



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – INGENIERÍA DE COSTAS Y RÍOS

DINÁMICA DE LA LÍNEA DE COSTA EN UNA PLAYA DISIPATIVA  
(SISAL, YUCATÁN)

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

PRESENTA:  
PAOLA ISABEL ESPADAS SÁNCHEZ

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)  
ERNESTO TONATIUH MENDOZA PONCE, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
ELENA OJEDA CASILLAS, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTORAL  
GABRIELA MEDELLÍN MAYORAL, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
CECILIA ELIZABETH ENRIQUEZ ORTIZ, FACULTAD DE CIENCIAS  
ISMAEL DE JESÚS MARIÑO TAPIA, CINVESTAV

SISAL, YUCATÁN, MÉXICO, FEBRERO, 2017

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DRA. ENRÍQUEZ ORTIZ CECILIA E.

Secretario: DRA. MEDELLÍN MAYORAL GABRIELA

Vocal: DR. MENDOZA PONCE ERNESTO T.

1<sup>er</sup>. Suplente: DRA. OJEDA CASILLAS ELENA

2<sup>do</sup>. Suplente: DR. MARIÑO TAPIA ISMAEL DE JESÚS

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: SISAL, YUCATÁN, MÉXICO.

**TUTORES DE TESIS:**

NOMBRE

DRA. ELENA OJEDA CASILLAS

-----  
**FIRMA**

NOMBRE

DR. ERNESTO TONATIUH MENDOZA PONCE

-----  
**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por la beca otorgada para obtener el título de maestría. Los apoyos otorgados de los proyectos CONACYT INFR-2014-01-225561, 252354 y 271544, así como al instituto de Ingeniería de la UNAM a través de los proyectos internos del Instituto de Ingeniería 5341 “Implementación de estación de video monitorización para la obtención de indicadores de vulnerabilidad a la erosión” y el proyecto 6202 “Dinámica temporal de la vegetación de playas y dunas costeras y su participación como elemento de estabilización en la morfología del frente de playa” por el financiamiento y las becas otorgadas. Así mismo se agradece al Servicio Mareográfico Nacional, al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros y al Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera UNAM por el apoyo en la obtención y procesamiento de datos utilizados en la realización de este trabajo.

Igualmente se agradece a todos mis compañeros del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, tanto docentes como estudiantes, por el apoyo, ayuda y comprensión brindados durante la realización de este trabajo. En especial a al Dr. Ernesto Tonatiuh Mendoza Ponce y la Dra. Elena Ojeda Casillas, por el tiempo invertido y la paciencia durante este tiempo, así mismo al Dr. José López y a Gonzalo Martín por su ayuda con los datos del mareógrafo y el sistema SIRENA. Finalmente, a mis familiares y amigos que sin ellos y su apoyo no estaría donde estoy, y sobre todo a María del Pilar Sánchez Victoria y Arturo Edgardo Espadas Solís, por el tiempo, los regaños, los buenos y malos momentos que pasamos durante el tiempo que duró este viaje.

# CONTENIDO

2.	ANTECEDENTES .....	5
3.	JUSTIFICACIÓN.....	10
4.	OBJETIVOS .....	11
5.	ÁREA DE ESTUDIO.....	12
6.	METODOLOGÍA.....	14
6.1.	CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE .....	15
6.1.1.	Datos de oleaje .....	15
6.1.2.	Eventos de tormenta .....	16
6.1.3.	Datos de marea.....	17
6.2.	SISTEMA DE VIDEO .....	17
6.2.1.	Obtención de imágenes y generación de vistas en planta.....	17
6.2.2.	Extracción de la posición de la línea de costa a partir de imágenes.....	18
6.2.3.	Cambios morfológicos debido a tormentas.....	20
6.2.4.	Evolución temporal de la línea de costa.....	21
7.	RESULTADOS.....	22
7.1.	CARATERIZACIÓN DEL OLEAJE .....	22
7.1.1.	Datos de oleaje .....	22
7.1.2.	Eventos de tormenta .....	23
7.1.3.	Datos de marea.....	25
7.2.	EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LA PLAYA DE SISAL .....	26
7.2.1.	Serie temporal de línea de costa.....	26
7.2.2.	Cambios morfológicos debido a tormentas.....	27
7.2.3.	Evolución estacional e interanual de la línea de costa .....	36
8.	DISCUSIONES Y CONCLUSIONES .....	52
8.1.	TRABAJOS FUTUROS.....	58
9.	REFERENCIAS.....	59
10.	ANEXOS.....	63
10.1.	ANEXO A .....	63
10.2.	ANEXO B .....	64

## FIGURAS

Figura 1. Partes del perfil de playa, tomado del Manual de Protección de la costa (Adaptado de Box, 1984). ..... 3

Figura 2. Imágenes: instantánea (a), promedio (b) y de varianza (c)..... 9

Figura 3. Zona de estudio en el Puerto de Sisal, indicando la región abarcada por las vistas en planta de la playa (recuadro rojo), la posición del ADCP y la posición de la torre de video-monitoreo. .... 12

Figura 4. Vista en planta de la zona de estudio, obtenida a partir de la geo-rectificación de las imágenes de las cinco cámaras. Los números marcan los campos de visión de las cinco cámaras (c1-c5) de la estación de video-monitoreo. .... 13

Figura 5. Metodología seguida en el trabajo. .... 14

Figura 6. Mediciones obtenidas con el dispositivo ADCP vs los datos obtenidos del retro-análisis, a 10 metros de profundidad, a) altura significativa del oleaje (***Hs***); b) período del oleaje (***Tp***); c) dirección del oleaje (dir). .... 16

Figura 7. (a) Torre meteorológica del sistema de video, (b) Caseta en la base de la torre. .... 18

Figura 8. Series temporales de marea, con rangos de marea delimitados: rojo, nivel de marea alta (HW); verde, nivel medio del mar (MW) y negro, nivel de marea baja (LW.)..... 20

Figura 9. Ubicación de los transectos de trabajo en la zona de estudio, posición longitudinal de la playa (eje X), posición transversal de la playa (eje Y), ubicando el 0 en la posición de la torre donde están colocadas las cámaras. .... 21

Figura 10. Serie de temporal de los datos modelados de oleaje en un nodo a 50 metros de profundidad; a) altura significativa del oleaje (***Hs***); b) período del oleaje (***Tp***); c) dirección del oleaje (dir)..... 22

Figura 11. Serie temporal de altura significativa del oleaje, barras verticales cian indican los eventos de tormenta disponibles y en rojo los eventos en los que no se tienen datos, mientras que la línea horizontal indica el valor del umbral de la altura. .... 23

Figura 12. Marea de pronóstico para el Puerto de Progreso (nodo más cercano al sitio de estudio) y marea obtenida con el mareógrafo de Sisal. Se señalan con puntos los días en los que se obtuvo la posición de la línea de costa para MW, HW y LW..... 26

Figura 13. Variación de la posición de la línea de costa a lo largo de la playa respecto a una línea de costa promedio (línea de costa de referencia): a) HW, b) MW y c) LW.....	27
Figura 14. Línea de costa de referencia (cian) y su posición en comparación a las líneas de costa registradas durante el periodo de estudio (azul oscuro).....	27
Figura 15. Dirección del oleaje.....	28
Figura 16. Cambio en la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 32. Retrocesos y avances menores a los 2 metros. Este evento tuvo lugar entre los días 14 y 15 de junio de 2015..	30
Figura 17. Cambio de la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 28. Evento ocurrido entre los días 24 y 28 de noviembre de 2014, con altura media de oleaje de 2.09 m, dirección max 330.79° y contenido energético 94.67 <b>m<sup>2</sup> · h</b> . ....	31
Figura 18. Cambio de la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 18. Evento ocurrido entre los días 7 y 8 de febrero de 2014.....	34
Figura 19. Cambio de la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 8. Este evento tuvo lugar entre los días 3 y 4 de marzo de 2013. ....	35
Figura 20. Evolución temporal de la posición de la línea de costa en el transecto 1 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL, con filtro de media móvil.....	36
Figura 21. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 1 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL (línea gris), con ajuste lineal (línea azul claro).....	37
Figura 22. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 2 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL, con filtro de media móvil y resaltando los períodos en los que se tuvieron ET. ....	38
Figura 23. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 2 (Figura 7) obtenidas en condiciones de MWL (línea gris), con ajuste lineal (línea azul claro).....	39
Figura 24. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 4 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL, con filtro de media móvil y resaltando los períodos en los que se tuvieron ET. ....	41
Figura 25. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 4 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL (línea gris), con ajuste lineal (línea azul claro).....	42
Figura 27. Correlación de la pendiente de cada transecto y su posición longitudinal en la playa, la distancia longitudinal está expresada en m (eje X) y la pendiente de la recta de ajuste en m/año (eje Y.) Nótese el cambio de color para la zona abarcada por las cámaras 1 y 2 (morado), y la zona abarcada por las cámaras 3, 4 y 5 (cian). ....	43

Figura 26. Comparación visual: a) posición de la línea de costa con la barra intermareal expuesta (25 de marzo de 2014, 12 horas UTC), b) posición de la línea de costa con la barra intermareal parcialmente sumergida (25 de marzo 2014, 13:30 horas UTC) c) posición de la línea de costa con la barra intermareal sumergida (25 de marzo de 2014, 23:30 horas UTC). .....	44
Figura 28. Comparación de la posición de costa para el transecto 1 en HW (línea azul claro), MW (línea azul oscuro) y LW (línea cian), y acercamiento de tres momentos con los 3 niveles de marea. ....	45
Figura 30. Condiciones de la zona para el caso 1 a los diferentes niveles de marea: a) LW, b) MW y c) HW y la posición de los transectos 1 y 3. ....	46
Figura 31. Comparación de la posición de costa para el transecto 3 en HW, MW y LW, y acercamiento de tres momentos con los 3 niveles de marea. ....	47
Figura 32. Comparación de la posición de costa para el transecto 4 en HW, MW y LW. ....	48
Figura 33. Comparación visual de la línea de costa en las tres diferentes épocas del año identificadas para el oleaje. a) Vista en planta del 15 de enero de 2014, b) vista en planta del 20 de mayo de 2014, y c) vista en planta del 15 de septiembre de 2014. ....	49
Figura 34. Variación espacio-temporal de la línea de costa de la playa de Sisal respecto a la línea de cosa media. Líneas de costa muestreadas durante condiciones de MW. Los tonos cálidos representan posiciones hacia mar y los tonos fríos representan posiciones hacia tierra. Las líneas negras indican eventos de tormenta (Tabla 1) y las regiones blancas indican períodos sin datos. .	50
Figura 35. Comparación de la posición de la línea de costa para la zona Oeste de la playa en dos épocas del año: a) inicio de la época de nortes (1 de noviembre de 2015) e b) inicio de la época de brisas intensas (1 de mayo de 2016). ....	52
Figura 36. Comparación de un transecto cercano al muelle (azul oscuro) y uno cercano a la entrada del puerto de abrigo (azul claro), eje Y variación transversal de la línea de costa, eje X variación temporal, donde los cuadros rojos indican donde se presentan los cambios de orientación de la playa a lo largo del tiempo de estudio. ....	56
Figura 37. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (1-8), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma. ....	65
Figura 38. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (9-16), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma. Notar el cambio de escala en el eje y para los eventos 13 - 16. .	65

Figura 39. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (17-24), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma. .... 66

Figura 40. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (25-32), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma. .... 66

## TABLAS

Tabla 1. Días de inicio y final de los ET, así como los días antes y después de los eventos. .... 24

Tabla 2. Casos identificados para los cambios debidos a eventos de tormenta. .... 29

Tabla 3. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto casi nulo en la línea de costa" ..... 29

Tabla 4. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto de retroceso generalizado de la línea de costa". .... 32

Tabla 5. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto de avance generalizado de la línea de costa". .... 33

Tabla 6. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto de avance y retroceso no uniforme de la línea de costa". .... 35

Tabla 7. Avance y retroceso estacional del transecto 1 durante el período de estudio. El signo negativo indica que en ese período ocurrió el efecto contrario al esperado (avance en el período de calma y retroceso en el periodo de ET). .... 38

Tabla 8. Avance y retroceso estacional del transecto 2 durante el período de estudio. El signo negativo indica que en ese período ocurrió el efecto contrario al esperado (avance en el período de calma y retroceso en el periodo de ET). .... 40

Tabla 9. Avance y retroceso estacional del transecto 4 durante el período de estudio. .... 41

Tabla 10. Valor de la pendiente de la recta de tendencias, para los 3 transectos de ejemplo asociados con el nivel de marea para HW, MW y LW. .... 43

Tabla 11. Información del oleaje para los diferentes eventos de tormenta identificados en el período de estudio. .... 63

Tabla 12. Información del oleaje para los diferentes eventos de tormenta excluidos en este estudio. .... 64



## RESUMEN

La posición de la línea de costa varía continuamente, debido a cambios en el nivel del mar, tormentas, transporte de sedimento y las actividades humanas (Liu et al., 2012). Investigadores, manejadores costeros e ingenieros buscan explicar y entender los cambios de la línea de costa a diferentes escalas espaciales y temporales (Smit *et al.*, 2007), con la finalidad de establecer parámetros para identificar problemas de erosión o inundación en la playa, así como para conocer las tendencias futuras de la morfología de la playa, además de proporcionar información para el conocimiento, control y mitigación de peligros en las zonas costeras (Dean & Dalrymple, 2004).

El monitoreo de la zona de costa usando cámaras de video fijas instaladas en un punto elevado de la playa es conocido como video-monitoreo y ha probado ser una herramienta útil para el estudio de los procesos costeros y la gestión de esta zona (Davidson et al., 2007; Kroon et al., 2007). Este estudio parte de las imágenes obtenidas de un sistema de video-monitoreo costero localizado en una playa disipativa micromareal (Sisal, Yucatán) para estudiar la evolución temporal de la línea de costa y su dinámica a diferentes escalas temporales (en respuesta a eventos de tormenta, así como las variaciones estacionales e interanuales).

La posición de la línea de costa se obtuvo a partir de las imágenes para el período de agosto de 2012 a septiembre de 2015 obteniendo las coordenadas reales a partir de la geo-referenciación de las imágenes (Holland et al., 1997).

Con respecto a los datos de oleaje se generó un hindcast tomando datos de un nodo frente a la playa de estudio, a una profundidad de 50 metros, para el período de estudio. Con los resultados del hindcast se identificaron los eventos de tormenta para la zona de estudio, utilizando un umbral de altura del oleaje  $H_{um} = 1.60$  m con una duración mínima de 12 horas. Se obtuvieron 32 eventos de oleaje para los 3 años de estudio, la mayoría ocurriendo entre los meses de noviembre y febrero, con una disminución de los eventos en los meses de marzo a mayo.

La serie temporal de posiciones de la línea de costa está formada por datos obtenidos cada 15 días durante temporadas de calma, y cuando ocurrieron eventos de tormenta, se obtuvo además la posición de la línea de costa previa y posterior al evento. La respuesta de la playa a los eventos de tormenta varió en función del estado previo de la playa y de las características propias de cada evento. Se obtuvieron retrocesos máximos de la línea de costa de 17 m y avances máximos de 8 m. Estacionalmente la línea de costa presenta una ciclicidad anual en la que se observa la línea de costa

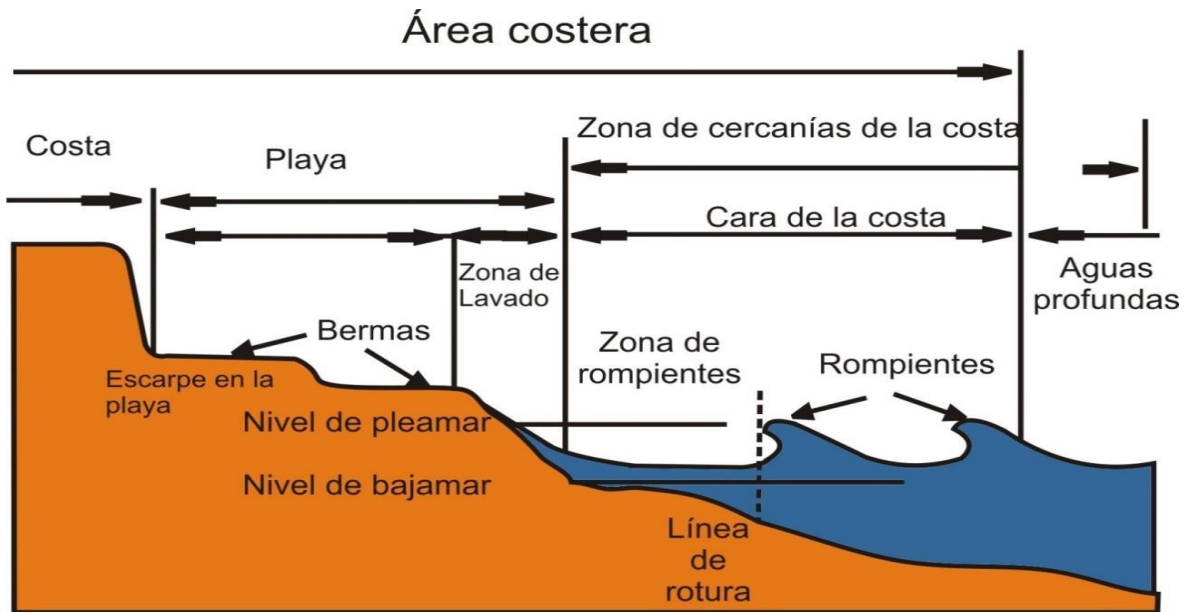
avanza en la zona Este en verano y luego en invierno retrocede, mientras que en la zona Oeste se observa el efecto contrario. Finalmente, se observó que, a pesar de los cambios estacionales y los debidos a los eventos de tormenta y a la posterior recuperación de la playa, la línea de costa de la playa de Sisal muestra una tendencia general de avance durante el período de estudio que no es homogénea a lo largo de toda la playa donde la tasa máxima de avance es de  $0.027 \text{ m/día}$  en la zona Este y la tasa mínima con un valor de  $0.01 \text{ m/día}$  en la zona central de la playa.

## 1. INTRODUCCIÓN

La zona costera es un término bastante amplio, el cual ha sido definido por varios autores con diferentes enfoques a lo largo de los años. Sin embargo, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) define esta zona como:

*“El espacio geográfico de interacción mutua entre el medio marino, el medio terrestre y la atmósfera...”*

A lo largo de los últimos años, ha crecido el interés por las costas con arena por sedimento, debido a que son ambientes atractivos y propicios para el desarrollo económico, asociado principalmente al turismo (Senechal et al., 2015). Dentro de esta zona, es posible identificar diferentes partes del perfil de la playa, las cuales se muestran a continuación (Figura 1).



**Figura 1. Partes del perfil de playa, tomado del Manual de Protección de la costa (Adaptado de Box, 1984).**

Una de las partes más cambiantes en el perfil de playa, es la situada en la zona de lavado, misma que está delimitada por el nivel de baja mar y la máxima excursión del oleaje sobre la cara de la playa, el cual depende de las características del oleaje y de la pendiente de la playa. Es en esta zona donde se encuentra la línea de costa, la cual se define como el límite entre la tierra y el mar (Natesan et al., 2015; Shin & Kim, 2015). Este límite presenta de origen gran dinamismo natural (García-Rubio

et al., 2015; Natesan et al., 2015; Shin & Kim, 2015) y, además, está sometido al efecto de intervenciones externas sobre el sistema (Natesan et al., 2015; Stive et al., 2002).

Los cambios naturales y los antropogénicos, generan efectos muy diferentes en la variación de la línea de costa y pueden darse en un amplio espectro de escalas, tanto espaciales como temporales. La escala espacial puede variar desde centímetros (rizaduras de la playa), unos metros (barras de arena) a kilómetros (bahías), mientras que la escala temporal, la variación puede darse desde unas cuantas horas (eventos extremos), variaciones inter-estacionales, inter-anuales, entre otras (Smit et al., 2007; Stive et al., 2002). Todas estas variaciones, pueden ser monitoreadas con la finalidad de generar información a largo plazo que permitan mejorar el conocimiento de este ambiente y permitir que manejadores costeros, científicos e ingenieros puedan tomar decisiones apropiadas y decidir cuándo y cómo intervenir, para tener un mejor control y manejo de la zona costera (Shin & Kim, 2015; Smit et al., 2007). El monitoreo de estas zonas, específicamente para escalas temporales pequeñas, es decir, para períodos de horas a días o meses, ha sido realizado con mayor frecuencia en los últimos años, y uno de los sistemas más confiables y poderosos son las estaciones automatizadas de video-monitoreo. Con estas estaciones, se abrió la puerta para generar y guardar información de los cambios en la línea de costa a largo plazo y sobre regiones relativamente amplias de la playa, así como la posibilidad de observar la morfología y los factores que gobiernan la evolución de la costa (Aarninkhof et al., 2000; Shin & Kim, 2015; Smit et al., 2007).

Para generar un mejor manejo y control de las zonas costeras, existe la necesidad de caracterizar el comportamiento de estas zonas, en particular el comportamiento de la línea de costa a diferentes escalas temporales y espaciales. Si bien, se han realizado numerosos estudios a nivel mundial para determinar el comportamiento estacional y tendencia general de la línea de costa, los estudios para las playas mexicanas en lapso de tiempo de varios años son escasos; en la Península de Yucatán se han realizado algunos trabajos como los de Mendoza et al. (2013); Jiménez et al. (2016); y Meyer-Arendt (1993), en los cuales se expone desde la caracterización de eventos de tormenta hasta la clasificación de la vulnerabilidad de las playas a la erosión, sin embargo, no se identifica claramente el comportamiento estacional de la línea de costa en estas playas.

En este trabajo se realiza una evaluación del comportamiento de la línea de costa a diferentes escalas de tiempo, así como los cambios morfológicos durante eventos extremos, con base en información generada mediante un sistema de video-monitoreo, durante 3 años en una playa disipativa micromareal.

## 2. ANTECEDENTES

Las playas presentan un alto dinamismo debido a los diferentes factores que actúan en ellas, factores como: viento, corrientes, y las condiciones de oleaje, entre otros muchos, por lo cual, tanto el perfil de la playa y la línea de costa están ajustándose y cambiando constantemente (Box, 1984; Natesan et al., 2015). En las últimas décadas, el estudio de la posición de la línea de costa y los cambios en el perfil de la playa en zonas costeras ha incrementado, esto es debido a la importancia en el desarrollo económico relacionado al turismo y las afectaciones que pueden tener estas zonas debido a los cambios mencionados (Armaroli et al., 2013; Feng et al., 2007; Quartel et al., 2008; Río et al., 2013; Senechal et al., 2015; Wright & Short, 1984).

La línea de costa se define como la interfase entre mar y tierra, la cual es una frontera dinámica por definición, puesto que está en continuo movimiento (cambiando con la llegada sucesiva de las olas, que la hacen ascender y descender a lo largo del perfil de la playa, así como los cambios diarios debidos a la variación de la marea, a variaciones anuales del nivel del mar, etc.). Por lo que, para determinar la posición de la línea de costa, se hace necesario la definición o selección de un indicador de la línea de costa. Un indicador de la línea de costa se define como la característica que representa la posición de la línea de costa, por lo que el indicador debe ser práctico, es decir, la característica que denotará la posición de la línea de costa debe estar presente en todos los lugares donde se planea identificar su posición. Los indicadores pueden ser considerados como características morfológicas y no morfológicas (Pajak & Leatherman, 2002):

- Las características morfológicas son aquellas características físicas que delimitan la posición de la línea de costa tales como la cresta de la berma, la línea de vegetación estable en la duna, el borde del escarpe, o la cima de un acantilado (Boak & Turner, 2005).
- Las características no morfológicas son aquellas relacionadas a la línea del agua como el límite húmedo, el límite seco-húmedo, o el límite de arena mojada, etc.

En las últimas décadas, con el desarrollo de las técnicas de obtención y procesamiento de imágenes, surgió una tercera categoría de indicadores de la línea de costa, el cual se basa en la aplicación de técnicas para el procesamiento de imágenes las cuales se utilizan para la extracción de la posición de la línea de costa, algunos ejemplos de estos indicadores están asociados a los niveles del agua, tales como, el nivel de marea alta, o el nivel medio de marea alta, asociados a muestreos tridimensionales de la playa como muestreos LIDAR o topografía con sistemas de posicionamiento global (GPS). En muchos estudios se ha utilizado la posición de la línea de costa en marea alta (HWL,

por sus siglas en inglés, High Water Line) como indicador de la posición de la línea de costa (Pajak & Leatherman, 2002), así como la línea de costa en marea baja (LWL)(Stive et al., 2002), la línea de costa instantánea (asociada al momento de una fotografía aérea) o el límite entre arena seca y húmeda.

Los indicadores antes mencionados son utilizados dependiendo de la fuente de información que sea utilizada para la extracción de la línea de costa Boak & Turner (2005), en su trabajo enumeran estas fuentes de información y hacen una revisión de las mismas. La primera fuente utilizada para determinar la posición histórica de la línea de costa fueron las fotografías históricas realizadas en tierra; si bien proveen un buen antecedente del sitio de interés, estas fotografías presentan demasiada oblicuidad y la información es limitada en términos del escalamiento y las condiciones del mar en el momento en el que fueron tomadas las fotografías. Otra manera de obtener la posición histórica de la línea de costa fueron los mapas y cartas costeras, así como las imágenes aéreas, ambas presentan una buena cobertura espacial; sin embargo, ambas presentan deficiencias en cuanto a la cobertura temporal. También se han realizado mediciones de la playa y levantamientos de la línea de costa con GPS, las cuales son una fuente de información bastante precisa. Sin embargo, los registros son bastante limitados tanto espacial como temporalmente debido al costo que implica realizar las campañas de campo para hacer las mediciones.

En cuanto a los métodos de percepción remota que se han utilizado para la detección de la línea de costa se tienen las imágenes multi-espectrales y las hiper-espectrales, así como las bases de información generadas con la tecnología LIDAR (acrónimo en inglés para Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), los datos generados por los sensores de micro-onda, y finalmente, las imágenes generadas con sistemas de video-monitoreo.

Estos sistemas de video-monitoreo, en los últimos años han alcanzado un amplio desarrollo e implementación en las zonas costeras, y consisten en dos o más cámaras con la capacidad de monitorear detalladamente los cambios en los sistemas costeros y proveen una buena cobertura temporal. Sin embargo, la cobertura espacial queda limitada al sitio donde se tiene el sistema de video, aunque estos espacios pueden extenderse a varios kilómetros. Existen claros ejemplos de los diferentes sistemas de video-monitoreo desarrollados a lo largo de estos años, siendo el primero, el sistema ARGUS (Holman & Stanley, 2007). Este sistema se ha utilizado ampliamente en diferentes estudios correspondientes tanto a los cambios morfológicos de la zona costera, así como al uso que se da a estas zonas. Un claro ejemplo de lo anterior, puede observarse en el trabajo realizado por

Aarninkhof et al. (2003), en el cual se validó la utilización del sistema de video en el monitoreo de los cambios morfológicos inter-mareales de una playa. Después del desarrollo de este sistema, comenzaron a desarrollarse otros sistemas similares por lo que en la actualidad se tiene una variedad de donde elegir, algunos ejemplos son COM-ERA, HORUS, SIRENA, etc. Con el avance en el desarrollo de estos sistemas de video-monitoreo en las costas, se generó una nueva categoría en los indicadores de la línea de costa, esta nueva categoría está dada en términos de la detección de pixeles que poseen el mismo valor en el umbral HVS (por el nombre en inglés Hue, Value y Saturation; matiz, brillo y saturación) dentro de una región de interés (Aarninkhof et al., 2003). Con los indicadores de la línea de costa se procedió a determinar la variación de la misma, por el efecto de diferentes factores. Algunos ejemplos de las variaciones observadas en la línea de costa son:

- Tendencias (cuasi-) lineales.
- Cambios en la tendencia.
- Fluctuaciones en la línea de costa (cíclicos, cuasi-cíclicos y no cíclicos).

Estas variaciones espaciales pueden generarse dentro de las diferentes escalas temporales -corto plazo (horas a años, 10 m a 1 km); mediano plazo (años a décadas, 1 a 5 km), largo plazo (décadas a siglos, 10 a 100 km) y muy largo plazo (siglos a milenios, 100 o más km) -, que se deben tanto a causas naturales como antropogénicas. Algunos ejemplos de estas causas son cambios climáticos a largo plazo, cambios en el nivel del mar, variaciones climáticas regionales, eventos extremos, variación en el clima de oleaje, ciclos de la barra intermareal, variaciones estacionales, etc. (Stive et al., 2002). Existen en la actualidad numerosos ejemplos de la aplicación de sistemas de video-monitoreo en zonas costeras, entre los cuales se encuentran trabajos como el realizado por Kroon et al. (2007), en el cual se evaluó la aplicación de los sistemas de video para el monitoreo y el manejo de la estabilidad de las playas de arena. Esto lo realizó en tres playas diferentes en las cuales se evaluó la posición de la línea de costa, el impacto de las tormentas y la evolución a largo plazo. Finalmente, concluyó que los sistemas nos dan una mejor resolución tanto espacial como temporal que los métodos convencionales. Así mismo, reveló que esta técnica puede dar un mejor indicador de la recuperación del sistema natural ante una tormenta o evento extremo y las acciones llevadas a cabo por las personas (relleno de playa) o estimar la efectividad de las acciones.

Quartel et al. (2008), caracterizaron el comportamiento morfológico de una playa de arena, mediante la cuantificación de la variabilidad estacional de la posición de la línea de costa para marea alta, nivel medio y marea baja, así como, el ancho de la playa y el volumen de sedimento de la

misma, y finalmente determinando la dependencia de la variabilidad de la línea de costa con las condiciones de oleaje. La caracterización de los patrones de acreción y erosión de las playas y su comportamiento morfológico son otras formas de protección y preservación de las zonas costeras, dado que al conocer el comportamiento de dichas zonas nos da suficiente información para determinar si la erosión es estacional o si en la playa de estudio la erosión es una tendencia a largo plazo, y así determinar si se requiere la intervención de obras para evitar esta tendencia y los pasos a seguir.

En el estudio realizado por Senechal et al. (2015) se analizaron datos de la posición de la línea de costa y de las barras de arena en Biscarrosse, Francia, extraídos de un sistema de video-monitoreo, con un período de tiempo de 3 años. Con base en este análisis se determinó que en la playa de estudio existen patrones estacionales los cuales están altamente relacionados al clima de oleaje de la zona, durante los eventos más energéticos (“tormentas de invierno”) localizados entre los meses de noviembre a marzo, resultando en erosión durante esos meses y un patrón de acreción una vez que las condiciones de oleaje son menos energéticas.

El primer sistema de video-monitoreo funcional implementado en México, desde 2012 hasta la fecha, es el sistema implementado por el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual consiste en un sistema de adquisición de imágenes de fuente abierta (Nieto et al., 2010). Este sistema se basa en una serie de cámaras localizadas en una posición fija de la playa, las cuales toman imágenes a un intervalo de tiempo fijo. Las imágenes obtenidas pueden ser geo-referenciadas haciendo uso de la posición de las cámaras y de una serie de puntos de control localizados en el campo de visión de las cámaras. Esta geo-referenciación permite obtener coordenadas reales a partir de las imágenes (Holman & Stanley, 2007) .

La forma de muestreo clásica y que se usa en el presente trabajo es, cada media hora, las cámaras entran en funcionamiento y capturan imágenes durante 10 minutos a una frecuencia de unas 3 imágenes por segundo. A partir de esto, el sistema de video-monitoreo genera tres tipos de productos, los cuales son:





**Figura 2. Imágenes: instantánea (a), promedio (b) y de varianza (c).**

(1) una imagen instantánea de la playa (Figura 2.a) correspondiente a una de las imágenes capturadas durante los 10 minutos y que sirve, principalmente, para tener una idea de las condiciones durante la captura; (2) un promedio de todas las imágenes tomadas durante los 10 minutos de recolección de datos (Figura 2.b) que permite detectar la posición media de la línea de costa en ese intervalo o las zonas preferenciales de rotura de las olas, asociada a la ubicación de las barras de arena sumergidas (Enckevort & Ruessink, 2003); y (3) una imagen que representa la desviación estándar de los 10 minutos de imágenes (Figura 2.c) en donde se observan con más intensidad las regiones más variables de la playa.

Y es con los productos obtenidos de este sistema que se han desarrollado algunos trabajos en la zona (Sisal, Yucatán). Un ejemplo es el realizado por Garzón Hervás (2013), el cual consistió en ubicar la posición de las barras de arena, así como en una comparación entre la posición medida de las barras de arena y la proporcionada por el procesamiento de las imágenes. Por otro lado, el trabajo realizado por Ruíz Ceballos (2015), caracterizó el comportamiento de la barra intermareal en condiciones de baja energía en la misma zona de estudio que Garzón.

Este trabajo continúa con el uso de los productos del sistema de video-monitoreo, utilizados por Garzón Hervás (2013), Ruíz Ceballos (2015) y Gracia Barrera (2016), e incorpora lo observado por Ruíz Ceballos en el comportamiento de la barra intermareal, así como el método de extracción de la línea de costa planteada por Gracia Barrera, para finalmente aportar lo observado en el comportamiento de la línea de costa, así como la tendencia de la misma hacia el final del estudio.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La mayoría de los países con litorales se ven obligados a afrontar problemas de erosión en playas, así como de inundación en las mismas y el posible impacto que esto tiene en las poblaciones localizadas en ellas y el medio ambiente (Natesan et al., 2015; Rijn, 2011). Igualmente se ha demostrado que muchas playas a nivel mundial presentan una tendencia erosiva a largo plazo (Park & Edge, 2011), lo cual deviene en problemas de seguridad para la población. Por otro lado, estudios que consideran el cambio climático dentro de la evaluación del retroceso de las playas, han determinado que el aumento del nivel del mar debido al cambio climático juega un papel importante en la posición de la línea en años venideros (Brunel & Sabatier, 2009).

México cuenta con 11 122 kilómetros totales de Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros (INEGI, 2013), los cuales no consideran las islas (según lo especificado por la SEMARNAT, en <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/zona-federal/costas-de-mexico>). En estos 11 122 kilómetros se han llevado a cabo programas para el desarrollo de las actividades económicas asociadas a la pesca, acuicultura y al turismo, por lo que la explotación del litoral ha ido en aumento. Por otra parte, los asentamientos en los litorales mexicanos han presentado un incremento y, según estadísticas de la SEMARNAT, la densidad poblacional media para la zona costera es de  $46.2 \text{ hab/Km}^2$ , por lo que deviene una creciente necesidad de conocer y caracterizar el comportamiento de estas zonas y así prevenir daños y disminuir la vulnerabilidad de las comunidades que se localizan ahí. Sin embargo, se ha identificado que en México como en muchos otros países las playas presentan cierto grado de erosión (Jiménez et al., 2016; Meyer-Arendt, 1993), por lo que se pone de manifiesto la necesidad de evaluar e identificar si el retroceso de los litorales mexicanos presenta tendencias a largo plazo y cómo los procesos costeros, el cambio climático y las actividades que se llevan a cabo en estas zonas afectan a la erosión de las playas.

Este estudio pretende determinar la dinámica de la línea de costa en una playa disipativa micromareal, la cual está situada en el lado Noroeste del estado de Yucatán. Si bien el determinar el comportamiento de la línea de costa en esta playa no implica que se pueda generalizar en todas las playas, nos da un primer acercamiento para generar información útil y demostrar la importancia de evaluar y caracterizar la dinámica del litoral mexicano en un futuro.

## 4. OBJETIVOS

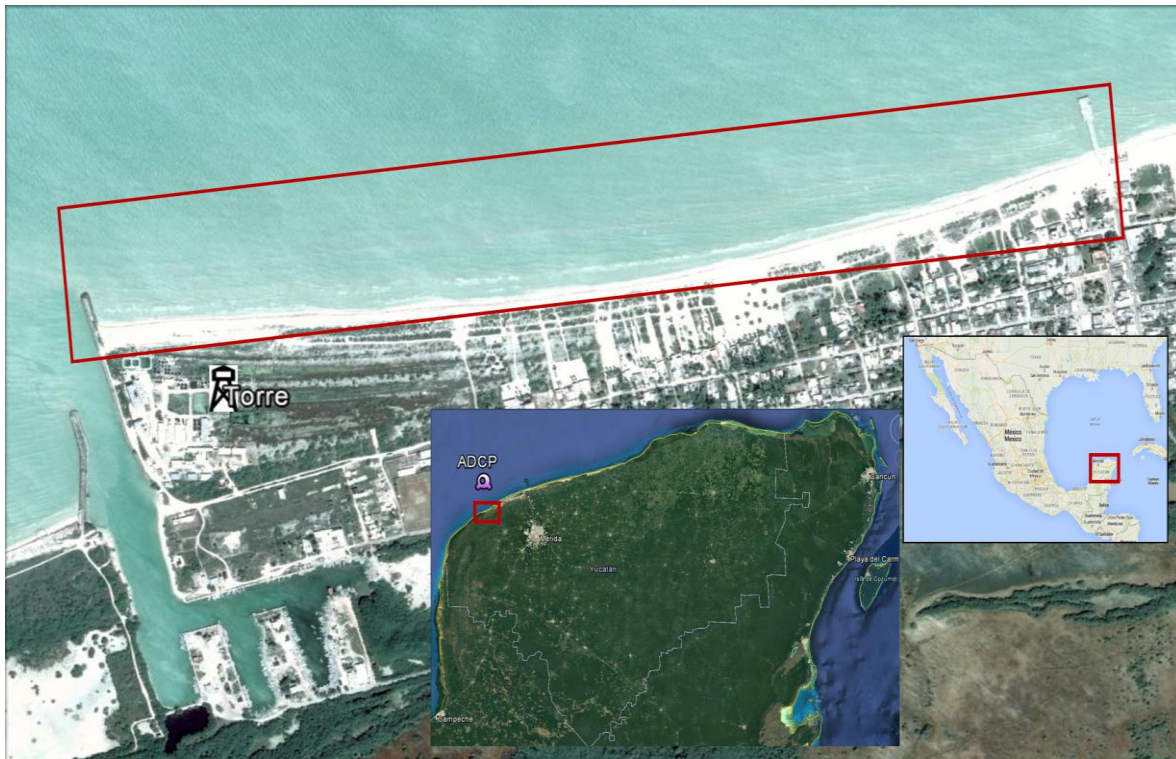
El objetivo general de este trabajo es determinar la dinámica de la línea de costa en una playa disipativa a diferentes escalas temporales, relacionando la morfología de la playa con el oleaje.

Para lograr este objetivo se plantearon y realizaron los siguientes objetivos particulares:

- 1) Caracterización del agente forzante: oleaje y mareas, a partir de:
  - a) Datos medidos de oleaje y marea para los años 2012 – 2015.
  - b) Campos de viento NCSFCR (2012 – 2015).
  - c) Datos de retro-análisis de oleaje de los años mencionados, con base en los campos de viento, mediante un re-análisis de estos datos, propuesto por Appendini et al. (2014).
  - d) Validación del hindcast de oleaje.
  - e) Identificación de eventos de tormenta para el período de estudio.
- 2) Obtención de la serie temporal de la posición de la línea de costa.
  - a) Extracción de la posición de la línea de costa a partir de las imágenes oblicuas (2012 – 2015), obtenidas del sistema de video.
  - b) Determinación de las medidas reales a partir de las imágenes oblicuas, mediante la geo-rectificación de los datos de la línea de costa e imágenes.
- 3) Evaluación del comportamiento de la línea de costa a diferentes escalas temporales y su relación con los agentes forzantes.
  - a) Determinación de identificadores de la línea de costa y escalas temporales.
  - b) Determinación de las tendencias.
  - c) Correlación entre las líneas de costa y los datos de oleaje.

## 5. ÁREA DE ESTUDIO

Las costas del estado de Yucatán miden aproximadamente 350 km de largo y comprenden desde el municipio de Celestún al Oeste hasta el municipio de Tizimin al Este. Esta zona se caracteriza por una pendiente casi monótona de 1/1000, una plataforma continental de aproximadamente 245 km de ancho (Enriquez, Mariño-Tapia, & Herrera-Silveira, 2010) y por ser una zona costera baja, constituida por lagunas costeras con islas de barrera y con zonas de frente al mar (CINVESTAV, 2007).

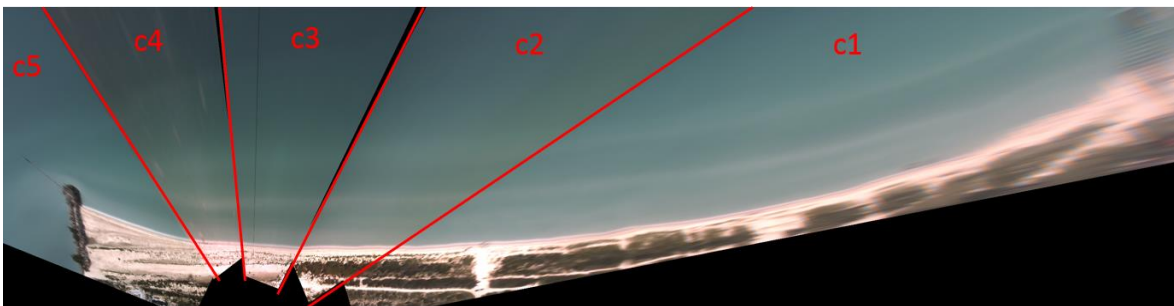


**Figura 3. Zona de estudio en el Puerto de Sisal, indicando la región abarcada por las vistas en planta de la playa (recuadro rojo), la posición del ADCP y la posición de la torre de video-monitoreo.**

El estudio se llevó a cabo en la playa de Sisal, situada al Noroeste del Estado (Figura 43), con un régimen de marea dominante tipo mixto, predominantemente diurno y un rango de marea aproximado de 0.8 m para mareas vivas y de 0.1 m para mareas muertas (Cuevas-Jiménez & Euán-Ávila, 2009). El régimen de oleaje para esta zona es de condiciones energéticas bajas, con una altura significativa media de 0.7-0.8 m (Appendini et al., 2013; Appendini et al., 2012). Esta área presenta tres épocas del año importantes en términos de oleaje: la época de Nortes, la cual comprende los meses de octubre a marzo; la de brisas, que inicia en abril y finaliza en junio y finalmente la época

de calma, que va del mes de julio al mes de septiembre (Mendoza et al., 2013). Las condiciones de oleaje causadas por ciclones tropicales, aunque poco frecuentes, pueden ocasionar efectos considerables en la playa.

Durante los primeros 10 meses del período de estudio (agosto 2012 a mayo 2013), la estación de video-monitoreo estaba formada por dos cámaras orientadas hacia el este de la playa. En junio de 2013 la estación se amplió a cinco cámaras cubriendo la región desde el muelle del puerto de Sisal al Este hasta la entrada del puerto de abrigo al Oeste, correspondiente a 1.6 km de playa (Figura 4 y Figura 3).



**Figura 4. Vista en planta de la zona de estudio, obtenida a partir de la geo-rectificación de las imágenes de las cinco cámaras. Los números marcan los campos de visión de las cinco cámaras (c1-c5) de la estación de video-monitoreo.**

## 6. METODOLOGÍA

El período de estudio comprende del 1 de agosto de 2012 al 30 de septiembre de 2015. Este trabajo se ha dividido en dos partes principales; la primera se enfoca en la caracterización de los agentes forzantes, el oleaje y la marea, y la segunda en el estudio de la evolución de las líneas de costa. En cuanto a la caracterización de los agentes forzantes, por un lado, se tienen mediciones reales de un dispositivo ADCP y el mareógrafo de la zona de estudio y, por otro lado, un retro-análisis de oleaje con base en datos de viento, tomados del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR, por sus siglas en inglés). En cuanto al procesamiento de imágenes, primeramente, se obtuvieron imágenes oblicuas y se generaron vistas en planta mediante una geo-rectificación. Posteriormente, se extrajo la posición de la línea de costa para el período de estudio y se procedió a hacer un análisis a diferentes escalas temporales, correlacionando los datos de oleaje con las imágenes y las líneas de costa extraídas. Finalmente, con los datos obtenidos, se determinaron las tendencias seguidas por la línea de costa en el área de estudio. Un esquema del método de trabajo se presenta en la Figura 5.

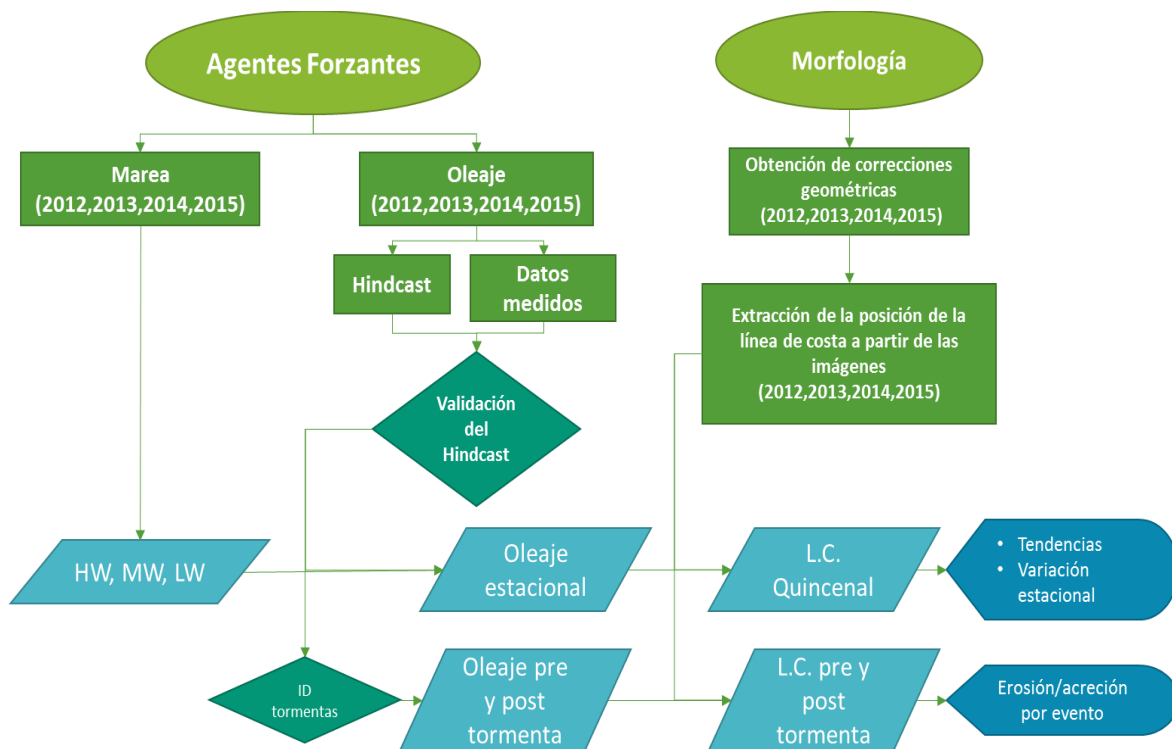


Figura 5. Metodología seguida en el trabajo.

## 6.1. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

### 6.1.1. Datos de oleaje

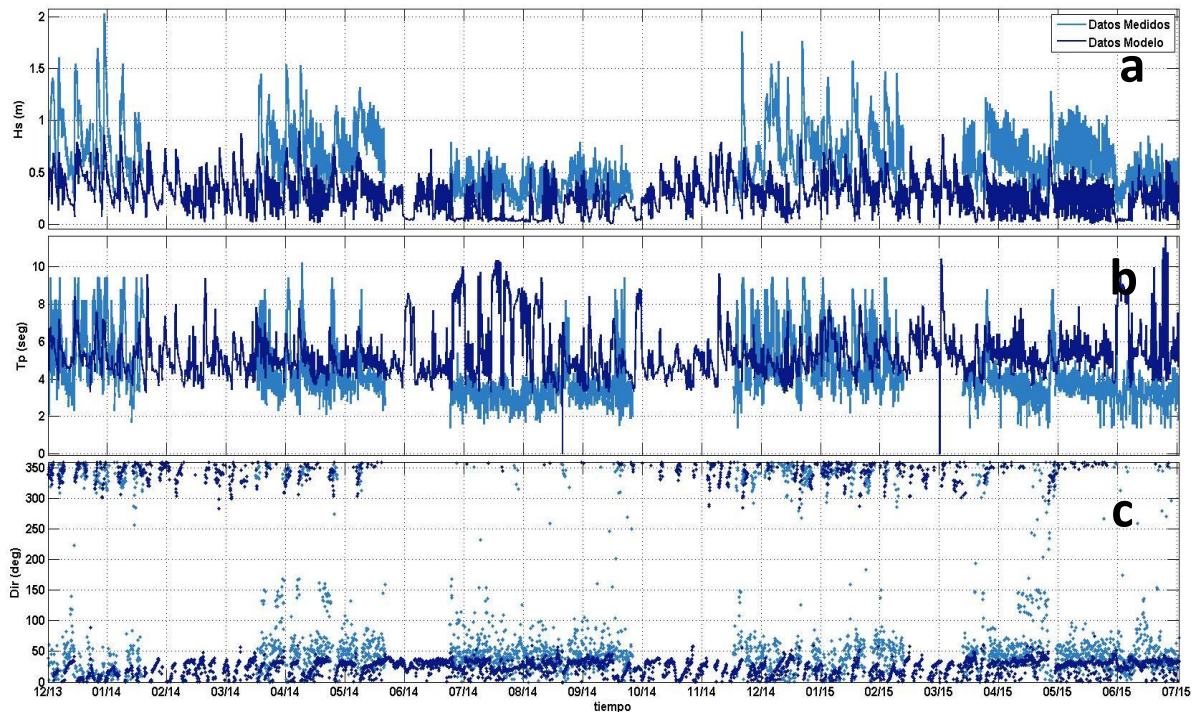
En cuanto a los datos de oleaje se siguieron dos caminos; el primero fue analizar los datos de mediciones reales de un perfilador acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés), colocado a 10 metros de profundidad que se encuentra aproximadamente a 10 km fuera de la costa, frente al área de estudio, las coordenadas del dispositivo son 21°16'30.99" N y 90°02'13.43" O (Figura 3). En las mediciones se observan períodos de tiempo en los cuales no se registraron datos, por lo cual se requirió utilizar datos de un retro-análisis de oleaje con vientos de CFSR, utilizando el modelo MIKE21 para poder analizar esos momentos en los que faltaron datos.

Los datos de viento utilizados, se obtuvieron de la base de datos del National Center for Environmental Prediction (NCEP), procesados por el Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), el cual es un producto de re-análisis de tercera generación, caracterizado por ser un sistema global, de alta resolución, el cual acopla atmósfera-océano-tierra superficie-mar hielo. El CFSR tiene una cobertura espacial en los rangos 180°O – 180°E y 90°S-90°N, la resolución atmosférica global de este re-análisis es aproximadamente 38 Km (T382) y el océano global es de 0.25° en el ecuador, extendiéndose a 0.5° global más allá de los trópicos. En cuanto al rango temporal del CFSR, los datos de este sistema de re-análisis tienen lecturas desde el primero de enero de 2011 y finalizan hasta el primero de diciembre de 2016, con datos horarios. De la base de datos del NCEP se extrajeron las componentes zonal y meridional ( $u$  y  $v$ ) de los datos de viento, con un formato establecido por el Network Common Data Form (NetCDF) para el período de tiempo correspondiente a este trabajo, a 10 metros sobre el nivel del mar con datos cada 3 horas y con resolución espacial de -100 a -60 para la longitud y para la latitud 35 a 5, con una malla 0.205° x ~0.204° de Oeste a 359.795 Este y 89.844 Norte a 89.844 Sur (1760 x 880 longitud/latitud gaussiana). Posteriormente, los datos fueron tratados con la herramienta MatLab®, utilizando los complementos nctools toolbox para interpolar los datos a una malla regular de 0.3° y transformarlos en el formato ascii para su lectura en MIKE 21.

El MIKE21 es un modelo de tercera generación de modelación costera, el cual puede ser utilizado para modelar el oleaje tanto en el océano como en zonas cercanas a la costa. Como datos de entrada para el forzamiento del modelo, se utilizó el campo de viento antes mencionado y la malla utilizada para el procesamiento fue la ETOPO1.



Una vez generado el retro-análisis, se extrajeron los datos del punto de la malla más cercano al punto donde se encuentra situado el ADCP, posteriormente se realizó una comparación de estos datos con las mediciones obtenidas del dispositivo ADCP y, finalmente, se hizo una correlación de ambas series para validar los datos con los que se trabajaron.



**Figura 6. Mediciones obtenidas con el dispositivo ADCP vs los datos obtenidos del retro-análisis, a 10 metros de profundidad, a) altura significativa del oleaje ( $H_s$ ); b) período del oleaje ( $T_p$ ); c) dirección del oleaje (dir).**

### 6.1.2. Eventos de tormenta

Con base en el retro-análisis del oleaje, se procedió a la caracterización de los eventos de tormenta (ET) en la zona de estudio. En este trabajo se considera como tormenta a un evento en el cual el oleaje supera un determinado límite de altura de ola durante cierto tiempo. Para identificar los eventos de tormenta en términos de oleaje, se utilizaron dos umbrales. El primero es el umbral de altura mínima del oleaje de tormenta que se calcula utilizando convencionalmente:  $H_{um} = \bar{H}_{sig} + 2\sigma$ , donde  $H_{um}$  es la altura mínima del oleaje para considerarse como tormenta,  $\bar{H}_{sig}$  es la altura media significativa y  $\sigma$  es la desviación estándar del oleaje (Walker & Basco, 2011). Por otro lado, el segundo valor umbral que se considera es la duración mínima de un evento, el cual se define para



dar tiempo a que el evento tenga un efecto sobre la playa, en este trabajo se utilizó un valor de 12 horas, debido a que se quisieron incluir todos los eventos relevantes durante el período de estudio, aun cuando por convención se toma como duración mínima de un Norte 24 horas. Con los eventos de tormenta identificados, se obtuvieron sus características principales, como: la altura máxima ( $H_s \max$ ), la altura media por evento ( $H_s \text{ med}$ ), la duración de la tormenta, la dirección del oleaje ( $\theta$ ) y el contenido energético ( $E$ ) expresado en  $m^2 \cdot h$ . La fórmula utilizada para la obtención del E es la siguiente:  $H_s^2 \cdot t$ , donde  $H_s$  es la altura de oleaje significativa media y  $t$  es el tiempo de duración del evento.

### 6.1.3. Datos de marea

La serie temporal de datos comprende el registro del Mareógrafo de Sisal (perteneciente al LIPC) que contiene a partir del año 2013 hasta el año 2015 con unos períodos de tiempo en los que no se cuenta con lecturas. En consecuencia, se requirió completar los datos faltantes de la marea con los del pronóstico para el Puerto de Progreso, Yucatán, realizado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), resaltándose que esta serie temporal corresponde sólo a la marea astronómica.

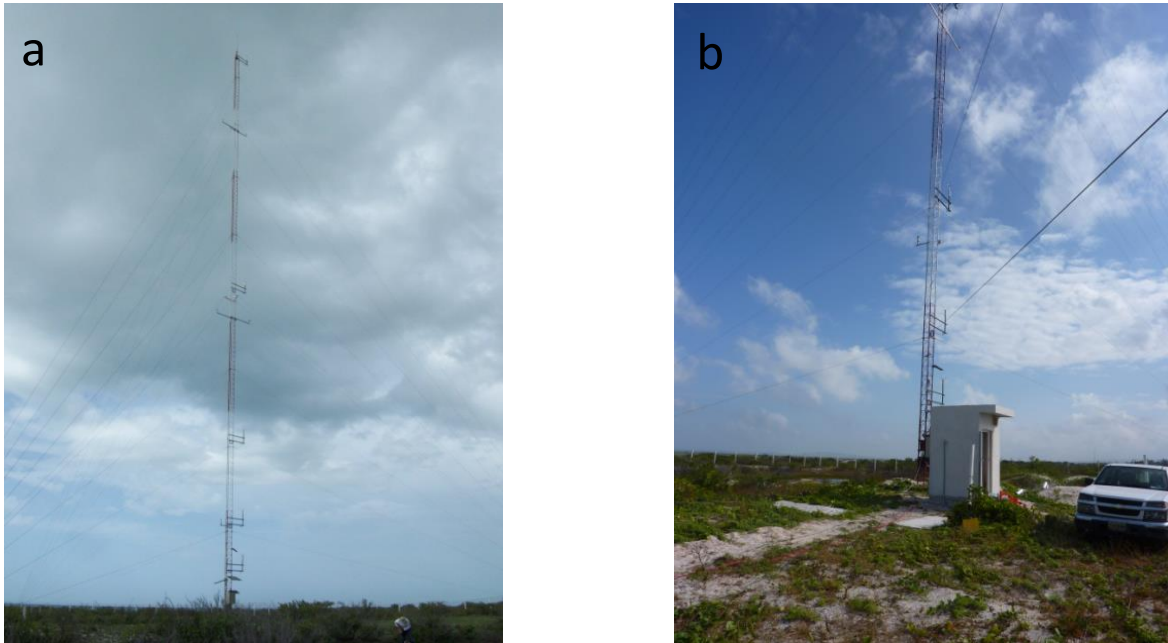
Se revisó que las series de tiempo, tanto los datos medidos como el pronóstico, estuvieran completas, de no estarlo se realizó una interpolación para la obtención de los datos faltantes. La serie de marea obtenida, se utilizó para identificar los momentos en los que se debía extraer la posición de la línea de costa para que correspondiesen al nivel del mar adecuado.

## 6.2. SISTEMA DE VIDEO

### 6.2.1. Obtención de imágenes y generación de vistas en planta

El sistema de video-monitoreo de Sisal está formado por cinco cámaras que se encuentran colocadas en lo alto de una torre meteorológica de 43 m de altura (Figura 3 y Figura 7.a), las cuales están conectadas mediante fibra óptica a un servidor encargado del pre-procesamiento y recolección de los datos, así como del envío al sistema principal (Figura 7.b). Este sistema de video comenzó a funcionar en agosto de 2012, contando inicialmente con 2 cámaras, orientadas hacia el muelle de Sisal (al Este). Posteriormente, en junio de 2013 se instalaron 3 cámaras más, por lo que a partir de ese mes se cuenta con una visión completa de la zona de estudio (Figura 3 y Figura 4). Las 5 cámaras

del sistema capturan 3 imágenes por segundo durante 10 minutos cada media hora, durante las horas de sol. En este trabajo se usan las imágenes promedio de los 10 minutos de muestreo.



**Figura 7. (a) Torre meteorológica del sistema de video, (b) Caseta en la base de la torre.**

Para poder obtener medidas reales a partir de las imágenes es necesario geo-rectificarlas, lo que permite transformar las imágenes en coordenadas reales para un plano determinado que, en este trabajo, se asoció al nivel del mar en el momento de la toma de las imágenes, ya que es la altura a la que está la línea de costa. A partir de la geo-rectificación y la unión de las imágenes de las 5 cámaras, se pueden obtener las vistas en planta de la playa (Figura 4). Para conseguirlo es necesario realizar dos procesos, una calibración intrínseca y otra extrínseca que requiere conocer la posición de las cámaras, del horizonte y una serie de puntos de control, localizados en el campo de visión de las cámaras (en este trabajo se tienen 14 puntos de control repartidos entre las 5 cámaras).

#### *6.2.2. Extracción de la posición de la línea de costa a partir de imágenes.*

La serie temporal de imágenes estudiada, abarca un período que va desde agosto de 2012 a septiembre de 2015 con imágenes de la playa cada media hora. La serie de imágenes tiene algunas interrupciones, generalmente menores a un día, pero que en varias ocasiones han sido más largas. El período más largo sin datos ocurrió entre diciembre de 2014 y febrero de 2015.

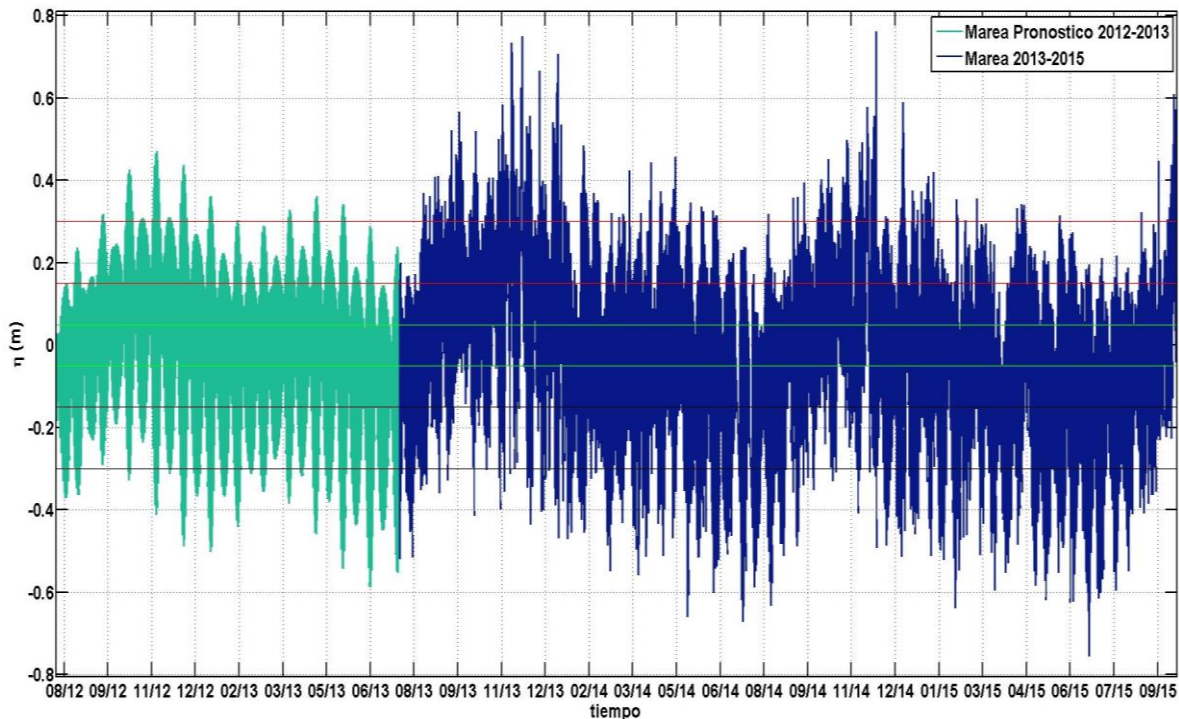
Las posiciones de la línea de costa se obtuvieron en función de las condiciones de oleaje y del nivel de mar. Durante los períodos de calma (entendido como las condiciones durante las cuales no ocurrieron ET), se extrajo la línea de costa cada 15 días en los momentos en los que el nivel del mar se encontraba dentro de los siguientes rangos de marea: marea alta (HW) con un rango de 0.15 a 0.30 metros, nivel medio del mar (MW) con un rango de -0.05 a 0.05 metros y el nivel de marea baja (LW) con un rango de -0.15 a -0.30 (Figura 8). Además, cuando ocurrió un ET, se extrajo la posición de la línea de costa antes y después del evento para incorporar en la serie temporal el efecto de los eventos. En el caso de las líneas de costa asociadas a ET, se tomó en cuenta que las condiciones de alta energía del oleaje hubiesen terminado y que el nivel del mar estuviese dentro del rango definido para cada evento.

Las líneas de costa se obtienen a partir de las imágenes oblicuas, siguiendo un proceso semi-automatizado descrito en Gracia et al. (2016). Habiendo obtenido las líneas de costa de las imágenes oblicuas de cada cámara, se utilizan los datos obtenidos en la geo-rectificación de las imágenes para generar las líneas de costa geo-rectificadas, eliminando los puntos que se repiten debido al traslape existente en las imágenes oblicuas. Para este paso, se tomó en cuenta el nivel del mar correspondiente a cada momento de la toma de las imágenes para cada día de trabajo (debe resaltarse que el proceso se realizó, utilizando las series temporales de marea, mencionadas en la sección 6.1.3).

Con la obtención de las líneas de costa para cada día y los días de ET, se extrajo una línea de costa de referencia, lo cual se realizó ajustando un polinomio a la línea de costa promedio del período de estudio. Esta línea de costa de referencia se definió para eliminar el efecto de la curvatura de la playa. Una vez calculada la línea de referencia se interpolaron los datos tanto de la línea de referencia de las líneas de costa disponibles a un mismo intervalo de posiciones longitudinales a la playa. Esta interpolación se realizó cada 0.5 metros, entre las posiciones  $x = -262$  y  $x = 1420$  para la construcción de la matriz de posiciones de la línea de costa  $Y(x, t)$  que contiene las posiciones transversales ( $Y$ ) de la línea de costa para cada posición longitudinal ( $x$ ) en cada momento ( $t$ ). Con los datos interpolados a un mismo intervalo de posiciones, se procedió a extraer el valor de la línea de costa de referencia a cada línea de costa de la serie temporal.

Debido a que la marea es de tipo mixta predominantemente diurna, no fue posible la obtención de las posiciones de la línea de costa para cada uno de los días, al extraer los datos correspondientes a HW y LW. A los tres grupos de líneas de costa se les agregaron los datos correspondientes a los días

de ET. Finalmente, estos 3 grupos (incluidos los datos de ET) se guardaron en tres series temporales diferentes con las que se observó: a) la evolución de la playa y b) las tasas de migración de toda la playa. Y, finalmente, de forma paralela a la evaluación de la evolución de la playa y las tasas de migración, se observaron los cambios morfológicos, debido a los eventos de tormenta mencionados anteriormente.



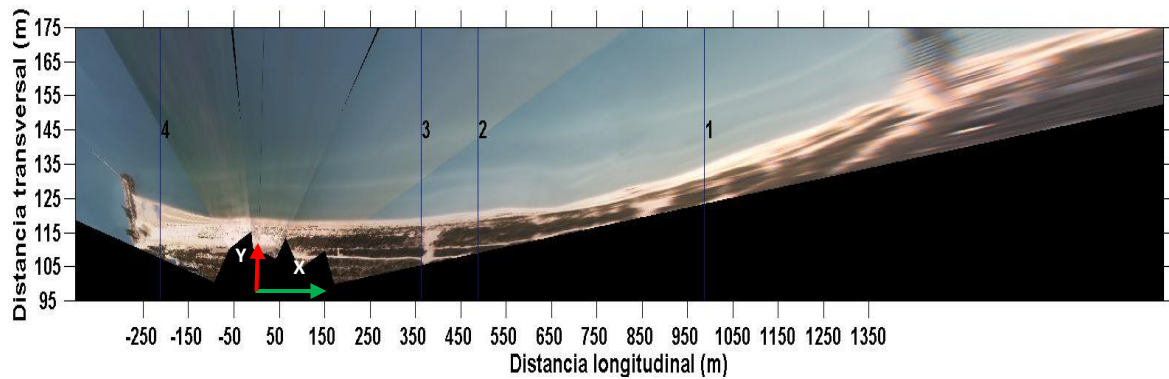
**Figura 8. Series temporales de marea, con rangos de marea delimitados: rojo, nivel de marea alta (HW); verde, nivel medio del mar (MW) y negro, nivel de marea baja (LW.)**

### 6.2.3. Cambios morfológicos debido a tormentas

Los cambios morfológicos debido a tormentas, se obtuvieron mediante la extracción de las líneas pertenecientes a los días anteriores y posteriores a los ET para observar los cambios ocurridos durante dichos eventos, para lo cual se realizó una comparación entre la línea de costa que se tiene un día antes de la tormenta y la obtenida una vez finalizado el evento (ambas obtenidas en las mismas condiciones de marea para minimizar errores). Así mismo, durante la comparación de las morfologías para ambos días de trabajo de los eventos, se observó la dirección del oleaje incidente, así como el contenido energético y la elevación de la marea, estas observaciones se realizaron con el fin de poder explicar lo sucedido en cada evento.

#### 6.2.4. Evolución temporal de la línea de costa.

Se muestra la posición de una serie de transectos, utilizados en este trabajo para ejemplificar lo observado en la evolución de la línea de costa, así como las tendencias seguidas por la línea de costa para las series temporales de  $Y_x(t)$  (Figura 9).



**Figura 9. Ubicación de los transectos de trabajo en la zona de estudio, posición longitudinal de la playa (eje X), posición transversal de la playa (eje Y), ubicando el 0 en la posición de la torre donde están colocadas las cámaras.**

Para determinar la evolución de la línea de costa, se aplicó un filtro de media móvil a la serie temporal de variación de posición de cada nivel de marea con la finalidad de observar los cambios estacionales que afectan a la línea de costa. La media móvil se aplicó, considerando que se tienen fechas de trabajo cada 15 días y la presencia de los eventos de tormenta (duraciones alrededor de 1 día o más), entonces para el filtro se tomaron 10 datos seguidos, considerando que los datos de menor duración (ET) desaparecerían y en su lugar nos dejarían el comportamiento de la línea de costa para períodos de tiempo mayores (escala estacional).

Una vez obtenida la variación de la línea de costa con el filtro, se ajustaron los datos de cada transecto a una línea recta con la finalidad de obtener la tendencia general de la línea de costa, así como una aproximación de las tasas de migración de la misma, mediante la pendiente de la línea recta a la cual se ajustaron los datos. Por lo que, al tener una pendiente positiva se consideró que en la playa de estudio existe acreción y de lo contrario con una pendiente negativa se tiene una tendencia de erosión.

## 7. RESULTADOS

En esta sección se presentan: i) la caracterización del clima marítimo, que incluye la caracterización del oleaje en la zona, de los eventos de tormenta y la marea; ii) la extracción de la posición de la línea de costa, iii) los cambios de la posición de la línea de costa debidos a eventos de tormenta y iv) los patrones de variación de la posición de la línea de costa a escala estacional e interanual.

### 7.1. CARATERIZACIÓN DEL OLAJE

#### 7.1.1. Datos de oleaje

Los datos de oleaje obtenidos con el ADCP para el período de tiempo de estudio (Figura 6) presentan períodos de tiempo en los cuales no se registraron lecturas, por lo que se decidió usar datos de oleaje modelados, los cuales se tomaron de un nodo localizado frente a Sisal a 50 m de profundidad (Figura 10).

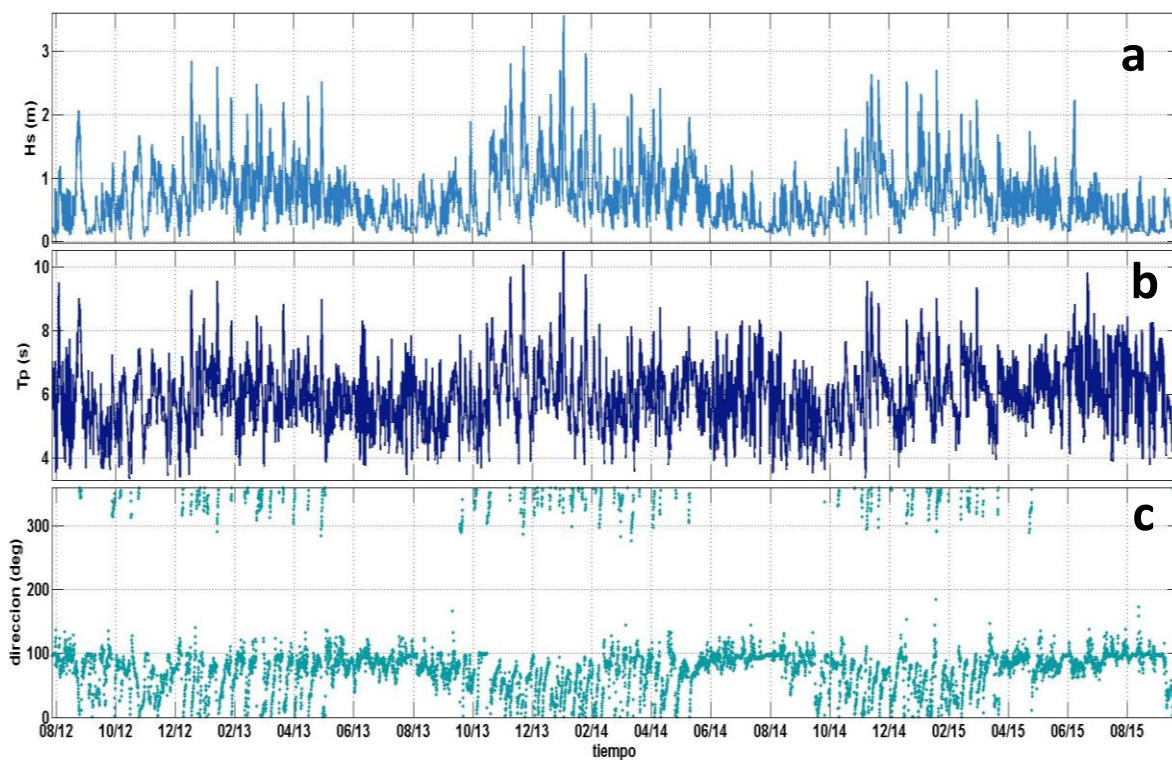


Figura 10. Serie de temporal de los datos modelados de oleaje en un nodo a 50 metros de profundidad; a) altura significativa del oleaje ( $H_s$ ); b) período del oleaje ( $T_p$ ); c) dirección del oleaje (dir).

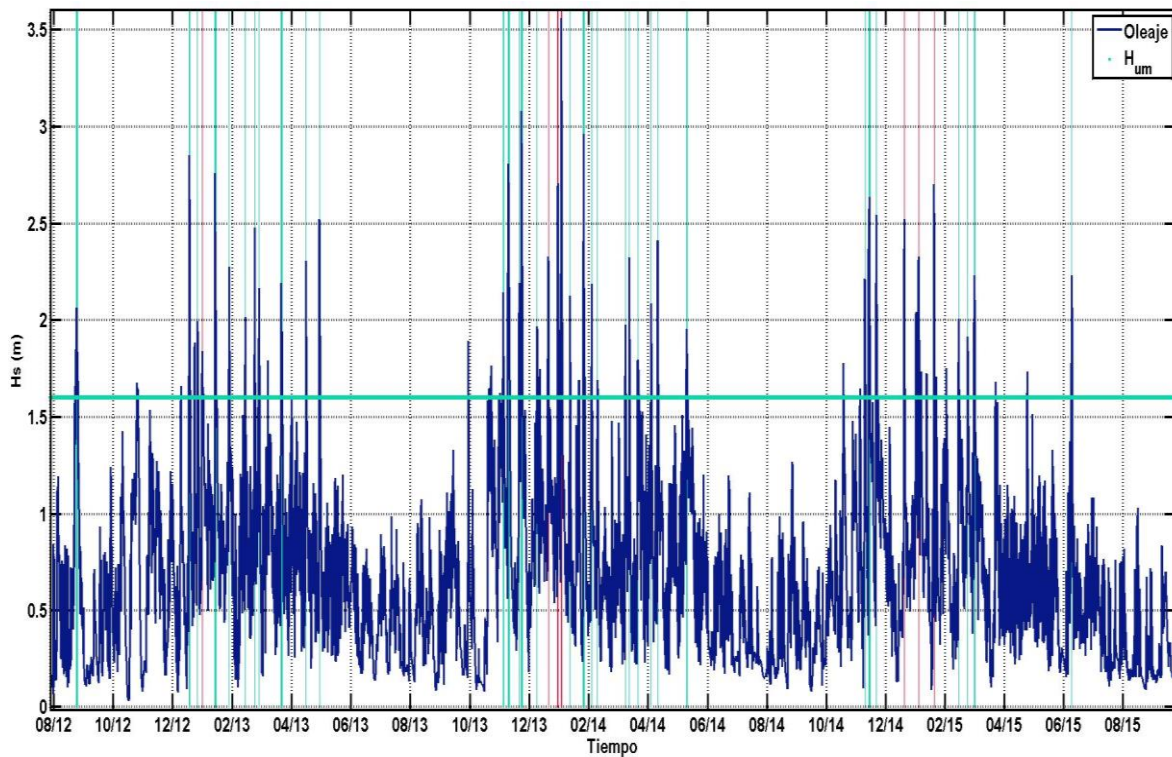


### 7.1.2. Eventos de tormenta

La serie temporal de datos extraída del modelo MIKE21, se trató para identificar los eventos de tormenta. La altura umbral para la serie temporal de datos de re-análisis a 50 m frente Sisal resultó:

$$H_{um} = \overline{H}_{sig} + 2\sigma = 0.7067 + 2(0.4455) = 1.5978 \approx 1.60 \text{ m}$$

De forma que, en este trabajo, un ET queda definido como aquel evento durante el cual la altura del oleaje es mayor de 1.60 m durante, al menos, doce horas. La serie contiene un total de 39 eventos, de los cuales se descartaron 7 debido a que no se contaba con imágenes para los días en los que iniciaban y terminaban los eventos, por lo que en total se trabajó con 32 eventos de tormenta (Figura 11). Las características de los 32 eventos de tormenta identificados se presentan en el Anexo A (Tabla 11), mientras que las características de los 7 eventos descartados se presentan en el Anexo B (Tabla 12), al final de este trabajo.



**Figura 11.** Serie temporal de altura significativa del oleaje, barras verticales cian indican los eventos de tormenta disponibles y en rojo los eventos en los que no se tienen datos, mientras que la línea horizontal indica el valor del umbral de la altura.

**Tabla 1. Días de inicio y final de los ET, así como los días antes y después de los eventos.**

ID	Día antes del ET				Día de inicio				Día final				Día después del ET			
	Año	Mes	Día	Hora	Año	Mes	Día	Hora	Año	Mes	Día	Hora	Año	Mes	Día	Hora
1	2012	8	26	16	2012	8	27	18	2012	8	29	21	2012	8	31	14
2	2012	12	20	18	2012	12	21	18	2012	12	23	0	2012	12	24	18
3	2012	12	31	21	2012	12	30	9	2012	12	30	21	2012	12	31	21
4	2013	1	15	23	2013	1	17	6	2013	1	18	18	2013	1	18	18
5	2013	1	18	18	2013	1	31	18	2013	2	1	9	2013	2	2	13
6	2013	1	30	20	2013	2	17	6	2013	2	17	18	2013	2	18	15
7	2013	1	15	23	2013	2	27	0	2013	2	27	15	2013	2	28	16
8	2013	1	30	20	2013	3	3	9	2013	3	4	3	2013	3	5	16
9	2013	2	18	15	2013	3	26	3	2013	3	27	12	2013	3	28	16
10	2013	2	25	19	2013	4	20	12	2013	4	21	9	2013	4	22	16
11	2013	2	28	16	2013	5	4	9	2013	5	5	9	2013	5	6	21
12	2013	3	2	13	2013	11	8	15	2013	11	9	18	2013	11	10	22
13	2013	2	25	19	2013	11	13	12	2013	11	15	18	2013	11	16	17
14	2013	3	2	13	2013	11	25	3	2013	11	29	0	2013	11	30	15
15	2013	3	28	16	2013	12	13	12	2013	12	14	3	2013	12	15	15
16	2014	4	19	15	2014	1	16	9	2014	1	16	21	2014	1	17	21
17	2014	4	22	16	2014	1	29	21	2014	1	31	15	2014	2	1	18
18	2014	5	3	13	2014	2	7	15	2014	2	8	3	2014	2	9	15
19	2014	2	12	15	2014	2	13	12	2014	2	14	0	2014	2	14	14
20	2014	3	12	17	2014	3	14	3	2014	3	14	18	2014	3	15	18
21	2014	3	16	19	2014	3	18	3	2014	3	18	18	2014	3	19	19
22	2014	3	25	14	2014	3	27	3	2014	3	27	15	2014	3	28	17
23	2014	4	7	14	2014	4	9	9	2014	4	10	6	2014	4	11	16
24	2014	4	14	22	2014	4	16	6	2014	4	17	0	2014	4	18	19
25	2014	5	14	20	2014	5	15	18	2014	5	17	0	2014	5	18	23
26	2014	11	11	23	2014	11	14	15	2014	11	15	12	2014	11	16	17
27	2014	11	17	16	2014	11	18	15	2014	11	20	9	2014	11	21	19
28	2014	11	24	19	2014	11	26	9	2014	11	27	6	2014	11	28	13
29	2015	2	17	15	2015	2	18	21	2015	2	19	12	2015	2	20	13
30	2015	2	26	13	2015	2	28	3	2015	2	28	15	2015	3	1	16
31	2015	3	5	20	2015	3	6	21	2015	3	7	21	2015	3	8	16
32	2015	6	13	12	2015	6	14	12	2015	6	15	12	2015	6	16	15

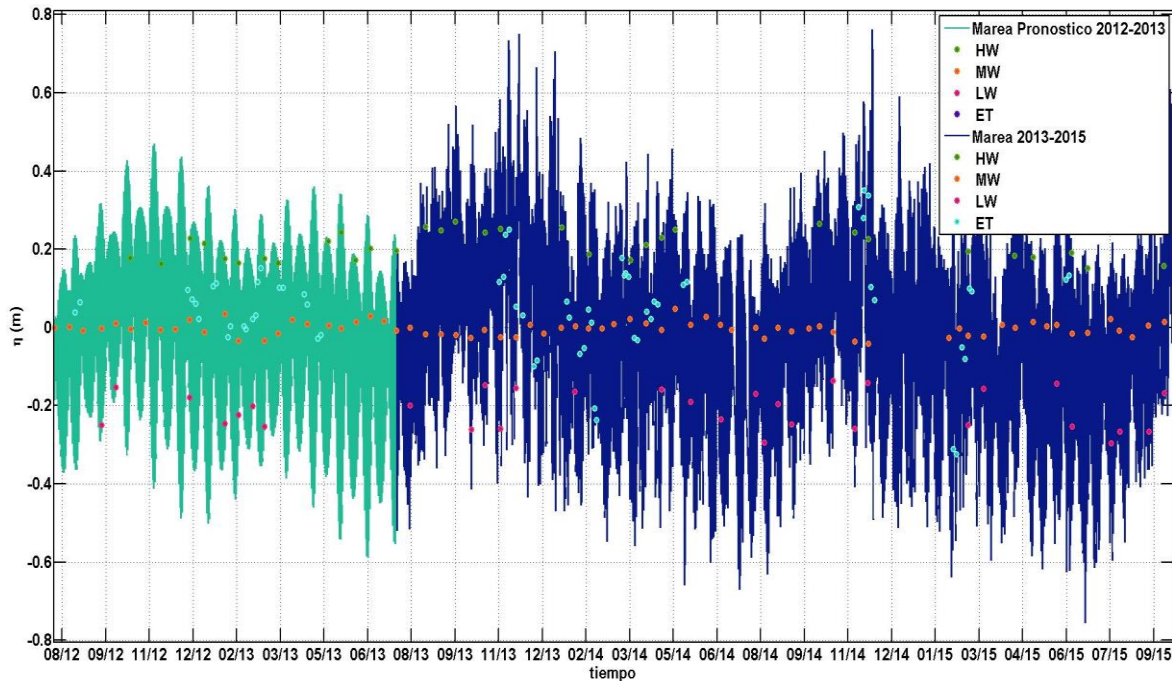


Si bien se puede observar que hay momentos en los que el oleaje supera el valor umbral de 1.60 metros, los eventos se descartaron como eventos de tormenta debido a que estos aun cuando superaban el valor umbral de la altura de oleaje, no superaron el valor umbral del tiempo, dado que aun si se tiene una altura de ola de 2 m durante una hora, este no tendría tiempo de afectar la playa. De igual modo, en la Figura 11 se observa que los dos eventos que alcanzaron mayor altura de ola durante el período de estudio fueron descartados dado que se localizaba dentro de los momentos en los que no se contaba con datos (el primero situado entre el 3 y el 4 de enero de 2014, y el segundo entre el 7 y el 8 de enero de 2014).

La Tabla 1 muestra la relación de eventos y las fechas para las que se extrajo la posición de la línea de costa. Para la selección de estos días (anterior y posterior al inicio y final del evento) se tomó en cuenta: i) disponibilidad de imágenes, ii) que hubiese condiciones de calma, revisado a partir de un examen visual de las imágenes que preceden al inicio del evento y las posteriores al termino del mismo, y iii) que el nivel del mar fuese similar en las condiciones previa y posterior al evento, considerando líneas de costa con un nivel de marea similar entre las dos con un rango de  $\pm 5$  cm de diferencia en la marea.

### *7.1.3. Datos de marea*

Se presenta tanto la marea de pronóstico utilizada para el período de tiempo en el cuál no se tuvieron lecturas de la estación mareográfica de Sisal, y los datos de marea extraídos del mareógrafo situado en Sisal (Figura 12).



**Figura 12.** Marea de pronóstico para el Puerto de Progreso (nodo más cercano al sitio de estudio) y marea obtenida con el mareógrafo de Sisal. Se señalan con puntos los días en los que se obtuvo la posición de la línea de costa para MW, HW y LW.

## 7.2. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LA PLAYA DE SISAL

Los resultados obtenidos de la evolución de la línea de costa se muestran en tres apartados; primero se presentan los cambios observados durante los eventos de tormentas, a continuación, los observados de manera estacional, y finalmente la tendencia que sigue la línea de costa de manera interanual.

### 7.2.1. Serie temporal de línea de costa.

En total, la serie temporal de datos de la posición de la línea de costa de Sisal está formada por 201 líneas de costa muestreadas de las imágenes del 1 de agosto de 2012 al 30 de septiembre de 2015. De estas, 34 posiciones corresponden a la serie temporal asociada a marea alta (Figura 13.a), 31 asociadas a marea baja (Figura 13.c), 72 las asociadas al nivel medio del mar (Figura 13.b). Por otra parte 64 están asociadas a los eventos de tormenta.

El campo de visión de las cámaras 1 y 2 cubre la región este de la playa, desde los 69 m a los 1400 m en la coordenada longitudinal de la playa (Figura 9), es por ello que se observa un corte en las

líneas de costa en los tres paneles de la Figura 13, que corresponde al período durante el cual el sistema de video-monitoreo solo contaba con dos cámaras.

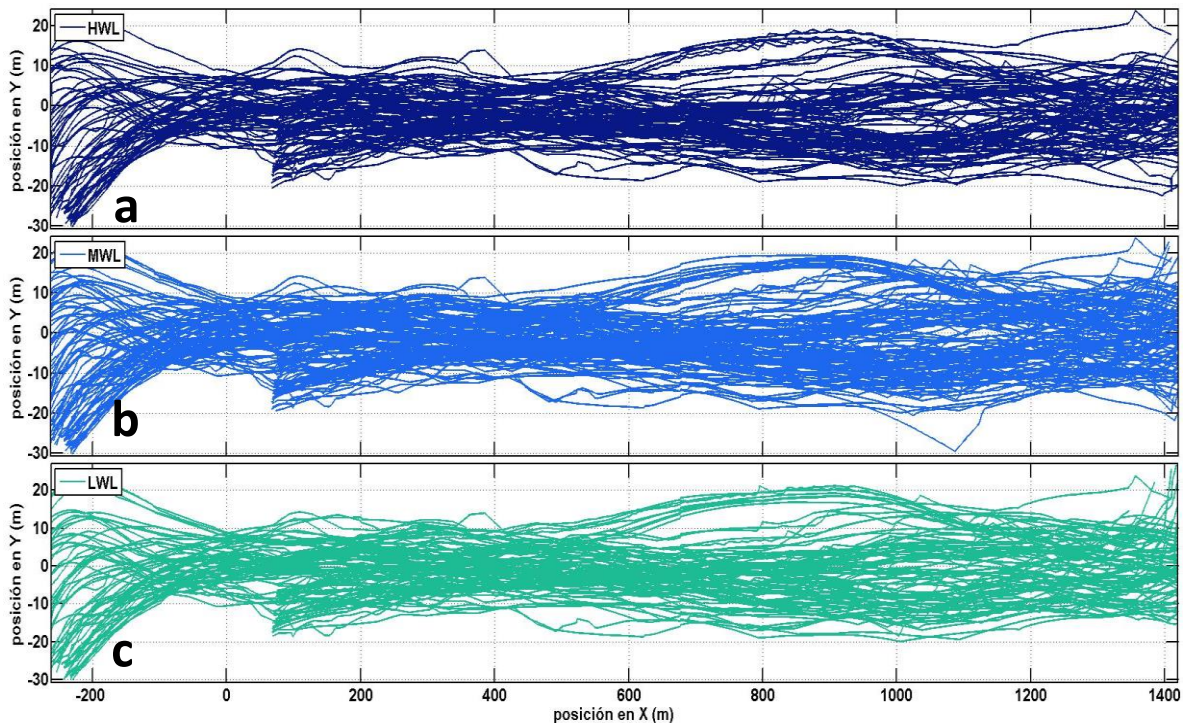


Figura 13. Variación de la posición de la línea de costa a lo largo de la playa respecto a una línea de costa promedio (línea de costa de referencia): a) HW, b) MW y c) LW.

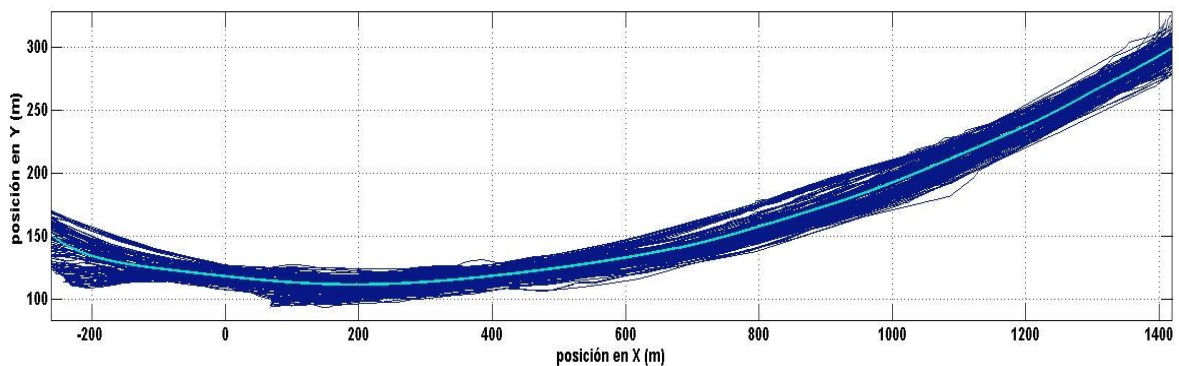
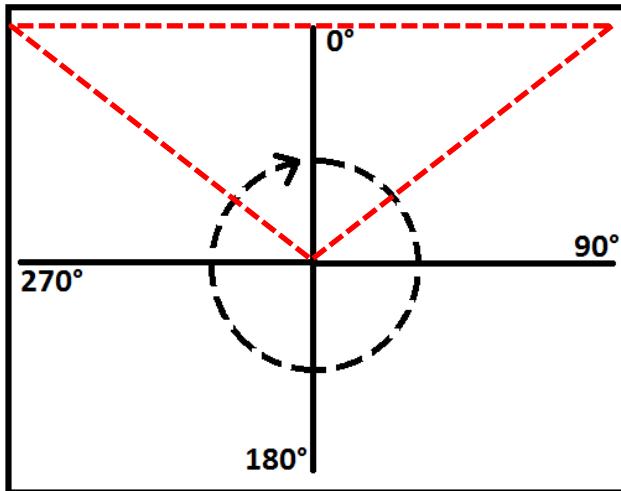


Figura 14. Línea de costa de referencia (cian) y su posición en comparación a las líneas de costa registradas durante el periodo de estudio (azul oscuro).

### 7.2.2. Cambios morfológicos debido a tormentas

Los cambios debido al efecto de eventos de tormenta son cambios rápidos que tienen lugar en períodos de tiempo entre unas horas y varios días. Para determinar los cambios sufridos por la línea de costa en respuesta a estos eventos de tormenta, se comparó la línea de costa previa y posterior

a cada uno de estos, considerando condiciones de calma (para minimizar el posible efecto del oleaje sobre la posición de la línea de costa) y niveles de marea similares (para que el efecto del nivel del mar tampoco afecte la comparación).



**Figura 15. Dirección del oleaje.**

Es importante remarcar que para los 11 primeros eventos de tormenta solo se disponía de las dos cámaras orientadas hacia el este de la playa (cámaras 1 y 2), por lo que las líneas de costa evaluadas son más cortas (Figura 9) y es a partir del evento 12 cuando se inició el estudio con las 5 cámaras.

Para la evaluación del cambio de línea de costa se consideró, además de las características del oleaje, el tipo de evento

responsable del oleaje: Nortes, brisas o ciclones tropicales. Para considerar el tipo de evento de tormenta se consideró la dirección del oleaje, así como el mes en el que se dio el evento, dado que los eventos situados entre los meses de octubre y marzo son principalmente Nortes, mientras que los eventos identificados entre los meses de abril y septiembre, pueden asociarse con ciclones tropicales o a brisas intensas que ocasionan cambios en la línea de costa, es importante mencionar que durante el período de estudio no tuvo lugar ningún ciclón tropical por lo que los cambios morfológicos debidos a este fenómeno no están registrados en este trabajo. El área delimitada por el triángulo punteado rojo indica la zona dentro de la cual un evento es considerado un Norte, esta zona abarca  $\pm 45^\circ$ , es decir se sitúa entre  $315^\circ$  y  $45^\circ$  pasando por el 0 (Figura 15).

Durante la evaluación de los cambios morfológicos debido a los eventos de tormenta se identificaron 4 respuestas según el grado de avance o retroceso observado en la línea de costa. Los casos, son enumerados en la Tabla 2.

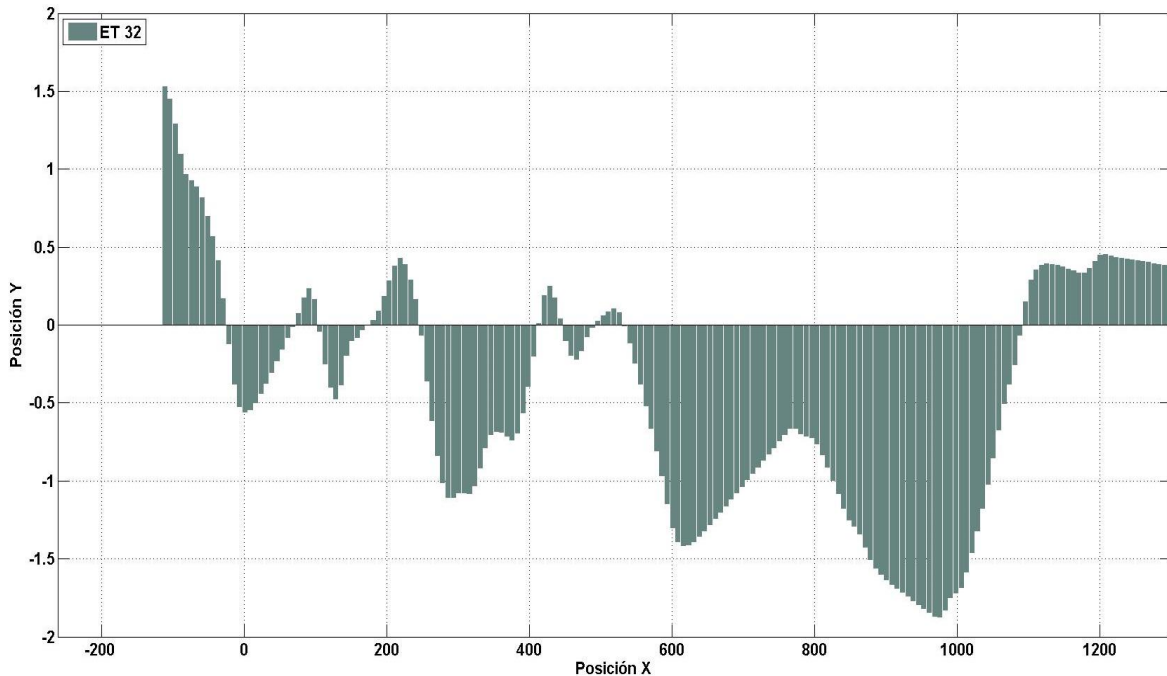
**Tabla 2. Casos identificados para los cambios debidos a eventos de tormenta.**

Caso	ID del ET
Eventos sin efecto perceptible	1 y 32.
Eventos con principalmente retroceso de la línea de costa	2, 4, 5, 7, 12, 13, 14, 15, 17, 21, 22, 23, 24, 27, 28 y 31.
Eventos con principalmente avance de la línea de costa	3, 9, 10, 16, 18, 20 y 26.
Eventos con avance y retroceso no uniforme de la línea de costa.	6, 8, 19 y 29.

Para el primer caso presentado en la Tabla 2, aquellos eventos sin efecto perceptible en la posición de la línea de costa, el retroceso o avance generados a lo largo de la playa fue menor a 2.5 metros en toda la extensión longitudinal de la playa. Las características del oleaje durante estos eventos clasificados dentro de este caso se presentan en la Tabla 3. Ambos eventos se dieron durante la época del año correspondiente a la época de tormentas tropicales (junio - octubre), la altura de oleaje aproximada durante esta época en la zona de estudio fue 1 m aproximadamente (Figura 11), por lo que se esperaría que estos dos eventos presenten un retroceso general en la playa, dado que el contenido energético en ambos eventos es similar al observado en los eventos que ocasionaron retroceso en la playa.

**Tabla 3. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto casi nulo en la línea de costa".**

ID	Hs med (m)	Hs máx. (m)	Tp med (seg)	Tp máx. (seg)	Dur (día)	Dir (Hsmax)	Contenido energético ( $m^2 \cdot h$ )
1	1.87	2.06	8.43	9.02	2.13	18.30	181.18
32	1.88	2.23	8.24	8.84	1.00	72.07	87.30



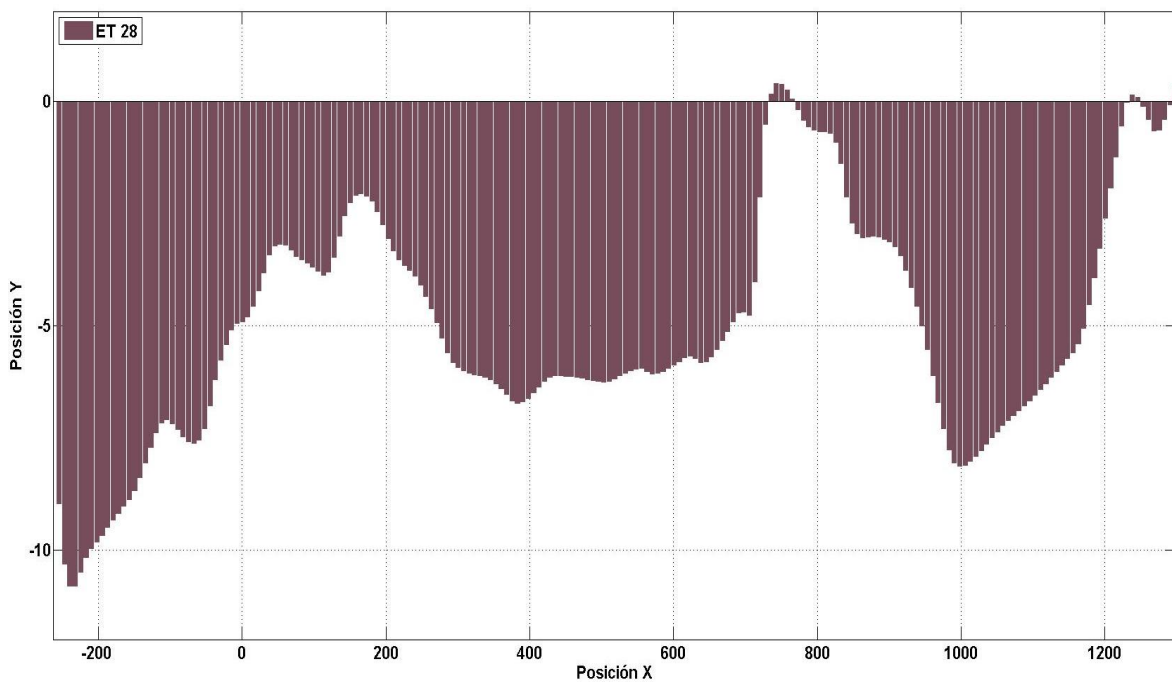
**Figura 16. Cambio en la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 32. Retrocesos y avances menores a los 2 metros. Este evento tuvo lugar entre los días 14 y 15 de junio de 2015.**

Para el segundo caso, los eventos responsables de un retroceso general de la línea de costa (Tabla 2), representan el 50% de los ET presentados en este trabajo. Las características de todos los eventos dentro de este caso se enlistan en la Tabla 4. La mayoría de estos eventos (14 de 16), se sitúan durante la época de Nortes, mientras que los dos eventos que no entraron dentro de esta época, tuvieron lugar los primeros meses de la época de calma (eventos 23 y 24), los cuales mantuvieron el estado de retroceso en la playa debido al corto período de tiempo entre los eventos 22, 23 y 24. Se observó que el retroceso máximo fue de 17.4 m (ET 14, Anexo C, Figura 38), mientras que el retroceso máximo promedio fue de 8.06 m y el retroceso promedio general fue de 2.58 m. Se resalta que la mayoría de estos eventos presentaron una  $H_s$  med mayor a los 2 m de altura, y el período promedio para estos eventos es de 8 segundos.

Como ejemplo se presenta el efecto del ET 28, el cual ocurrió entre los días 26 y 27 de noviembre de 2014, siendo el tercer evento de la temporada de Nortes de 2014. El contenido energético, el cual se calcula con la fórmula:  $CE = H_s \text{ med}^2 \cdot Dur$ ; donde Dur es la duración del evento en horas, para este evento se considera bajo (menor a los  $100 \text{ m}^2 \cdot h$  y duración de 24 horas). Se observa que el retroceso máximo es de aproximadamente 10 metros localizada en el lado Oeste, el cual es similar



al generado por eventos con duración y contenido energético mayores (Figura 17). El retroceso en la zona Oeste puede deberse a la dirección del oleaje del evento ( $298.11^\circ$ ) y la similitud del retroceso con eventos más energéticos se debe a la proximidad de los dos eventos precedentes (eventos 26 y 27, once y 6 días antes del evento 28, respectivamente), ya que el estado previo de la playa generada por estos eventos propició que el evento 28 mantuviera el estado de retroceso general.



**Figura 17. Cambio de la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 28. Evento ocurrido entre los días 24 y 28 de noviembre de 2014, con altura media de oleaje de 2.09 m, dirección max  $330.79^\circ$  y contenido energético  $94.67 m^2 \cdot h$ .**

Dentro de los eventos que ocasionaron este tipo de cambio en la línea de costa, está presente el evento con mayor contenido energético -evento 13- cuyo efecto en la posición de la línea de costa, sin embargo, fue de magnitud similar a otros eventos de menor contenido energético. Al analizarse el comportamiento de tres eventos consecutivos con pocos días de diferencia (ET 12, 13 y 14), se observó que, con respecto a la intensidad, los eventos 13 y 14 fueron más intensos que el evento 12, sin embargo, el efecto del evento 13 es similar al observado en el ET 12. Las similitudes entre lo ocurrido en los eventos 12 y 13 puede deberse a que el oleaje para ambos eventos proviene de una dirección similar, generando que la playa se acostumbrara a las condiciones de oleaje del primer evento (ET 12) propiciando así que la playa esté preparada para recibir un evento de características similares.

Se observó que el evento 13 causó retroceso en la mayor parte de la playa con excepción de una porción de 210 m en la zona Oeste de Sisal, donde la dinámica de la playa se ve más influenciada por el espigón del puerto de abrigo. Posterior a este evento, días después tuvo lugar el evento 14, el cual presentó una dirección del oleaje del Sureste en comparación a la observada en el evento 13; sin embargo, la  $H_s$  med del evento 14 presentó un valor similar al del evento previo, por lo que se explica el retroceso de la zona Oeste de la playa y la desaparición de la pequeña zona de avance observada en el evento 13 (Anexo C, Figura 37).

**Tabla 4. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto de retroceso generalizado de la línea de costa".**

ID	$H_s$ med (m)	$H_s$ máx. (m)	$T_p$ med (seg)	$T_p$ máx. (seg)	Dur (día)	Dir ( $H_{smax}$ )	Contenido energético ( $m^2 \cdot h$ )	Retroceso med (m)	Retroceso máx. (m)
2	2.25	2.85	8.21	9.27	1.25	3.67	164.79	2.59	7.69
4	2.12	2.76	8.48	9.56	1.50	303.76	170.25	1.40	6.37
5	2.02	2.27	7.85	8.30	0.63	341.39	63.58	1.12	5.15
7	2.09	2.48	7.92	8.46	0.63	319.05	70.33	0.57	4.01
12	1.81	2.14	7.48	8.00	1.13	12.06	91.17	1.42	9.53
13	2.16	2.81	8.51	9.68	2.25	23.29	264.02	4.21	11.06
14	2.15	2.63	8.07	8.94	1.38	164.11	177.09	5.05	17.39
15	1.76	1.97	7.49	7.85	0.63	51.04	48.11	3.82	10.26
17	2.14	2.96	8.34	9.78	1.75	1.02	203.11	2.42	7.90
21	2.05	2.32	7.61	8.12	0.63	294.83	66.05	0.44	3.36
22	1.69	1.80	7.54	7.73	0.50	53.48	34.97	1.39	3.27
23	1.88	2.08	7.57	7.97	0.88	334.35	76.90	0.61	8.32
24	2.06	2.41	8.07	8.74	0.75	319.25	81.31	1.68	6.47
27	2.20	2.63	8.45	9.21	1.75	12.92	209.66	4.26	6.93
28	2.09	2.54	8.16	8.85	0.88	330.79	94.67	5.01	10.88
31	2.01	2.23	8.58	9.36	1.00	321.33	99.66	5.25	10.36

Para el tercer caso, el avance general de la línea de costa, se clasificaron 7 eventos (Tabla 5). La mayoría de los eventos de esta clasificación, con excepción de uno, presentan un contenido energético menor a los  $100 m^2 \cdot h$  y duraciones menores a un día (Tabla 5). Como se sabe, durante los eventos de tormenta se genera un transporte de sedimento hacia mar, sin embargo, para este caso se puede ver el efecto contrario, esto es posiblemente debido a que la  $H_s$  med para estos eventos fue menor a la del oleaje de los eventos previos, a modo de ejemplo podemos poner a los eventos 2, 3 y 4. Para los eventos 2 y 4 se observó retroceso de la playa para valores de  $H_s$  med

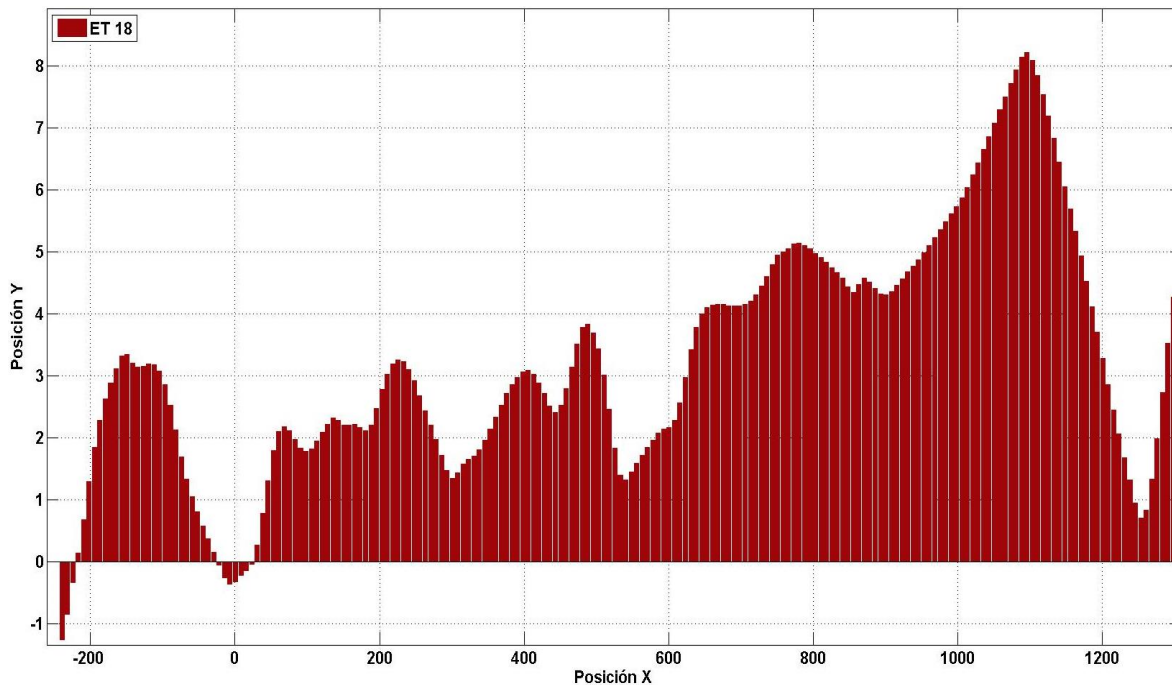


superiores a 2 m, mientras que el ET 3 avanzó y su  $H_s$  med tuvo un valor menor a los 2 m (Tabla 4 y Tabla 5). Se resalta que los tres eventos se evaluaron durante condiciones de marea alta descartando así el efecto del nivel del mar en el fenómeno de avance o retroceso de la línea. Se presenta el efecto ocasionado por el ET 18 a modo de ejemplo. Este evento se dio entre los días 7 y 8 de febrero de 2014 y se sitúa entre los eventos con contenido energético menor a  $50 m^2 \cdot h$ , con una dirección de oleaje de  $80.63^\circ$  con la cual se esperaría un incremento en el avance de la zona Oeste, en contraste a lo esperado se observó un avance máximo en la zona Este con un valor de 8 metros (Figura 18).

**Tabla 5. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto de avance generalizado de la línea de costa".**

ID	$H_s$ med (m)	$H_s$ máx. (m)	$T_p$ med (seg)	$T_p$ máx. (seg)	Dur (día)	Dir (Hsmax)	Contenido energético ( $m^2 \cdot h$ )	Avance med (m)	Avance máx. (m)
3	1.88	1.99	7.65	7.83	0.50	347.69	43.91	3.66	8.32
9	1.87	2.19	8.00	8.82	1.38	348.86	116.51	1.19	4.44
10	1.98	2.30	7.37	7.84	0.88	326.40	85.84	0.02	3.98
16	1.96	2.12	7.44	7.78	0.50	328.18	47.12	1.68	5.54
18	1.95	2.18	7.54	7.81	0.50	3.86	46.88	3.22	8.22
20	1.82	1.98	7.46	7.82	0.63	23.25	51.39	1.76	7.54
26	1.94	2.21	8.15	9.52	0.88	322.64	81.93	3.95	8.81

Este evento tuvo lugar 7 días después del ET 17 que generó un retroceso general de la playa, al considerar el estado previo de la playa generado por el ET 17 y que tanto el contenido energético como la altura media del oleaje para el ET 18 son menores al ET 17, así como una dirección del oleaje menos oblicua, puede explicarse el porqué del avance observado, dado que al tener oleaje menos energético y menos oblicuo el sedimento puede ser transportado hacia tierra. El avance máximo observado para este tipo de efecto fue de 8.81 m aproximadamente (ET 26) y el avance máximo promedio fue de 6.7 m, mientras que el promedio del avance medio fue de 2.2 m.

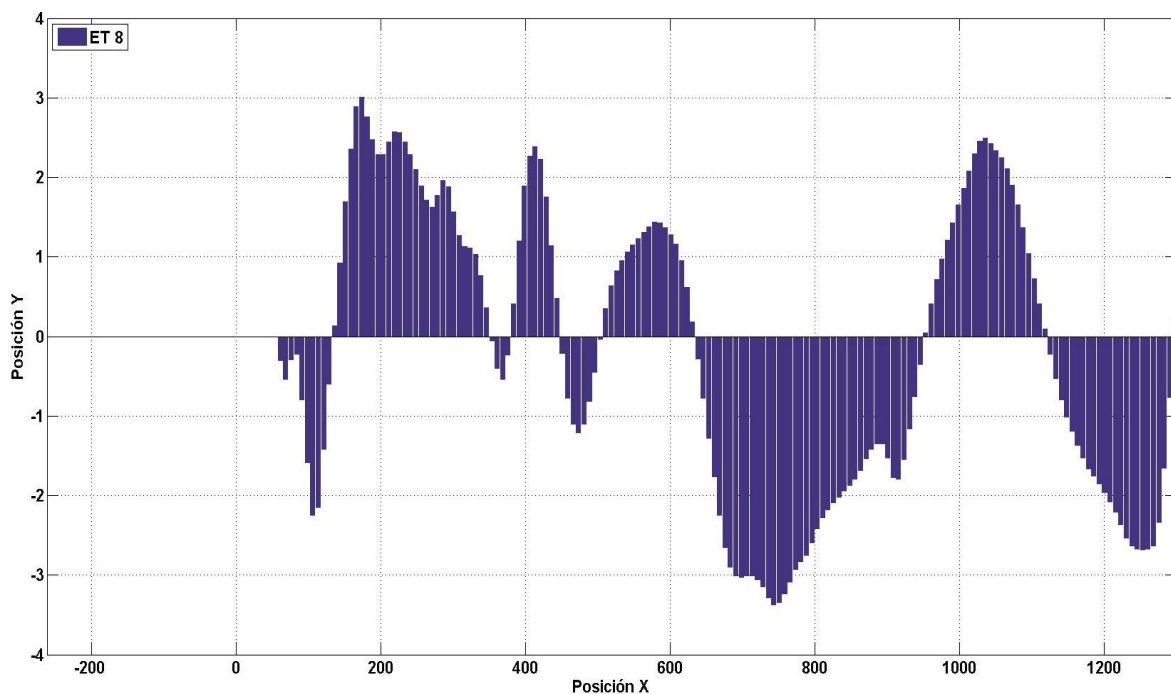


**Figura 18. Cambio de la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 18. Evento ocurrido entre los días 7 y 8 de febrero de 2014.**

Finalmente, para el caso donde se observó igual cantidad de zonas de avance y retroceso, se tienen 4 de 32 eventos. En todos los eventos de este caso se observa una dirección proveniente del Noroeste, así mismo todos presentaron una  $H_s$  med menor a los 2 m, lo cual puede observarse en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..** Como ejemplo, se presentan las variaciones sucedidas durante el evento 8 (Figura 19). Este ET pudo haberse clasificado en el caso de efecto casi nulo, sin embargo, dado que el retroceso y el avance en dos zonas fue mayor a los 2.5 metros, se clasificó en un caso diferente. Este ET presentó un contenido energético practicamente igual al del evento previo que generó retroceso general en la playa (ET 7), por otro lado el evento que tuvo lugar días depues presentó un contenido energético mayor y generó avance general de la playa (ET 9), por lo que podría considerarse que durante este evento se dio un estado de transición entre el evento previo y el posterior (Anexo C, Figura 36 yFigura 37). Es importante señalar que durante el mes de marzo de 2013 se observó días en los caules la barra intermareal quedó expuesta durante la marea baja generando así un ancho de playa mayor que el esperado, uno de estos días quedó comprendido al momento de extraer la posición de la línea de costa final para el ET 8. Por lo que este comportamiento en la línea de costa debida a la playa sumergida pudo, probablemente, gear este efecto en la playa aun cuando fue un evento de intensidad similar al ET 7 que generó retroceso.

**Tabla 6. Características de los eventos clasificados dentro del caso "efecto de avance y retroceso no uniforme de la línea de costa".**

ID	Hs med (m)	Hs máx. (m)	Tp med (seg)	Tp máx. (seg)	Dur (día)	Dir (Hsmax)	Contenido energético ( $m^2 \cdot h$ )
6	1.81	2.01	7.46	7.67	0.50	356.73	40.89
8	1.93	2.16	7.53	8.13	0.75	329.53	70.84
19	1.64	1.69	7.00	7.58	0.50	325.20	32.60
29	1.87	2.00	8.00	8.31	0.63	354.56	53.96

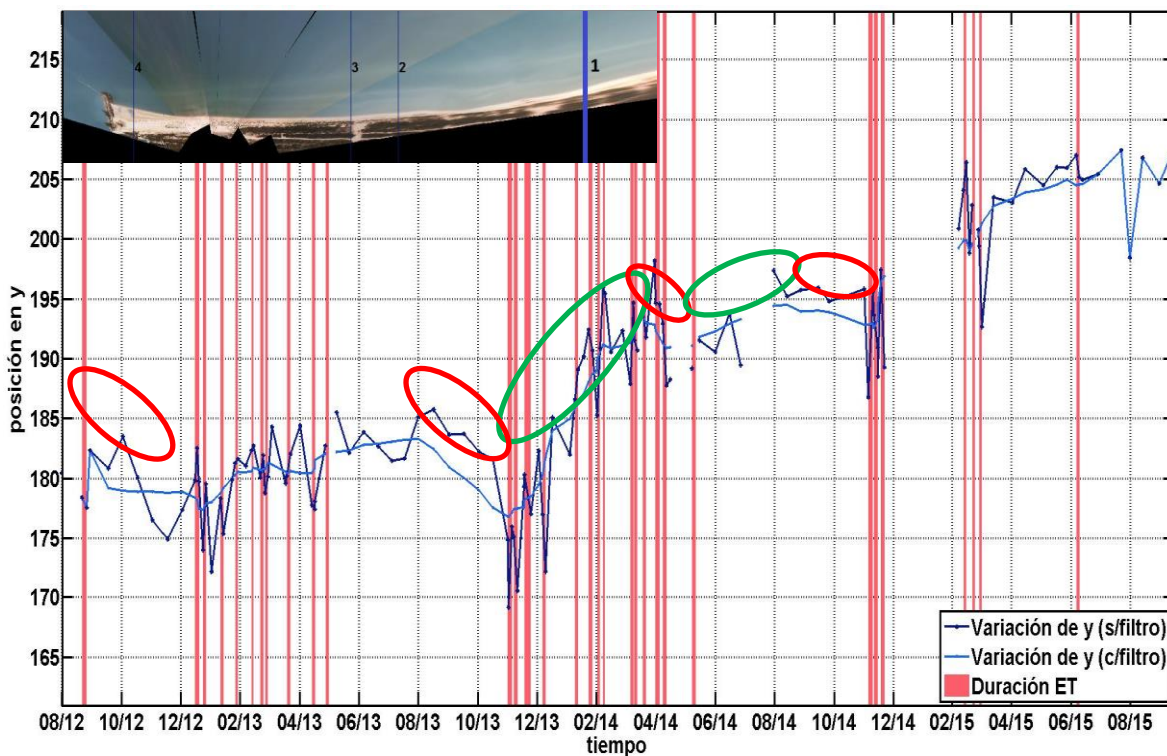


**Figura 19. Cambio de la posición de la línea de costa debido al evento de tormenta 8. Este evento tuvo lugar entre los días 3 y 4 de marzo de 2013.**

En resumen, se puede ver que los cambios morfológicos ocasionados por los diferentes eventos dependen de las condiciones morfológicas de la playa antes del evento y no solo de las características del oleaje presente durante los eventos dado que para diferentes condiciones de oleaje se observan cambios similares en la playa o en condiciones de oleaje similares los cambios en la playa son muy diferentes.

### 7.2.3. Evolución estacional e interanual de la línea de costa

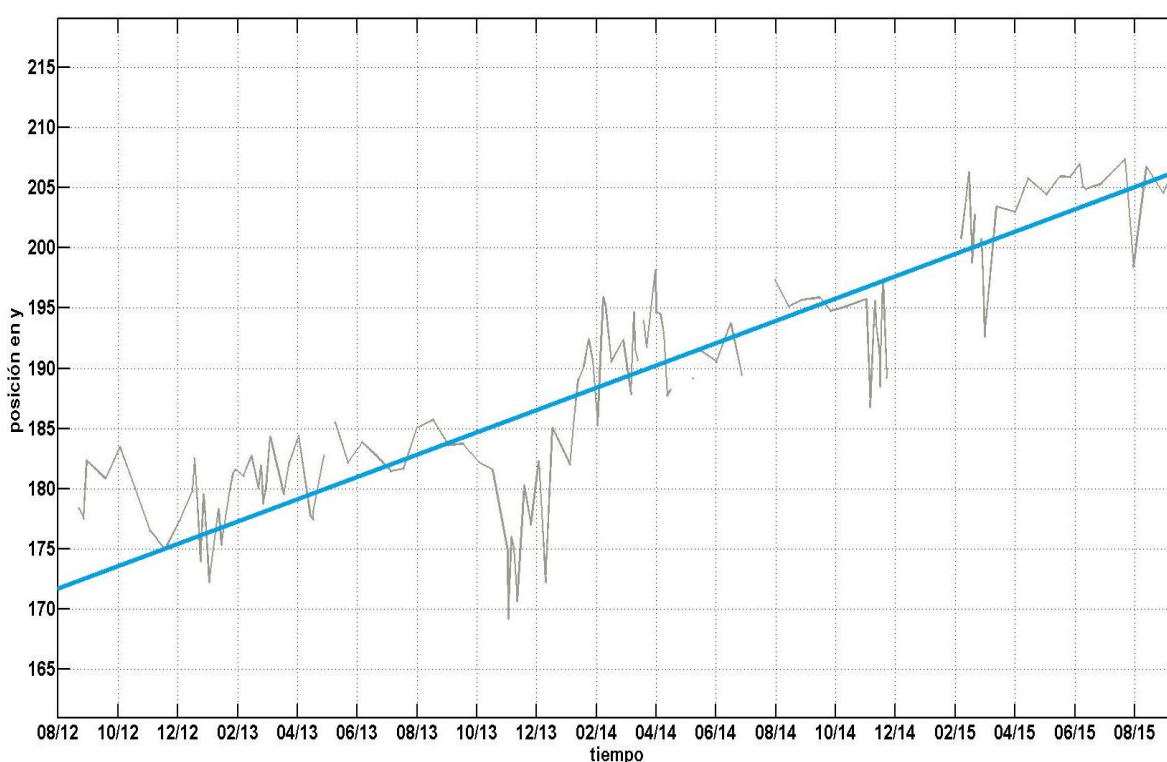
Superpuesto al patrón de avance-retroceso de la línea de costa debido al efecto de eventos de tormenta individuales se encuentra una variación estacional de la posición de la línea de costa en la playa de Sisal asociada a las características del oleaje predominante en cada temporada del año. La playa de Sisal puede dividirse en tres regiones con comportamientos similares: i) la región este, que comprende las posiciones longitudinales de 1400 a 738 m; ii) la región central, que comprende las posiciones longitudinales de 738 a 238 m; y iii) la región Oeste de la playa; comprendida de la posición 238 a -260 m. Para ejemplificar el comportamiento de estas regiones se presenta la evolución de 3 transectos perpendiculares a la playa (Figura 9, transectos 1, 2 y 4). Para los tres transectos se presentan dos figuras para cada zona, la primera tiene la serie temporal con un filtro de media móvil (Figura 20, Figura 22 y Figura 24) y la segunda la serie temporal con un ajuste lineal (Figura 21, Figura 23 y Figura 25).



**Figura 20. Evolución temporal de la posición de la línea de costa en el transecto 1 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL, con filtro de media móvil.**

El comportamiento de la zona Este de la playa muestra que para el período de estudio la variación de la línea de costa presenta varias escalas temporales, cuando se estudian los eventos de tormenta (horas y/o días), y otra cuando no se evalúan los eventos (semanas, meses) (Figura 20). Se percibió

que, al remover los días correspondientes a los ET, la serie temporal de datos era muy similar a lo observado en el filtro de media móvil aplicado. Por otro lado, se percibe que durante el período en el que se observan eventos de tormenta se tienen cambios mucho más bruscos que los observados en las épocas del año donde no se tiene presencia de eventos, donde las variaciones son menos bruscas y más paulatinas. De igual modo se puede observar que al inicio del estudio (los primeros meses) no había tanta variación de la línea de costa, sin embargo, a finales de 2013 se observa que la línea de costa comenzó a avanzar aun cuando se tiene la presencia de un proceso cíclico estacional, dado que como se aprecia la línea de costa exhibe períodos del año con un marcado avance y otros con un retroceso.



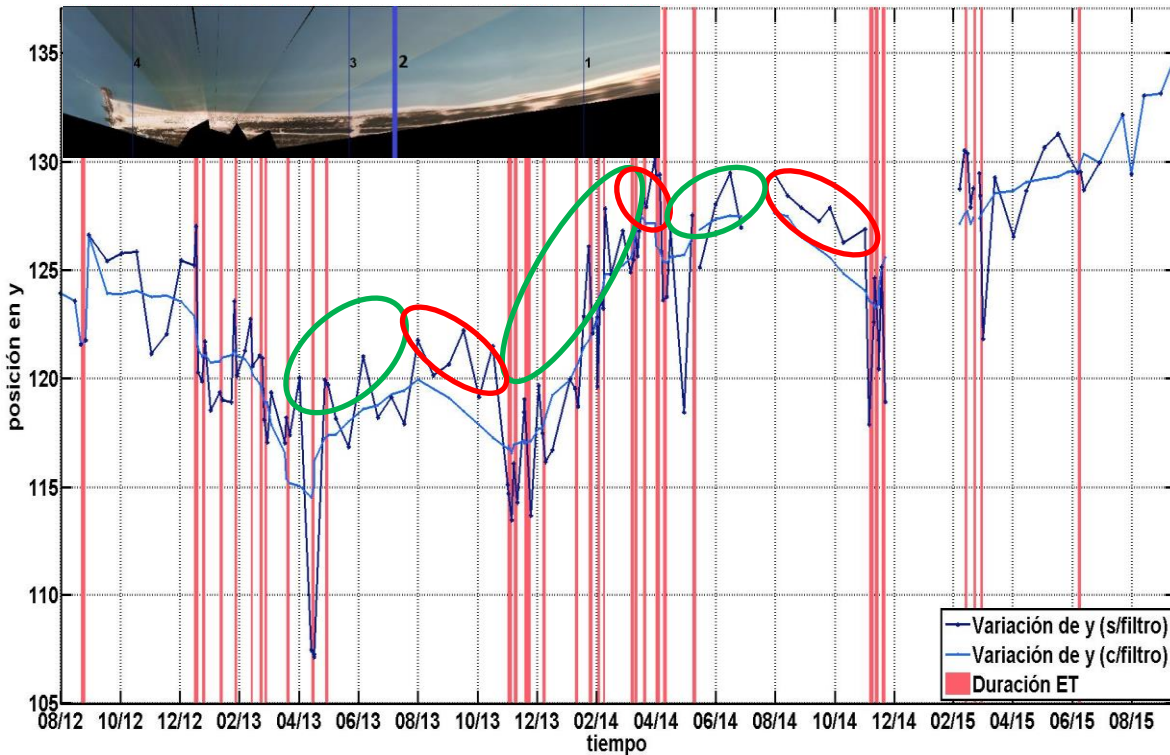
**Figura 21. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 1 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL (línea gris), con ajuste lineal (línea azul claro).**

Al evaluar la tendencia general observada para este transecto (Figura 21), que la playa tiende a avanzar hacia mar aun con la presencia de períodos de retroceso en el año, si bien la recta de ajuste para el transecto 1 presenta una pendiente muy pronunciada, la playa no presenta esta misma pendiente en toda su extensión longitudinal, lo cual puede indicar la existencia de zonas en las cuales hay mayor depósito de sedimento que propicia un avance mayor en determinadas zonas de la playa. En el caso del transecto 1, la playa avanzó aproximadamente 27 m para todo el período de

estudio. En la Tabla 7 donde se resume el avance y retroceso estacional observado para el transecto 1.

**Tabla 7. Avance y retroceso estacional del transecto 1 durante el período de estudio. El signo negativo indica que en ese período ocurrió el efecto contrario al esperado (avance en el período de calma y retroceso en el periodo de ET).**

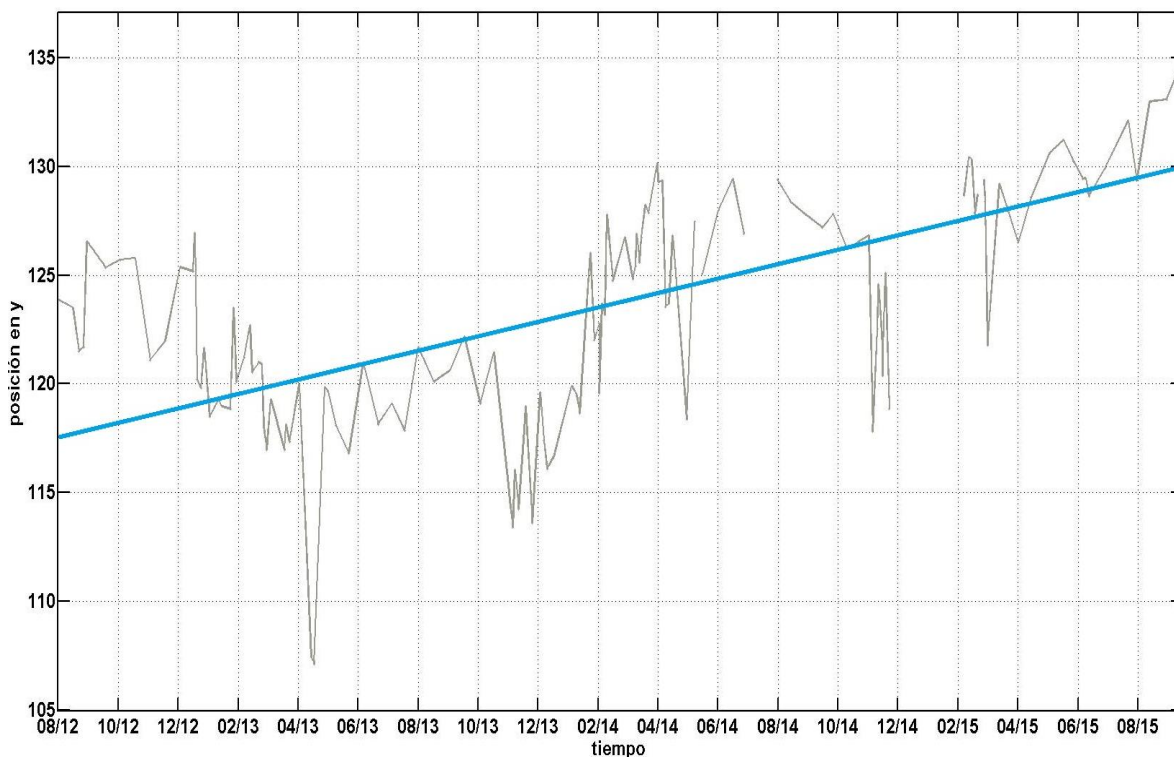
Año	Período de calma	Período de ET	Número de eventos
	Avance (m)	Retroceso (m)	
2012	-0.4	-5.525	3
2013	-2.82	-16.92	12
2014	-3.05	-7.65	13
2015	4.68	-	4



**Figura 22. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 2 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL, con filtro de media móvil y resaltando los períodos en los que se tuvieron ET.**



Para el transecto 2 (Figura 22), nuevamente se observa que para la época del año donde se tiene la presencia de eventos la línea de costa presenta cambios bruscos ya sea de avance o retroceso y que durante las épocas del año donde no se observaron eventos la línea de costa presentó variaciones menos bruscas y paulatinas. Sin embargo, en este transecto se observa que los cambios presentados por la línea de costa al inicio del período de estudio fueron mucho más marcados que los observados en el transecto 1 (Figura 20), aunque este transecto al igual que el anterior a partir de noviembre de 2013 comenzó un proceso de avance hacia mar hasta el final del estudio, aun con la presencia de procesos cíclicos estacionales. De igual modo, otro aspecto a resaltar es que la posición de la línea de costa a inicio del año 2014 es muy similar a la observada en septiembre de 2012, sin embargo, en 2014 la línea de costa no retrocedió tanto como lo hizo durante 2012 y 2013.



**Figura 23. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 2 (Figura 7) obtenidas en condiciones de MWL (línea gris), con ajuste lineal (línea azul claro).**

La tendencia general de la línea de costa para el transecto 2 (Figura 23), al igual que la tendencia observada para la zona Este de la playa es de avance hacia mar, sin embargo, se puede apreciar que la pendiente en este ejemplo es menos pronunciada. Posteriormente se presenta el valor de la pendiente de la recta de ajuste para cada transecto en el cual se resaltarán similitudes identificadas en las tres zonas de la playa (Tabla 10). El avance neto de la playa para el transecto dos fue

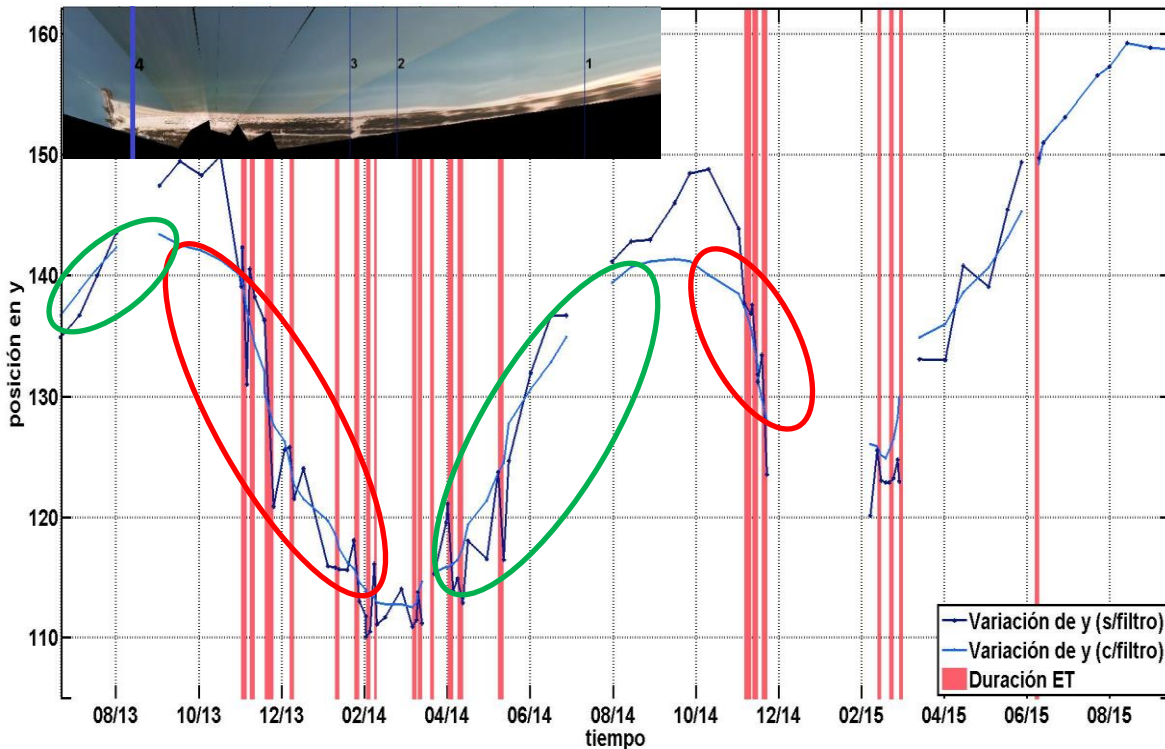
aproximadamente de 11 m hacia el final del estudio, mientras que el avance y retroceso estacional seguidos por este transecto se resumen en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..**

**Tabla 8. Avance y retroceso estacional del transecto 2 durante el período de estudio. El signo negativo indica que en ese período ocurrió el efecto contrario al esperado (avance en el período de calma y retroceso en el periodo de ET).**

Año	Período de calma	Período de ET	Número de eventos
	Avance (m)	Retroceso (m)	
<b>2012</b>	1.9	9.79	3
<b>2013</b>	6.8	12.79	12
<b>2014</b>	-3.92	2.38	13
<b>2015</b>	8.42	-	4

Finalmente, se ejemplifica lo observado en la zona Oeste de la playa con el transecto 4. En él se observa que los períodos de avance y retroceso de la línea de costa están muy marcados y siguen la idea general de que en la época de nortes (octubre-marzo) se presente un retroceso de la línea de costa, en la de brisas (abril-junio) se percibe el avance hacia mar de la línea y la época de calma (julio- septiembre) donde se debería observar que la línea de costa se mantiene relativamente estable, sin embargo, aquí durante esta época la playa continúa avanzando hacia mar hasta llegar nuevamente al período de nortes (Figura 24). Estos períodos de avance y retroceso de la línea de costa aparentan estar bien balanceados, dado que el avance y retroceso presenta valores similares (aproximadamente 30 metros), así mismo se puede observar que para febrero de 2015 el comportamiento de la línea de costa es de avance hacia mar hasta finales del mes de agosto del mismo año, donde se observa un ligero retroceso. Para este caso se observa perfectamente el comportamiento cíclico estacional, observado en los demás transectos, y que el avance interanual o neto de la línea de costa no es tan notorio como el de los ejemplos anteriores.



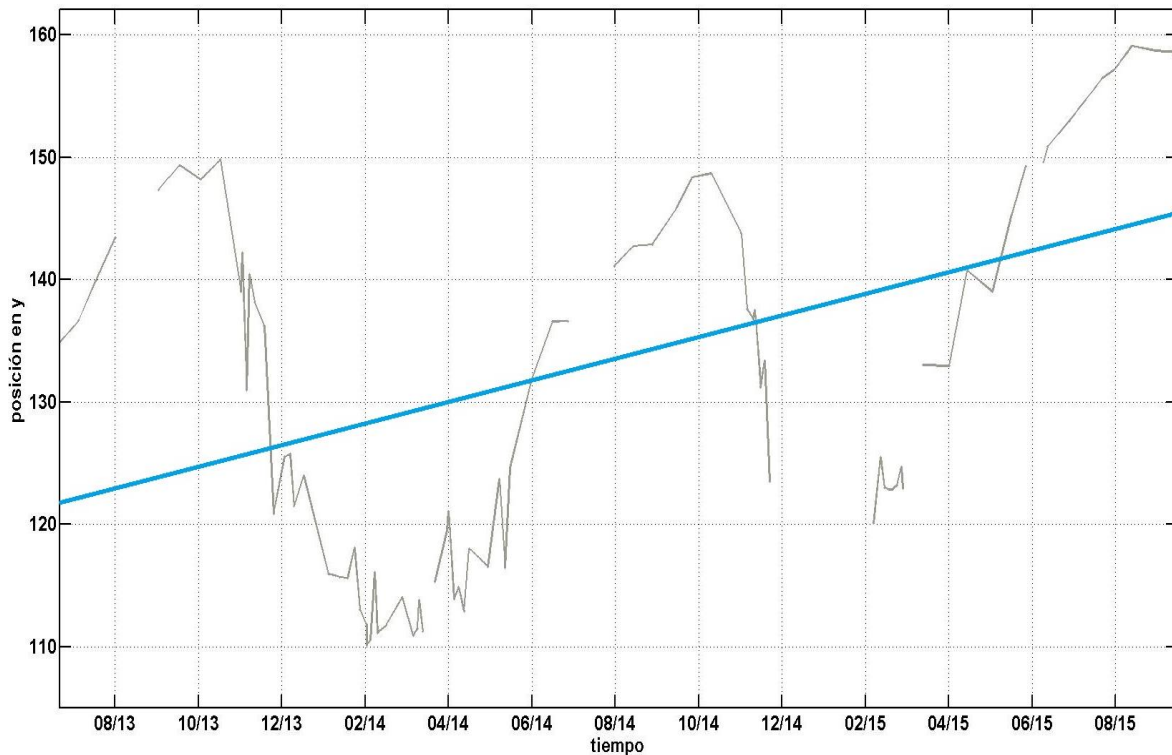


**Figura 24. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 4 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL, con filtro de media móvil y resaltando los períodos en los que se tuvieron ET.**

Se puede observar que el transecto 4, al igual que la tendencia seguida por los otros transectos en las diferentes zonas de la playa es de avance hacia mar (Figura 25). Así mismo, se puede apreciar que la pendiente para este transecto es mucho más pronunciada que en los transectos centrales, similar a la observada en los transectos de la zona Este de la playa. En el transecto 4 se observó un avance neto de 24 m para todo el período de estudio. El avance y retroceso estacional seguidos por el transecto 4 se presentan en la Tabla 9

**Tabla 9. Avance y retroceso estacional del transecto 4 durante el período de estudio.**

Año	Período de calma	Período de ET	Número de eventos
	Avance (m)	Retroceso (m)	
<b>2013</b>	21.035	23.71	12
<b>2014</b>	29.16	10.75	13
<b>2015</b>	25.61	-	4



**Figura 25. Variación de la posición de la línea de costa en el transecto 4 (Figura 9) obtenidas en condiciones de MWL (línea gris), con ajuste lineal (línea azul claro).**

Las tasas de migración de la línea de costa para cada transecto ejemplificado, se presentan en la Tabla 10, donde se enlistan los valores tanto evaluando la posición de la línea de costa para el nivel medio del mar (MW), así como para los otros dos niveles de marea (HW, LW). La Figura 26 muestra los valores de la tasa de avance/retroceso de la posición de la línea de costa evaluada para toda la longitud de la playa a intervalos de 0.5 metros. La playa de Sisal, en toda su extensión longitudinal, presenta valores de avance de la línea de costa a lo largo del período de estudio evaluado. Esto ocurre, además, en cualquiera de los tres niveles de marea presentados. Las zonas con mayor avance de la posición de la línea de costa son las situadas en los extremos de la zona de estudio (zona Este y Oeste de la playa), mientras que la zona central es la que presenta menor avance.

Tabla 10. Valor de la pendiente de la recta de tendencias, para los 3 transectos de ejemplo asociados con el nivel de marea para HW, MW y LW.

Nivel de marea / Transecto	HW (m/año)	MW (m/año)	LW (m/año)
1	9.85	9.85	10.22
2	3.65	3.65	3.65
4	6.94	9.13	10.95

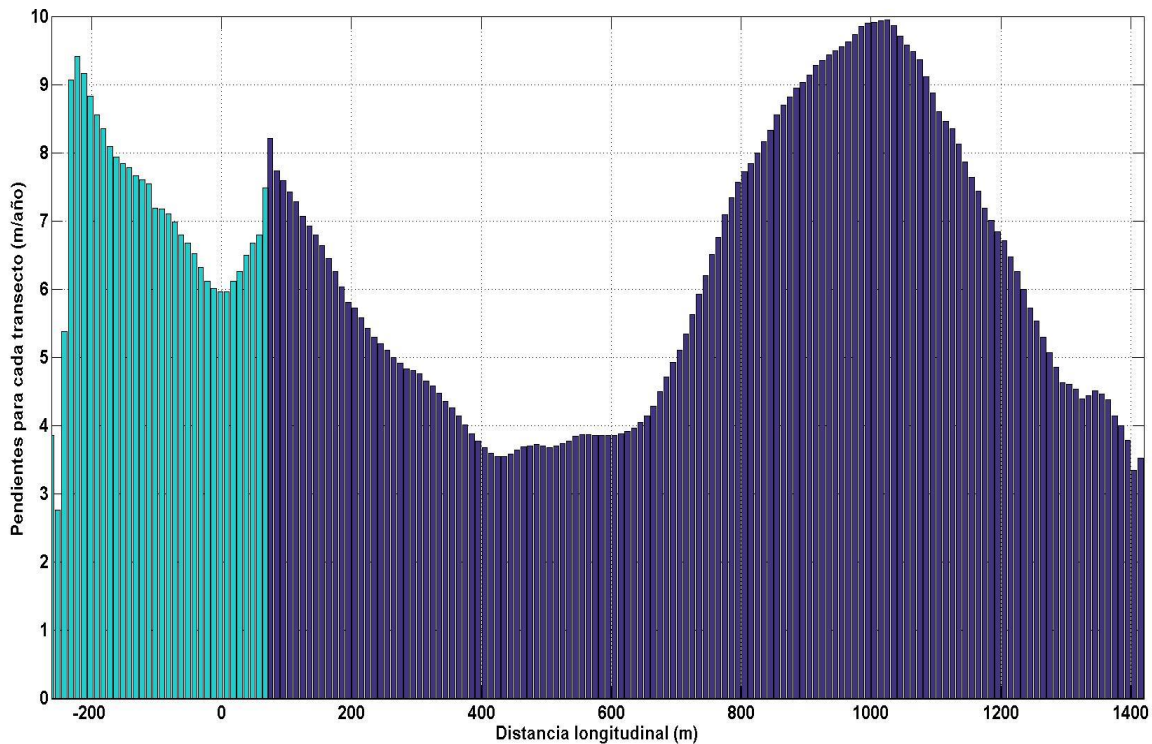


Figura 26. Correlación de la pendiente de cada transecto y su posición longitudinal en la playa, la distancia longitudinal está expresada en m (eje X) y la pendiente de la recta de ajuste en m/año (eje Y.) Nótese el cambio de color para la zona abarcada por las cámaras 1 y 2 (morado), y la zona abarcada por las cámaras 3, 4 y 5 (cian).

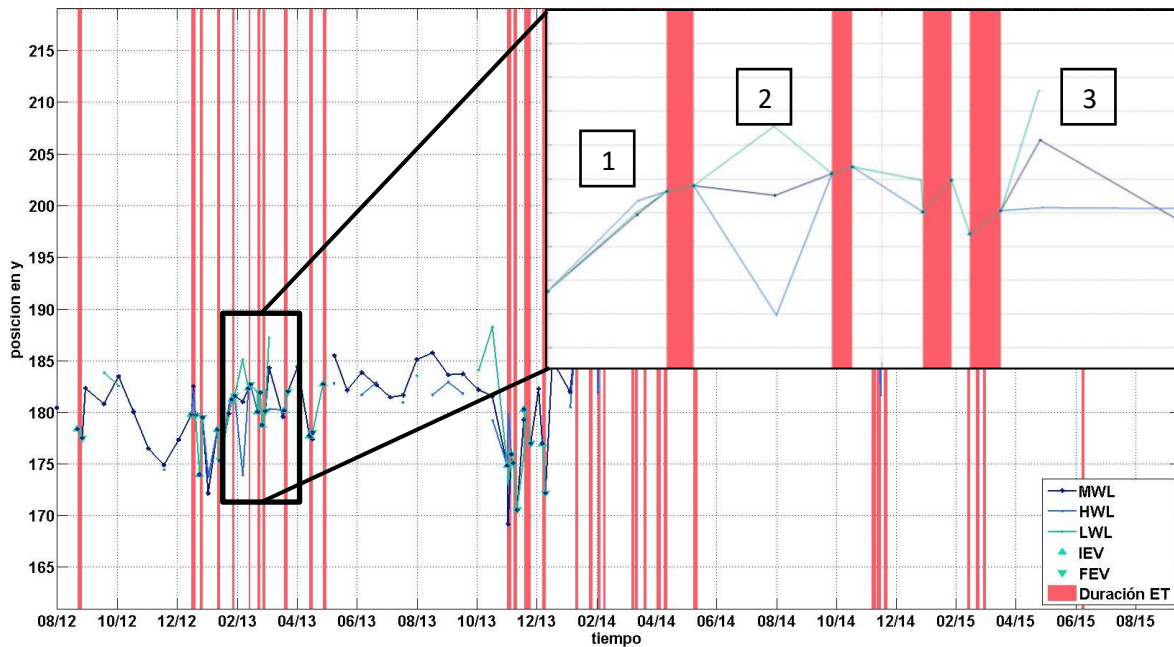
Así mismo, en la revisión visual realizada a las vistas en planta, se percibieron zonas en las cuales se da una acumulación mayor de sedimento, lo cual se ve reflejado en la tasa de avance que sigue cada transecto, ejemplo de esto es el transecto 1 y la zona comprendida en la posición longitudinal 0 a 200 m (Figura 9 y Figura 26), dado que aun con los cambios estacionales observados en todos los transectos en las zonas mencionadas se observan pequeños promontorios de arena posiblemente relacionados con la dinámica de la playa sumergida, como se observa en el ejemplo de la posición

del transecto 1 que es donde se observa en varias ocasiones la exposición de la barra intermareal con la cara de la playa dando una razón de avance elevada para este transecto (Figura 27).



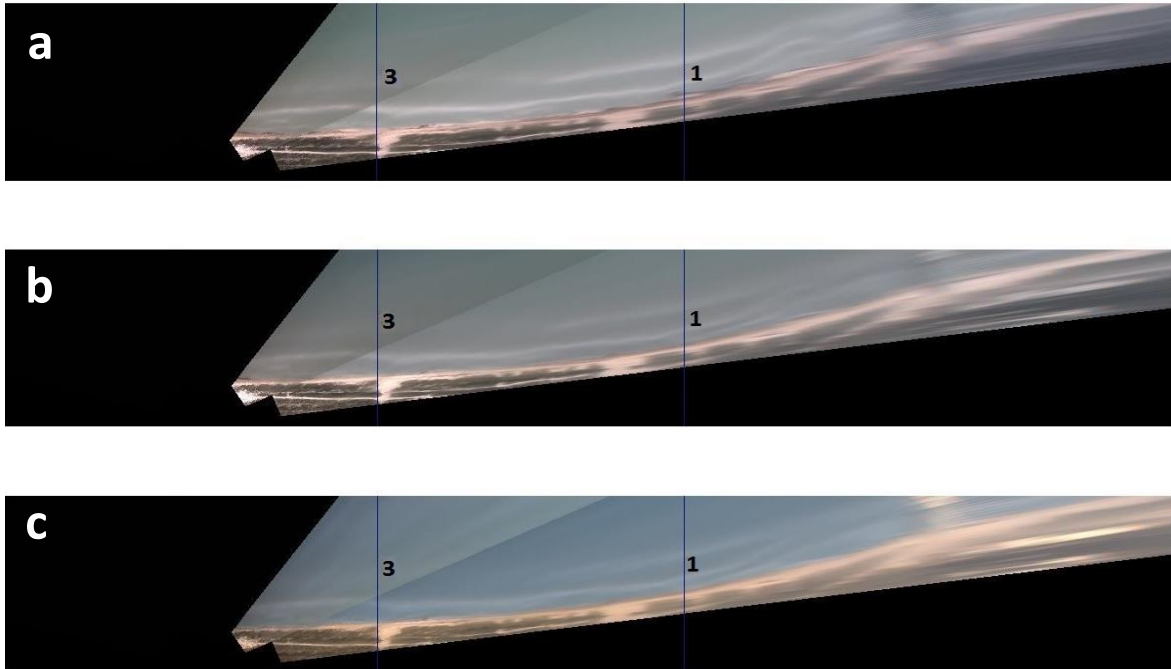
**Figura 27. Comparación visual: a) posición de la línea de costa con la barra intermareal expuesta (25 de marzo de 2014, 12 horas UTC), b) posición de la línea de costa con la barra intermareal parcialmente sumergida (25 de marzo 2014, 13:30 horas UTC) c) posición de la línea de costa con la barra intermareal sumergida (25 de marzo de 2014, 23:30 horas UTC).**

A continuación, se presenta una comparación entre las líneas de costa para los tres niveles de marea estudiados para tres transectos de los antes presentados (1, 2 y 4). En las gráficas, la línea continua es la correspondiente al nivel medio del mar, de igual modo en la gráfica se tienen una línea correspondiente a la variación de línea de costa para marea baja y una para la variación en marea alta (Figura 28). Sin embargo, estas dos últimas presentan vacíos debido a las condiciones de marea que presenta la zona de estudio (marea mixta, predominantemente diurna) y a los períodos de tiempo donde el sistema de video-monitoreo no recolectó datos. En primera instancia, es de esperarse que la posición situada más hacia mar sea la correspondiente al nivel de marea baja, mientras que el correspondiente a marea alta sea el localizado más hacia tierra, y que estas líneas se mantengan paralelas sin cruzarse.



**Figura 28. Comparación de la posición de costa para el transecto 1 en HW (línea azul claro), MW (línea azul oscuro) y LW (línea cian), y acercamiento de tres momentos con los 3 niveles de marea.**

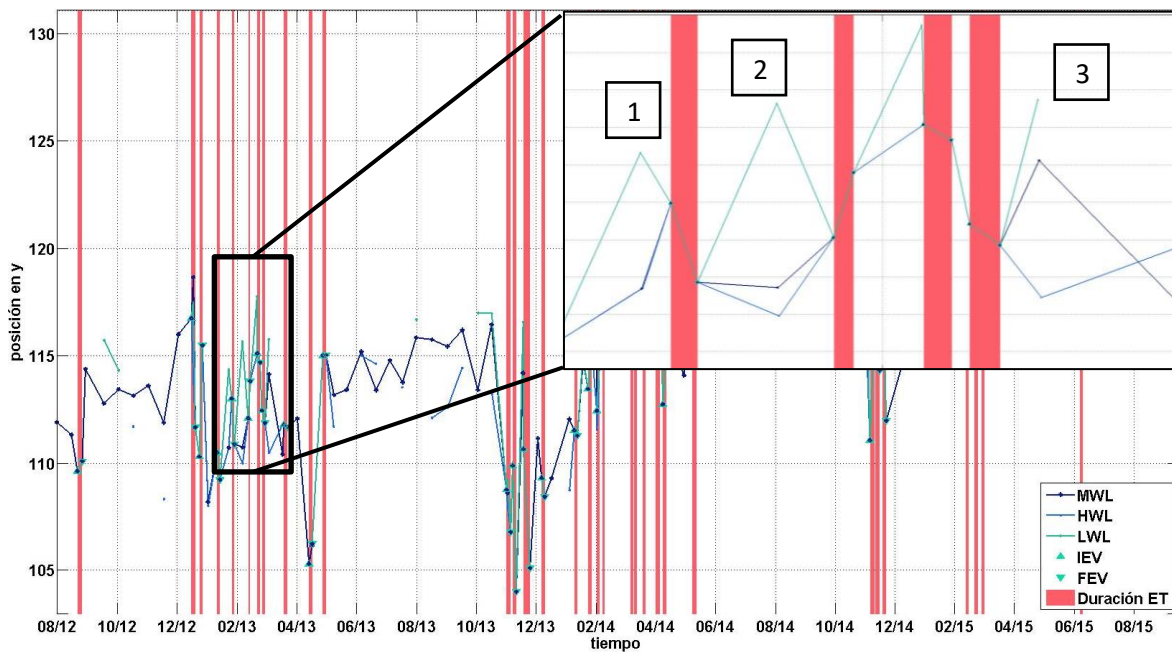
Se presenta en la comparación de los 3 niveles de marea para el transecto 1, un acercamiento a un período de tiempo en el cual se observan 3 días en los cuales se contó con datos para los 3 niveles de marea. Con respecto a lo mencionado en el párrafo anterior, se puede ver en el acercamiento de la serie temporal (zona superior derecha), que para el primer caso donde se cuenta con los valores de la posición de la línea de costa en los tres niveles de marea, la posición situada más hacia mar es la correspondiente a la marea alta, seguido de la posición correspondiente a marea baja y finalmente, la posición más cercana a tierra es la obtenida para el nivel medio del mar. El segundo y tercer caso corresponden a los días 10 de febrero y 9 de marzo de 2013, respectivamente; ambos casos están situados en el período de tiempo en el cual estaba finalizando la marea viva para la zona, se observa que la posición de la línea de costa sigue las consideraciones que se hicieron inicialmente en el párrafo anterior. Para el caso dos, la diferencia en la posición de la línea de costa máxima debida a la marea fue de 11.1 metros, y la mínima de 4.1 metros; con respecto al caso 3, la diferencia máxima fue de 6.9 metros y la mínima de 2.9 metros. Con la información obtenida es posible sacar la pendiente de la cara de la playa, lo cual se observa en el trabajo de Gracia et al. (2016), donde se obtuvieron modelos de elevación por medio de la posición de la línea de costa.



**Figura 29. Condiciones de la zona para el caso 1 a los diferentes niveles de marea: a) LW, b) MW y c) HW y la posición de los transectos 1 y 3.**

El caso 1 al igual que los otros dos se sitúa en una época del año cuando finaliza la marea viva. Sin embargo, en este caso se observa que la posición de la línea de costa para los tres niveles se comporta de manera diferente a los otros dos casos. El nivel de marea al cual corresponde la posición más hacia mar es el de marea alta (Figura 29.c), se percibe que las condiciones de oleaje fueron menos energéticas que las correspondientes a los niveles de marea baja y al nivel medio del mar. Esto se puede ejemplificar del siguiente modo, cuando tenemos el nivel de marea baja en condiciones de calma se observa la posición de la línea de costa más hacia mar y la posición de marea alta más hacia tierra, sin embargo, sí se cambia esta condición de calma la posición de la línea de costa puede variar, es decir que sí durante la marea alta se observa calma en el mar y posteriormente al comenzar a descender la marea se genera un oleaje de mayor intensidad y se está durante la fase de marea muerta en la zona se puede observar este cruce en la posición de la línea de costa entre un nivel de marea y otro. En cambio, para la posición de la línea de costa en marea baja y el nivel medio las condiciones de oleaje pudieron ser similares y situar la línea de costa una cerca de la otra, así como la presencia de sargazo en ciertas zonas que nos obligaron a tomar la posición de la línea justo antes de la ubicación del sargazo. Para este caso la diferencia máxima de la posición de la línea de costa fue de 0.8 metros y la mínima de 0.1.

La comparación de las variaciones de la línea de costa en los tres niveles para el transecto 3 muestra a diferencia de lo observado en el transecto 1 que la posición de la línea de costa sigue el comportamiento esperado en los tres casos de ejemplo (Figura 30). Para el primer caso al comparar los dos transectos (1 y 3), se observa que la posición de la línea de costa durante LW es la más lejana a la posición de la línea de costa para los niveles de MW y HW, en comparación a lo observado en el transecto 1. Para el caso 1, se tiene una variación máxima de 3.6 metros (marea baja y marea alta) y una mínima de 0 metros (marea alta y nivel medio del mar).



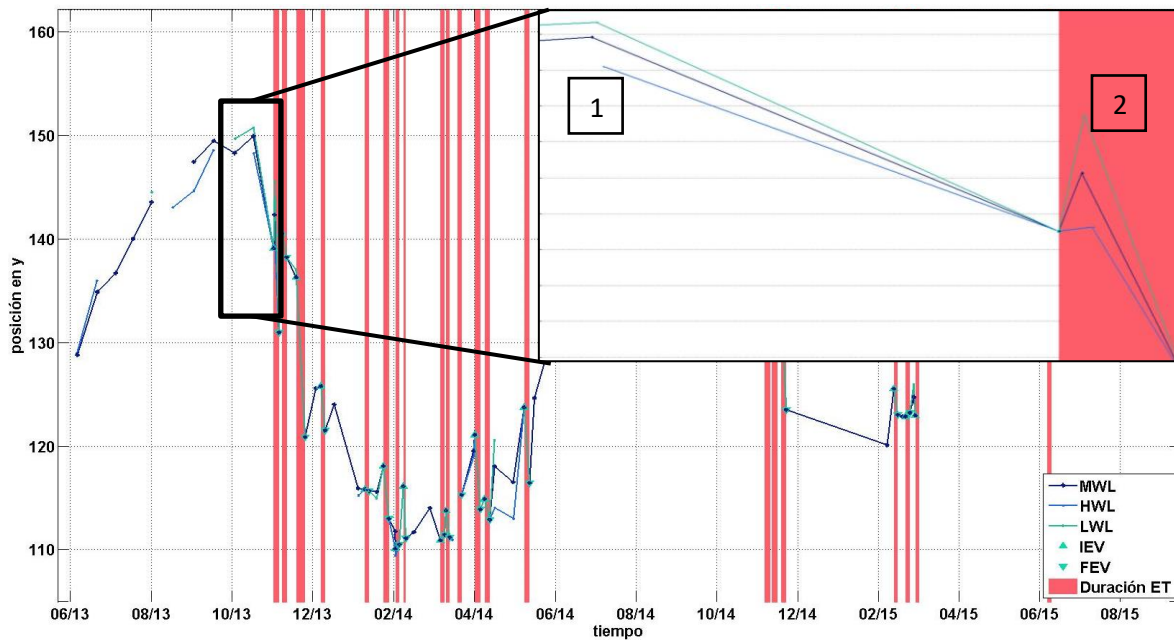
**Figura 30. Comparación de la posición de costa para el transecto 3 en HW, MW y LW, y acercamiento de tres momentos con los 3 niveles de marea.**

Para el caso 2, las variaciones fueron 5.6 y 0.7 metros, correspondientes a la máxima y mínima respectivamente. Así mismo se observa que para este transecto en comparación al transecto 1, la diferencia en la posición de la línea de costa en marea baja está más hacia mar y alejada de las posiciones de la misma para el nivel medio del mar o marea alta. Finalmente, el caso 3 tiene una máxima de 5.2 y una variación mínima de 1.6 metros.

Finalmente, se presenta la comparación de la posición de la línea de costa en los tres niveles de marea para el transecto 4 (Figura 31). Se identificaron dos casos, que se sitúan en fechas diferentes a los que se presentaron para los transectos anteriores. Las fechas de ambos casos son el 22 de octubre y el 7 de noviembre de 2013, para el caso 1 y 2 respectivamente. Para el caso 1 se percibe que el comportamiento de la posición de la línea de costa se comporta como se señaló



anteriormente, y la diferencia máxima de posición debida al cambio de la marea es de 2.4 metros, mientras que la diferencia mínima es de 0.8 metro. En el acercamiento, se puede advertir que el caso 2 se sitúa dentro de la duración de un evento de tormenta y que aun con el efecto del evento el comportamiento de la línea de costa siguió el lineamiento planteado como el caso 1 aun cuando al final del evento la línea de costa retrocedió, la diferencia máxima es de 6.2 y la mínima de 3 metros.



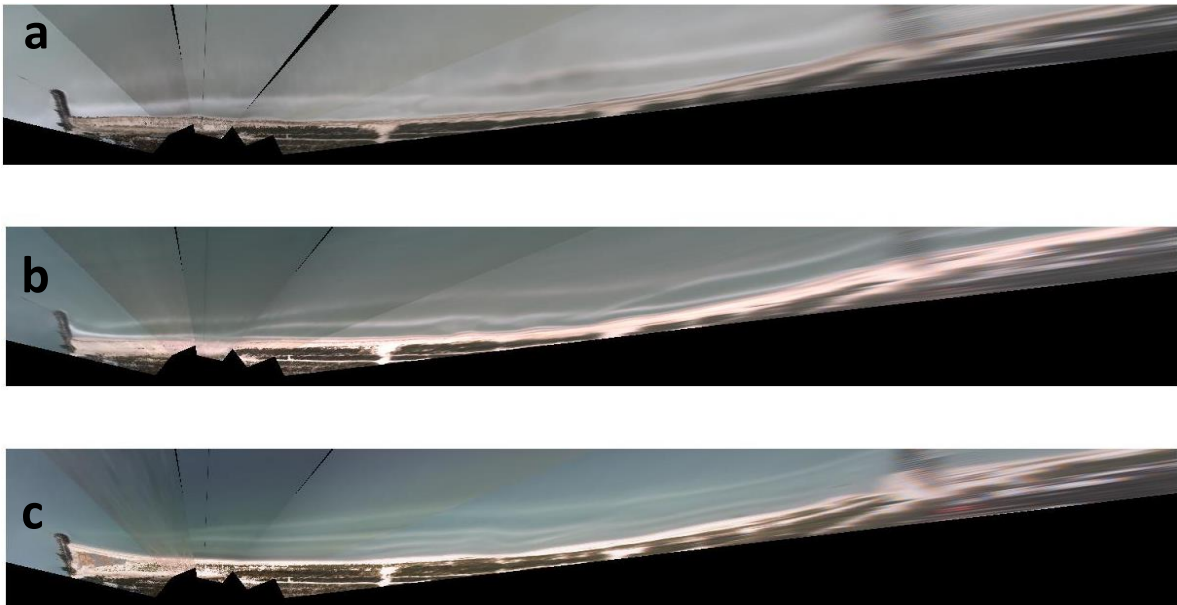
**Figura 31. Comparación de la posición de costa para el transecto 4 en HW, MW y LW.**

En resumen, de las comparaciones del comportamiento de la línea de costa para los 3 niveles, se puede apreciar que, si bien tienden a seguir el mismo patrón general de avance o retroceso, los cambios en la línea de costa no son necesariamente los mismos para los tres niveles de marea.

Así mismo, se presenta una comparación de la posición de la línea de costa durante las tres épocas del año, que se identificaron para el oleaje (Figura 32). Para la época de oleaje más intenso y frentes fríos (Figura 32.a), se puede observar que la posición de la línea de costa es la más cercana a tierra en comparación a su posición en las otras épocas del año, esto es consistente con lo observado en el análisis realizado anteriormente. Los cambios más notorios nuevamente se localizan en el extremo Oeste de la zona de estudio, así mismo, como se muestra, en la época del año con oleaje más energético se tiene un ancho de playa menor al observado en la época cuando el oleaje es de menor intensidad (Figura 32.c). Aunque, de igual modo, se puede observar que en el extremo Oeste



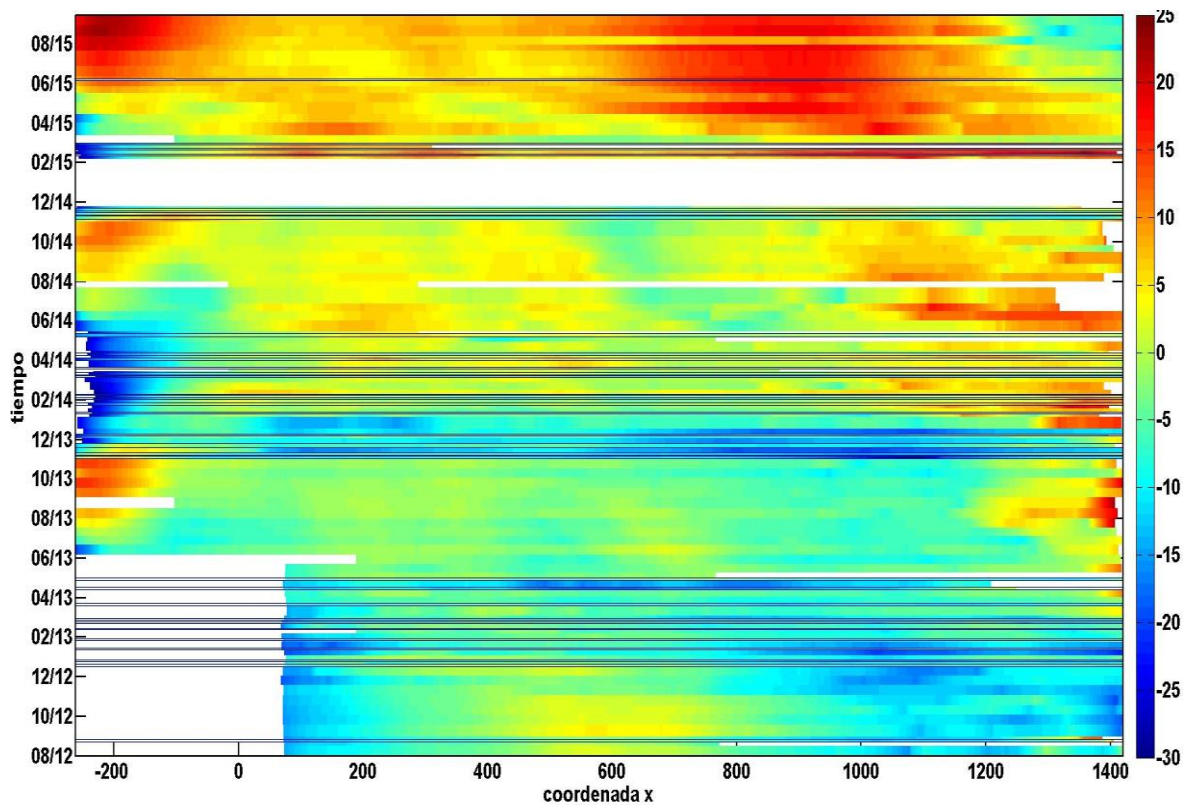
de la playa (cerca del muelle) se forma un promontorio de arena el cual no está presente en las épocas del año con oleaje más intenso, sino que solo se observa durante la época de calma.



**Figura 32. Comparación visual de la línea de costa en las tres diferentes épocas del año identificadas para el oleaje. a) Vista en planta del 15 de enero de 2014, b) vista en planta del 20 de mayo de 2014, y c) vista en planta del 15 de septiembre de 2014.**

El comportamiento de las barras de arena juega un papel importante en la posición de la línea de costa en diferentes momentos (Figura 32), esto es debido a que en ciertas ocasiones la barra intermareal queda expuesta por espacios de tiempo prolongados durante los períodos de marea viva en la zona, lo cual nos da la impresión de un ancho de playa mayor al que se tiene en los períodos de marea muerta.

Todo lo antes observado y analizado se resume en un diagrama espacio-temporal de la posición de la línea de costa a nivel medio del mar (Figura 33). Se aprecia en este diagrama que toda la playa presenta una tendencia general a avanzar hacia mar confirmando lo observado con las tasas de avance presentada anteriormente (Figura 26 y Tabla 10), y de esta tendencia general de avance se puede ver que las zonas donde existe el mayor avance son la zona Oeste más cercana a la entrada del puerto de abrigo ( $x < -200$ ) y de igual modo en la zona situada entre la posición  $800 < x < 1200$  longitudinal.



**Figura 33. Variación espacio-temporal de la línea de costa de la playa de Sisal respecto a la línea de cosa media. Líneas de costa muestreadas durante condiciones de MW. Los tonos cálidos representan posiciones hacia mar y los tonos fríos representan posiciones hacia tierra. Las líneas negras indican eventos de tormenta (Tabla 1) y las regiones blancas indican períodos sin datos.**

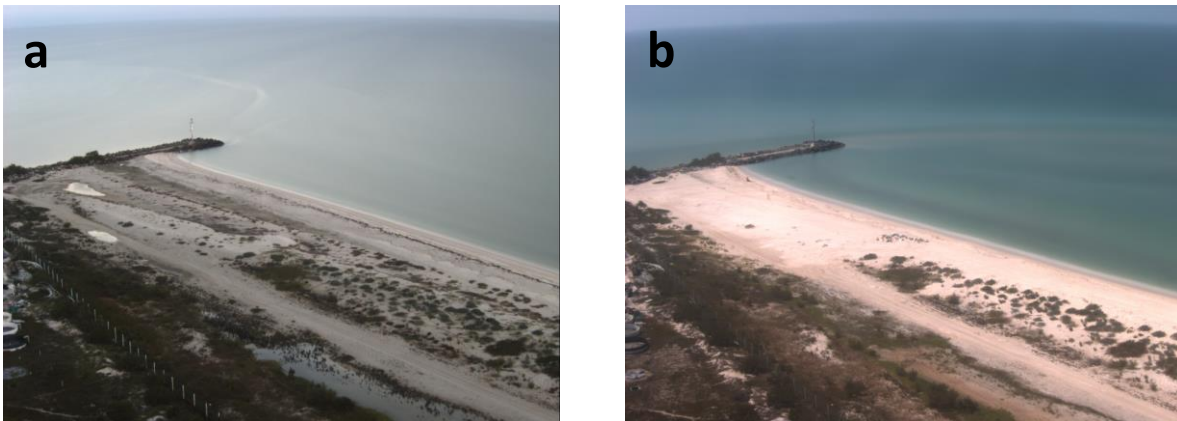
Aunado a esta tendencia de avance, se observa que en la zona Oeste de la playa existe la mayor variabilidad en los patrones de avance y retroceso, es decir, esta zona es la que presenta un mayor cambio entre los procesos estacionales de retroceso y de avance de la línea de costa, por lo que a pesar de que es una de las zonas que presenta un avance significativo, este avance se equilibra con las épocas en las que la línea de costa tiende a retroceder (Figura 24). Así mismo, los períodos de retroceso para esta zona corresponden a las épocas del año en las cuales en la zona de estudio están presentes los frentes fríos y los períodos de avance están situados en la época del año correspondientes a las brisas intensas y la época de calma.

Otra zona que presenta gran variabilidad en la posición de la línea de costa es la situada en la zona Este (cercana al muelle). Esta variabilidad no es tan notoria como la observada en la zona Oeste, pero se hace evidente que cuando del lado Oeste de la playa comienza a avanzar hacia mar, el lado Este tiende a retroceder y viceversa, cuando el lado Oeste retrocede el lado Este avanza. Este tipo

de comportamiento nos da la idea de un cambio de orientación estacional de la playa. De igual modo se puede observar que el transporte del sedimento hacia el Oeste y que los promontorios de arena (observados alrededor de las coordenadas longitudinales de -50 hasta 50 y de 360 hasta 600 (Figura 9)), inician en el lado Este de la playa. Con el paso del tiempo estos migran poco a poco hasta llegar a la zona Oeste de la playa, lo que esto explica el sesgo observado en el comportamiento que sigue la línea de costa en los transectos presentados en este estudio y permite la clasificación de las 3 zonas de la playa, expuestas anteriormente.

## 8. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la dinámica de la línea de costa utilizando imágenes de un sistema de video-monitoreo durante un período de 3 años, en una playa disipativa micromareal (carrera de marea promedio de 0.5 metros). La playa de estudio es un sistema semi-cerrado, dado que del lado Este se encuentra situado un muelle que permite el paso de sedimento y del lado Oeste se sitúa un espigón, el cual restringe temporalmente el transporte de sedimento longitudinal (Figura 3). Se define como temporal esta restricción porque cuando la posición de la línea de costa en la zona Oeste se sitúa más hacia tierra, el espigón limita el transporte del sedimento, hasta que la playa cubre toda la longitud del espigón y se observa un bypass de arena aguas abajo (Figura 34.a). Debido a esta característica en la configuración de la playa, se observa entrada y salida de sedimento al sistema.



**Figura 34. Comparación de la posición de la línea de costa para la zona Oeste de la playa en dos épocas del año: a) inicio de la época de nortes (1 de noviembre de 2015) e b) inicio de la época de brisas intensas (1 de mayo de 2016).**

Al analizar el comportamiento de la línea de costa para los tres niveles de marea, se detectó que la posición de la línea de costa situada más hacia mar es la asociada a LW, mientras que la posición más hacia tierra es la que corresponde a HW, con la posición de la línea costa para MW en el centro de esos dos niveles. Sin embargo, ese comportamiento típico se ve modificado cuando las condiciones de oleaje varían significativamente a lo largo del día, como ejemplo tenemos lo observado en el caso 1 presentado en la Figura 28, donde vemos que la posición de la línea de costa más hacia mar fue la asociada al nivel de marea alta y la posición más hacia tierra la correspondiente a MW. Como se explicó esto se debe a que durante el cambio de la posición de la línea de costa por

la marea el mar presento momentos de calma y momentos de oleaje más energético generando así el cruce entre la posición de la línea de costa de un nivel de marea a otro.

Durante el período de estudio se identificaron una serie de eventos, en los cuales la barra intermareal queda expuesta dentro de la zona comprendida entre las posiciones longitudinales 0 a 750 metros, lo que genera un cambio en la ubicación de la línea de costa y por consiguiente un avance de la misma, y es mayor en comparación a los momentos en los que no se tiene este comportamiento. Este tipo de situaciones fue observado en las épocas de frentes fríos (oleaje más energético), junto con mareas vivas, la barra queda expuesta en los momentos cuando se tiene marea baja y queda sumergida al cambiar hacia el nivel medio del mar y marea alta. Lo antes mencionado fue observado en el trabajo de Ruíz Ceballos (2015), aunque éste menciona igualmente un evento en el cual la barra se acopla a la línea de costa en la época de año correspondiente a la presencia de tormentas tropicales, se remarca que para el período de estudio no se identificaron tormentas ni ciclones tropicales en la zona. Por tanto, es importante discernir cuando la barra está migrando hacia tierra y cuando solamente queda expuesta en mareas vivas (durante bajamar).

El cambio que ocurre en un período de tiempo relativamente corto es el que se da por los eventos de tormenta. De los cambios que se analizaron en este trabajo, se detectó que cada evento de tormenta genera un comportamiento diferente en la playa, el cual depende de varios factores, uno de éstos, es el estado previo de la playa al evento, seguido tanto de la intensidad del evento como de la dirección del oleaje. Se identificaron 4 respuestas de la playa a los eventos de tormenta:

- a) Eventos sin efecto o efecto casi nulo en la playa ( $H_s$  med aproximada de 1.87 m y dirección del NE).
- b) Eventos con retroceso generalizado en la playa ( $H_s$  med oscila entre 1.8 y 2.20 m; con direcciones oscilando entre del NE y NO).
- c) Eventos con avance generalizado en la playa ( $H_s$  med oscila entre 1.85 y 1.98 m, con dirección predominante del NO).
- d) Eventos con avance y retroceso no uniforme en la playa ( $H_s$  med oscila entre 1.64 y 1.93 m, con dirección predominante del NO).

Todos los cambios debidos a estos eventos modifican significativamente el paisaje costero por períodos de tiempo breves. Sin embargo, los cambios juegan un papel importante durante la toma de decisiones, la importancia recae en que aun cuando los cambios se dan en períodos de tiempo

cortos, en ciertas zonas estos cambios generan retrocesos masivos de la línea de costa aumentando el riesgo de esas áreas ante la inundación, con posibles daños en propiedades y poniendo en peligro a las personas asentadas en las playas que presentan ese problema.

El hecho de que la playa no presente cambios significativos debidos a los ET del caso a puede ser porque la playa se encontrase en condiciones de equilibrio para el oleaje relacionado a estos eventos, posiblemente por un evento previo de características similares. Este caso no se puede corroborar ya que ocurrió al inicio del período de estudio. En el caso del evento 32: la dirección del oleaje fue de unos 72 grados (dirección NNE), que posiblemente no afectó tanto a la playa dado que llegó de manera oblicua a la playa además de que esta no fue afectada durante los tres meses anteriores (en marzo). Se debe mencionar que en la Figura 33 se ve que, después del ET 31, la playa cambió su disposición típica de las brisas (con avance al Oeste de la playa y retroceso al Este). Así que cuando llega el ET 32 parece que la playa ya está en equilibrio con las condiciones de oleaje de la temporada de brisas.

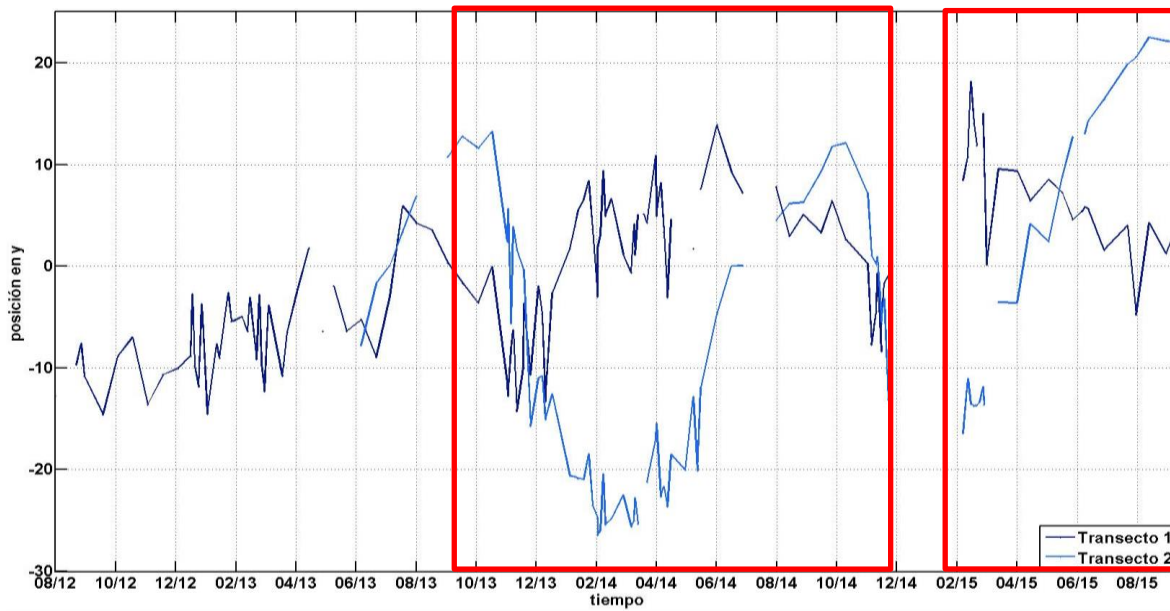
En el caso b, observamos como los eventos de tormenta transportan el sedimento hacia afuera de la playa, que es el comportamiento esperado para este tipo de eventos. Se observó que normalmente los eventos que generan retroceso en la playa tienen un contenido energético mayor a los  $80 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$ . Sin embargo, en el estudio observamos eventos que presentan un contenido energético menor a este valor y que aun así generan retroceso de la playa. Lo anterior puede explicarse por el estado previo de la playa y la separación entre el evento previo que no generó mucho retroceso. Un ejemplo de esto es el caso del ET 22, el cual ocurrió al inicio de la época de brisas de 2014, que es cuando la playa comienza el proceso de avance, lo cual explica porque a pesar de una altura de ola menor a los 2 m y un contenido energético tan bajo se generó retroceso en la playa. Así mismo puede sumarse el efecto de retroceso generado por el evento previo que tuvo lugar pocos días antes (7 días). Se resalta que el retroceso generado por los eventos de este caso puede deberse a dos cosas: 1) alto contenido energético de un evento que ocurre durante la época de calma y 2) eventos consecutivos en períodos de tiempo cortos.

El caso c, en contraste al efecto esperado por un ET, se observó un avance de la posición de la línea de costa hacia mar, esto puede deberse a que estos eventos fueron precedidos y seguidos por eventos con altura de oleaje mayor a 2 m, de lo que podemos inferir que el estado morfológico de la playa estaba preparado para recibir eventos con alturas de ola altas, pero al recibir un evento con

una altura menor a la esperada, propició que el sedimento fuera llevado hacia tierra creando así el avance de la línea de costa.

En el caso d, se observa que todos los eventos ocurrieron durante el período de tiempo donde se observa que la barra intermareal queda expuesta debido al cambio del nivel de marea durante la marea viva. Esto es importante en el efecto que ocasiona el evento en la línea de costa, ya que, al tener un ancho de playa mayor por la exposición de la barra, el retroceso que pudo generarse por el ET queda mitigado. Por lo que, finalmente, con respecto a los cambios debidos a los ET podemos decir que la playa de estudio muestra gran variedad de cambios los cuales dependen en primera instancia de los días que separaban a una tormenta de otra, como de sus condiciones de oleaje, lo que ayuda a mantener o aumentar el grado de retroceso, así como cambiar por completo a un avance de la playa.

Aunado a los cambios debidos a los ET en la playa de estudio, se detectaron patrones estacionales, los cuales se observan en toda la extensión longitudinal de la playa. Aún con estos cambios estacionales, la playa presenta un comportamiento particular y se puede dividir en tres zonas en general: la zona Este (más cercana al muelle, posición longitudinal desde 738 hasta 1300 metros), zona Central (comprende la posición longitudinal situada entre 240 a 738 metros) y la zona Oeste (más cercana al espigón de entrada al puerto de abrigo; localizada en la posición longitudinal entre -250 a 240 metros). Dentro de la zona Este se advierten avances abruptos, sin embargo, los retrocesos de la línea de costa no presentan el mismo comportamiento. Los períodos de retroceso de la línea de costa tienen lugar en las épocas del año correspondientes a las brisas intensas y parte de la época de calma, mientras que los períodos de avance se sitúan en las épocas cuando el oleaje es más intenso y se tienen los eventos de tormenta y nortes. Por otro lado, en la zona Central de la playa el comportamiento antes mencionado tiende a desfasarse unos meses en comparación a la zona anterior, es decir el período de retroceso empieza en el mes de agosto correspondiente solo a la época de calma de la playa, mientras que los períodos de avance inician en el mes de diciembre. Finalmente, en la zona Oeste, las épocas de avance se dan iniciando el período de brisas intensas en marzo-abril y terminando con el inicio de los frentes fríos en septiembre o retrasándose hasta noviembre, que es cuando los períodos de retroceso inician y se extienden hasta iniciar nuevamente con la época de brisas.



**Figura 35. Comparación de un transecto cercano al muelle (azul oscuro) y uno cercano a la entrada del puerto de abrigo (azul claro), eje Y variación transversal de la línea de costa, eje X variación temporal, donde los cuadros rojos indican donde se presentan los cambios de orientación de la playa a lo largo del tiempo de estudio.**

El comportamiento observado principalmente en el transecto 4, y específicamente dentro de la zona cercana al espigón que da entrada al puerto de abrigo (alrededor de 190 metros), concuerda con lo que se expone en el trabajo realizado por Quartel et al. (2008), el cual dice que las playas de arena, funcionan como un buffer natural de sedimento para los sistemas costeros, así mismo, indican que estas playas tienen períodos de acreción y erosión alternando a lo largo del tiempo, normalmente condiciones de oleaje poco energético proveen sedimento a la playa generando avance en la misma, mientras que, condiciones muy energéticas generan retroceso de la playa.

Se presenta la comparación entre el comportamiento de la línea de costa para ambos extremos de la playa (zona Este y Oeste) (Figura 35). Se puede observar que la playa de Sisal va cambiando la posición de los extremos de la línea de costa dependiendo de la estación del año. Este tipo de movimiento se asemeja al observado en bahías cerradas dando la impresión de una rotación aparente de la forma de la playa y ha sido altamente documentado en diversos trabajos como los realizados por Ojeda & Guillén (2008); Thomas et al. (2012); Thomas et al. (2011); Harley et al., (2011), entre muchos otros. Aunque la rotación de playas por definición, se aplica a playas encajadas, el trabajo realizado por Thomas et al. (2012) muestra que la rotación de las playas no es exclusiva de las bahías, al presentar dos playas abiertas adyacentes en las costas de Inglaterra que



muestran este fenómeno, al igual que el trabajo realizado por Dolphin, Vincent, & Wihsgott (2011), donde se observa rotación en una playa que no tiene promontorios en ninguno de sus dos extremos. La rotación en estos casos está relacionada con la estacionalidad del clima de oleaje lo cual es similar a lo observado en la comparación de los extremos de la playa de Sisal donde se observa un cambio en la orientación de la línea de costa debido a cambios en las condiciones de oleaje de manera estacional (Figura 35), así como también, a menor escala temporal, por los eventos de tormenta como se explicó en párrafos anteriores.

Con base en la timestack y en el análisis de los transectos de la playa de estudio, se determinó que toda la playa tiene una tendencia general a avanzar hacia mar, en contraste con muchas otras playas de la región de Yucatán (Meyer-Arendt, 2001). Esta tendencia a avanzar puede deberse a la presencia del espigón en la zona Oeste de la playa, el cual ayuda a la acumulación de sedimento en esta zona y hace que la línea de costa avance a hacia mar, como se ha observado en otras playas de la región situadas aguas arriba de los espigones, unos ejemplos son la playa de Telchac Puerto y El Cuyo (Gutierrez-Estrada et al., 1988; Meyer-Arendt, 1993).

Por otro lado, de acuerdo con un estudio presentado por Meyer-Arendt (1993), en el cual se indica que las tasas de erosión encontradas para las playas de Progreso y Yucalpetén (ambas situadas al norte de la costa de Yucatán) son de  $0.3$  a  $0.6 \text{ m/año}$  y  $0.9 \text{ m/año}$ , respectivamente, para un período de estudio de 30 años. En comparación con las tasas de avance obtenidas en este estudio (Tabla 10), para un período de tres años y medio, las tasas enlistadas por este autor son mayores a las tasas de  $3.65$  a  $9.85 \text{ m/año}$  encontradas en la playa de Sisal, y si bien el comportamiento del estudio realizado en este trabajo, solo representaría una décima parte del estudio presentado por Meyer-Arendt, los resultados sugieren que el comportamiento morfológico y la tendencia de nuestra playa es diferente al observado en playas con mayor desarrollo y con una orientación al Norte diferente, dado que la orientación de la playa juega un papel importante en la morfología observada en ella. A modo de ejemplo la orientación de la playa de Yucalpetén es de  $77^\circ$ , para la Playa de Progreso la orientación es de  $80^\circ$ , mientras que la orientación para la playa de Sisal es de  $82^\circ$ . Así mismo, esto nos hace concluir que, si bien en este momento se tiene una tendencia de avance, es importante continuar con este estudio para generar datos en un período de tiempo más amplio y determinar si esta tendencia continúa o cambia en algún punto.

En resumen, se puede concluir de lo antes expuesto que la playa de Sisal durante los 3 años de estudio presentó una tendencia predominante a avanzar, ganando así ancho de playa, sin embargo, presenta episodios estacionales en toda su extensión longitudinal, alternando la orientación de la misma entre una posición para invierno y otoño; y otra posición para primavera y verano.

### 8.1. TRABAJOS FUTUROS.

De este trabajo, pueden desprenderse una serie de trabajos futuros que sirvan para completar la información presentada. Uno de estos es continuar con la observación en el comportamiento de la línea de costa durante los años posteriores a este trabajo, y así poder realizar pruebas de correlación como la Mann-Kendal y la Mann-Kendal estacional y saber el grado de correlación de los cambios estacionales observados aquí.

Por otro lado, con la información generada en este trabajo pueden realizarse calibraciones de modelos morfodinámicos para realizar predicciones en el comportamiento de la línea de costa y no solo la observación de como se ha comportado en los últimos años, como lo realizado en el trabajo de Yates et al. (2009), en el cual se desarrolló y calibró un modelo de cambio de línea de costa de equilibrio. Aunado a la calibración de modelos morfodinámicos, con los datos de este trabajo puede realizarse la estimación del cambio morfológico de la playa a eventos de tormenta, pero agregando datos de marea de tormenta a los datos de oleaje para complementar la información de oleaje y así realizar una correlación mejor entre las características de los eventos con el resultado morfológico en las playas debido a estos.

Finalmente, con este tipo de datos pueden generarse estimaciones de las tasas de transporte de sedimento de manera visual mediante una cuantificación de metros líneas de avance o retroceso en la playa a diferentes escalas (diaria, semanal, mensual, etc.) y compararla con los datos de mediciones de campo para la calibración de modelos en los cuales se tenga la misma zona de estudio.

## 9. REFERENCIAS

- I. Aarninkhof, S., Caljouw, M., & Stive, M. (2000). Video-based, quantitative assessment of intertidal beach variability. *Coastal Engineering* 2000.
- II. Aarninkhof, S. G., Turner, I. L., Dronkers, T. D., Caljouw, M., & Nipius, L. (2003). A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coastal Engineering*, 49(4), 275–289. Coastal Engineering.
- III. Appendini, C., Salles, P., Mendoza, E., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 285, 1404–1417.
- IV. Appendini, C., Torres-Freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., López, J., & Mendoza, E. (2013). Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment. *Applied Ocean Research*, 39, 20–30.
- V. Armaroli, C., Grottoli, E., Harley, M., & Ciavola, P. (2013). Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology*, 199, 22–35.
- VI. Boak, E., & Turner, I. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688–703.
- VII. Box, P. (1984). SHORE PROTECTION MANUAL, 337.
- VIII. CINVESTAV, CICY, ITC, ITM, & UADY. (2007). programa de ordenamiento ecológico del territorio costero del Estado de Yucatán (POETCY).
- IX. Brunel, C., & Sabatier, F. (2009). Potential influence of sea-level rise in controlling shoreline position on the French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, 107(1-2), 47–57. doi:10.1016/j.geomorph.2007.05.024
- X. Cuevas-Jiménez, A, & Euán-Ávila, J. (2009). Morphodynamics of carbonate beaches in the Yucatán Peninsula. *Ciencias Marinas*. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=01853880&AN=45563952&h=b1sRv0riwiNWRuh0FZHjSpX3YihTU%2FDawLhY8ZbrqTa5%2B4E0lr6%2BflfEHF61v9rj0ss7PnojoEpgU6tF6LxKA%3D%3D&crl=c>
- XI. Davidson, M. et al. 2007. The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management. *Coastal Engineering*. 54, 6-7 (2007), 463–475.

- XII. Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. 2004. *Coastal Processes With Engineering Applications*. PRESS SYNDICATE OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE.
- XIII. Dolphin, TJ, Vincent, CE, & Wihsgott, J. (2011). Seasonal rotation of a mixed sand-gravel beach. *Journal of Coastal Research*. Retrieved from [http://www.ics2011.pl/artic/SP64\\_65-69\\_T.J.Dolphin.pdf](http://www.ics2011.pl/artic/SP64_65-69_T.J.Dolphin.pdf)
- XIV. Enckevort, I., & Ruessink, BG. (2003). Video observations of nearshore bar behavior. Part 2: alongshore non-uniform variability. *Continental Shelf Research*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434302002352>
- XV. Enriquez, C., Mariño-Tapia, I., & Herrera-Silveira, J. (2010). Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research*, 30(2), 127–137. *Continental Shelf Research*.
- XVI. Feng, C., Hui-Mei, C., Xian-Ze, S., & Dong-Xing, X. (2007). Analysis on Morphodynamics of Sandy Beaches in South China. *Journal of Coastal Research*, 231, 236–246.
- XVII. García-Rubio, G, Huntley, D, & Russell, P. (2015). Evaluating shoreline identification using optical satellite images. *Marine Geology*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322714003259>
- XVIII. Garzón Hervás, J. L. (2013). *Remote sandbar mapping at a multi-barrel beach. Sisal, Yucatan*. Universidad de Cantabria, Santander, España.
- XIX. Gracia, A. D., Ojeda, E., & Mendoza, E. T. (2016). Obtención de modelos digitales de elevación usando la variación de la línea de costa debido a la marea. *Abstraction & Applitcation*, 1–10.
- XX. Gutierrez-Estrada, M., Castro-Del Río, A., & Galaviz-Solis, A. (1988). Mexico (p. 700). Baton Rouge, LA, USA: Kluwer Academic Publishers.
- XXI. Hayrley, MD., Turner, IL., Short, AD., Ranasinghe, R. (2011). A re-evaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*.
- XXII. Holland, K., Holman, R., Lippmann, T., Stanley, J., & Plant, N. (1997). Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(1), 81–92. doi:10.1109/48.557542
- XXIII. Holman, R. A., & Stanley, J. (2007). The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 477–491.
- XXIV. INEGI. (2013). Conociendo México.

- XXV. Jiménez, A., Ávila, J., Lacouture, M., & Casarín, R. (2016). Classification of Beach Erosion Vulnerability on the Yucatan Coast. *Coastal Management*, 44(4), 333–349. Taylor & Francis.
- XXVI. Jiménez, J., Osorio, A., Marino-Tapia, I., Davidson, M., Medina, R., Kroon, A., Archetti, R., et al. (2007). Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators. *Coastal Engineering*, (2007), 507–521. Coastal Engineering.
- XXVII. Kroon, A., Davidson, M., Aarninkhof, S., Archetti, R., Armadori, C., Gonzalez, M., Medri, S., et al. (2007). Application of remote sensing video systems to coastline management problems. *Coastal Engineering*, (54), 493–505.
- XXVIII. Liu, Y. et al. 2012. Detecting coastline change from satellite images based on beach slope estimation in a tidal flat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. (2012).
- XXIX. Medina, R., Marino-Tapia, I., Osorio, A., Davidson, M., & Martin, F. L. (2007). Management of dynamic navigational channels using video techniques. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 523–537. Coastal Engineering.
- XXX. Mendoza, E., Trejo-Rangel, M., Salles, P., Appendini, C. M., Lopez-Gonzalez, J., & Torres-Freyermuth, A. (2013). Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*.
- XXXI. Meyer-Arendt, K. J. (1993). Shoreline Changes along the North Yucatán Coast. Retrieved from <http://www.academia.edu/download/41638979/1993ShorelineChangesYuc.pdf>
- XXXII. Meyer-Arendt, K. (2001). Recreational development and shoreline modification along the north coast of Yucatán, Mexico. *Tourism Geographies*, 3(1), 87–104. Taylor & Francis.
- XXXIII. Natesan, U., Parthasarathy, A., Vishnunath, Kumar, E., & Ferrer, V. (2015). Monitoring Longterm Shoreline Changes along Tamil Nadu, India Using Geospatial Techniques. *Aquatic Procedia*, 4, 325–332. ScienceDirect.
- XXXIV. Nieto, M., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G., Ortiz, A., Tintoré, J., et al. (2010). An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(14), 1712–1719.
- XXXV. Ojeda, E., & Guillén, J. (2008). Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology*, (253), 51–62. Marine Geology.
- XXXVI. Pajak, M. J., & Leatherman, S. (2002). The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4299078>

- XXXVII. Park, Y., & Edge, B. (2011). Beach Erosion along the Northeast Texas Coast. *Journal of Coastal Research*, 27, 502–514. doi:10.2112/JCOASTRES-D-09-00042.1
- XXXVIII. Quartel, Kroon, & Ruessink, B. G. (2008). Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, 250(1-2), 19–33.
- XXXIX. Rijn, V. L. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569111000652>
- XL. Ruíz Ceballos, P. (2015). *Caracterización del ridge and runnel en una playa de ambiente disipativo y su rol en la dinámica costera*. Universidad de Cantabria.
- XLI. Río, L., Gracia, F., & Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252–266.
- XLII. SECTUR. (2011). *Quinto Informe de Labores ( No. 5°)* (p. 116). MÉXICO: SECRETARÍA DE TURISMO.
- XLIII. Senechal, N., Coco, G., & Marieu, V. (2015). Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France), 448–461.
- XLIV. Shin, B., & Kim, K. (2015). Estimation of shoreline change using high-resolution images. *Procedia Engineering*, (116), 994–1001. Procedia Engineering.
- XLV. Smit, M. W. ., Aarninkhof, S. G. J., Wijnberg, K. M., González, Kingston, K. S., Southgate, H. N., Ruessink, B. G., et al. (2007). The role of video imagery in predicting daily to monthly coastal evolution. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 539–553. ScienceDirect.
- XLVI. Stive, M., Aarninkhof, S., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K. M., Nicholls, R. J., et al. (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*, (47), 211–235. Coastal Engineering.
- XLVII. Thomas, T, Phillips, MR, Williams, AT, & Jenkins, RE. (2012). Rotation on two adjacent open coast macrotidal beaches. *Applied Geography*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622812000914>
- XLVIII. Thomas, T., Phillips, M. R., Williams, A. T., & Jenkins, R. E. (2011). Medium timescale beach rotation; gale climate and offshore island influences. *Geomorphology*, 135(1-2), 97–107.
- XLIX. Thomas, T., Phillips, M., & Williams, A. (2011). Short-term beach rotation, wave climate and the North Atlantic Oscillation (NAO). *Progress in Physical Geography*, 35(3), 333–352. Progress in Physical Geography.
- L. Wright, L. ., & Short, A. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1-4), 93–118.

## 10. ANEXOS

### 10.1. ANEXO A

**Tabla 11. Información del oleaje para los diferentes eventos de tormenta identificados en el período de estudio.**

ID	ai	mi	di	hi	af	mf	df	hf	Hs med	Hs max	Tp med	Tp max	Dir med	dur(día)	Dir (Hsmax)	Contenido energético
1	2012	8	27	18	2012	8	29	21	1.87	2.06	8.43	9.02	120.62	2.13	18.30	181.18
2	2012	12	21	18	2012	12	23	0	2.25	2.85	8.21	9.27	132.87	1.25	3.67	164.79
3	2012	12	30	9	2012	12	30	21	1.88	1.99	7.65	7.83	208.83	0.50	347.69	43.91
4	2013	1	17	6	2013	1	18	18	2.12	2.76	8.48	9.56	320.66	1.50	303.76	170.25
5	2013	1	31	18	2013	2	1	9	2.02	2.27	7.85	8.30	346.83	0.63	341.39	63.58
6	2013	2	17	6	2013	2	17	18	1.81	2.01	7.46	7.67	284.25	0.50	356.73	40.89
7	2013	2	27	0	2013	2	27	15	2.09	2.48	7.92	8.46	319.97	0.63	319.05	70.33
8	2013	3	3	9	2013	3	4	3	1.93	2.16	7.53	8.13	331.04	0.75	329.53	70.84
9	2013	3	26	3	2013	3	27	12	1.87	2.19	8.00	8.82	127.57	1.38	348.86	116.51
10	2013	4	20	12	2013	4	21	9	1.98	2.30	7.37	7.84	254.71	0.88	326.40	85.84
11	2013	5	4	9	2013	5	5	9	2.12	2.52	7.98	8.98	322.36	1.00	303.25	111.77
12	2013	11	8	15	2013	11	9	18	1.81	2.14	7.48	8.00	14.89	1.13	12.06	91.17
13	2013	11	13	12	2013	11	15	18	2.16	2.81	8.51	9.68	63.86	2.25	23.29	264.02
14	2013	11	25	3	2013	11	29	0	2.15	2.63	8.07	8.94	210.45	1.38	164.11	177.09
15	2013	12	13	12	2013	12	14	3	1.76	1.97	7.49	7.85	46.93	0.63	51.04	48.11
16	2014	1	16	9	2014	1	16	21	1.96	2.12	7.44	7.78	330.08	0.50	328.18	47.12
17	2014	1	29	21	2014	1	31	15	2.14	2.96	8.34	9.78	108.61	1.75	1.02	203.11
18	2014	2	7	15	2014	2	8	3	1.95	2.18	7.54	7.81	80.63	0.50	3.86	46.88
19	2014	2	13	12	2014	2	14	0	1.64	1.69	7.00	7.58	317.43	0.50	325.20	32.60
20	2014	3	14	3	2014	3	14	18	1.82	1.98	7.46	7.82	22.17	0.63	23.25	51.39
21	2014	3	18	3	2014	3	18	18	2.05	2.32	7.61	8.12	298.19	0.63	294.83	66.05
22	2014	3	27	3	2014	3	27	15	1.69	1.80	7.54	7.73	42.36	0.50	53.48	34.97
23	2014	4	9	9	2014	4	10	6	1.88	2.08	7.57	7.97	330.19	0.88	334.35	76.90
24	2014	4	16	6	2014	4	17	0	2.06	2.41	8.07	8.74	285.04	0.75	319.25	81.31
25	2014	5	15	18	2014	5	17	0	1.76	1.95	7.66	8.13	267.35	1.25	337.86	94.52
26	2014	11	14	15	2014	11	15	12	1.94	2.21	8.15	9.52	329.49	0.88	322.64	81.93
27	2014	11	18	15	2014	11	20	9	2.20	2.63	8.45	9.21	151.74	1.75	12.92	209.66
28	2014	11	26	9	2014	11	27	6	2.09	2.54	8.16	8.85	298.11	0.88	330.79	94.67
29	2015	2	18	21	2015	2	19	12	1.87	2.00	8.00	8.31	225.12	0.63	354.56	53.96
30	2015	2	28	3	2015	2	28	15	1.80	1.91	7.59	7.76	31.34	0.50	31.22	40.28
31	2015	3	6	21	2015	3	7	21	2.01	2.23	8.58	9.36	229.65	1.00	321.33	99.66
32	2015	6	14	12	2015	6	15	12	1.88	2.23	8.24	8.84	77.93	1.00	72.07	87.30

## 10.2. ANEXO B

**Tabla 12. Información del oleaje para los diferentes eventos de tormenta excluidos en este estudio.**

ID	ai	mi	di	hi	af	mf	df	hf	Hs med	Hs max	Tp med	Tp max	Dir med	dur(H)	Dir (Hsmax)	Energy
<b>A</b>	2013	1	4	0	2013	1	4	21	1.727	1.8392	7.311	8.2003	219.5625	0.875	351.87	63.789
<b>B</b>	2013	12	25	3	2013	12	26	0	2.005	2.3257	7.829	8.2561	65.28913	0.875	17.869	89.084
<b>C</b>	2014	1	3	15	2014	1	4	21	2.292	2.7026	8.279	9.2011	141.7273	1.25	9.9478	165.860
<b>D</b>	2014	1	7	3	2014	1	8	18	2.528	3.5545	9.012	10.484	108.0249	1.625	358.37	272.683
<b>E</b>	2014	12	25	3	2014	12	25	21	2.037	2.5214	7.828	8.3337	316.7243	0.75	317.26	80.685
<b>F</b>	2015	1	8	18	2015	1	9	15	2.085	2.3255	8.384	8.7017	28.6875	0.875	28.386	94.711
<b>G</b>	2015	1	24	15	2015	1	25	12	2.214	2.6971	8.411	9.0031	321.8563	0.875	311.56	111.152



### 10.3. ANEXO C

Efecto de los eventos de tormenta identificados en este trabajo.

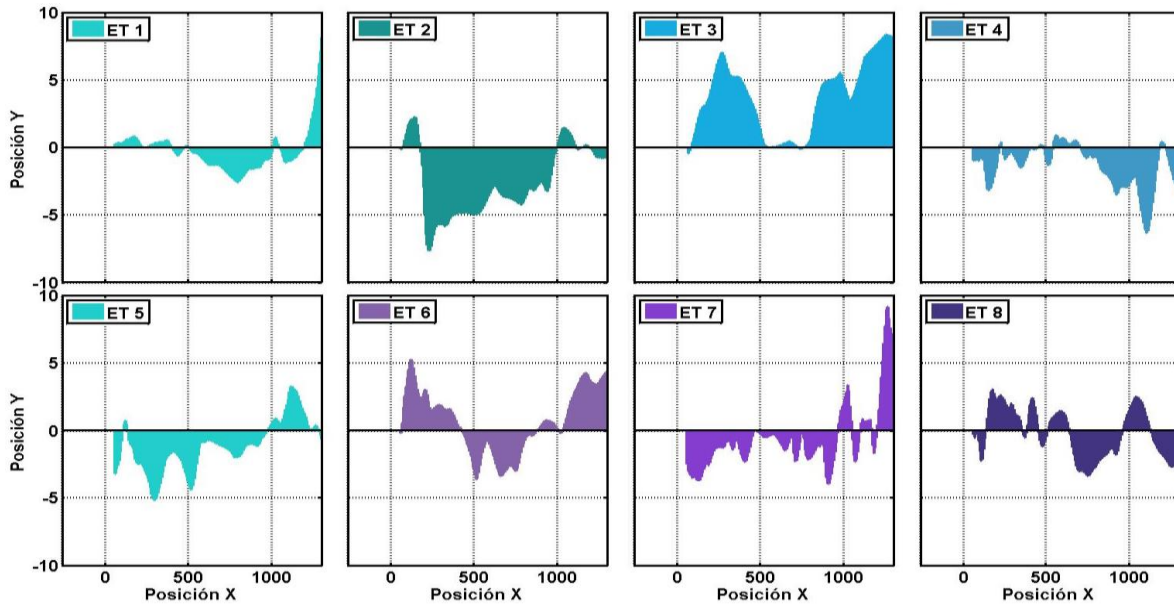


Figura 36. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (1-8), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma.

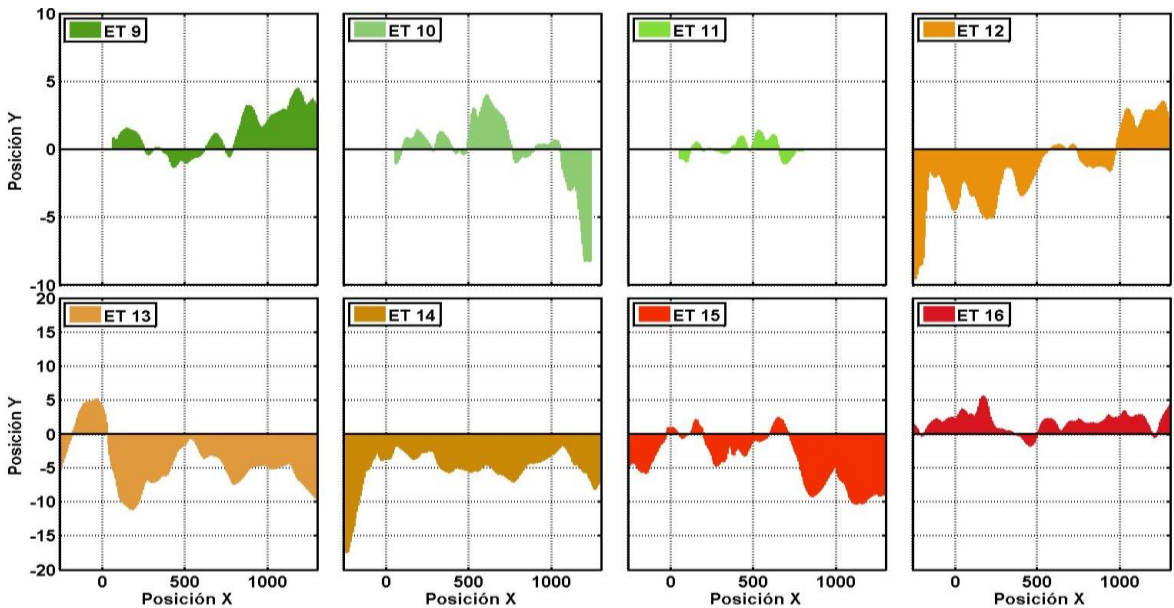


Figura 37. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (9-16), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma.

los ejes verticales la posición transversal de la misma. Notar el cambio de escala en el eje y para los eventos 13 - 16.

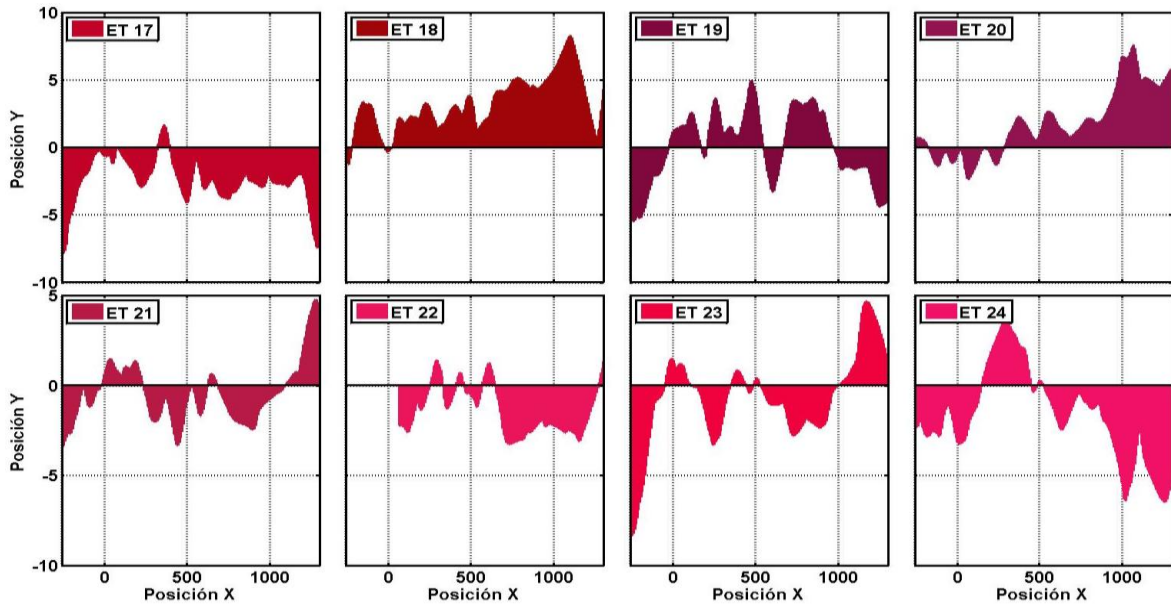


Figura 38. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (17-24), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma.

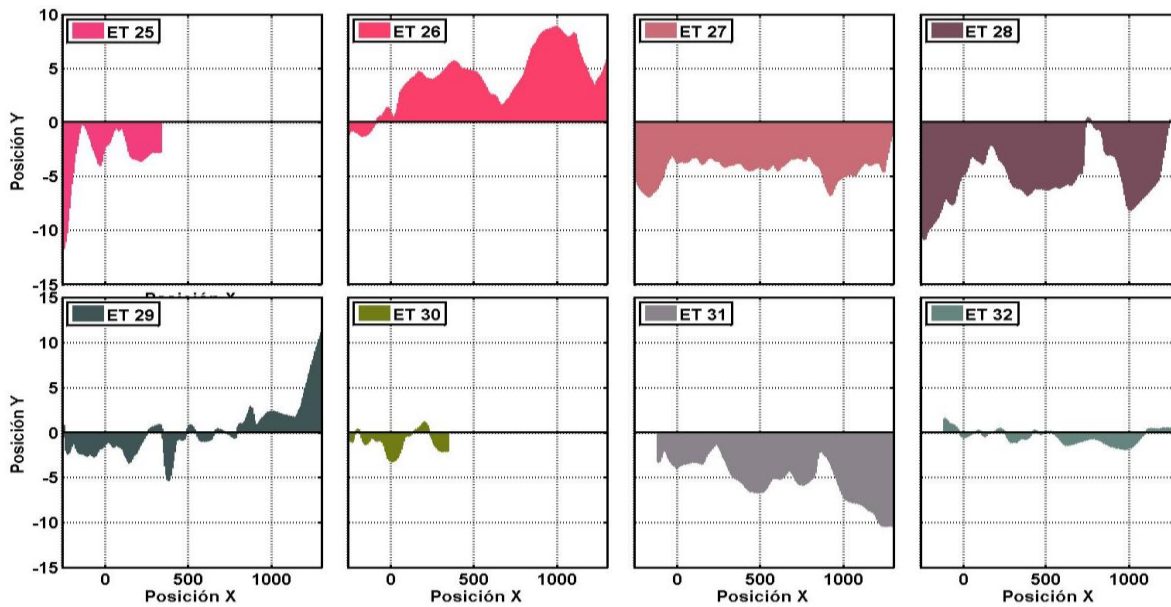


Figura 39. Cambios morfológicos en la línea de costa debido a eventos de tormenta (25-32), ejes horizontales indican la posición longitudinal de la línea de costa, mientras que los ejes verticales la posición transversal de la misma.