



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**IMPACTO DE ESPIGONES PERMEABLES EN LA COSTA NORTE
DE YUCATÁN**

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

PRESENTA:
JOSE CLEMENTE TUZ PECH

TUTOR PRINCIPAL:
ALEC TORRES FREYERMUTH, INSTITUTO DE INGENIERÍA

SISAL, YUCATÁN. DICIEMBRE DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Paulo Salles de Almeida
Secretario: Dra. Gabriela Medellín Mayoral
Vocal: Dr. Alec Torres Freyermuth
1^{er} Suplente: Dr. Jose López González
2^{do} Suplente: Dra. Elena Ojeda Casillas

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

TUTOR DE TESIS:

DR. Alec Torres Freyermuth

.....

Firma

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos que siempre me impulsan y apoyan de manera incondicional en cualquier proyecto que emprenda, y a los cuales debo mis logros actuales.

Al Dr. Alec Torres Freyermuth por su asesoramiento y paciencia en la elaboración de esta tesis, sin la cual no hubiera sido posible.

Al instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y su laboratorio de ingeniería y procesos costeros por su colaboración con el material y equipo utilizado durante los experimentos de la presente tesis, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de dichos experimentos.

Agradezco el apoyo financiero de la DGAPA-UNAM, a través del proyecto "Morfodinámica de playas en una costa dominada por brisas marinas" (IN101218), y de CONACYT (Proyecto Ciencia Básica No. 284819) para la realización de este estudio.

A la empresa Grupo Bari por la donación de los hexápodos de concreto utilizados en esta tesis.

Agradezco el apoyo técnico por parte del ISC Gonzalo Uriel Martín Ruíz, del M.I. Juan Alberto Gómez Liera, y del Dr. José López González para la realización de los experimentos en el campo.

A la Dra. Gabriela Medellín, Dra. Elena Ojeda y Dr. Tonatihu Mendoza por las sugerencias y comentarios aportados para este proyecto, los cuales han sido muy útiles para concluir el presente trabajo.

A todos mis compañeros y amigos: Álvaro, Luis, Fernando, Daniel, Ivette, Wilmer, Jorge, Alejandro Paladio, Alejandro Astorga, Alberto, Miguel Valencia, Miguel Domínguez, Orlando, Rodrigo, Oswaldo, Niels, David, Gemma, Iván, Luisete, Héctor, Luis Evia y Manuel Chacón por la ayuda prestada durante las campañas de campo, ya que sin ellos no hubiera sido posible la elaboración de los experimentos.

RESUMEN

Es importante determinar los cambios en la posición de la línea de costa debido a que delimita la interfaz entre el mar y la tierra. Por lo tanto, el retroceso de la línea de costa (erosión) tiene implicaciones sociales, económicas, y ambientales para las actividades que allí se desarrollan. En la costa de Yucatán se han utilizado estructuras costeras para mitigar los problemas de erosión. Sin embargo, estas no cuentan con estudios que respalden su diseño y el impacto en la morfología de las playas adyacentes. En este trabajo estudiamos la funcionalidad y estabilidad de un espigón permeable durante condiciones medias (brisas marinas), tormentas (Nortes), y eventos extremos (turbonada) en la playa de Sisal, Yucatán, México. La zona de estudio se caracteriza por la presencia de brisas marinas intensas la mayor parte del año, lo que genera un transporte de sedimento significativo a lo largo de la costa. Por otro lado, también se ve influenciada por tormentas asociadas al paso de frentes fríos (Nortes) durante los meses de otoño a primavera. En este trabajo se realizó un estudio sobre la funcionalidad y estabilidad de espigones permeables. Los espigones tienen una longitud de 15 m de largo, altura de 0.60 m, y están hechos con 72 elementos de concreto hexápodos de 65 kg (BARI). Las condiciones de oleaje, el principal forzamiento de corrientes litorales, se midieron a 10 m de profundidad. Asimismo, para investigar el impacto de las estructuras en la morfología de playas se llevaron a cabo levantamientos topobatimétricos utilizando un Sistema Geoposicionador Satelital (GPS) en tiempo real (Real Time Kinematics, RTK). El estudio de campo consistió de dos etapas. En la primera etapa se colocó un espigón para evaluar su estabilidad y funcionalidad. En este período ocurrió un evento extremo (turbonada) que produjo una sobre-elevación por marea de tormenta de 1 m y una altura de ola significativa de $H_s=2.5\text{m}$. La segunda etapa consistió en colocar una segunda estructura para evaluar la funcionalidad de un campo de espigones. El segundo espigón se colocó 30 m al oeste durante un período de 14 días. Las mediciones muestran que la estructura es altamente estable durante eventos extremos y la generación de un incremento promedio en el ancho de la playa de 2.15 m (mínimo y máximo 0.6 m y 3.8 m respectivamente) y un incremento de volumen total de 14.74 m^3 de la parte emergida en el periodo del 14 al 27 de junio de 2017, en los 130 m de la línea de costa. Los análisis PCA y Even/Odd muestran que el área de estudio debe ser ampliada, para mejorar el monitoreo de los efectos generados por los espigones en zonas alejadas, y el análisis espacio-temporal muestra que la tendencia de la estructura es almacenar en sus zonas aledañas. Este estudio demuestra que el uso de espigones de baja coronación es una alternativa para los problemas de erosión.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Problemas de erosión en la costa de Yucatán (Yucalpetén y Chuburná Puerto), fotografía tomada de Sipse noticias 14/10/2013.	1
Figura 2. Campo de espigones (espolones) en la costa de Yucatán (Chelem). Fotografía proporcionada por Aerozoom.....	3
Figura 3. Representación gráfica de los modos de transporte de sedimento. Tomado de Pedrozo-Acuña (2011).....	7
Figura 4. Componentes longitudinales (qx) y transversal (qy) del transporte litoral. Tomada de Dean (1995).....	8
Figura 5. Ubicación del área de estudio.	12
Figura 6. Ubicación de la Zona de los Experimentos.	13
Figura 7. Rosa de Vientos(WRFS) tomada de Figueroa-Espinoza et al. (2014).....	14
Figura 8. Equipo e instrumentos utilizados (a, b) para evaluar y (c)construir los espigones permeables.	16
Figura 9. Representación de la ubicación del ADCP en el lecho marino.	16
Figura 10. Ubicación de los equipos utilizados para medir las condiciones mareográficas y puntos de referencias usados durante los levantamientos topográficos.....	17
Figura 11. Hexápodos de concreto y su colocación: a)ensamble de elementos para construir la estructura permeable; b)forma de la parte del morro o parte final de la estructura, tomado de Hofman, (2016).....	18
Figura 12. Representación de levantamientos de perfiles de playa.....	19
Figura 13. Transectos a realizar en experimento 1, la línea roja indica la ubicación de la estructura.....	21
Figura 14. Transectos a realizar en experimento 2, las líneas rojas indican la ubicación de la estructura y las azules los transectos.....	22

Figura 15. Serie temporal de (a) mareas y (b) altura y dirección de oleaje del 02/Mayo/2017 al 27/Junio/2017 dividido en dos secciones: experimento con espigón simple (fondo gris claro) y campo de espigones (fondo gris oscuro).	25
Figura 16. Curvas de nivel a) 02/Mayo/2017; b) Comparación 02/Mayo/2017 con 03/Mayo/2017; c) 03/Mayo/2017; d) Comparación 03/Mayo/2017 con 05/Mayo/2017; c) 05/Mayo/2017.	28
Figura 17. Perfiles del 02-05 de mayo de 2017, donde se observa la erosión de la duna de arena y la acreción en la parte sumergida del perfil tras la turbonada: a) Oeste 8(O8); b) Oeste 2(O2); c) Espigón; d) Este 2 (E2); e) Este 8(E8).	30
Figura 18. Evolución de la línea de costa (cota nivel 0m) del 02 de mayo al 05 de mayo, respecto a la línea de costa del 02 de mayo.	31
Figura 19. Comparación de volumen emergido del 02 de mayo al 05 de mayo, tomando como volumen inicial el 02 de mayo de 2017, a) lado Este del espigón; b) lado Oeste del espigón.	32
Figura 20. Comparación del volumen emergido del 02 de mayo al 05 de mayo, en la cual se observa el impacto generado por la turbonada como un cambio en la zona de acreción/erosión.	32
Figura 21. Espigón permeable a) fotografía antes de la tormenta; b) fotografía durante la tormenta 04 de mayo; c) fotografía después de la tormenta del 04 de mayo.	33
Figura 22. Curvas de nivel a) 05/Mayo/2017; b) Comparación del 05/Mayo/2017 al 08/Mayo/2017;	35
Figura 23. Curvas de nivel a) 08/Mayo/2017; b) Comparación del 08/Mayo/2017 al 12/Mayo/2017;	35
Figura 24. Curvas de nivel a) 12/Mayo/2017; b) Comparación del 12/Mayo/2017 al 16/Mayo/2017;	36
Figura 25. Curvas de nivel a) 16/Mayo/2017; b) Comparación del 16/Mayo/2017 al 08/Junio/2017;	36

Figura 26. Curvas de nivel a) 08/Junio/2017; b)Comparación del 08/Junio/2017 al 14/Junio/2017;	37
Figura 27. Curvas de nivel 14/Junio/2017.....	37
Figura 28. Perfiles del 02 de mayo al 14 de junio de 2017, donde se observa el movimiento de la duna de arena y el aumento en la parte sumergida tras la turbonada: a) Oeste 8(O8); b) Oeste 2(O2); c) Espigón; d) Este 2 (E2); e) Este 8(E8).	38
Figura 29. Comparación cota nivel 0 del 02 de mayo al 14 de junio: a) Comparación tomando como base el 02 de mayo de 2017; b) Comparación tomando como base la línea de costa del 05 de mayo de 2017.	39
Figura 30. Análisis Even/Odd para línea de costa a 0 m a) De 02 de mayo al 05 de mayo, efectos de la turbonada; b) De 02 de mayo al 14 de junio, impacto durante todo el experimento 1.....	40
Figura 31. Análisis Even/Odd para línea de costa a -0.50 m a) De 02 de mayo al 05 de mayo, efectos de la turbonada; b) De 02 de mayo al 14 de junio, impacto durante todo el experimento 1.....	40
Figura 32. Análisis Even/Odd para línea de costa a 0 m a) De 02 al 03 de mayo; b) De 03 al 05 de mayo; c) De 05 al 08 de mayo; d) De 08 al 12 de mayo; e) De 12 al 16 de mayo; f) De 16 de mayo al 08 de junio; g) De 08 de junio al 14 de junio.....	41
Figura 33. Análisis PCA para línea de costa dividido por secciones, en la cual lo gris representan los nortes; a) componente espacial; b) componente temporal.....	42
Figura 34. Comparación de volumen a cota nivel 0m del 02 de mayo al 14 de junio, tomando como volumen inicial el 05 de mayo de 2017, a) lado Este del espigón; b) lado Oeste del espigón.....	43
Figura 35. Comparación de volumen a cota nivel 0m del 02 de mayo al 14 de junio.	44
Figura 36. Curvas de nivel a) 14/Junio/2017; b)Comparación del 14/Junio/2017 al 16/Junio/2017;	45

Figura 37. Curvas de nivel a) 16/Junio/2017; b)Comparación del 16/Junio/2017 al 19/Junio/2017;	45
Figura 38. Curvas de nivel a) 19/Junio/2017; b)Comparación del 19al 23/Junio/2017;	46
Figura 39. Curvas de nivel a) 23/Junio/2017; b)Comparación del 23 al 27/Junio/2017; ...	46
Figura 40. Curvas de nivel a) 27/Junio/2017.....	46
Figura 41. Perfiles del 14 de junio al 27 de junio de 2017, donde se observa el movimiento de la duna de arena: a) Oeste 8(O8); b) Oeste 2(O2); c) Este 5 (E5); d) Este 10(E10); e) W2; f) W8.....	48
Figura 42. Comparación de línea de costa a cota nivel 0m del 14 de junio al 27 de junio.	48
Figura 43. Componentes de PCA para línea de costa dividido por secciones, en la cual lo gris representan los nortes, para cota nivel 0m del 14 de junio al 27 de junio a) Componentes espaciales; b) Componentes Temporales.	49
Figura 44. Comparación de volumen a cota nivel 0m del 14 de junio al 27 de junio, tomando como volumen inicial el 14 de junio de 2017, a) lado Este del espigón (E); b) lado Oeste del primer espigón (O) o central de campo de espigones; c) lado Oeste del segundo espigón (W).	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de estructuras, objetivos y función principal, tomada de Salles, Paulo; Silva Casarín, (2004).....	9
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los espigones, tomada de Suárez D (2001).	11
Tabla. 3 Valores de densidad aparente (ρ'), densidad de las partículas (ρ_s) y porosidad (n) a lo largo del perfil de playa tomados de Roca Barcelo (2016).	14
Tabla 4 Valores del tamaño medio de grano (d_{50}) estimados por Roca Barcelo (2016) a partir del método de cribado y mediante el CamSizer.	15
Tabla 5. Consideraciones de los experimentos.....	20
Tabla 6. Distancias de los transectos para el experimento 1.....	21
Tabla 7. Fechas de los levantamientos realizados para el experimento 1.....	21
Tabla 8. Distancias de los transectos para el experimento 2.....	22
Tabla 9. Fechas de los levantamientos realizados para el experimento 2.....	22
Tabla 11. Periodos de observación y su condición de oleaje asociada.	26

INDICE

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Justificación	3
2.	Estado del Arte	4
3.	Marco teórico	6
3.1.	Transporte de sedimento	6
3.1.1.	Propiedades del sedimento	7
3.1.2.	Modos de transporte	7
3.1.3.	Transporte transversal y longitudinal	8
3.2.	Estructuras de protección costera	9
3.2.1.	Espigones	10
4.	Zona de estudio	12
4.1.	Localización	12
4.2.	Delimitación del área de experimento	12
4.3.	Clima marítimo	13
4.4.	Características del sedimento	14
5.	Métodos	16
5.1.	Mediciones de campo	16
5.1.1.	Diseño y construcción del espigón permeable	17
5.1.2.	Levantamientos topo-batimétricos	19
5.2.	Diseño de los experimentos	20
5.2.1.	Experimento 1: Espigón sencillo	20
5.2.2.	Experimento 2: Campo de espigones	21
5.3.	Procesamiento y análisis de datos	23

5.3.1.	Mareas y oleaje	23
5.3.1.	Análisis de los datos topográficos.....	23
6.	Resultados.....	25
6.1.	Condiciones de forzamiento.	25
6.2.	Estabilidad y funcionalidad durante un evento extremo	26
6.2.1.	Evolución de las curvas de nivel	27
6.2.2.	Perfiles de playa y línea de costa	29
6.2.3.	Cambio en el volumen de sedimento en la tormenta	31
6.2.4.	Estabilidad de la estructura.....	33
6.3.	Funcionalidad en el mediano plazo.....	34
6.3.1.	Experimento 1: Espigón sencillo	34
6.3.1.1.	Evolución de las curvas de nivel.....	34
6.3.1.2.	Perfiles de playa y líneas de costa.....	37
6.3.1.3.	Análisis Even/Odd de la línea de costa.....	39
6.3.1.4.	Análisis componentes principales (PCA) de la línea de costa.....	42
6.3.1.5.	Cambio volumétrico.....	43
6.3.2.	Experimento 2: Campo de espigones	44
6.3.2.1.	Curvas de nivel.....	44
6.3.2.2.	Perfiles de playa y comparación de línea de costa	47
6.3.2.3.	PCA de la línea de costa para campo de espigones.....	49
6.3.2.4.	Cambio de volumen.....	50
7.	Discusiones.	52
8.	Conclusiones	53
9.	Referencias	54

1. Introducción

1.1. Motivación

La erosión es un tema de preocupación para los ingenieros y desarrolladores costeros debido a los impactos socioeconómicos y ambientales que genera en zonas costeras alrededor del mundo (Samaras & Koutitas, 2014).

La erosión costera es el decremento de sedimento asociado a un retroceso en la línea de costa, el cual se puede estimar al comparar dos estados de la línea de costa. Está asociada a gradientes de transporte de sedimento. Es decir, ésta ocurre cuando más sedimento sale de una zona de la costa en comparación con el que entra. Conocer la erosión o acreción en una costa es importante para entender el balance de los sedimentos.

La erosión natural de playas es causada por eventos extremos (huracanes, tsunamis, etc.) o por gradientes naturales del transporte de sedimento (figura 1). Sin embargo, también existen acciones realizadas por el hombre que contribuyen a este problema como lo son las construcciones en la orilla de la playa, deforestación de la duna, y estructuras portuarias como escolleras o espigones, las cuales generan un obstáculo en el transporte de sedimento y disminuyen las fuentes naturales del mismo. La evaluación de la erosión requiere monitoreo en el tiempo y el espacio que permita determinar la existencia de una tendencia para saber si la costa se está erosionando.



Figura 1. Problemas de erosión en la costa de Yucatán (Yucalpetén y Chuburná Puerto), fotografía tomada de Sipse noticias 14/10/2013.

La construcción de estructuras costeras para el control de erosión de la costa es común en varias partes alrededor del mundo. En la costa norte de la Península de Yucatán es muy común observar diversas estructuras para el control de la erosión como los espigones tradicionales conocidos como “espolones” hechos de diversos materiales como piedras y palos, que impiden parcialmente el paso de los sedimentos. Sin embargo, la mayoría de las estructuras están hechas sin ningún diseño ni contemplan el monitoreo que permita evaluar sus posibles efectos.

La construcción de estructuras de manera no regulada y sin diseño llegan a generar afectaciones más grandes (Felices, 2009). Aunque existen manuales para el diseño de los espigones, estos en su mayoría toman estructuras impermeables, descartando el transporte de los sedimentos a través o por encima de la estructura (Gerardo Fracassi, 2012). Es por ello importante su estudio y definir los criterios de diseño adecuados para la costa norte de Yucatán. En este trabajo se estudió de manera experimental el impacto de espigones permeables en la morfología de una playa cuya dinámica se encuentra dominada por brisas marinas

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de espigones permeables en el mediano plazo en una playa dominada por brisas.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la estabilidad de la estructura durante eventos extremos (turbonadas y Nortes).
- Evaluar la funcionalidad de la estructura durante condiciones típicas de oleaje (brisas marinas).

La meta es proponer una alternativa para el problema de erosión en la zona, minimizando el daño a las zonas aledañas.

1.3. Justificación

El uso de espigones permeables es ampliamente utilizado como medida de mitigación al problema de erosión en la costa norte de Yucatán (Figura 2). Sin embargo, existen pocos trabajos enfocados a determinar el impacto que generan estas estructuras en el mediano plazo en las zonas aledañas y en identificar criterios de diseño específicos para las condiciones en esta zona.



Figura 2. Campo de espigones (espolones) en la costa de Yucatán (Chelem). Fotografía proporcionada por Aerozoom.

2. Estado del Arte

Existen varias alternativas para mitigar los problemas de erosión en las costas, como son colocar estructuras perpendiculares (espigones) las cuales actúan bloqueando total o parcialmente el transporte de sedimentos (Kristensen, Drønen, Deigaard, & Fredsoe, 2016). Los espigones pueden ser usados de igual manera para controlar inundaciones, recuperación de tierras, y la provisión de profundidad navegable. Las funciones pueden cambiar según los objetivos de las obras y la hidrodinámica de la zona (Ali & Tominaga, 2012). Este tipo de estructuras pueden clasificarse de una manera muy general en permeables o impermeables (Yossef, 2005).

El diseño de los espigones varía de un lugar a otro debido a la dinámica marina que caracteriza la zona de estudio, lo cual hace difícil estandarizar los modelos y la construcción de los mismos. De igual forma, su construcción varía debido a la disponibilidad de los materiales para su construcción y los costos asociados a estos (Michigan et al., 2004).

Los campos de espigones típicamente se construyen como medida de mitigación de la erosión costera. Estos actúan bloqueando el transporte de sedimentos y como resultado cambia la orientación de la línea de costa corriente arriba volviéndose paralela a las crestas del oleaje predominante (Ahmed, Hasan, & Tanaka, 2010).

Los estudios realizados sobre los espigones no sólo están basados en modelaciones matemáticas, como es el caso de Alauddin & Tsujimoto (2012) que modelan la erosión con configuraciones distintas de espigones para los ríos de Bangladesh, ya que los métodos convencionales usados no dan los resultados esperados. De igual manera se han realizado estudios de comportamiento como el elaborado por Kristensen et al. (2016) quienes demostraron por medio de un estudio de sensibilidad realizado al impacto que generan los espigones; que el aumento de longitud de espigón aumenta la respuesta costera o impacto en la morfología y disminuyendo la longitud del espigón, genera una altura de ola efectiva mayor, lo cual aumentará la anchura de la zona de surf y con ello disminuirá la respuesta costera.

Meyer-Arendt, (1991) realizó estudios de impacto físico de la costa norte de Yucatán, con base al desarrollo del turismo regional y la modificación de la costa generada por estructuras ilegales, las cuales fueron construidas como respuesta a la erosión ocasionada al oeste de los puertos de abrigo. La costa yucateca ha tenido grandes afectaciones debido al mal manejo y construcción de estructuras por parte de los propietarios de las casas. La presencia de espigones, construidos principalmente de roca y madera, han estimulado a construir más estructuras a lo largo de la costa.

Un estudio reciente como el realizado por Roca Barcelo (2016) con diques exentos en la playa de Sisal, ha mejorado la comprensión del funcionamiento natural del área de estudio, concluyendo que en la temporada de nortes se produce un incremento en la berma, mientras que en la temporada de brisas esta se mantiene estable, de igual manera concluyó que en los periodos de transición de nortes a brisas las playas sufren erosión generalizada y desplazamiento *offshore* de las barras.

Existen otros estudios experimentales elaborados en el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), como los realizados por Hofman (2016) y Tereszkievicz (2016) para evaluar el impacto de espigones temporales permeables e impermeables en las playas de Sisal. En ambos trabajos las estructuras fueron instaladas durante periodos de 24 horas, para abarcar un evento de brisas, y se realizaron mediciones de alta resolución espacio-temporal para evaluar sus impactos. Sin embargo, la evaluación de su comportamiento por periodos de varios días durante condiciones medias y su estabilidad durante tormentas no fue estudiada en estos trabajos. Más recientemente, Jiménez y Flores (2017) monitorearon un espigón permeable con curvatura al oeste durante el periodo de brisas medias y tormentas.

3. Marco teórico.

En esta sección se explica los procesos costeros asociados al oleaje, principal responsable del transporte litoral en la zona. De igual forma se explican los tipos de estructuras de protección costera, y sus principales funciones, haciendo mayor énfasis en los espigones.

3.1. Transporte de sedimento

El transporte litoral tiene una función primordial en muchos aspectos de la ingeniería costera, estuarina, y de costa afuera. La arena en el mar puede ser movida por corrientes, la acción del oleaje, o por la acción combinada de éstas. Cuando el oleaje se propaga en aguas someras, la disminución de la profundidad provoca la rotura del oleaje y por lo tanto su disipación por turbulencia. El efecto de la rotura produce abrasión y suspensión de las partículas de arena (Suárez D., 2001).

Existen tres procesos básicos en el transporte de sedimento no-cohesivo las cuales son:

- **Incorporación:** Se presenta con la fricción ejercida en el suelo marino, la cual ayuda a mantener el sedimento en suspensión.
- **Transporte:** Es el efecto que se genera en los granos de arena, los cuales ruedan, se deslizan o saltan en el fondo marino.
- **Deposición:** Ocurre cuando las partículas de arena detienen su movimiento y se encuentran en reposo.

La tasa de transporte de sedimentos se define como la cantidad de sedimentos por unidad de tiempo que pasa por un plano vertical de ancho unitario y que está perpendicular al flujo. El transporte de sedimento en el mar tiene magnitud y dirección, por lo que se define como una cantidad vectorial. En el caso de que entre más sedimento de lo que sale se genera acreción y en caso de que salga más sedimento de lo que entra se genera erosión. Por lo tanto, las tasas de erosión o de acreción en un área determinada dependen de los gradientes de transporte en todas las direcciones.

3.1.1. Propiedades del sedimento

Las características más importantes del sedimento son las siguientes:

- **Tamaño de grano:** La clasificación de los granos de sedimento se basa en su diámetro, la arena está definida como un sedimento con diámetro de grano dentro del intervalo de 0.062 mm a 2 mm. Los sedimentos más finos son clasificados como arcillas y limos, el material con tamaño de grano superior a 2 mm es clasificado como grava.
- **Densidad y masa del grano:** La densidad de un grano se define como la masa por unidad de volumen, y está determinada por la mineralogía. La masa del grano es igual al producto de su volumen y densidad.
- **Forma del grano y redondez:** La forma del grano está dada por el promedio de las medidas del eje corto, intermedio y largo. Esto tiene influencia sobre la forma en la que se mueve el sedimento, los granos planos tienden a tardar más en incorporarse, en comparación con los granos esféricos. La redondez es una escala del tamaño en función a la forma, indicando el grado de abrasión que ha sufrido el grano.
- **Porosidad y ángulo de fricción interna:** la porosidad depende del grado de compactación y el tamaño de los granos de sedimento. El ángulo de fricción es el ángulo con el cual los granos de sedimento comienzan a rodar en forma de avalancha, el cual depende de la forma de los granos y su distribución. Frecuentemente se considera un valor de 45° o más para gravas y arenas secas.

3.1.2. Modos de transporte

Los sedimentos tienen diferentes modos de transporte, los cuales se pueden agrupar en transporte por fondo o por suspensión (Figura 3).

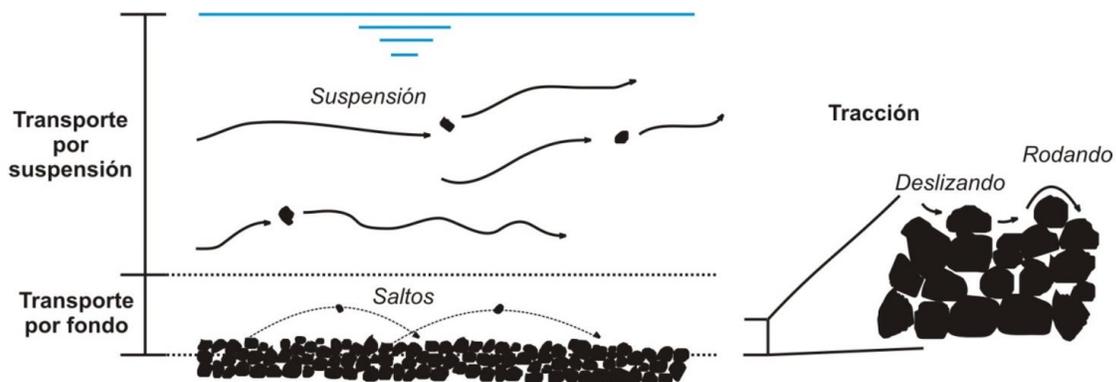


Figura 3. Representación gráfica de los modos de transporte de sedimento. Tomado de Pedrozo-Acuña (2011).

El transporte por fondo, es el movimiento que mantiene contacto con el lecho ya sea por saltos, deslizando o rodando sobre el fondo marino. Este modo de transporte se considera relativamente lento y se observa principalmente en el transporte de sedimentos gruesos, teniendo corrientes moderadas e intensas.

El modo por suspensión es el que se mantiene debido a la turbulencia que se genera en el agua en la zona de rompiente. La mayor parte del tiempo los granos de arena se encuentran en suspensión teniendo que este modo de transporte es típico de las corrientes moderadas, las cuales transportan limos.

3.1.3. Transporte transversal y longitudinal

El transporte litoral se divide en dos componentes principales, una paralela a la línea de costa, llamada transporte longitudinal (*long-shore*) y otra perpendicular a la misma llamada transporte transversal (*cross-shore*).

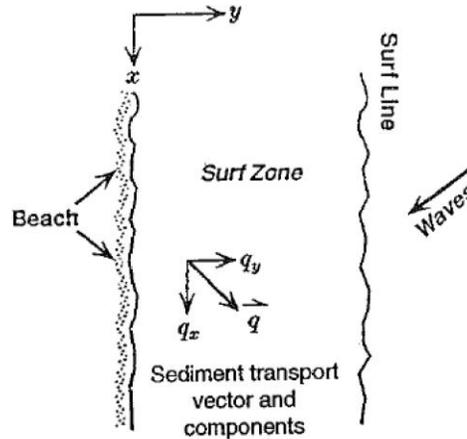


Figura 4. Componentes longitudinales (q_x) y transversal (q_y) del transporte litoral. Tomada de Dean (1995).

En el transporte longitudinal el sedimento se desplaza a lo largo de la costa debido a las corrientes litorales inducidas por el oleaje y se lleva a cabo principalmente por cualquiera de los modos (suspensión o de fondo). El fenómeno del transporte longitudinal se observa en la zona de swash, cuando el oleaje incidente llega oblicuo a la costa, lo cual provoca un transporte en zigzag.

El transporte transversal de sedimento se da cuando el oleaje incidente tiene una dirección normal a la costa o cuando se presentan corrientes de resaca. Este tipo de transporte es el que genera mayor cambio en el perfil de la playa, debido a que se presenta durante eventos de tormenta, moviendo el sedimento hacia el mar, con duración de horas, mientras que en los periodos de calma se presenta la recuperación, pero estos son de mayor duración.

3.2. Estructuras de protección costera

Con los fenómenos naturales y antropogénicos que desestabilizan las zonas costeras, generando erosión de costas e inundaciones en distintas áreas habitadas se hace necesario el uso de estructuras de protección y defensa de las costas.

Las estructuras son muy diversas y cumplen funciones específicas, las cuales están divididas en acorazamiento costero, estabilización de playas y protección de instalaciones costeras (USACE, 2002). En la siguiente tabla se enlista los tipos de estructuras costeras, el objetivo, y la función principal de cada una de ellas.

Tabla 1. Tipos de estructuras, objetivos y función principal, tomada de Salles, Paulo; Silva Casarín, (2004).

Tipos, objetivos y funciones de estructuras de protección costera. (Fuente: USACE, 2002).		
Tipo de Estructura	Objetivo	Función Principal
Dique	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas costeras bajas	Separación entre la línea de costa y las zonas bajas en tierra a través.
Muro vertical (espaldones)	Proteger tierra y estructura contra inundaciones y rebase	Refuerzo de parte del perfil de playa
Revestimiento	Proteger la línea de costa contra erosión	Refuerzo de parte del perfil de playa
Malecón de retención	Retener suelo y evitar deslizamiento de tierra al mar	Refuerzo y relleno del banco de tierra costero
Espigón	Prevenir erosión de playas	Reducción de transporte longitudinal a la playa
Rompeolas no ligado a la playa	Prevenir erosión de playas	Reducción de la altura de ola en la sombra de la estructura
Dique o rompeolas arrecife	Prevenir erosión de playas	Reducción de la altura de ola en la playa
Dique sumergido	Prevenir erosión de playas	Retardar el movimiento del sedimento mar adentro
Rompeolas	Proteger puertos y obras de toma contra oleaje y corrientes	Disipación de energía de oleaje y/o reflexión del oleaje hacia mar adentro
Dren de playa	Prevenir erosión de playas	Acumulación de material playero en la porción drenada de la playa
Relleno artificial de playa y dunas	Prevenir erosión playera y proteger contra inundaciones	Relleno artificial de la playa y duna para que sea erosionado en lugar del material naturalmente depositado
Rompeolas flotante	Proteger puertos y zonas de atraque contra oleaje de alta frecuencia	Reducción de altura de ola por reflexión y atenuación
Espigón de escollera	Estabilizar canales de navegación en desembocaduras de bocas	Confinar corrientes y flujos de marea. Proteger contra aguas pluviales y corrientes cruzadas
Muro de conducción	Prevenir azolve o erosión no deseados y proteger atraques contra corrientes	Direccionamiento de corrientes forzando el flujo a lo largo de las estructuras
Barreras de marea de tormenta	Proteger estuarios contra mareas de tormenta	Separación del estuario y el mar por medio de compuertas móviles
Protección socavación	Proteger estructuras costeras contra inestabilidad producida por erosión de fondo marino adyacente	Aumento de la resistencia contra erosión causada por oleaje y corrientes

3.2.1. Espigones

Los espigones son las estructuras más comunes para el manejo de playas, los cuales se construyen generalmente perpendicular a la línea de costa para impedir el paso de arena a lo largo de la playa. El objetivo principal de los espigones es estabilizar las playas afectadas por la erosión, acumulando arena transportada por las corrientes longitudinales a un costado del espigón.

Con la presencia del espigón se modifica la dirección de las corrientes, impidiendo el paso de sedimento hacia el otro lado de la estructura, generando una disminución de arena aguas abajo del espigón, causando problemas de erosión. En la mayoría de los casos los espigones sirven para estabilizar la playa, generando el depósito de la arena. El fenómeno de la difracción y refracción se hace presente en los espigones, generando una serie de playas artificiales, las cuales se ubican entre espigones. Generalmente los espigones son estructuras rectas, pero en algunos casos se construyen curvos o en forma de T, aunque éstos actúan igualmente como rompeolas.

Los principales criterios que se toman en cuenta para el diseño de los espigones son:

- Localización en planta, la cual es marcada como la ubicación en la cual se construirá y las características topográficas de la zona.
- Longitud del espigón, estos pueden clasificarse como cortos o largos dependiendo de hasta donde atraviesan la zona de rompiente de oleaje. Si los espigones atraviesan la totalidad de la zona de rompimiento de las olas, se consideran largos, pero si solo se extienden parte de la zona de rompimiento, se consideran cortos. Pero durante periodos de olas bajas, un espigón puede funcionar como largo y durante tormentas funcionar como corto.
- Espaciamiento de los espigones, esto depende de la longitud de los espigones, usando comúnmente de 1.5 a 2 veces la longitud la cual sugiere el manual de la US ARMY.
- Altura del espigón, se clasifican como altos o bajos, dependiendo su altitud con referencia a los niveles de marea, teniendo como altos los que se encuentra por encima de nivel de marea alta y no transporta sedimento por encima y los espigones bajos que tienen una elevación por debajo del nivel medio de marea, pudiendo transportar sedimento por encima de la estructura.

- Tipo de espigones, pueden clasificarse en dos tipos, permeables los cuales permiten el paso de sedimentos a través de la estructura y los impermeables que no permiten el paso de arena.

Las principales ventajas y desventajas de los espigones se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los espigones, tomada de Suárez D (2001).

Principales ventajas y desventajas de los espigones. (Fuente:USACE, 2002).	
Ventajas	Desventajas
Los espigones son efectivos para controlar la erosión debida al transporte de sedimentos a lo largo de la orilla.	No son efectivos para impedir la perdida de arena hacia el fondo marino.
Los espigones se construyen de la playa hacia el mar, volviendo económica su construcción.	Generan fuertes corrientes de agua a lo largo de sus costados, produciendo perdida de arena hacia el fondo del mar.
Los espigones no cambian las condiciones de la zona de rompiente,	Pueden generar erosión en las playas vecinas debido a que impiden el paso de sedimentos a lo largo de la costa.
Se pueden construir de diversos tipos de materiales (piedras, pilotes, tabla estacas, gaviones, etc.)	No existe un diseño óptimo que pueda regir el tamaño, longitud, forma o tipo de espigón.
Los espigones permiten ajustar sus dimensiones después de ser construidos, mejorando su eficiencia contra los efectos generados	

4. Zona de estudio

4.1. Localización

Sisal es un pueblo localizado en el litoral Noroeste del estado de Yucatán, ubicado en las coordenadas Latitud $21^{\circ}09'55''$ Norte, Longitud $90^{\circ}01'50''$ Oeste (Figura 5). La comunidad se encuentra en el municipio de Hunucmá, en donde se encuentra el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) de la UNAM.

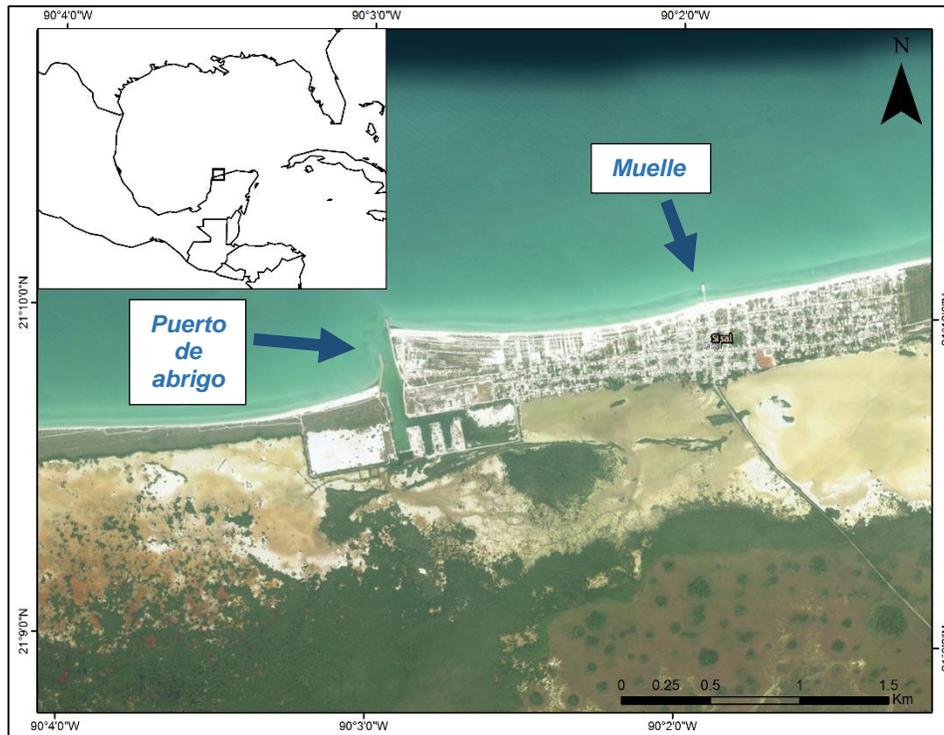


Figura 5. Ubicación del área de estudio.

La playa de Sisal se encuentra en una isla de barrera entre el puerto de abrigo que representa una desembocadura del sistema lagunar estuarino y un muelle de Sisal. En la zona se existe la presencia de ojos de agua.

4.2. Delimitación del área de experimento

El área donde se realizaron los experimentos se encuentra en una sección de playa localizada 360 m al este del puerto de Abrigo de Sisal (cuadro rojo en figura 6). La zona experimental comprende 150 m de línea de costa en las coordenadas las siguientes coordenadas: UTM X(806740.8), UTM Y(2343334.4) a UTM X(806886.8), UTM Y(2343329.4).



Figura 6. Ubicación de la Zona de los Experimentos, marcada con el recuadro en rojo.

Esta playa es ideal para el estudio de procesos costeros bajo condiciones extremas y medias en la región debido a la conservación de la playa y duna costera. El sitio seleccionado se encuentra apartado del muelle y la escollera del puerto de Abrigo. Por lo tanto, el efecto sombra que genera efectos en la morfodinámica no tiene un efecto significativo durante el periodo de estudio. Adicionalmente, su cercanía al LIPC facilita la logística para la ejecución de campañas de campo.

4.3. Clima marítimo

Sisal presenta velocidades de viento que llegan a ser hasta 50% más fuertes que las registradas a 50 km al sureste debido a su ubicación en la península, teniendo como vientos predominantes los alisios, que se presentan de noreste y sureste. Asimismo, presenta vientos asociados a las brisas marinas y terrestres, del NE y SE, respectivamente (Figura 7). Por otro lado, en la península se presentan eventos en invierno conocidos como frentes fríos o Nortes que se caracterizan por vientos intensos del Norte y Noroeste, lluvias, y el descenso de la temperatura (Figuroa-Espinoza et al, 2014; Lira-Pantoja et al, 2012). Durante eventos de brisas marinas se presentan velocidades mayores a los 10 m/s provenientes del NE, mientras que los eventos de Nortes se presentan velocidades de 15 m/s del NNW (Torres-Freyermuth et al., 2017)

La zona de estudio se caracteriza por oleaje de baja energía a 10 km de la costa debido a que la plataforma continental es muy ancha y somera. Durante eventos de brisas marinas la circulación costera es hacia el oeste y es controlada por la marea, el viento y las olas.

Por otro lado, durante eventos de Nortes la circulación dominante es hacia el oeste y hacia afuera de la zona de surf principalmente (Torres-Freyermuth et al., 2017). Las corrientes marinas predominantes en la zona de Sisal tienen dirección al Oeste, paralelas a la costa presentando velocidades promedio de 0.25 m/s y como máximas 1m/s (Sisal, Generales, & Puerto, 2006). De acuerdo a su orientación, la playa de Sisal se considera estable ya que no presenta gradientes de transporte de sedimentos, encontrándose entre la zona de transición de Chelem (erosión) a Celestun (depósito) (Appendini, Salles, Tonatiuh Mendoza, López, & Torres-Freyermuth, 2012).

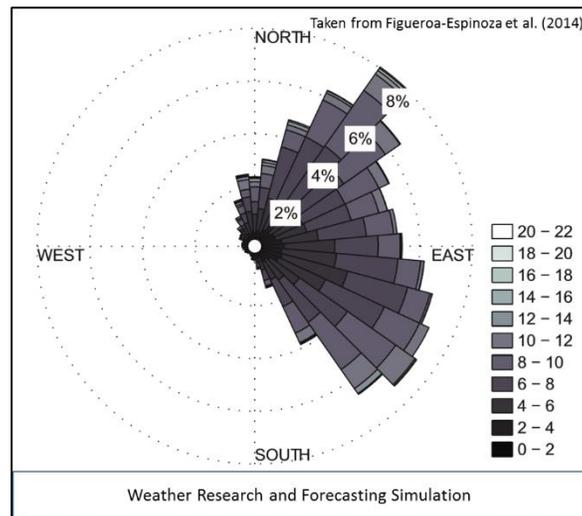


Figura 7. Rosa de Vientos(WRFS) tomada de Figueroa-Espinoza et al. (2014).

4.4. Características del sedimento

El sedimento de la playa de Sisal está compuesto principalmente de material calcáreo de origen biológico, el cual está conformado de fragmentos de concha y coral en su mayoría. Roca Barcelo, (2016) analizó de forma detallada la zona de experimentación ubicada frente al LIPC, tomando muestras procedentes de tres diferentes zonas a lo largo del perfil de playa, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla. 3 Valores de densidad aparente (ρ'), densidad de las partículas (ρ_s) y porosidad (n) a lo largo del perfil de playa tomados de Roca Barcelo (2016).

	M.O. [%]	ρ' [Kg/m ³]	ρ_s [Kg/m ³]	n [%]
Playa Seca	0.67	1444.75	2352.76	38.87
Zona Swash	3.46	1604.87	2380.21	33.54
Zona Rompientes	1.92	1230.51	2242.22	45.68

En la tabla 3 se puede observar un bajo contenido de materia orgánica en las tres zonas analizadas, de igual forma se observa que la porosidad, en las 3 muestras cuentan con valores entre el 33 y 46 %.

Los valores de diámetro medio (d_{50}) varía en las 3 zonas mencionadas anteriormente, que van de 0.16 mm a 1.21 mm, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 4 Valores del tamaño medio de grano (d_{50}) estimados por Roca Barcelo (2016) a partir del método de cribado y mediante el CamSizer.

	Playa Seca	Zona Swash	Zona Rompientes
d_{50} Cribado [mm]	0.37	0.54	0.16
d_{50} CamSizer [mm]	0.40	1.21	0.16

5. Métodos

En el presente capítulo se describe los instrumentos y metodologías empleadas en este trabajo, así como el diseño y construcción de la estructura temporal. De igual manera se explica el procesamiento de los datos obtenidos durante las campañas para su análisis.

5.1. Mediciones de campo

Para las mediciones topo-batimétricas se utilizó un Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GPS) diferencial en su modo de corrección en tiempo real (RTK). El sistema cuenta con una base y un dispositivo móvil "rover" (figura 8a) para la medición de posición y elevación con precisión milimétrica. La base, con coordenadas conocidas, se encuentra en la parte superior del edificio del LIPC (figura 10). La antena de radio también está instalada en una torre de 10 m localizada en el edificio para enviar correcciones en tiempo real. Por otro lado, se definió un punto de control encima de una placa de acero colocada de manera temporal frente a la zona del experimento, la cual se utilizó para determinar la altura de la antena previo y posterior a cada levantamiento.

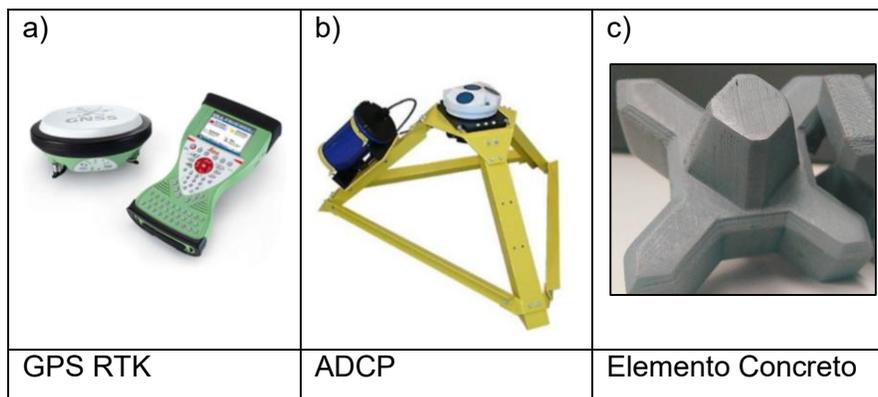


Figura 8. Equipo e instrumentos utilizados (a, b) para evaluar y (c) construir los espigones permeables.

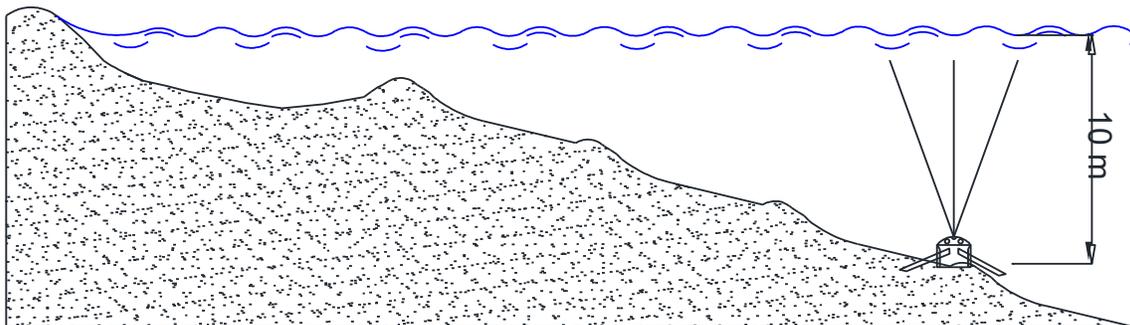


Figura 9. Representación de la ubicación del ADCP en el lecho marino.

Para las mediciones de oleaje y corriente costa afuera se utilizó un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) (figura 8b y figura 9). Este aparato permite obtener perfiles de corriente, así como mediciones de altura de ola, periodo pico, y su dirección. El funcionamiento del equipo se basa en el efecto que generan las ondas de sonido al dispersarse a lo cual se le conoce como efecto Doppler. Para este trabajo se utilizaron los datos obtenidos a 10 m de profundidad en el periodo de medición que comprende del 02 de Mayo al 27 de Junio de 2017. Por otro lado, un mareógrafo perteneciente al Sistema Mareográfico Nacional, ubicado en el puerto de Sisal, registró mediciones del nivel del mar cada minuto. La ubicación de los instrumentos se muestra en la figura 10.



Figura 10. Ubicación de los equipos utilizados para medir las condiciones mareográficas y puntos de referencias usados durante los levantamientos topográficos.

5.1.1. Diseño y construcción del espigón permeable

Para la construcción de cada espigón permeable se utilizaron 72 elementos de concreto en forma de hexápodos. Cada elemento tiene un peso de 65 kg y dimensiones de 0.60 m x 0.60 m x 0.60 m. Estos elementos están patentados por la empresa Bari (www.bari.com.mx). Los elementos fueron trasladados a la zona de estudio por medio de vehículos 4x4. Se requirió de la ayuda de 10 personas para la descarga y colocación de los elementos en la cara de la playa para la construcción de la estructura de acuerdo al trabajo de Hoffman (2016).

Para la construcción de la estructura se siguieron los siguientes pasos:

- Se señaló el inicio y el fin de la estructura utilizando el GPS, con el fin de tener las referencias principales para mantener la estructura perpendicular a la playa.
- Se procedió a colocar los elementos, comenzando por la parte seca de la playa hasta llegar al agua. La estructura tuvo una longitud aproximada de 15 m, teniendo 5 m aproximadamente dentro del agua y el resto en la zona intermareal y playa seca.
- Los elementos fueron colocados de tal forma que se acoplaran unos con otros en forma de cadena (ver figura 11), siendo un arreglo para el inicio de la estructura en la parte emergida e intermareal de la playa (figura 11a) y una colocación distinta en la zona que se encuentra dentro del agua. Esta configuración está basada en el trabajo realizado por Hofman (2016).

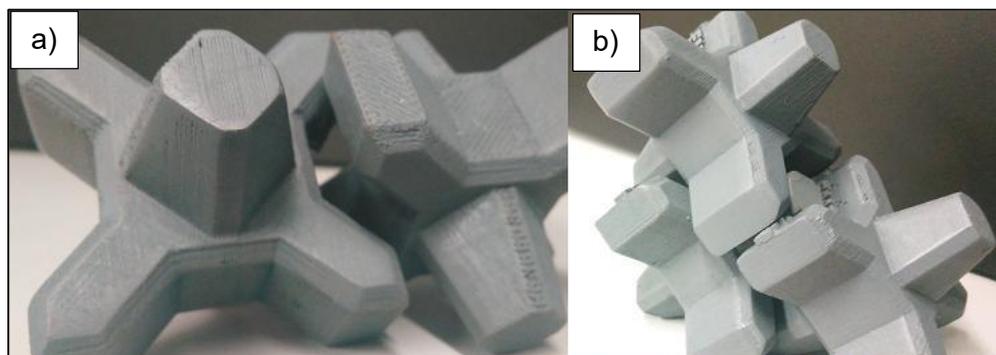


Figura 11. Hexápodos de concreto y su colocación: a)ensamble de elementos para construir la estructura permeable; b)forma de la parte del morro o parte final de la estructura, tomado de Hofman, (2016).

- Al llegar al final en la parte del agua se construyó el morro de la estructura para brindar mayor estabilidad el cual consistió de dos capas de elementos en la parte final como se muestra en la figura 11b.

El tiempo aproximado de construcción del espigón permeable siguiendo los pasos descritos fue de 3.5 horas. Este tiempo puede incrementar o disminuir en función de la cantidad de camionetas y personal de apoyo para mover los elementos de concreto.

5.1.2. Levantamientos topo-batimétricos

Para el análisis del impacto de las estructuras permeables en la morfología de la playa se realizaron levantamientos de perfiles de playa de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se coloca la radio que está conectada a la estación de referencia ubicada en la azotea del edificio del LIPC para activar el modo RTK del GPS.
- Se coloca el “rover” en un bastón que se adapta fácilmente a una mochila, la cual es cargada en la espalda para mantener las manos libres y así poder manipular la controladora del GPS que define los transectos de muestreo.
- Antes de iniciar el levantamiento se realiza una medición sobre el punto de control de coordenadas conocidas para determinar la altura del “rover” con respecto al nivel de terreno durante el postproceso.
- Los transectos fueron definidos previamente y trazados en autocad. El archivo *.dxf* con la ubicación de los transectos se introdujo en la controladora del GPS.
- En cada transecto se realizó un recorrido en dirección mar adentro, de la duna a la playa sumergida, utilizando una frecuencia de muestreo de 1 Hz para capturar los cambios de la morfología correctamente (figura 12).
- Se repite el procedimiento para cada uno de los transectos (figura 13 y 14).

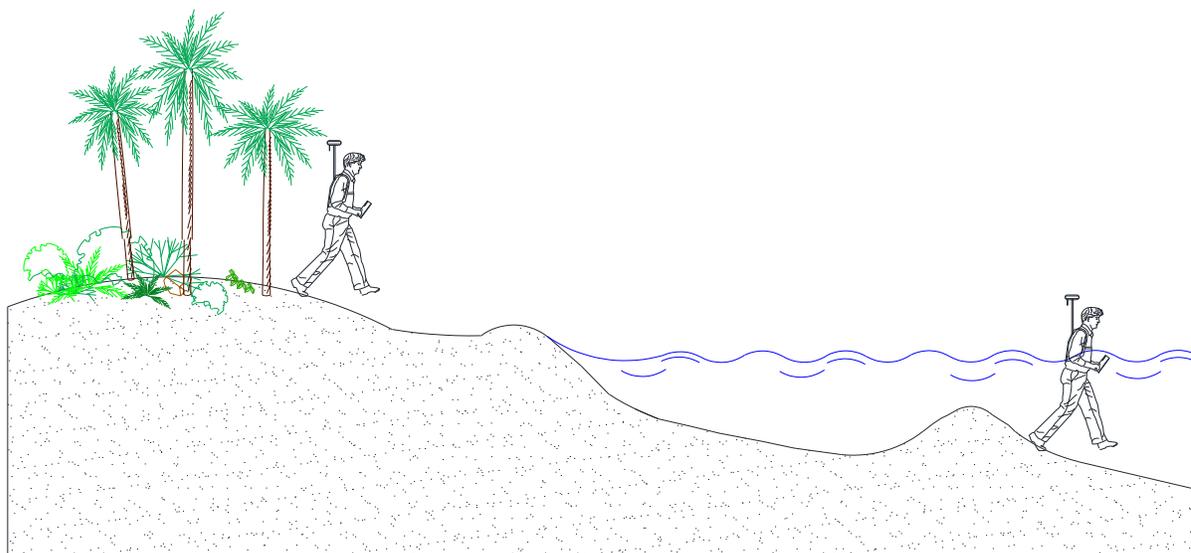


Figura 12. Representación de levantamientos de perfiles de playa.

- El final de cada recorrido mar adentro estuvo en función del clima marítimo y el nivel del mar durante el levantamiento. Se toma en cuenta que el nivel del agua

no debe de exceder 1.50 m para no poner en riesgo el equipo. En la mayoría de los casos esto permitió el levantamiento de la primera barra de arena.

- Al finalizar el levantamiento de todos los transectos se realizó una medición final sobre el punto de control para determinar si existieron variaciones significantes en la altura de la antena previa y posterior al levantamiento.
- Para el postproceso se descargaron los datos utilizando el software LeicaGeoOffice® con el cual se calcula la altura ortométrica, la cual se ajustará con los valores del punto de referencia tomados al inicio y al final de cada campaña, considerando la media de las dos mediciones.

5.2. Diseño de los experimentos

Se diseñaron los experimentos con el fin de alcanzar los objetivos planteados (tabla 5).

Las variables más importantes a tomar en cuenta durante los experimentos fueron el clima marino, y el número de estructuras utilizadas. En este trabajo se evaluó la estabilidad de la estructura durante un evento extremo y su funcionalidad a mediano plazo.

Tabla 5. Consideraciones de los experimentos.

Consideraciones	Experimento 1	Experimento 2
	Estabilidad	Funcionalidad
Duración	43 días	17 días
Campañas	7	5
Espigones	1	2

A continuación, se describen los experimentos realizados con un sólo espigón y con el campo de espigones.

5.2.1. Experimento 1: Espigón sencillo

Con el fin de monitorear la variabilidad de la morfología debido a la estructura y su estabilidad durante eventos extremos, el 02 de mayo de 2017 se construyó un espigón permeable perpendicular a la línea de costa con 72 elementos de concreto. Para evaluar el impacto del espigón en la morfología de la playa se realizaron 7 levantamientos durante el periodo comprendido del 02 de mayo al 14 de junio de 2017. Para ello, se midieron perfiles de playa a lo largo de los 21 transectos mostrados en la figura 13. Para tener mejor

resolución del cambio generado en la zona cercana a la estructura permeable, se empleó una mayor resolución en la zona aledaña a la estructura (ver tabla 6).

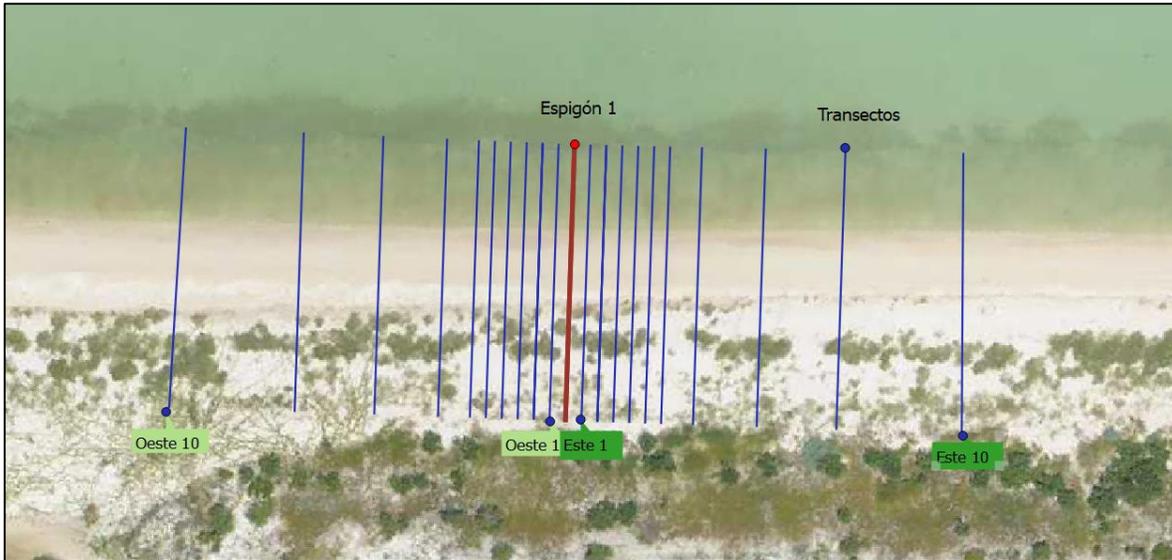


Figura 13. Transectos a realizar en experimento 1, la línea roja indica la ubicación de la estructura.

Tabla 6. Distancias de los transectos para el experimento 1.

Transecto	O 10	O 9	O 8	O 7	O 6-O 1 y E 1-E 6	E 6	E 7	E 8	E 9
	- O 9	- O 8	- O 7	- O 6		- E 7	- E 8	- E 9	- E 10
Separación	15 m	10 m	8 m	4 m	2 m	4 m	8 m	10 m	15 m

Las fechas en las cuales se realizaron los 7 levantamientos del experimento 1 se enlistan en la tabla 7.

Tabla 7. Fechas de los levantamientos realizados para el experimento 1.

Levantamiento	1	2	3	4	5	6	7	8
Fecha	02/Mayo	03/Mayo	05/Mayo	08/Mayo	12/Mayo	16/Mayo	08/Junio	14/Junio

5.2.2. Experimento 2: Campo de espigones

Con el objetivo de evaluar la funcionalidad de un campo de espigones, el 14 de junio de 2017 se construyó un segundo espigón a 30 m al oeste del primer espigón, tomando como criterio una separación de dos veces la longitud del espigón. Se monitoreó el impacto en la playa incrementando el número de transectos al Oeste (tabla 8 y figura 14). Se llevaron a cabo 5 campañas de campo durante el periodo del 14 al 30 de junio de 2017.

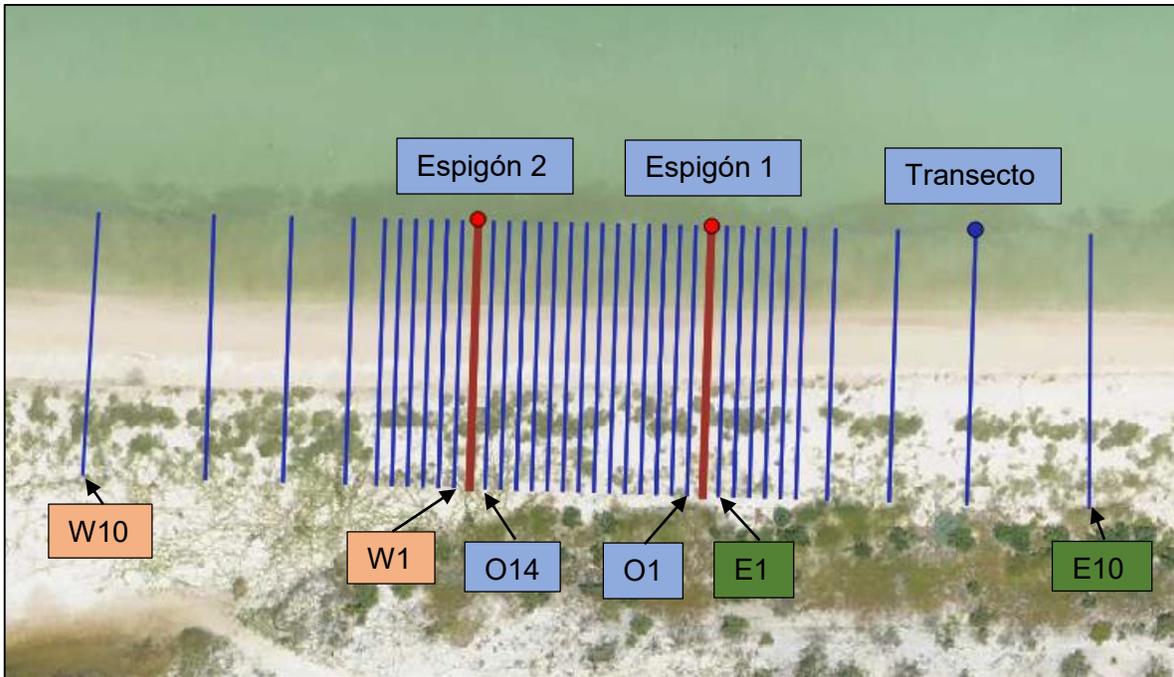


Figura 14. Transectos a realizar en experimento 2, las líneas rojas indican la ubicación de la estructura y las azules los transectos.

Tabla 8. Distancias de los transectos para el experimento 2.

	W 10	W 9	W 8	W 7	W6 – W 1	E 6	E 7	E 8	E 9
Transecto	–	–	–	–	O14 – O1	–	–	–	–
	W 9	W 8	W 7	W 6	E 1 – E 6	E 7	E 8	E 9	E 10
Separación	15 m	10 m	8 m	4 m	2 m	4 m	8 m	10 m	15 m

Las fechas en las que se realizaron los levantamientos para el Experimento 2 se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9. Fechas de los levantamientos realizados para el experimento 2.

Levantamiento	8	9	10	11	12
Fecha	14/Junio/2017	16/Junio/2017	19/Junio/2017	23/Junio/2017	27/Junio/2017

Después del lapso de los 17 días, el 30 de junio de 2017 se retiraron las estructuras, para permitir la recuperación natural de la playa.

5.3. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento de la información consistió en separar los datos obtenidos durante las campañas, los cuales fueron los levantamientos topo-batimétricos con el GPS, altura y dirección en aguas profundas con el ADCP y nivel del mar de la estación Mareográfica.

5.3.1. Mareas y oleaje

Los datos de mareas obtenidos de la estación mareográfica nacional, se importaron al MATLAB, programa con el cual se generaron series de tiempo durante el periodo de los experimentos. Las series de tiempo de mareas se dividieron en dos secciones Experimento 1 y Experimento 2, las cuales son del 02 de mayo al 14 de junio de 2017 y del 14 de junio al 27 de junio de 2017 respectivamente.

Los datos obtenidos del ADCP fueron importados al programa MATLAB para la elaboración de series de tiempo, con la altura de ola y la dirección.

5.3.1. Análisis de los datos topográficos

Para la obtención de la línea de costa de cada campaña, se interpolaron las mediciones realizadas por el GPS a una malla con una resolución en eje X (paralelo a la costa) de 0.2 m y Y (perpendicular a la costa) de 0.3 m, teniendo lo anterior se procede a utilizar un filtro para encontrar los valores más cercanos a cero.

Para el cálculo de volumen de arena se utilizaron los perfiles de playa realizados, los cuales se proyectaron a cada uno de los transectos de referencia mediante la fórmula de proyección de vectores (Ecuación 1). A partir de ellos se calculó volumen en el área emergida de la playa para cada una de las campañas mediante la integral bajo la curva (Ecuación 2).

$$Proy_u^{\vec{v}} = \left(\frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{(|\vec{v}|^2)} \right) \vec{v}$$

Ecuación 1

u = Coordenadas x, y a proyectar.

v = Coordenadas del transecto guía.

$$\iiint S(x, y) dx dy dz = \text{Volumen de sedimentos}$$

Ecuación 2

Para la integración se tomaron los límites hacia mar mínimos en Y de 2343337.6714 m, y en Z se tomaron en las cotas nivel 0 m y -0.50 m.

Para evaluar el impacto de las estructuras en la línea de costa se utilizó el análisis *Even/Odd* (Dean & Dalrymple, 2001; Work & Dean, 1990) el cual determina los efectos de las características naturales por una estructura costera que genera un impacto en el transporte longitudinal de sedimento, utilizando las siguientes formulas:

$$\Delta V_e(x) = \frac{1}{2} [\Delta V_s(x) + \Delta V_s(-x)]$$

Ecuación 3

$$\Delta V_o(x) = \frac{1}{2} [\Delta V_s(x) - \Delta V_s(-x)]$$

Ecuación 4

donde la función $V_e(x)$ es simétrica sobre el eje y la función $V_o(x)$ es antisimétrica, teniendo $x=0$ en la estructura.

Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales (siglas en ingles PCA), el cual describe los datos utilizando el menor número de funciones independientes. La evolución espacio-temporal de las líneas de costa se puede describir por funciones espaciales y temporales independientes por,

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n a_k c_k(t) e_k(x)$$

Ecuación 5

donde $e_k(x)$ es la eigenfunción espacial y $c_k(t)$ es el coeficiente temporal. El número de funciones independientes n . Dichos análisis describen el comportamiento espacial y temporal de la línea de costa, donde el primer modo estará asociado con el efecto debido a la presencia de las estructuras (Dean & Dalrymple, 2001).

El objetivo del análisis es describir los cambios entre los diferentes perfiles de playa con el menor número de funciones, teniendo que la primera función representa la mayor cantidad de varianza de los datos.

Existen estudios previos que han utilizado las funciones propias ortogonales empíricas (siglas en ingles EOF) también conocidas como Componentes Principales, un ejemplo de estos trabajos fue Winant, Inman, & Nordstrom, (1979) quienes realizaron un análisis de los cambios estacionales de los perfiles en las playas de Torrey Pines en California, usando EOF.

6. Resultados

En esta sección se muestran los resultados de los experimentos enfocados a evaluar la estabilidad y funcionalidad de los espigones permeables.

La presentación de los resultados se divide en:

- Condiciones marinas durante el experimento
- Análisis de estabilidad de la estructura en condiciones de tormenta.
- Análisis de funcionalidad de espigón sencillo y doble.

6.1. Condiciones de forzamiento.

Para caracterizar las condiciones de forzamiento para la zona de estudio se obtuvieron mediciones de nivel del mar y oleaje (altura de ola significativa, período, y dirección) a 10 m de profundidad. La figura 15 muestra la variación del nivel del mar y del oleaje durante el periodo de estudio (02 de mayo al 27 de junio de 2017).

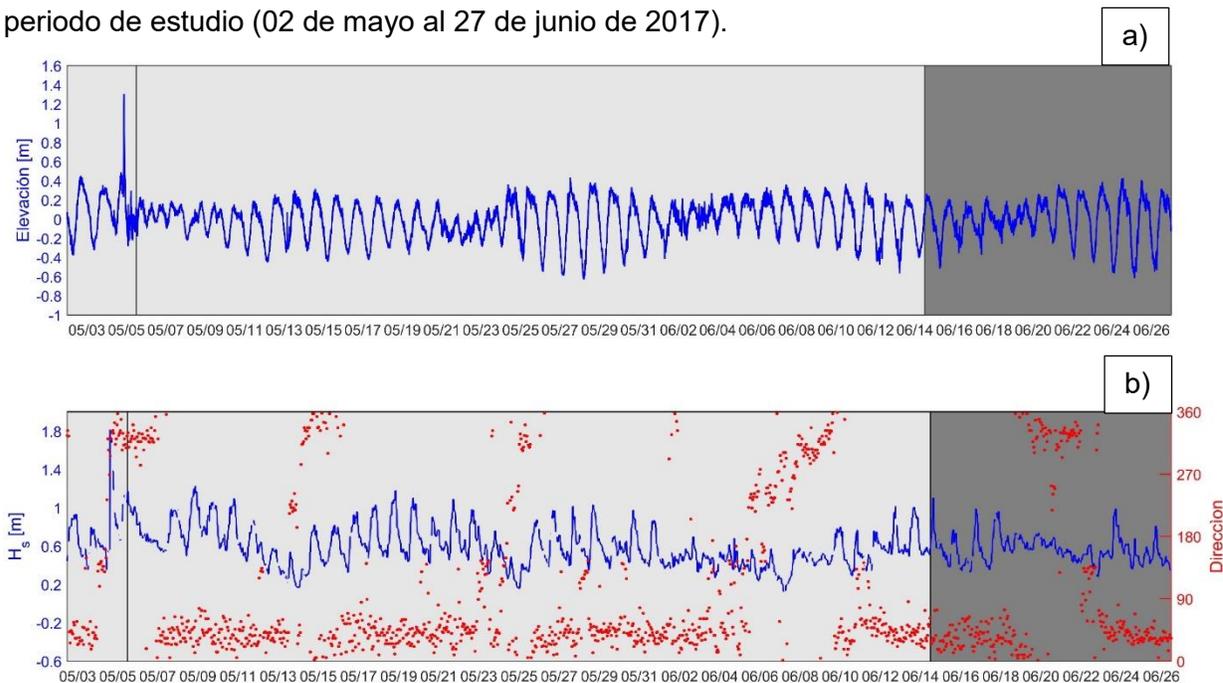


Figura 15. Serie temporal de (a) mareas y (b) altura y dirección de oleaje del 02/Mayo/2017 al 27/Junio/2017 dividido en dos secciones: experimento con espigón simple (fondo gris claro) y campo de espigones (fondo gris oscuro).

Con los datos presentados en la figura 15 se puede apreciar con claridad que durante el estudio se presentaron eventos de nortes, eventos de brisas, y un evento extremo a principios de mayo 2017 conocido localmente como “turbonada” con una altura máxima de 1.81 m. Los Nortes se identifican por la dirección del oleaje del NNW (puntos rojos cercanos

a la dirección de 0° y entre 270° a 360° en la figura 15 b) y alturas típicas entre 0.4 m y 1.1 m. Por otro lado, las brisas se caracterizan por una variación diurna de la altura del oleaje con dirección del NE y alturas máximas de 1.1 m. Los eventos y duración de cada uno de ellos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Periodos de observación y su condición de oleaje asociada.

Periodo	Condición
02 de mayo – 03 de mayo	Nortes
03 de mayo – 04 de mayo	Brisas
04 de mayo	Turbonada
04 de mayo – 07 de mayo	Nortes
07 de mayo – 14 de mayo	Brisas
14 de mayo – 17 de mayo	Nortes
17 de mayo – 23 de mayo	Brisas
23 de mayo – 26 de mayo	Nortes
26 de mayo – 05 de junio	Brisas
05 de junio – 10 de junio	Nortes
10 de junio – 19 de junio	Brisas
19 de junio – 23 de junio	Nortes
23 de junio – 27 de junio	Brisas

Durante el periodo de estudio se observa lo cambiante que resultó el clima marino en la zona de estudio, pudiendo observar que las brisas tienen mayor presencia durante dicho periodo. De igual manera, los Nortes o tormentas asociadas al paso de frentes fríos se presentan con relativa frecuencia (ver figura 15). En las figuras 15a y 15b se puede observar un máximo en la sobre elevación del nivel medio del mar y en la altura de ola significativa el día 04 de Mayo a las 14:00 horas, asociado a una tormenta local. El nivel medio del mar alcanza 1.4 m con respecto al nivel medio, provocando la inundación de la playa y por lo tanto que la estructura queda completamente sumergida. Este tipo de eventos en la zona se le conoce regionalmente como turbonada, la cual es muy común en los primeros días del mes de mayo en la costa norte de Yucatán.

La serie de tiempo del oleaje y dirección presenta 6 eventos de Nortes, los cuales presentaron una altura máxima de ola 1.81 m durante el periodo de estudio seleccionado.

6.2. Estabilidad y funcionalidad durante un evento extremo

Para evaluar la estabilidad y funcionalidad durante un evento extremo se consideró la turbonada presentada el 04 de mayo de 2017. Una turbonada es un aumento repentino y fuerte de la velocidad del viento durante un intervalo breve de tiempo, este fenómeno aumenta genera acumulación de oleaje y aumento de nivel medio del mar. Este evento registró la altura de ola y el incremento del nivel medio del mar máximos observados en el periodo de estudio. A continuación, se presentan los resultados del análisis de los

levantamientos topobatimétricos obtenidos del 02 al 05 de mayo. Es importante mencionar que a pesar de las condiciones altamente energéticas la estructura no presentó fallos y mantuvo la unión entre los elementos.

6.2.1. Evolución de las curvas de nivel

Durante el evento del 04 de mayo la estructura conservó su funcionalidad a pesar de las condiciones de oleaje y nivel del mar extremos. Las curvas de nivel, elaboradas a partir de las mediciones de campo, muestran la evolución de la morfología y las diferencias en elevación entre las campañas pre- y post- tormenta (ver Figura 16, colores fríos representan erosión, y colores cálidos acreción).

De igual manera se muestran las comparaciones de las curvas de nivel, las cuales son la diferencia de las elevaciones obtenidas en cada levantamiento, con el inmediato anterior.

La figura 16a muestra las curvas de nivel iniciales, con las cuales se comienza el periodo de experimentación, y la posición del primer espigón el cual fue construido el 02 de mayo de 2017. Para poder explicar el cambio que se observa en cada una de las imágenes presentadas a continuación se denomina Zona A, a la sección aguas arriba (*updrift*) del espigón ubicada al este de la estructura y Zona B a la sección aguas abajo (*downdrift*) que se encuentra al oeste del espigón.

Como se observa en la figura 16b se genera acumulación/erosión en la zona A/B entre el 2 y el 3 de mayo debido al oleaje asociado a las brisas el cual genera transporte de sedimento de Este a Oeste. Dicha modificación se observa claramente en la figura 16c.

La tormenta (*turbonada*) registrada el 04 de Mayo de 2017 generó un cambio en el patrón de erosión/acreción (figura 16d) debido al oleaje extremo proveniente del noroeste. Esto ocasionó acreción en la Zona B y erosión en la Zona A (figura 16e). La tormenta ocasionó un aumento de la elevación de la playa de 0.27 m en la zona B cercana al espigón y una erosión frente a la duna. Durante el oleaje y sobrelevación de tormenta los elementos que conforman la estructura no presentaron un desplazamiento significativo, manteniendo su ubicación.

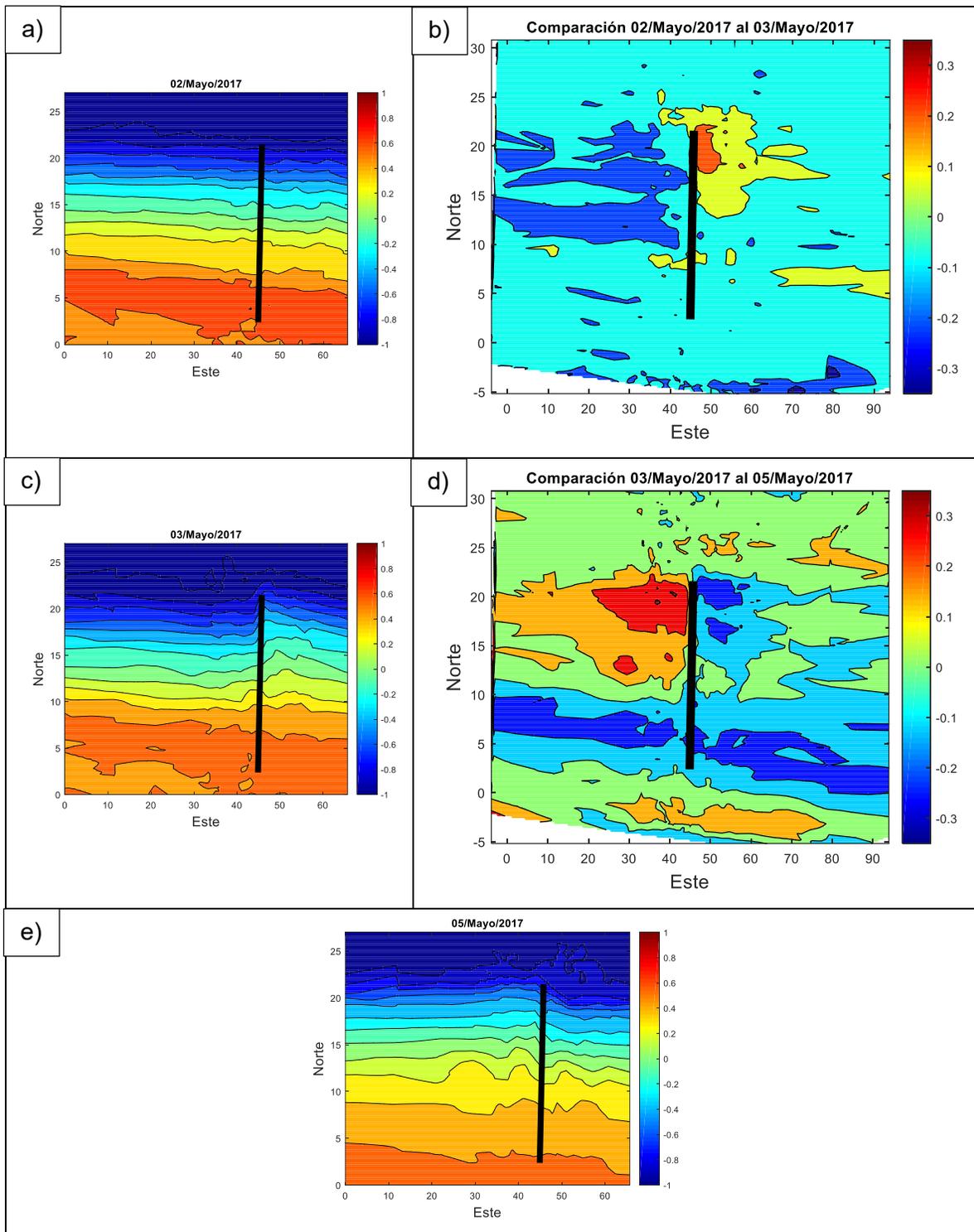


Figura 16. Curvas de nivel [m] a) 02/Mayo/2017; b) Comparación 02/Mayo/2017 con 03/Mayo/2017; c) 03/Mayo/2017; d) Comparación 03/Mayo/2017 con 05/Mayo/2017; e) 05/Mayo/2017.

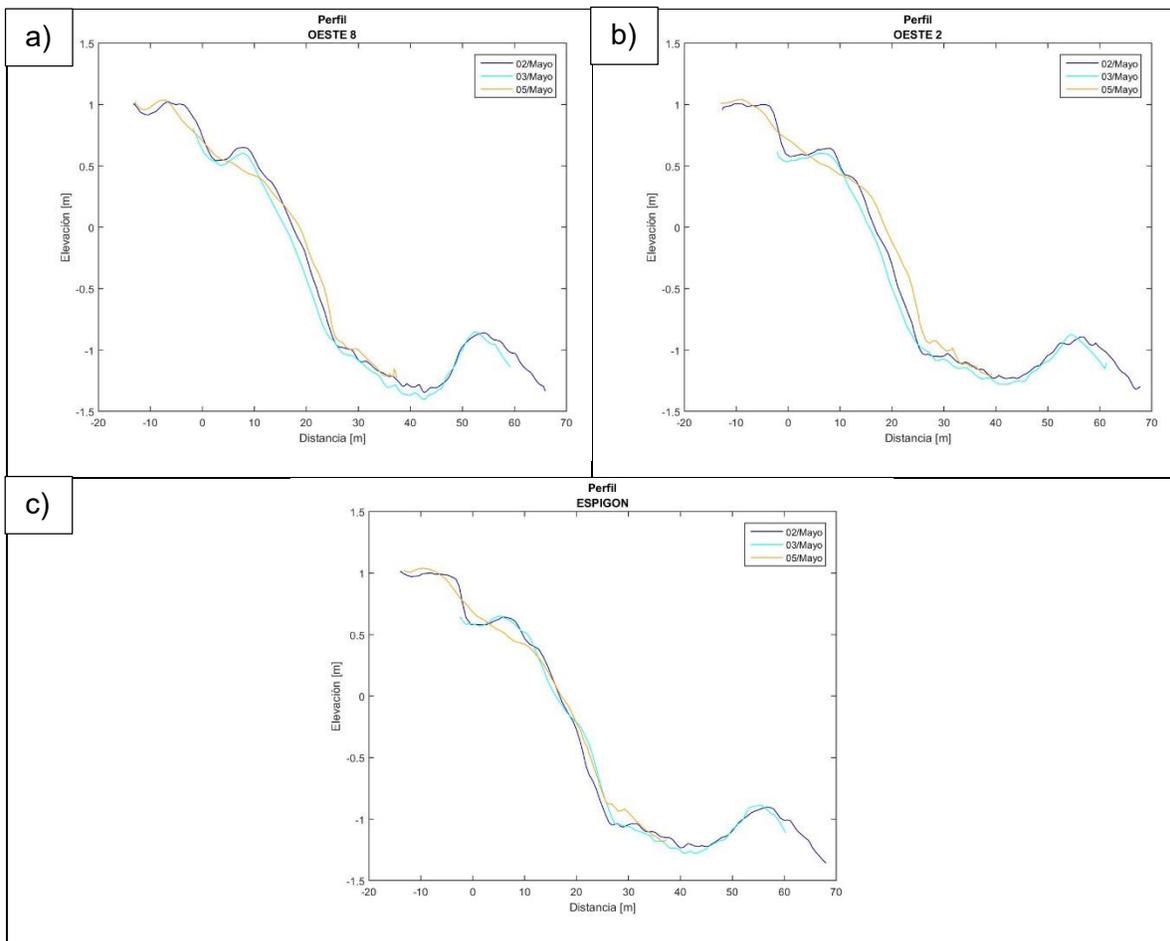
6.2.2. Perfiles de playa y línea de costa

A continuación, se presentan los perfiles O8, O2, E2, E8 y el del espigón, los cuales son perfiles representativos de las mediciones realizadas el 02 de mayo, 03 de mayo y 05 de mayo.

En la figura 17 se puede observar que en todos los perfiles la duna y la berma de arena se erosionan durante la Turbonada (tormenta del 04 de mayo), aplanando la sección emergida de la playa.

En las figuras 17a y 17b, las cuales corresponden a los perfiles O8 y O2 respectivamente, se puede ver claramente un retroceso de la línea de costa del 03 de mayo, con respecto a la medición anterior realizada el 02 de mayo, considerando que la línea de costa se encuentra en la elevación 0m. De igual manera se observa el avance en estos perfiles para la fecha del 05 de mayo de 2017.

Comparando los perfiles *updrift*, E8 y E2, se puede apreciar de igual forma el cambio generado en la duna y berma debido a la fuerte tormenta, en la cual el nivel medio del mar aumentó sobrepasando la estructura y la duna.



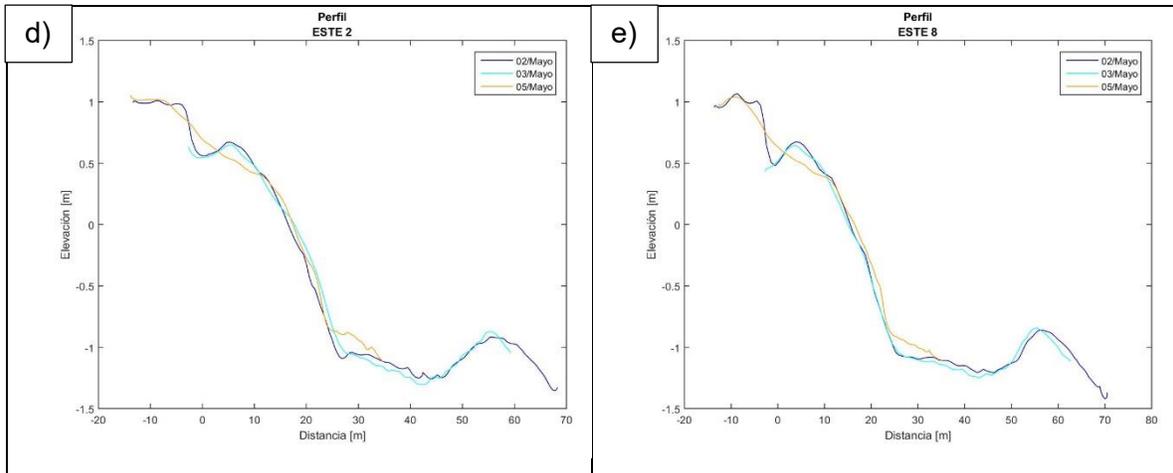


Figura 17. Perfiles del 02-05 de mayo de 2017, donde se observa la erosión de la duna de arena y la acreción en la parte sumergida del perfil tras la turbonada: a) Oeste 8(O8); b) Oeste 2(O2); c) Espigón; d) Este 2 (E2); e) Este 8(E8).

Con respecto al avance o retroceso de la línea de costa en la zona A se puede observar en el perfil E2 que el avance que se tiene es mínimo aun después de la tormenta, del 04 de mayo, pero en el perfil E8 se puede observar de igual forma un leve avance en la línea de costa. Los perfiles medidos el 02 y 03 de mayo tienden a ser iguales a excepción de lo ocurrido en el perfil E2 en el cual el perfil medido el 03 de mayo presenta un pequeño avance con respecto al medio el 02 de mayo.

Para observar el cambio en la morfología de la línea de costa se presentan en la figura 18 las comparaciones de las cotas de nivel 0, las cuales representan la línea de costa para los levantamientos realizados el 02 de mayo, 03 de mayo y el 05 de mayo.

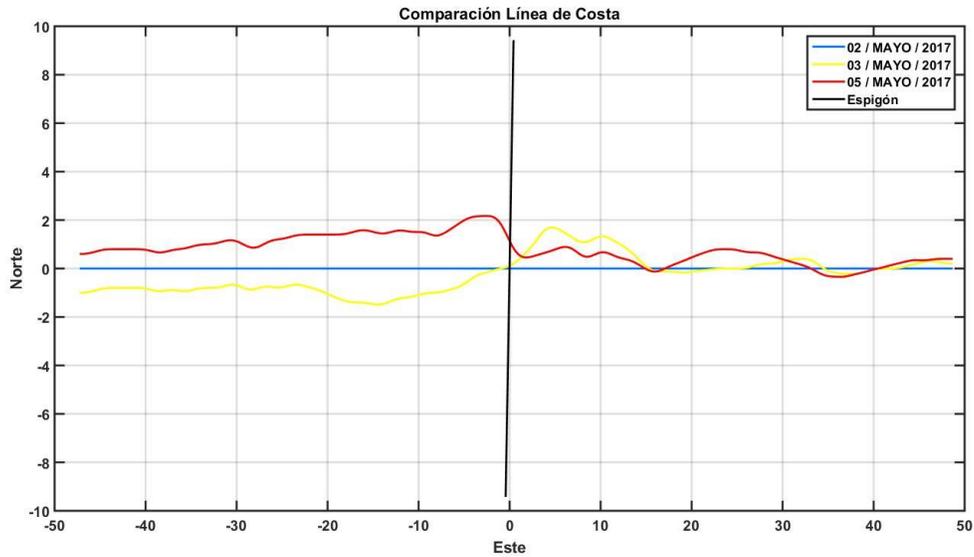
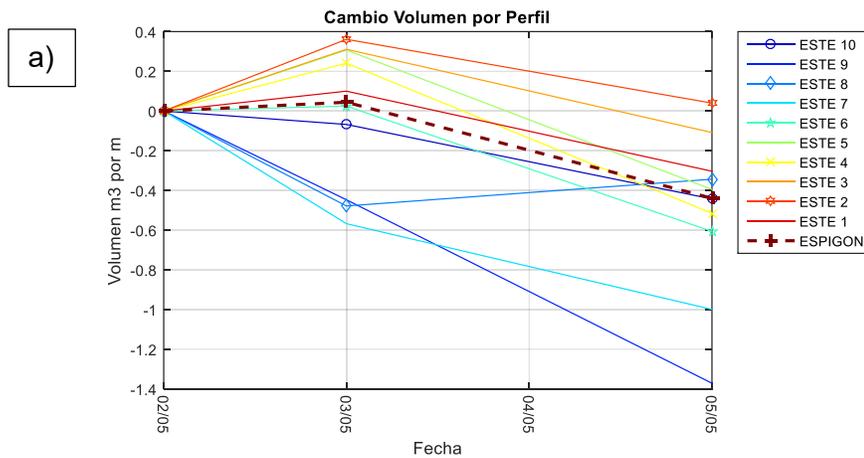


Figura 18. Evolución de la línea de costa (cota nivel 0m) del 02 de mayo al 05 de mayo, respecto a la línea de costa del 02 de mayo, tomando de la malla.

La figura 18 nos muestra un avance neto en la línea de costa posterior a la tormenta en la cual alcanza valores máximos de 2 m en el lado Oeste.

6.2.3. Cambio en el volumen de sedimento en la tormenta

Los resultados presentados a continuación están divididos por las zonas al Este y al Oeste del espigón, en las cuales se puede apreciar el cambio del volumen que se genera en cada uno de los perfiles medidos durante el 03 y el 05 de mayo con respecto a la medición tomada el día 02 de mayo. Se considera que el volumen con base de nivel de cota a 0 m representa la parte emergida.



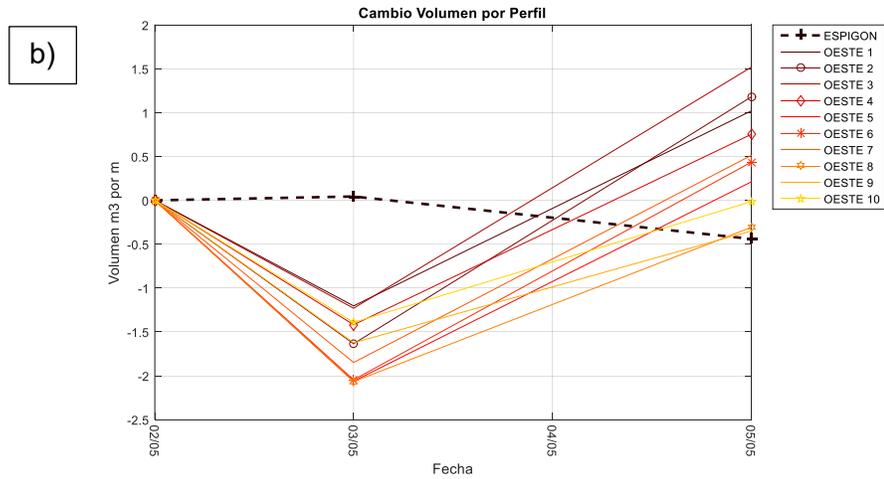


Figura 19. Comparación de volumen emergido del 02 de mayo al 05 de mayo, tomando como volumen inicial el 02 de mayo de 2017, a) lado Este del espigón; b) lado Oeste del espigón.

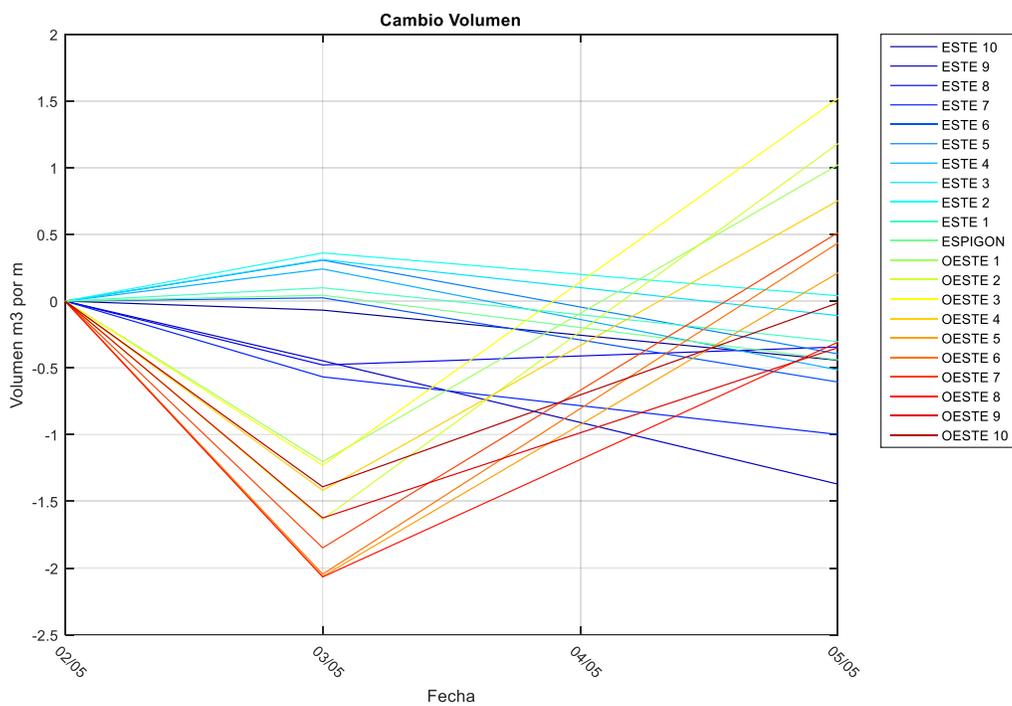


Figura 20. Comparación del volumen emergido del 02 de mayo al 05 de mayo, en la cual se observa el impacto generado por la turbonada como un cambio en la zona de acreción/erosión.

La figura 19b nos muestra el cambio en el volumen del lado Oeste del espigón para cada uno de sus perfiles, en el cual se observa la pérdida de volumen en todos y cada uno de

estos para la fecha del 03 de mayo y su recuperación posterior a la turbonada, como se observa en los casos de los perfiles más cercanos al espigón. Por otra parte, analizando la figura 19a la cual corresponde al lado Este del espigón, se puede observar un cambio inverso en algunas zonas, como sucede en los perfiles cercanos Este 1, Este2, Este3, los cuales tienen un incremento en el volumen para la primera fecha del 03 de mayo, y para esa misma fecha en los perfiles Este7, Este8, Este9 y Este 10 se observa un decremento. Los decrementos en la sección Este del espigón debido a la tormenta se observan con claridad en los perfiles alejados al espigón, los cuales fueron directamente afectados por el cambio de dirección del oleaje.

La figura 20 representa el comportamiento completo en ambos sentidos de la estructura, debido a los efectos generados debido a la turbonada presentada el 4 de mayo de 2017, teniendo un oleaje extremo proveniente del NNO y un aumento del nivel medio del mar, ocasionando el cambio de dirección del transporte de sedimentos de Oeste a Este, generando el cambio de las tendencias de erosión/acreción mostradas en las fechas iniciales.

6.2.4. Estabilidad de la estructura

Para evaluar la estabilidad se determinó el grado de afectación que sufrió la estructura debido a la tormenta del 04 de mayo de 2017. La tormenta ocasionó una sobreelevación de 1.4 m del nivel medio del mar ocasionando el rebase de la estructura y oleaje extremo.

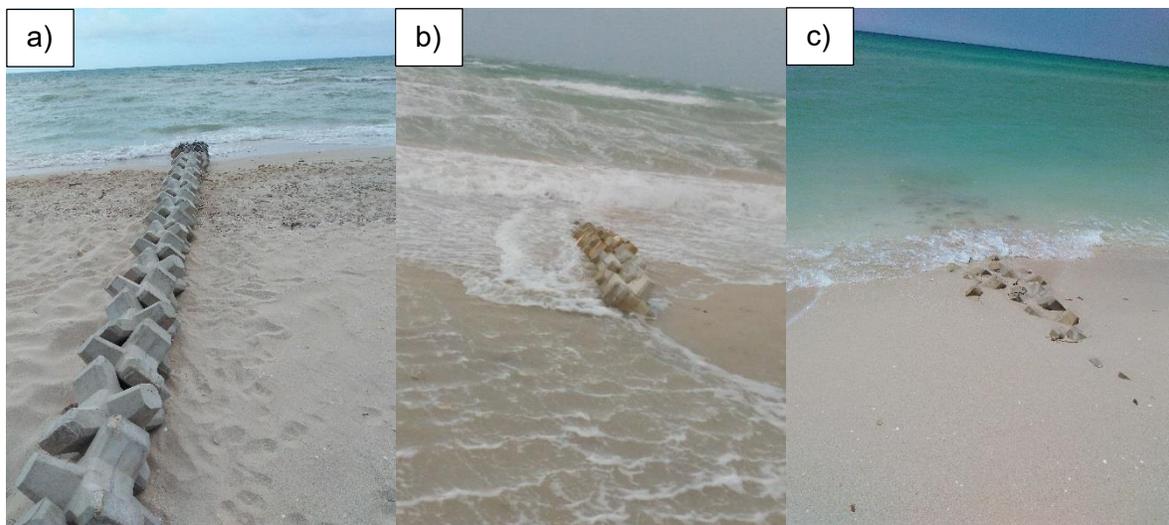


Figura 21. Espigón permeable a) fotografía antes de la tormenta; b) fotografía durante la tormenta 04 de mayo; c) fotografía después de la tormenta del 04 de mayo.

La figura 21 muestra la estructura previa, durante y posterior a la tormenta. Durante la tormenta la estructura fue completamente rebasada (figura 21b). Posterior a la tormenta la estructura presentó saturación (figura 21c). Resultado del análisis la estructura no presentó desplazamiento, permaneciendo en la misma posición y sin presentar fallas o desperfectos en sus elementos. Por lo tanto, continuó funcionando durante el resto de la campaña.

6.3. Funcionalidad en el mediano plazo

Con el fin de determinar el impacto ocasionado por los espigones permeables en la morfología de la playa durante condiciones de oleaje predominante en la zona (brisas y los frentes fríos o Nortes) se analizó: (i) la evolución de curvas de nivel, (ii) los cambios en los perfiles de playa y la línea de costa, y (iii) el cambio de volumen generado por las estructuras en el mediano plazo. Los resultados se presentan para los dos experimentos que consistieron en: (1) espigón sencillo y (2) dos espigones.

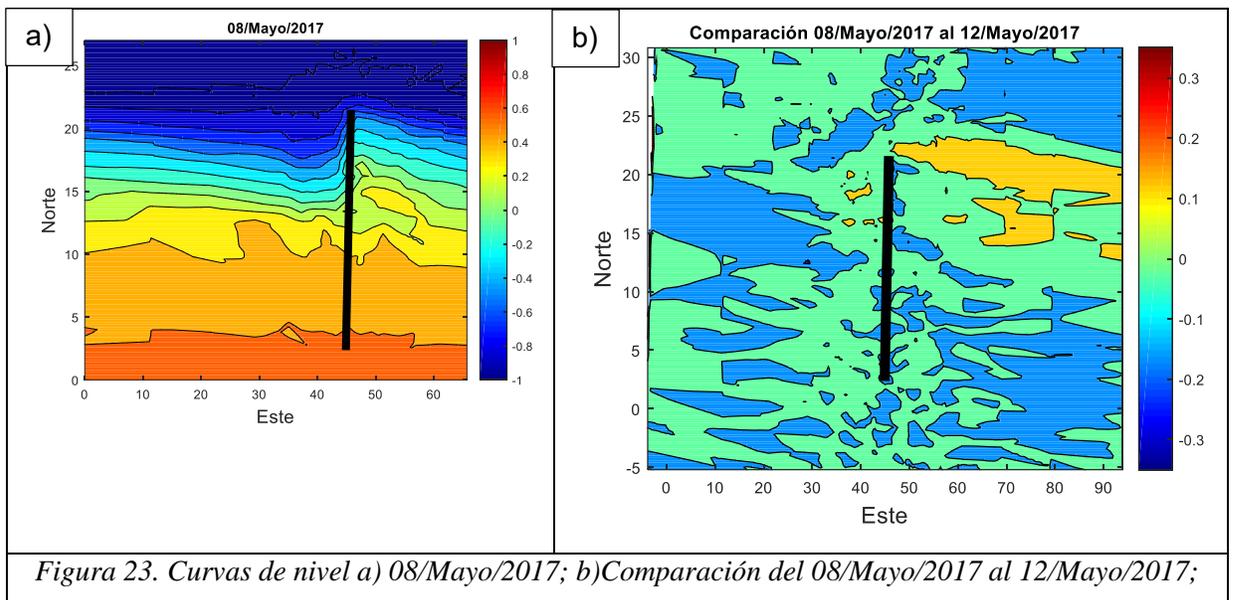
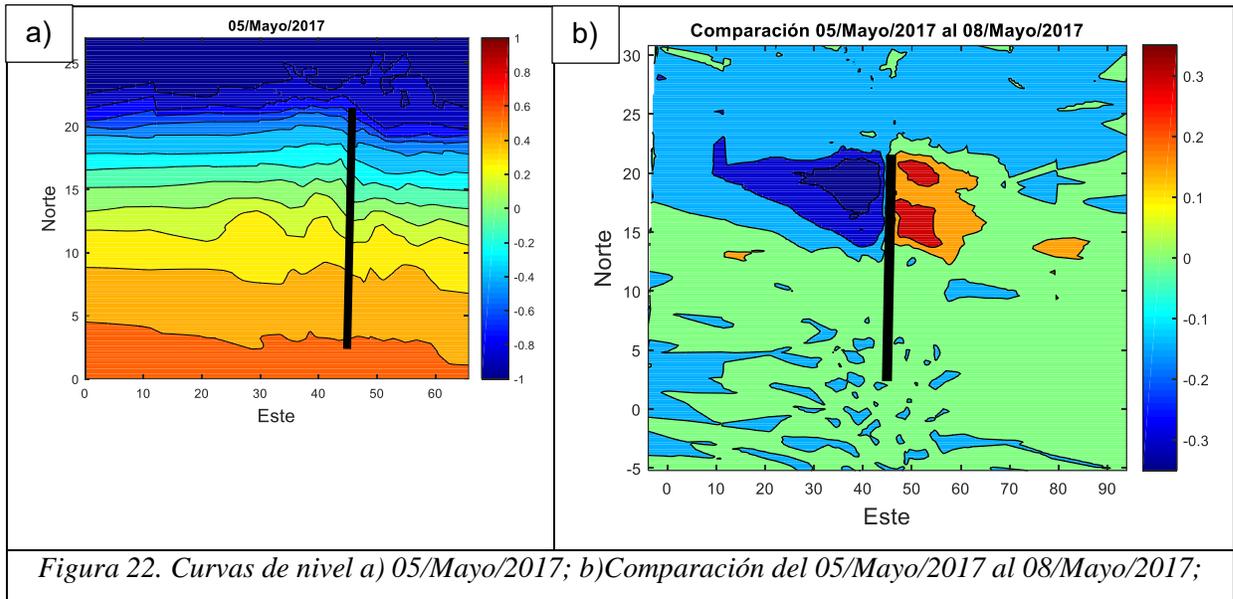
6.3.1. Experimento 1: Espigón sencillo

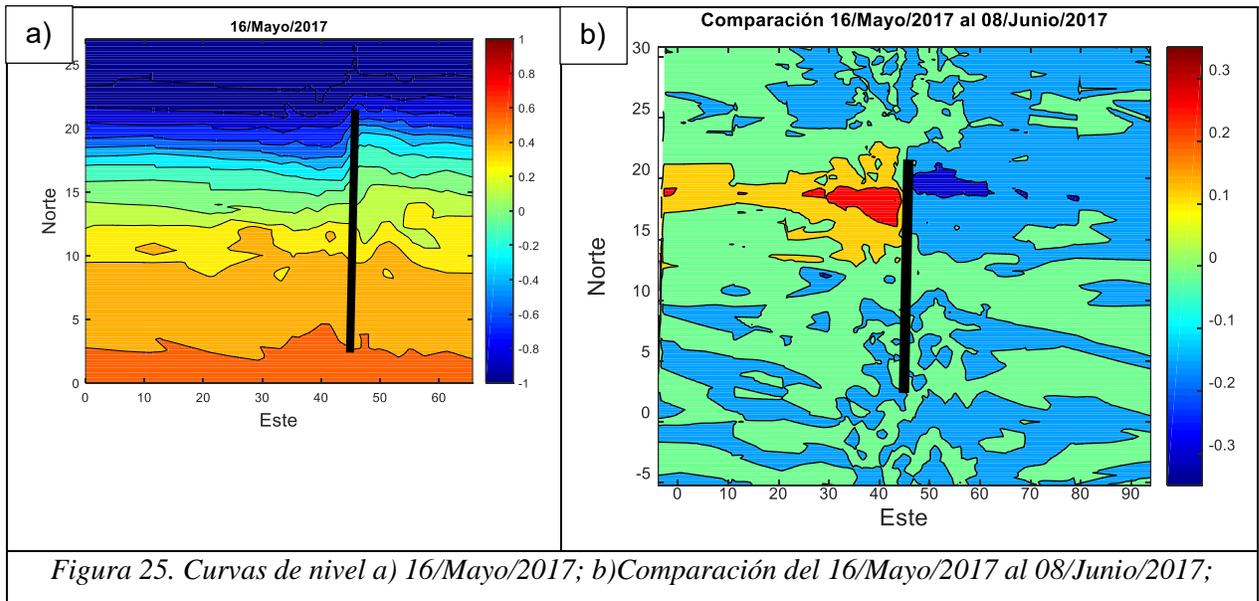
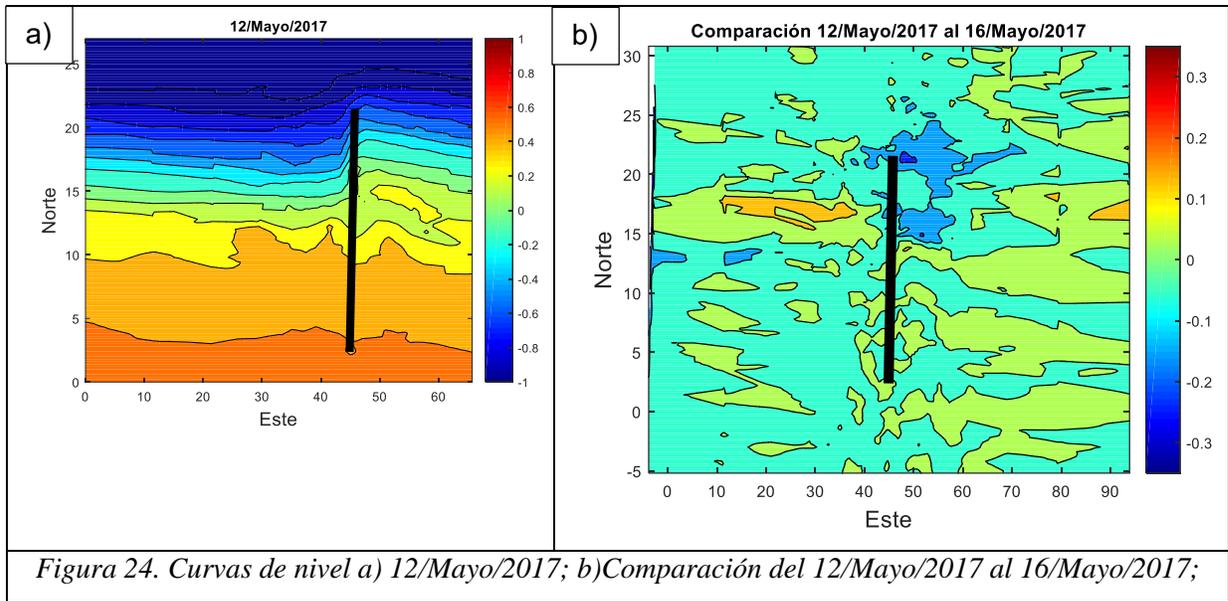
Como parte del estudio del impacto generado en la morfología debido al espigón permeable instalado el 02 de mayo de 2017, se tienen los siguientes resultados, los cuales se analizan posterior a la tormenta del 04 de mayo, tomando como referencia el levantamiento del 05 de mayo, a partir del cual comparamos la evolución de la morfología.

6.3.1.1. Evolución de las curvas de nivel

El oleaje predominante del noreste con una altura significativa de 0.5 m (Figura 15), la cual genera una corriente que transporta el sedimento de Este a Oeste, es responsable de la acreción en la Zona A y erosión en la Zona B registrada entre el 05 y el 08 de mayo.

La evolución se comienza a considerar estable, cuando la acumulación de sedimento debido a la estructura no presenta grandes variaciones, como se observa para el 12 y 16 de mayo, teniendo progreso considerable en las zonas cercanas de la estructura generando un claro efecto del espigón y siendo constante durante estos últimos. Para el periodo del 16 de mayo al 8 de junio se presentaron Nortes con dirección del Noroeste, el cual satura la zona B alcanzando un equilibrio en ambas zonas (Figura 25). Del 08 de junio al 14 de junio se presenta un periodo de transición de norte a brisa, el cual generó un ligero cambio final en la morfología cercana al espigón. La última medición del experimento con un espigón fue el día 14 de junio (figura 27), mismo que da inicio el segundo experimento.





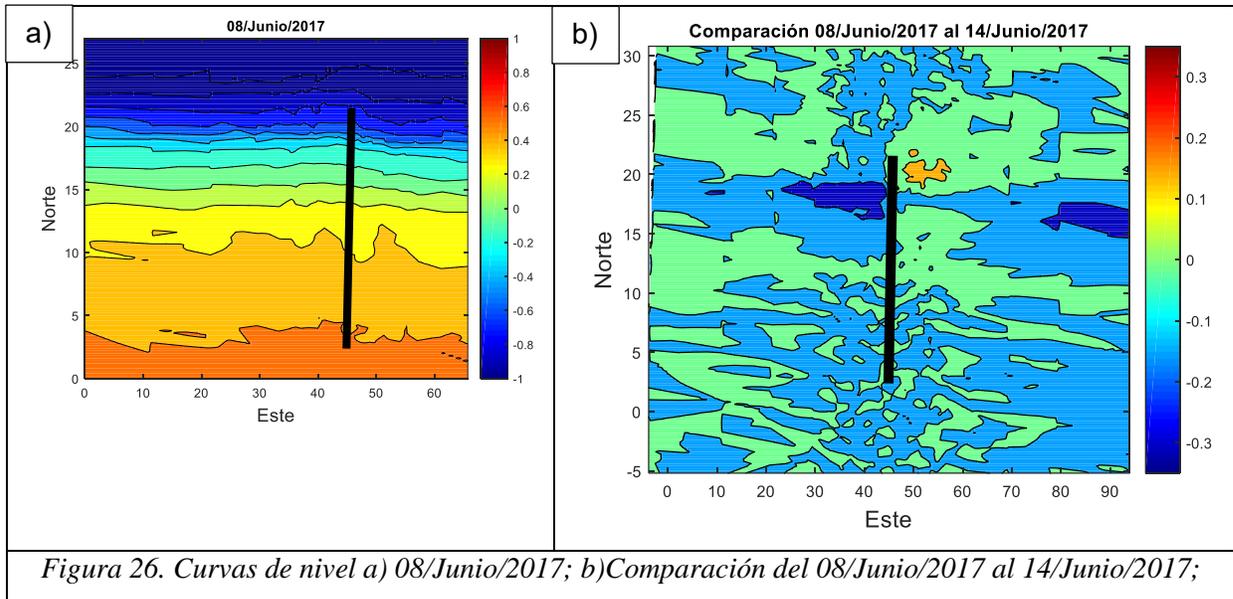


Figura 26. Curvas de nivel a) 08/Junio/2017; b) Comparación del 08/Junio/2017 al 14/Junio/2017;

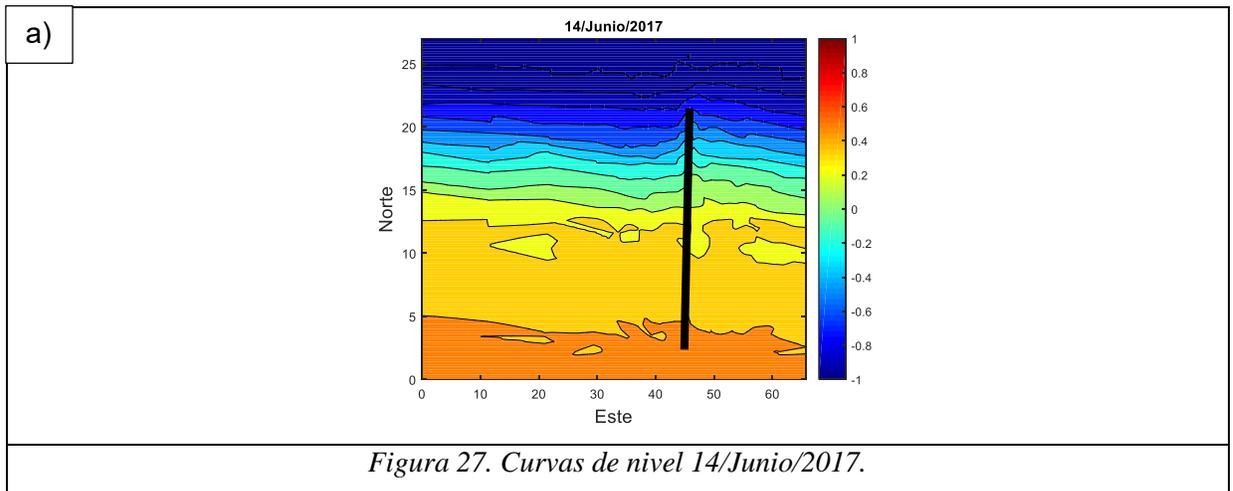


Figura 27. Curvas de nivel 14/Junio/2017.

6.3.1.2. Perfiles de playa y líneas de costa

Los perfiles de la figura 28 nos muestran el efecto que tiene la estructura durante las condiciones típicas de la región, teniendo con ello incrementos y decrementos en ambas secciones, de igual forma se observa migración de la barra de arena hacia la costa en las primeras fechas y después hacia mar adentro en condiciones de brisas.

En los perfiles tomados se puede observar que la barra de arena se comienza a desplazar hacia mar adentro volviéndose más pequeña y más uniforme hasta el 14 de junio, la cual se tiene desplazado 10 m la cresta de la barra.

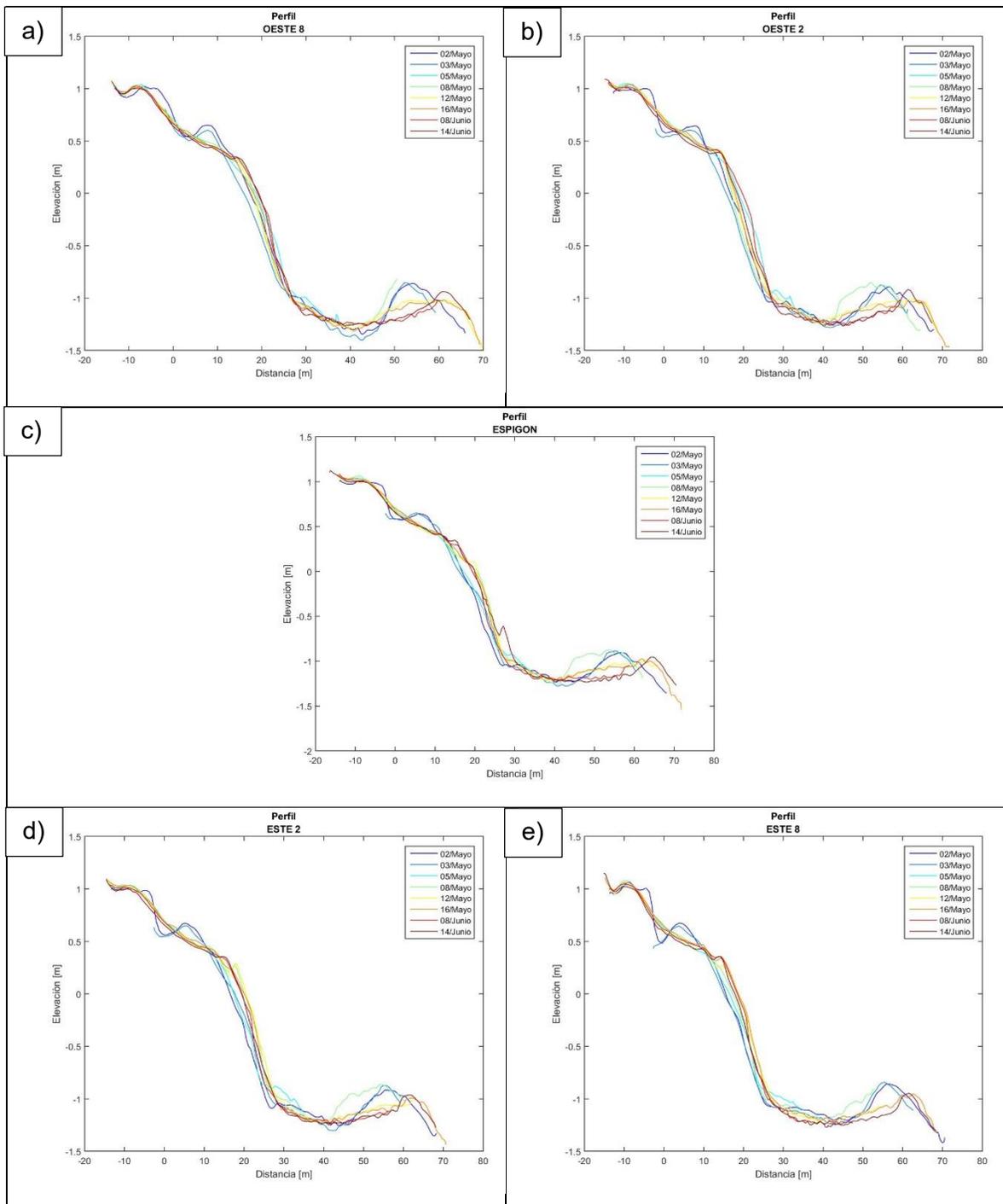


Figura 28. Perfiles del 02 de mayo al 14 de junio de 2017, donde se observa el movimiento de la duna de arena y el aumento en la parte sumergida tras la turbonada: a) Oeste 8(O8); b) Oeste 2(O2); c) Espigón; d) Este 2 (E2); e) Este 8(E8).

Para los perfiles que se encuentran al Este, en estos se puede apreciar un desplazamiento o ganancia de ancho de playa. En cambio, para la sección Oeste se tiene que una pérdida de ancho de playa a la zona cercana al espigón, la cual desaparece debido a la saturación de la estructura que facilite el trasvase de arena y elimina el impacto negativo corriente abajo, generando ganancia en todos los perfiles.

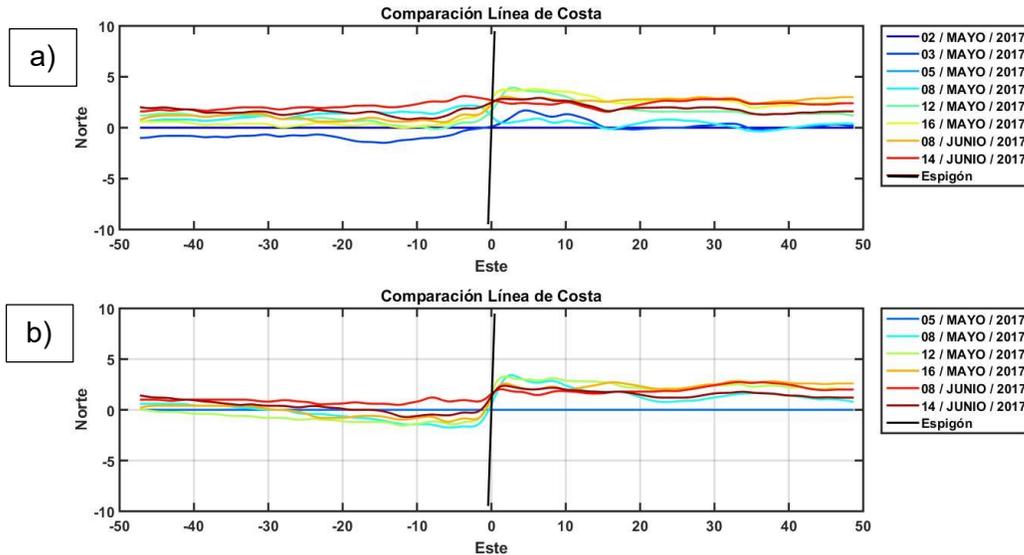


Figura 29. Comparación cota nivel 0 del 02 de mayo al 14 de junio: a) Comparación tomando como base el 02 de mayo de 2017; b) Comparación tomando como base la línea de costa del 05 de mayo de 2017.

Comparando la línea de costa final que representa el 14 de junio con respecto a la presentada el 02 de mayo, se puede apreciar aumento en las dos zonas, teniendo que en la zona Este de la estructura un aumento de 2.70 m y en la zona Oeste de la estructura de 1.50 m (Figura 29a). Por otra parte, la figura 29b presenta decremento para el día 14 de junio debido al cambio de norte a brisa días previos, lo cual generó erosión al Oeste del espigón, para representar el impacto de la morfología debido a la turbonada, la línea de costa base es el 05 de mayo.

6.3.1.3. Análisis Even/Odd de la línea de costa.

Considerando que $x=0$ se encuentra en el espigón construido en la playa, se tienen las siguientes graficas en las cuales se observa el cambio en la línea de costa para determinar el grado de erosión y el efecto del espigón, teniendo como periodo del análisis los 44 días del 2 de mayo al 14 de junio de 2017. Para ello, se realizó un análisis Even/Odd de las mediciones de línea de costa.

La figura 30a presenta los graficos Even/Odd de color azul y rojo respectivamente, en el cual se puede observar que el cambio en la línea de costa en los extremos del grafico de Odd no llegan a 0 m, por lo cual para este análisis presenta que el área de influencia del espigón excede los límites monitoreados. Para el grafico Even los valores en los extremos no mantienen una línea de tendencia constante, debido a ello se entiende que representa la tasa de cambio, teniendo 1.47 m por los 4 días.

Observando la figura 30b que el radio de influencia de la estructura en el grafico Odd es de 35 m, tomando en cuenta el periodo completo de 44 días.

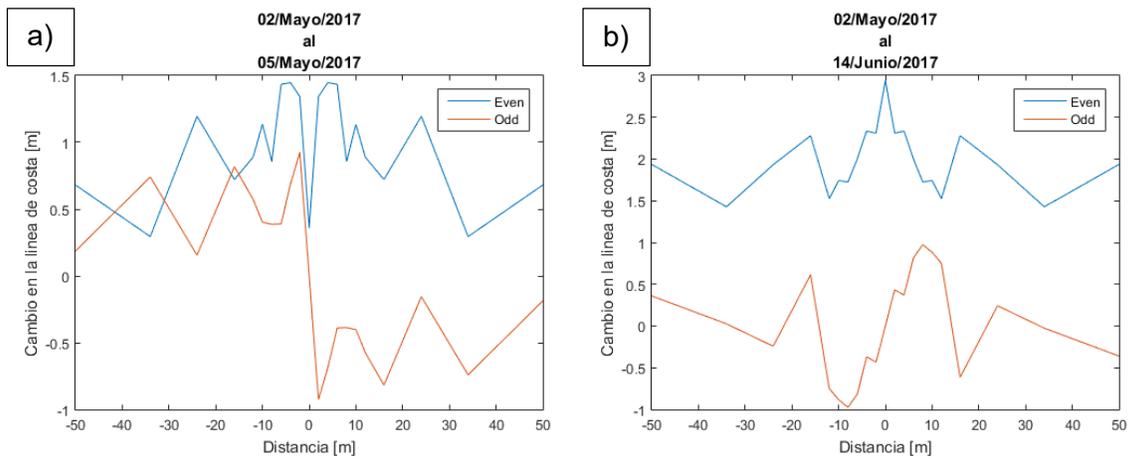


Figura 30. Análisis Even/Odd para línea de costa a 0 m a) De 02 de mayo al 05 de mayo, efectos de la turbonada; b) De 02 de mayo al 14 de junio, impacto durante todo el experimento 1.

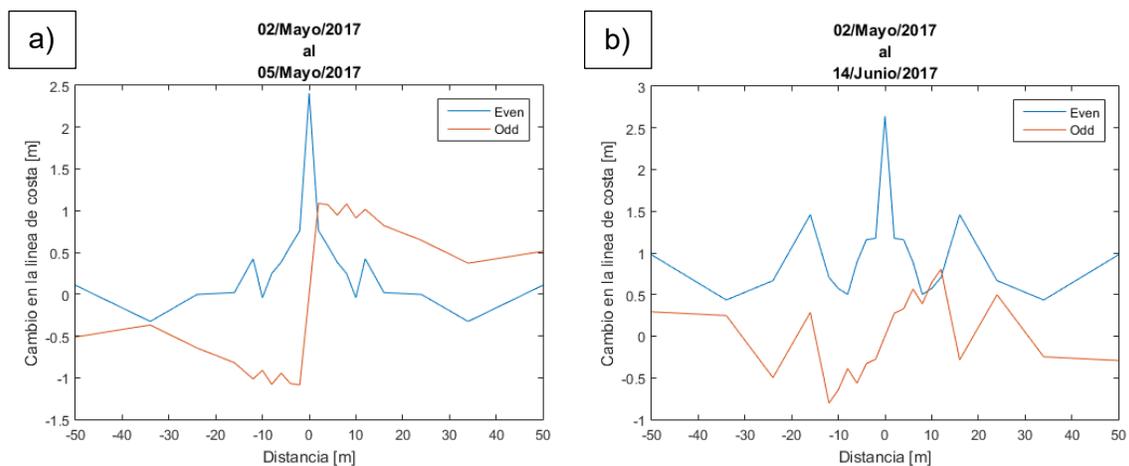


Figura 31. Análisis Even/Odd para línea de costa a -0.50 m a) De 02 de mayo al 05 de mayo, efectos de la turbonada; b) De 02 de mayo al 14 de junio, impacto durante todo el experimento 1.

Las figuras 31a y 31b presentan un análisis Even/Odd para una línea de costa en la cota -0.50 m, para poder observar los cambios en la zona *foreshore*. Los gráficos Even llegan a 0 m en los extremos para el 31a y para el 31b mantiene un comportamiento similar al presentado en la figura 30b. Debido a esto se entiende que la zona de mayor cambio se presentó en la parte emergida y para la turbonada acumuló el sedimento en la zona foreshore. Por lo tanto, el análisis Even/Odd nos indica que el espigón permeable presenta procesos simétricos por impacto de tormenta, lo que quiere decir que el comportamiento durante las tormentas es similar al presentado por procesos naturales, sin presencia del espigón.

En la figura 32a-g se presentan las gráficas Even/Odd como una serie de tiempo comparando levantamientos de manera secuencial, en las cuales se puede observar de manera más clara los periodos de estabilidad y las tendencias al extremo del espigón permeable, teniendo una tasa de cambio más estable o constante a partir de los 30 m.

Los gráficos Odd de las figuras 32b, 32e y 32f muestran el cambio de la influencia de la estructura debido a los nortes, teniendo avance al Oeste de la estructura y en las figuras 32a, 32c y 32g se observa claramente los efectos de las brisas.

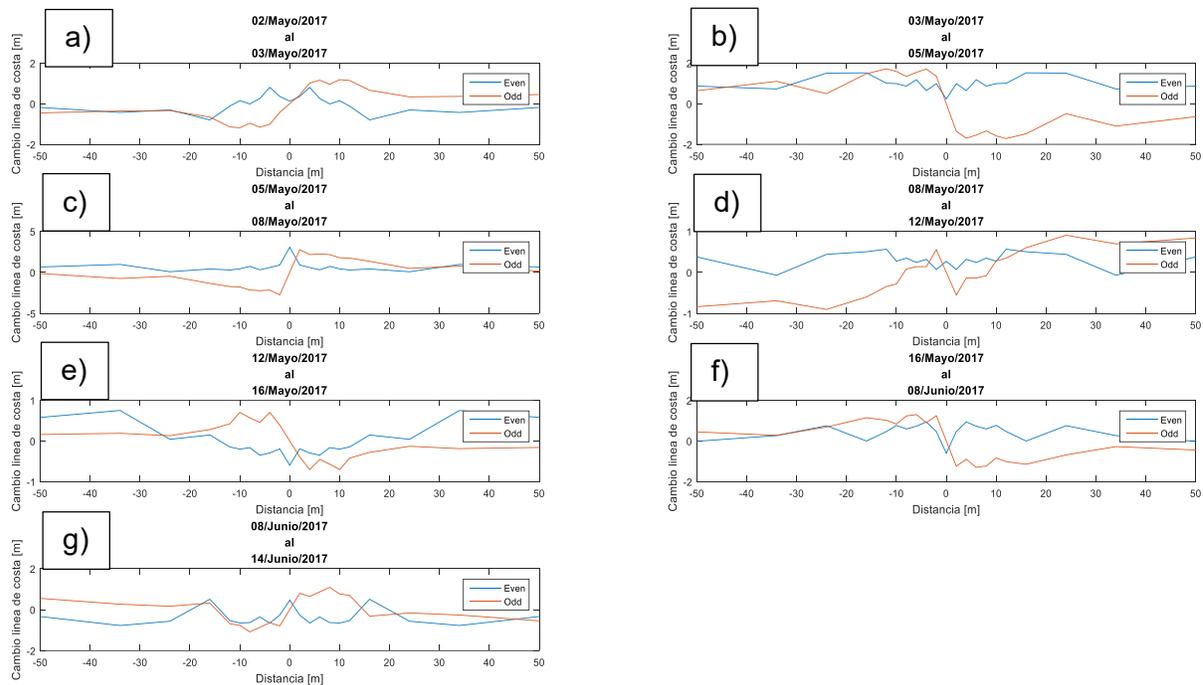


Figura 32. Análisis Even/Odd para línea de costa a 0 m a) De 02 al 03 de mayo; b) De 03 al 05 de mayo; c) De 05 al 08 de mayo; d) De 08 al 12 de mayo; e) De 12 al 16 de mayo; f) De 16 de mayo al 08 de junio; g) De 08 de junio al 14 de junio.

6.3.1.4. Análisis componentes principales (PCA) de la línea de costa

Se realizó un análisis de componentes principales para evaluar los modos de variabilidad espacial y temporal. Los dos primeros modos suman más del 90% de la variabilidad, teniendo que el modo 1 explica el 84.15% y el modo 2 de 6.95% de la varianza.

La figura 33a muestra que el modo 1 representa el efecto del espigón en la línea de costa, mientras que el modo 2 los efectos naturales (nortes y tormentas) que la afectan. Teniendo mayor importancia en las zonas cercanas a la estructura. Mientras que la figura 33b se observa que el modo 1 y el modo 2 se comportan de manera inversa y depende de las condiciones de oleaje en la zona de estudio. En las condiciones de nortes y turbonada el modo 2 tiende a aumentar, y el modo 1 a disminuir, contrariamente lo que sucede en el periodo más largo de brisas observado del 8 al 16 de mayo.

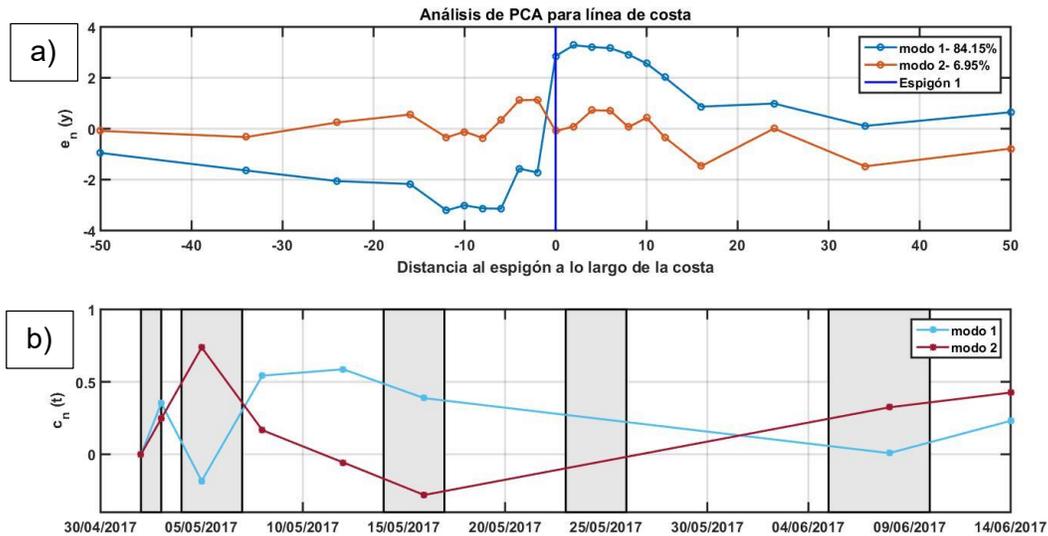


Figura 33. Análisis PCA para línea de costa dividido por secciones, en la cual lo gris representan los nortes; a) componente espacial; b) componente temporal.

El comportamiento presentado en este análisis describe los efectos en la estructura debido a las brisas, los nortes y la turbonada, los cuales generan un aumento en la zona Este durante el primer Norte, caso contrario en la medición del 05 de mayo ya que se presentó una turbonada un día antes, la cual hizo un cambio en la línea de costa. Los Nortes en este caso generan incremento en la zona Oeste y decremento en la zona Este, mientras que en la temporada de brisas se presenta un efecto inverso, debido al efecto de saturación ocasionada por la turbonada presentada el 04 de mayo, la línea de costa se observa un leve incremento final al día 14 de junio de 2017.

6.3.1.5. Cambio volumétrico

Los cambios volumétricos presentados a continuación se encuentran divididos en las dos secciones anteriormente mencionadas (Este y Oeste de la estructura). Las figuras 34a y 34b toman como base del cambio el 05 de mayo de 2017, en las que se puede observar el incremento en la sección Este para el 08 de mayo, durante este periodo ocurrieron nortes provenientes del NNO los cuales generaron incremento en la zona Este.

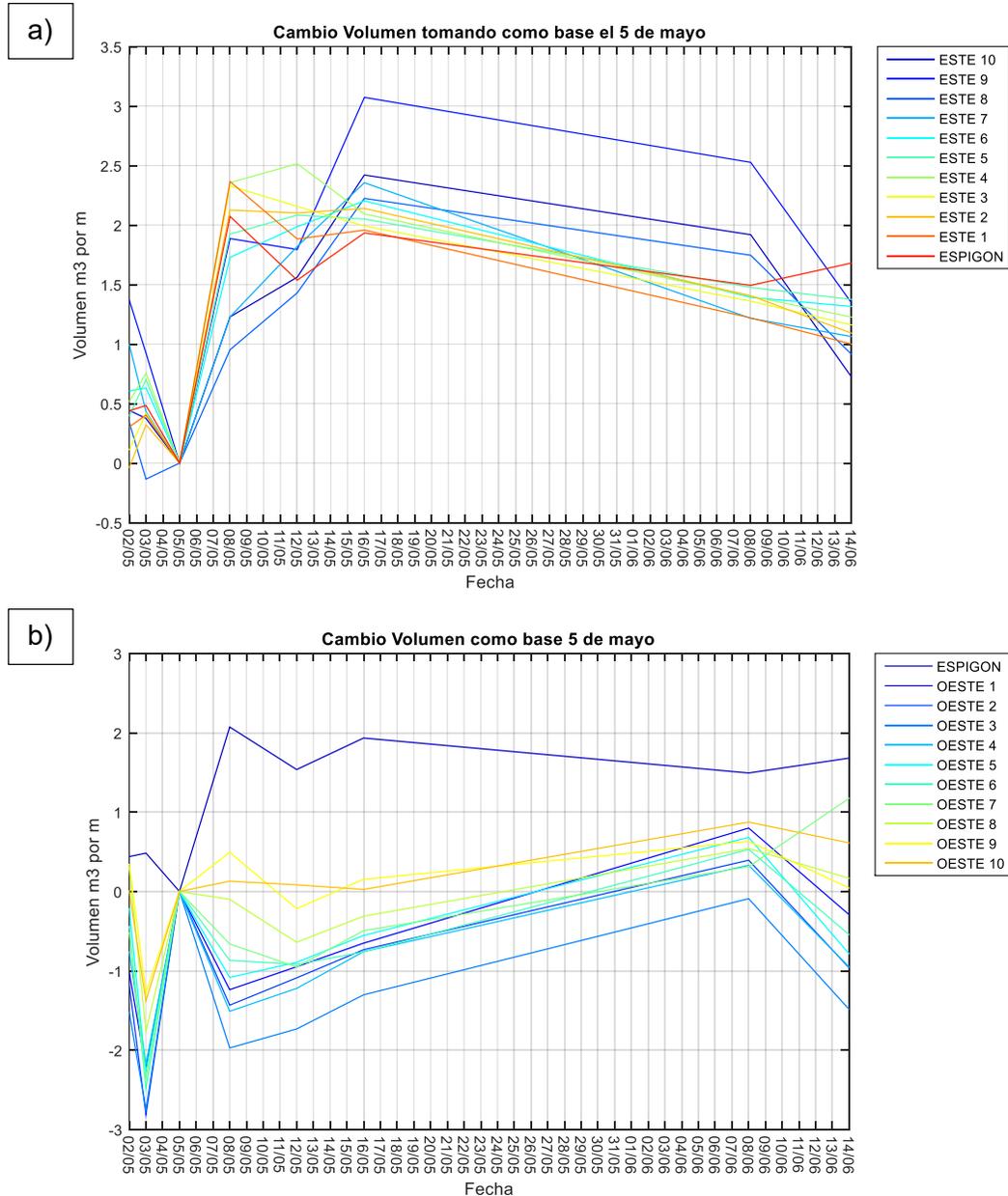


Figura 34. Comparación de volumen a cota nivel 0m del 02 de mayo al 14 de junio, tomando como volumen inicial el 05 de mayo de 2017, a) lado Este del espigón; b) lado Oeste del espigón.

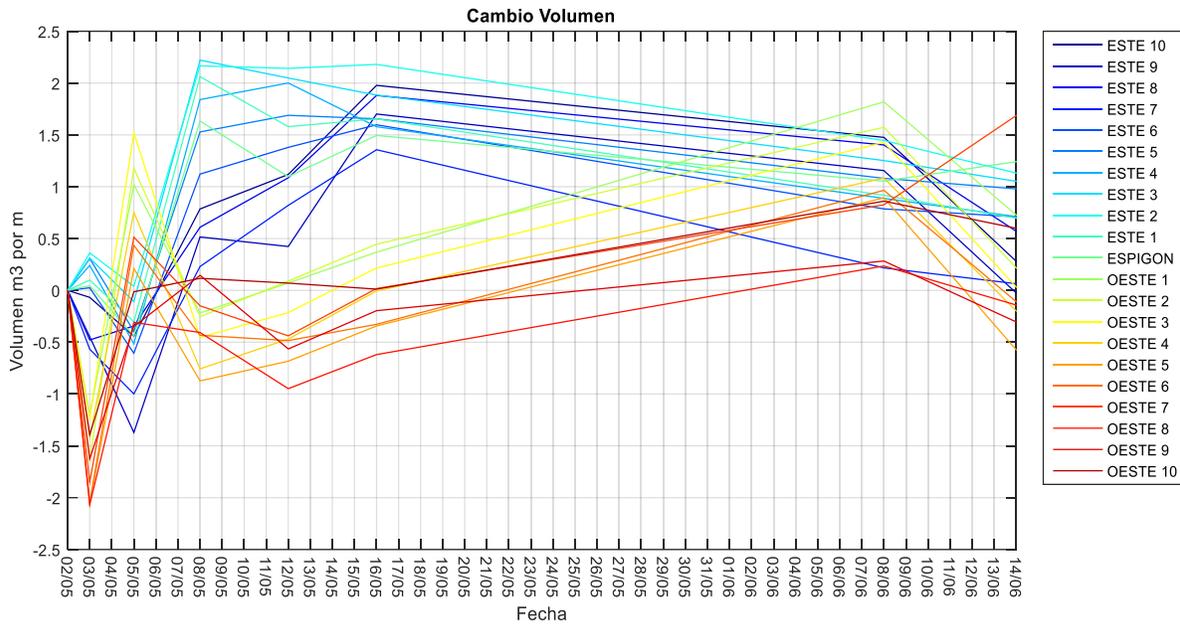


Figura 35. Comparación de volumen sumergido del 02 de mayo al 14 de junio.

La figura 35 nos expresa el comportamiento completo de ambas secciones del espigón, teniendo como base el primer levantamiento del 02 de mayo, en el cual podemos observar los primeros cambios debidos a las brisas, acumulación en Zona Este y erosión en la Zona Oeste, pero este se ve abruptamente modificado debido a la presencia de la turbonada del 04 de mayo, en la cual se observa una recuperación en la Zona Oeste, continuando con los periodos típicos, se observa que los perfiles no cambian considerablemente de volumen.

6.3.2. Experimento 2: Campo de espigones

Continuando con el estudio del impacto en la morfología con el segundo espigón instalado el 14 de junio de 2017, se presentan los siguientes resultados, los cuales se analizan de manera independiente al primer experimento. Teniendo 5 levantamientos en el periodo del 14 al 30 de junio de 2017. Usando la nomenclatura de Zona A (Este "E"), Zona B (Centro "O") y Zona C (Oeste "W").

6.3.2.1. Curvas de nivel

En el periodo del 10 al 19 de junio de 2017 se registró oleaje predominante del Noreste con una altura significativa máxima de 1.2 m (Figura 15), la cual generó una corriente longitudinal a la costa provocando el transporte de sedimentos de Este a Oeste, como se observa en las figuras 36a y 37b, generando acreción en la zona A y B, y erosión en la zona C.

Para el periodo del 19 al 23 de junio se presentó evento de norte con dirección del Noroeste teniendo como altura significativa máxima 0.75 m, la cual generó un cambio de dirección en

el transporte de sedimento de Oeste a Este, el cual erosiona la zona A y B, y acreción en la zona C, observado en el levantamiento realizado el 19 de junio de 2017(Figura 38a). Durante el último periodo de la prueba se presentó un oleaje predominante del Noreste con una altura promedio de ola significativa de 1.1 m, generó una variación constante en la acumulación de sedimento cercana a los espigones, lo cual se observa claramente en las figuras 39a y 40, teniendo esta ultima una similitud al levantamiento realizado el 19 de junio de 2017 (Figura 38a).

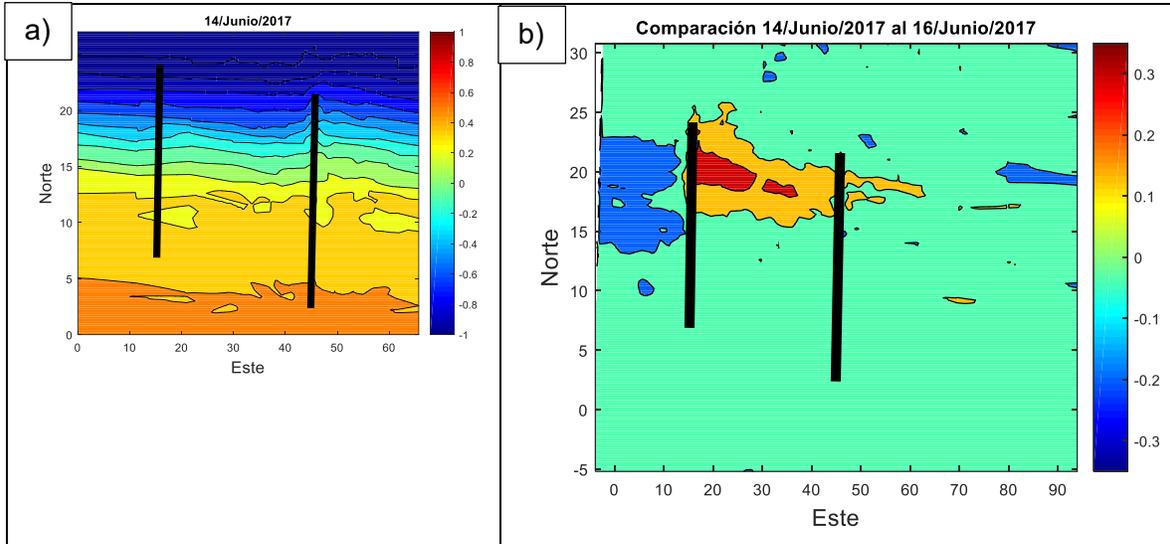


Figura 36. Curvas de nivel a) 14/Junio/2017; b)Comparación del 14/Junio/2017 al 16/Junio/2017;

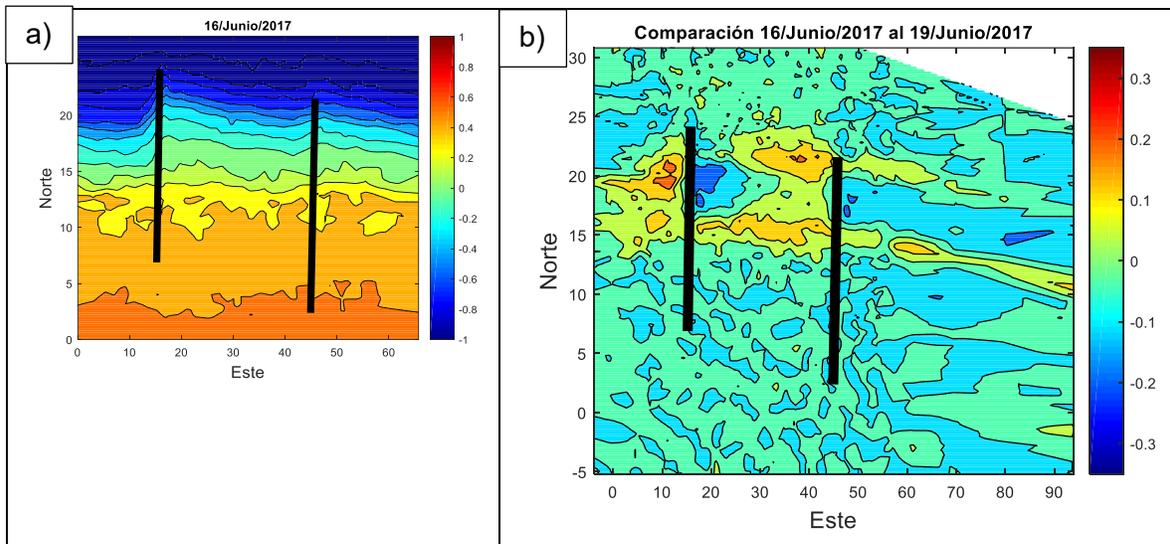


Figura 37. Curvas de nivel a) 16/Junio/2017; b)Comparación del 16/Junio/2017 al 19/Junio/2017;

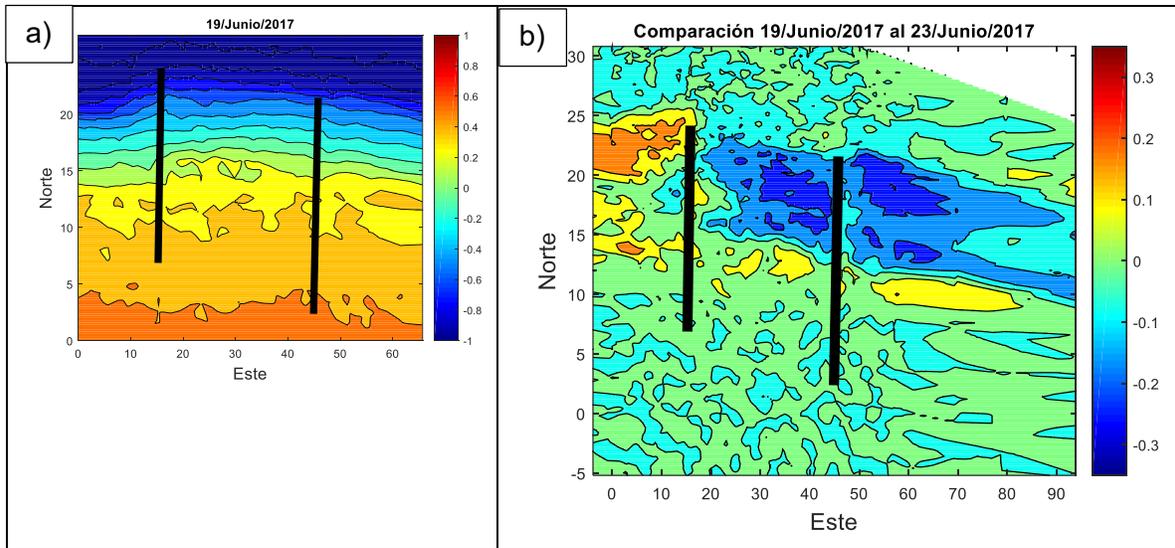


Figura 38. Curvas de nivel a) 19/Junio/2017; b) Comparación del 19 al 23/Junio/2017;

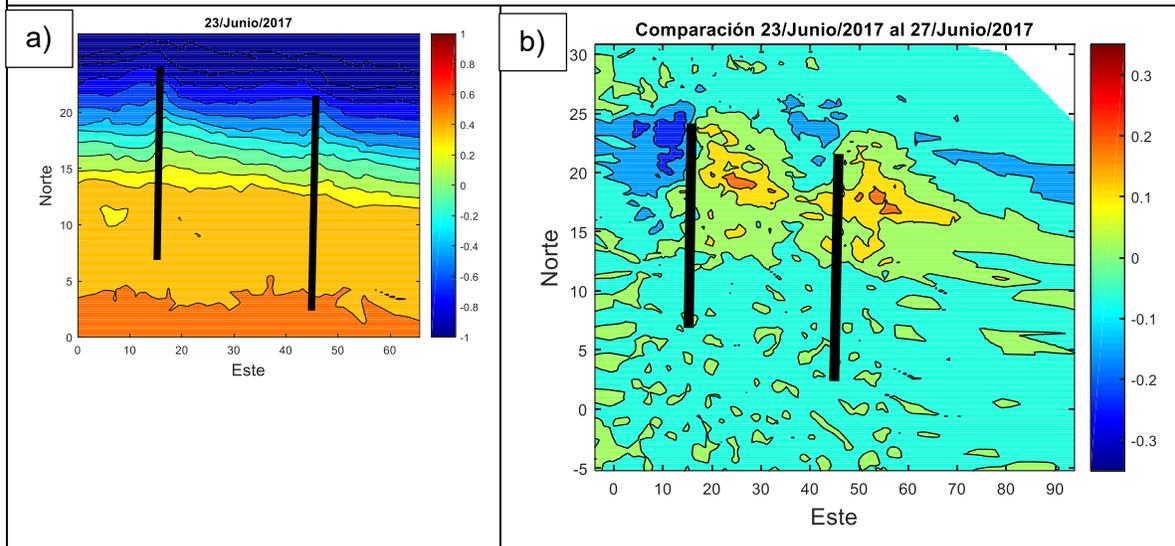


Figura 39. Curvas de nivel a) 23/Junio/2017; b) Comparación del 23 al 27/Junio/2017;

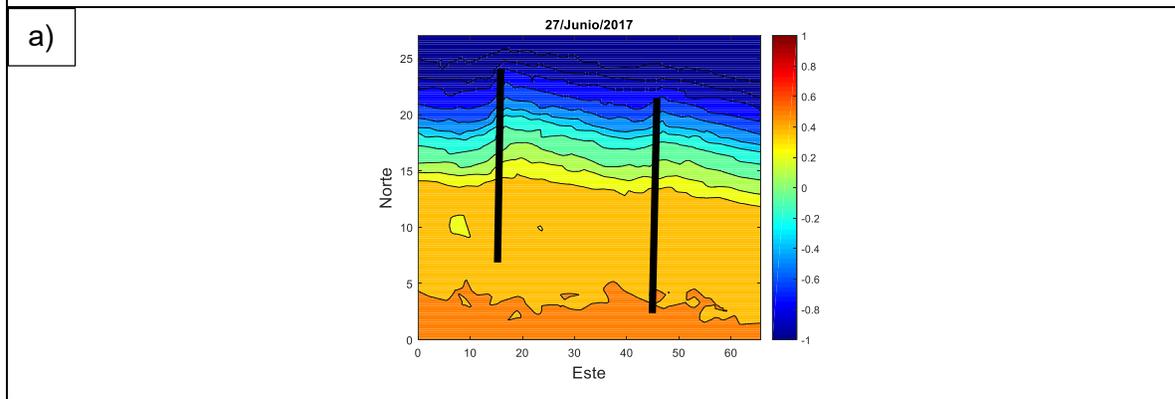
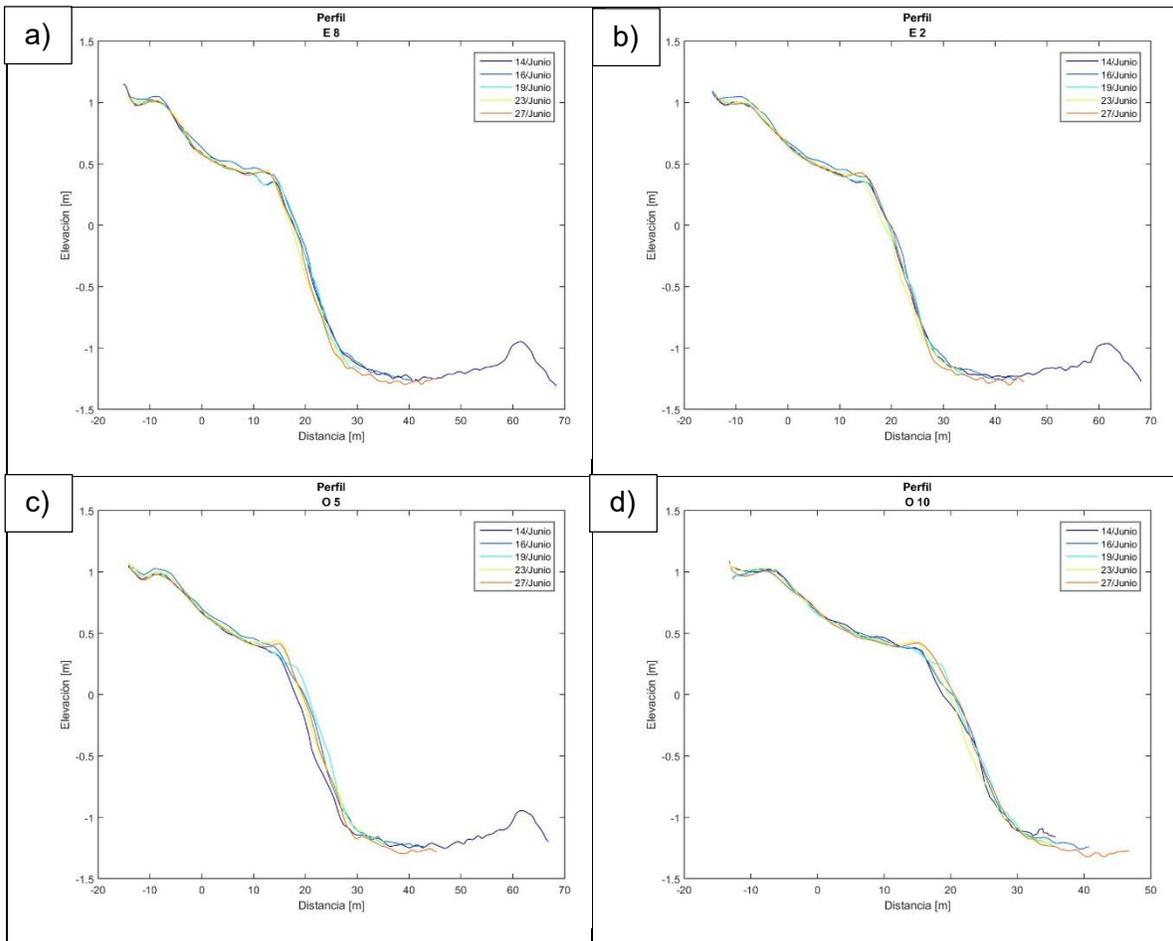


Figura 40. Curvas de nivel a) 27/Junio/2017.

6.3.2.2. Perfiles de playa y comparación de línea de costa

Los perfiles mostrados a continuación E8, E2, O5, O10, W2 y W8, son una muestra representativa de las mediciones realizadas del 14 de junio al 27 de junio de 2017.

En la figura 41 se observa un crecimiento de la playa en las tres zonas, teniendo que en la zona A (W2 y W8) la sección marcada avanzó en promedio 3.2m en la parte emergida, para la zona B (O5 y O10) se muestra un avance promedio de 3.5m y en la zona C (E2 y E8) un avance de 1.7m, todo con respecto a la línea de costa.



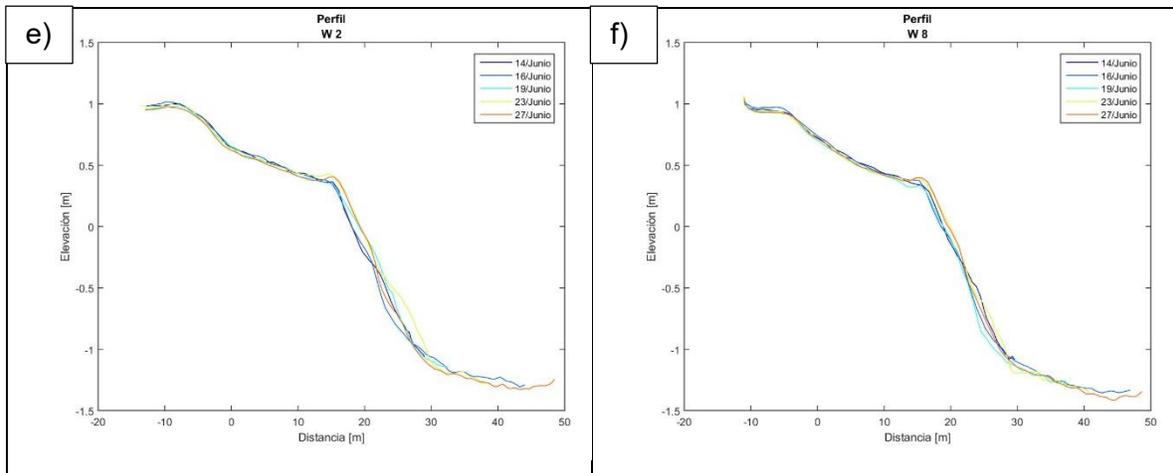


Figura 41. Perfiles del 14 de junio al 27 de junio de 2017, donde se observa el movimiento de la duna de arena: a) Oeste 8(O8); b) Oeste 2(O2); c) Este 5 (E5); d) Este 10(E10); e) W2; f) W8.

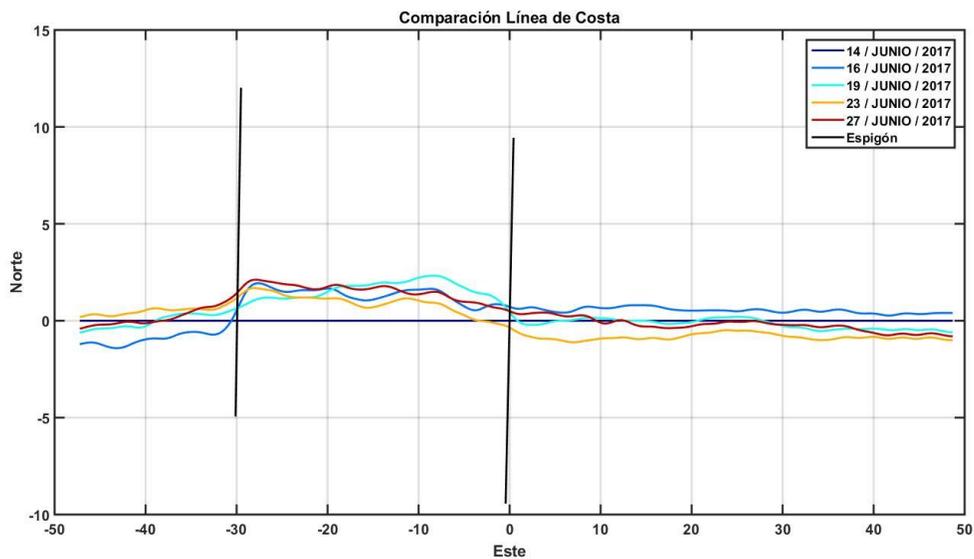


Figura 42. Comparación de línea de costa a cota nivel 0m del 14 de junio al 27 de junio.

En la figura 42 muestra un avance neto en la línea de costa posterior al 14 de junio de 2017, observando el incremento en la zona central que comprende la sección entre ambos espigones, dicho aumento presenta una variación, mientras que en la zona Este y zona Oeste, se observa que para la primera medición después de la instalación del segundo espigón (16/junio/2017) se presenta erosión en la Zona C (Oeste segundo espigón), mientras que el comportamiento en la zona central y Este del campo de espigones presenta un aumento cross-shore de la línea de costa.

6.3.2.3. PCA de la línea de costa para campo de espigones.

El análisis de componentes principales se realizó para evaluar los modos de variabilidad espacial y temporal, teniendo en el modo 1 un 68.13% de varianza y en el modo 2 un 21.93%, con estos dos podemos representar el mayor porcentaje de cambio, ya que suman más del 90%.

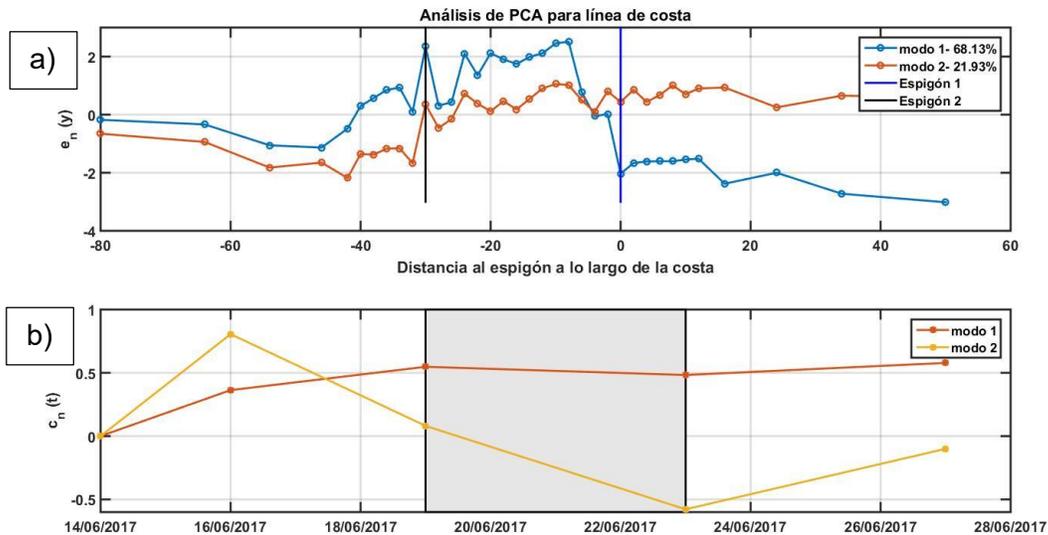


Figura 43. Componentes de PCA para línea de costa dividido por secciones, en la cual lo gris representan los nortes, para cota nivel 0m del 14 de junio al 27 de junio a) Componentes espaciales; b) Componentes Temporales.

Para el primer gráfico (figura 43a) donde se presentan las componentes espaciales podemos observar que el mayor efecto generado por la estructura (modo1) se encuentra en la zona centro ubicada entre ellos, de igual forma se observa que para la zona Este del primer espigón al haber sido afectada anteriormente, presenta mayor impacto a las condiciones naturales (nortes y tormentas), caso contrario a la zona Oeste del segundo espigón que presenta un mayor impacto debido a la estructura.

En la figura 43b se observa que temporalmente el modo1 tiende a aumentar y a mantenerse sin importar la presencia de los nortes, caso contrario en el modo 2 que con la presencia de nortes tiende a disminuir. El análisis nos demuestra que el comportamiento del espigón permeable es el típico esperado, debido a que las zonas de acumulación/erosión cambian debido a las condiciones temporales, pero con el tiempo estas se comienzan a mantener estables dentro de un rango de valores y con ello llegando a la estabilidad del funcionamiento de la estructura.

6.3.2.4. Cambio de volumen

En la siguiente sección se presenta el cambio de volumen en el campo de espigones durante el periodo de 14 días, tomando como volumen base las mediciones del 14 de junio de 2017.

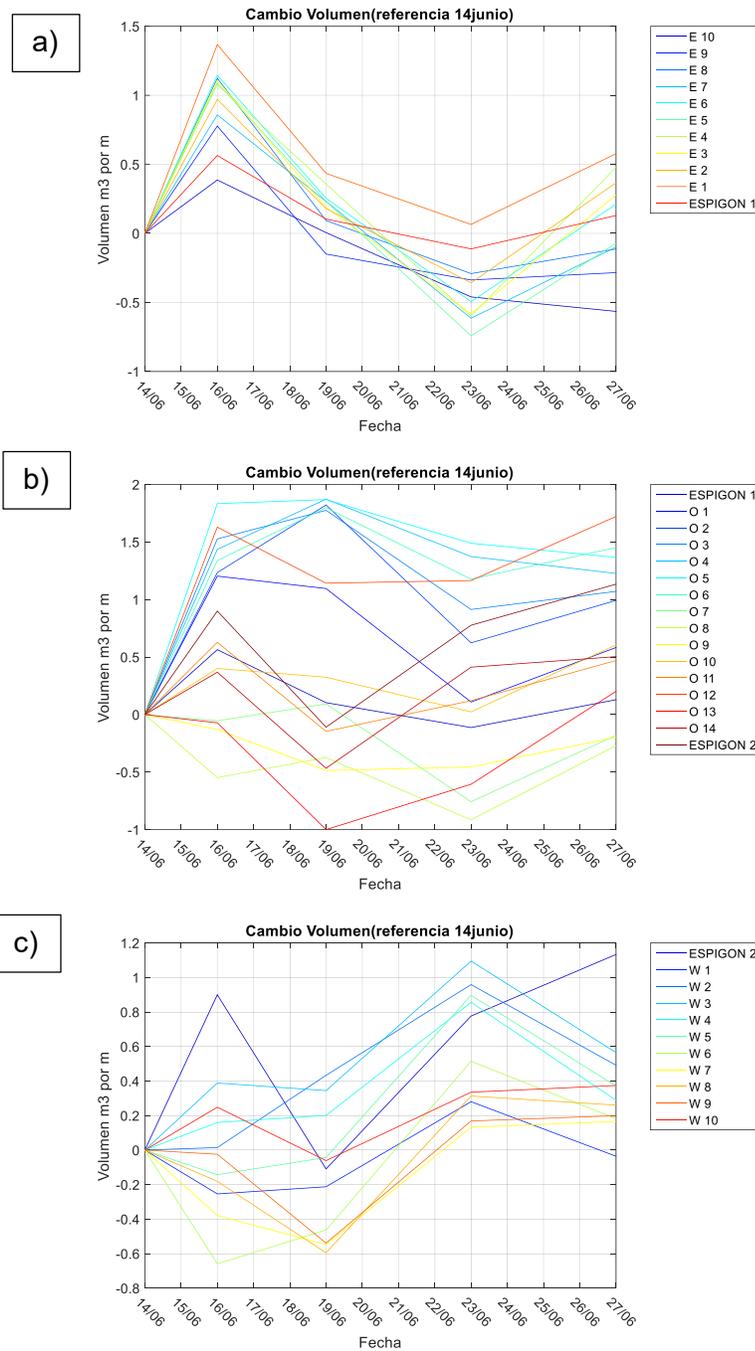


Figura 44. Comparación de volumen a cota nivel 0m del 14 de junio al 27 de junio, tomando como volumen inicial el 14 de junio de 2017, a) lado Este del espigón (E); b) lado Oeste del primer espigón (O) o central de campo de espigones; c) lado Oeste del segundo espigón (W).

La figura 44 se divide en 3 secciones para Zona A (E), Zona B (O) y Zona C (W), observando en la Zona B un incremento en los perfiles O1, O2, O3, los cuales son los más cercanos al espigón, aunque la variación durante el periodo de 14 días es amplia, la tendencia de esa sección es a incrementar o a mantenerse. Para las zonas A se observa que las condiciones de brisas y nortes afectan claramente la acumulación y erosión, tendiendo a quedar igual en algunas secciones. En la Zona C de igual forma se observa una amplia variación en los perfiles debido a las condiciones de oleaje y corriente, pero la tendencia con el paso del tiempo de la estructura es a incrementar la acumulación de sedimento.

7. Discusiones.

Analizando los resultados obtenidos durante este trabajo experimental podemos observar las aportaciones que genera para el área de estudio. Este experimento ha mejorado el entendimiento del comportamiento del transporte de sedimento en la cara de la playa y el efecto que genera un espigón permeable a la línea de costa durante condiciones típicas. De igual forma nos revela la fácil utilización de estas estructuras para campos de espigones y su funcionalidad durante eventos extremos. Tras el desarrollo del experimento se presentan varias especificaciones que se deben tener en cuenta, ya que pueden presentar efectos en los datos. Algunos de los cuales se presentan a continuación:

Las velocidades de los recorridos topo batimétricos influyen la cantidad de datos y la distancia entre ellos, lo cual afecta la resolución de los perfiles creando saltos de diferentes profundidades.

Debido a los cambios en las condiciones de la zona de estudio, es difícil monitorear en algunas fechas debido al aumento del nivel medio del mar y la elevación de la altura de ola lo cual pone en riesgo la integridad del equipo, por lo cual los límites y profundidades a monitorear se ven limitadas.

La colocación del equipo GPS en la mochila genera errores y movimientos laterales o con ángulos cuando no está fijada adecuadamente, por lo cual se recomienda tener puntos de control o referencia al inicio y al final de los levantamientos para tener la corrección.

Con respecto a la estructura, la forma, posición y cantidad de elementos utilizados en los experimentos puede variar y afectar el resultado obtenido en este trabajo, la variación que pudiera generar el cambio de estos factores no fue monitoreada, ni estimada. Pero la estabilidad de la estructura debido a su peso es recomendable para la zona de estudio.

Para determinar la estabilidad durante el experimento solo se pudo hacer de manera fotográfica, mostrando que los elementos no tuvieron movimiento, pero para obtener una mejor información es necesario hacer mediciones de posición y revisar que los elementos no se hundan.

Al final del experimento 1 se presenta un rango de $0.50 \text{ m}^3/\text{m}$ en los primeros 5 perfiles cercanos al espigón por el lado Este y del lado Oeste $1 \text{ m}^3/\text{m}$, por otra parte, la línea de costa aumentó en promedio 2.70 m y 1.50 m en la Zona Este y Oeste respectivamente. Para el experimento 2 los rangos presentados por los 5 primeros perfiles cercanos a los espigones tienen una variación de $0.50 \text{ m}^3/\text{m}$, $2 \text{ m}^3/\text{m}$ y $1.1 \text{ m}^3/\text{m}$ para la Zona A, Zona B y Zona C respectivamente, la línea de costa al terminar el experimento aumentó 3.2 m en la Zona A, 3.5 m en la Zona B y 1.7 m en la Zona C.

8. Conclusiones

Como resultado de los experimentos realizados en el presente trabajo, se ha instalado una estructura tipo espigón permeable, de fácil montaje y retiro, que a su vez es funcional y capaz de resistir condiciones de oleaje extremas, como lo fueron los nortes y la turbonada. Con la primera parte del experimento se demuestra la estabilidad de la estructura durante los eventos de tormentas, ya que no se presentan desplazamientos longitudinales de los elementos de concreto que conforman el espigón permeable.

El impacto que genera en la morfología los campos de espigones de baja coronación es positivo, ya que al final de toda la evaluación en todas las secciones se obtuvo ganancia de sedimento, considerando que el espigón funciona para condiciones predominantes (brisas) y para tormentas (nortes) por igual, como se observaron en las mediciones de los instrumentos durante las pruebas.

El campo de espigones generó un avance en la línea de costa de aproximadamente 2.8 m, el incremento es estable en la sección entre los espigones mostrando un movimiento lineal de la línea de costa. Ya que para el campo de espigones la línea de costa ya se encontraba modificada, en el espigón 1 no se observan grandes variaciones o aumentos en los volúmenes de sedimentos.

Los espigones permeables modifican en gran escala la línea de costa, pero su mayor cambio se observa en la zona de swash, donde se modifican las corrientes longitudinales. Con los resultados presentados en las imágenes de estabilidad se puede concluir que los espigones simples fabricados con elementos de concreto en forma de hexápodos, resisten fácilmente las condiciones climáticas extremas presentadas en la zona de estudio. De igual forma podemos observar que:

1. Con los análisis volumétricos presentados en este trabajo se puede concluir que el área de estudio tuvo un aumento de 35.32 m³ del 05 de mayo al 14 de junio con el primer espigón, y un aumento total de 14.74 m³ para el periodo del 14 al 27 de junio de 2017, tomando en cuenta la zona A y B ya tenían un alto grado acreción y estabilidad, con esto demostrando la utilidad de la estructura en la zona de Sisal.
2. Con los resultados presentados en este trabajo se puede concluir que los espigones de baja coronación son una alternativa para la recuperación de las zonas con características similares.

Entre las recomendaciones de uso de estas estructuras, se pueden sugerir para el cambio de los espolones tradicionales en la costa Yucateca debido a la similitud de condiciones de oleaje y que estas no impedirán el paso completamente del transporte de sedimento,

pudiendo aun generar transporte y variaciones en la morfología tras su saturación. De igual forma teniendo en cuenta su fácil instalación y desinstalación, lo convierten en una alternativa factible para cualquier cambio que pueda surgir en la costa, pudiendo considerarla una estructura móvil y adaptable.

9. Referencias

- Ahmed, H. S., Hasan, M. M., & Tanaka, N. (2010). Analysis of flow around impermeable groynes on one side of symmetrical compound channel : an experimental study. *Water Science and Engineering*, 3(1), 56–66. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.006>
- Alauddin, M., & Tsujimoto, T. (2012). Optimum configuration of groynes for stabilization of alluvial rivers with fine sediments. *International Journal of Sediment Research*, 27(2), 158–167. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(12\)60024-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(12)60024-9)
- Ali, N. A., & Tominaga, A. (2012). Flow Analysis Around Groyne With Different Permeability, 302–320.
- Appendini, C. M., Salles, P., Tonatiuh Mendoza, E., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 1404–1417. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1>
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge, UK: The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Felices, A. R. (2009). Consideraciones sobre defensas fluviales con las espigones, 1–43.
- Figueroa-Espinoza, B., & Salles, P. (2014). On the wind power potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico. *Atmósfera*, 27(1), 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71102-6](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71102-6)
- Gerardo Fracassi. (2012). *Obras de sistematización fluvial en torrentes y ríos con Espigones Manual Técnico* (1 Edición, Vol. 1). MACCAFERRI.

- Hofman, A. (2016). On the role of a permeable groin in beach morphodynamics during sea-breeze events. Retrieved from <http://essay.utwente.nl/71052/>
- Kristensen, S. E., Drønen, N., Deigaard, R., & Fredsoe, J. (2016). Impact of groyne fields on the littoral drift: A hybrid morphological modelling study. *Coastal Engineering*, 111, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.009>
- Lira-Pantoja, M. A., & , Alec Torres-Freyermuth, Christian M. Appendini, Diana Fernández, Paulo Salles, E. Tonatiuh Mendoza, José López, A. P.-A. (2012). CHRONIC BEACH EROSION INDUCED BY COASTAL STRUCTURES IN CHELEM, YUCATÁN. *Coastal Engineering*, 1–10.
- Meyer-Arendt, K. (1991). Yucatan Coast : on the North Tourism Development Human Response to Shoreline Erosion and Hurricanes. *GeoJournal*, 23(4), 327–336.
- Michigan, L., Shabica, C., Meshberg, J., Keefe, R., Georges, R., Shabica, C., ... Georges, R. (2004). Evolution and Performance of Groins on a Sediment Starved Coast : The Illinois Chicago , 1880-2000 Shore of Lake Michigan North of, (33).
- Pedrozo-Acuña, A. (2011). *Procesos costeros y morfodinámica de playas*.
- Roca Barcelo, F. (2016). *EFFECTOS DE UN DIQUE EXENTO EN LA MORFOLOGÍA DE UNA PLAYA DOMINADA POR BRISAS*.
- Salles, Paulo; Silva Casarín, R. (2004). Infraestructura de protección costera. *Manejo Costero En México*, 179–190.
- Samaras, A. G., & Koutitas, C. G. (2014). Comparison of three longshore sediment transport rate formulae in shoreline evolution modeling near stream mouths. *Ocean Engineering*, 92, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.10.005>
- Sisal, E. L., Generales, D., & Puerto, D. E. L. (2006). El sisal, yucatán.
- Suárez D., J. (2001). *Control erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia.
- Takayuki, N., & Tadao, K. (2004). WAVE TRANSMISSION AND REFLECTION DUE TO A THIN VERTICAL, 1, 28–33.

- Tereszkiewicz, P. A. (2016). *PERMEABLE AND IMPERMEABLE GROINS ALONG THE NORTHERN YUCATÁN COAST*.
- Torres-Freyermuth, A., Puleo, J. A., DiCosmo, N., Allende-Arandía, M. E., Chardón-Maldonado, P., López, J., ... Candela, J. (2017). Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Continental Shelf Research*, 151(August), 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.008>
- Winant, C. D., Inman, D. L., & Nordstrom, C. E. (1979). Description of Seasonal Beach Changes Using Empirical Eigenfunction, 80(15), 1979–1986.
- Work, P. A., & Dean, R. G. (1990). Even/Odd Analysis of Shoreline Changes Adjacent to Florida's Tidal Inlets, 2522–2535.
- Yossef, F. M. (2005). Morphodynamics of Rivers With Groynes.