

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS



“INFLUENCIA DE LA BRISA MARINA EN LA MORFODINAMICA  
DE BARRAS EN UNA PLAYA MICRO-MAREAL”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

PRESENTA:

**JULIO LOPEZ CASTILLEJOS**

Ensenada, Baja California, México Agosto del 2015

## RESUMEN

---

Las barras de arena en playas constituyen un reservorio importante del sedimento que se transporta a través y a lo largo de la costa, por lo tanto, es primordial entender su dinámica y determinar los procesos físicos que generan su evolución. Las brisas marinas son agentes que pueden inducir cambios morfológicos relevantes en playas; sin embargo, actualmente existen pocos estudios que explican su efecto en el transporte de sedimento de playas micro-mareales con baja energía de oleaje. Con base en mediciones colectadas durante una campaña intensiva de campo llevada a cabo del 1 al 11 de abril del 2014, en este trabajo se investiga el efecto que tienen las brisas marinas sobre la morfodinámica de barras en la playa de Sisal, Yucatán, una playa micro-mareal y expuesta a baja energía de oleaje. Para ello, se analizan datos topobatimétricos diarios, observaciones meteorológicas y mediciones hidrodinámicas colectadas en la zona de barras sumergidas. Durante el periodo de mediciones, se presentaron tres tipos de eventos característicos y con interés a diferenciar: brisa, calma y tormenta conocida localmente como “norte”. Se cuantificó la variabilidad espacio-temporal de las barras de arena y se calculó el volumen de sedimento transportado cada día en el área de estudio, encontrando valores de erosión durante los eventos de brisas y ‘nortes’, con la diferencia de que posterior al evento de ‘norte’, el sedimento erosionado se recupera rápidamente. Además, se analizó la hidrodinámica con la que se determinó que el transporte de sedimento predominante es el longitudinal y las corrientes promedio son igual de intensas durante el ‘norte’ y las brisas nocturnas, con velocidades máximas de  $0.11 \text{ ms}^{-1}$ , con la diferencia que durante la brisa nocturna su dirección es hacia el este y durante el ‘norte’ hacia el oeste. Finalmente se concluyó que la parte más dinámica es la zona de barras, donde se observaron migraciones transversales promedio de entre 10 y 5 m en las barras somera y profunda, respectivamente.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS  
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

“INFLUENCIA DE LA BRISA MARINA EN LA MORFODINAMICA  
DE BARRAS EN UNA PLAYA MICRO-MAREAL”

TESIS

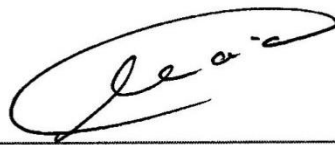
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

JULIO LOPEZ CASTILLEJOS

Aprobada por:



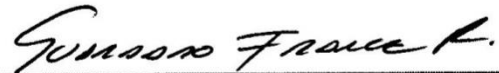
---

Dra. Amaia Ruiz de Alegria Arzaburu  
Directora de tesis



---

Dr. Hector Garcia Nava  
Sinodal



---

M.C. Rigoberto Guardado France  
Sinodal

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo  
de tesis de grado de Maestría

**DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA**  
**COORDINADOR DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACION, F.C.M.**  
**Presente.-**

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Julio López Castillejos** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

INFLUENCIA DE LA BRISA MARINA EN LA MORFODINAMICA DE BARRAS  
EN UNA PLAYA MICRO-MAREAL.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 11 de agosto de 2015



---

**DRA. AMAIA RUIZ DE ALEGRIA ARZABURU**  
**DIRECTORA DE TESIS**

c.c.p. Expediente

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo  
de tesis de grado de Maestría

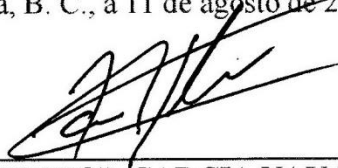
**DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA**  
**COORDINADOR DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACION, F.C.M.**  
**Presente.-**

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Julio López Castillejos** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

INFLUENCIA DE LA BRISA MARINA EN LA MORFODINAMICA DE BARRAS  
EN UNA PLAYA MICRO-MAREAL.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 11 de agosto de 2015



---

**DR. HECTOR GARCIA NAVA**  
**SINODAL**

c.c.p. Expediente

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo  
de tesis de grado de Maestría

**DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA**  
**COORDINADOR DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACION, F.C.M.**  
**Presente.-**

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Julio López Castillejos** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

INFLUENCIA DE LA BRISA MARINA EN LA MORFODINAMICA DE BARRAS  
EN UNA PLAYA MICRO-MAREAL.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 11 de agosto de 2015

  
M.C. RIGOBERTO GUARDADO FRANCE  
SINODAL

c.c.p. Expediente

## DEDICATORIA

---

A mis hijos Ivan y Dulcita, que fueron mi más grande inspiración para seguir adelante en estos últimos años, los amo infinito chinchitas.

A mi compañera de vida y maravillosa madre de mis hijos, Dulce, por luchar junto a mí para conseguir nuestras metas y salir juntos adelante.

A mis padres Candy y Jorge, grandes ejemplos de vida, por su total apoyo, grandes enseñanzas y por impulsarme a seguir luchando pase lo que pase siempre adelante en las buenas y en las malas. ¡Los quiero chucho!

A mi hermano Ik, que aún es muy pequeño pero para que un día se dé cuenta de todo el cariño e infinito amor que le tengo.

## AGRADECIMIENTOS

---

A la Dra. Amaia Ruiz de Alegria Arzaburu por su confianza, gran apoyo, colaboración y brindarme el conocimiento necesario para la elaboración de este trabajo.

A mis sinodales, el Dr Hector Garcia Nava y el M.C. Rigoberto Guardado France, por sus acertados comentarios, oportunas sugerencias y enseñanzas a lo largo de este periodo.

A la M.C. Patricia Alvarado Graef que fue un gran apoyo, alguien en quien confiar y pedir consejos durante los tiempos difíciles y de confusión, personal y académicamente hablando. En usted encontré no solo una excelente maestra, sino también una gran amiga.

A mis amigos Arturo y Orlando por su gran amistad y al resto de mis compañeros con los que compartí este proceso y que mutuamente nos apoyamos durante el estudio.

Al proyecto de CONACyT CB-2011-167692-T a cargo del Dr. Alec Torres Freyermuth, a través del cual se subvenciona gran parte de la campaña de NCSal.

Al proyecto de CONACyT INFR-2013-205020 a cargo de la Dra. Amaia Ruiz de Alegria Arzaburu, el cual proporciono la instrumentación necesaria para medir corrientes (Vectors y OBS) y estación meteorológica.

Y a todo el equipo de trabajo que participo en la campaña de NCSal, en particular los colaboradores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, Universidad de Delaware, Universidad de Texas A&M y UABC.

# INDICE

---

<b>RESUMEN.....</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>VI</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
1.1. LA PLAYA.....	1
1.2. BRISA MARINA .....	4
1.3. BARRAS SUMERGIDAS.....	6
1.4. MORFODINÁMICA COSTERA.....	8
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
2.1. GENERAL .....	10
2.2. PARTICULARES .....	10
<b>3. AREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>11</b>
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>16</b>
4.1. DATOS METEOROLÓGICOS .....	18
4.2. MEDICIONES DE MORFOLOGÍA .....	19
4.2.1. <i>Evolución de perfiles.....</i>	<i>21</i>
4.2.2. <i>Modelos Digitales de Elevación (MDE's) .....</i>	<i>22</i>
4.2.3. <i>Calculo de volumen.....</i>	<i>23</i>
4.2.4. <i>Posición de las barras sumergidas.....</i>	<i>24</i>
4.3. MEDICIONES DE HIDRODINÁMICA .....	24

4.3.1.	<i>Mareas</i> .....	24
4.3.2.	<i>Oleaje</i> .....	25
4.3.3.	<i>Corrientes</i> .....	25
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>29</b>
5.1.	METEOROLOGÍA .....	29
5.2.	MORFOLOGÍA.....	31
5.2.1.	<i>Evolución temporal de perfiles</i> .....	31
5.2.2.	<i>Evolución morfológica transversal y longitudinal</i> .....	34
5.2.3.	<i>Variabilidad volumétrica</i> .....	39
5.2.4.	<i>Variabilidad espacial de las barras sumergidas</i> .....	45
5.3.	HIDRODINÁMICA .....	47
5.3.1.	<i>Mareas</i> .....	47
5.3.2.	<i>Oleaje</i> .....	48
5.3.3.	<i>Corrientes</i> .....	49
<b>6.</b>	<b>DISCUSION Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>56</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 1. TERMINOLOGÍA UTILIZADA EN UN PERFIL DE PLAYA (ADAPTADO DEL SHORE PROTECTION MANUAL DE 1984, EN PEDROZO-ACUÑA, 2011).....	1
FIGURA 2. MODELOS DE LA FORMACIÓN DE BARRAS SUMERGIDAS: A) MECANISMO DE ROMPIENTE, Y B) TEORÍA DE ONDAS INFRAGRAVITATORIAS ESTÁTICAS (MODIFICADO DE KOMAR, 1998 EN MASSELINK Y HUGHES, 2003).....	8
FIGURA 3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. EL RECUADRO AZUL SEÑALA EL ÁREA DONDE SE REALIZARON LAS MEDICIONES PARA LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO. ....	11
FIGURA 4. TOPO-BATIMETRÍA DE LA PLAYA DE SISAL MEDIDA EN MARZO. LAS LÍNEAS NEGRAS REPRESENTAN LOS DATOS CRUDOS DE CAMPO Y LAS BLANCAS DOS PERFILES QUE EMPATAN CON LOS MEDIDOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO (RECUADRO EN EL PANEL SUPERIOR). COMPARACIÓN DE LOS PERFILES BATIMÉTRICOS EXTENSOS DE MARZO Y LOS MEDIDOS DURANTE LA CAMPAÑA INTENSIVA DE ABRIL; LAS FLECHAS SEÑALAN LA UBICACIÓN DE LAS DOS BARRAS SUMERGIDAS (PANELES INFERIORES). ....	13
FIGURA 5. DIFERENCIA DE ELEVACIÓN TOPO-BATIMÉTRICA ENTRE LOS MESES DE MARZO Y ABRIL DEL 2014. EL MAPA A COLOR MUESTRA LA DIFERENCIA DE ELEVACIÓN DE UN MES A OTRO, ASÍ COMO 3 PERFILES MARCADOS (A, B Y C) EN BLANCO LOS DE MARZO Y EN NEGRO LOS DE ABRIL. LA LÍNEA AZUL SÓLIDA REPRESENTA EL CONTORNO DE 0 M Y LAS LÍNEAS NEGRAS PUNTEADAS LA BATIMETRÍA CADA METRO (PANEL IZQUIERDO). EL PANEL DERECHO MUESTRA LOS CAMBIOS ENTRE MARZO Y ABRIL DE LOS PERFILES A, B Y C. ....	14
FIGURA 6. A) POSICIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ANCLADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO (DESCRIPCIÓN EN TEXTO) Y PERFILES UTILIZADOS PARA CÁLCULOS DE VOLUMEN; B) FOTO AÉREA DEL ÁREA DE ESTUDIO DONDE SE OBSERVAN LAS ESTRUCTURAS CON LOS INSTRUMENTOS (CORTESÍA DE AXIS INGENIERÍA).....	16
FIGURA 7. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA LA COLECCIÓN DE DATOS HIDRODINÁMICOS. A) EN LA ZONA DE SWASH EN UN ANCLAJE TIPO ANDAMIO CONFORMADO CON TUBOS DE ALUMINIO. B) ANCLAJE CON UN VECTOR COLOCADO SOBRE LA BARRA SOMERA EN LOS TRANSECTOS DEL ESTE Y	

OESTE. C) CORRENTÍMETRO VECTOR COLOCADO EN EL TRANSECTO CENTRAL, EN UN ANCLAJE DE ALUMINIO SIMILAR AL DE LA ZONA DE SWASH PERO DE REDUCIDO TAMAÑO. ....	17
FIGURA 8. TORRE DE ALUMINIO COLOCADA EN LA PLAYA SUPRAMAREAL DONDE SE COLOCÓ LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA. ....	19
FIGURA 9. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS MORFOLÓGICOS. A) BASE DEL DGPS, UBICADA EN EL TECHO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA. B) ROVER DEL DGPS OPERADO MANUALMENTE. C) ESTACIÓN TOTAL. ....	20
FIGURA 10. EJEMPLO DEL PROCESAMIENTO DE DATOS MORFOLÓGICOS DIARIOS, PASANDO DE DATOS PUNTUALES ESPARCIDOS POR TODA EL ÁREA DE ESTUDIO (PANEL IZQUIERDO) A OTRA CON 15 PERFILES TOPO-BATIMÉTRICOS INDIVIDUALES CON DATOS PUNTUALES ACOMODADOS (PANEL DERECHO). ....	21
FIGURA 11. EJEMPLO DE TOPO-BATIMETRÍA OBTENIDA CON MEDICIONES DE ELEVACIÓN. LOS PUNTOS BLANCOS CORRESPONDEN A LOS VALORES MEDIDOS Y LOS PUNTOS NEGROS A LOS OBTENIDOS DE LA INTERPOLACIÓN. ....	22
FIGURA 12. EJEMPLO PARA OBTENER EL ÁREA DE UN PERFIL DE PLAYA. ....	24
FIGURA 13. POSICIÓN DE LOS ANCLAJES M4, M5 Y M7 A LO LARGO DEL PERFIL TRANSVERSAL DE PLAYA Y ANALIZADOS EN ESTE ESTUDIO. CADA ANCLAJE CUENTA CON UN MEDIDOR DE CORRIENTE MODELO <i>VECTOR</i> Y UN SENSOR DE TURBIDEZ (OBS).....	27
FIGURA 14. MAGNITUD (PANEL SUPERIOR) Y DIRECCIÓN (PANEL INFERIOR) DEL VIENTO MEDIDO POR LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA. PARA PERIODOS DE A) BRISA, B) CALMA ANTES DEL 'NORTE', C) 'NORTE' Y D) CALMA POSTERIOR AL 'NORTE'. LAS ÁREAS SOMBREADAS EN GRIS MUESTRAN EL TIEMPO DURANTE EL CUAL SE REALIZARON LAS MEDICIONES TOPO-BATIMÉTRICAS.....	29
FIGURA 15. SERIE DE TIEMPO DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (PANELES DE ARRIBA HACIA ABAJO, RESPECTIVAMENTE), OBTENIDAS CON LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA. LAS ÁREAS SOMBREADAS CON GRIS MUESTRAN EL TIEMPO DURANTE EL CUAL SE REALIZARON LAS MEDICIONES TOPO-BATIMÉTRICAS. ....	30

FIGURA 16. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS PERFILES P3, P7, P10 Y P14 UBICADOS DE OESTE A ESTE, PANELES A, B, C Y D, RESPECTIVAMENTE. EL ORIGEN DE LA DISTANCIA TRANSVERSAL SE REFIERE AL LÍMITE SUPERIOR DE LA PLAYA SUPRAMAREAL.....	32
FIGURA 17. EVOLUCIÓN LONGITUDINAL DE PERFILES POR CADA DÍA DE MEDICIÓN. ....	34
FIGURA 18. DIFERENCIAS DE ELEVACIÓN DIARIA EN EL ÁREA DE ESTUDIO, LOS COLORES REPRESENTAN LA DIFERENCIA DE ELEVACIÓN, MIENTRAS QUE LAS LÍNEAS SÓLIDAS Y PUNTEADAS REPRESENTAN LA BATIMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO. A) DIFERENCIA ENTRE LOS DÍAS 2 Y 3 DE ABRIL, B) DIFERENCIA ENTRE LOS DÍAS 3 Y 4, C) DIFERENCIA ENTRE LOS DÍAS 4 Y 7 DE ABRIL, D) DIFERENCIA ENTRE LOS DÍAS 7 Y 9 DE ABRIL, E) DIFERENCIA ENTRE LOS DÍAS 9 Y 10 DE ABRIL, Y F) DIFERENCIA ENTRE LOS DÍAS 10 Y 11 DE ABRIL. ....	37
FIGURA 19. DIFERENCIAS ACUMULADA A LO LARGO DEL TIEMPO, EN COLOR SE MUESTRA LA DIFERENCIA DE ELEVACIÓN MIENTRAS QUE LAS LÍNEAS SÓLIDAS Y PUNTEADAS REPRESENTAN LA BATIMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO. A) DIFERENCIA ENTRE LAS DÍAS 2 Y 3 DE ABRIL, B) DIFERENCIA ENTRE LAS DÍAS 2 Y 4 DE ABRIL, C) DIFERENCIA ENTRE LAS DÍAS 2 Y 7 DE ABRIL, D) DIFERENCIA ENTRE LAS DÍAS 2 Y 9 DE ABRIL, E) DIFERENCIA ENTRE LAS DÍAS 2 Y 10 DE ABRIL, Y F) DIFERENCIA ENTRE LAS DÍAS 2 Y 11 DE ABRIL.....	38
FIGURA 20. VOLUMEN TOTAL (EN M <sup>3</sup> ) DE LA SECCIÓN DE PLAYA DE ESTUDIO POR DÍA, Y RELACIONADO A LOS PERIODOS METEOROLÓGICOS: A) BRISAS, B) CALMA ANTES DEL 'NORTE', C) 'NORTE' Y D) CALMA DESPUÉS DEL 'NORTE'. ....	40
FIGURA 21. VOLUMEN DE SEDIMENTO OBTENIDO DE LA RESTA HECHA AL VOLUMEN TOTAL DE LA MEDIA DE VOLUMEN EN LOS 7 DÍAS, DANDONOS UN CAMBIO DE VOLUMEN POR DÍA CON RESPECTO A LA MEDIA DE TODOS LOS DÍAS, Y RELACIONADOS A LOS EVENTOS METEOROLÓGICOS: A) BRISAS, B) CALMA ANTES DEL 'NORTE', C) 'NORTE' Y D) CALMA DESPUÉS DEL 'NORTE'. ....	41
FIGURA 22. CAMBIO TEMPORAL DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO PARA CADA PERFIL RESPECTO AL PROMEDIO VOLUMETRICO CALCULADO PARA CADA PERFIL DEL 2 AL 11 DE ABRIL. EL EJE X MUESTRA LA DISTANCIA LONGITUDINAL DE LA PLAYA DESDE EL EXTREMO OESTE. ....	42

FIGURA 23. CAMBIO VOLUMÉTRICO PORCENTUAL RESPECTO AL DEL PRIMER DÍA DE MUESTREO (2 DE ABRIL) PARA CADA PERFIL (EJE X) EN EL TIEMPO (EJE Y).....	45
FIGURA 24. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA POSICIÓN DE LA CRESTA EN LA BARRA SOMERA.....	45
FIGURA 25. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA POSICIÓN DE LA CRESTA EN LA BARRA SUMERGIDA MÁS PROFUNDA. ....	46
FIGURA 26.COMPARACIÓN ENTRE LA MAREA PREDICHA PARA EL PUERTO PROGRESO Y LA MEDIDA EN LA MARINA DE SISAL.....	48
FIGURA 27. SERIE DE TIEMPO DE MEDICIONES DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE ( $H_s$ ), PERIODO (T) Y DIRECCIÓN DEL OLEAJE TOMADOS A 4.3 Y 10.5 M DE PROFUNDIDAD. ....	49
FIGURA 28. COMPONENTES U Y V DE LAS CORRIENTES, ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA (TKE) Y SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN EN M4 (UBICADO SOBRE LA BARRA SOMERA), PARA CONDICIONES DE BRISA, CALMA Y 'NORTE'. LA COMPONENTE DE LA VELOCIDAD $U>0$ INDICA CORRIENTES CON DIRECCIÓN HACIA LA COSTA Y $V>0$ CORRIENTES CON DIRECCIÓN DE ESTE A OESTE.....	51
FIGURA 29. COMPONENTES U Y V DE LAS CORRIENTES, ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA (TKE) Y SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN EN M5 (UBICADO EN EL CANAL ENTRE LAS BARRAS), PARA CONDICIONES DE BRISA, CALMA Y 'NORTE'. LA COMPONENTE DE LA VELOCIDAD $U>0$ INDICA CORRIENTES CON DIRECCIÓN HACIA LA COSTA Y $V>0$ CORRIENTES CON DIRECCIÓN DE ESTE A OESTE.....	52
FIGURA 30. COMPONENTES U Y V DE LAS CORRIENTES, ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA (TKE) Y SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN EN M7 (UBICADO SOBRE LA BARRA PROFUNDA), PARA CONDICIONES DE BRISA, CALMA Y 'NORTE'. LA COMPONENTE DE LA VELOCIDAD $U>0$ INDICA CORRIENTES DIRIGIDAS HACIA LA COSTA Y $V>0$ DE ESTE A OESTE. ....	53
FIGURA 31. COMPONENTES U Y V DE LAS CORRIENTES, ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA (TKE) Y SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN, PARA CONDICIONES DE CALMA POSTERIOR AL 'NORTE' EN LAS BARRAS SUMERGIDAS Y EL CANAL. LA COMPONENTE DE LA VELOCIDAD $U>0$ INDICA CORRIENTES DIRIGIDAS HACIA LA COSTA Y $V>0$ DE ESTE A OESTE .....	54

FIGURA 32. MAPA CONCEPTUAL REPRESENTANDO LA VELOCIDAD RESULTANTE DE LAS CORRIENTES  
SOBRE LAS BARRAS Y EL CANAL PARA EVENTOS DE BRISA, CALMA Y NORTE..... 59

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. La playa

Las playas son formaciones costeras muy dinámicas, constituidas por sedimento que se encuentra en constante movimiento a lo largo y a través de la misma por corrientes inducidas por el oleaje, el viento y las mareas (Wright y Short, 1984). Típicamente, el límite superior de la playa lo define una línea de vegetación, ubicada en la duna o sobre un acantilado, mientras que el límite oceánico lo define la profundidad de cierre, definida como la profundidad a partir de la cual deja de existir transporte de sedimentos. Por lo tanto, a partir de la profundidad de cierre, el perfil de playa no presenta cambios de elevación a lo largo del tiempo. (Hallenmeyer, 1981).

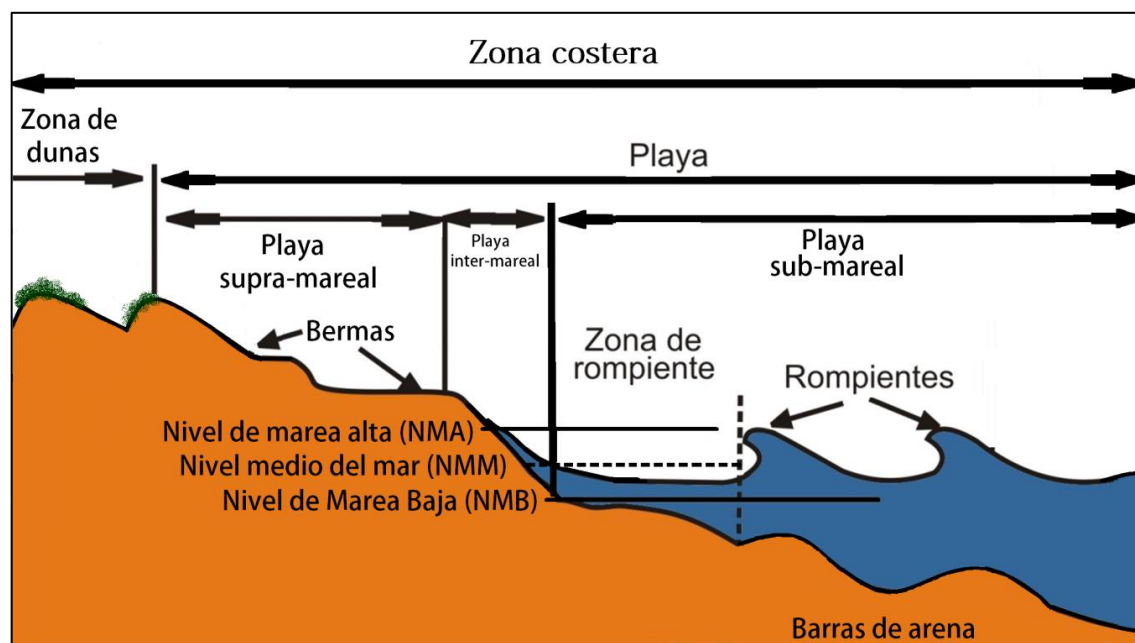


Figura 1. Terminología utilizada en un perfil de playa (adaptado del Shore Protection Manual de 1984, en Pedrozo-Acuña, 2011)

La zonación de la playa se da en función de dos factores: a la manera en que se dispersa la energía del oleaje incidente y al área de la playa que es cubierta por el nivel de marea (Masselink y Hughes, 2013). La Figura 1 presenta la terminología utilizada en la zona costera con respecto a la posición de la marea que será utilizada en este trabajo.

El cálculo de la profundidad de cierre ( $Z_c$ ) se puede realizar a través de una parametrización empírica, propuesta por Hallermeier (1981), en la cual la profundidad de cierre se relaciona con las condiciones de oleaje incidente, utilizando mediciones de varios años:

$$Z_c = 2.28H_{sx} - 68.5 \frac{H_{sx}^2}{gT_{sx}^2} \quad (1)$$

donde  $H_{sx}$  es la altura y  $T_{sx}$  el periodo del oleaje de tormentas que excedieron 12 hr de duración cada año, respectivamente. En caso de no contar con varios años de mediciones requeridos para calcular los parámetros anteriormente mencionados, Hallermeier (1981) propone usar una aproximación simplificada:

$$Z_c = 2\bar{H}_s + 11\sigma \quad (2)$$

donde  $\bar{H}_s$  se refiere a la media anual de altura de ola significativa y  $\sigma$  a su desviación estándar.

Short (2006) describe distintos tipos de playa de acuerdo al forzamiento dominante que genera el transporte de sedimento, y por tanto, el cambio morfológico. De acuerdo con Short (2006), las playas pueden ser clasificadas en 3 grupos: dominadas por el oleaje, dominadas por la marea o modificadas

por la corriente. Cuando el efecto de la marea no es significativo, siendo de mayor importancia el efecto del oleaje, existe una diversidad de tipos de playas, que se diferencian entre sí dependiendo de la forma en que llega y se distribuye la energía del oleaje en la cara de la playa. Así, en ambientes dominados por el oleaje existen tres tipos de playa en función de las características de la transformación del oleaje, que son: disipativas, reflejantes e intermedias; las cuales obtienen sus nombres por la manera en que se atenúa la energía del oleaje a través de la playa (Short 2006). En las playas disipativas se atenúa la mayor parte de la energía en la zona de rompientes, mientras que las playas reflejantes, reflejan la mayor porción de la energía incidente en la cara de la playa.

Los diferentes tipos de playa pueden ser predichos utilizando el parámetro adimensional de velocidad de caída,  $\Omega$  (Gourlay, 1968; Dean, 1973; Masselink y Hughes, 2013):

$$\Omega = \frac{H_b}{Tw_s} \quad (3)$$

donde  $H_b$  es la altura de ola significativa en rompiente,  $T$  es el periodo asociado a la ola y  $w_s$  la velocidad de caída de sedimento calculado con la ecuación:

$$w_s = \frac{\mu}{9D_{50}} \left[ \sqrt{(10.36^2 + 1.049D_*^3)} - 10.36 \right] \quad (4)$$

donde  $\mu$  es la viscosidad molecular del fluido ( $1,4 \times 10^{-3} \text{Nsm}^{-2}$ ),  $\rho$  es la densidad del agua de mar,  $D_{50}$  es el tamaño medio de grano,  $D_*$  esta dado por

$$D_* = D_{50} \left[ \frac{g^2 g(s-1)}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (5)$$

$g$  es la aceleración de la gravedad y  $s$ , la gravedad específica del sedimento, que es la razón entre las densidades del sedimento ( $\rho_s$ ) y del agua ( $\rho$ ):

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (6)$$

En las playas disipativas, el oleaje tiende a romper en las barras sumergidas lejos de la zona intermareal, la energía incidente suele disiparse de manera progresiva a través de la zona de surf y el oleaje en rompiente es de tipo derrame (Masselink & Hughes, 2003; Hughes *et al*, 2014; Wright y Short, 1984, Aagaard *et al.*, 2013). La morfodinámica en estas playas se encuentra controlada por el oleaje que actúa sobre una amplia zona de surf de cientos de metros de anchura, con una pendiente de playa pequeña ( $\tan\beta < 0.01$ ) y, comúnmente, constituida de arena fina a media. Se espera que este tipo de playa sea muy estable y que no presente grandes cambios a lo largo del tiempo (Short 2000).

## 1.2. Brisa Marina

En las costas donde la energía de oleaje incidente es baja y las mareas se encuentran en un rango micro-mareal (de 0 a 2 m de rango mareal promedio),

es de gran interés el estudio de las brisas marinas, ya que se considera que el viento es el principal agente que induce el transporte de sedimento a lo largo y a través de la playa (Pattiaratchi *et al*, 1997; Masselink y Pattiaratchi, 1998b).

Neumann (1984) define el término de brisa marina como un fenómeno en el que el viento cambia de dirección en un periodo diurno del mar a la costa y viceversa debido a los cambios de temperatura y presión que hay en la atmósfera a lo largo del día (Capper, 1801; von Hann, 1901).

Las brisas marinas forman parte de un sistema de circulación atmosférico diurno que surge de las contrastantes respuestas térmicas de la superficie de la tierra y el agua, debido a sus diferentes propiedades térmicas y balances energéticos (Pattiaratchi *et al* 1997). Durante los periodos de brisas marinas se producen cambios en el campo del oleaje incidente, pudiendo afectar significativamente a la morfología y los procesos que inducen la dinámica de la playa. Después de la aparición de la brisa marina, los valores de altura de ola incidente aumentan, el periodo del oleaje disminuye, y el ángulo de incidencia del oleaje puede cambiar dependiendo de la dirección del sistema de las brisas (Masselink y Pattiaratchi, 1998b).

Masselink y Pattiaratchi (1998b) identificaron dos efectos importantes de la morfodinámica de la brisa marina sobre la morfología de la playa. Primero, el transporte de sedimento longitudinal inducido por el oleaje y corrientes generadas por la brisa es relevante para evaluar el balance sedimentario de la

costa a largo plazo. Segundo, durante los periodos de brisa, la playa se ajusta continuamente a los cambios hidrodinámicos que intentan mantener el equilibrio sedimentario. Así, las brisas marinas parecen presentarse como una serie de ciclos de pequeñas tormentas, caracterizadas por generar erosión durante la noche y acreción durante el resto del día.

### 1.3. Barras sumergidas

Las barras sumergidas son acumulaciones de arena, que en muchas playas se encuentran paralelas a la línea de costa, se presentan en costas dominadas por el oleaje y tienen periodos de formación distintos a lo largo de un periodo anual, pudiendo encontrar una o más (hasta 5) en un sistema de barras (Wijnberg y Kroon, 2002; Ruessink *et al.*, 2003), suelen encontrarse a menos de 10 m de profundidad y constituyen una acumulación de sedimento que juega un papel fundamental en la hidrodinámica de la zona de rompiente, y por tanto, en la morfodinámica costera (Price y Ruessink, 2008).

Las playas disipativas se caracterizan por la presencia de barras de arena sumergidas en la zona submareal, las cuales conforman un sistema natural de protección para las playas ante eventos extremos de oleaje (Huntley y Bowen, 1975; Short, 1975; Huntley, 1976; Sasaki *et al.*, 1977; Wright *et al.*, 1979; Holman *et al.*, 1979). Price y Ruessink (2008) indicaron que las barras son más dinámicas en las playas micro-mareales que en las macro-mareales. Por tanto es relevante estudiar la dinámica de las barras submareales para entender la

dinámica de la playa emergida, determinar su vulnerabilidad y capacidad de respuesta ante eventos extremos de oleaje.

La morfología de las barras sumergidas es muy variable, lo que complica la creación de una clasificación de tipo de barras para diferentes ambientes costeros. La mayoría de los criterios usados en las clasificaciones actuales se basan en la elevación y la morfología de la barra. Las barras arenosas son vistas como características dinámicas que pueden inducir cambios relevantes en la forma de la playa a través de variaciones de su amplitud o su posición transversal como respuesta al cambio de las condiciones del oleaje (Wijnberg y Kroon, 2002).

Actualmente, existen dos teorías que explican la formación de barras sumergidas. Una teoría, explica que las barras se forman cerca de la rompiente como resultado de la convergencia del sedimento transportado hacia la costa por una corriente ubicada fuera de la zona de surf (durante el proceso de asomeramiento), y la corriente de resaca dirigida mar adentro después de la zona de surf que se forma en el fondo (Figura 2a). La otra teoría se enfoca para playas con morfología rítmica y con sistemas de barras, e indica que su formación es atribuida a los patrones de transporte neto de sedimento, asociado a ondas infragravitarias estáticas (Figura 2b, Masselink y Hughes, 2003).

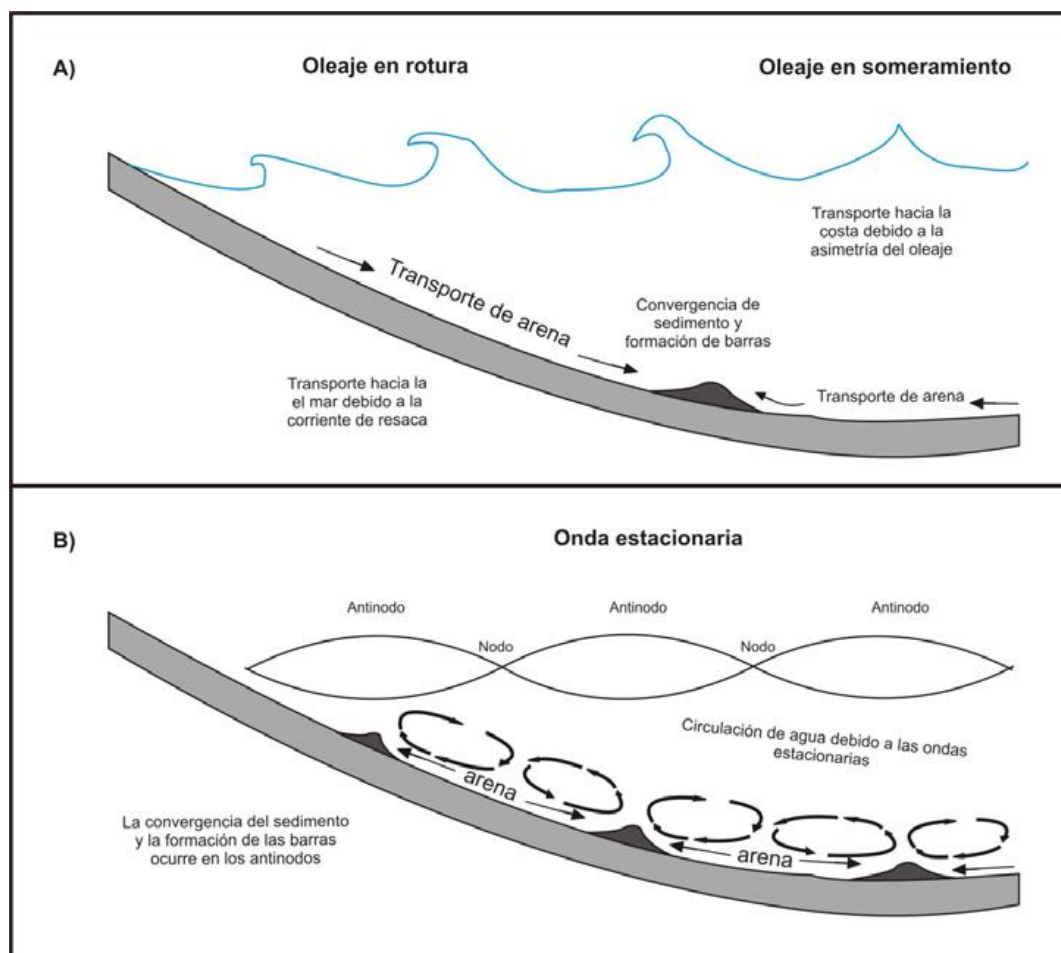


Figura 2. Modelos de la formación de barras sumergidas: a) mecanismo de rompiente, y b) Teoría de ondas infragravitatorias estáticas (Modificado de Komar, 1998 en Masselink y Hughes, 2003).

#### 1.4. Morfodinámica costera

La morfología de todo tipo de barras de arena es afectada por los campos de corrientes inducidas por el oleaje incidente. Debido a la relación morfodinámica existente entre las corrientes inducidas por el oleaje incidente y las barras de arena, estas barras son también conocidas como barras formadas por corrientes (Wijnberg y Kroon, 2002). Los periodos de erosión y acreción de las barras están comúnmente asociados a periodos de alta y baja energía de oleaje, mostrando fuertes variaciones específicas en cada sitio (Senechal *et al.*,

2015). La existencia de barras de arena en la playa submareal indica la existencia de gradientes de transporte de sedimento transversales a la playa y al mismo tiempo la presencia de convergencia de sedimento como resultado de las características hidrodinámicas de la zona de rompiente (Masselink y Hughes 2003).

El término de morfodinámica costera fue introducido por Wright y Thom (1977) para explicar los factores que afectan y controlan la morfología costera, siendo los primeros en implementar una aproximación del sistema entre la morfología costera y su evolución. La morfodinámica es la interacción mutua entre la dinámica de fluidos y la morfología del lugar, incluyendo los procesos de transporte de sedimento, convirtiéndose en un paradigma esencial para estudiar la evolución costera (Wright y Thom, 1977; Masselink y Hughes, 2013; Aagaard *et al.*, 2013).

Para un estudio de morfodinámica costera se deben tener en cuenta dos aspectos importantes: El sistema costero y las condiciones ambientales del entorno. Las condiciones ambientales son procesos que generan y afectan el transporte de sedimento, la morfología y la estratigrafía del sistema costero. El sistema costero comprende aquellos procesos que asocian la energía con el flujo de materiales afectando el transporte de sedimento, la morfología del sistema y su estratigrafía (Wright y Thom, 1977; Cowell y Thom, 1994; Masselink y Hughes, 2013).

## 2. OBJETIVOS

---

### 2.1. General

Determinar el efecto que tiene el oleaje local producido por brisas marinas, y sus corrientes asociadas, sobre la morfología (morfodinámica) de las barras sumergidas en una playa disipativa micro-mareal y de baja energía de oleaje, determinando de esta manera su morfodinámica.

### 2.2. Particulares

- Cuantificar los cambios morfológicos espacio-temporales de la playa longitudinal y transversalmente a partir del cálculo de volúmenes y variaciones en la posición de barras.
- Caracterizar la hidrodinámica en la zona de rompiente calculando las corrientes promedio, el sedimento en suspensión y la energía cinética turbulenta
- Determinar la relación entre los cambios morfológicos de la playa submareal y la hidrodinámica durante diferentes condiciones meteorológicas y sus distintas velocidades.

### 3. AREA DE ESTUDIO

La playa de Sisal se localiza al Noroeste de la península de Yucatán, México, aproximadamente a 63 Km de la ciudad de Mérida (Figura 3). El área de estudio constituye una sección de 130 m de playa que se extiende 150 m mar adentro, con elevaciones comprendidas entre 1 y -2.5 m respecto al nivel medio del mar (NMM). La playa está formada por arenas de 0.15 mm de tamaño medio ( $D_{50}$ ), de color blanco y origen biogénico (Cuevas-Jiménes y Euán-Avila 2009). En el área de estudio no existe aporte terrígeno de sedimento dada la inexistencia de ríos, tratándose de un ambiente kárstico.

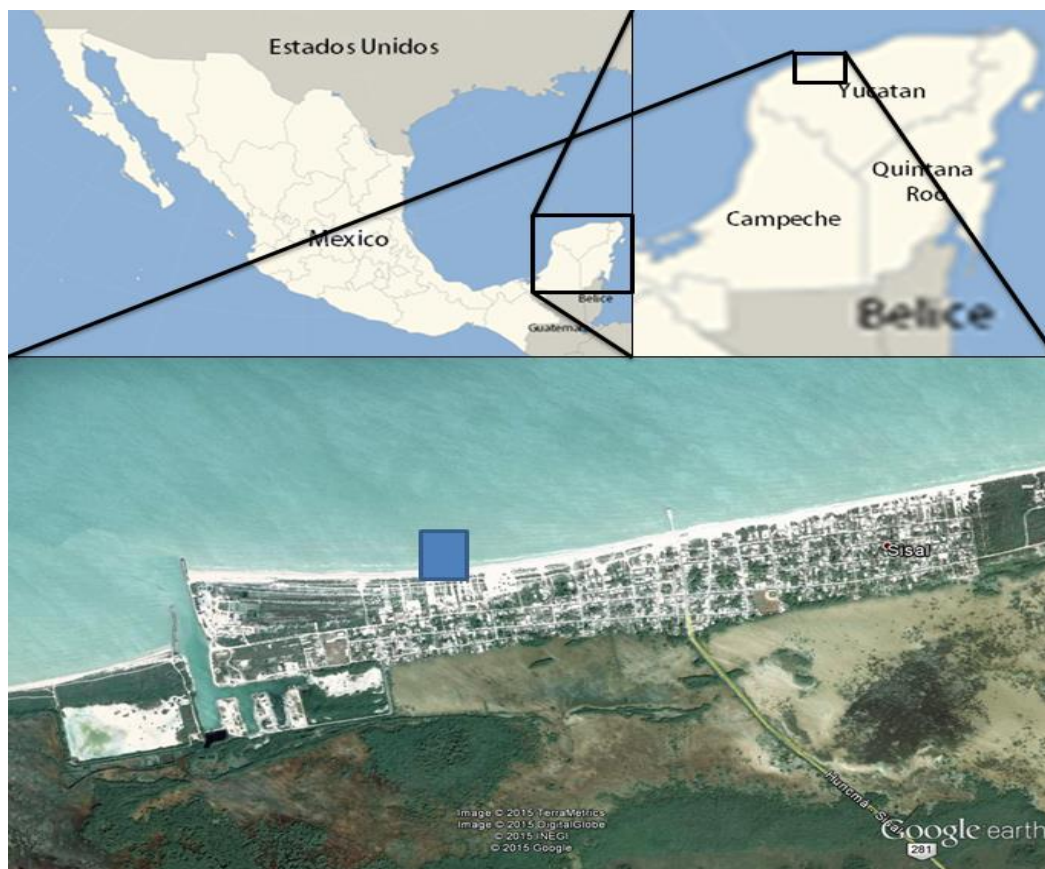


Figura 3. Localización del área de estudio. El recuadro azul señala el área donde se realizaron las mediciones para la elaboración de este trabajo.

En Mendoza *et al.* (2013) se menciona la existencia de dos fenómenos que presentan condiciones meteorológicas con vientos de mesoescala: los 'nortes' y los ciclones tropicales. Por la gran relevancia que se observa en las velocidades del viento, se analiza también la brisa marina como un evento de gran importancia en la morfodinámica del área, siendo un fenómeno de periodicidad diurna y de magnitudes similares a las producidas por los 'nortes', comúnmente de entre 10 y 13  $\text{ms}^{-1}$ .

Las corrientes predominantes en la playa se dan con dirección oeste y paralelas a la costa, con velocidades promedio de 0.25  $\text{ms}^{-1}$ , y máximas de hasta 1  $\text{ms}^{-1}$ , mientras que el oleaje predominante es del noreste, generado por los vientos dominantes de la región, con una altura significativa promedio de 1 m y un periodo promedio de 5 s (Gonzales-Herrera *et al* 2015; Appendini *et al*, 2012). El tipo de marea es mixta con predominancia diurna, y micro-mareal, con rangos de marea de entre 0.1 y 0.8 m durante mareas muertas y vivas respectivamente (Cuevas-Jiménes y Euán-Avila 2009). La amplitud máxima de marea durante el periodo de estudio fue de 1.2 m, medido con un sensor de presión instalado dentro de la marina de Sisal.

Con diferencias topo-batimétricas tomadas entre principios de marzo y finales de abril, se realizó una descripción morfológica del área de estudio, observando que la playa se caracteriza por la presencia de dos barras de arena sumergidas, ubicadas entre 1 y 2.5 m de profundidad (Figura 4). Además, se observan diferencias relevantes en la pendiente de la playa dependiendo de la zona del

perfil: la playa subaérea presenta una pendiente más pronunciada que el resto de la playa con  $\tan\beta = 0.04$ , la playa intermareal y submareal cercana hasta la segunda barra tiene una pendiente  $\tan\beta = 0.01$ , mientras que la playa submareal comprendida entre 2.5 y 5.5 m de profundidad es la pendiente menos pronunciada con  $\tan\beta = 0.005$  (Figura 4).

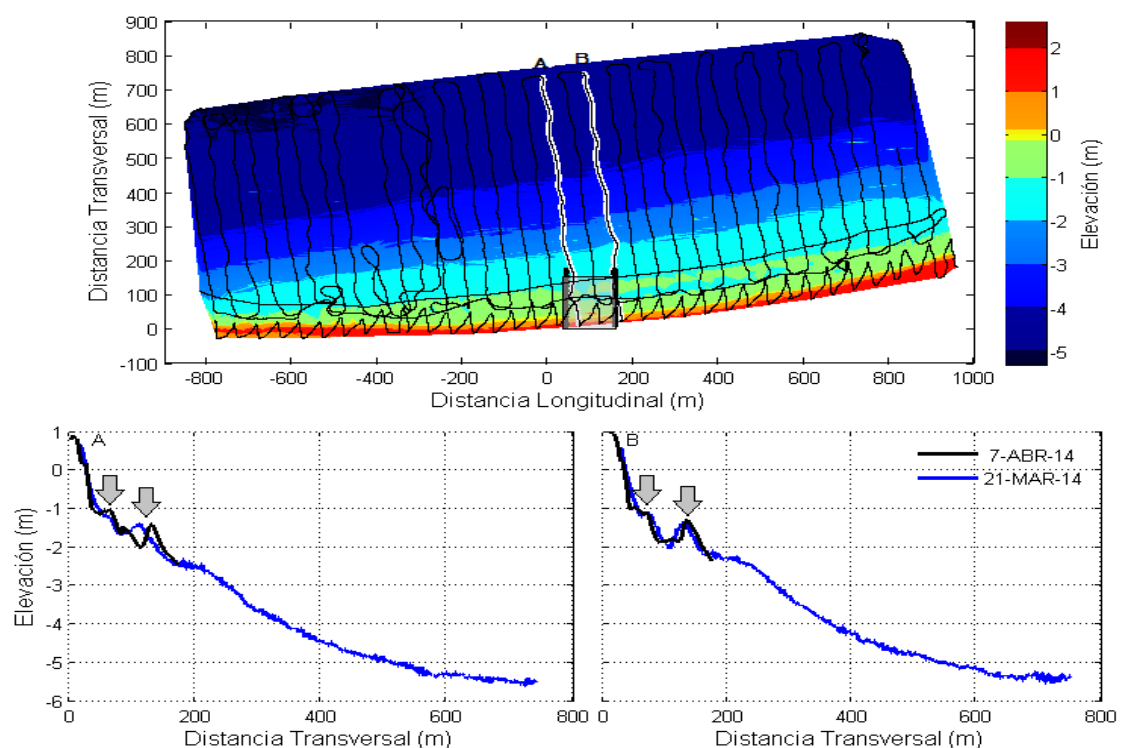


Figura 4. Topo-batimetría de la playa de Sisal medida en marzo. Las líneas negras representan los datos crudos de campo y las blancas dos perfiles que empanan con los medidos en el área de estudio (recuadro en el panel superior). Comparación de los perfiles batimétricos extensos de marzo y los medidos durante la campaña intensiva de abril; las flechas señalan la ubicación de las dos barras sumergidas (paneles inferiores).

Con el fin de describir mejor el área de estudio, en la Figura 5 se muestra la diferencia de elevación que hay entre las topo-batimetrías mensuales que se realizaron en abril y marzo. Se observan dos patrones en los cambios de elevación: uno longitudinal adyacente a la línea de costa, y otro transversal dirigido mar adentro. Gráficamente podemos observar que el cambio longitudinal más notable en la playa se da hasta los 2.5 metros de profundidad (ver perfiles en Figura 5), identificando esta como la profundidad de cierre de la playa para el intervalo de estudio, puesto que el cambio posterior a esta profundidad puede ser despreciable.

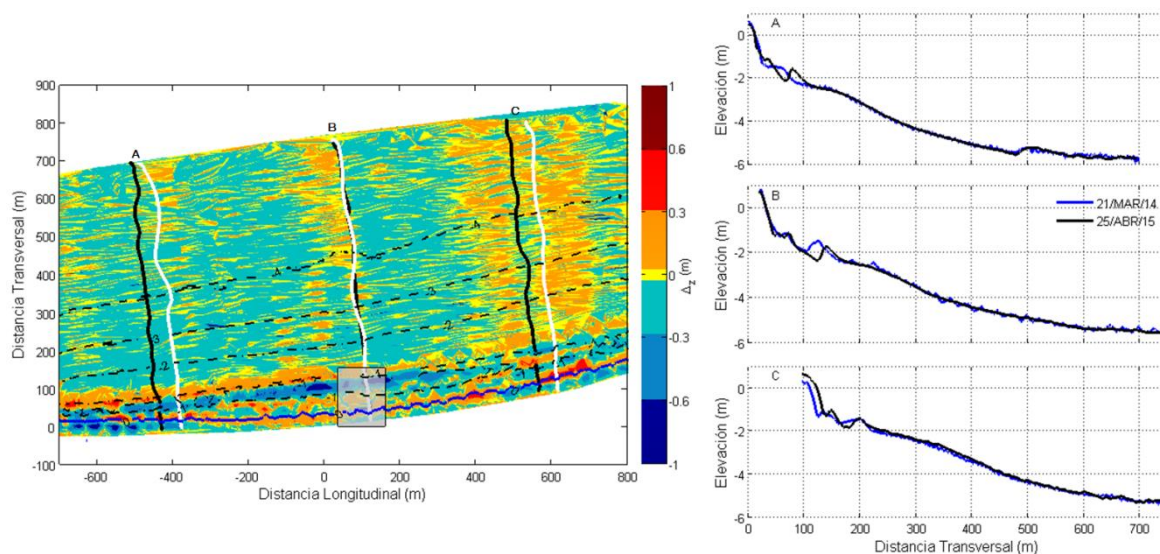


Figura 5. Diferencia de elevación topo-batimétrica entre los meses de marzo y abril del 2014. El mapa a color muestra la diferencia de elevación de un mes a otro, así como 3 perfiles marcados (A, B y C) en blanco los de marzo y en negro los de abril. La línea azul sólida representa el contorno de 0 m y las líneas negras punteadas la batimetría cada metro (panel izquierdo). El panel derecho muestra los cambios entre marzo y abril de los perfiles A, B y C.

Adicionalmente, se calculó la profundidad de cierre utilizando la ecuación 2, obteniendo un valor de  $Z_c=1.8$  m. A través de la Ec. 3 se calculó el parámetro adimensional de valor de caída, utilizando una altura de ola significativa  $H_0=0.8$ m y un periodo de oleaje  $T=6$ s, mientras que el  $w_s$  fue calculado con el tamaño medio de sedimento  $D_{50}=0.15$ mm y las densidades de agua de mar y sedimento de  $\rho=1025$  Kg m<sup>-3</sup> y  $\rho_s=2750$  Kg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Confirmando que la playa de este estudio se clasifica como altamente disipativa con valor de  $\Omega$  igual a 10.3.

## 4. METODOLOGIA

Las mediciones requeridas para cumplir con los objetivos de este trabajo se recabaron en una campaña intensiva de campo realizada en la playa de Sisal durante 11 días comprendidos entre el 1 y el 11 de abril del 2014. La Figura 6 presenta una ampliación del área donde se realizaron las mediciones (recuadro azul en la Figura 3), que es ampliada en la Figura 6.

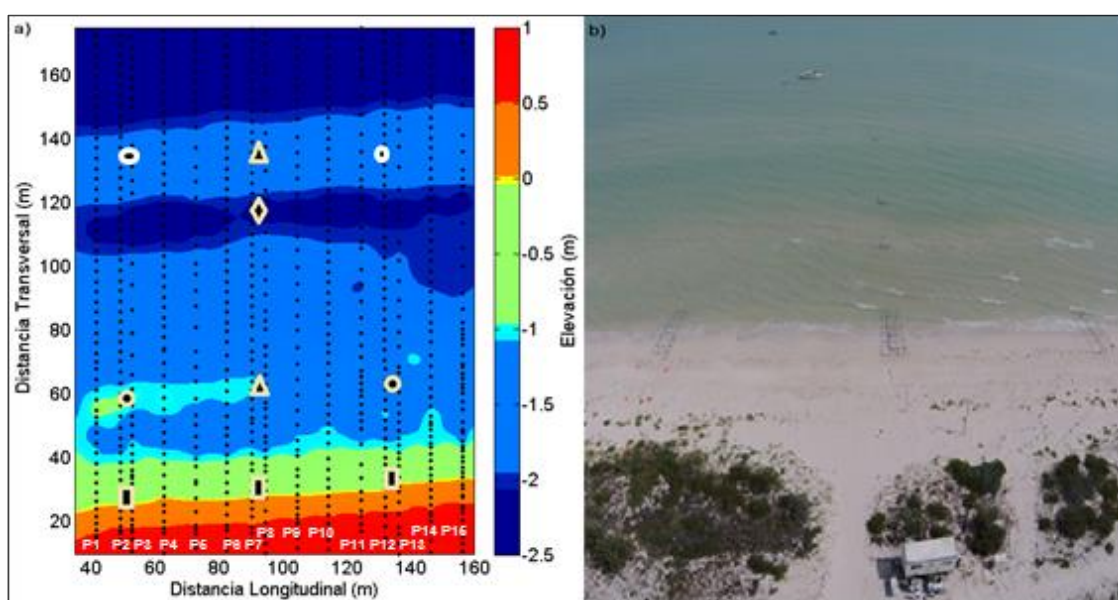


Figura 6. a) Posición de los instrumentos anclados en el área de estudio (descripción en texto) y perfiles utilizados para cálculos de volumen; b) Foto aérea del área de estudio donde se observan las estructuras con los instrumentos (cortesía de Axis ingeniería).

En la Figura 6a se muestra la posición de los instrumentos oceanográficos instalados a diferentes profundidades. Los rectángulos representan anclajes en la playa intermareal, los círculos los anclajes con ADVs (velocímetros acústicos doppler) modelo *Vector* en las estructuras este y oeste de la primera barra, los triángulos indican anclajes equipados con ADVs (velocímetros acústicos

doppler) modelo *Vector* y OBSs (sensores ópticos de backscatter), y el rombo representa un anclaje similar al del triángulo pero que incluye un ADCP (perfilador acústico de corrientes) modelo *Aquadopp*. El análisis para este estudio se realizó utilizando únicamente los instrumentos colocados en el perfil central y sobre las barras sumergidas y el canal entre ellas (triángulos y rombo de la Figura 6a, mostrados en la Figura 7).



Figura 7. Instrumentación utilizada para la colección de datos hidrodinámicos. a) En la zona de swash en un anclaje tipo andamio conformado con tubos de aluminio. b) Anclaje con un Vector colocado sobre la barra somera en los transectos del este y oeste. c) Correntímetro Vector colocado en el transecto central, en un anclaje de aluminio similar al de la zona de swash pero de reducido tamaño.

Se realizaron levantamientos topo-batimétricos diarios con la ayuda de un GPS diferencial y una estación total (puntos negros de Figura 6a marcados de P1 a P15). También, durante la campaña se instaló una estación meteorológica en la

playa para obtener mediciones de dirección y rapidez del viento, se instaló un medidor de presión en la marina de Sisal para conocer el nivel de marea durante el estudio, y dos ADCPs en aguas más profundas (4.3 y 10.1 m) con el objetivo de caracterizar el oleaje fuera de la playa.

#### 4.1. Datos meteorológicos

Los parámetros meteorológicos fueron medidos con una estación meteorológica marca 'Vaisala' con datalogger, instalada en una torre de aluminio de 5 m de altura. Se obtuvieron datos de dirección y rapidez del viento, humedad relativa, presión atmosférica, temperatura y precipitación promedio cada 10 minutos y de forma continua. Los datos fueron analizados para poder determinar los eventos de viento de interés (brisa, calma y 'norte') para el estudio de la morfodinámica de la playa durante esas condiciones precisas. Por tanto, los datos meteorológicos serán analizados junto con la morfología para identificar relaciones entre ambos.



Figura 8. Torre de aluminio colocada en la playa supramareal donde se colocó la estación meteorológica.

#### 4.2. Mediciones de morfología

Se realizaron mediciones topográficas y batimétricas a lo largo de 15 perfiles transversales a la línea de costa, e interpolando dichas mediciones se obtuvo un mapa topo-batimétrico diario. Estos perfiles se obtuvieron combinando el uso de un GPS diferencial y un sistema de estación total (Figura 9). El conjunto de perfiles se midió de forma sistemática una vez por día durante marea baja, aunque algunos días no fue posible obtener estos datos debido a condiciones meteorológicas adversas. Todas las mediciones se realizaron a pie, la colección

de mediciones topográficas se realizó tomando puntos frecuentes y de manera estática a través de los transectos, mientras que las mediciones batimétricas fueron de menor frecuencia debido a que la estación total requiere más tiempo para coleccionar los puntos.

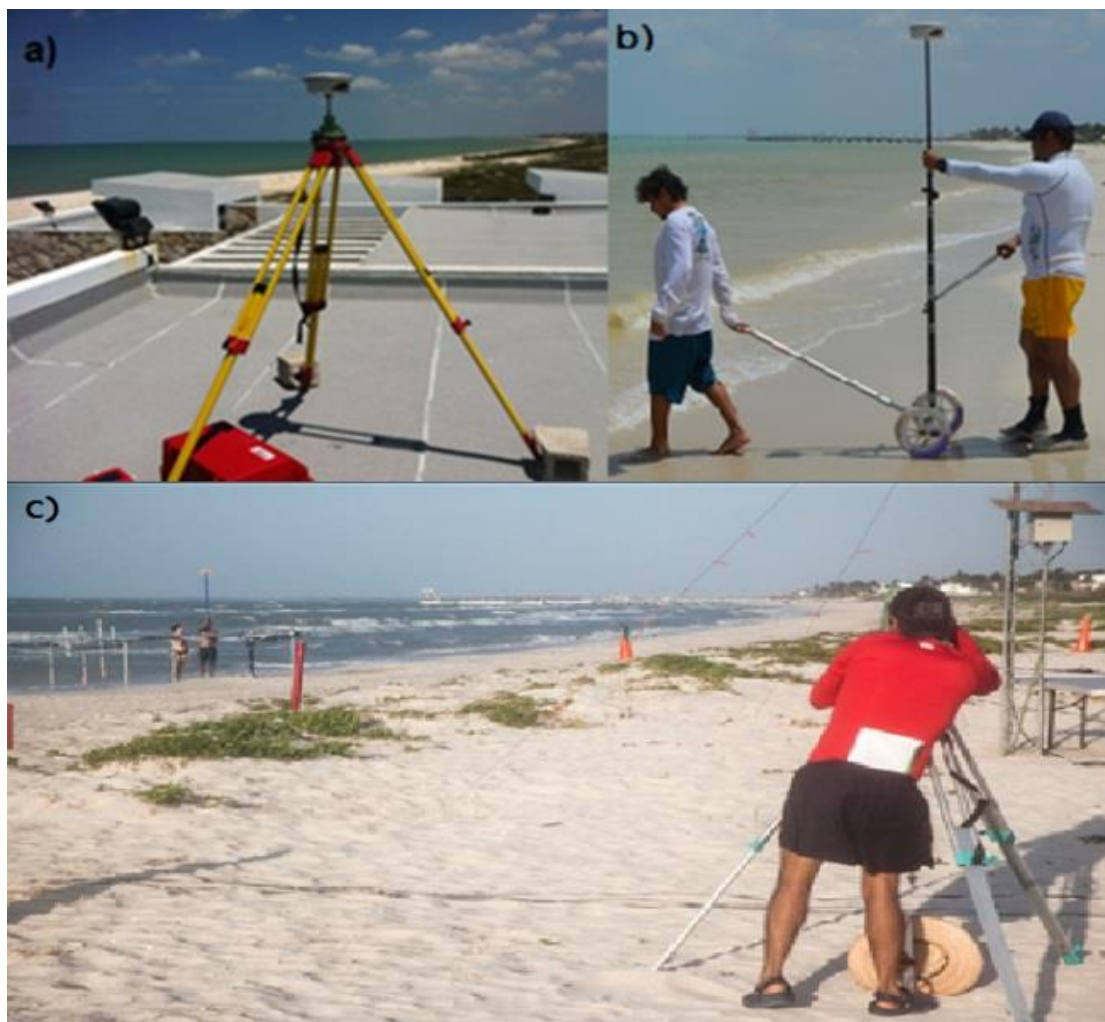


Figura 9. Instrumentación utilizada para la recolección de datos morfológicos. a) Base del dGPS, ubicada en el techo del Instituto de Ingeniería. b) Rover del dGPS operado manualmente. c) Estación total.

### 4.2.1. Evolución de perfiles

Con el fin de determinar la evolución morfológica de la playa por perfil medido, se analizaron 15 perfiles que fueron colectados de forma diaria. Los datos crudos de los levantamientos topo-batimétricos fueron sometidos a una limpieza, en la que se pasó de tener puntos individuales de datos topo-batimétricos esparcidos por toda el área de estudio, a tener datos puntuales acomodados en perfiles identificados de forma individual. Los perfiles limpios (panel derecho, Figura 10), fueron utilizados para llevar a cabo una interpolación.

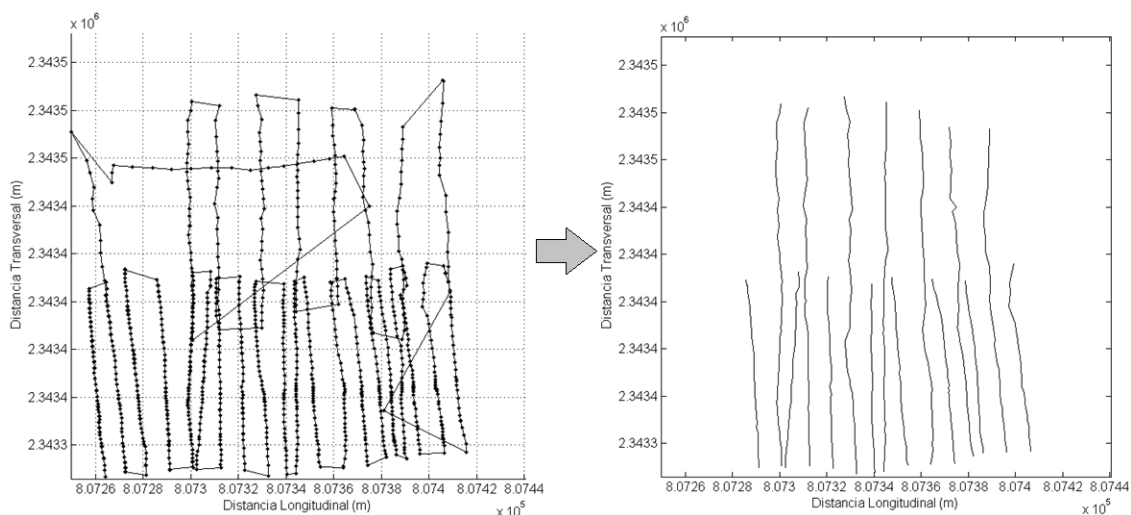


Figura 10. Ejemplo del procesamiento de datos morfológicos diarios, pasando de datos puntuales esparcidos por toda el área de estudio (panel izquierdo) a otra con 15 perfiles topo-batimétricos individuales con datos puntuales acomodados (panel derecho).

Posterior a la limpieza se realizó una interpolación de los perfiles, con la cual se obtuvo la topo-batimetría del área de estudio (Figura 11). De esta interpolación, se extrajeron datos para prolongar los perfiles cortos y que todos tuvieran la misma longitud y que el volumen entre perfiles fuera comparable.

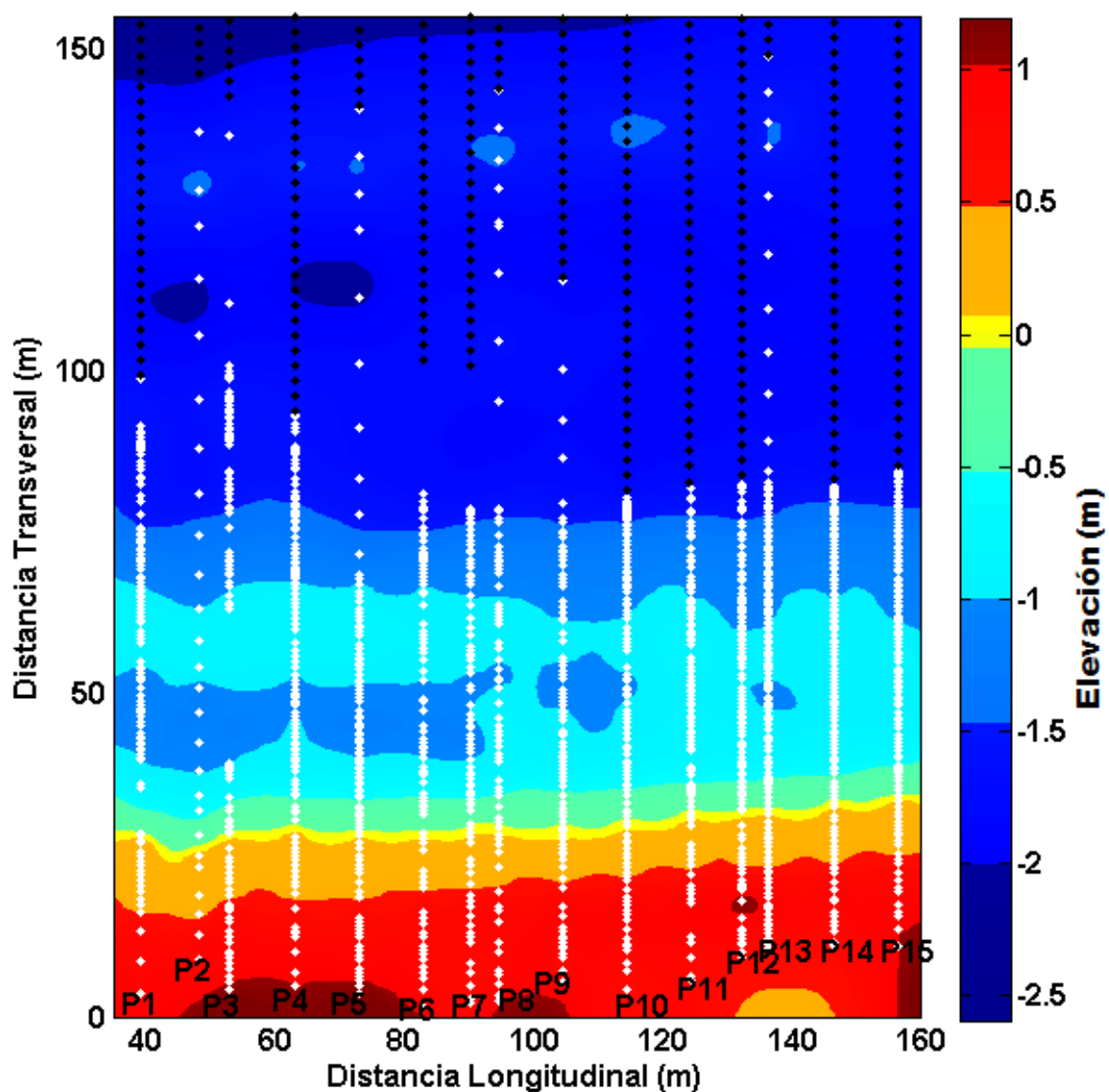


Figura 11. Ejemplo de topo-batimetría obtenida con mediciones de elevación. Los puntos blancos corresponden a los valores medidos y los puntos negros a los obtenidos de la interpolación.

#### 4.2.2. Modelos Digitales de Elevación (MDE's)

Con los mapas topo-batimétricos se elaboraron MDEs, estos se obtienen de la resta de elevaciones entre un mapa y otro, con el fin de interpretar los cambios evolutivos de la playa a lo largo de los diferentes días de muestreo. El análisis de las diferencias de estos MDEs puede explicar el movimiento transversal o

longitudinal del sedimento e inferir procesos de acumulación o erosión en el tiempo. Estos modelos se elaboraron, primero, para analizar cambios de un día a otro, es decir comparando el día 2 y 3 luego el 3 y 4, 4 y 5, etc., y segundo, para calcular cambios acumulados, es decir, al cambio entre el día 2 y 3 se le sumó el cambio entre el día 3 y 4, y así sucesivamente hasta llegar al último día para cuantificar el cambio total acumulado desde el inicio de las mediciones.

#### **4.2.3. Calculo de volumen**

Para realizar el cálculo numérico de volúmenes, se obtuvo el área de un perfil utilizando la fórmula del área de un trapecio  $\left(\frac{b_1+b_2}{2} \cdot h\right)$  en repetidas ocasiones obteniendo áreas trapezoidales entre los puntos medidos de un perfil como se observa en la Figura 12. Posteriormente, se realizó la sumatoria de todas las áreas calculadas, obteniendo finalmente el área total del perfil.

Una vez calculado el área de un perfil, se obtuvo el volumen entre un perfil y otro, promediando el área de dos perfiles continuos y multiplicándola por la distancia que los separa. De esta forma, se obtuvo una serie de tiempo de 12 días de volúmenes por secciones a lo largo de la playa, requerido para realizar el análisis volumétrico longitudinal.

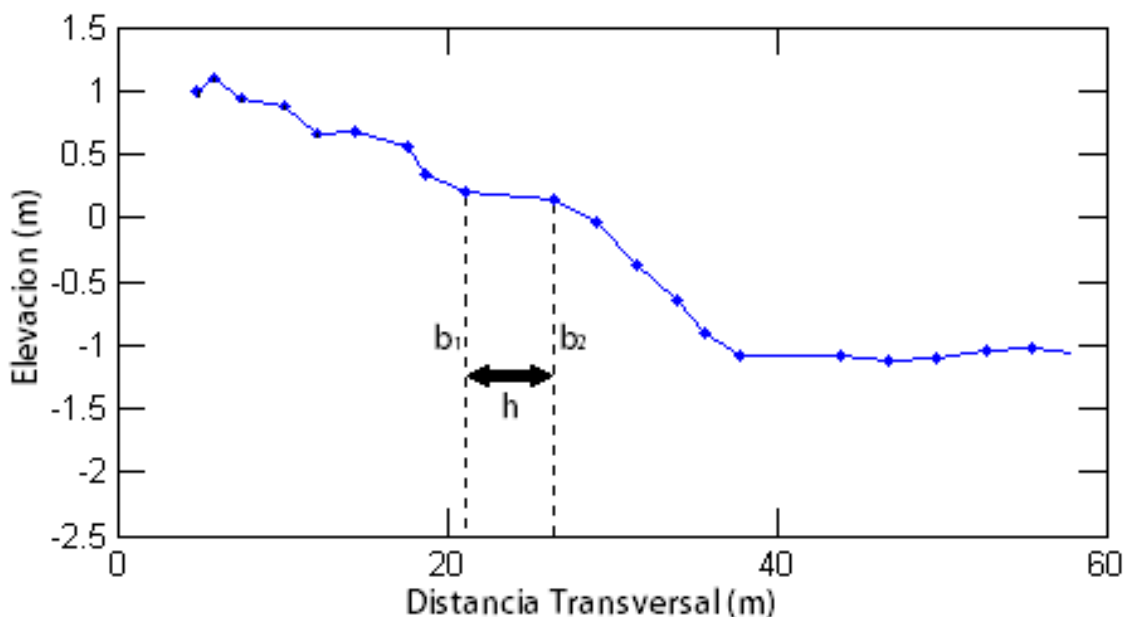


Figura 12. Ejemplo para obtener el área de un perfil de playa.

#### 4.2.4. Posición de las barras sumergidas

La identificación de las barras sumergidas se realizó individualmente con los perfiles topo-batimétricos diarios extrayendo la coordenada de ubicación transversal de su cresta.

Habiendo obtenido las coordenadas de la posición de barras de todos los perfiles en los distintos días, se analizó la posición de la barra y su cambio en el tiempo para determinar su movimiento y cambio morfológico.

### 4.3. Mediciones de hidrodinámica

#### 4.3.1. Mareas

La medición de las mareas se realizó con un sensor de presión instalado en el interior de la marina de Sisal. Los datos de marea tomados con este

instrumento fueron trabajados para referenciar los datos al NMM, ya que se encontraban referenciados a un nivel local de elevación. La referenciación al NMM fue hecha observando la marea predicha y la presión atmosférica, cuando la presión fuera la promedio en condiciones de calma en el área de estudio (1013 mb), se compararon las mareas medidas por el instrumento y las predichas a NMM. A la marea medida se le restó la diferencia entre las dos, obteniendo una elevación con la que se referenciaron los niveles de marea medidos por el instrumento al NMM.

#### **4.3.2. Oleaje**

Con el fin de caracterizar las condiciones de oleaje durante la campaña de campo se instalaron dos perfiladores acústicos de corrientes y oleaje (ADCP modelo RDI) a profundidades de 4.3 y 10.1 m. Midiendo de forma continua en intervalos de 17 minutos, promediados por hora, a una frecuencia de 2 Hz.

Estos, fueron colocados en el fondo con un anclaje parecido al presentado en la Figura 7b, y las variables que se midieron con estos anclajes fueron perfiles con velocidad de las corrientes y presión con los que se infieren los parámetros de oleaje. Esta información fue utilizada para caracterizar el oleaje incidente en la zona de estudio.

#### **4.3.3. Corrientes**

Con el fin de identificar los patrones de transporte de sedimento longitudinal y transversal en el área de estudio, se tomaron mediciones de corrientes y

sedimento en suspensión en la cresta de las barras sumergidas y en el canal entre ellas. Para ello, se instalaron correntómetros acústicos (ADV modelo Vector, Figura 7c) junto con OBSs en estructuras tipo andamio de aluminio conformadas por tuberías ancladas en la arena. Estos instrumentos fueron colocados a lo largo de tres transectos transversales a la playa (este, central y oeste) y sobre la barra somera (M4), el canal (M5) y la barra ubicada a mayor profundidad (M7) (Figura 13). Todos los instrumentos midieron de forma continua a 16 Hz, obteniendo datos de velocidades (componentes  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) puntuales y de sedimento en suspensión a 0.15 m del fondo. Los aparatos fueron colocados de tal manera que los tres anclajes muestren magnitudes de velocidad en la componente  $u$  positivas hacia la costa y negativas hacia fuera de la costa, las magnitudes en la componente  $v$  positivas hacia el oeste y negativas hacia el este y las magnitudes de la componente  $w$  positivas hacia la superficie.

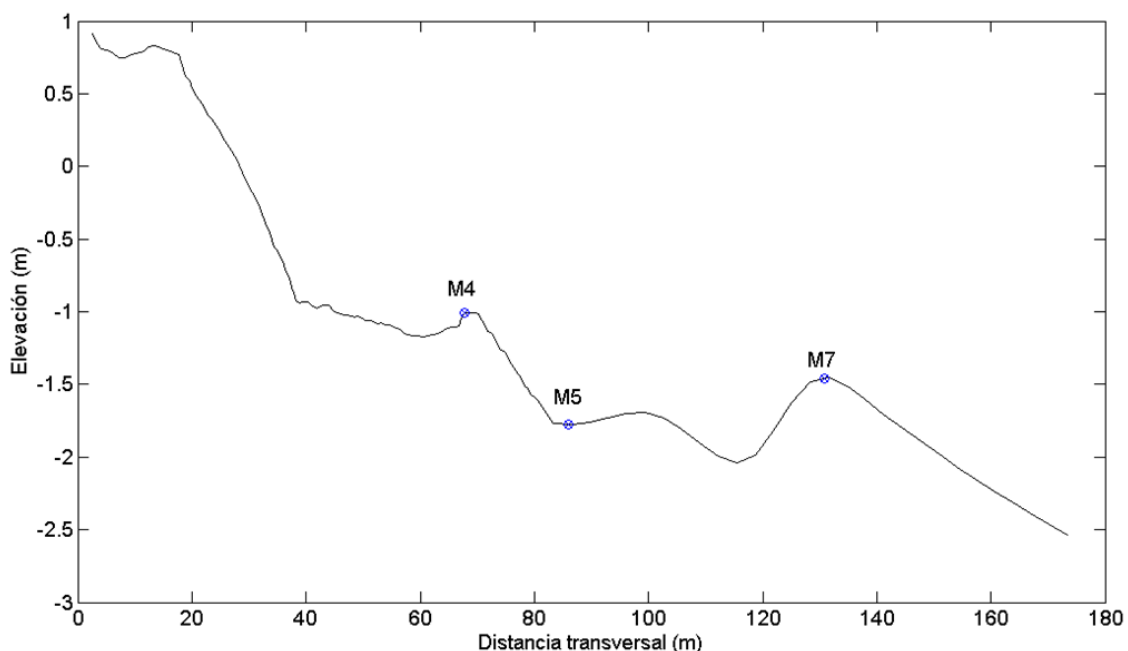


Figura 13. Posición de los anclajes M4, M5 y M7 a lo largo del perfil transversal de playa y analizados en este estudio. Cada anclaje cuenta con un medidor de corriente modelo *Vector* y un sensor de turbidez (OBS).

Con las velocidades de corrientes obtenidas, se realizaron cálculos de energía cinética turbulenta (TKE), la cual nos indica la cantidad de energía que es producida en dirección de la corriente para generar transporte de sedimento. La TKE se calcula con la ecuación

$$TKE = \frac{\langle U'^2 \rangle + \langle V'^2 \rangle + \langle W'^2 \rangle}{2} \quad (7)$$

donde las tildes indican las fluctuaciones respecto al promedio y los corchetes el promedio temporal, cada 900 datos (medidos a 1Hz), obteniendo un valor de TKE cada 15 minutos en cada evento meteorológico de interés y cada instrumento.

El transecto central de instrumentos es el único que incluye mediciones de los OBSs, y corresponden con la localización de los perfiles topo-batimétricos 7 y 8.

Por tanto, las mediciones tomadas a lo largo del transecto central van a ser analizadas para calcular las variaciones de las corrientes y del sedimento en suspensión bajo diferentes condiciones de viento. Los anclajes fueron nombrados M4, M5 y M7, correspondientes a su posición en la barra somera, el canal entre barras y la barra más profunda respectivamente como se observa en la Figura 13.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Meteorología

Con la estación meteorológica se obtuvieron los datos de magnitud y dirección del viento con los cuales se pudo caracterizar los periodos de brisa, calma y tormenta de interés a estudiar (Figura 14).

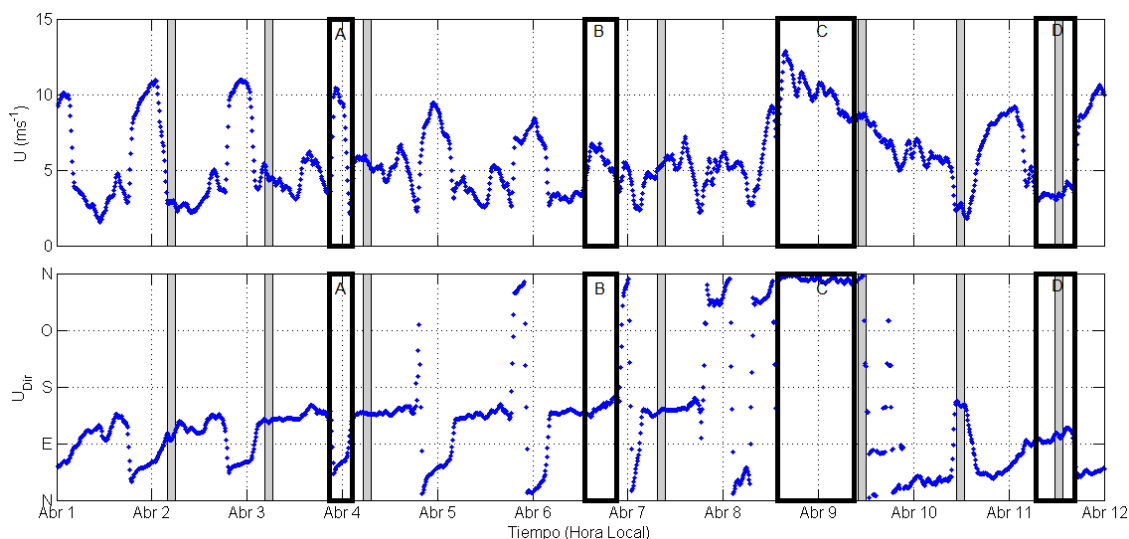


Figura 14. Magnitud (panel superior) y dirección (panel inferior) del viento medido por la estación meteorológica. Para periodos de A) brisa, B) calma antes del 'norte', C) 'norte' y D) Calma posterior al 'norte'. Las áreas sombreadas en gris muestran el tiempo durante el cual se realizaron las mediciones topo-batimétricas.

La brisa marina (A en Figura 14) se caracteriza por suceder durante cortos periodos en la noche (3-4 horas), presentando rachas de viento del noreste con intensidades mayores de  $10 \text{ ms}^{-1}$ . En el día la brisa se dirige de tierra a mar, por tanto, proviene del sureste y tiene magnitudes significativamente más bajas. Durante los periodos de calma (B en Figura 14), el viento proviene del sureste y las magnitudes del viento varían entre  $5$  y  $7 \text{ ms}^{-1}$ . Durante el periodo de 'norte' (C en Figura 14), los vientos provienen del norte y las magnitudes llegan a ser

mayores de  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Finalmente, las condiciones posteriores al 'norte' (D en Figura 14) muestran vientos provienen del este y sureste con magnitudes de 3 a  $4 \text{ ms}^{-1}$ .

Al comparar los tres periodos meteorológicos (A, B y C; Figura 14) se observa que las brisas y los 'nortes' llegan a tener similares magnitudes máximas de velocidad, alcanzando hasta  $12 \text{ ms}^{-1}$ , pero con duración y dirección diferente. Las brisas marinas con dirección noreste tienen una duración estimada de 3 a 4 horas, mientras que el evento de 'norte' en este estudio muestra una duración de aproximadamente 21 horas.

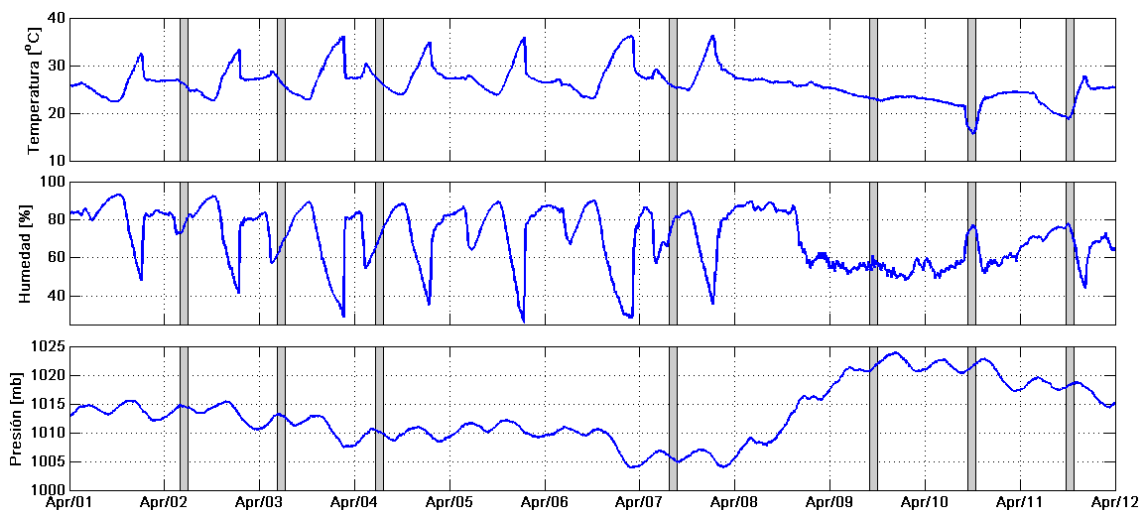


Figura 15. Serie de tiempo de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica (paneles de arriba hacia abajo, respectivamente), obtenidas con la estación meteorológica. Las áreas sombreadas con gris muestran el tiempo durante el cual se realizaron las mediciones topo-batimétricas.

Entre el 1 y 7 de abril la temperatura aumenta al medio día, hasta alcanzar su máximo durante el atardecer y disminuir repentinamente al comenzar el periodo de brisa nocturna con dirección de mar a tierra, posiblemente debido al

enfriamiento de la tierra durante la noche. Durante el 'norte', la temperatura disminuye significativamente hasta los 25°C y se mantiene constante (Figura 15). La humedad tiene el mismo comportamiento que la temperatura, pero invertido, al medio día empieza a disminuir y al atardecer aumenta rápidamente. Por último, la presión se mantiene entre 1008 y 1015 mb entre el 1 y el 6 de abril, el día 7 de abril la presión baja oscilando entre 1002 y 1008 mb, y a partir del día 8 de abril aumenta por causa del 'norte', oscilando entre 1020 y 1015 mb (Figura 15).

## 5.2. Morfología

Con los datos topo-batimétricos se analizó la evolución morfológica del área de estudio. Primero se determinó la variabilidad transversal de varios perfiles en el tiempo para evaluar los cambios antes y después de los eventos meteorológicos de interés. Posteriormente, se analizaron los Modelos Digitales de Elevación para determinar cambios diarios de elevación e identificar procesos de acumulación y acreción a lo largo y ancho de la playa. El siguiente paso fue analizar, cuantitativamente las diferencias volumétricas entre perfiles para, finalmente, determinar la evolución espacio-temporal de las barras en relación a las diferentes condiciones hidrodinámicas.

### 5.2.1. Evolución temporal de perfiles

Para estudiar a detalle la variabilidad transversal de la playa, se realiza una comparación temporal de los perfiles 3, 7, 10 y 14 (Figura 16). El cambio morfológico más significativo en todos los perfiles se da entre el 7 y el 9 de abril,

por efecto del 'Norte'. Se observa un acercamiento de la barra más somera hacia la playa subaérea, y un achatamiento de la barra más profunda, además de depositarse sedimento en el canal entre ambas barras. Posterior al evento de tormenta (11 de abril), se observa una recuperación del perfil de playa (línea roja), principalmente para la sección oeste de la playa (A, B y C, Figura 14).

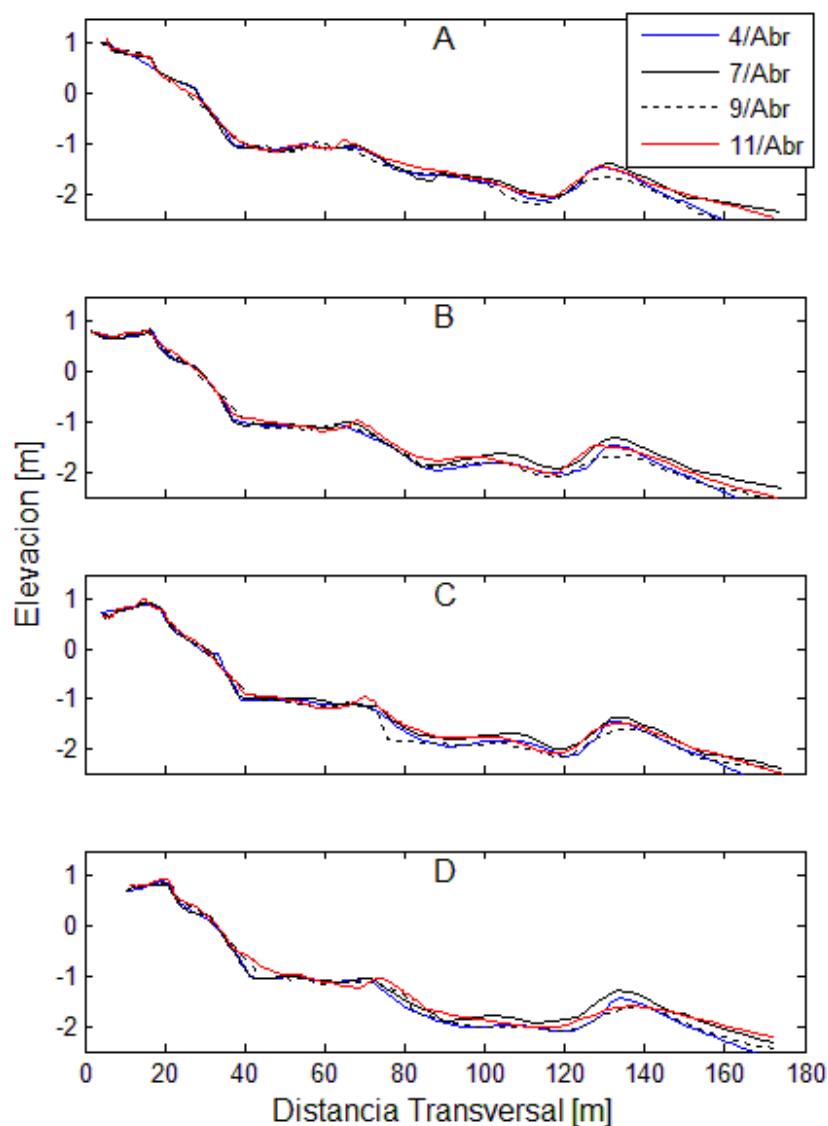


Figura 16. Evolución temporal de los perfiles P3, P7, P10 y P14 ubicados de oeste a este, paneles A, B, C y D, respectivamente. El origen de la distancia transversal se refiere al límite superior de la playa supramareal.

Realizando una comparación longitudinal de todos los perfiles de un mismo día, se pueden observar las variaciones morfológicas longitudinales de las barras (Figura 17). La barra más somera se encuentra entre los 70 y 80 m desde el límite superior de la zona supramareal. Sin embargo, se observa una diferencia longitudinal significativa sobre la posición de las barras sumergidas a lo largo de la sección de playa; en el extremo este ( $P_{14}$ ) las barras se encuentran aproximadamente 10 m más alejadas hacia el mar, que al oeste. Además, la barra más somera se encuentra con menor altura que la barra más profunda a lo largo de la costa. Al día 9 de abril, la barra somera pierde sedimento en la cresta, lo que sugiere que el material erosionado se acumula en el canal (Figura 17). Después de la tormenta el canal se vuelve a erosionar, y las crestas de las barras recuperan su forma, por tanto, la mayoría de los perfiles vuelven a su forma inicial (Figura 17).

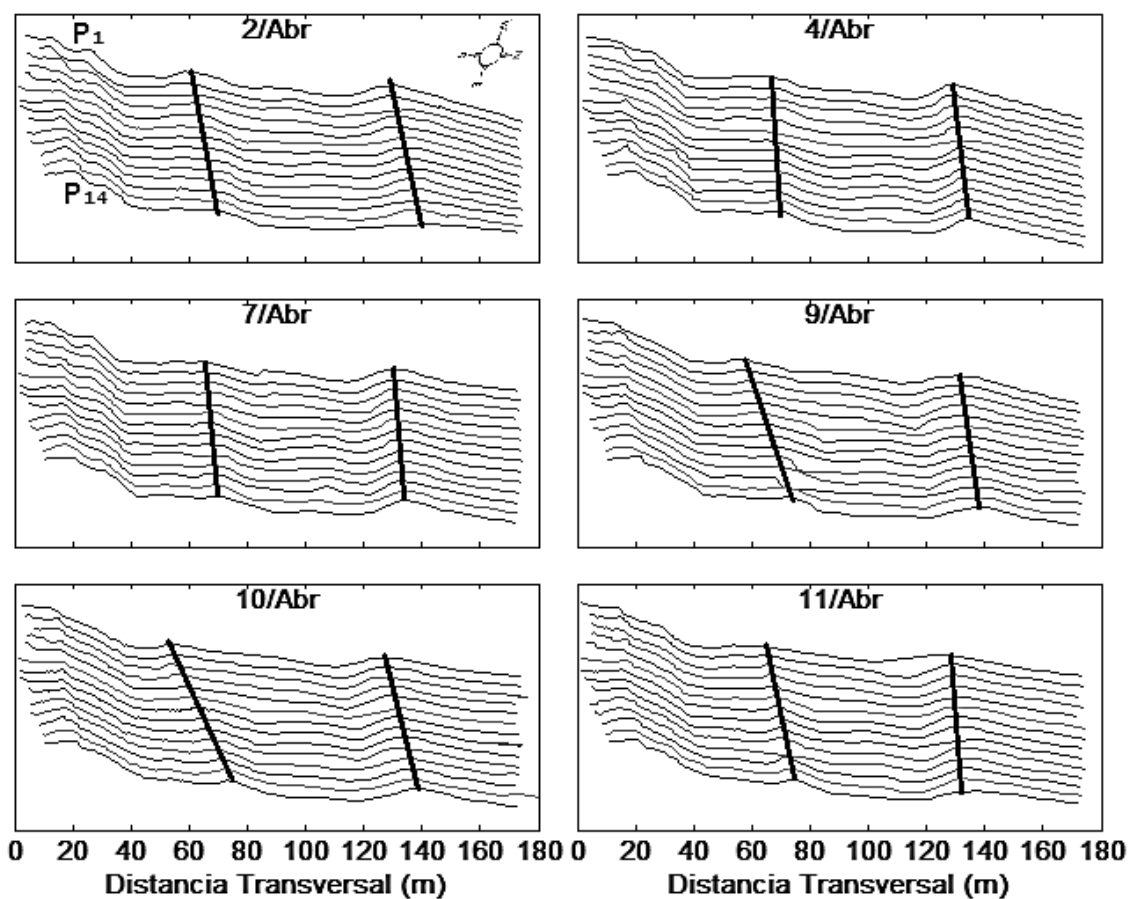


Figura 17. Evolución longitudinal de perfiles por cada día de medición.

### 5.2.2. Evolución morfológica transversal y longitudinal

Para entender los cambios morfológicos temporales ocurridos en la playa, tanto de forma transversal como longitudinal, se analizaron las diferencias diarias de los MDEs. Las diferencias sugieren la dirección y magnitud del movimiento de sedimento, indicando acreción en los cambios positivos y erosión en los negativos. Con el fin de entender la profundidad a la que ocurren dichos cambios, se añaden los contornos topo-batimétricos a los MDEs, de esta forma, se puede identificar la ubicación de la variabilidad morfológica (en las barras o en el canal). El sistema de coordenadas determinado para los MDEs ubica el

origen (0,0) en el límite superior de la playa supramareal y extremo oeste de la playa.

Restando los MDEs entre sí se evaluó la variabilidad morfológica entre los diferentes días (Figura 18). Se observa que durante las condiciones de viento de brisa (2 a 4 de abril), hubo cambios morfológicos de erosión y acreción de la misma magnitud (0.25 m), el sedimento erosionado se depositó de forma dispersa a diferentes profundidades (paneles A y B, Figura 18). Del 4 al 7 de abril las brisas se debilitaron y predominó un periodo de calma (B de Figura 14). Durante este periodo, se observa una acumulación de sedimento (0.5 m) en la playa submareal hasta la barra más somera y poca erosión (0.25 m) entre profundidades de 0 y 1 m y en algunas partes de la playa supramareal (panel C, Figura 18).

Entre los días 7 y 9 de abril ocurrió el evento de 'norte', el cual causó erosión significativa en la playa submareal lejana (distancia transversal de 100 -150 m), y en particular de hasta 0.5 m a la distancia transversal de 130 m, correspondiente a la segunda barra sumergida (panel D, Figura 18). Se estima que parte del sedimento erosionado fue acumulado en la barra más somera, ubicada a una distancia transversal de ~80 m (panel D, Figura 18). Al debilitarse el 'norte', entre los días 9 y 10 de abril, se da la recuperación de la playa submareal, aunque ocurre erosión en la playa subaérea (intermareal y supramareal) (panel E, Figura 18). Entre los días 10 y 11 de abril, el viento cambia a noreste y vuelve el régimen de brisas (Figura 14), favoreciendo la

acreción de prácticamente la totalidad de la playa estudiada, y por tanto, generando una recuperación después del evento de tormenta (panel F, Figura 18).

La evolución morfológica de la playa se determinó a través del cálculo de la suma acumulada de las diferencias de los MDEs en el tiempo (Figura 19). Durante las condiciones de brisas marinas (del 2 al 4 de abril) el cambio morfológico acumulado indica que la playa está sujeta a erosión débil (0.25 m), y el sedimento erosionado tiende a acumularse en la playa subaérea, entre los 80 y 130m de distancia transversal, correspondientes a la posición de las barras sumergidas (paneles A y B, Figura 19).

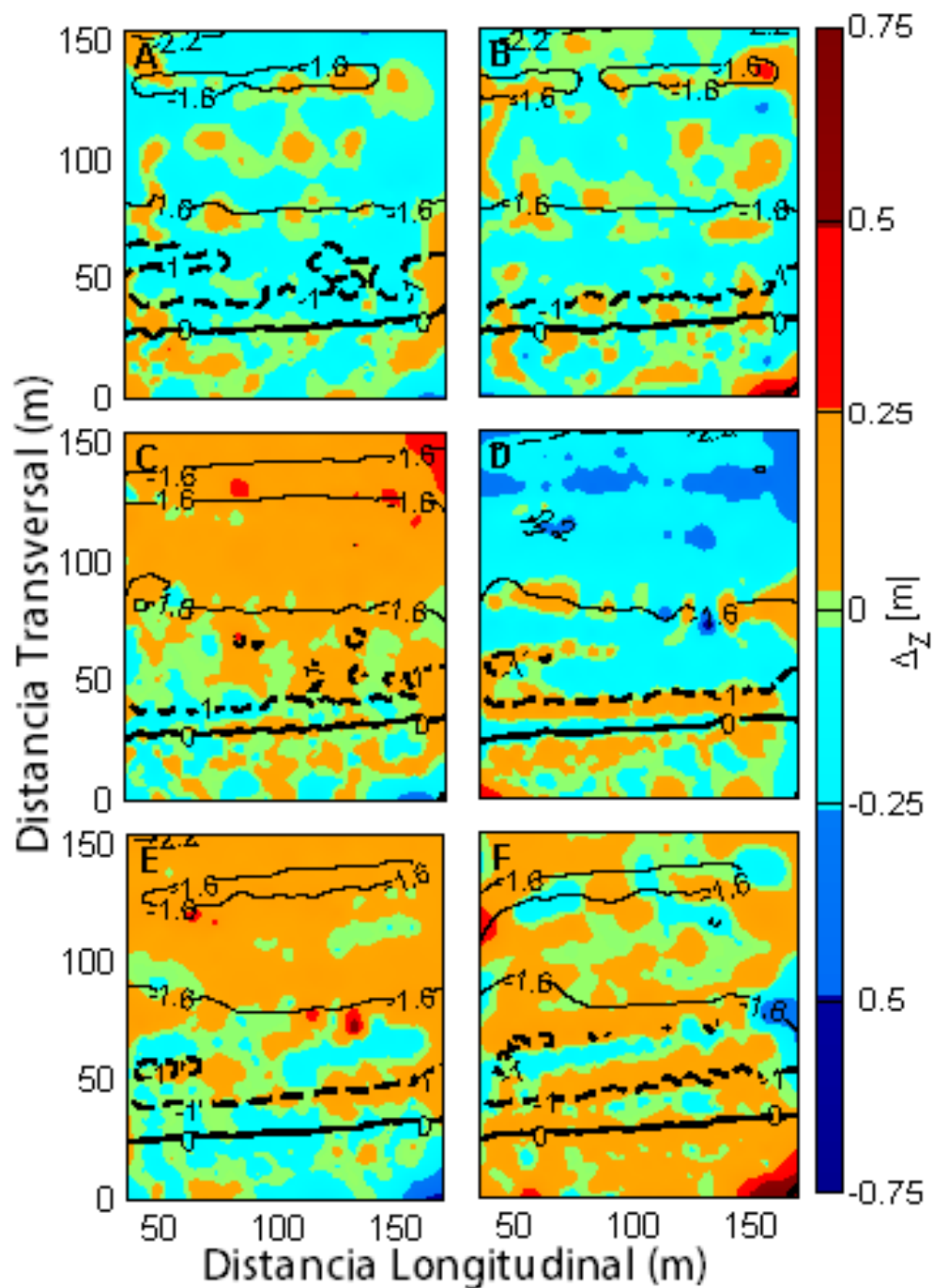


Figura 18. Diferencias de elevación diaria en el área de estudio, los colores representan la diferencia de elevación, mientras que las líneas sólidas y punteadas representan la batimetría del área de estudio. A) Diferencia entre los días 2 y 3 de Abril, B) Diferencia entre los días 3 y 4, C) Diferencia entre los días 4 y 7 de Abril, D) Diferencia entre los días 7 y 9 de Abril, E) Diferencia entre los días 9 y 10 de Abril, y F) Diferencia entre los días 10 y 11 de Abril.

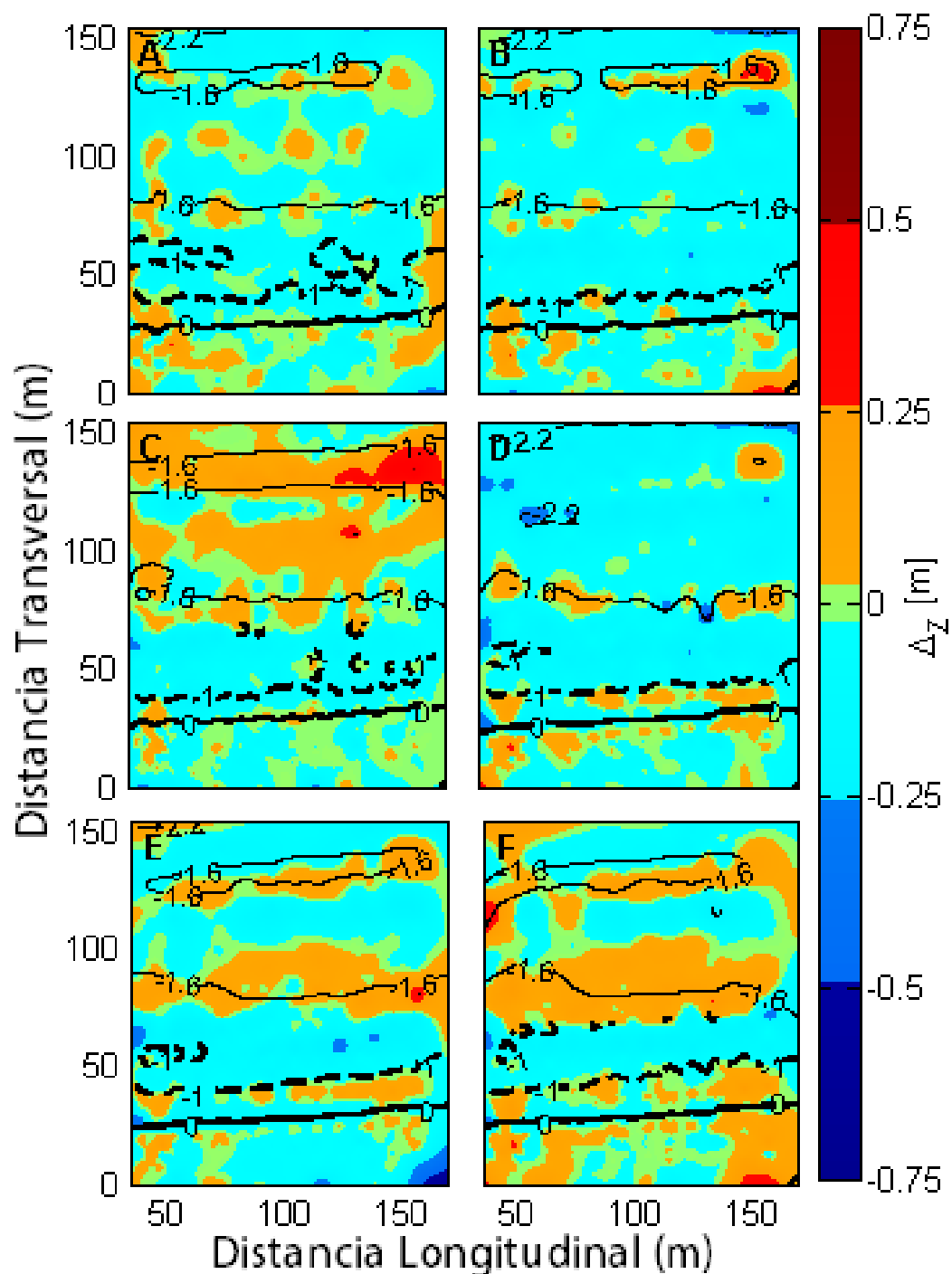


Figura 19. Diferencias acumulada a lo largo del tiempo, en color se muestra la diferencia de elevación mientras que las líneas sólidas y punteadas representan la batimetría del área de estudio. A) Diferencia entre las días 2 y 3 de Abril, B) Diferencia entre las días 2 y 4 de Abril, C) Diferencia entre las días 2 y 7 de Abril, D) Diferencia entre las días 2 y 9 de Abril, E) Diferencia entre las días 2 y 10 de Abril, y F) Diferencia entre las días 2 y 11 de Abril.

Entre los días 4 y 7 de abril, durante condiciones de brisas débiles y calma (B en Figura 14), se depositó una cantidad significativa de sedimento en la playa submareal (a la distancia de las barras sumergidas), mientras que el resto de la playa no parece modificarse (panel C, Figura 19). La llegada del Norte erosiona todo el material depositado anteriormente (entre los días 4 y 7) y acumula parte del material erosionado en la playa intermareal y submareal cercana (arriba de la cota -1 m) (panel D, Figura 19). En cuanto el evento de 'norte' se debilita, entre los días 9 y 10 de abril, se deposita sedimento (0.25 m) principalmente en las barras sumergidas, mientras que no se da ningún cambio morfológico relevante en el resto de la playa (panel E, Figura 19). La acreción de sedimento en las posiciones de 80 y 130 m continúa entre los días 10 y 11 de abril, y además, se deposita arena en gran parte de la playa subaérea (panel E, Figura 19).

### **5.2.3. Variabilidad volumétrica**

Con el objetivo de cuantificar los cambios morfológicos medidos en la playa, se llevó a cabo, por un lado el cálculo de volúmenes totales de sedimento cada día (Figura 20) y, por otro, el de volúmenes restándoles el valor promedio obtenido del 2 al 11 de abril (Figura 21). La Figura 20 muestra que del 2 al 4 de abril (periodo de dominancia de brisas), el volumen de la sección de playa va disminuyendo poco a poco, pasando de 33,928 a 31,596 m<sup>3</sup> en este periodo de tres días.

Entre los días 4 y 7 de abril, durante el periodo de calma antes de la tormenta, se muestra una pequeña recuperación, pasando de 31,596 m<sup>3</sup> el día 4 de abril a 32,390 m<sup>3</sup> el día 7 de abril (Figura 20). El 9 de abril, día después de la tormenta, la playa presentó una disminución, pasando de 32,390 a 29,077 m<sup>3</sup>, sin embargo, los días posteriores (10 y 11 de abril), se presenta una rápida recuperación volumétrica, principalmente entre los días 9 y 10 de abril, momento en el que se debilita el norte y se invierte la dirección del viento, aumentando de 29,077 m<sup>3</sup> el 9 de abril a 33,535 m<sup>3</sup> el día 11 de abril. El volumen de sedimento de la playa el día 11 de abril fue similar al del día 2 de abril, presentándose un balance negativo de 392 m<sup>3</sup>, después de un cambio global de hasta 4,850 m<sup>3</sup>.

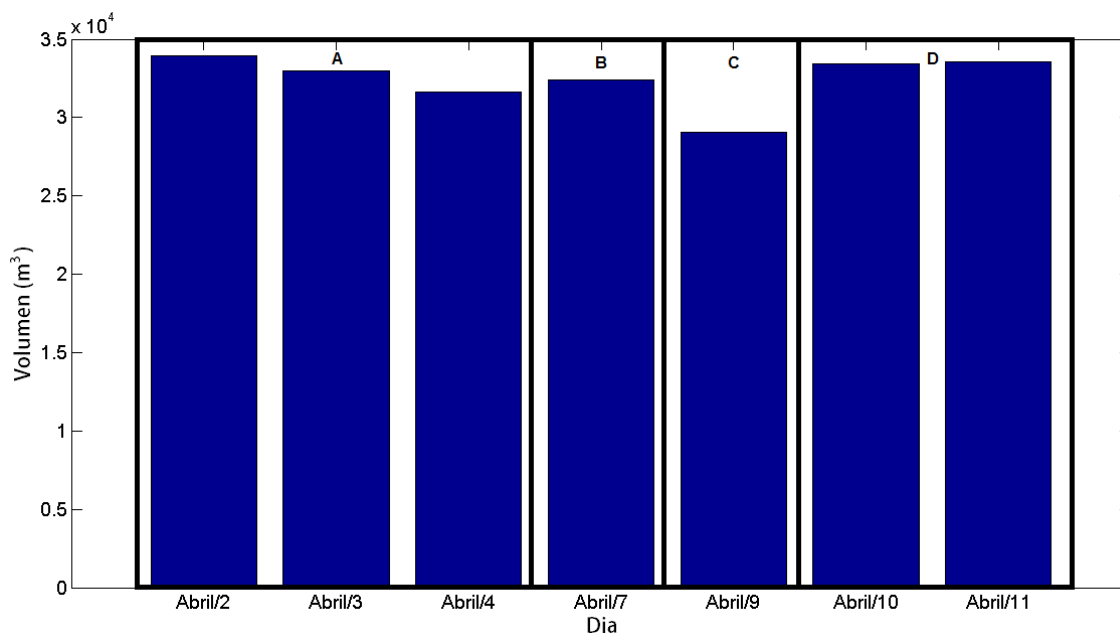


Figura 20. Volumen total (en m<sup>3</sup>) de la sección de playa de estudio por día, y relacionado a los periodos meteorológicos: A) Brisas, B) Calma antes del 'norte', C) 'norte' y D) Calma después del 'norte'.

Restando el promedio volumétrico del 2 al 11 de abril a cada uno de los volúmenes calculados por día (presentados en la Figura 20), se obtiene la varianza volumétrica diaria respecto a ese promedio (Figura 21). Durante el periodo de brisas entre los días 2 y 4 de abril la playa muestra una pérdida volumétrica gradual de hasta  $2,350 \text{ m}^3$ , mientras que en el periodo de calma entre los días 4 y 7 se da una recuperación de hasta  $800 \text{ m}^3$  (Figura 21). Entre el 7 y 9 de abril, debido al evento de 'norte', se da una pérdida volumétrica de  $3,300 \text{ m}^3$ , y un día después del norte (10 de abril) la playa se recupera significativamente, con un aumento de  $4,360 \text{ m}^3$  en un solo día, y entre los días 10 y 11 vuelve a haber una ligera acreción en la playa, de  $100 \text{ m}^3$ .

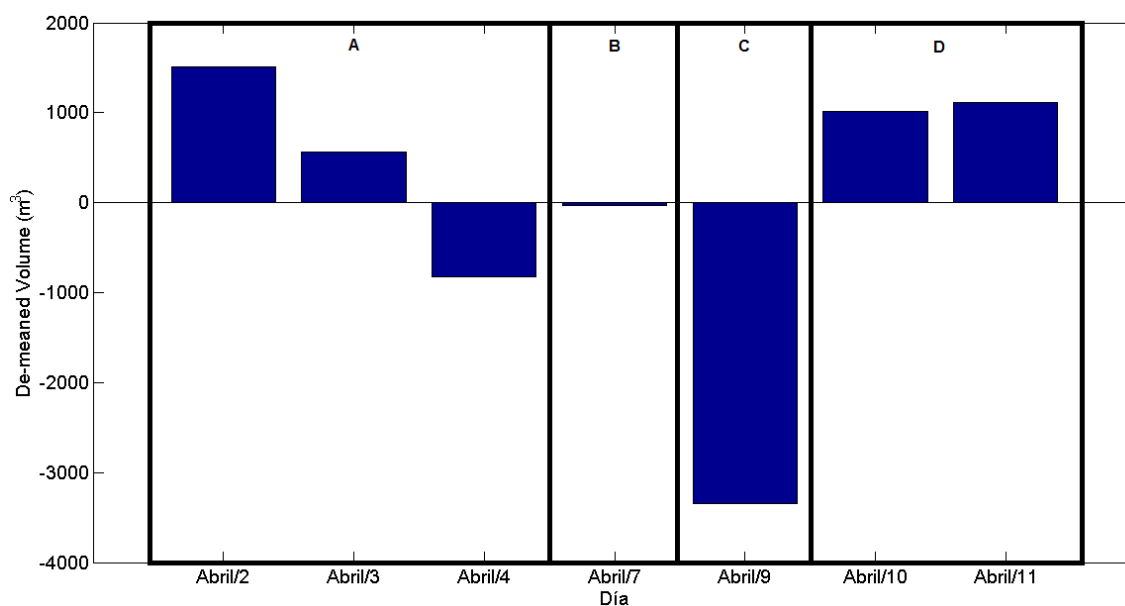


Figura 21. Volumen de sedimento obtenido de la resta hecha al volumen total de la media de volumen en los 7 días, dandonos un cambio de volumen por día con respecto a la media de todos los días, y relacionados a los eventos meteorológicos: A) Brisas, B) Calma antes del 'norte', C) 'norte' y D) Calma después del 'norte'.

Con el fin de determinar el cambio volumétrico a lo largo de la playa, se calculó la diferencia de volúmenes para cada perfil respecto al volumen promedio de ese perfil entre los días 2 y 11 de abril (Figura 22). En términos generales, se observan diferencias a lo largo de la playa, la sección de playa del oeste (los primeros 60 m) es más dinámica que el resto del área de estudio.

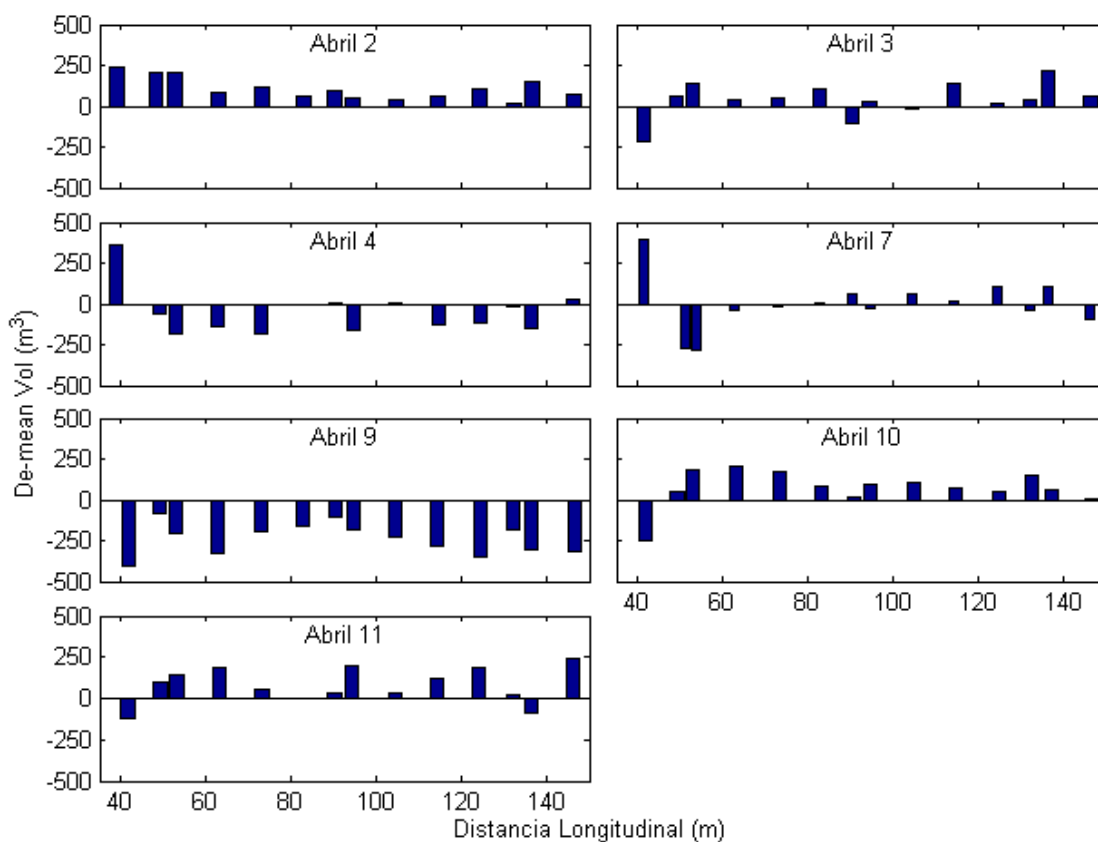


Figura 22. Cambio temporal del volumen de sedimento para cada perfil respecto al promedio volumétrico calculado para cada perfil del 2 al 11 de abril. El eje x muestra la distancia longitudinal de la playa desde el extremo oeste.

Entre los días 2 y 4 de abril se observa una pérdida gradual de sedimento, la arena erosionada parece redistribuirse de forma dispersa a lo largo de la playa formando celdas de ganancia y pérdida de sedimento. El extremo oeste (perfiles P1 y P2) es muy dinámico, y presenta cambios drásticos de erosión y acreción durante el periodo de estudio.

Durante el periodo de calma del 7 de abril, se observa un ligero aumento de sedimento al este del área de estudio. Al día siguiente a la tormenta (9 de Abril), se observa disminución muy notable de sedimento a lo largo de todo el área de estudio, indicando un transporte principalmente transversal y dirigido hacia afuera, por el lado este del área de estudio. Posterior al 'norte' (10 abril) se observa una rápida recuperación de volumen de sedimento a lo largo de toda la playa, y en particular, un aumento mayor en la mitad oeste, quizá relacionado con la erosión ocurrida en los primeros 50 m playa. El 11 de abril se observa que la playa recibe más sedimento, y se distribuye con cierta ritmicidad longitudinal

La Figura 23 muestra la serie de tiempo volumétrica (eje y) para cada perfil de playa medido (eje x) y los volúmenes presentados son los cambios porcentuales de la diferencia volumétrica respecto al del primer día (2 de abril) para cada perfil. Estos resultados muestran que la playa presenta cambios volumétricos longitudinales muy diferentes, y no está clara la presencia de celdas a lo largo de la sección de playa estudiada. En general se observa que durante los eventos de brisa se distribuye sedimento a lo largo de la playa

induciendo principalmente erosión y algo de acreción (de hasta 5 %) en algunos puntos; mientras que el evento de 'norte' genera una erosión casi homogénea de hasta un 15% del volumen total a lo largo de la sección de playa (Figura 23).

Los cambios volumétricos entre los días 2 y 4 de abril, respecto al día 2 muestran erosión de hasta el 10%; del día 2 al 3 de abril se observa una disminución menor al 5%, del día 3 al 4 se dan disminuciones del 5 al 10 %, por la presencia de brisas más intensas (Figura 14), y durante el periodo de calma (entre los días 4 y 7) hay una disminución volumétrica menor al 5% y una acreción de hasta un 10% de en el perfil 1 (Figura 23). Posteriormente, entre los días 7 y 9 de abril, periodo de la tormenta, se dan los cambios volumétricos negativos de mayor magnitud, de hasta 15%. Los días posteriores a la tormenta (del 9 al 11 de abril) no se presentan fenómenos de brisa durante la noche (Figura 14), y se observan un aumento diario del 5% en la mayor parte de la playa (excepto el extremo oeste), favoreciendo la rápida recuperación la playa (Figura 23).

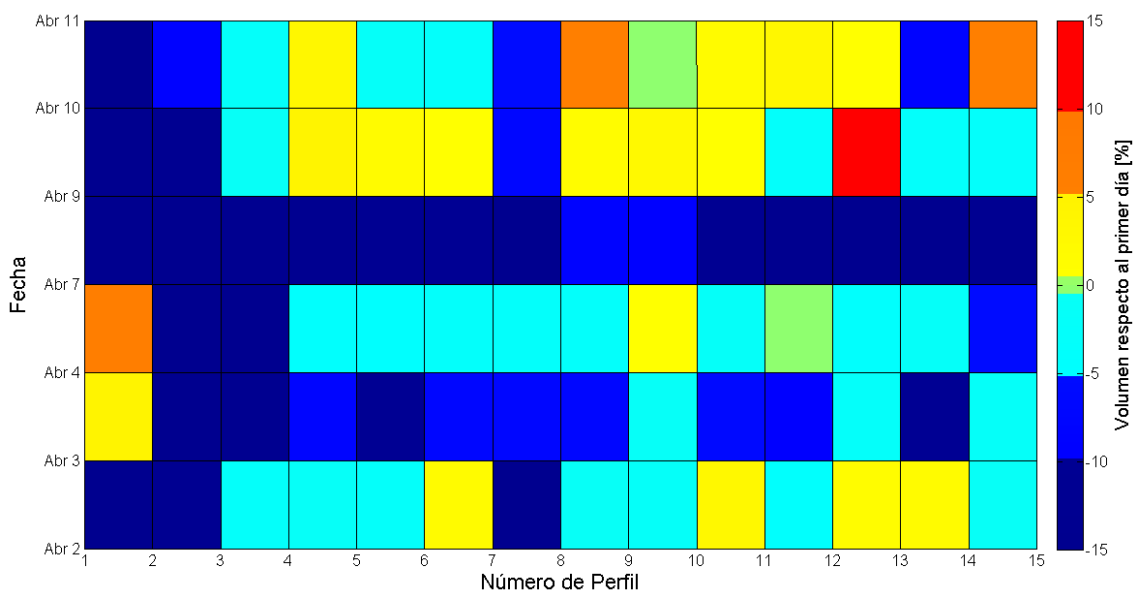


Figura 23. Cambio volumétrico porcentual respecto al del primer día de muestreo (2 de abril) para cada perfil (eje x) en el tiempo (eje y)

#### 5.2.4. Variabilidad espacial de las barras sumergidas

Para determinar los cambios de posición transversal y longitudinal de las barras sumergidas, se utiliza la posición de la cresta de las barras como indicador del movimiento. Ambas barras muestran una migración máxima de hasta 20 m mar adentro en el periodo de estudio, sin embargo, la barra somera es mucho más dinámica que la más profunda (Figura 24y Figura 25).

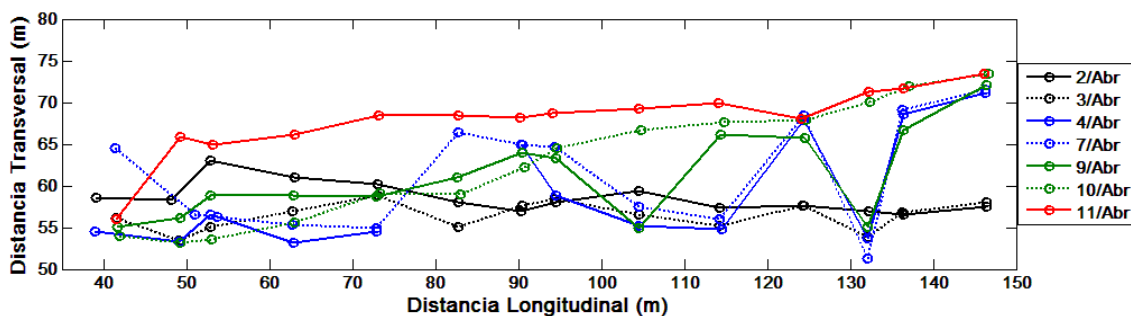


Figura 24. Evolución temporal de la posición de la cresta en la barra somera

La barra somera se ubica a una distancia transversal promedio de ~57 m y longitudinalmente es casi homogénea entre el 2 y 3 de abril, a excepción de la sección longitudinal entre los 45 y 65 m, donde se observa una migración de la cresta de hasta 8 m hacia la zona intermareal (Figura 24). Entre el 3 y 4 de abril las crestas de la barra de la mitad este de la playa migran hasta 10 m mar adentro. Durante el periodo de calma entre el 4 y 7 de abril, no ocurren cambios sustanciales, las barras se mantienen prácticamente en la misma posición.

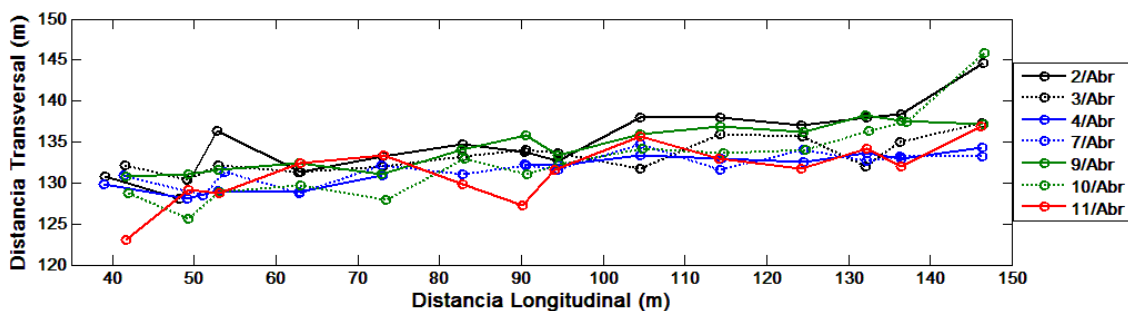


Figura 25. Evolución temporal de la posición de la cresta en la barra sumergida más profunda.

Durante el evento de 'norte' entre el 7 y 9 de abril, la barra somera no presenta movimientos significativos, aunque partes de la barra se alejan de la costa (e.g. secciones longitudinales en 60 m y 105 m) (Figura 24). Después de la tormenta, entre los días 9 y 11 de abril, la barra migra mar adentro, y el día 11 de abril la cresta de esta barra se ubica en su punto más alejado (con excepción al perfil 1 ubicado en el extremo oeste) presentando una migración total promedio de 10 m, y un cambio de orientación de la barra de estar alineada con inclinación negativa a tener una positiva hacia el este (Figura 24).

Por el contrario, la barra profunda no presentó tanta variabilidad longitudinal (Figura 25), y a diferencia de la barra somera, mantiene la misma inclinación positiva diagonal, más alejada de la costa del lado este y más cercana del lado oeste.

Durante las condiciones de brisa, del 2 al 4 de abril, la barra profunda migra alrededor de 3 m del lado oeste y 8 m del lado este hacia la costa, disminuyendo su pendiente con respecto a la línea de costa. Durante el periodo de calma entre el 4 y 7 de abril la posición se mantiene prácticamente estable. El evento de 'norte' aleja la barra de la costa entre 3 y 5 m, principalmente en la sección este de la playa (comparación entre 7 y 9 de abril, Figura 25), mientras que la barra en la sección oeste de la playa se mantiene bastante estable. Después de la tormenta (entre el 9 y 11 de abril) la barra migra hacia la costa, principalmente en la sección este de la playa, cambiando así la orientación oblicua longitudinal, y alineándose a la línea de costa (Figura 25).

### 5.3. Hidrodinámica

#### 5.3.1. Mareas

La Figura 26 muestra una comparación entre la marea predicha y la medida con el sensor de presión.

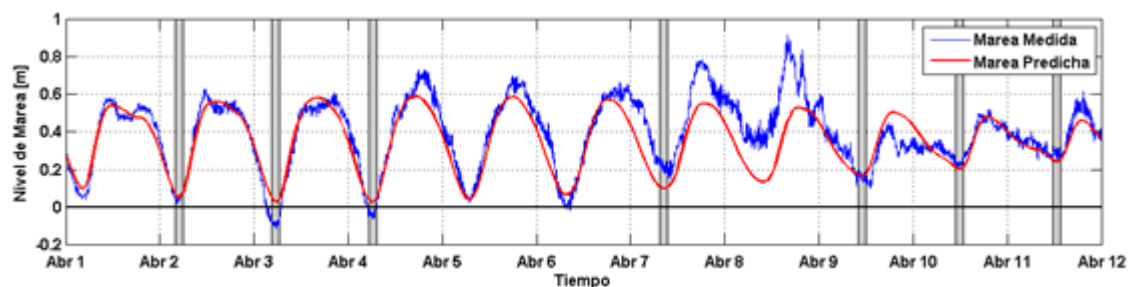


Figura 26. Comparación entre la marea predicha para el puerto Progreso y la medida en la marina de Sisal.

Se observa el desfase de las mareas significativo durante el periodo de 'norte' característico de eventos de tormenta.

### 5.3.2. Oleaje

Las condiciones de oleaje fueron medidas a dos profundidades diferentes (4 y 10 m, Figura 27). Las mediciones de oleaje somero (a 4 m de profundidad) muestran que durante la noche hay una altura de ola significativa de hasta 0.6 m con periodo de 4 s, mientras que en el día son de entre 0.3 y 0.4 m de altura y periodo de hasta 3 s. Durante el periodo de 'norte' la altura de ola alcanza 1 m de altura y periodo de entre 6 y 8 s.

A los 10 m de profundidad, se observa en las mediciones que durante la noche se alcanza una altura de ola significativa de hasta 1 m con periodo de 5 s, mientras que en el día son de entre 0.5 y 0.7 m de altura y periodo de entre 3 y 4 s. Durante el periodo de 'norte' la altura de ola alcanza 1.5 m de altura y periodos de entre 6 y 9 s.

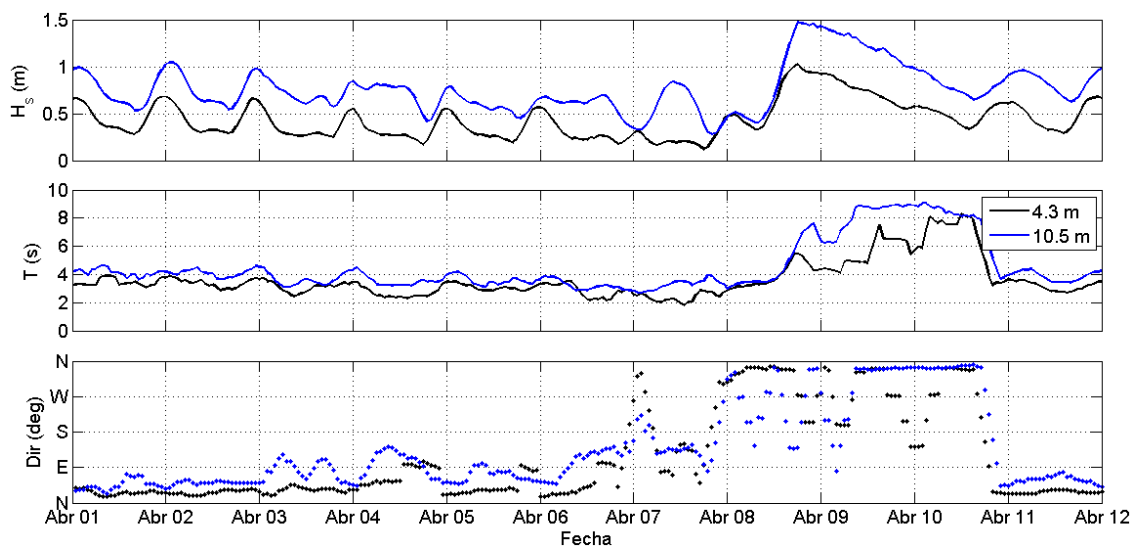


Figura 27. Serie de tiempo de mediciones de altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo ( $T$ ) y dirección del oleaje tomados a 4.3 y 10.5 m de profundidad.

La dirección del oleaje predominante en ambos casos es del este-noreste, con excepción de algunos eventos de brisa y durante el 'norte', que la dirección del oleaje es directamente del norte.

### 5.3.3. Corrientes

Con el fin de caracterizar la dinámica de corrientes en condiciones de brisas, periodo de calma, evento de 'norte' y después de 'norte', sobre las barras y el canal entre ellas, se analizan las componentes  $u$  y  $v$  de la velocidad en las posiciones M4, M5 y M7 (Figura 13). Comparando las componentes  $u$  y  $v$  para los tres instrumentos (Figura 28, Figura 29 y Figura 30) se observa que las magnitudes son mayores durante la brisa (del 2 al 4 de abril) y durante el 'norte' (del 8 al 9 de abril) que en el resto de periodo de muestreo. Los valores de TKE y sedimento en suspensión, se relacionan con la magnitud de las corrientes,

indicando que, a mayores velocidades, mayor será la energía cinética turbulenta (TKE) al igual que el sedimento en suspensión, propiciando el transporte de sedimento en dirección de las corrientes.

El instrumento M4 (barra somera) muestra que en la componente U se presentan magnitudes de hasta  $-0.13 \text{ ms}^{-1}$  y  $-0.22 \text{ ms}^{-1}$  durante periodo de brisa y 'norte', respectivamente, esto indica que durante ambos periodos, la componente transversal se dirige hacia mar abierto, aunque con menor magnitud durante las brisas. La componente V muestra valores de hasta  $0.54 \text{ ms}^{-1}$  y  $-0.51 \text{ ms}^{-1}$  durante brisa y 'norte', respectivamente, sugiriendo transporte predominante de este a oeste durante la brisa y de oeste a este durante el evento de 'norte' de casi igual magnitud. A su vez, se obtienen valores de TKE de hasta  $0.06 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  durante la brisa, y de hasta  $0.13 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  durante el 'norte', asociados a cantidades de sedimento en suspensión de hasta 4,815 y 7,850 counts, respectivamente, medido por el OBS (Figura 28).

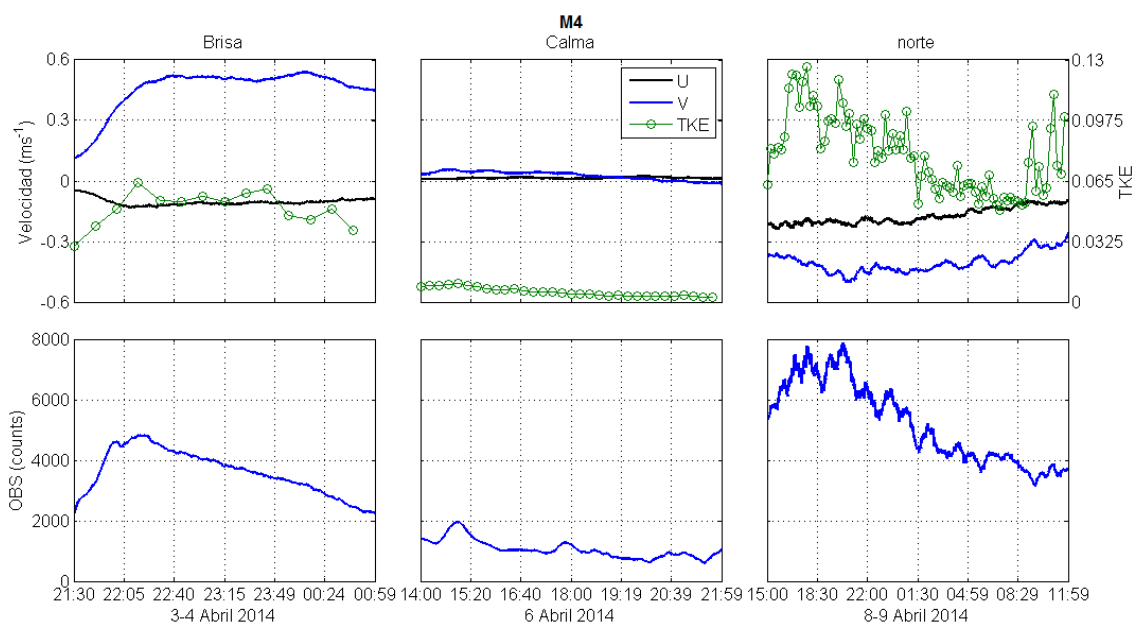


Figura 28. Componentes U y V de las corrientes, energía cinética turbulenta (TKE) y sedimento en suspensión en M4 (ubicado sobre la barra somera), para condiciones de brisa, calma y 'norte'. La componente de la velocidad  $U > 0$  indica corrientes con dirección hacia la costa y  $V > 0$  corrientes con dirección de este a oeste.

El instrumento M5 ubicado en el canal entre las barras muestra magnitudes de la componente U de hasta  $0.04 \text{ ms}^{-1}$  y  $-0.15 \text{ ms}^{-1}$  durante periodo de brisa y 'norte', respectivamente, indicando que durante el periodo de brisa marina el transporte transversal es con dirección hacia la línea de costa, mientras que durante el 'norte', se dirige hacia mar adentro, y con menor magnitud durante las brisas. La componente V muestra valores de hasta  $0.2 \text{ ms}^{-1}$  y  $-0.3 \text{ ms}^{-1}$  durante brisa y 'norte' respectivamente, indicando transporte predominante de este a oeste durante la brisa y de oeste a este durante el evento de 'norte' de casi la misma magnitud. Los valores de TKE son de hasta  $0.04 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  durante la brisa, y  $0.08 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  durante el 'norte', asociado a concentraciones de sedimento

en suspensión de hasta 8,550 y 3,850 counts, respectivamente, indicando que en el canal hay una mayor cantidad de sedimento en suspensión durante la brisa que durante el 'norte', posiblemente asociado a la convergencia de corrientes en el canal durante este periodo corto de 3 a 4 horas (Figura 29).

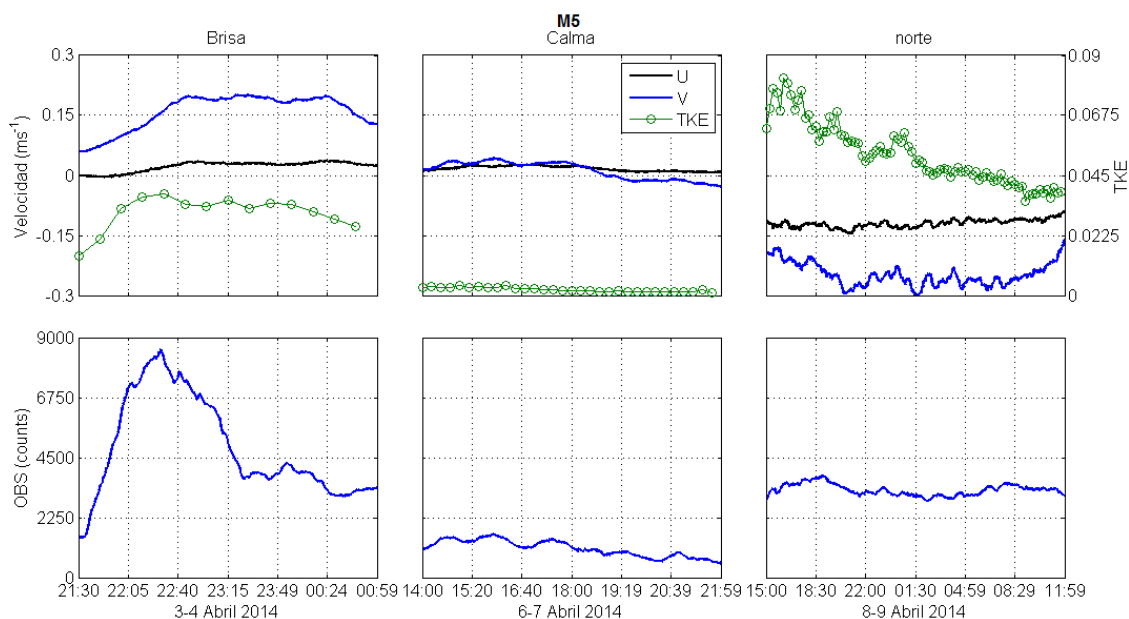


Figura 29. Componentes U y V de las corrientes, energía cinética turbulenta (TKE) y sedimento en suspensión en M5 (ubicado en el canal entre las barras), para condiciones de brisa, calma y 'norte'. La componente de la velocidad  $U > 0$  indica corrientes con dirección hacia la costa y  $V > 0$  corrientes con dirección de este a oeste.

El instrumento M7, ubicado sobre la barra más profunda, muestra valores de la componente U de hasta  $-0.05 \text{ ms}^{-1}$  y  $-0.22 \text{ ms}^{-1}$  durante periodo de brisa y 'norte', respectivamente, indicando que durante ambos periodos, la componente transversal se dirige hacia mar adentro, con menor magnitud durante las brisas. La componente V muestra valores de hasta  $+0.24 \text{ ms}^{-1}$  y  $-0.37 \text{ ms}^{-1}$  durante brisa y 'norte', respectivamente, indicando una dirección predominante de este

a oeste durante la brisa y de oeste a este durante el 'norte', ambos de similar magnitud. Los cálculos de TKE muestran valores de hasta  $0.06 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  durante la brisa, y de hasta  $0.12 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  durante el 'norte', con cantidades de sedimento en suspensión de hasta 8,000 counts en ambos casos, indicando que en la barra profundase suspende una cantidad similar de sedimento tanto en eventos de brisa marina como durante los 'nortes' (Figura 30).

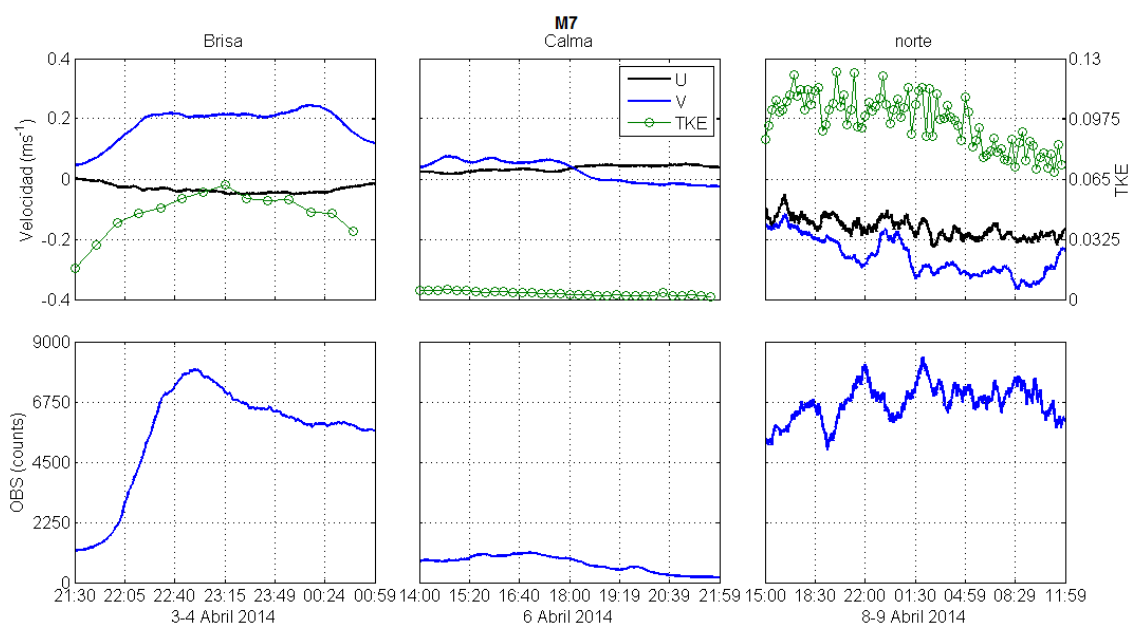


Figura 30. Componentes U y V de las corrientes, energía cinética turbulenta (TKE) y sedimento en suspensión en M7 (ubicado sobre la barra profunda), para condiciones de brisa, calma y 'norte'. La componente de la velocidad  $U > 0$  indica corrientes dirigidas hacia la costa y  $V > 0$  de este a oeste.

Durante el periodo de calma posterior al 'norte' en el M4, ubicado sobre la barra somera, se presentan valores de la componente U de hasta  $-0.1 \text{ ms}^{-1}$ , indicando movimiento hacia afuera de la costa, mientras que la componente V muestra valores de hasta  $+0.24$ , lo que sugiere un transporte longitudinal del este al

oeste. Esto último tiene valores asociados de turbidez de hasta 2,350 counts y, TKE de  $0.03 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  al principio del periodo, que va disminuyendo con el tiempo hasta  $0.02 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  (Figura 31).

En el canal entre las barras (instrumento M5, Figura 31) se presentan valores de la componente U de hasta  $+0.01 \text{ ms}^{-1}$ , que corresponden a un transporte hacia la línea de costa. La componente V tiene valores de hasta  $+0.12 \text{ ms}^{-1}$ , que indica un movimiento longitudinal de sedimento del este al oeste. Se obtienen valores de turbidez de hasta 6,350 counts y TKE de hasta  $0.03 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  al principio del periodo, disminuyendo con el tiempo a valores de  $0.01 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ .

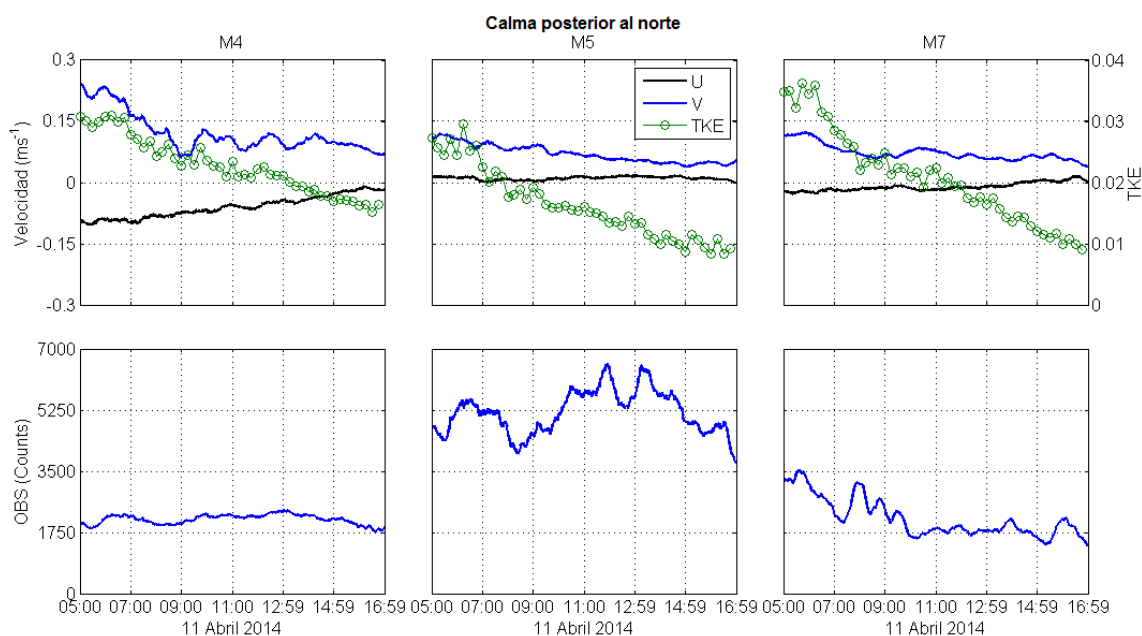


Figura 31. Componentes U y V de las corrientes, energía cinética turbulenta (TKE) y sedimento en suspensión, para condiciones de calma posterior al 'norte' en las barras sumergidas y el canal. La componente de la velocidad  $U > 0$  indica corrientes dirigidas hacia la costa y  $V > 0$  de este a oeste

La información recabada en M7 sobre la barra profunda en el periodo de calma posterior al 'norte' (Figura 31) muestra magnitudes de la componente U de hasta  $-0.03 \text{ ms}^{-1}$  que cambian conforme avanza el tiempo hasta que al final llegan hasta  $0.02 \text{ ms}^{-1}$ , lo que indica un transporte hacia afuera de la costa al principio, y hacia la costa al final del periodo. Los valores de la componente V al principio del periodo alcanzan hasta  $0.12 \text{ ms}^{-1}$ , disminuyendo hasta  $0.04 \text{ ms}^{-1}$  al final del mismo, lo que indica un transporte longitudinal de este a oeste. Se obtuvieron valores de turbidez de hasta 3,500 counts a principios del periodo, disminuyendo hasta 1,400 counts al final del mismo, asociado a TKE de hasta  $0.04 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  a principio del periodo y  $0.01 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  a finales.

## 6. DISCUSION Y CONCLUSIONES

---

La playa de Sisal se clasifica como disipativa ( $\Omega=10.3$ ), con una pendiente promedio  $\tan\beta = 0.01$  y se caracteriza por tener dos barras sumergidas ubicadas a profundidades aproximadas de entre 1 y 1.6 m NMM, con un canal intermedio de hasta 40 m de anchura y 2.3 m de profundidad. La profundidad de cierre estimada con los perfiles medidos en campo es de 2.5 m, y 1.8 m con la ecuación de Hallermeier (1981), sin embargo, ambas son aproximaciones, dado que se requiere de al menos un año de mediciones continuas de oleaje para poder obtener un cálculo preciso.

Las condiciones de viento son muy variables en el área de estudio. Durante los 12 días de mediciones, se pudieron capturar eventos de brisas marinas, calmas y 'norte'. Mendoza *et al.*, (2013) indica que los eventos de 'norte' suelen alcanzar magnitudes de hasta  $15 \text{ ms}^{-1}$ , y en este estudio se reporta una rapidez máxima de  $13 \text{ ms}^{-1}$  tanto para el evento de 'norte' como para las brisas. En comparación, las brisas son de menor duración que los 'nortes', alrededor de 4 y 21 h, respectivamente. Además, durante el 'norte', el viento siempre proviene de dirección norte, mientras que las brisas invierten su dirección entre el día y la noche, presentando magnitudes promedio de  $5 \text{ ms}^{-1}$  provenientes del sureste durante la brisa diurna, y hasta  $12 \text{ ms}^{-1}$  del noreste durante la nocturna. Estos valores son similares a los reportados por Pattiaratchi *et al.* (1997), que frecuentemente exceden los  $15 \text{ ms}^{-1}$  durante las brisas nocturnas para las playas del sureste de Australia.

En concordancia con lo reportado por Gonzales-Herrera *et al.* (2015) y Appendini *et al.*, (2012), el oleaje incidente en la playa de Sisal se caracteriza por tener una altura significativa promedio de 0.7 m y un periodo promedio de 4 s. Sin embargo, este estudio muestra una variabilidad diurna importante, siendo de noche cuando ocurren las olas más altas y de periodos más largos ( $H_0=1.1\text{m}$  y  $T=5\text{s}$  a 10 m de profundidad). Esto podría sugerir que el oleaje está notablemente modulado por el viento asociado a la brisa marina.

Las pérdidas volumétricas durante el periodo de brisas fue de  $\sim 750\text{ m}^3$  en promedio por día, y esto concuerda con Pattiaratchi *et al.* (1997), quienes mencionan que la presencia de la brisa marina inducen erosión vertical significativa en periodos cortos de tiempo de hasta 30 minutos. El cambio morfológico neto capturado durante los días de dominancia de brisa marina indicó una significativa pérdida volumétrica de  $\sim 2,300\text{ m}^3$ , y parte del sedimento erosionado se acumuló sobre las barras y la playa subaérea. El 'norte' indujo una erosión de  $\sim 3,300\text{ m}^3$ , principalmente sobre las barras (hasta 0.5 m) y acumulando una pequeña porción de sedimento en la playa intermareal. Durante los periodos de calma la playa ganó sedimento  $\sim 800\text{ m}^3$ , que se acumuló sobre las barras sumergidas, a la vez que una ligera erosión en la cara de la playa (cotas de 0 a -1 m). Después del 'norte' la playa recuperó  $\sim 4,400\text{ m}^3$  de arena, favoreciendo la acreción de la playa submareal, en particular, las barras sumergidas. Por tanto, en el periodo de estudio se llevó a cabo un

cambio volumétrico total de hasta 4,850 m<sup>3</sup>, más del 14% del volumen total de la sección de playa, y el cambio principal ocurrió sobre las barras sumergidas.

A partir del análisis de la magnitud y dirección de las corrientes y el cambio morfológico, se infiere que en la playa de Sisal predomina el transporte de sedimento longitudinal sobre el transversal. Esto concuerda con Aagaard *et al* (2013), en que en playas disipativas el gradiente de transporte de sedimento transversal suele ser menor en relación al longitudinal. El extremo oeste de la playa es la más dinámica, y la variabilidad morfológica medida está fuertemente vinculada a cambios en la dirección y magnitud de los vientos. Las brisas marinas juegan un papel importante en la erosión de la zona costera a largo plazo, producto de la erosión durante la noche y poca acreción durante el día, dado que durante la brisa diurna el transporte de sedimento es menor que durante la nocturna (Pattiaratchi *et al.*, 1997), lo que concuerda con los resultados volumétricos obtenidos para la playa de Sisal del 2 al 4 de abril. Las tormentas de 'norte' inducen erosión significativa, pero los largos periodos de calma posteriores a estos eventos propician una rápida recuperación de la playa (Aagaard *et al.*, 2013; Senechal *et al.*, 2015).

Asumiendo que las mediciones topo-batimétricas alcanzan la profundidad de cierre, se entiende que debe de existir un balance transversal en la sección de playa estudiada. La Figura 32 es un mapa conceptual que representa las direcciones y magnitudes de las corrientes resultantes promedio para cada instrumento durante los distintos periodos de viento, resumiendo así la

morfodinámica de las barras sumergidas en relación a las condiciones de viento y corrientes dominantes para la playa de Sisal.

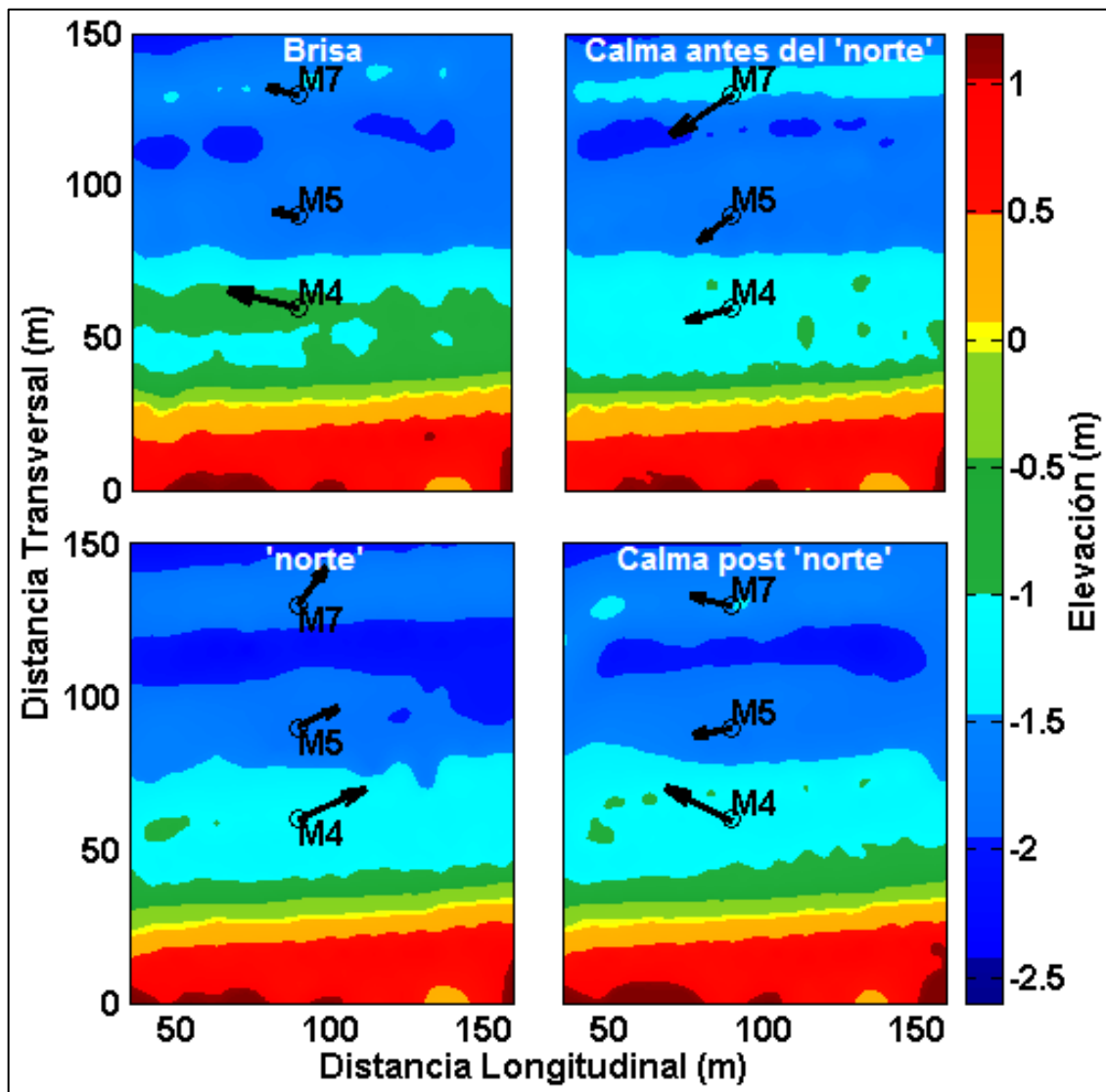


Figura 32. Mapa conceptual representando la velocidad resultante de las corrientes sobre las barras y el canal para eventos de brisa, calma y norte.

La variabilidad morfológica de la playa bajo el régimen de brisas marinas indica la predominancia de pérdida de sedimento. Las corrientes inducidas por las brisas sugieren un transporte de sedimento con dominancia longitudinal hacia el

oeste, y sobre la barra somera estas corrientes son de hasta  $0.07 \text{ ms}^{-1}$ . En el canal y la barra profunda no se presentan tantos cambios de elevación, y los valores de velocidad de la corriente son menores a  $0.01 \text{ ms}^{-1}$  (panel superior izquierdo, Figura 32).

Las distintas condiciones de viento inducen cambios morfológicos diferentes en cada una de las barra sumergidas de la playa, por tanto, la magnitud y dirección de su migración también varía. La barra somera al principio del estudio, se encontraba más cerca a la costa del lado oeste que del este, durante el periodo de calma (antes del 'norte') comenzó a alejarse del lado oeste y a acercarse del este, cambiando así su inclinación y pasando de tener una pendiente positiva a una negativa respecto a la línea de costa. Después del 'norte', el lado este de esta barra se alejó de la costa, hasta conseguir una inclinación casi paralela a la línea de costa.

La barra profunda no presenta cambios significativos en cuanto a su inclinación, se acerca durante periodos de calma y aleja durante el 'norte', manteniéndose paralela a la línea de costa. El evento de 'norte' genera una erosión de mayor magnitud que durante la dominancia de brisas marinas, y las corrientes indican un transporte del sedimento con dominancia longitudinal hacia el este y transversal mar adentro con velocidades de hasta  $0.11 \text{ ms}^{-1}$ . En concordancia con Masselink y Hughes (2013), en la playa micro-mareal y disipativa de Sisal, la migración de la barra profunda ocurre en dirección mar adentro típicamente durante eventos de tormenta (en este caso 'nortes'), mientras que la migración

hacia la playa intermareal se da durante periodos de energía baja a moderada (periodos de calma).

La parte más dinámica de la playa es la zona de barras submareales, y se cuantificaron migraciones transversales promedio de entre 10 y 5 m en promedio para la barra somera y profunda, respectivamente. Estas magnitudes de migración de barras obtenidas para la playa de Sisal concuerdan con el rango de valores de movimiento transversal de barras de entre 1 y 10 m estimados para playas disipativas (Masselink y Hughes, 2013).

El movimiento transversal de las barras está asociado a altos valores de sedimento en suspensión y energía cinética turbulenta (TKE). Las magnitudes de TKE calculados para el periodo de mediciones fueron mayores al mínimo de  $0.0002 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  necesario para producir movimiento de sedimento por la corriente (Dyer *et al.*, 2004). Los valores de TKE obtenidos sobre las barras (instrumentos M4 y M7, Figura 32) fue de hasta  $0.06 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  durante brisas nocturnas y  $0.13 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  durante el 'norte', por tanto, las corrientes asociadas son capaces de transportar altas concentraciones de sedimento en suspensión (de hasta 9,000 counts) en ambas barras y durante los eventos de brisa y 'norte'. En función de los valores de TKE obtenidos, se espera que el transporte de sedimento asociado al evento del 'norte' sea el doble al que ocurre durante la brisa, pero con direcciones opuestas. Esto puede sugerir que el balance de sedimentos longitudinal en la playa de Sisal a largo plazo dependerá del equilibrio en la ocurrencia de estos dos tipos de eventos.

## 7. REFERENCIAS

---

Aagaard, T., B. Greenwood y M. Hughes, 2013. Sediment transport on dissipative, intermediate and reflective beaches. *Earth-Science Reviews*, 124: 32-50

Appendini, C. M., P. Salles, E. T. Mendoza, J. Lopez y A. Torres-Freyermuth, 2012. Longshore sediment transport on the northern coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 28(6):1404-1417

Capper, J., 1801. Observation on the winds and monsoons; Illustrated with a chart, and accompanied with notes. *Geographical and Meteorological*, J. Debrett. London. 234 p

Cowell, P. J. y B. G. Thom, 1994. Morphodynamics of coastal evolution. En: Carter, R. W. G. y Woodroffe (editors), *Coastal Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 33-86 p

Cuevas-Jimenez, A. y J. Euán-Avila, 2009. Morfodinámica del perfil de playa con sedimentos carbonatados en la Península de Yucatán. *Ciencias Marinas*, 35(3): 307-320

Dean, R. G., 1973. Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proceedings 1<sup>st</sup> Australian Coastal Engineering Conference*. Institution of Engineers, 208-214 p

Dyer, K. R., M. C. Christie y A. J. Manning, 2004. The effects of suspended sediment on turbulence within an estuarine turbidity maximum. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59: 237-248

Gonzales-Herrera, R., A. Solís-Pimentel, C. Zetina-Moguel e I. Mariño-Tapia, 2015. Modeling the northern coastline of Yucatan, Mexico, with GENESIS. *Environmental & Engineering Geoscience*, 21(1): 47-61

Gourlay, M. R., 1968. Beach and Dune erosion Tests. Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands. Report no. M935/M936

Holman, R.A., D. A. Huntley y A. J. Bowen, 1979. Infragravity waves in storm conditions. *Proc. Coastal Eng. Conf.*, 16: 268-284

Hughes, M. G., T. Aagaard, T. E. Baldock y H. E. Power, 2014. Spectral signatures for swash on reflective, intermediate and dissipative beaches. *Marine Geology*, 355: 88-97

Huntley, D.A. y A.J. Bowen, 1975. Comparison of the hydrodynamics of steep and shallow beaches. En: J.R. Hails y A. Cart (Editores), *Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation*. Wiley, New York, N.Y. 316 p

Huntley, D.A., 1976. Long period waves on a natural beach. *J. Geophys. Res.*, 81:6441-6449

Lanckriet, T. y J.A. Puleo, 2013. Near-bed turbulence dissipation measurements in the inner surf and swash zone. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118: 6634-6647

Masselink, G. y C. B. Pattiaratchi, 1998a. Morphological evolution of beach cusps and associated swash circulation patterns. *Marine Geology*, 146: 93-113

Masselink, G. y C. B. Pattiaratchi, 1998b. The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment resuspension. *Marine Geology*, 146: 115-135

Masselink, G., M. G. Hughes, 2003. *Introduction to coastal processes & geomorphology*. Hodder Education, Londres, Gran Bretaña. 354 p

Masselink, G., A. Kroon, R. G. D. Davidson-Arnott, 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave dominated coastal settings – A review. *Geomorphology*, 73:33-49

Mendoza, E.T., M.A. Trejo-Rangel, P. Salles, C.M. Appendini, J. Lopez-Gonzalez y A. Torres-Freyermuth, 2013. Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, special issue, 65: 790-795

Neumann, J., 1984. The Coriolis force in relation to the sea and land breezes - a historical note. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 65: 24-26

Nicholls, R. J., W. A. Birkemeier y G. Lee, 1998. Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, EUA, *Marine Geology*, 148: 179-201

Pattiaratchi, C., B. Hegge, J. Gould et. Eliot, 1997. Impact of sea-breeze activity on nearshore and foreshore processes in southwestern Australia. *Continental Shelf Research*, 17(13): 1539-1560

Pedrozo-Acuña, A., 2011. Procesos costeros y morfodinámica de playas, apuntes de clase. Instituto de Ingeniería, UNAM. Primera edición. 240 p

Price, T. D. y B. G. Ruessink, 2008. Morphodynamic zone variability on a microtidal barred beach. *Mar. Geol.*, 251:98-109

Sasaki, T., K. Horikawa y S. Hotta, 1977. Nearshore Current on a Gently Sloping Beach. *Proc. Int. Conf. Coastal Eng.*, 15: 626-644

Senechal, N., G. Coco, B. Castelle y V. Marieu, 2015. Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open Sandy beach (Biscarrosse, France). *Geomorphology*, 228: 448-461

Short, A.D., 1975. Multiple offshore bars and standing waves. *J. Geophys. Res.*, 80(27): 3838-3840

Short, A. D., 2000. Handbook of beach and surface morphodynamics. Wiley. Nueva York. 379 p

Short, A. D., 2006. Australian beach systems - nature and distribution. *Journal of coastal research*, 22(1):11-27

von Hann, J., 1901. *Lehrbuch der Meteorologie*. Chr. Herm. Tauchnitz, Leipzig. 805 p

Wijnberg, K. M. y A. Kroon, 2002. Barred beaches. *Geomorphology*, 48: 103-120

Wright, L. D. y B. G. Thom, 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, 1: 412-459.

Wright, L.D., J. Chappell, B. G. Thom, M. P. Bradshaw y P. Cowell, 1979a. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. *Mar. Geol.*, 32: 105-140

Wright, L. D., B. G. Thomy U. J. Chappe, 1979b. Morphodynamic Variability of HighEnergy Beaches. *Proc. Int. Conf. Coastal Eng.*, 16: 1180-1194

Wright, L. D. y A. D. Short, 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118