. Este modo aplica un modelo de disipación para simular la ruptura de ondas (Roelvink, 1993) por default por medio de la ecuación [2.4], para su uso con ondas cortas (SS) dentro de un grupo de ondas.

$$\overline{D_w} = 2 \frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \frac{H_{rms}}{h} \quad \text{Ecuación [2.6]}$$

$$Q_b = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^{10}\right) \quad \text{Ecuación [2.7]}$$

donde  $\overline{D_w}$  es la disipación total de energía de las olas debido a la rotura,  $T_{rep} = 1/f_{rep}$  es el período de onda representativo y  $Q_b$  es la fracción de las olas rompientes, la altura de ola cuadrática de las ondas cortas (SS),  $H_{rms} = \sqrt{8E_w/\rho g}$ ; la altura de onda máxima,  $H_{max} = \gamma_r h$ ;  $E_w$  es la variación de la energía de olas SS dentro de un grupo de ondas;  $\alpha$  es la disipación y  $\gamma_r$  es el ratio del oleaje en rotura con respecto a la profundidad local.

### **Balance de energía del roller o rodillo**

La rotura de oleaje induce gradientes de tensores de radiación dentro de la zona de rompientes, generando corrientes a lo largo y a través de la playa. Después de que las olas rompan el momento almacenado se representa con el balance de energía del roller ( $E_r$ ), está se acopla a la ecuación de acción de onda en la que se utiliza como fuente para la energía del rodillo. La formulación se representa como:

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x E_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y E_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta E_r}{\partial \theta} = D_w + D_r \quad \text{Ecuación [2.8]}$$

donde  $D_r$  es la pérdida del movimiento ondulatorio debido al rompimiento y  $D_w$  es la disipación de las olas debido a su rotura.

### **Tensores de radiación**

La conexión entre el balance de acción de onda corta y las ecuaciones de aguas someras se da por medio de los tensores de radiación.

Los tensores de radiación, que resultan directamente de la energía del balance de acción de onda, dependen de la propagación de las ondas en la dirección  $x$  ( $S_{xx}$ ) y  $y$  ( $S_{yy}$ ), además de la componente de esfuerzo cortante del tensor de radiación ( $S_{xy}$ ) como:

$$S_{xx,w}(x, y, t) = \int_0^{2\pi} \frac{c_g}{c} \left(1 + \cos^2\theta - \frac{1}{2}\right) S_w d\theta \quad \text{Ecuación [2.9]}$$

$$S_{xy,w}(x, y, t) = \int_0^{2\pi} \text{sen}\theta \cos\theta \frac{c_g}{c} S_w d\theta \quad \text{Ecuación [2.10]}$$

$$S_{yy,w}(x, y, t) = \int_0^{2\pi} \frac{C_g}{c} \left(1 + \text{sen}^2\theta - \frac{1}{2}\right) S_w d\theta \quad \text{Ecuación [2.11]}$$

El balance de energía del roller es también el responsable de la formación de los tensores de radiación. Primero se convierte en energía de onda en cada sector direccional por medio de la siguiente derivada parcial:

$$S_r(x, y, t, \theta) = \frac{\partial E_r(x, y, t)}{\partial \theta} \quad \text{Ecuación [2.12]}$$

Después, nuevamente la energía de la onda en los sectores direccionales se descompone en tensores de radiación en las direcciones  $xx$ ,  $xy$ , o  $yx$  y  $yy$ :

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int_0^{2\pi} (1 + \cos^2\theta - 1/2) S_r d\theta \quad \text{Ecuación [2.13]}$$

$$S_{xy,r} \text{ o } S_{yx,r}(x, y, t) = \int_0^{2\pi} \text{sen}\theta \cos\theta S_r d\theta \quad \text{Ecuación [2.14]}$$

$$S_{yy,r}(x, y, t) = \int_0^{2\pi} \text{sen}^2\theta S_r d\theta \quad \text{Ecuación [2.15]}$$

### ***Ecuaciones de aguas someras***

Los movimientos de la envolvente del grupo de ondas y de las ondas de baja frecuencia (ondas IG) se resuelven en el dominio de tiempo utilizando la ecuación de aguas someras para el modo *surfbeat*.

Para obtener el flujo de masa inducido por la onda y el flujo de retorno se utiliza las formulaciones de Media Lagrangiana Generalizada (GLM) para aguas someras, descritas mediante las siguientes formulaciones:

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left( \frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h}, \quad \text{Ecuación [2.16]}$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left( \frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h}, \quad \text{Ecuación [2.17]}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0, \quad \text{Ecuación [2.18]}$$

donde  $u^L$  y  $v^L$  representan las velocidades lagrangianas,  $v_h$  la viscosidad horizontal,  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $\tau_{sx}$  y  $\tau_{sy}$  son los esfuerzos cortantes del viento,  $\tau_{bx}^E$  y  $\tau_{by}^E$  son los esfuerzos cortantes del fondo marino que está determinado por el coeficiente de Chezy.  $\eta$  es la superficie libre del agua y  $h$  es la profundidad,  $\rho$  la densidad del agua y  $g$  la constante gravitacional. La variación de la energía de las olas ejerce una fuerza sobre la columna de agua por medio de los tensores de radiación y sirve como entrada para la ecuación no lineal de aguas someras. Los esfuerzos de radiación,  $F_x$  y  $F_y$ , son los inducidos por el oleaje están dados por:

$$F_x = \left[ \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right], \text{ fuerzas en dirección transversal} \quad \text{Ecuación [2.19]}$$

$$F_y = \left[ \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} \right], \text{ fuerzas en dirección a lo largo de costa} \quad \text{Ecuación [2.20]}$$

### Transporte de sedimento

El modelo utiliza la formulación de advección- difusión promediado en profundidad para el cálculo del transporte de sedimento de Galapatti (1983):

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu_{av}}{\partial x} + \frac{\partial hv_{av}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad \text{Ecuación [2.21]}$$

donde  $C$  es la concentración de sedimento promediada en profundidad que varía en la escala de tiempo del grupo de ondas.  $u_{av}$ ,  $v_{av}$  (m/s) son las velocidades transversales y longitudinales incluyendo el efecto de las ondas cortas *skewed* y asimétricas,  $D_h$  es el coeficiente de difusión de sedimento.

$u_{av}$ ,  $v_{av}$  se han implementado recientemente en XBeach y se definen como:

$$u_{av} = v_w \cos v \theta_m + u_e \quad \text{Ecuación [2.22]}$$

$$v_{av} = v_w \sin v \theta_m + v_e$$

donde  $\theta_m$  es la dirección media del oleaje y la amplitud de velocidad  $v_w$  se modela para incluir los efectos de la onda corta skewness ( $S_k$ ) y asimetría ( $A_s$ ):

$$v_w = \gamma_{ua} u_{rms} (S_k - A_s) \quad \text{Ecuación [2.23]}$$

$\gamma_{ua}$  determina la influencia de las propiedades de las ondas cortas en el transporte de sedimentos y  $u_{rms}$  es la velocidad cuadrática media de cerca del fondo.

El arrastre de sedimento está representado por un tiempo de adaptación  $T_s$ , generado por una aproximación basada en la profundidad de agua local  $h$  y la velocidad de caída  $w_s$ :

$$T_s = \max \left( 0.05 \frac{h}{w_s}, 0.2 \right) s \quad \text{Ecuación [2.24]}$$

El término concentración de equilibrio ( $C_{eq}$ ) es importante para la ecuación de transporte de sedimento, ya que determina junto con la concentración de sedimentos ( $C$ ) el arrastre o deposición de sedimentos. Si  $C$  es mayor a ( $C_{eq}$ ) hay un depósito de sedimento y viceversa, si es menor el sedimento es arrastrado en la columna de agua.

El equilibrio de la concentración de sedimentos se calcula con la fórmula de Soulsby- Van Rijn:

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left( \left( |u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d} \right)^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m) \quad \text{Ecuación [2.25]}$$

donde el sedimento es agitado por la velocidad media euleriana y la velocidad de infragravedad en combinación con la velocidad de onda corta cercana al lecho,  $u_{rms}$ .  $A_{sb}$  y  $A_{ss}$  es la carga de fondo y carga suspendida respectivamente, son funciones de la profundidad del agua, tamaño de grano y densidad relativa del sedimento y  $C_d$  es el coeficiente de arrastre. Para tener en cuenta los efectos de la pendiente del lecho ( $m$ ) se aplica un factor de calibración denotado por  $\alpha_b$ .

### **Cambio del fondo**

El cambio del nivel del fondo se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{1-p} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{Ecuación [2.26]}$$

donde  $z_b$  es el nivel del fondo,  $p$  es la porosidad,  $f_{mor}$  es un parámetro de aceleración morfológica, con valor de 1 hasta 10,  $q_x$  y  $q_y$  representan el transporte de sedimentos en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente.

La tasa de transporte de sedimentos en las direcciones  $x$  y  $y$  son calculadas usando:

$$q_x(x, y, t) = \left[ \frac{\partial h C u^E}{\partial x} \right] + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] \right] \quad \text{Ecuación [2.27]}$$

$$q_y(x, y, t) = \left[ \frac{\partial h C v^E}{\partial y} \right] + \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] \right] \quad \text{Ecuación [2.28]}$$

Durante la erosión de las dunas provocadas por las tormentas, la avalancha actualiza la evolución del lecho, además de tomar en cuenta el desprendimiento de arena desde la cara de la duna hasta la playa. El desprendimiento se genera cuando se excede la pendiente crítica  $m_{cr}$ .

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \quad \text{Ecuación [2.29]}$$

La pendiente del fondo se calcula utilizando:

$$\frac{\partial z_b}{\partial x} = \frac{z_{b,i+1,j} - z_{b,i,j}}{\Delta x} \quad \text{Ecuación [2.30]}$$

Los índices  $i, j$  representan las coordenadas transversales y longitudinales, respectivamente, en la cuadrícula del modelo.

El cambio del fondo dentro de un paso  $\Delta z_b$  está dado por;

$$\Delta z_b = \min \left( \left( \left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, 0.05 \Delta t \right), \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \quad \text{Ecuación [2.31]}$$

$$\Delta z_b = \max \left( - \left( \left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, -0.05 \Delta t \right), \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \quad \text{Ecuación [2.32]}$$

## Formulaciones para el modo estacionario

### Ecuación de balance de acción de onda

La ecuación de acción de balance se repite para este modo (ecuación [2.3]). Las diferencias entre el modo estacionario y el modo *surfbeat* son las siguientes:

- Las alturas de ola son estacionarias (no varían en el tiempo), por lo que el término  $\frac{\partial A}{\partial t}$  es cero. No se genera un gradiente en los tensores de radiación en el balance de acción de onda para variaciones de grupos de ondas. Por lo tanto, el balance de acción de onda no puede forzar la variación del nivel de agua en la ecuación de aguas someras (para variaciones de grupos de ondas).
- La disipación debido a la rotura del oleaje es diferente, se utiliza la formulación de Baldock, donde la fracción de olas rompientes  $Q_b$  y la altura de olas rompientes  $H_b$  se calculan de forma diferente, la cual está representada por la ecuación:

$$\overline{D_w} = \frac{1}{4} \alpha Q_b \rho g f_{rep} (H_b^2 + H_{rms}^2) \quad \text{Ecuación [2.33]}$$

$$Q_b = \exp\left[-\frac{H_b^2}{H_{rms}^2}\right], H_b = \frac{0.88}{k} \tanh\left[\frac{\gamma kh}{0.88}\right] \quad \text{Ecuación [2.34]}$$

- El índice de rotura  $\gamma$  es diferente para el modo estacionario es de 0.78 y para el modo *surfbeat* 0.541.

### Ecuaciones de aguas someras

No hay diferencias en las ecuaciones de aguas someras en el modo estacionario con respecto al modo *surfbeat* (ecuaciones [2.16]-[2.20]). El balance de acción de onda no fuerza las ecuaciones de aguas someras para la variación de los grupos de onda, por lo que las ondas IG no son modeladas.

### 2.3.5. Factor de aceleración morfológica

El modelo XBeach utiliza un factor de aceleración morfológica (*morfac*) que está definido en una escala de tiempo morfológico con relación a la escala de tiempo hidrodinámico, reduciendo el tiempo computacional. Por ejemplo, si se realiza una simulación hidrodinámica de 10 minutos (600 s) con un *morfac* de 6 se simula la evolución morfológica a lo largo de una hora (3600 s) y da como resultado 6 veces más erosión y acreción en un paso de tiempo más corto (Roelvink et al., 2015; Trouw et al., 2012).

### 2.3.6. Modelación de estructuras costeras con XBeach

El modelo XBeach ha sido utilizado para el estudio de estructuras costeras debido a su capacidad para simular la hidrodinámica y morfodinámica de playas con tiempos de cómputo asequibles. Algunos ejemplos de sus aplicaciones se describen a continuación.

Razak et. al (2013) implementaron el modelo XBeach empleando el modo estacionario para validar el cambio de la línea de costa con un modelo analítico cerca de un espigón idealizado. Los autores lograron predecir la evolución de la línea de costa observando el proceso natural de bypassing,

siendo que los modelos analíticos no logran hacerlo. Ruol, et. al (2018) realizaron la parte experimental y numérica de dos espigones construidos en el laboratorio, obtuvieron buenos resultados calibrando el modelo utilizando el modo estacionario. Lograron reproducir la evolución de la línea de costa a corto plazo (30 horas). Gruwez et al. (2014) emplearon un sistema de espigones, el modelo fue capaz de reproducir los principales cambios morfológicos, pero sobreestimó las tasas de erosión, como resultado de una subestimación del transporte *onshore* durante condiciones de oleaje suave. Razak & Nor, (2018) simularon con un rompeolas, reprodujeron eficazmente los cambios morfodinámicos alrededor de él. Detectaron que es importante la distancia a la que se coloca el rompeolas de la línea de costa, llegando a formarse tómbolos cuando están más cerca de la costa. Utilizaron olas estacionarias (es decir el modo estacionario) y la dirección del oleaje normal al rompeolas y a la línea de costa. Estos estudios se enfocaron a condiciones de laboratorio e idealizadas. Es por ello relevante evaluar la aplicación del modelo XBeach en playas naturales.

# Capítulo 3

## Zona de estudio

### 3.1. Localización

El sitio de estudio se encuentra localizado al norte de la Península de Yucatán, en la comunidad de Sisal, ubicada en 21°09' al Norte y 90°01'50" al Oeste. La costa se caracteriza por tener una amplia y somera plataforma continental, con una pendiente suave de 1:1000 (Enriquez et al., 2010). Las principales fuentes de ingresos de la comunidad están relacionadas con la pesca y el turismo. La playa de Sisal se encuentra entre dos estructuras, siendo la escollera del Puerto la responsable del crecimiento de la playa a lo largo de los últimos 40 años (figura 5). Mediciones de perfiles de playa de 2015 a 2019 estimaron un incremento en el volumen de arena de la playa emergida de 50 000 m<sup>3</sup> (Medellín & Torres-Freyermuth, 2019).

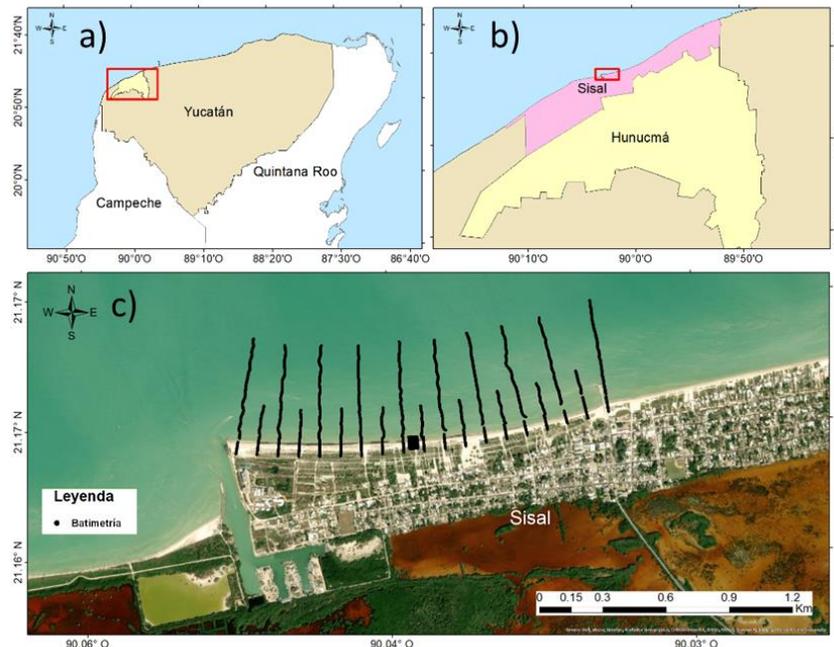


Figura 5. Localización del sitio de estudio. Ubicación de a) La costa norte de Yucatán, b) Sisal y c) Foto aérea de Sisal.

### 3.2. Clima marítimo

La costa norte de Yucatán presenta la incidencia de eventos sinópticos conocidos como Nortes o frentes fríos durante los meses de octubre a marzo (Medina-Gómez & Herrera-Silveira, 2009). Estos eventos se caracterizan por vientos del Norte y Noroeste, presentan una disminución de la temperatura, muchas veces están acompañados de precipitación, y son el resultado del desplazamiento de un centro de alta presión desde latitudes nortes hacia el sur y el este. Debido a los fuertes vientos y la escala sinóptica de estos eventos, la zona de estudio se ve afectada por oleaje

energético a 10 m de profundidad con  $H_s > 2$  m y período relativamente alto ( $T=8s$ ) (Torres-Freyermuth et al., 2017; ver figura 6b, c- recuadro blanco).

Por otra parte, el clima marino está dominado la mayor parte del año por eventos de brisas marinas del NE y brisas terrestres del SE. Las brisas marinas predominan durante los meses de primavera y verano, siendo más energética en abril y mayo, (Figuroa-Espinoza et al., 2014). Estos eventos generan el oleaje responsable de mover grandes cantidades de sedimento a través del transporte litoral (Medellín et al., 2018; Medellín & Torres-Freyermuth, 2019; Torres-Freyermuth et al., 2017, 2020).

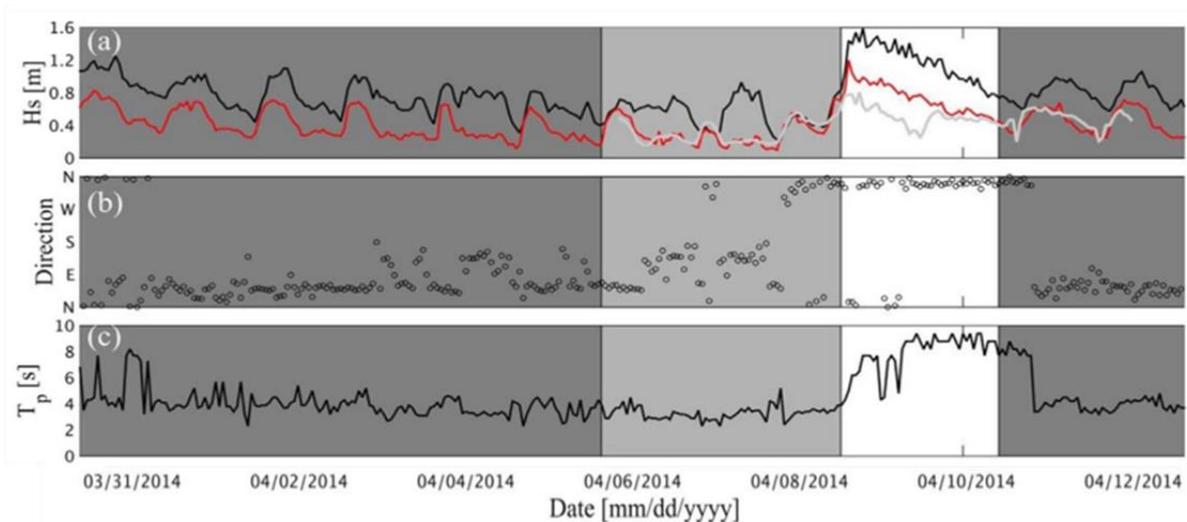
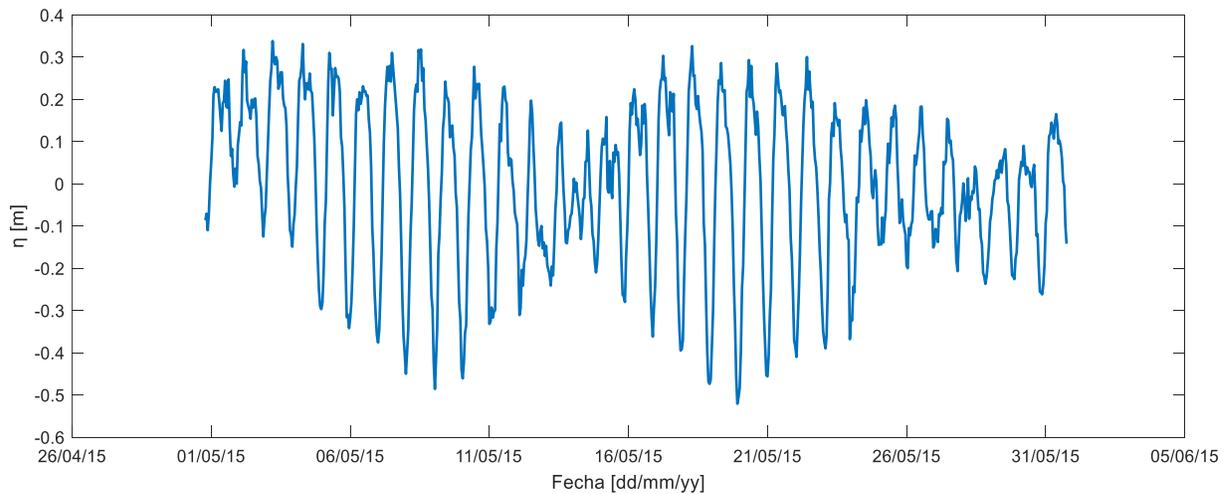


Figura 6. Series temporales de la a)  $H_s$  en la zona interna de la plataforma (línea negra), fuera de la zona surf (línea roja) y en la zona surf (línea gris), b) Dirección del oleaje y c) Período pico a 10 m de profundidad del agua durante un año. El recuadro blanco representa el período con la incidencia de un Norte, recuadro gris opaco delimita las brisas marinas y recuadro gris encuadra las brisas terrestres. Tomada de Torres-Freyermuth et al. (2017).

### 3.3. Mareas

Esta región costera se caracteriza por la presencia de mareas predominantemente diurnas y por ser micro-mareas con un rango entre 0.8 m durante mareas vivas y 0.1 en mareas muertas (Appendini et al., 2012). La figura 7 muestra una serie temporal del nivel del mar a lo largo de un mes, se aprecia una variación diurna y dos ciclos de marea viva y muerta.



### 3.4. Corrientes

En el experimento de Torres-Freyermuth et al. (2017) se midieron las corrientes en diferentes posiciones transversales, durante Nortes y brisas (marinas y terrestres) frente a la costa de Sisal, Yucatán. Las mediciones *in situ* se analizaron detalladamente en la zona interna de la plataforma, fuera y dentro de la zona surf y en la zona *swash*.

Los resultados más relevantes fueron los siguientes:

- En la zona interna de la plataforma y antes de la zona surf son hacia el oeste con un valor de 0.3 m/s durante brisas marinas con mareas diurnas. En las brisas terrestres decreció la velocidad a 0.1 m/s. Con la presencia del Norte al inicio se registró una velocidad máxima de 0.22 m/s con una dirección hacia el suroeste, finalizando con una velocidad mínima de 0.08 m/s.
- En la zona surf se detectaron corrientes con velocidades superiores comparados con los de la zona *offshore*. Durante brisas terrestres la dirección de la corriente es hacia el sur o suroeste (S/SW) con velocidades máximas de 0.1 m/s, en brisas marinas cambia a oeste con velocidades entre 0.3 a 0.4 m/s. Por otra parte, durante el Norte la velocidad alcanzó un máximo de 0.4 m/s en dirección hacia el este-noreste (E/NE) al inicio, modificándose hacia el noroeste (NW) al final del evento.
- En la zona *swash* durante brisas marinas la dirección es hacia el oeste con una velocidad máxima de 0.25 m/s; durante el evento de Norte la dirección de la corriente es hacia el este con un aumento de 0.37 m/s. Por último, en brisas terrestres las velocidades máximas son menores a 0.1 m/s con dirección hacia el sur o suroeste.

### 3.5. Morfología de la playa de Sisal

El perfil de playa de Sisal está constituido por barras sumergidas, altamente dinámicas que migran en función de las características del oleaje. En los meses de octubre a abril la barra de arena interior sumergida migra hacia la costa. Después de acercarse a la costa genera una barra soldada, por lo que entre enero y abril de cada año aumenta el ancho de la playa en las zonas alejadas de las estructuras costeras. En el mes de mayo comienza a migrar hacia el mar alcanzando la posición más alejada de la costa en el mes de septiembre. De modo que, las barras de arena sumergida migran hacia el mar durante las condiciones de brisas marinas (primavera-verano) y migran hacia la costa durante las condiciones de tormenta del Norte (otoño-invierno) (Medellín & Torres-Freyermuth, 2021).

La playa de Sisal se caracteriza por tener un tamaño de grano de 0.3 mm, consta de un campo de dunas con vegetación en la parte emergida de la playa (post-playa). El crecimiento de las dunas está modulado por el ciclo diario de brisas del NE-SE, por ende, la elevación de la cresta de las dunas es mayor en los meses de primavera (marzo-junio) que es cuando las brisas son más intensas. En los meses de otoño- invierno hay una disminución de volumen en las dunas por el *overwash* (rebase), con pérdidas mayores de sedimento en los Nortes (Medellín & Torres-Freyermuth, 2021).

Las variaciones en la zona de la anteplaya son contrarias a la evolución de las dunas. Durante primavera-verano a medida que crece la duna, el volumen de la playa decrece generando una erosión, en contraparte durante las tormentas de invierno se genera una acreción en la playa (Medellín & Torres-Freyermuth, 2021).

## Capítulo 4

### Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron los datos medidos en el experimento de Medellín et al. (2018). La información del oleaje, hidrodinámica y morfodinámica fue utilizada para la implementación, calibración y validación del modelo XBeach. Gracias a la alta resolución espacial de las mediciones topobatemétricas fue posible comparar la evolución de la playa en varios instantes de tiempo. A continuación, se describen los datos de campo utilizados y los detalles sobre la implementación del modelo numérico.

#### 4.1. Datos del experimento

El experimento consistió en la instalación de un espigón impermeable temporal, con una longitud de 15 m en la playa de Sisal, Yucatán. El objetivo fue realizar mediciones antes, durante y después de la colocación de la estructura temporal. Durante las primeras 24 horas (27 de mayo- 8:00 am) se realizaron levantamientos topográficos de alta resolución mediante un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) utilizando Cinemática en Tiempo Real (RTK), para medir la morfología de la playa sumergida y emergida cada dos horas, a lo largo de 15 transectos (figura 8a). Después de las primeras 24 horas, figura 8b (28 de mayo- 8:00 a.m.), el espigón fue removido, continuando con las mediciones con una frecuencia más baja hasta observar la recuperación de la playa 144 horas después de la remoción de la estructura (3 de junio).

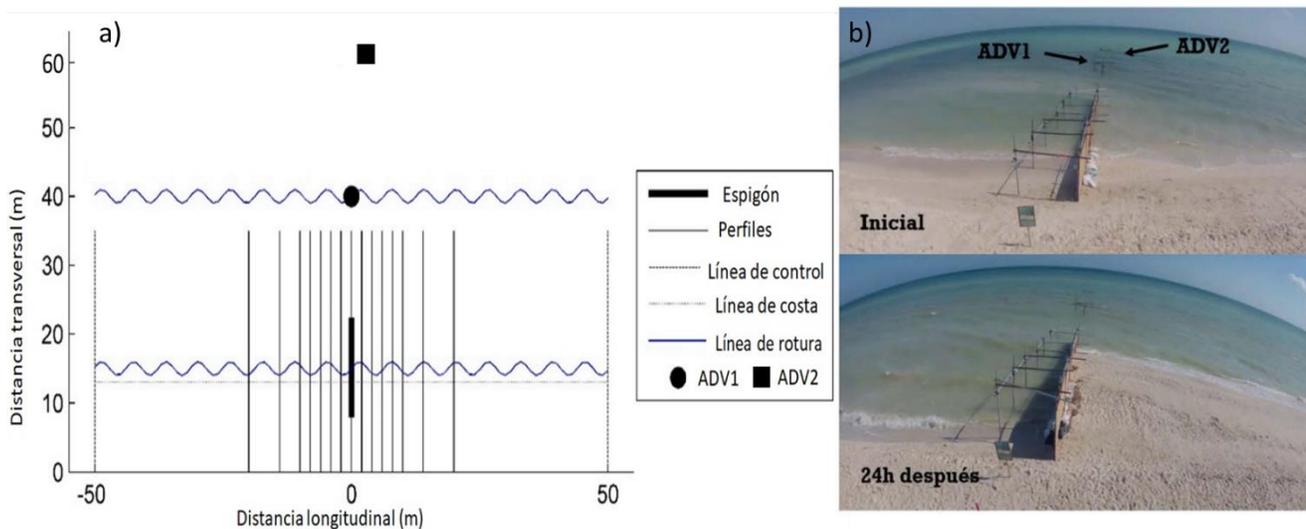


Figura 8. a) Ubicación del espigón temporal, sensores de medición, transectos de medición y la línea de costa. b) Fotografías de la playa justo después de colocar el espigón temporal y a las 24 horas después de la colocación del espigón. Tomada de (Medellín et al., 2018; López-Ramade et al., 2023), respectivamente.

Tabla 1. Distancia a línea de costa y profundidad del agua de los sensores ADVs.

Sensor	Ubicación	Profundidad	Elevación respecto al sensor
ADV1	x=45 m	0.7 m	0.2 m
ADV2	x= 65 m	1.5 m	0.5 m

## Viento

Los datos de viento fueron colectados por un anemómetro y fueron promediados cada hora; se tomaron de la estación meteorológica de Sisal (MeteoSisal). La figura 9 muestra la variación de la velocidad y dirección del viento, donde se observa que durante el experimento dominaron las brisas marinas, con máximos de hasta de 15 m/s (fondo gris) con dirección NE y mínimos de 5 m/s (fondo blanco) durante brisa terrestre con dirección SE.

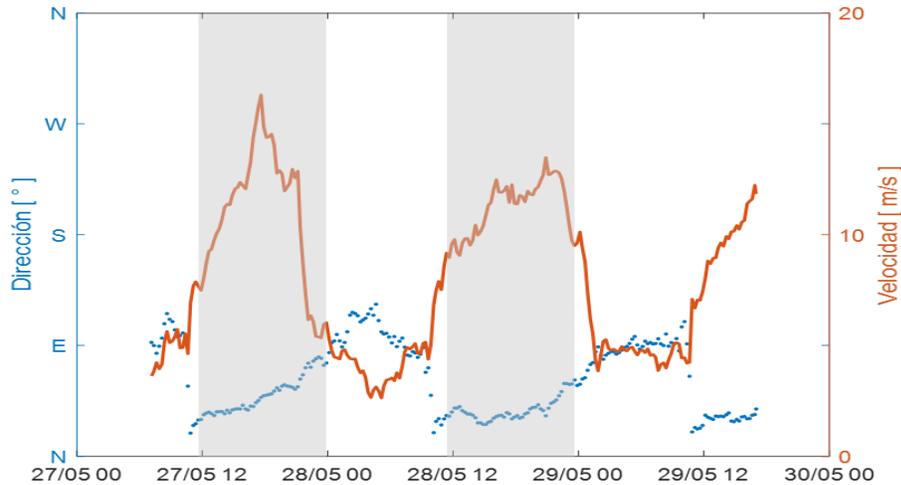


Figura 9. Serie temporal de la magnitud y dirección del viento durante el experimento del espigón temporal. El fondo gris delimita los eventos de brisas marinas y el fondo blanco los eventos de brisas terrestres.

## Oleaje

Para la medición del oleaje, se colocó un Perfilador de Corrientes Acústico Doppler (ADCP) a 10 m de profundidad (11 km de la costa). Las mediciones de oleaje se obtuvieron cada media hora del 27 de mayo al 3 de junio. Estos datos fueron propagados con el modelo SWAN a una profundidad de 4 m por López-Ramade et al. (2023). Estos datos se emplearon para utilizarlos como forzamiento para la modelación con XBeach.

La figura 10 muestra las condiciones de oleaje a 4 m de profundidad, que presentan una variación diurna de  $H_s$  con un valor máximo de 0.7 m durante el pico de la brisa marina. El promedio del período de pico  $T_p$  fue de 3.5 s con dirección del NE.

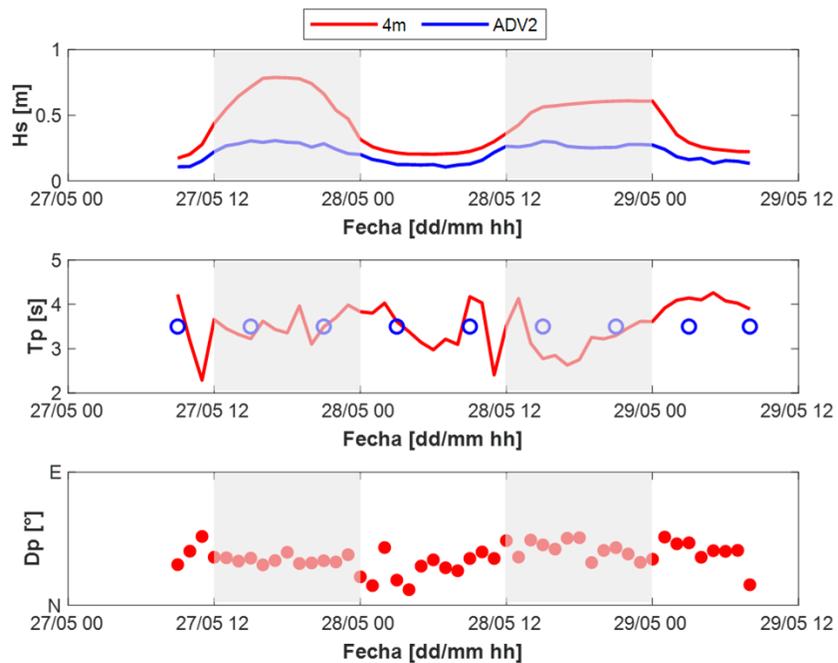


Figura 10. Condiciones de oleaje a 4m de profundidad (línea roja) y en la zona rompiente (ADV2). El fondo gris muestra los eventos de brisas marinas y el fondo blanco los eventos de brisas terrestres.

## Marea

El nivel del mar fue obtenido por un mareógrafo, perteneciente al Sistema Mareográfico Nacional, instalado dentro del Puerto de Sisal. Los datos fueron medidos cada 1 minuto y promediados cada hora. Se seleccionaron condiciones de mareas muertas durante el experimento para disminuir el efecto de la marea en los procesos de la zona de rompientes y de *swash*. La serie temporal del nivel del mar muestra que se encontró en un intervalo de -0.2 m y 0.2 m como mínimo y máximo, respectivamente (figura 11).

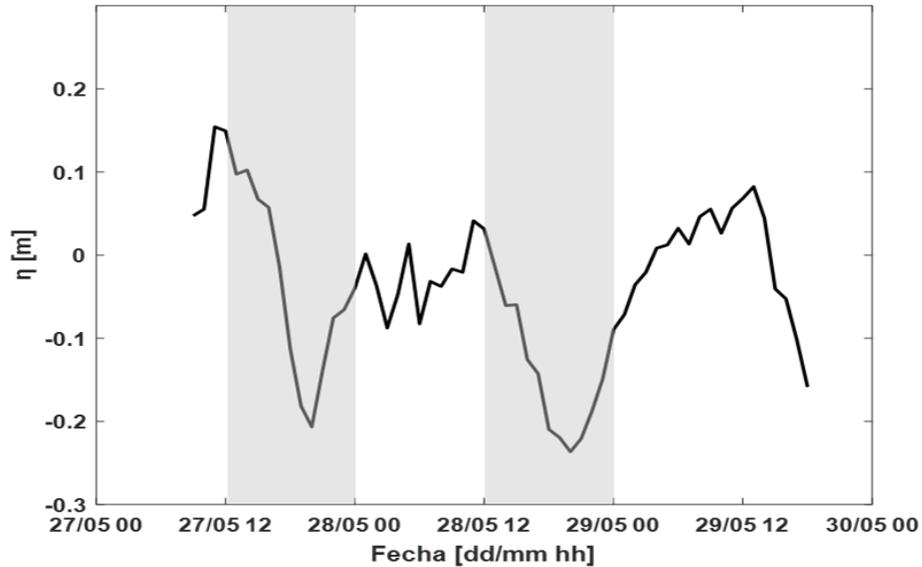


Figura 11. Variación del nivel del mar durante el experimento del espigón temporal. El fondo gris delimita los eventos de brisas marinas y de fondo blanco los eventos de brisas terrestres.

### Corrientes

Las corrientes en la zona de surf fueron obtenidas con dos Velocímetros Acústicos Doppler (ADV por sus siglas en inglés) Nortek Vector. Se midieron velocidades de corrientes, de manera continua a una frecuencia de 16 Hz durante 48 horas (27 al 29 de mayo). Las corrientes fueron medidas en un sistema de referencia XYZ asociado a las velocidades instantáneas  $u$ ,  $v$  y  $w$ , respectivamente. Por lo tanto, la componente transversal ( $u$ ) de la velocidad presenta valores positivos *onshore* y la componente longitudinal ( $v$ ) presenta valores positivos hacia el oeste. A partir de las mediciones instantáneas se obtuvieron las corrientes medias ( $U$  y  $V$ ) con el promedio temporal de las velocidades a lo largo de 7 minutos. La figura 12 muestra como la componente dominante es longitudinal ( $V$ ) con magnitud máxima de 0.5 m/s y 0.35 m/s en el ADV1 y ADV2, respectivamente, con dirección hacia el oeste. La corriente  $U$  tiene magnitudes pequeñas con valores positivos en dirección *onshore*.

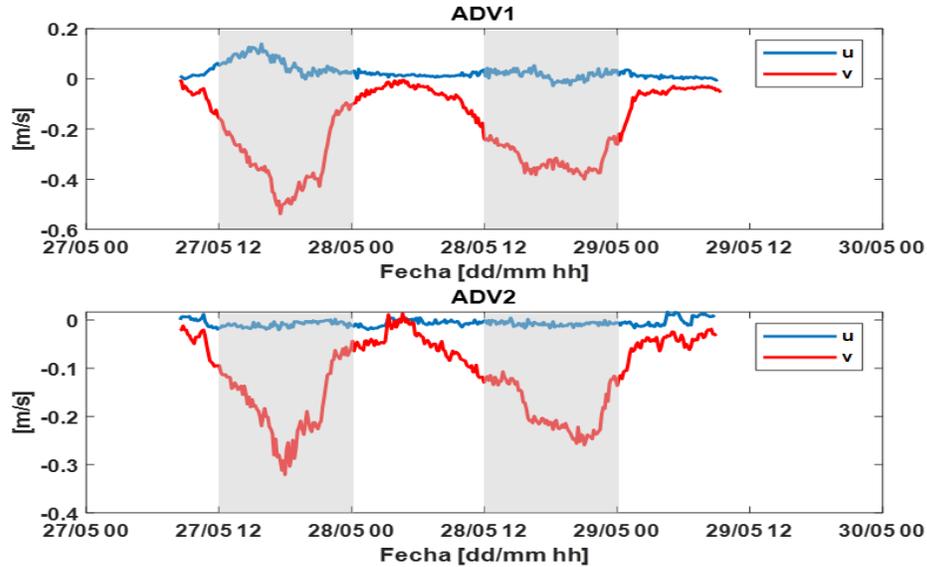


Figura 12. Velocidades de las corrientes en la zona de rompientes para la componente transversal ( $U$ ) y longitudinal ( $V$ ) de la velocidad registrada en los velocímetros ADV1 y ADV2 durante el experimento de Medellín et al. (2018). El fondo gris delimita los eventos de brisas marinas y el fondo blanco los eventos de brisas terrestres.

## 4.2. Implementación del modelo numérico XBeach

Se utilizó el modelo XBeach en modo estacionario y modo *surfbeat* (XBeach versión 1.23.5852). Las simulaciones se realizaron por un período de 24 horas con el objetivo de calibrar el modelo numérico con las mediciones del espigón temporal (Sección 4.1). El modelo calibrado fue utilizado para modelar las 24 horas posteriores a la remoción de la estructura. A continuación, se describe la implementación del modelo en la malla de cálculo y las condiciones de contorno. Asimismo, se describen las características de los casos simulados en este trabajo.

### 4.2.1. Dominio y mallado

A partir de mediciones de la batimetría en la zona de estudio se generó un mapa con una resolución espacial de 2x2 m, generando un dominio numérico de 1766 m y 474 m en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente (figura 13). Se seleccionó un perfil de playa cercano a la posición del espigón (figura 14a), creando una batimetría idealizada con las mismas dimensiones (figura 15). Tomando como referencia que XBeach utiliza un sistema de coordenadas donde el eje  $x$  siempre está orientado perpendicular a la costa y el eje  $y$  se orienta de manera longitudinal (paralela a la línea de costa) (Roelvink et al., 2015).

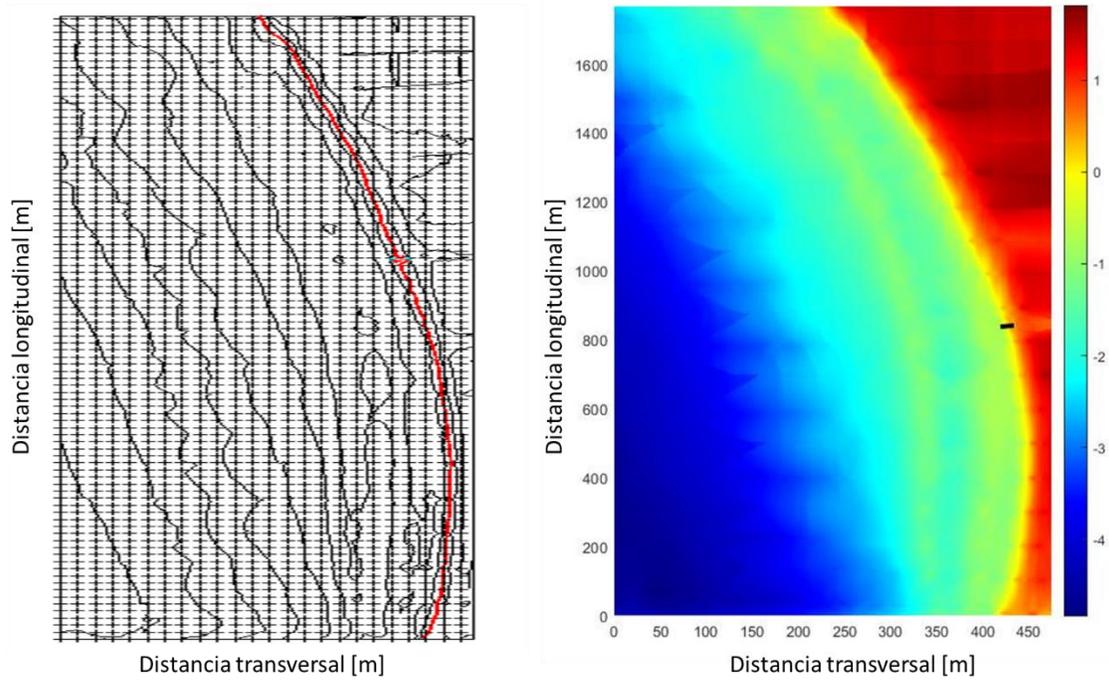


Figura 13. a) Malla y b) batimetría real de la playa de Sisal en 2D.

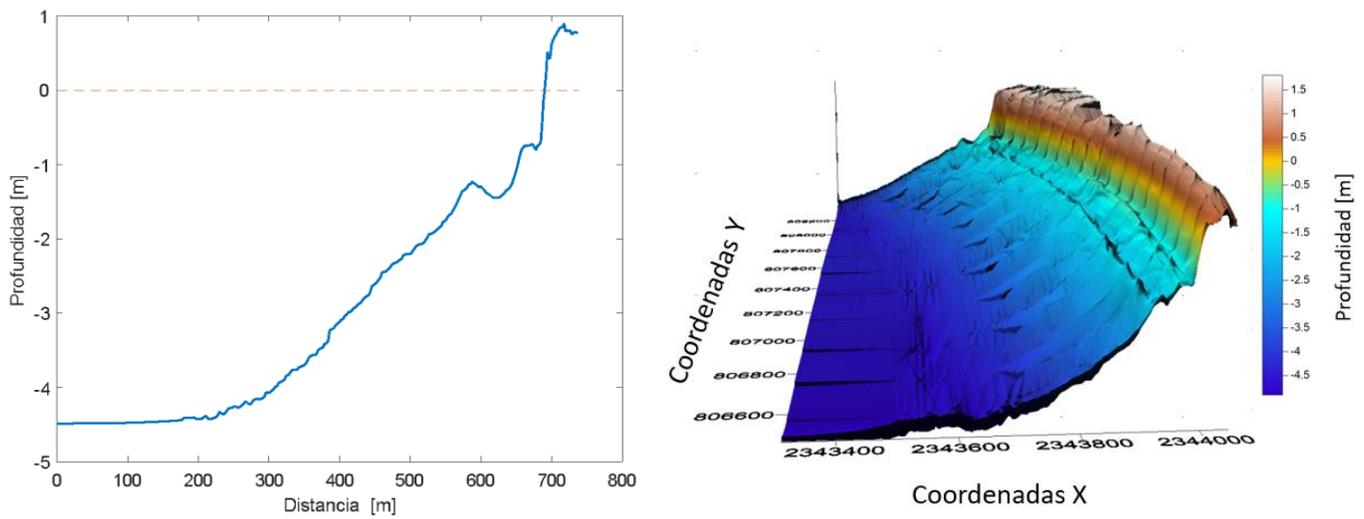


Figura 14. a) Perfil topo-batimétrico de la playa de Sisal y b) batimetría en 3D de la playa de Sisal.

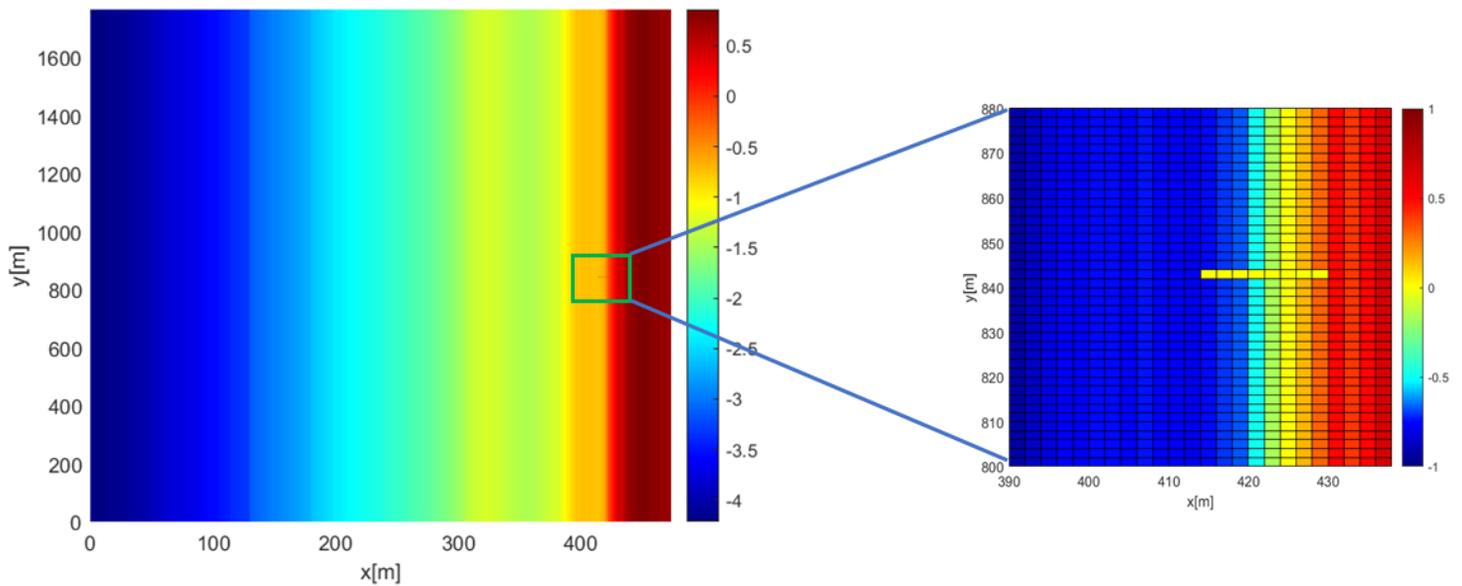


Figura 15. Malla y batimetría idealizada de la playa de Sisal en 2D construida a partir del perfil topobbatimétrico medido.

La dirección de propagación del oleaje en el modelo XBeach se puede especificar en coordenadas cartesianas ( $thetanaut=0$ ) o náuticas ( $thetanaut=1$ ) (figura 16). Cuando se utiliza las coordenadas náuticas, las ondas se propagan con un ángulo con respecto al norte ( $0^\circ$ ) y en sentido horario (este= $90$ ). El sistema cartesiano es relativo al eje  $x$  de la malla que se generó. Por lo que para una cuadrícula con un eje  $x$  de oeste a este (de costa a costa) una onda con ángulo de  $0^\circ$  es perpendicularmente entrante (Berrío Arrieta, 2018). La energía de las ondas incidentes se discretiza en sectores direccionales llamados  $thetamin$  (límite direccional inferior) y  $thetamax$  (límite direccional superior) (Kolokythas et al., 2016). El usuario también puede ajustar el tamaño de contenedor direccional utilizando  $dtheta$ .

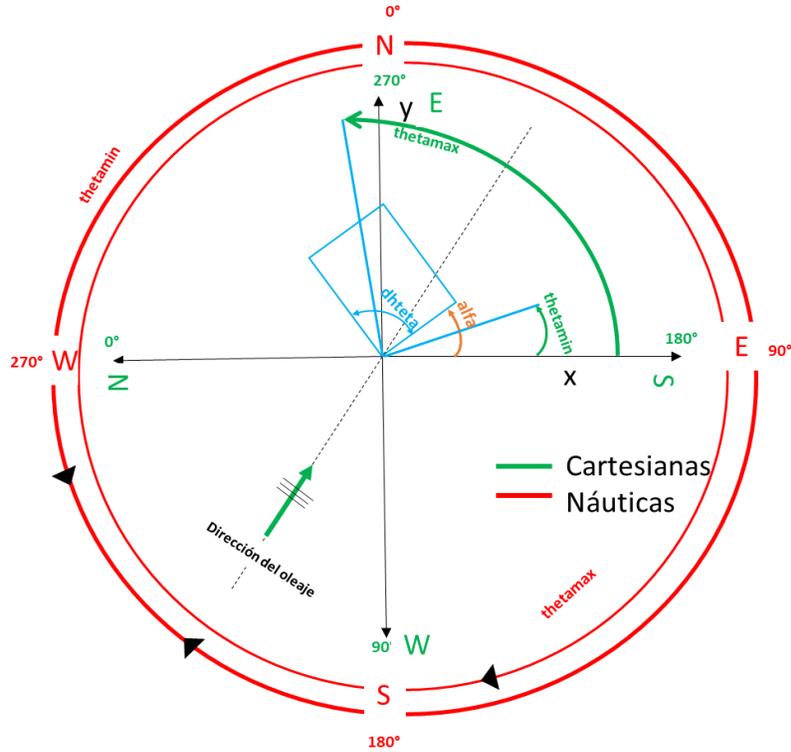


Figura 16. Representación del uso de las coordenadas cartesianas y náuticas en XBeach para la dirección del oleaje. Modificado de Ramli (2020).

En el presente estudio, los límites direccionales superior e inferior se fijaron a 90 y -90, respectivamente, de acuerdo con la convención cartesiana (Este= 0° y Norte= 90°) y  $dtheta = 10$ . Los ángulos empleados están rotados internamente en relación con la línea de costa, el cual se especifica con el parámetro *alfa* (ángulo del eje computacional x relativo al Este y en sentido contrario a las agujas del reloj). Para la playa de Sisal se utilizó un *alfa* de 0°.

#### 4.2.2 Condiciones de forzamiento

La opción que se utilizó fue una serie con diferentes condiciones de oleaje representados por un espectro JONSWAP (*jons\_table*). Por lo tanto, el archivo de entrada debe tener diferentes espectros JONSWAP con los datos definidos en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros empleados para la opción *jons* en XBeach.

Parámetro	Descripción
<b>Hmo</b>	Altura significativa de la ola
<b>Tp</b>	Período pico
<b>mainang</b>	Dirección de la ola

<b>gamma<sub>jsp</sub></b>	Factor de espectro JONSWAP
<b>s</b>	coeficiente de dispersión direccional
<b>Duración</b>	Duración de cada espectro

Se utilizaron en total 24 condiciones de oleaje horarias, lo que equivale a la duración del experimento, utilizando las series de tiempo de altura, período, dirección del oleaje (figura 10) y nivel del mar (figura 11), ver tabla 3. Las condiciones de marea se simulan durante dos ciclos de marea con una amplitud de 0.2 m aproximadamente. La altura del oleaje varía de 0.8 m como valor máximo a 0.3 m como mínimo. El período pico del oleaje varió de 4.2 s como máximo y 2.28 s como mínimo. Todas las olas provienen del cuadrante NE. El tamaño de sedimento es de  $D_{50}=0.3$  mm.

Tabla 3. Datos de  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$  y nivel del mar utilizados para el forzamiento del modelo.

$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$D_p$ (°)	Nivel del agua (m)
0.172	4.223	27.43	0.047
0.203	3.175	36.55	0.055
0.277	2.289	46.51	0.154
0.436	3.658	32.45	0.149
0.549	3.452	32.06	0.097
0.645	3.320	29.83	0.102
0.715	3.224	31.82	0.067
0.780	3.621	27.27	0.057
0.787	3.435	30.2	-0.017
0.784	3.356	35.82	-0.112
0.778	3.966	28.2	-0.181
0.740	3.102	28.58	-0.206
0.663	3.495	30.09	-0.138
0.538	3.700	29.24	-0.07575
0.472	3.985	34.16	-0.06575
0.316	3.834	19.19	-0.03975
0.259	3.803	13.24	0.00125
0.231	4.028	38.99	-0.03675
0.213	3.612	10.48	-0.08775
0.203	3.384	10.48	-0.04675

### 4.2.3 Parámetros generales

La tabla 4 contiene los parámetros para el archivo de entrada params.txt único para poder ejecutar las simulaciones.

Tabla 4. Parámetros de montaje del modelo XBeach con su descripción y valor utilizado.

Parámetros		Descripción	Valor usado
<b>Mallado numérico</b>	Nx	Celdas numéricas en el eje x	237
	Ny	Celdas numéricas en el eje y	883
	Thetamin	Límite direccional	-90
	Thetamax	Límite direccional	90
	Dtheta	Tamaño de contenedor direccional	10
	Alfa	Ángulo del eje x respecto al este	0
<b>Tiempo modelación</b>	Tstop	Tiempo de duración de la simulación	86400
	CFL	Máximo número de Courant para el cálculo	0.7
<b>General</b>	wavemodel	Estacionario, <i>surfbeat</i> o no hidrostático	<i>surfbeat</i> stationary
	single_dir	Refracción se resuelve de forma estacionaria, dirección oleaje promedio	0
	Cyclic		1
<b>Condiciones de frontera</b>	Front	Contorno generador y absorbente en 2D	abs_2d
	Left	Condición de frontera lateral	Neumann
	Right	Condición de frontera lateral	Neumann
	lateralwave	Condición lateral izquierdo	wavecrest
<b>Condiciones de forzamiento</b>	Bcfile	Archivo de entrada para cálculos espectrales	jons_table
	Instant	Condiciones para el oleaje	jons_table
<b>Condiciones de la Marea</b>	Tideloc	Indica el uso de marea	1
	zs0file	Archivo con datos de la marea	

<b>Estructura</b>	Struct	0- Con estructura, 1-Sin estructura	1
	ne_layer	Archivo externo donde se especifica donde se encuentra la estructura.	Capa erosionable con un valor de 10  Capa no erosionable con un valor de 0
<b>Morfología</b>	Morfac	Factor morfológico	2

El espigón es tratado como una estructura no erosionable. La condición de contorno en los límites laterales para el gradiente del nivel del agua es Neumann. Para el transporte de sedimentos, se utilizan las formulaciones de la [2.21] a la [2.25]. El valor de *morfac* es 2 considerando que sólo hay pocas horas de simulación. Como parte de la validación y calibración, primero se simuló sin activar el transporte de sedimento (*sedtrans*) y la morfología (*morphology*), sin marea y con marea esto para identificar cambios con la estructura al activar y desactivar *sedtrans* y *morphology*. También se activó el parámetro de avalancha (*avalanching*) para tener en cuenta el desprendimiento de arena cerca de la línea de costa.

Revisando la literatura sobre morfodinámica con estructuras utilizando XBeach, se encontró que el modelo es sensible a los parámetros *facua*, *wetslp* y *dryslp*. En la tabla [5], se hace una descripción de estos parámetros de XBeach y los respectivos valores usados en las pruebas con modo *surfbeat* y estacionario.

Tabla 5. Parámetros de sensibilidad encontrados para XBeach.

Parámetro	Descripción	Valor por default	Valor usado
<b><i>Facua</i></b>	Asimetría de transporte	0.1	1
<b><i>Wetslp</i></b>	Pendiente crítica de avalancha bajo el agua	0.3	0.3
<b><i>Dryslp</i></b>	Pendiente crítica de avalancha encima del agua	1	1
<b><i>bedfriction</i></b>	Coefficiente de rugosidad	55 m <sup>1/2</sup> /s	55 m <sup>1/2</sup> /s

- ***Facua***

Uno de los parámetros de calibración importantes para la morfodinámica de playas es *facua*. Se utiliza para definir *skewness* y asimetría de las olas. Las velocidades Eulerianas promediadas en profundidad transversal y longitudinalmente son reemplazadas por las velocidades de advección del

sedimento debido a la asimetría. Con valores altos promueve el transporte de sedimento *onshore*, mientras que con valores cercanos a cero el transporte de sedimento es en dirección *offshore*.

Estudios como De Vet (2015) y Splinter et. al (2012) recomiendan calibrar este parámetro para lograr tener una mejor predicción en estudios de erosión de dunas. Por otro lado, en estudios previos con estructuras (Cho et al., 2021; Fang et al., 2020; Garzon et al., 2022; Razak et al., 2013; Razak & Nor, 2018; Ruol et al., 2018) este valor ha sido calibrado, siendo el valor máximo igual 0.3 en todas estas investigaciones. El único estudio que utilizó valores más grandes fue el de Demirci (2016), alcanzando un valor de 5, siendo que no se mostraba un cambio en la línea de costa a lo largo de la simulación. Para esta investigación se optó por utilizar el valor de 1, ya que con valores bajos no mostraba ningún cambio en la línea de costa al colocar la estructura.

- **Wetslp y dryslp**

El parámetro *wetslp* es utilizado para describir la pendiente de avalanchas críticas bajo el agua. Cuando se asignan valores altos causará una pendiente de equilibrio más empinada y con valores más bajos se tendrá una pendiente de equilibrio más suave. En contraparte, el parámetro *dryslp* es usado para describir la pendiente de avalanchas críticas por encima del agua, si se define un valor grande se observa mucha erosión sobre el agua, mientras que para valores bajos la erosión disminuye (SÖĞÜT, 2014).

- **Coefficiente de rugosidad**

La fricción de fondo por las corrientes y las ondas largas (ondas IG) está asociada a el coeficiente de Chezy. Por default equivale a  $55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ , este valor representa una mayor fricción a medida que su magnitud se aproxime a cero. Al aumentar los valores de fricción se tendrán niveles de erosión más bajos (Cueto & Otero, 2020).

La fricción de fondo de ondas cortas está dada por  $f_w$ . Para este estudio se utilizó el valor por default, equivalente a 0. Este valor solo afecta la ecuación de acción de ondas.

#### **4.2.4 Efecto de la propagación direccional del oleaje en 2D**

El coeficiente del parámetro *directional spreading* (dispersión direccional-*s*) es importante para saber si el espectro direccional al momento de propagarse en aguas profundas es el correcto. Este afecta la aceleración de las olas y la energía de las olas IG cercanas a la costa. Si este valor no se llega a tomar en cuenta suele sobreestimar los valores de las alturas significantes de las olas y de las velocidades del flujo, además de modificar el efecto en el transporte de sedimentos cerca de la costa (Razak et al., 2013; Daly, 2009).

La dirección del campo de oleaje es expresado por el espectro bidimensional  $S(f, \theta)$  donde  $f$  es la frecuencia y  $\theta$  es el ángulo de dirección de onda. La distribución direccional de la energía de las olas a una frecuencia  $f$  está dada por:

$$D_f = \frac{E(f, \theta)}{\int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta} \quad \text{Ecuación [4.1]}$$

Kuik et al. (1988) definió el ancho direccional  $\sigma$  como medida de la dispersión direccional como:

$$\sigma = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{2(1 - m_1)} \quad \text{Ecuación [4.2]}$$

donde

$$m_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad \text{Ecuación [4.3]}$$

$$a_1 = \int_0^{2\pi} \cos(\theta) D(\theta) d\theta \quad \text{Ecuación [4.4]}$$

$$b_1 = \int_0^{2\pi} \sin(\theta) D(\theta) d\theta \quad \text{Ecuación [4.5]}$$

Una forma típica de la distribución direccional es:

$$D(\theta) = D_0 \cos^{2s} \left( \frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad \text{Ecuación [4.6]}$$

Donde  $D_0$  es una constante de normalización  $\int_0^{2\pi} D(\theta) d\theta = 1$  y  $s$  es el parámetro de dispersión direccional y  $\sigma$  están relacionados por:

$$\sigma = \frac{180}{\pi} \sqrt{\frac{2}{s+1}} \quad \text{Ecuación [4.7]}$$

Otra definición de la distribución direccional es:

$$D(\theta) = k \cos^m(\theta - \theta_0) \quad \text{Ecuación [4.8]}$$

[4.6] y [4.8] son similares cuando  $s=2m+1$ .

En el modelo XBeach, para un oleaje irregular, la distribución de frecuencias de la densidad de energía correspondiente está dada por un espectro Joswap con una distribución de  $\cos 2\theta$  limitado de 1 a 1000. Por otro lado, la distribución de energía direccional en cada frecuencia en el espectro se discretiza en sectores direccionales, cada uno con un ancho  $\Delta\theta$  (figura 17). Por lo tanto, al aumentar el parámetro  $s$  la distribución de la densidad de energía disminuye la cantidad de sectores direccionales en los que se divide la propagación del oleaje (Berrio Arrieta, 2018; Roelvink et al., 2009).

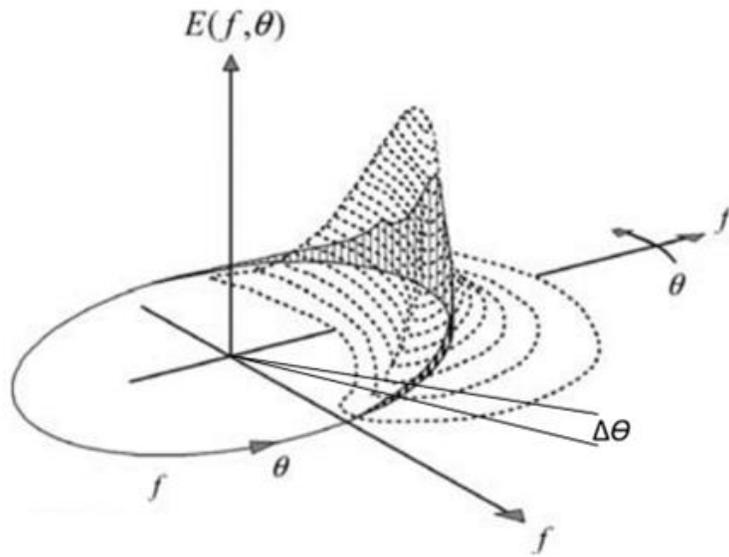


Figura 17. Distribución de energía direccional a una frecuencia ( $f$ ) arbitraria con un único sector direccional  $\Delta\theta$ . Tomada y modificada de Holthuijsen (2007).

Con el objetivo de encontrar el mejor valor del parámetro de propagación direccional ( $s$ ) se realizaron un conjunto de pruebas con diferentes valores;  $s = 5$  ( $\sigma = 33^\circ$ ),  $10$  ( $\sigma = 24.5^\circ$ ) y  $20$  ( $\sigma = 18^\circ$ ). Para después comparar la hidrodinámica de los datos de campo con los obtenidos por el modelo con los diferentes valores de  $s$ .

#### 4.2.5 Efecto del parámetro *single\_dir*

Este parámetro propaga la energía de las olas con una dirección media. Esta opción preserva el agrupamiento del oleaje, lo que lleva a un mayor forzamiento de las ondas de infragravedad. Esto conduce a tener un run-up más alto y provocará un aumento en la erosión (Lashley, 2017; Garzon et al., 2022). En trabajos previos como Ruol et al. (2018, 2020), Oliveira et al. (2020) y Garzon et al. (2022) utilizan este parámetro en su archivo de entrada para observar los procesos hidromorfodinámicos.

#### 4.2.6 Índices de rendimiento

Para evaluar el desempeño del modelo numérico se utilizaron índices de rendimiento. Específicamente, para este estudio se emplearán la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de Pearson, y el coeficiente de correlación  $R^2$ . Además de esta evaluación, también se realizó una comparación cualitativa de la variación espacial y temporal de la hidrodinámica de los dos modelos (*surfbeat* y estacionario) con los datos obtenidos en campo.

### **Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)**

Uno de los indicadores más utilizados para caracterizar la capacidad de precisión de un modelo es la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que está en función de la raíz de la diferencia entre los valores del modelo y los observados elevados al cuadrado (Kuhn & Johnson, 2013). Se denota por la ecuación [4.9].

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i,modelado} - x_{i,medidos})^2} \quad \text{Ecuación [4.9]}$$

### **Coefficiente de correlación de Pearson**

El coeficiente de correlación sirve para medir la relación lineal entre dos conjuntos de datos X-Y. El coeficiente de correlación de Pearson oscila entre +1, -1. Con un valor igual a 1 la correlación es positiva y excelente; con -1 la correlación es negativa y el valor 0 indica que no hay ninguna correlación entre los valores de X y Y. Está dada por la ecuación [4.10]:

$$\text{Coeficiente de correlación de Pearson} = 1 - \frac{S_{xy}}{S_x \times S_y} \quad \text{Ecuación [4.10]}$$

donde  $S_{xy}$  es la covarianza de X y Y, calculada por:

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$S_x$  y  $S_y$  son la desviación estándar de X y Y, respectivamente (Kotu & Deshpande, 2019).

### **Coefficiente de correlación $R^2$**

Otra métrica común es el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), que puede interpretarse como la proporción de información de los datos observados que explica el modelo. Por ejemplo, con un valor de  $R^2$  de 0.75, el modelo puede explicar las tres cuartas partes de la variación que se obtuvo con los resultados (Kuhn & Johnson, 2013). Su formulación está representada por la ecuación [4.11].

$$R^2 = \frac{\text{cov}(obs,modelo)}{\sigma_{obs}\sigma_{modelo}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,modelado} - \bar{x})(y_{i,observados} - \bar{y})}{(N-1)\sigma_{modelo}\sigma_{observados}} \quad \text{Ecuación [4.11]}$$

donde  $\bar{x}$  es la media de los datos modelados,  $\bar{y}$  es la media de los datos observados,  $\sigma_{modelo}$  es la desviación de los datos modelados y  $\sigma_{observados}$  es la desviación de los datos medidos (Roelvink et al., 2009).

## Capítulo 5

### Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en esta investigación. En la sección 5.1 se muestran los casos de calibración y validación de la hidrodinámica realizados en el análisis de sensibilidad del modelo XBeach para el modo *estacionario* y el modo *surfbeat*. Por otra parte, en la Sección 5.2 se presentan los resultados de la morfodinámica con la configuración del espigón temporal.

#### 5.1 Casos de calibración y validación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las diferentes modelaciones realizadas con el objetivo de calibrar y validar el modelo XBeach para la hidrodinámica de la playa de Sisal. En primer lugar, se determinó el efecto del parámetro de dispersión direccional para el modo *surfbeat*. Este parámetro, no se necesita en modo estacionario ya que no es un parámetro de entrada.

##### 5.1.1. Sensibilidad del parámetro del coeficiente de dispersión direccional $s$

En la figura 18 se muestran los resultados para diferentes valores de  $s$  y su influencia en la hidrodinámica, analizando las variables de las velocidades de las corrientes transversal  $U$  y longitudinal  $V$  comparadas con los datos medidos por los dos ADVs instalados dentro de la zona de rompientes. Se obtuvieron mejores resultados para  $s=5$  en el caso que no incorpora los efectos de la marea, y la morfodinámica de la playa. Tomando en cuenta los índices de rendimiento se obtuvo una mejor predicción para los dos ADVs con el valor antes mencionado (tabla 6) para la velocidad  $V$  en ADV1 (figura 18 c-línea roja) y para la velocidad  $V$  en ADV2 (figura 18 d-línea roja). Este valor ( $s=5$ ) se encuentra para las ondas generadas por el viento, el cual es recomendado por Bart (2017). Por lo anterior, para todas las ejecuciones del modelo se trabajó con ese valor, ya que presenta una mejor predicción en la hidrodinámica en comparación con los demás valores utilizados.

Siendo el valor de  $s=10$  por defecto también se tiene una buena predicción, aunque se nota una mejor predicción para la velocidad  $V$  en el ADV2 (figura 18 c-línea azul), mientras que en ADV1 se obtuvo una velocidad máxima de  $-0.6$  m/s siendo la máxima  $-0.42$  m/s en los datos observados, por lo que no está representando adecuadamente. Se obtuvo un Pearson,  $R^2$  y RMSE de 0.95, 0.91 y 0.11, respectivamente para ADV1 y 0.90, 0.81 y 0.05 (ver tabla 6), respectivamente para ADV2 (figura 18 d-línea azul).

A medida que aumenta este coeficiente se tiene un desfase en la velocidad  $V$  cambiando el valor máximo, esto se muestra con  $s=20$  (figura 18-línea verde). Aunque se tienen buenos valores de rendimiento en ADV1, se ve afectada la velocidad  $V$  en el ADV2 disminuyéndolos. Obteniendo un valor de Pearson,  $R^2$  y RMSE de 0.97, 0.94 y 0.11, respectivamente para ADV1 (figura 18 c-línea verde) y 0.7, 0.006 y 0.18, (ver tabla 6) respectivamente para ADV2 (figura 18 c-línea verde).

La velocidad  $U$  en los datos medidos para el ADV1 tiene rangos entre 0.0 m/s (mínimo) y 0.1m/s (máximo). Comparando con los diferentes valores de  $s$ , se obtuvo una mejor aproximación con  $s=20$

para los índices de rendimiento. Se tiene una mejor estimación visualmente con  $s=5$  con un rango entre  $-0.08$  m/s (mínimo) y  $0.02$  m/s como máximo acercándose más a los valores medidos. La componente  $U$  en el ADV2 tiene un rango cercano a  $0.0$  m/s de igual manera se tiene buenos índices de rendimiento con  $s=20$ , sin embargo se alejan dentro del rango en el que se encuentra  $U$ . Por lo que con  $s=5$  se tiene un máximo de  $0.2$  m/s y un mínimo de  $-0.05$  m/s acercándose más al valor máximo y mínimo de  $U$  de las mediciones de campo. Sin embargo, es importante remarcar la fuerte dependencia de  $U$  a la elevación del sensor ( $z=-2h/3$ ) debido a la estructura vertical de los flujos transversales en la zona de rompientes que no es reproducida por el modelo numérico. Por lo tanto, en este trabajo la calibración del modelo se limita a la componente  $V$  de la corriente.

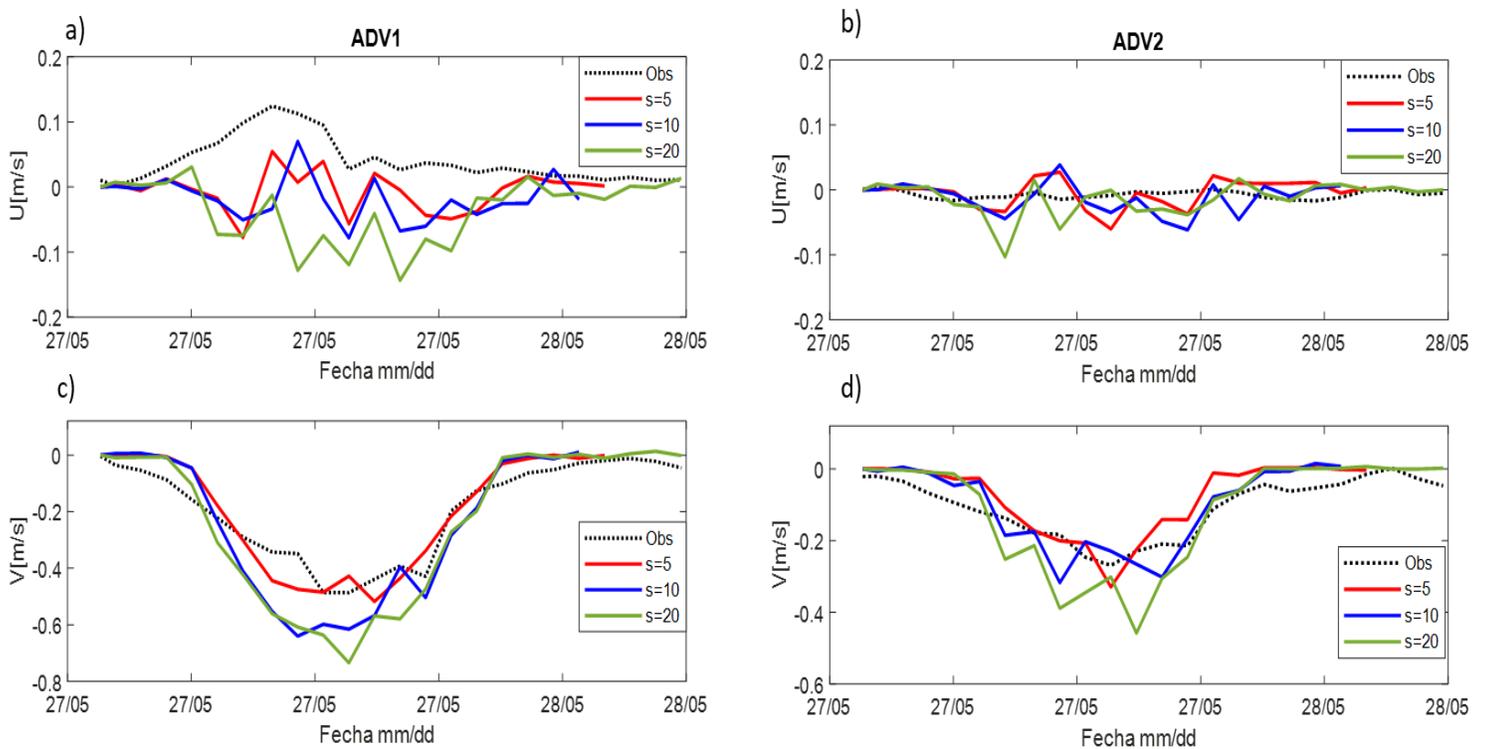


Figura 18. Calibración de la hidrodinámica en la zona de rompientes (modelo: línea punteada; mediciones: líneas sólidas) para las mediciones de campo de las velocidades a)  $U$  – velocidad transversal y c)  $V$  – velocidad longitudinal con ADV1 y b)  $U$  – velocidad transversal y d)  $V$  – velocidad longitudinal con ADV2, respectivamente para diferentes valores del coeficiente de dispersión direccional  $s$  ( $s=5$ -línea roja,  $s=10$ -línea azul,  $s=20$ -línea verde).

Tabla 6. Índices de rendimiento para las velocidades  $U$  y  $V$  con diferentes valores de  $s$ .

<b>ADV1</b>		Pearson	R <sup>2</sup>	RMSE	<b>ADV2</b>	Pearson	R <sup>2</sup>	RMSE
<b>s=5</b>	$U$	0.17	0.029	0.06	$U$	0.05	0.002	0.022
	$V$	0.95	0.91	0.06	$V$	0.93	0.87	0.05
<b>s=10</b>	$U$	0.11	0.012	0.07	$U$	0.14	0.02	0.02
	$V$	0.95	0.91	0.11	$V$	0.90	0.81	0.05
<b>s=20</b>	$U$	0.35	0.16	0.10	$U$	0.53	0.29	0.23
	$V$	0.97	0.94	0.11	$V$	0.7	0.006	0.18

### 5.1.2. Sensibilidad del parámetro *single\_dir*

El parámetro *single\_dir* influyó en la comparación del comportamiento de la hidrodinámica en el modelo con los datos obtenidos de los ADVs colocados dentro de la zona de rompiente. Teniendo una mejor aproximación sin *single\_dir* (ver figura 19) para la velocidad longitudinal ( $V$ ) en los dos ADVs. Alcanzó valores de 97.85, 0.95 y 0.03 para Pearson, R<sup>2</sup> y RMSE en el ADV1 (figura 19 c- línea roja), respectivamente y para el ADV2 valores de 93.7, 0.87 y 0.04 para Pearson, R<sup>2</sup> y RMSE, aumentando los picos de la altura de la ola. La  $H_s$  se sobreestimó con y sin *single\_dir* como se puede observar en la figura 19 c, teniendo unos picos más pronunciados con *single\_dir*. Para la velocidad  $U$  en el ADV1 se obtuvieron buenas aproximaciones con *single\_dir*, mientras que para el ADV2 con este mismo parámetro se estimaron bajas aproximaciones. Siendo que las velocidades  $U$  de las mediciones oscilan en un rango de 0.0 m/s, pueden llegar a ser despreciables, y debido a las diferencias que mostraron los índices de rendimiento para *single\_dir*, solo se va a considerar  $H_s$  y la velocidad  $V$  para determinar el uso de *single\_dir*. Por lo tanto, para las siguientes simulaciones se optó por no utilizar este parámetro, considerando que para  $H_s$  y para la velocidad  $V$  se obtuvieron buenos índices de rendimiento. Sin embargo, la altura de ola significativa es sobreestimada en el ADV2.

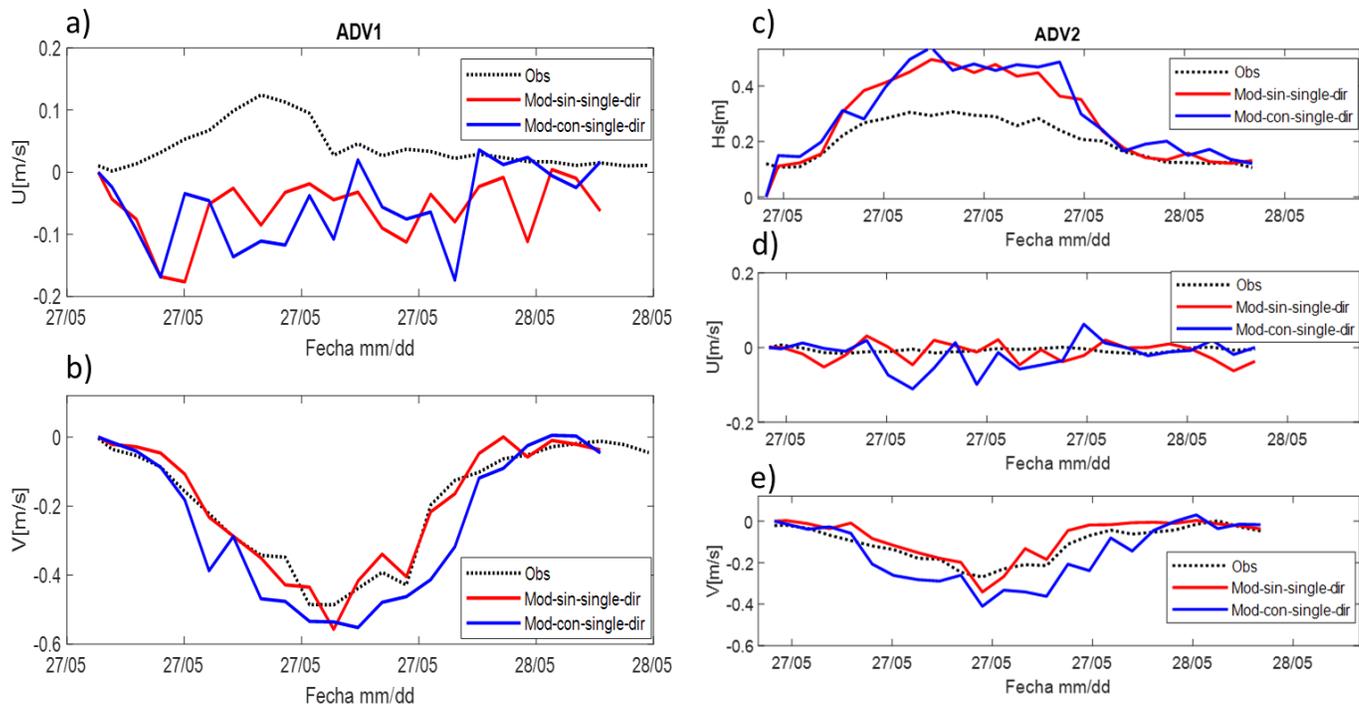


Figura 19. Representa la validación de la hidrodinámica de las variables de las velocidades  $U$  y  $V$  de los ADVs y  $H_s$  en conjunto con los datos del modelo para el parámetro *single\_dir*. Línea punteada datos observados, línea roja datos del modelo sin *single\_dir* y línea azul con *single\_dir*.

Tabla 7. Índices de rendimiento para las velocidades  $U$  y  $V$  con y sin el parámetro *single\_dir*.

ADV1		Pearson	R <sup>2</sup>	RMSE	ADV2		Pearson	R <sup>2</sup>	RMSE
<i>Sin single_dir</i>	$U$	0.05	0.003	0.11	<i>Sin single_dir</i>	$H_s$	0.97	0.94	0.11
	$V$	0.97	0.95	0.03		$U$	0.20	0.04	0.027
<i>Con single_dir</i>	$U$	0.37	0.13	0.12	<i>Con single_dir</i>	$V$	0.93	0.87	0.04
	$V$	0.95	0.90	0.08		$H_s$	0.92	0.85	0.12
					$U$	0.09	0.0089	0.04	
					$V$	0.92	0.85	0.08	

Continuando con los resultados anteriores de la calibración del modelo a continuación se muestran los resultados para los dos modos hidrodinámicos (*surfbeat* y estacionario) usados en esta investigación.

### 5.1.3. Validación hidrodinámica modo *surfbeat*

El modo *surfbeat* tiene en cuenta las ondas infragravitatorias (IG) y principalmente se usa para condiciones de oleaje extremo (Roelvink et al., 2009). En la figura 20 se muestran los resultados de la validación de hidrodinámica sin considerar el efecto de la marea (figura 20-línea roja). La comparación de la  $H_s$  (altura de ola significativa),  $U$  (velocidad transversal) y  $V$  (velocidad longitudinal) con las mediciones de campo (figura 20-línea punteada) obtenidos a partir de los ADVs instalados en la zona de rompientes.

La altura significativa ( $H_s$ ) del modelo con y sin marea tienen el mismo comportamiento para el vector ADV2 (figura 20c), aunque resulta en un mayor índice de rendimiento con marea con Pearson de 0.97,  $R^2$  de 0.94 y RMSE de 0.10 (Tabla 8). Se tiene una diferencia de 0.2 m para ambos casos, por lo que no se ve afectada cuando se incluye la marea. Aunque se usaron diferentes valores para distintos parámetros (*facua*, *dryslp*, *wetslp*) no se vio afectado su comportamiento.

Las corrientes longitudinales ( $V$ ) obtenidas con el modelo sin marea y con marea tienen una buena comparación con las mediciones el ADV1 (figura 20 b), teniendo una magnitud y dirección similar. Con los mismos valores de Pearson de 0.97 y error cuadrático  $R^2$  de 0.95 y con una poca diferencia en RMSE de 0.01 (tabla 8). Sin embargo, para el ADV2 (figura 20-e) se tiene una mejor predicción sin marea con un Pearson de 0.92, 0.85 de  $R^2$  y 0.05 para RMSE (tabla 8). Sin embargo, se observa que está subestimando para ambas sin marea.

La corriente transversal ( $U$ ) del modelo oscila entre un máximo de -0.1 m/s y 0.0 m/s como mínimo con marea y sin marea para el ADV1, comparando estos valores con los medidos con un rango de 0.0 m/s (mínimo) y 0.1m/s (máximo), hay un cambio de dirección en el valor máximo del modelo. El modelo mostro un valor máximo con un valor negativo y las mediciones con un valor positivo, esto influyo en los índices de rendimiento obteniendo valores muy bajos (tabla 8). En el ADV2 los datos medidos oscilan en torno a los 0.0 m/s, mientras que los del modelo están entre -0.04 m/s y 0.04 m/s con marea y sin marea, esta pequeña variación se notó en tener índices de rendimiento tan bajos. Recordando que la medición de las velocidades transversales es altamente dependiente de la elevación en la columna de agua y que la elevación respecto al fondo a la que se colocó el sensor fue de 0.2 m, el modelo muestra una limitante en las velocidades transversales, ya que el modelo calcula las velocidades promediadas en profundidad. Como se mencionó anteriormente, la comparación del modelo con las mediciones de  $U$  no es directa por la variabilidad de  $U$  con la profundidad.

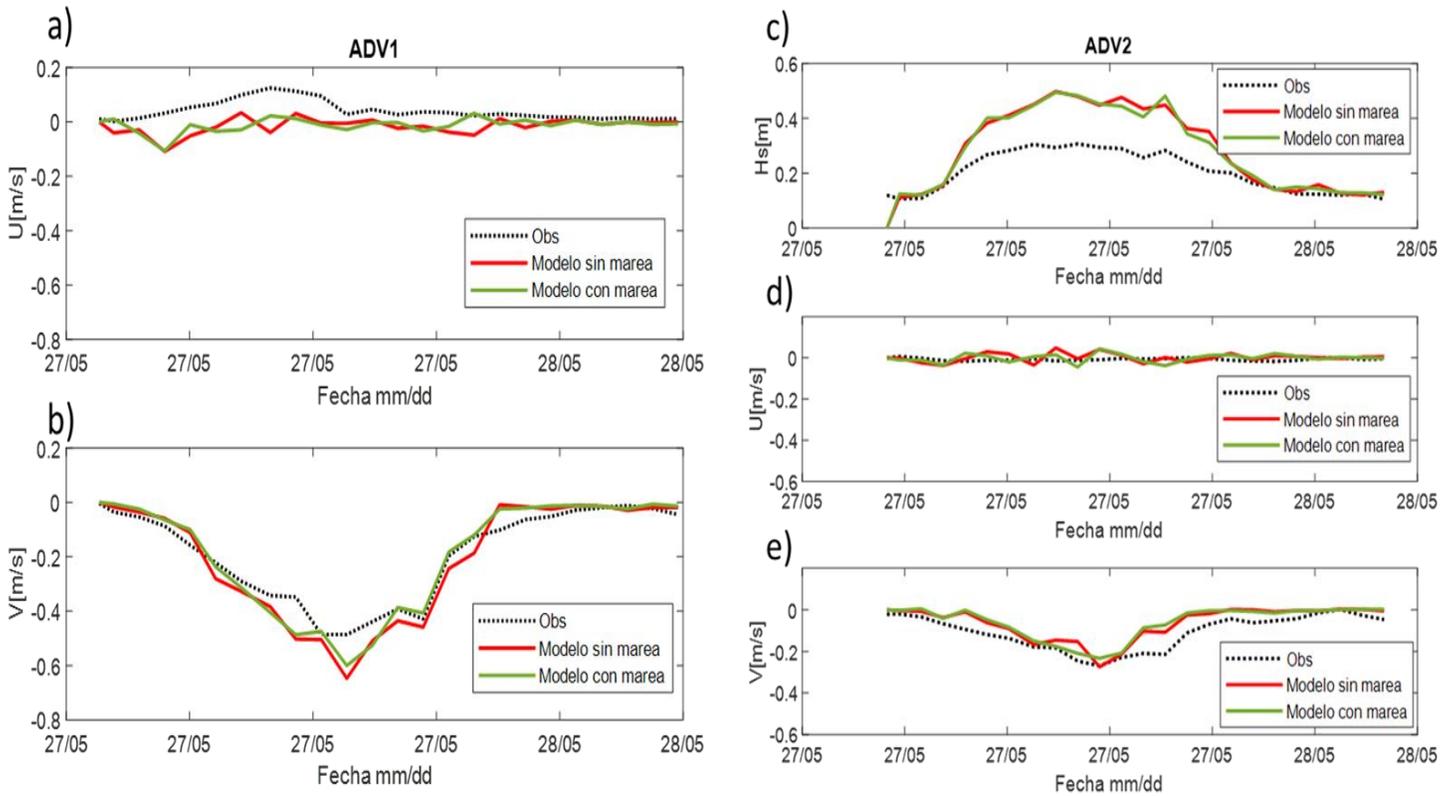


Figura 20. Validación hidrodinámica sin marea y con marea de los resultados obtenidos del modelo vs mediciones de campo con los ADV's de a) velocidad transversal  $U$ , b) velocidad longitudinal  $V$  con ADV1 y c)  $H_s$ , d) y e) velocidad transversal y longitudinal con ADV2, respectivamente con el modo *surfbeat*.

Tabla 8. Índices de rendimiento para las velocidades  $U$ ,  $V$  y  $H_s$  sin marea y con marea.

<b>ADV1</b>		Pearson	$R^2$	RMSE	<b>ADV2</b>		Pearson	$R^2$	RMSE
Sin marea	$U$	0.17	0.03	0.06	Sin marea	$H_s$	0.97	0.94	0.11
	$V$	0.97	0.95	0.06		$U$	0.28	0.08	0.002
Con marea	$U$	0.07	0.005	0.06	Con marea	$V$	0.92	0.85	0.05
	$V$	0.97	0.95	0.05		$H_s$	0.97	0.94	0.10
					$U$	0.18	0.03	0.02	
					$V$	0.90	0.82	0.05	

### 5.1.4. Validación hidrodinámica modo estacionario

Este modo es utilizado para condiciones de oleaje moderado y no toma en cuenta las ondas IG (Bart, 2009). Los resultados de las simulaciones empleando el modo estacionario se representan en la figura 21, comparando nuevamente con los datos medidos por los dos ADVs (línea punteada). Se muestran las variables  $H_s$  y las velocidades de corriente  $U$  y  $V$  obtenidas del modelo sin marea (línea roja) y con marea (línea verde). Para la altura  $H_s$  (figura 21 c) se muestra una sobreestimación con y sin marea, teniendo mejores valores con marea, con un Pearson de 0.92,  $R^2$  de 0.85 y un RMSE de 0.07 (tabla 9). La corriente longitudinal  $V$  tanto para el vector ADV1 como el ADV2 obtuvieron una buena estimación con marea. Esto se refleja en los índices de Pearson con 0.89,  $R^2$  de 0.80 y RMSE de 0.16 para el vector ADV1 y para ADV2 con valores de Pearson de 0.92,  $R^2$  de 0.86 y RMSE de 0.13. La velocidad  $U$  obtuvo una sobrestimación con y sin marea, con índices de rendimiento bajos de Pearson de 0.51 y 0.48, respectivamente para el vector ADV1. Mientras que para el vector ADV2 los índices de rendimiento reflejan una mala aproximación con y sin marea con valores para Pearson de 0.11 y 0.05, respectivamente. Considerando nuevamente la elevación del fondo a la que fueron colocados los ADVs y que el modelo promedia las velocidades en profundidad no se logró tener una buena estimación de la corriente transversal, teniendo una limitante en el modelo para la velocidad  $U$ .

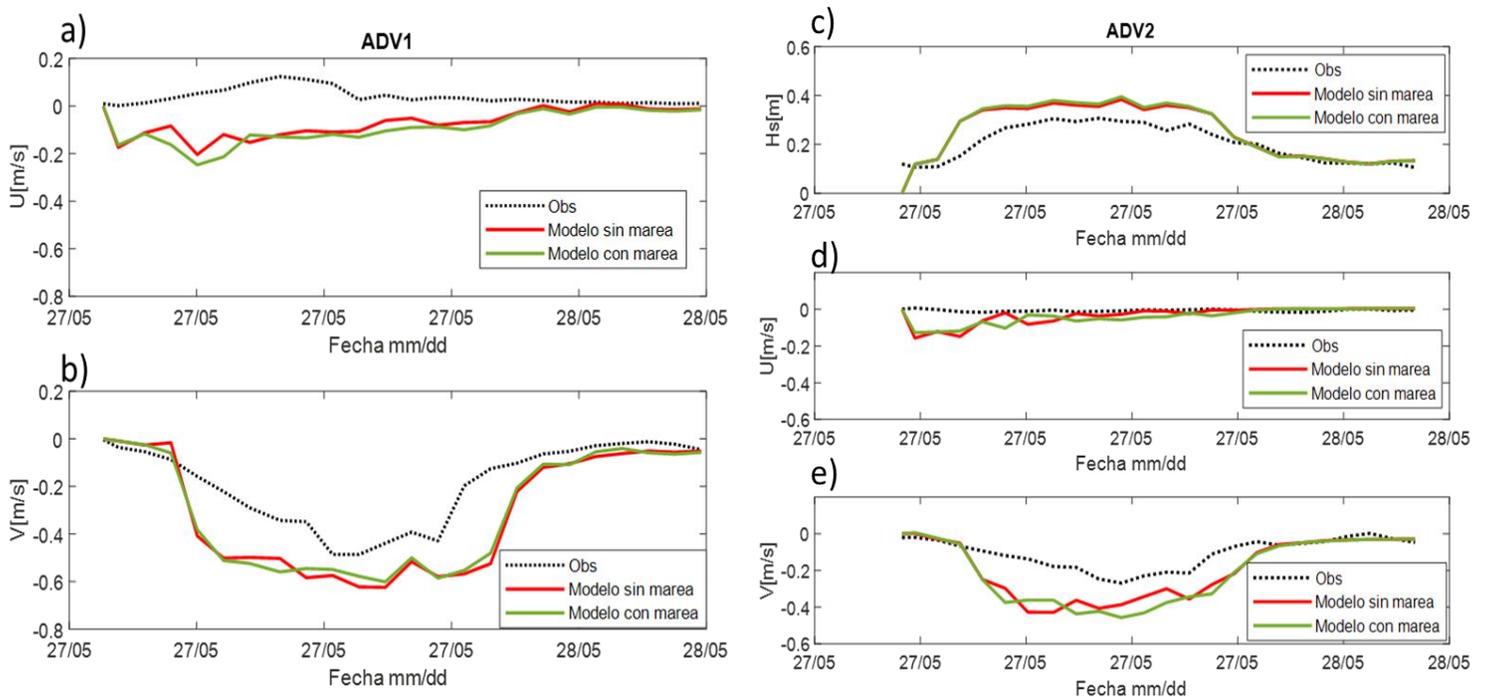


Figura 21. Validación hidrodinámica sin marea (línea roja) y con marea (línea verde) de los resultados obtenidos del modelo vs mediciones de campo (línea punteada) con los ADV's de a) velocidad transversal ( $U$ ), b) velocidad longitudinal ( $V$ ) con ADV1 y c)  $H_s$ , d) y e) velocidad transversal y longitudinal con ADV2, respectivamente.

Tabla 9. Índices de rendimiento para las velocidades  $U$ ,  $V$  y  $H_s$  sin marea y con marea.

ADV1		Pearson	R <sup>2</sup>	RMSE	ADV2		Pearson	R <sup>2</sup>	RMSE
Sin marea	$U$	0.51	0.26	0.13	Sin marea	$H_s$	0.91	0.84	0.06
	$V$	0.89	0.80	0.17		$U$	0.11	0.012	0.05
Con marea	$U$	0.48	0.23	0.15	Con marea	$V$	0.89	0.80	0.12
	$V$	0.89	0.80	0.16		$H_s$	0.92	0.85	0.07
						$U$	0.05	0.002	0.05
						$V$	0.92	0.86	0.13

La comparación de la variación temporal y espacial de las corrientes longitudinales obtenidas con el modelo XBeach (modos estacionario y *surfbeat*) con respecto a las mediciones fue satisfactoria. Sin embargo, la mejor aproximación se obtuvo con el modo *surfbeat* con marea, porque incluye los procesos en la zona *swash* y toma en cuenta las ondas IG y *sea-swell* (SS). Además se obtuvieron mejores estimaciones de los índices de rendimiento para las dos ADVs. A pesar de que los experimentos fueron realizados durante mareas muertas, la inclusión de la marea en el modelo numérico mejora ligeramente la predicción. Otro factor importante fue el coeficiente de dispersión direccional, el cual sí afectó las predicciones en la zona de rompientes. Por otro lado, el modo estacionario sólo toma en cuenta las ondas SS y podemos observar que es importante considerar las ondas IG para tener validaciones cercanas a la realidad.

Aunque algunos autores como Ruol et al. (2018,2020), Oliveira et al. (2020) y Garzon et al. (2022), sugieren el uso de *single\_dir*, en el presente caso de estudio su inclusión no ayudó a mejorar la validación hidrodinámica. Sin embargo, es importante considerar este factor para estudios por ejemplo de erosión de dunas o condiciones de oleaje (*swell*) donde son más importantes las ondas IG.

## 5.2. Validación morfodinámica

En esta sección se presentan los resultados de las modelaciones morfodinámicas en 2DH, empleando los modos *surfbeat* y estacionario, para los casos con la presencia de un espigón temporal y su evolución posterior al ser removido.

### 5.2.1. Evolución de la topo-batimetría con modo *surfbeat*

En la figura 22 se observa la evolución de la morfología de la playa a lo largo de 24 horas asociada a la presencia de un espigón impermeable durante condiciones de oleaje por brisas intensas. En la parte superior se muestra el cambio en la batimetría con las mediciones correspondientes al experimento de Medellín et al. (2018) y los paneles inferiores muestran los resultados de la modelación numérica, con el modo *surfbeat*, utilizando una batimetría idealizada. Las mediciones de campo muestran que la dirección del transporte de sedimento es de este a oeste y el espigón tiene un impacto significativo en la morfología de la playa en 24 horas.

A continuación se presentan los resultados de la simulación con una duración de 24 horas y para el caso sin marea. Las condiciones de forzamiento se refieren a espectros jonswap generados a partir de parámetros espectrales del oleaje determinados para cada hora con base en las series temporales propagadas desde los 10 m a 4 m de profundidad en el trabajo de López-Ramade et al. (2023). La evolución de la línea de costa, isóbata  $z = 0$  m difiere entre los datos de campo y el modelo numérico. Primero podemos observar cómo a partir de la hora seis empieza a dar un cambio en la línea de costa (figura 22 b-g), generando acreción corriente arriba y erosión corriente abajo, tanto en las mediciones como en el modelo, llegando a rodear el espigón. Para  $t = 12$  horas en la simulación (figura 22 h) se observa que hay una acumulación de arena al oeste del espigón asociada al bypass, provocando que hasta los 20 m con referencia al eje  $x$  se muestre una erosión corriente abajo. Para  $t = 18$  horas hay una mayor acumulación de arena y mayor bypass del lado oeste de la estructura en el modelo manteniéndose igual hasta las 24 horas (figura 22 i), sin lograr reproducir lo que se obtuvo con las mediciones. Comparando la figura 22 e y j, que corresponden al final de las 24 horas de los resultados de las mediciones y del modelo respectivamente, se observan diferencias importantes en el patrón de acreción y erosión en zonas aledañas a la estructura. Esto sugiere que es importante la inclusión del cambio del nivel del mar durante el período de simulación.

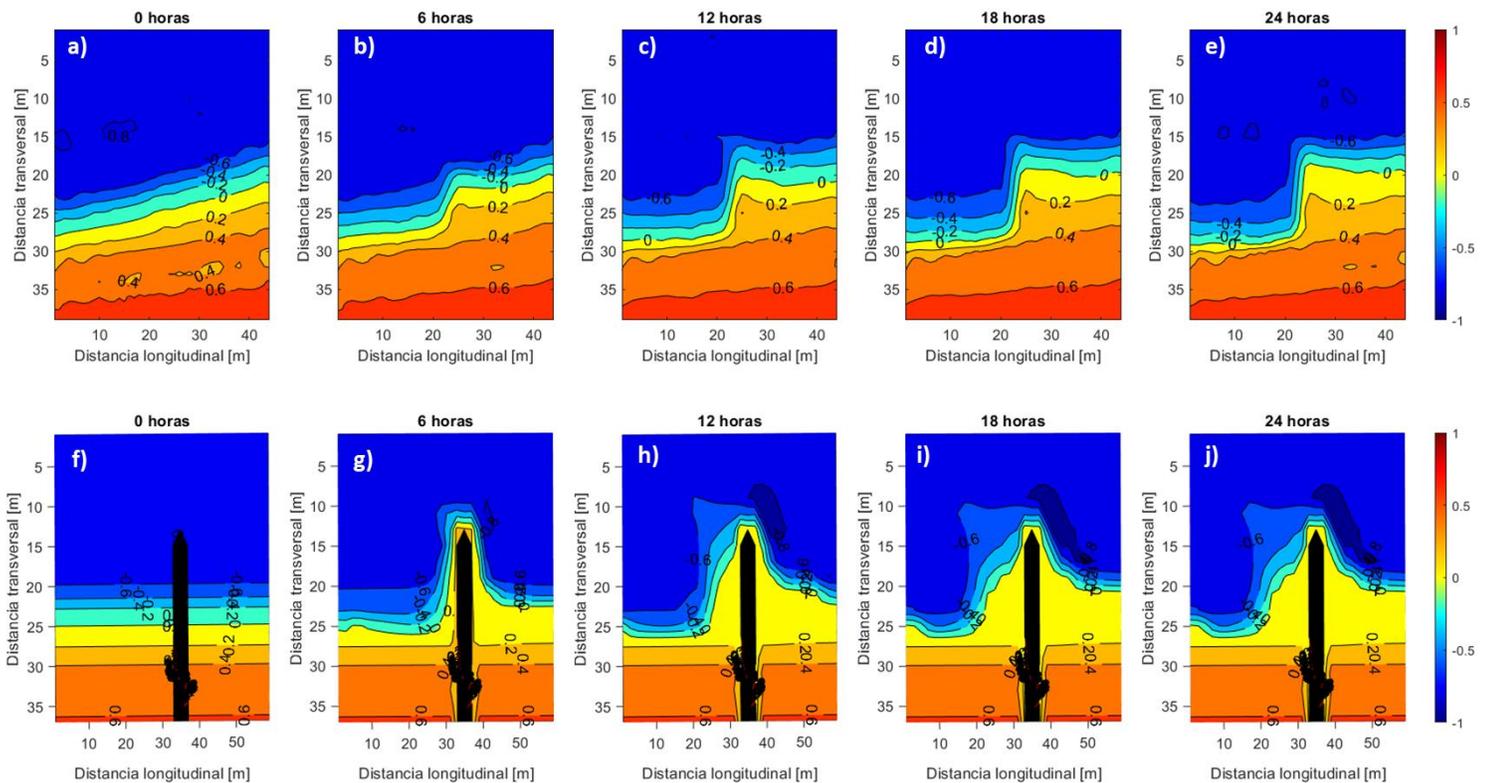


Figura 22. Evolución de los cambios en la topo-batimetría a través de la colocación de un espigón utilizando modo *surfbeat* sin incluir las variaciones del nivel por marea y con condiciones de oleaje variables. La escala longitudinal y transversal se encuentran aproximadamente entre 0 a 45 m y 0 a 38 m, respectivamente.

La figura 23 nos muestra la evolución de la morfología de la playa a lo largo de 24 hora para el caso con marea. Los paneles superiores muestran las mediciones y en la parte inferior los resultados del modelo XBeach-*surfbeat*. Se observa que para  $t = 6$  horas ya existe un avance en la posición de las isóbatas  $z=0.2$  m hasta  $-0.6$  m producto de la acreción corriente arriba, así como erosión corriente abajo (figura 23 f) como en las obtenidas por las mediciones (figura 23 b). En  $t = 12$  horas la isóbata en  $z = 0.2$  m con el modelo (figura 23 h) muestra similitud con las mediciones corriente arriba (figura 23 c), pero corriente abajo empieza a haber diferencias con respecto a las mediciones. Específicamente, las isóbatas  $z = 0$  hasta la isóbata  $z = -0.6$  m presentan un retroceso en la parte oeste pero con acumulación de arena cercana a la estructura. Para la  $t = 18$  horas, se mantienen la posición de las isóbatas de  $z = 0.2$  m hasta  $z = -0.6$  m al oeste (izquierda) de la estructura, con un ligero incremento del volumen de arena del lado este (derecha) del espigón (figura 23 i), manteniéndose así para la hora 24 (figura 23 j) debido a la disminución de la energía del oleaje. Los resultados del modelo XBeach-*surfbeat* muestran la relevancia de incluir la variación del nivel del mar asociado a la marea presentando una mejor simulación morfológica en la zona de *swash* para el caso con marea.

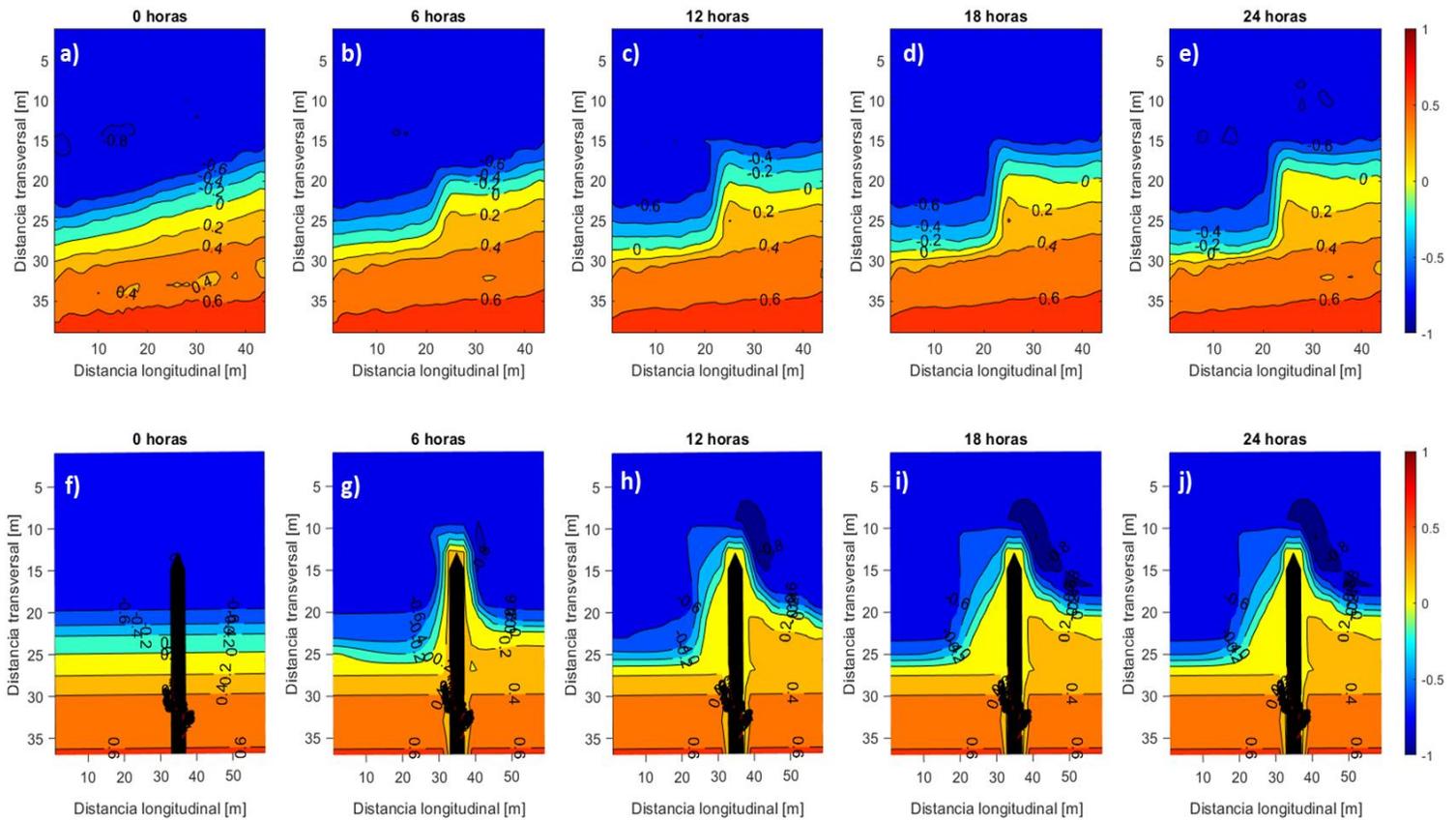


Figura 23. Evolución de los cambios en la batimetría a través de la colocación de un espigón utilizando modo *surfbeat* con variaciones de la marea y el oleaje. La escala longitudinal y transversal se encuentran aproximadamente entre 0 a 45 m y 0 a 38 m, respectivamente.

A partir de los resultados numéricos y las mediciones de campo es posible estimar los cambios en la morfología de la playa con la diferencia entre levantamientos. La figura 24 muestra los patrones de erosión corriente abajo y acreción corriente arriba. Los resultados del modelo sobreestiman la acreción corriente arriba, mientras que subestima la erosión corriente abajo durante las 24 horas. A partir de las primeras 6 horas de modelación (figura 24 e) se observa una acreción del lado oeste de la estructura provocando una menor área de erosión corriente abajo al finalizar las 24 horas (figura 24 d). Los valores de acumulación máximo y mínimo en ambos lados del espigón para el modelo en la hora 24 son de  $1 \text{ m}^3$  (sedimentación) y  $-0.5 \text{ m}^3$  (erosión). A diferencia de los valores encontrados en los datos medidos, arrojaron valores de  $-0.5 \text{ m}^3$  (erosión) y  $0.8 \text{ m}^3$  (sedimentación). La diferencia entre los valores de acumulación de la erosión y sedimentación puede ser por las dimensiones de la resolución de la malla, ya que para el modelo es de  $2 \times 2 \text{ m}$  y para los datos observados es de  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . Por lo que puede influir en tener áreas diferentes para la sedimentación y erosión en los datos del modelo y de campo.

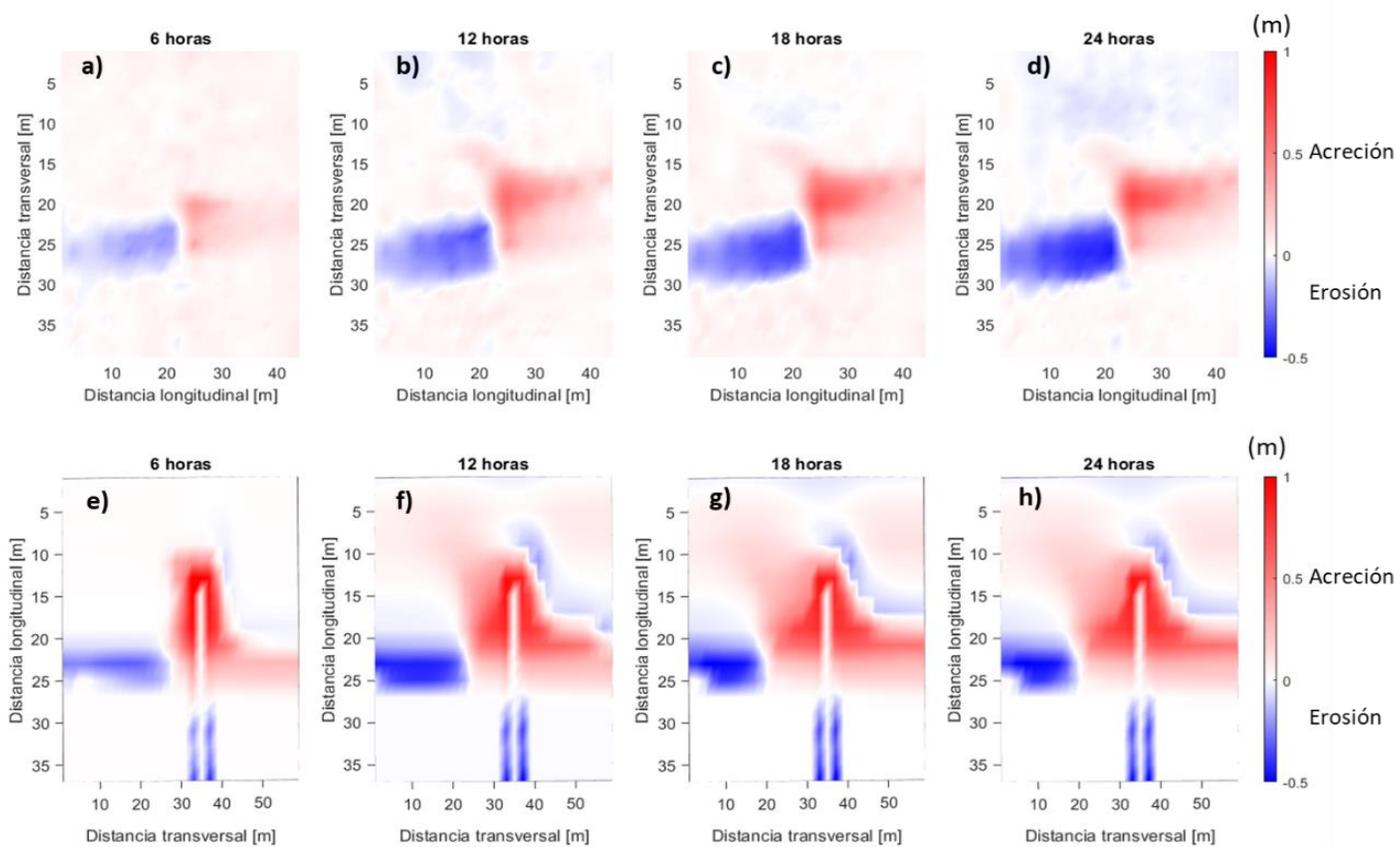


Figura 24. Comparación cualitativa de los patrones de erosión y acreción durante las primeras 24 horas de simulación con el modo *surfbeat*. Las barras de colores en azul indican erosión y en rojo acreción.

Finalmente, en la figura 25a se muestran los cambios de volumen de sedimento tanto en la zona de acreción corriente arriba como la zona de erosión corriente abajo. El volumen máximo total neto de acreción durante las mediciones fue de  $60 \text{ m}^3$ , mientras que el modelo registró un valor de  $42 \text{ m}^3$ . Para la erosión se obtiene una diferencia de un orden de magnitud ( $4 \text{ m}^3$  modelo vs  $40 \text{ m}^3$  mediciones). Por lo tanto, el modelo no logró reproducir la erosión corriente abajo de manera satisfactoria. Esta limitación también fue reportada en el estudio de López-Ramade et al. (2023) en el que utilizaron el modelo Delft-3D.

En la figura 25b podemos apreciar el desplazamiento de la isóbata  $z = -0.3 \text{ m}$  a lo largo de las 24 horas. En las primeras 12 horas hay una subestimación respecto a la acreción corriente arriba. Se nota un mejor ajuste en la hora 14 hasta finalizar las 24 horas, teniendo un desplazamiento de 5 m aproximadamente. En el desplazamiento de la erosión corriente abajo en las primeras 6 horas se nota una subestimación, después se mantiene constante desplazándose 2 m en la hora 24.

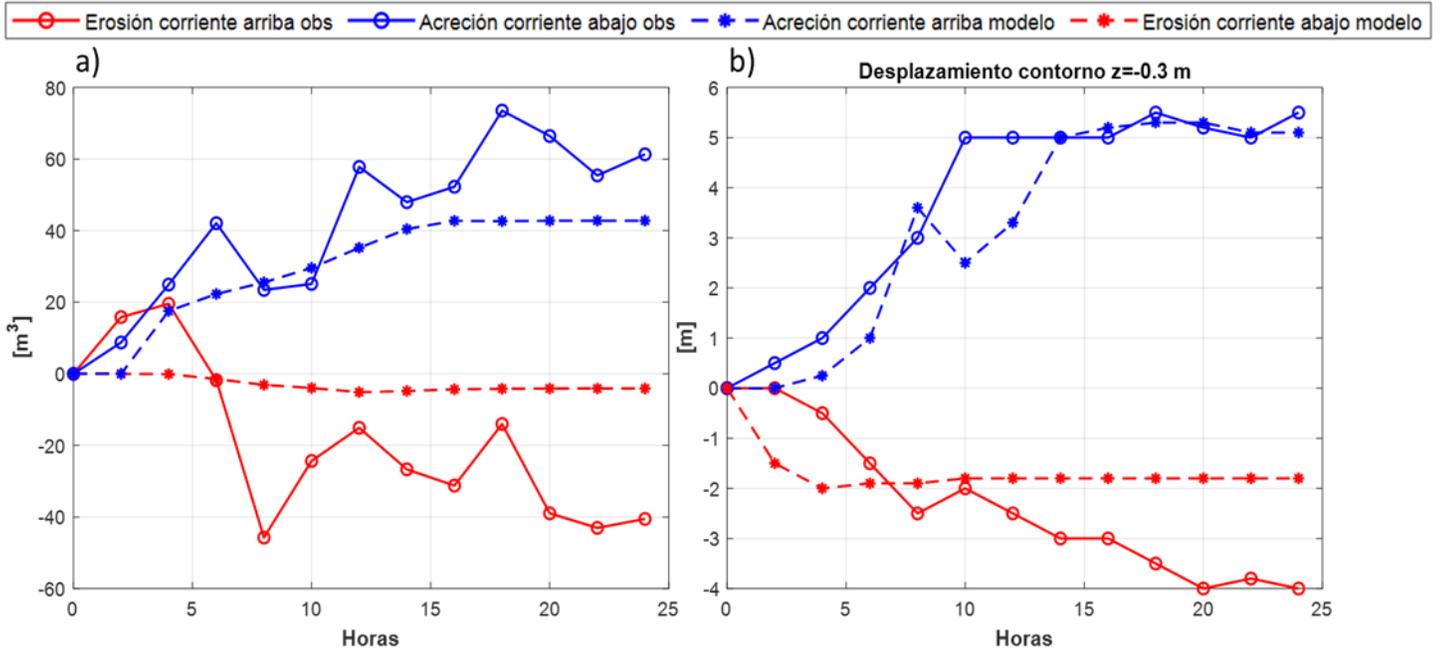


Figura 25. Cambios de a) volumen de sedimento y b) desplazamiento del contorno  $z = -0.3\text{m}$  de las mediciones y del modelo durante las 24 horas al colocar el espigón temporal.

## 5.2.2. Evolución de la topo-batimetría al remover el espigón

El modelo numérico fue utilizado para simular la recuperación de la playa posterior a la remoción de la estructura. Se utilizaron los mismos parámetros seleccionados para la simulación con la presencia del espigón temporal. Para la condición inicial del modelo, se consideró la batimetría medida justo antes de remover el espigón temporal (figura 26 f). En la figura 26 se muestra la recuperación de la playa después de quitar el espigón temporal durante las siguientes 24 horas, donde los paneles superiores corresponden a las observaciones en campo y los inferiores al modelo. A partir de  $t=3$  horas se nota un cambio desde la isóbata  $z = 0.2$  m hasta  $z = -0.6$  m tanto en las simulaciones del modelo como en las observaciones (figura 26 b y g). En  $t=9$  horas el desplazamiento de la isóbata  $z = 0$  m es más notoria en la modelación (figura 26 i) llegando a su forma inicial con una acreción y erosión menor. En cambio en los observados (figura 26d) no llega a su estado inicial después de una semana (figura 26 e), el cual se mantiene igual en los datos modelados (figura 26 j). Al finalizar las 24 horas los cambios batimétricos tanto del modelo como en los observados se nota la presencia de un pequeño escalón en la isóbata  $z = 0.2$  m (figura 26 e y j).

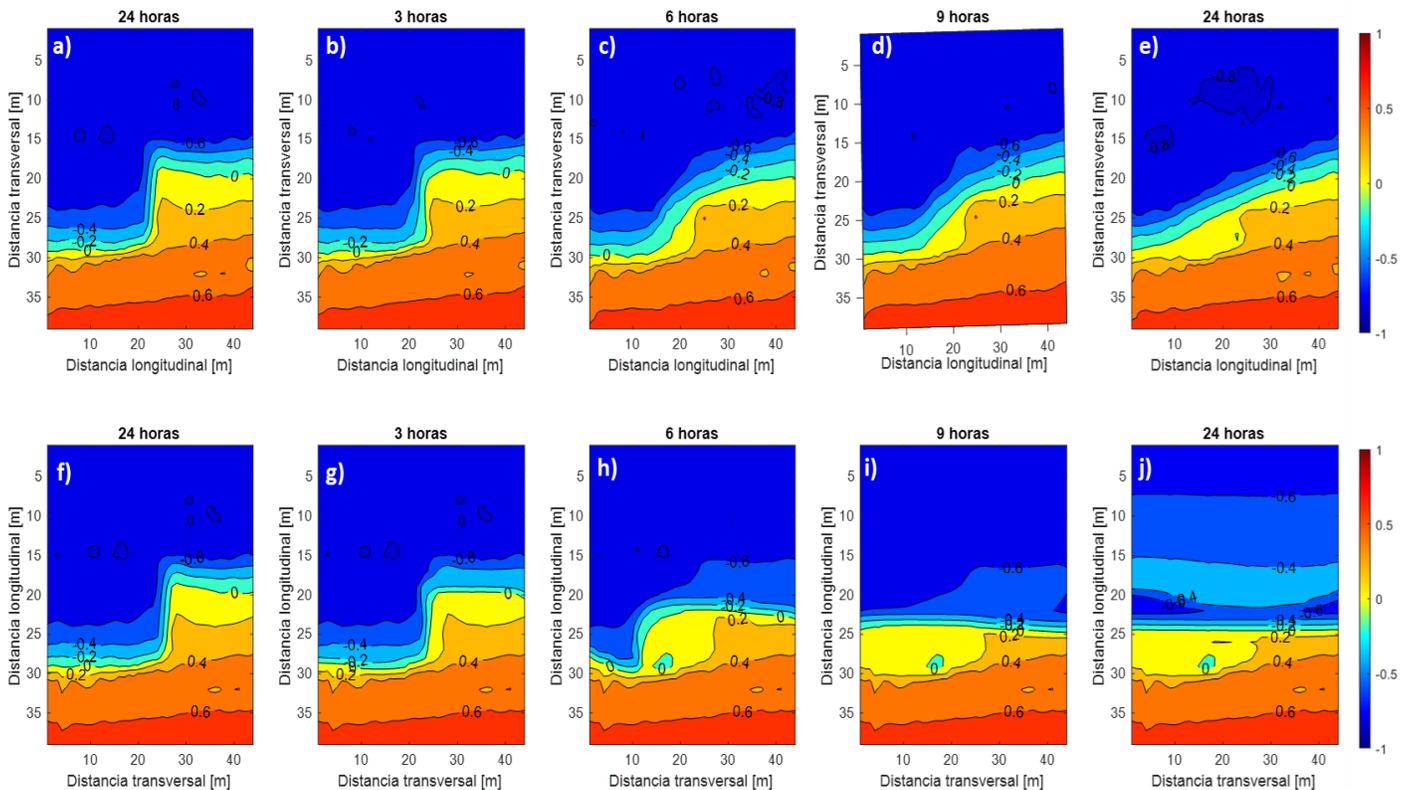


Figura 26. Cambios batimétricos después de la remoción del espigón temporal durante las siguientes 24 horas considerando las variaciones del nivel debido a las mareas y el oleaje.

### 5.2.3. Evolución de la topo-batimetría con modo estacionario

La figura 27 muestra los cambios en la batimetría en la presencia del espigón empleando el modo estacionario sin marea. Los paneles superiores representan los resultados con los datos de campo y los paneles inferiores muestran los resultados de la modelación. Se observa que las isóbatas de 0, -0.2, -0.4 y -0.6 m muestran un cambio con el modelo desde  $t = 6$  horas. Sin embargo, a partir de  $t = 12$  horas la isóbata en  $z = 0$  m se mueve muy poco (figura 27 h) en la modelación. Para las isóbatas en  $z = -0.2, -0.4$  y  $-0.6$  m que rodean el espigón se muestra que hay una acreción corriente arriba y una erosión corriente abajo. Llegando a  $t = 18$  horas (figura 27 d-i) y  $t = 24$  horas (figura 27 e-j) sigue sin moverse la línea de costa, sin embargo hay una acreción corriente arriba y erosión corriente abajo, mostrando que el transporte del sedimento es de este a oeste. Los resultados obtenidos con la marea son similares y no presentan una mejoría con respecto a este caso (figura 28).

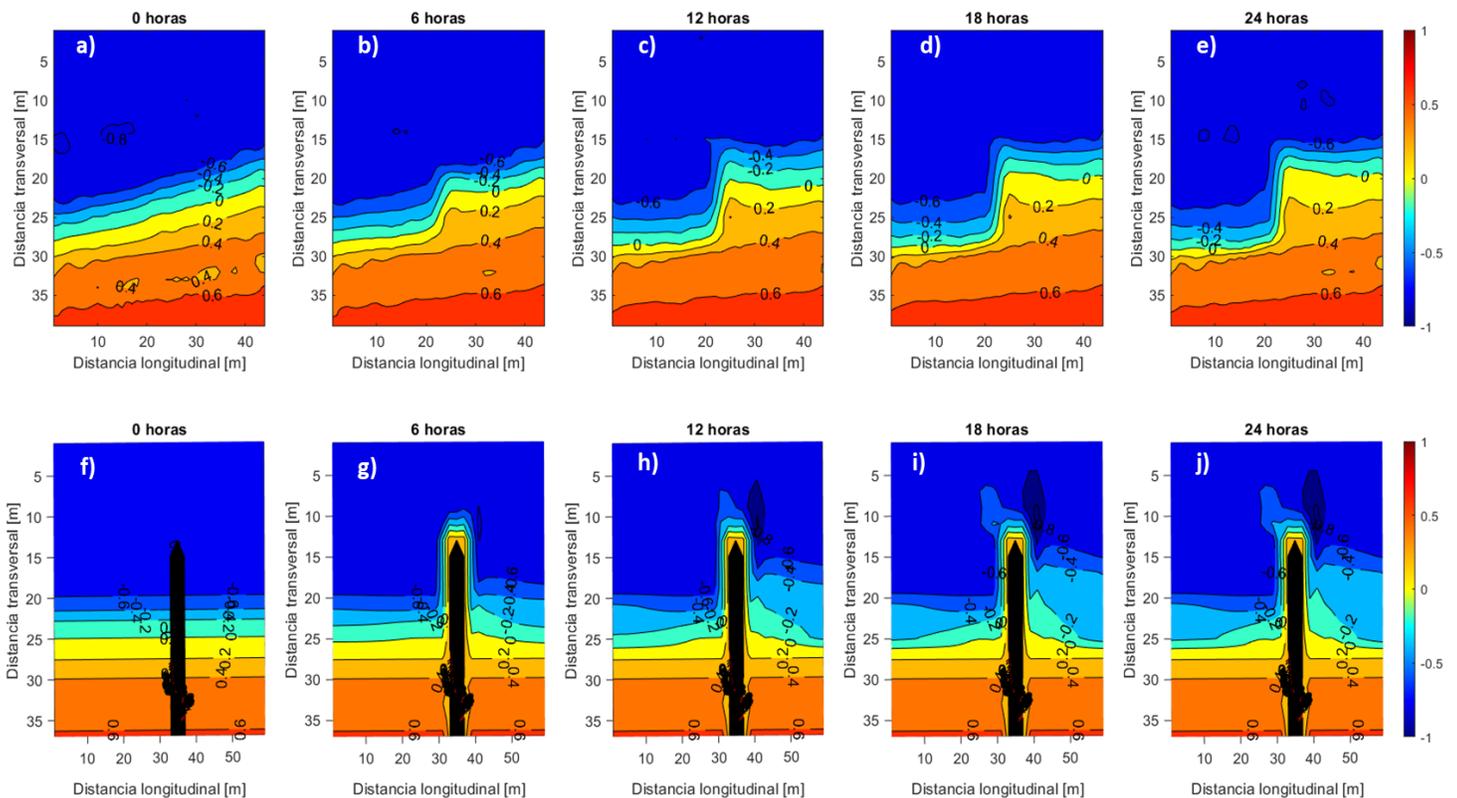


Figura 27. Evolución de los cambios en la topo-batimetría a través de la colocación de un espigón utilizando modo estacionario, sin marea, y variando las condiciones del oleaje. La escala longitudinal y transversal se encuentran aproximadamente entre 0 a 45 m y 0 a 38 m, respectivamente.

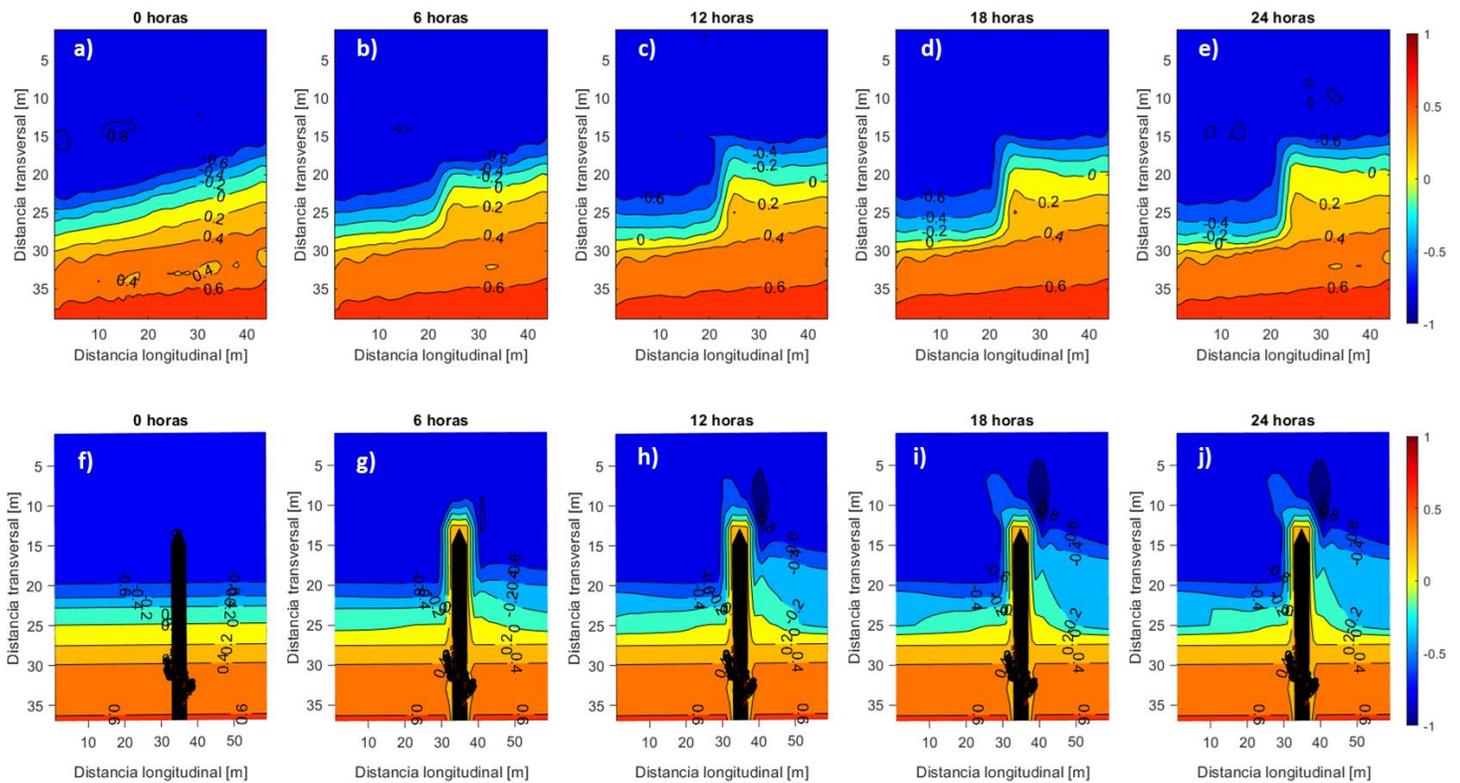


Figura 28. Evolución de los cambios en la batimetría a través de la colocación de un espigón utilizando modo estacionario con marea, y variando las condiciones del oleaje. La escala longitudinal y transversal se encuentran aproximadamente entre 0 a 45 m y 0 a 38 m, respectivamente.

La figura 29 muestra los patrones de erosión corriente abajo y acreción corriente arriba. Los resultados del modelo subestiman la acreción corriente abajo y la erosión corriente abajo a lo largo de las 24 horas de simulación. En  $t = 6$  horas de la simulación (figura 29 e) se observa áreas pequeñas para la sedimentación y erosión. Al finalizar las 24 horas de simulación del modelo (figura 29 d) se observa para la acreción corriente arriba un área menor que la obtenido en los datos medidos. Mientras que los patrones de erosión corriente abajo no represento cambios significativos desde la  $t = 12$  horas (figura 29 f) hasta  $t = 24$  horas (figura 29 h), generando un área casi nula comparada con el área de los datos observados (figura 29 d). Lo que pudo influir en tener diferencias en los patrones de sedimentación y erosión antes mencionadas, es que la resolución de la malla de los datos del modelo es de  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , mientras que la resolución de los datos medidos es de  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ .

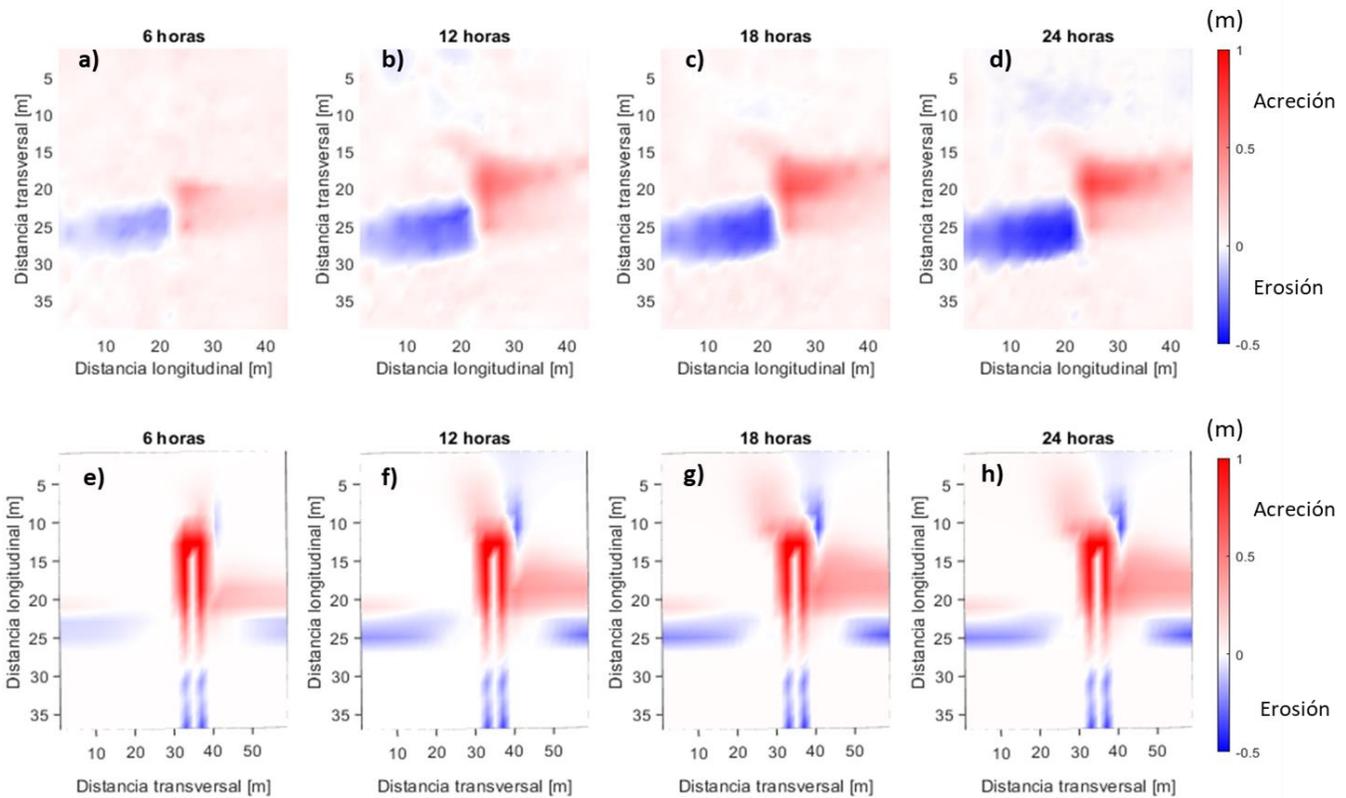


Figura 29. Comparación cualitativa de los patrones de erosión y acreción durante las primeras 24 horas de simulación con el modo estacionario. Las barras de colores en azul indican erosión y en rojo acreción.

Los cambios de volumen de sedimento de la acreción corriente arriba y erosión corriente abajo se muestran en la figura 30 a. El modelo registra un volumen máximo total neto de acreción de  $25 \text{ m}^3$ , mientras que las mediciones fueron de  $60 \text{ m}^3$ . El modelo no fue capaz de presentar grandes cambios en el volumen de erosión corriente abajo con un volumen de  $1 \text{ m}^3$ , en comparación con mediciones que indicaron un volumen de  $40 \text{ m}^3$ .

El desplazamiento de la isóbata  $z = 0.3 \text{ m}$  a lo largo de las 24 horas se muestra en la figura 30 b. En  $t = 8$  horas se nota una buena estimación para la acreción corriente abajo. Sin embargo, para  $t = 10$  horas se observa una subestimación hasta  $t = 24$  hora, llegando a tener un desplazamiento final de  $3 \text{ m}$ , a diferencia de los  $5 \text{ m}$  en las mediciones. El desplazamiento para la erosión corriente abajo no muestra ningún cambio, por lo que el modo estacionario no es capaz de reproducir la erosión corriente abajo.

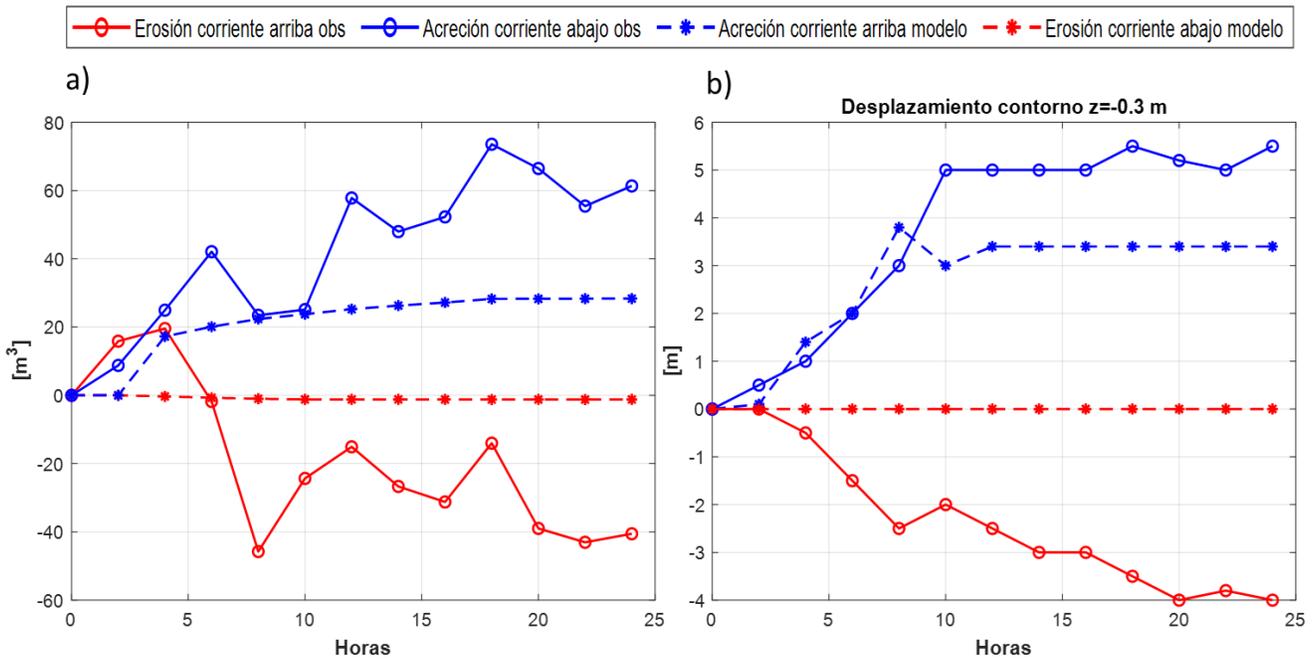


Figura 30. a) Cambios de volumen de sedimento, b) desplazamiento del contorno z=-0.3m de las mediciones y del modelo durante las 24 horas al colocar el espigón temporal.

## Capítulo 6

### Discusión

El modo *surfbeat* con marea reprodujo de manera satisfactoria las observaciones de la morfodinámica de la zona de *swash* en la zona de acreción (corriente arriba) con relación al modo estacionario. El modo estacionario no fue capaz de modelar de manera satisfactoria los patrones de acreción y erosión en las zonas aledañas al espigón temporal. Algunas de las razones generales son; (i) la ecuación de balance de acción de onda y de energía de los rodillos no se integran en el tiempo, sino que se iteran hasta que se encuentra un equilibrio en el dominio del modelo. (ii) La onda es uniforme y la distribución de la energía de las olas es constante a lo largo del tiempo. (iii) No se incluyen los movimientos de la zona de *swash* por lo que no logró representar cambios morfológicos significativos en este estudio.

Otra diferencia son los modelos de rotura del oleaje entre los dos modos (estacionario y *surfbeat*). En el cálculo del modo estacionario, la disipación de energía de las olas se calcula con la fórmula de Baldock, mientras que para el modo *surfbeat* se emplea la ecuación de Roelvink. Se tiene un coeficiente de rotura de  $\gamma = 0.55$ , este valor es común para las olas irregulares. Su tiempo de simulación es mayor que el estacionario, esto es porque la energía de onda corta incidente se genera para cada sector direccional, en cada punto de la cuadrícula *offshore* y en cada paso de tiempo. Por lo que estos procesos consumen más tiempo de simulación.

Para la calibración morfodinámica debido se utilizó un  $facua=1$ , el valor más alto, lo que provocó que el transporte de sedimentos aumentara en dirección *onshore* debido a la no linealidad de las olas, generando una reducción en la erosión corriente abajo. Lo anterior se debe a que la variable velocidad de flujo neto ( $v_w$ ) de la ecuación [2.23] puede calcularse en función de  $Sk$ ,  $As$ ,  $U_{rms}$  y un factor de calibración  $\gamma_a$  (definido en XBeach como *facua*). Este valor (*facua*) se utiliza tanto en la ecuación de advección- difusión (ecuación 2.21) y en las ecuaciones de transporte de sedimento (ecuaciones 2.27 y 2.28). Reemplazando las velocidades eulerianas  $u^E$  y  $v^E$  por  $(u^E + u_a \sin \theta_m)$  y  $(v^E + u_a \cos \theta_m)$ , respectivamente, donde  $\theta_m$  es el ángulo de incidencia de las olas con respecto a la dirección transversal.

También se llegó a experimentar con los parámetros *facAs* y *facSk*. El parámetro *facSk* es el que más influye en la forma del perfil en la zona de asomeramiento y rompiente, al incrementar su valor aumenta la *skewness* del oleaje lo que conduce a tener principalmente flujos de sedimento *offshore*. Por otro lado, *facAs* cambia el perfil transversal en la zona surf y *swash* (Gruwez et. al, 2014). Aunque se realizaron combinaciones entre ambos parámetros, no mejoraron la morfodinámica, optando por dejar los valores máximos equivalentes a uno.

Al comparar los resultados obtenidos con el trabajo de López-Ramade et al. (2023), donde emplean el modelo Delft 3D, en este trabajo se obtuvo una mejor predicción de la hidrodinámica (velocidad longitudinal) y la variación del oleaje utilizando el modo XBeach-*surfbeat*. Con relación a la validación morfodinámica, en este estudio se logró representar ligeramente la erosión corriente abajo, pero no se pudo representar de forma completa la acreción corriente arriba. Este problema

también ocurrió con el trabajo López-Ramade et al. (2023). En este mismo estudio la recuperación de la playa se consiguió representar de mejor manera los cambios de la playa respecto a los patrones de las mediciones. La mayor ventaja de este trabajo radica en la capacidad del modelo *surfbeat* de reproducir los cambios en la morfología de la playa emergida ( $z > 0\text{m}$ ), lo cual no se puede realizar con el modelo Delft 3D.

Así mismo el modelo XBeach modo *surfbeat* calibrado pudo predecir los patrones generales de transporte de sedimentos, identificando que uno de los parámetros importantes es *facua* (como se mencionó anteriormente), el cual permitió observar los esquemas de erosión corriente abajo y acreción corriente arriba, aunque la erosión corriente abajo se subestimó, lo que no permitió tener una buena predicción con las mediciones de campo. Se observó que para los eventos de brisa marina a corto plazo el comportamiento de las isóbatas al este del obstáculo indica una acumulación de sedimentos, mientras que en la dirección oeste las isóbatas muestran erosión, produciendo cambios significativos en la isóbata  $z = -0.6\text{ m}$  y en la línea de costa  $z = 0\text{ m}$ . Esto corroboró que las corrientes longitudinales que inducen el transporte litoral se mueven hacia el oeste, lo que es consistente con las observaciones de campo. La dirección de los vectores de velocidad en la zona de estudio mostró estar relacionada con los procesos de erosión y sedimentación que se observaron alrededor del espigón.

Se recomienda trabajar con parámetros por default, recalando que se obtuvieron buenos resultados en este estudio para la mayoría de los parámetros. Aunque se obtuvieron mejores resultados con el modo *surfbeat*, debido a su capacidad para simular en la zona *swash* y toma en cuenta las ondas IG, el tiempo de simulación es mucho mayor, generando una limitación para usarlo. Por lo que también se recomienda trabajar con modo estacionario para detectar si el modelo está realizando correctamente la dirección del vector de velocidades, por ejemplo, y así ahorrar tiempo computacional. Sin embargo, una de sus limitaciones es que no generó transporte *offshore*, sin lograr mover sedimentos para obtener mejores patrones de erosión corriente abajo, aún calibrando la asimetría del oleaje.

## Capítulo 7

### Conclusiones

En este estudio se calibró y validó el modelo XBeach con mediciones de hidrodinámica y morfodinámica de playas ante la presencia de un espigón temporal durante condiciones de brisas marinas intensas. Los dos modos utilizados (*surfbeat* y estacionario) fueron capaces de reproducir la variación del oleaje y corrientes longitudinales dentro de la zona de rompientes durante un ciclo de brisas. La principal limitación del modelo es que promedia las velocidades en profundidad. Por lo tanto, no es posible realizar una validación rigurosa de la corriente transversal la cual es dependiente de la elevación donde se obtuvo la medición. El modo estacionario y *surfbeat* presentaron diferencias significativas para el caso del modelado de la morfodinámica de la playa en presencia de un espigón. El modo *surfbeat* reprodujo la acreción de la playa corriente arriba, incluyendo el incremento del volumen y el avance de la línea de costa. Asimismo, reprodujo la variación de la playa emergida y sumergida en esta zona. Sin embargo, el modelo subestimó de manera significativa la erosión corriente abajo de la estructura. Los resultados muestran que la inclusión de la marea es relevante para modelar la morfodinámica a pesar de que las mediciones se realizaron durante mareas muertas. Además, se logró con este mismo modo reproducir la recuperación de la playa posterior a la remoción del espigón obteniendo buenos resultados después de las 24 horas, logrando que la línea de costa regresara a un estado inicial. Por otro lado, el modo estacionario no fue capaz de reproducir la evolución de la morfodinámica de la playa y sólo presentó avance de las isóbatas sumergidas corriente arriba de la estructura. La comparación de los resultados de este trabajo con un trabajo previo (López-Ramade et al., 2023), en el que se utiliza el modelo estacionario Delft3D, sugiere que el modelo XBeach-*surfbeat* mejora de manera significativa la morfodinámica de la playa emergida. No obstante, no presentó mejoras importantes con respecto al modelo estacionario corriente abajo por lo que su estudio requiere mayor atención en trabajos futuros.

## Referencias

- Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore sediment transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1404–1417. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1>
- Barnard, P. L., Hoover, D., Hubbard, D. M., Snyder, A., Ludka, B. C., Allan, J., Kaminsky, G. M., Ruggiero, P., Gallien, T. W., Gabel, L., McCandless, D., Weiner, H. M., Cohn, N., Anderson, D. L., & Serafin, K. A. (2017). Extreme oceanographic forcing and coastal response due to the 2015-2016 El Niño. *Nature Communications*, 8, 6–13. <https://doi.org/10.1038/ncomms14365>
- Bart, L. (2009). *Long-term modelling with XBeach : combining stationary and surfbeat mode in an integrated approach*. Technical University of Delft.
- Berrio Arrieta, Y. M. (2018). Evaluación morfodinámica con esquemas de protección costera en las playas de Riohacha, la guajira. Tesis de maestría de la Universidad del Norte. <http://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/8206/133149.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bosboom, J., & Stive, M. J. F. (2021). Coastal dynamics. In *TU Delft Open*.
- Cho, M., Yoon, H. D., Do, K., & Kim, I. (2021). Calibration and Assessment of Bed Evolution Model in an Embayed Beach with Submerged Breakwaters. *Journal of Coastal Research*, 114(sp1), 514–518. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI114-104.1>
- Cueto, J., & Otero, L. (2020). Morphodynamic response to extreme wave events of microtidal dissipative and reflective beaches. *Applied Ocean Research*, 101, 102283. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102283>
- Davidson-Arnott, R. (2010). An Introduction to Coastal Processes & Geomorphology. In *Cambridge University Press*.
- Dean, R. G. (2004). Coastal Processes with Engineering Applications. In *Cambridge University Press*.
- De Vet, P.L.M., McCall, R.T., Den Bieman, J.P., van Ormondt, M., Stive, M.J.F., 2015. Modelling dune erosion, overwash and breaching at fire island (NY) during hurricane sandy. In: Paper Presented at the Proc. Coastal Sediments. [https://doi.org/10.1142/9789814689977\\_0006](https://doi.org/10.1142/9789814689977_0006)
- Dhanak, M. R., & Xiros, N. I. (Eds.). (2016). *Springer Handbook of Ocean Engineering* (Springer). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0>
- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I. J., & Herrera-Silveira, J. A. (2010). Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research*, 30(2), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.10.005>
- Fang, K., Wang, H., Sun, J., Zhang, J., & Liu, Z. (2020). Including Wave Diffraction in XBeach: Model Extension and Validation. *Journal of Coastal Research*, 36(1), 116. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-19-00015.1>

- Franklin, G. L., Medellín, G., Appendini, C. M., Gómez, J. A., Torres-Freyermuth, A., López González, J., & Ruiz-Salcines, P. (2021). Impact of port development on the northern Yucatan Peninsula coastline. *Regional Studies in Marine Science*, 45, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101835>
- Garzon, J. L., Ferreira, Ó., & Plomaritis, T. A. (2022). Modeling of Coastal Erosion in Exposed and Groin-Protected Steep Beaches. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 148(6), 1–16. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000719](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000719)
- González Legia, M., Eb, S., Álvarez, E., Solís, A., & Wabi, C. (2012). Leija et al poster. *Coastal Engineering Proceedings*, 38(2004), 164549.
- Hewageegana, V. H., & Canestrelli, A. (2021). Numerical modeling of the influence of tides on cross-shore sediment dynamics of dissipative beaches under moderate wave conditions. *Continental Shelf Research*, 218(June 2019), 104381. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104381>
- Hoefel, F., & Elgar, S. (2003). Wave-induced sediment transport and sandbar migration. *Science*, 299(5614), 1885–1887. <https://doi.org/10.1126/science.1081448>
- Kolokythas, G. A., Raquel, S., & Delgado Blanco, M. R. (2016). Morphological evolution of a bed profile induced by a storm event at the Belgian coast predicted by XBeach model. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2016-Janua*, 1239–1246.
- Kotu, V., & Deshpande, B. (2019). Classification. *Data Science*, 65–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814761-0.00004-6>
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). Applied predictive modeling. In *Applied Predictive Modeling*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- López Ramade, E., Mulligan, R. P., Medellín, G., & Torres-Freyermuth, A. (2023). Modelling beach morphological responses near coastal structures under oblique waves driven by sea-breeze. *Coastal Engineering*, 104290.
- Luijendijk, A., Hagenaaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Luijendijk, A., Ranasinghe, R., de Schipper, M. A., Huisman, B. A., Swinkels, C. M., Walstra, D. J. R., & Stive, M. J. F. (2017). The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study. *Coastal Engineering*, 119(August 2015), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.09.005>
- Masselink, G., & Pattiaratchi, C. (1998). The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment resuspension. *Marine Geology*, 146(1–4), 115–135. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00121-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00121-7)
- Medellín, G., Marinõ-Tapia, I., & Euán-Ávila, J. (2015). The Influence of a Seawall on Postnourishment Evolution in a Sea-Breeze-Dominated Microtidal Beach. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1449–1458. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00194.1>

- Medellín, G., & Torres-Freyermuth, A. (2019). Morphodynamics along a micro-tidal sea breeze dominated beach in the vicinity of coastal structures. *Marine Geology*, 417. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106013>
- Medellín, G., & Torres-freyermuth, A. (2021). Fore-dune formation and evolution on a prograding sea-breeze dominated beach. *Continental Shelf Research*, 226(104495). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104495>
- Medellín, G., Torres-Freyermuth, A., Tomasicchio, G. R., Francone, A., Tereszkievicz, P. A., Lusito, L., Palemón-Arcos, L., & López, J. (2018). Field and numerical study of resistance and resilience on a sea breeze dominated beach in Yucatan (Mexico). *Water (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/w10121806>
- Medina-Gómez, I., & Herrera-Silveira, J. A. (2009). Seasonal responses of phytoplankton productivity to water-quality variations in a coastal karst ecosystem of the yucatan peninsula. *Gulf of Mexico Science*, 27(1), 39–51. <https://doi.org/10.18785/goms.2701.05>
- Mendoza, E. T., Torres-Freyermuth, A., Ojeda, E., Medellín, G., Rioja-Nieto, R., Salles, P., & Turki, I. (2022). Seasonal changes in beach resilience along an urbanized barrier island. *Frontiers in Marine Science*, 9(September), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.889820>
- Mendoza-González, G., Paredes-Chi, A., Méndez-Funes, D., Giraldo, M., Torres-Irineo, E., Arancibia, E., & Rioja-Nieto, R. (2021). Perceptions and social values regarding the ecosystem services of beaches and coastal dunes in yucatán, mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/su13073592>
- Meyer-Arendt, K. J. (2001). Recreational development and shoreline modification along the north coast of Yucatán, Mexico. *Tourism Geographies*, 3(1), 87–104. <https://doi.org/10.1080/14616680010008720>
- Palmsten, M. L., & Splinter, K. D. (2016). Observations and simulations of wave runup during a laboratory dune erosion experiment. *Coastal Engineering*, 115, 58–66. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2016.01.007>
- Pedrozo, A. (2011). Procesos costeros y morfodinámica de playas. Apuntes de clase. In *UNAM II*.
- Peláez, D. S. (2015). *Modelación numérica de la transformación del oleaje y las oscilaciones de run-up en arrecifes de coral*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramli, Z. (2020). *XBeach Training Tutorial 5 Parte 1*. <https://www.youtube.com/watch?v=LIDfx4SAM8U>
- Razak, A. M. S., Dastgheib, A., & Roelvink, D. (2013). Sand bypassing and shoreline evolution near coastal structure, comparing analytical solution and XBeach numerical modelling. *Journal of Coastal Research*, 165, 2083–2088. <https://doi.org/10.2112/si65-352.1>
- Razak, M., & Nor, N. (2018). XBeach Process-Based Modelling of Coastal Morphological Features Near Breakwater. *MATEC Web of Conferences*, 203, 1007. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201820301007>

- Razak, M. S. A., & Nor, N. A. Z. M. (2018). XBeach Process-Based Modelling of Coastal Morphological Features Near Breakwater. *MATEC Web of Conferences*, 203. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820301007>
- Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, 103–123. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.004>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Roelvink, D., van Dongeren, A., McCall, R., Hoonhout, B., van Rooijen, A., van Geer, P., de Vet, L., & Nederhoff, K. (2015). Xbeach Manual. *Deltares*, 138.
- Ruiz-Martínez, G., Mariño-Tapia, I., Baldwin, E. G. M., Casarín, R. S., & Ortiz, C. E. E. (2016). Identifying Coastal Defence Schemes through Morphodynamic Numerical Simulations along the Northern Coast of Yucatan, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 32(3), 651–669. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00009.1>
- Ruol, P., Martinelli, L., Favaretto, C., & Scroccaro, D. (2018). Innovative Sand Groin Beach Nourishment with Environmental, Defense and Recreational Purposes. *International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- SÖĞÜT, E. (2014). *MODELLING LONG TERM MORPHOLOGICAL CHANGE USING XBEACH* (Issue December). Middle East Technical University.
- Splinter, K. D., & Palmsten, M. L. (2012). Modeling dune response to an East Coast Low. *Marine Geology*, 329–331, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.09.005>.
- Stockdon, H. F., Thompson, D. M., Plant, N. G., & Long, J. W. (2014). Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models. *Coastal Engineering*, 92, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2014.06.004>
- Tereszkiewicz, P., McKinney, N., & Meyer-Arendt, K. J. (2018). Groins along the Northern Yucatán Coast. *Journal of Coastal Research*, 34(4), 911–919. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00062.1>
- Thieler, E. R., Pilkey, O. H., Young, R. S., Bush, D. M., & Chai, F. (2000). The use of mathematical models to predict beach behavior for U.S. coastal engineering: A critical review. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 48–70.
- Torres-Freyermuth, A., Hofman, A., Tuz-Pech, J. C., Medellín, G., & Roos, P. C. (2020). Design and performance of permeable groins on a low-energy natural beach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/JMSE8040283>
- Torres-Freyermuth, A., Medellín, G., Mendoza, E. T., Ojeda, E., & Salles, P. (2019). Morphodynamic response to low-crested detached breakwaters on a sea breeze-dominated coast. *Water (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040635>

- Torres-Freyermuth, A., Puleo, J. A., DiCosmo, N., Allende-Arandía, M. E., Chardón-Maldonado, P., López, J., Figueroa-Espinoza, B., de Alegria-Arzaburu, A. R., Figlus, J., Roberts Briggs, T. M., de la Roza, J., & Candela, J. (2017). Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Continental Shelf Research*, 151(October), 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.008>
- van de Ven, M. J. P. (2018). *The effects of currents on wave nonlinearities* [Delft University of Technology]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:b19d57c1-e7ea-457e-997e-f02c42387b52/datastream/OBJ/download>
- Van Rijn, L. C. (2013). *Design of hard coastal structures against erosion*. 1–33. <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Coastalstructures2013.pdf>
- Vieira, B. F. V., Pinho, J. L. S., Barros, J. A. O., & Antunes do Carmo, J. S. (2020). Hydrodynamics and morphodynamics performance assessment of three coastal protection structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/jmse8030175>
- Wong, A. L. Z. (2016). *Wave Hydrodynamics in Ports: Numerical model assessment of XBeach* [Delft University of Technology]. <http://repository.tudelft.nl/>.

## Apéndice: params.txt

```
%%%%%%%%%%params.txt%%%%%%%%%%
wavemodel = surfbeat
morphology = 1
sedtrans = 1
%%%%%%%%Grid parameters%%%%%%%%
depfile = prof.dep
posdwn = -1
nx = 237
ny = 883
alfa = 0
dx=2
dy=2
xori = 0
yori = 0
thetamin = -90
thetamax = 90
dtheta = 10
front = abs_2d
back = wall
%%%%%%%%%%cyclic boundary conditions%%%%%%%%
cyclic=1
%%%%%%%%%%Tide boundary conditions%%%%%%%%
zs0file = tide1.txt
tideloc = 1
%%%%%%%%%%Model time%%%%%%%%
tstart = 0
tstop = 86400

%%%%%%%%%%Wave boundary condition parameters%%%%%%%%
instat = jons_table
random = 0
%%%%%%%%%%Bed composition parameters%%%%%%%%
D50=0.0003
%%%%%%%%%%Wave boundary condition parameters%%%%%%%%
bcfile = jons_table.txt
lateralwave= wavecrest
%%structure%%
morfac=2
morstart=3600
struct=1
ne_layer=groin.txt
facua=1
%% Output variables%%%%%%%%
tstart = 0
tintg = 3600
```

```
tintp    = 3600
outputformat = netcdf
nglobalvar = 6
H
zb
zs
u
v
sedero
nmeanvar = 3
H
u
v
```