



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

**DISEÑO DE ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN DE PLAYAS CON UN  
ENFOQUE DE MANEJO BASADO EN ECOSISTEMAS**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**ANGEL GABRIEL KUC CASTILLA**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**COMITÉ TUTOR**  
**DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**DR. RAÚL MARTELL DUBOIS, COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO  
DE LA BIODIVERSIDAD**

**CIUDAD DE MÉXICO. SEPTIEMBRE 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

Secretario: DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES

1<sup>er.</sup> Vocal: DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

2<sup>do.</sup> Vocal: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

3<sup>er.</sup> Vocal: DR. RAÚL MARTELL DUBOIS

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, CIUDAD DE MÉXICO

**TUTOR DE TESIS:**

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

-----  
**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Estas líneas son para agradecer a las instituciones y personas que me han brindado su apoyo para la culminación de este trabajo, gracias a su contribución he podido terminar una etapa más de aprendizaje y de superación personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la realización de este trabajo.

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de formarme y crecer académicamente.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, por ser mi tutor y director de este trabajo, por ofrecerme sus conocimientos, por su paciencia y apoyarme en todo momento.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín por las oportunidades que me dio para desarrollar y mejorar mi formación académica, por sus aportaciones a este trabajo y por su apoyo.

A mis sinodales Dr. Ramón Domínguez Mora, Dr. Oscar Fuentes Mariles y al Dr. Raúl Martell Dubois, por las aportaciones y consejos recibidos durante la elaboración de este trabajo.

Gracias a mis compañeros y amigos del grupo de Costas y Puertos: Débora, Román, Anahí, Violeta, Ernesto, Monse, Mani, Dea, Erik y Pedro, con los que compartí grandes momentos y que fueron un gran apoyo en el transcurso del doctorado.

Gracias a toda mi familia por darme siempre su apoyo incondicional y estar siempre cuando los necesito.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante esta etapa de mi vida.

A mis padres Teresita y José, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me han apoyado.

A mis hermanos Dianela y Luis, por estar siempre a mi lado y apoyarme en cada momento.

A mi sobrino Alejandro, por estar conmigo y traerme alegría en los momentos difíciles.

A mi abuelita Julia, por quererme y preocuparse por mí en todo momento, y a mis abuelitos Guibaldo y Lorenzo que desde el cielo están conmigo y me siguen cuidando.

A todos mis amigos que me han apoyado en esta etapa de mi formación profesional: Débora, Román, Anahí, Violeta, Ernesto, Monse, Mani, Dea, Erik y Pedro, muchas gracias.

A toda mi familia quienes con su ayuda, cariño y comprensión han sido parte fundamental de mi vida.

## RESUMEN

El análisis y comprensión de la variabilidad de la línea de costa, así como las tendencias de erosión-acreción son importantes para orientar los procedimientos de gestión costera. Actualmente los ecosistemas costeros forman parte importante en la protección de las playas, ya sea por sí solos o en combinación con estructuras rígidas.

Este estudio se enfoca en la detección y evaluación de cambios en la línea costera, evaluar el grado de modificación antropogénica de los ecosistemas costeros, así como en la valoración de los servicios ecosistémicos, a fin de proponer la medida de protección más adecuada contemplando a los ecosistemas presentes en la playa de Sabancuy, en Campeche, México.

Los cambios en la línea de costa a lo largo de la playa se estudiaron mediante análisis de imágenes de satélite y, a partir de esto, se calculó las áreas con mayor erosión obteniendo las tasas de erosión y acreción de la playa. El grado de antropización se determinó a partir de mapas de uso del suelo y mediante los cambios en la cobertura vegetal. El valor de los servicios ecosistémicos se obtuvo por medio de la transferencia de valor utilizando como referencia estudios previos. Adicionalmente, se realizó una medición de perfiles de playa y toma de muestras de arena en diferentes zonas de la playa, caracterizando los principales parámetros de los sedimentos que permiten conocer la dinámica sedimentaria de la playa.

Mediante simulaciones numéricas se establecieron las condiciones de oleaje y marea bajo diferentes escenarios, observando la influencia de las medidas de protección para determinar la más adecuada.

Los resultados obtenidos indican la situación actual en la playa de Sabancuy producto del proceso de erosión, lo que indica que es necesario tomar acciones que permitan proteger y conservar los valores y servicios ecológicos de la costa

## **ABSTRACT**

The analysis and understanding of shoreline variability and coastal erosion-accretion trends are important in orienting coastal management procedures. Coastal ecosystems are currently an important part of beach protection, alone or in combination with hard structures.

This study focuses on detection and evaluation of coastline changes, assess the degree of anthropogenic modification of coastal ecosystems, as well as the valuation of ecosystem services, in order to propose the most appropriate protection measure considering the ecosystems present at Sabancuy beach, in Campeche, Mexico. The changes in the coastline along the beach were studied by satellite image analysis, and starting from this, the areas with most erosion were computed, obtaining the erosion and accretion rates of beach. The degree of anthropization was determined from land-use maps and through changes in vegetation cover. The value of ecosystem services was determined through the transfer of value using previous studies as a reference. Additionally, a measurement of beach profiles and sand sampling was carried out in different areas of the beach, characterizing the main parameters of the sediments that allow to know the sedimentary dynamics of the beach. Through numerical simulations, the wave and tidal conditions were established under different scenarios, observing the influence of protection measures to determine the most appropriate.

The results indicate the current situation at Sabancuy beach as a result of the erosion process, which indicates that it is necessary actions to protect and conserve the ecological values and services of the coast.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	7
1. ÁREA DE ESTUDIO.....	9
2. OBJETIVOS.....	12
3. ESTADO DEL ARTE.....	13
3.1. Importancia socioambiental de Sabancuy .....	13
3.1.1. Anidación de tortugas marinas en la playa de Sabancuy.....	13
3.1.2. Actividad pesquera .....	17
3.2. Cambios morfológicos en la línea de costa.....	19
3.3. Manejo basado en ecosistemas .....	20
3.3.1. Humedales .....	22
3.3.2. Playas y dunas .....	23
4. METODOLOGÍA .....	24
4.1. Evaluación de los cambios de la costa.....	24
4.2. Determinación de la tasa de cambio de la línea de costa.....	25
4.3. Recolección y análisis de datos de campo para la descripción de la dinámica sedimentaria.....	27
4.3.1. Toma de muestras y análisis de las características granulométricas .....	28
4.3.2. Parámetros texturales del sedimento .....	29
4.4. Delimitación de celdas litorales.....	31
4.5. Determinación del Índice Integrado Relativo de Antropización (INRA).....	32
4.6. Valoración de servicios ecosistémicos.....	33
4.7. Modelación matemática.....	35
4.8. Modelo topobatimétrico.....	36
4.9. Análisis de oleaje.....	36
4.10. Condiciones de marea .....	38
4.11. Propuestas para el control de la erosión.....	39
4.11.1. Restauración de manglar .....	40
4.11.2. Diseño de diques en talud.....	40
4.11.2.1. Altura de ola.....	41
4.11.2.2. Número de Iribarren.....	41

4.11.2.3.	Ascenso máximo (Run-up).....	41
4.11.2.4.	Diámetro y peso nominal de las piezas del dique.....	42
4.11.2.5.	Transmisión.....	44
4.11.2.6.	Reflexión.....	44
4.11.2.7.	Respuesta de la costa .....	45
4.11.3.	Relleno de playa y restauración de dunas.....	45
5.	RESULTADOS.....	47
5.1.	Evolución de la línea de costa.....	47
5.2.	Perfiles de playa.....	51
5.3.	Sedimentos.....	55
5.4.	Celdas litorales e índice de antropización (INRA) .....	64
5.5.	Servicios ecosistémicos .....	67
5.6.	Condiciones de oleaje .....	72
5.7.	Justificación para la selección de las medidas para el control de la erosión.....	75
5.8.	Alternativas para el control de la erosión .....	81
5.9.	Hidrodinámica de la costa en condiciones actuales y con las medidas de protección	86
7.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	105
8.	RECOMENDACIONES .....	108
9.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO .....	108
	BIBLIOGRAFÍA .....	109
	ANEXO I.....	124
	ANEXO II.....	130

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de Sabancuy.....	9
Figura 2. Canal de acceso al estero de Sabancuy. ....	10
Figura 3. Ejemplos de problemas de erosión a lo largo de la playa de Sabancuy: (a) pérdida de instalaciones turísticas (restaurante destruido); (b) restos de rompeolas rocoso; (c) pérdida de instalaciones turísticas (palapas); (d) pérdida de playa seca frente al campamento de tortugas marinas; (e) muro de rocas para proteger la carretera; (f) pérdida de lugares turísticos. ....	11
Figura 4. Localización de estaciones de anidación en el campamento Tortuguero La Escollera. ....	14
Figura 5. Distribución acumulada de anidación de tortuga Carey y blanca (2001 – 2012). ....	16
Figura 6. Mosaico de imágenes satelitales de la playa de Sabancuy.....	24
Figura 7. Transectos transversales utilizados para el análisis de la costa de la playa de Sabancuy. ....	26
Figura 8. Esquema de levantamiento de perfiles de playa con GPS diferencial. ....	28
Figura 9. Secado de muestras de sedimento en hornos de convección. ....	28
Figura 10. Equipo CAMSIZER.....	29
Figura 11. Modelo topobatómico de Sabancuy.....	36
Figura 12. Serie de datos de oleaje de 2005 a 2018. (a) Altura de ola significativa ( $H_s$ ); (b) periodo pico ( $T_p$ ); (c) dirección de oleaje. ....	37
Figura 13. Función de marea de tormenta de Sabancuy.....	39
Figura 14. Secciones en la playa de Sabancuy. ....	47
Figura 15. Detalle de las áreas de acreción y erosión en la zona del canal de acceso.....	48
Figura 16. (a) Evolución de la costa entre 2004 y 2015 en la sección este de la playa; (b) NSM es el cambio neto de la costa y (c) EPR es la tasa anual de desplazamiento de la costa. ....	49
Figura 17. (a) Evolución de la costa entre 2004 y 2015 en la sección oeste de la playa;(b) NSM es el cambio neto de la costa y (c) EPR es la tasa anual de desplazamiento de la costa. ....	50
Figura 18. Localización de perfiles de playa en la costa de Sabancuy.....	51
Figura 19. Puente Carretera Federal 180, vía de acceso principal a la Península de Yucatán. .	51
Figura 20. Perfiles medidos en la playa este. ....	52
Figura 21. Perfiles de playa, lado este. ....	53
Figura 22. Perfiles medidos en la playa oeste. ....	54

Figura 23. Perfiles de playa, lado oeste.....	55
Figura 24. Variación del tamaño gráfico promedio de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.....	57
Figura 25. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.....	59
Figura 26. Variación de asimetría gráfica inclusiva de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.....	61
Figura 27. Variación de la curtosis de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.....	63
Figura 28. Límites entre celdas litorales para el estado de Campeche.....	64
Figura 29. Límites entre celdas litorales, Sabancuy.....	65
Figura 30. Grado de antropización para cada subunidad de análisis (SUA), 1981.....	66
Figura 31. Grado de antropización para cada subunidad de análisis (SUA), 2015.....	66
Figura 32. Grado de antropización para los SUA alrededor del poblado de Sabancuy, 2015.....	67
Figura 33. Función de distribución de altura de ola significativa ( $H_s$ ), anual.....	72
Figura 34. Probabilidad conjunta de altura de ola significativa ( $H_s$ ).....	73
Figura 35. Rosa de oleaje anual.....	73
Figura 36. Análisis de valores extremos para altura de ola significativa ( $H_s$ ) por el método POT (Peak Over Threshold) pico sobre un umbral a 95% con la función GVE.....	74
Figura 37. Probabilidad conjunta de altura de ola significativa ( $H_s$ ).....	74
Figura 38. Rosa de oleaje de tormenta.....	75
Figura 39. Mapa de uso y vegetación de la playa de Sabancuy, año 1981.....	76
Figura 40. Lancha pesquera transitando por el canal de Sabancuy.....	78
Figura 41. Localización de estaciones de anidación en el campamento Tortuguero La Escollera, playa oeste.....	80
Figura 42. Servicios turísticos presentes en la costa de Sabancuy.....	80
Figura 43. Localización de diques propuestos.....	81
Figura 44. Sección transversal de los diques.....	84
Figura 45. Vegetación de duna en la playa de Sabancuy.....	85
Figura 46. Localización de pasarelas.....	85
Figura 47. Altura de ola media cuadrática ( $H_{rms}$ ) en régimen medio,.....	88

Figura 48. Velocidad y dirección de corrientes en régimen medio, .....	89
Figura 49. Nivel de agua en régimen medio, playa con estructuras de protección, .....	90
Figura 50. Altura de ola media cuadrática (Hrms) en condiciones de tormenta, .....	91
Figura 51. Altura de ola media cuadrática (Hrms) en condiciones de tormenta, .....	92
Figura 52. Velocidad y dirección de corrientes en condiciones de tormenta, .....	93
Figura 53. Velocidad y dirección de corrientes en condiciones de tormenta, .....	94
Figura 54. Nivel de agua en condiciones de tormenta,.....	95
Figura 55. Nivel de agua en condiciones de tormenta,.....	96
Figura 56. Morfología de playa en condiciones de tormenta, .....	98
Figura 57. Morfología de playa en condiciones de tormenta, .....	99
Figura 58. Perfil transversal 1.....	100
Figura 59. Perfil transversal 2.....	101
Figura 60. Perfil transversal 3.....	102
Figura 61. Perfil transversal 4.....	103
Figura 62. Perfil transversal 5.....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Anidación tortuga carey ( <i>Eretmochelys imbricata</i> ) periodo 2001-2018. ....	14
Tabla 2. Anidación tortuga blanca ( <i>Chelonia mydas</i> ) periodo 2001-2018. ....	15
Tabla 3. Tamaño de grano que suelen seleccionar las tortugas carey y blanca. ....	16
Tabla 4. Captura total para el estado de Campeche y Sabancuy. ....	17
Tabla 5. Captura por especie para el estado de Campeche y Sabancuy. ....	18
Tabla 6. Clasificación de la ingeniería ecológica (Tomada de van der Nat et al., 2016). ....	21
Tabla 7. Requerimientos de la línea de costa. ....	25
Tabla 8. Límites de los parámetros texturales. ....	31
Tabla 9. Intervalos de grado de antropización. ....	33
Tabla 10. Componentes armónicas. ....	39
Tabla 11. Tipos de rotura sobre taludes. ....	41
Tabla 12. Coeficientes para estimar el ascenso máximo en taludes permeables. ....	42
Tabla 13. Valores de $A_w$ y $B_w$ para la formulación de Losada. ....	43
Tabla 14. Valores de $a$ y $b$ . ....	45
Tabla 15. Condiciones límite para la clasificación del tipo de respuesta de la costa tras un dique exento. ....	45
Tabla 16. Balance de áreas de acreción y erosión. ....	47
Tabla 17. Tamaño medio de grano, utilizando una escala de colores para facilitar su interpretación. ....	56
Tabla 18. Clasificación (desviación estándar), utilizando una escala de colores para facilidad de interpretación. ....	58
Tabla 19. Asimetría, utilizando una escala de colores para facilidad de interpretación. ....	60
Tabla 20. Curtosis, utilizando una escala de colores para facilitar su interpretación. ....	62
Tabla 21. Valores de antropización parciales y coberturas correspondientes. ....	65
Tabla 22. Servicios ecosistémicos proporcionado por las playas y dunas. ....	67
Tabla 23. Servicios ecosistémicos proporcionado por los manglares. ....	69
Tabla 24. Servicios ecosistémicos proporcionado por los humedales. ....	70
Tabla 25. Resumen de resultados para el diseño de los diques exentos (parte 1). ....	82
Tabla 26. Resumen de resultados para el diseño de los diques exentos (parte 2). ....	82
Tabla 27. Resumen de resultados para el diseño de los diques exentos (parte 3). ....	83
Tabla 28. Parámetros de oleaje definidos para cada escenario de simulación. ....	86

## INTRODUCCIÓN

El litoral mexicano es de suma importancia debido a la riqueza y diversidad de sus recursos naturales. Es, además, una franja extensa que alcanza más de 11 mil kilómetros de línea de costa. México se encuentra delimitado por dos de los principales océanos, el Pacífico y el Atlántico, a lo largo de los que se distribuyen una gran variedad de ecosistemas y especies que habitan la zona costera mexicana (Morán, 2005).

La zona costera puede definirse como la franja en donde la tierra, el mar y la atmósfera interactúan. En este espacio confluyen aspectos demográficos, económicos, ecológicos y geográficos, donde el uso de la tierra y las características ambientales afectan directamente las condiciones ecológicas marinas y viceversa (De la Lanza y Cáceres, 1994).

La construcción de puertos implica la colocación de obras costeras que pueden alterar la configuración del litoral y generar problemas como erosión o crecimiento indeseado de las playas vecinas, alteración en la dinámica de las barras de arena, modificación de la hidrodinámica y alteración de los patrones de transporte litoral. Otros ejemplos de consecuencias no deseables incluyen: azolve de canales de navegación, erosión en zonas costeras pobladas e incluso la desaparición de especies marítimas. Es por ello que la mayoría de los países con costa dedican una gran cantidad de recursos en el estudio de la respuesta de la costa a la actividad antrópica (Reyes, 2015).

La playa de Sabancuy ubicada en la zona sur de la costa del estado de Campeche, presenta un severo proceso de erosión debido a la interrupción del flujo de sedimentos ocasionado por las obras de protección y rectificación de un canal de navegación artificial. El grado de erosión ha puesto en estado de riesgo el ecosistema de la playa, así como la integridad estructural de la Carretera Federal 180, la cual es una arteria principal que comunica a la Península de Yucatán con el resto del país. Dicho proceso erosivo ha amplificado el daño producido por las tormentas que periódicamente se presentan en la región, al grado que la playa ha perdido toda capacidad de autorrecuperación. Debido a esto, es necesario establecer un plan urgente de intervención para lo cual, a su vez, resulta imprescindible profundizar en el conocimiento del funcionamiento físico del sistema con el fin de diseñar estrategias adecuadas para la mitigación de la erosión y la consecuente recuperación del sistema.

Actualmente, la protección contra la erosión costera es una de las necesidades humanas en la que los ecosistemas pueden contribuir como parte de los servicios ambientales que proveen. Sin embargo, algunos ecosistemas no ofrecen el nivel de protección exigido por grandes y densas urbanizaciones. Por lo tanto, el servicio de protección dado por los ecosistemas, a menudo suele utilizarse en combinación con estructuras de ingeniería tradicionales para aumentar la protección de la costa (Van der Nat et al., 2016) y la certeza respecto de la resistencia de la estrategia de protección.

Una manera efectiva que se utiliza en la ingeniería para evaluar el éxito de las medidas de protección es la implementación de modelos matemáticos hidrodinámicos (Bates et al., 2005; Gallien, 2016). Sin embargo, se debe tener siempre presente que el modelado matemático, a pesar de ser válido, no reproduce exactamente la realidad, pero sí algo muy cercano a ella. Además, es importante resaltar que la precisión de los procesos numéricos depende de que tan

final sea la digitalización o discretización del área de estudio, la exactitud de los datos iniciales y el tipo de fenómeno a estudiar.

Para describir el comportamiento hidrodinámico en Sabancuy y observar los cambios derivados de la colocación de estructuras de protección, se tomaron en cuenta diferentes variables como la topografía, batimetría, marea y oleaje. Ellos sirvieron de insumos para llevar a cabo simulaciones matemáticas y conocer cuál es la respuesta de la zona frente a distintos escenarios de intervención.

Finalmente, el aporte principal de este trabajo de investigación es la generación de un catálogo de soluciones de ingeniería ecológica al problema de erosión en playas arenosas tropicales, tomando como caso de aplicación la costa de Sabancuy, México. Los resultados aquí presentados contribuyen al conocimiento de la evolución de la playa de Sabancuy y sirven como base para la toma de decisiones, cuando de manejo costero se trate.

# 1. ÁREA DE ESTUDIO

El estero de Sabancuy se localiza en la región oriental del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (APFFLT) en las coordenadas 18°59'10"N y 91°10'31"O (Carranza-Edwards, Gutiérrez-Estrada, y Rodríguez, 1975) y se divide en cinco áreas: El Pujo, San Nicolás, el poblado de Sabancuy, Ensenada Polcai y Santa Rosalía. En el suroeste, en la zona de El Pujo, el estero está conectado a la Laguna de Términos donde se forman llanuras de inundación pantanosas. En el límite noreste, cerca de Ensenada Polcai, se tiene un canal artificial que conecta con el Golfo de México que sirve a los pescadores locales (Villalobos-Zapata y Mendoza, 2010) (Figura 1).

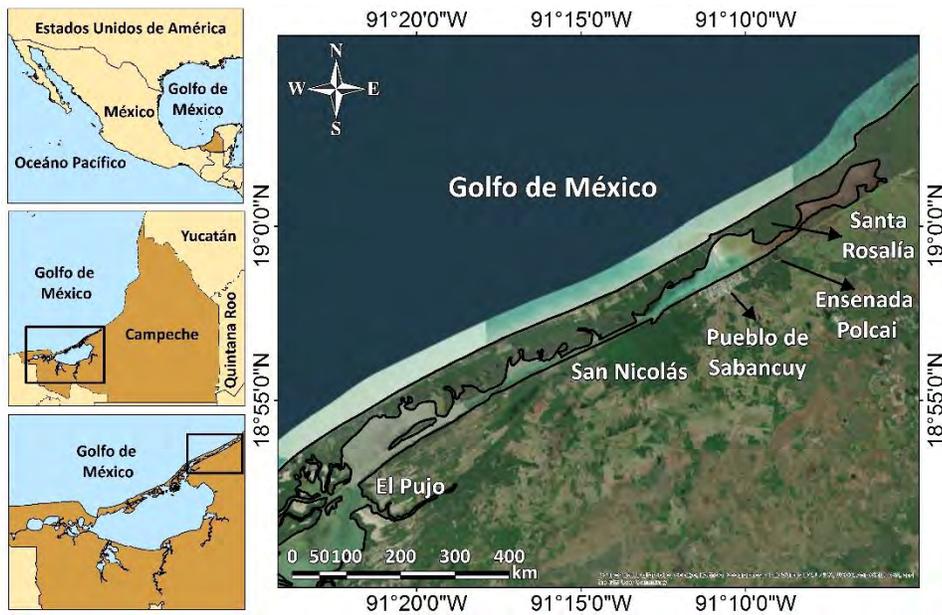


Figura 1. Localización de Sabancuy.

El clima de la región es cálido-húmedo con tres estaciones distintas: secas (febrero a abril), lluvias (mayo a octubre), y “nortes”, o tormentas de invierno (noviembre a enero) (Agraz et al., 2015). Durante la estación de secas, las playas generalmente se estabilizan, mientras que durante las temporadas de lluvias y nortes se reportan períodos de erosión (Torres et al., 2010).

La playa de Sabancuy es arenosa de baja y mediana energía (excepto en época de nortes), tiene poca pendiente aunque llega a ser dinámica lo cual cambia totalmente su conformación a través del año por efecto del transporte litoral que modifica continuamente el perfil de playa (Universidad Autónoma del Carmen, 2018).

La arena del área de estudio consiste principalmente en fragmentos de conchas carbonatadas de diferentes tamaños y altos contenidos de fragmentos líticos claros con poca abundancia de cuarzo y feldespato. Este tipo de minerales son depositados por la escorrentía de los diferentes ríos que bordean el área (López et al., 2014). Estas características convierten a Sabancuy en un sitio adecuado de anidación de tortugas de las especies carey (*Eretmochelys imbricata*) y blanca (*Chelonia mydas*) (Guzmán, 2001) y, debido a que son especies que se encuentran en el estatus de peligro de extinción se lleva a cabo el programa de protección y conservación de tortugas

marinas a través del campamento tortuguero “La Escollera” (Universidad Autónoma del Carmen, 2018).

El canal artificial en el estero de Sabancuy se construyó en 1980, para unir el estero con el Golfo de México y así mejorar las interacciones ecológicas de este hábitat, a través del intercambio de agua entre el estero y el mar para mantener y hacer más eficiente la operación pesquera existente, la cual es la principal actividad económica de la zona (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2001). Para estabilizar la boca y mantener la batimetría del canal, se construyeron escolleras en cada lado hacia el mar (Figura 2).



Figura 2. Canal de acceso al estero de Sabancuy.

El efecto de estas estructuras sobre la playa de Sabancuy se hizo evidente casi de inmediato. El transporte longitudinal de sedimentos, principalmente de este a oeste, fue interrumpido, causando sedimentación al este del canal y erosión severa al oeste del mismo (Figura 3). Un par de décadas después, la capacidad de retención de la escollera ubicada al este fue rebasada y la arena comenzó a llenar el canal (Gobierno del estado de Campeche, 2008).

Para mantener la operabilidad y garantizar el libre tránsito de los pescadores, el canal fue dragado en el 2007 y 2008. De igual forma, en el 2008 y con la justificación de que las escolleras se encontraban en proceso de deterioro, se realizaron trabajos de rehabilitación y prolongación de las estructuras. Luego, en 2012 se llevó a cabo un nuevo dragado en el canal y, en un esfuerzo por detener la erosión al oeste del canal y proteger así la Carretera Federal 180, se construyeron seis rompeolas semi sumergidos, paralelos a la costa (Posada, 2015). Desafortunadamente, tras todas las intervenciones los problemas de sedimentación y erosión no se resolvieron.

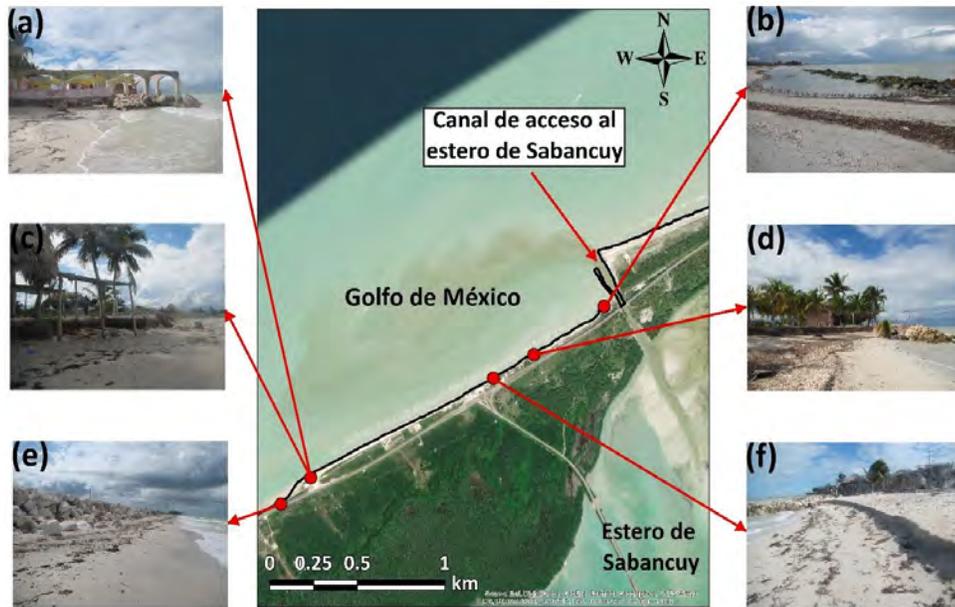


Figura 3. Ejemplos de problemas de erosión a lo largo de la playa de Sabancuy: (a) pérdida de instalaciones turísticas (restaurante destruido); (b) restos de rompeolas rocoso; (c) pérdida de instalaciones turísticas (palapas); (d) pérdida de playa seca frente al campamento de tortugas marinas; (e) muro de rocas para proteger la carretera; (f) pérdida de lugares turísticos.

Con lo mencionado, la importancia de la zona de Sabancuy radica en la mezcla de activos humanos (Carretera Federal 180 y el canal artificial) y alto valor ecológico (campamento de tortugas marinas “La Escollera” y playa de Sabancuy), por lo cual, es relevante diseñar y evaluar medidas de protección costera que ayuden al control y mitigación del intenso proceso de erosión presente en la playa de Sabancuy.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es estudiar las interconexiones entre el medio físico y los ecosistemas costeros con el fin de maximizar el servicio de protección provisto tanto por las actuaciones ingenieriles (rígidas y flexibles) como por los ecosistemas litorales (verdes o grises mejoradas) y así contar con bases sólidas para proponer estrategias e intervenciones que deriven en la mitigación de la erosión costera y sus daños asociados.

Para abordar el objetivo general, se establecieron cinco objetivos particulares que se detallan a continuación:

1. Determinar los cambios geomorfológicos en la línea de costa de la zona en estudio.
2. Analizar la evolución de los perfiles de playa y la granulometría del sedimento en las distintas zonas de cada perfil.
3. Simular matemáticamente el comportamiento de la línea de costa bajo las condiciones actuales y ante eventos hidrometeorológicos extremos.
4. Diseñar un catálogo de medidas basadas en principios de eco-ingeniería para solucionar la problemática detectada considerando los factores biofísicos y socioeconómicos de la zona de estudio.

### **3. ESTADO DEL ARTE**

#### **3.1. Importancia socioambiental de Sabancuy**

##### **3.1.1. Anidación de tortugas marinas en la playa de Sabancuy**

México es uno de los países con mayor número de tortugas marinas en el mundo, ya que de las ocho especies que existen, siete llegan a desovar en playas mexicanas (Bolongaro et al., 2010).

Las tortugas marinas son reptiles de respiración pulmonar, que viven durante casi toda su vida en el mar. En la estructura de su cuerpo, resaltan las extremidades transformadas en aletas y la forma del caparazón que evidencian su adaptación a la vida marina. Sin embargo, parte importante de su ciclo de vida lo pasan en las playas de las zonas tropicales y subtropicales del mundo; razón por la cual las playas arenosas son sumamente importantes para estos organismos (Briseño y Abreu, 1994).

El estado de Campeche, por su ubicación en el cinturón tropical y la riqueza de sus ecosistemas estuarinos, lagunares y marinos, es uno de los hábitats preferidos para las poblaciones de las tortugas marinas. Siendo importante para la anidación de tres especies, la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*), la blanca o verde (*Chelonia mydas*) y lora (*Lepidochelys Kempii*) (Guzmán, 2004).

El sistema lagunar estuarino Sabancuy, Isla del Carmen, Laguna de Términos y la región marina de la Sonda de Campeche, constituye el hábitat adecuado y preferido para algunas especies de tortugas marinas de la región, y durante alguna etapa de su ciclo de vida, las utilizan temporal o permanentemente como zonas de alimentación, reproducción, refugio y protección o en sus rutas migratorias (Guzmán, 2001).

Las tortugas marinas han sido, a lo largo de la historia, una fuente importante de recursos para las comunidades humanas que habitan en las zonas costeras. Su explotación indiscriminada, los pobres conocimientos sobre su biología y otras causas indirectas, han provocado el decline de muchas de sus poblaciones (Ferrer, Díaz-Fernández y Díaz 2007).

Las principales amenazas que afectan de manera directa a las tortugas marinas son la recolecta de huevos, la cacería, la pesca incidental, la depredación por animales silvestres y domésticos, las enfermedades y la captura directa. También existen amenazas de forma indirecta, como la alteración del hábitat, la contaminación en las playas y en el océano, la nitrificación, la alteración del medio donde habitan, los derrames petroleros, la erosión costera y la influencia de los turistas (Limpus et al., 2003).

Todas las especies de tortugas marinas que anidan en el estado de Campeche se encuentran en el estatus de amenazadas o en peligro de extinción y se encuentran protegidas por diversos instrumentos legales nacionales y tratados internacionales.

En México todas las especies de tortugas marinas se encuentran en la categoría de peligro de extinción, de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010. De igual forma están incluidas dentro de la lista roja de las especies consideradas en peligro o vulnerables de extinción de

acuerdo con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, siglas en inglés), en los apéndices I y II de la Convención sobre la Conservación de las Especies Migratorias y de Animales Silvestres (CMS, siglas en inglés) y en el apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, siglas en inglés) (Horrocks y Scott, 1991; Guzmán, 2004; Bolongaro et al., 2010).

La protección de tortugas en las playas campechanas comenzó en el año 1977, con el establecimiento del primer campamento tortuguero en el poblado de Isla Aguada, hasta llegar en la actualidad a once campamentos tortugueros ubicados estratégicamente en las playas más importantes de anidación de tortugas (Guzmán, 2006). Entre los campamentos distribuidos en la costa de Campeche, el campamento “La Escollera” que se localiza en la playa de Sabancuy, posee 24 km de playa asignada (del km 66 al km 80 del tramo carretero Isla Aguada – Champotón de la Carretera Federal 180). Estos 24 km de litoral asignado se encuentran distribuidos en 10 estaciones con separación de 2.4 km (Figura 4), como una manera de identificar la playa donde se tiene mayor anidación de tortugas. En esta zona se tiene bien identificada la anidación de la tortuga Carey y blanca (Universidad Autónoma del Carmen, 2018), las cuales utilizaron la playa para construir más de 19,000 nidos en conjunto durante el periodo de 2001 a 2018. En las Tablas 1 y 2, se muestra los datos de anidación de ambas especies de tortugas durante el periodo 2001 – 2018.



Figura 4. Localización de estaciones de anidación en el campamento Tortuguero La Escollera.

Tabla 1. Anidación tortuga Carey (*Eretmochelys imbricata*) periodo 2001-2018.

Año	Total de nidos	Nidos in situ	Nidos corral	Huevos incubados	Crías liberadas	% de eclosión
2001	372	10	362	54,777	34,467	62.9%
2002	314	44	270	49,964	25,797	58.7%
2003	252	8	244	3,696	19,923	54.7%
2004	188	14	174	24,945	16,808	67.4%
2005	172	10	162	24,772	14,086	56.9%

2006	227	30	196	32,465	19,739	60.8%
2007	108	7	101	14,265	9,282	65.1%
2008	200	7	193	27,372	19,004	69.4%
2009	84	3	81	11,463	6,404	55.9%
2010	284	62	222	47,658	28,882	60.6%
2011	203	27	176	24,778	16,574	66.9%
2012	204	70	134	14,354	9,369	63.3%
2013	233	143	90	5,632	4,006	71.1%
2014	484	446	36	68,250	45,950	67.3%
2015	295	295	0	41,300	35,105	85%
2016	227	227	0	31,780	27,103	85%
2017	334	334	0	46,760	39,746	85%
2018	649	649	0	90,860	77,880	85.7%
Total	4,830	2,386	2,441	573,577	450,125	

Tabla 2. Anidación tortuga blanca (*Chelonia mydas*) periodo 2001-2018.

<b>Año</b>	<b>Total de nidos</b>	<b>Nidos in situ</b>	<b>Nidos corral</b>	<b>Huevos incubados</b>	<b>Crías liberadas</b>	<b>% de eclosión</b>
2001	14	0	14	1,410	1,066	75.6%
2002	227	21	206	26,806	16,528	61.7%
2003	46	7	39	5,747	3,293	68.3%
2004	175	7	168	19,167	13,347	69.6%
2005	286	6	280	33,288	20,749	62.3%
2006	166	9	157	19,183	12,521	65.3%
2007	347	12	335	36,796	26,490	72%
2008	414	10	404	43,883	31,776	72.4%
2009	228	4	224	23,278	14,256	61.2%
2010	925	104	821	123,710	93,352	75.5%
2011	509	45	464	49,036	33,511	68.3%
2012	920	220	700	72,837	53,442	73.4%
2013	1,773	1,654	119	12,587	104,464	83.1%
2014	998	988	10	113,036	88,951	78.7%
2015	3,000	3,000	0	420,000	357,000	85%
2016	1,284	1,284	0	179,760	152,796	85%
2017	2,588	2,588	0	362,320	307,972	85%
2018	651	651	0	91,140	78,120	85.7%
Total	14,551	10,610	3,941	1,633,984	1,409,634	

La Figura 5 ilustra los nidos globales de las dos especies en las 10 estaciones de control para el periodo 2001 – 2012. En esta se refleja que de la estación 1 a la 4 es la zona de mayor anidación, siendo la tortuga blanca la especie que más anida.

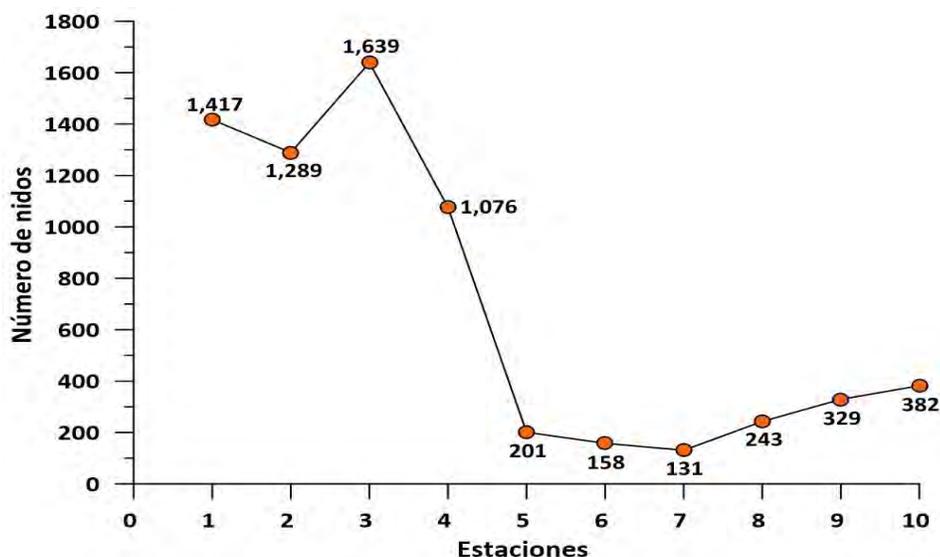


Figura 5. Distribución acumulada de anidación de tortuga Carey y blanca (2001 – 2012).

Un factor reportado en la selección del sitio de anidación es el tamaño de grano de la arena en las playas (Zavaleta, 2013), ya que la importancia de la selección de playas con tamaño de grano adecuado permite el éxito de la anidación.

En el caso de la tortuga blanca, aunque es una especie que puede tolerar un rango amplio de tamaño de las partículas del sustrato, granos de tamaño grueso podrían generar mayor estrés en las hembras al cavar el nido, además de que sustratos compactos y finos generan mayor gasto de energía en las hembras al cavar, presentando mayor probabilidad de derrumbamiento del nido (Chen, Cheng, y Hong, 2007).

Diversos trabajos han analizado el tipo de sedimento en diferentes playas donde anidan las tortugas Carey y blanca. En la Tabla 3 se resumen los tamaños de grano preferidos de acuerdo con lo publicado por diversos autores.

Tabla 3. Tamaño de grano que suelen seleccionar las tortugas Carey y blanca.

Especie de tortuga marina	Tipo de arena	Autor
Tortuga blanca ( <i>Chelonia mydas</i> )	Media	Hirth, 1971
	Gruesa	Stancyk y Ross, 1978
	Gruesa	Mortimer, 1990
	Gruesa	Buitrago y Ziegler, 2004
	Media	Bolongaro et al., 2010
	Media a gruesa	Fuentes et al., 2010
	Media	Márquez-García, Campos-Verduzco, y Castro-Soriano, 2010
	Media	Zavaleta, 2013
	Media	Cisneros, Roberts, y Martin, 2017
Tortuga Carey ( <i>Eretmochelys imbricata</i> )	Media a fina	Rincón-Díaz y Rodríguez-Zárate, 2004
	Media	García-Vicario, 2008
	Media	Bolongaro et al., 2010

### 3.1.2. Actividad pesquera

Una de las principales zonas de pesca en el Golfo de México se localiza en la región sur, donde se han identificado como funciones de fuerza los procesos costeros vinculados a las descargas de aguas continentales, en particular el papel de la laguna de Términos como gran sistema lagunar-estuarino que mantiene a la producción pesquera (Soberón-Chávez, 1985; Yañez et al., 1985).

El estado de Campeche se encuentra en el octavo lugar en volumen de captura a nivel nacional aportando el 2.73% en la producción nacional (SAGARPA, 2018).

Sabancuy es una localidad donde la pesca es una de las principales actividades económicas para la población, siendo uno de los motivos para la construcción del canal artificial en 1980.

En las Tablas 4 y 5, se muestra el volumen de captura de manera general y por las principales especies comerciales, a nivel estatal y correspondiente al puerto de Sabancuy, reportado por la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA), en el periodo 2000 – 2017.

Tabla 4. Captura total para el estado de Campeche y Sabancuy.

<b>Año</b>	<b>Captura total Edo. Campeche (kg)</b>	<b>Captura total Sabancuy (kg)</b>	<b>Porcentaje de captura en Sabancuy</b>
2000	30,066,966.78	2,467,068.50	8.2
2001	32,649,608.35	2,114,353.50	6.5
2002	31,792,205.55	2,021,906	6.4
2003	34,257,359.85	2,035,083.50	5.9
2004	30,696,021.60	2,467,581	8.0
2005	26,095,379.35	2,220,520	8.5
2006	26,631,211	2,213,607	8.3
2007	24,799,872	2,073,217.50	8.4
2008	23,673,877.50	1,859,850	7.9
2009	22,602,355.50	1,628,043	7.2
2010	30,654,187.50	2,084,134.50	6.8
2011	25,457,701.10	1,929,662	7.6
2012	30,256,852.75	2,548,643.50	8.4
2013	30,207,188.55	2,881,678.50	9.5
2014	36,121,469.03	2,841,138.585	7.9
2015	44,342,316.24	2,618,817	5.9
2016	42,566,006.17	2,861,110.10	6.7
2017	38,975,071.72	2,945,047.95	7.6
Promedio			7.5

Tabla 5. Captura por especie para el estado de Campeche y Sabancuy.

<b>Especie</b>	<b>Captura total por especie, Edo. Campeche (kg)</b>	<b>Captura total por especie, Sabancuy (kg)</b>	<b>Porcentaje de captura en Sabancuy</b>
Bagre	582,764.68	5,962.80	1.02
Bandera	26,677,668.55	5,776,655.20	21.65
Besugo	449,973.81	0	0.00
Bonito	8,008,806.32	675,342.25	8.43
Cabrilla	222,930.65	208,447.35	93.50
Calamar	166,874.90	0.00	0.00
Camarón	79,991,388.17	0.00	0.00
Caracol	37,923,563.48	9,976.40	0.03
Carpa	985,809.05	22,693.50	2.30
Cazón	8,197,973.34	759,677.90	9.27
Charal	21,157,250.09	0.00	0.00
Cintilla	1,147,640.37	72,960.80	6.36
Corvina	23,490,695.04	1,615,361.70	6.88
Esmedregal	1,648,425.29	415,814.05	25.22
Guachinango	9,853,994.14	1,837,926.20	18.65
Jaiba	53,328,421.28	6,271,525.30	11.76
Jurel	24,983,567.02	2,776,454	11.11
Lebrancha	3,130,390.05	387,123.35	12.37
Lenguado	38,068.50	7,653	20.10
Lisa	3,396,436.25	29,017.10	0.85
Mero	2,161,575.03	196,267.50	9.08
Mojarra	11,011,079	741,777	6.74
Ostión	13,038,983.50	0.00	0.00
Pámpano	2,167,968.29	329,698.90	15.21
Pargo	10,798,400.78	780,117.55	7.22
Pulpo	126,103,730.50	3,442,292.30	2.73
Raya	558,451.51	11,420.25	2.04
Robalo	40,843,659.49	3,139,787.75	7.69
Ronco	245,923.20	16,147.50	6.57
Rubia	4,873,547.80	1,350,230.40	27.71
Sierra	41,343,002.24	10,789,337.85	26.10
Tiburón	3,307,316.78	141,794.23	4.29
Trucha	9,371.42	0.00	0.00

Se tiene que Sabancuy en promedio ha aportado el 7.5% de la captura total durante los años 2000 a 2017, lo cual pudiera ser poco si se compara con los puertos de las ciudades de Campeche y del Carmen, los cuales son los principales puertos del estado. Sin embargo, al observar la captura por especie se tiene que en Sabancuy se capturan 6 especies con porcentajes mayores al

20% respecto al total estatal. Estas especies son: Cabrilla (93.5%), Rubia (27.71%), Sierra (26.10%), Esmedregal (25.22%), Bandera (21,65%) y Lenguado (20.10%).

### **3.2. Cambios morfológicos en la línea de costa**

La zona costera es un ambiente dinámico de la tierra y la única región a lo largo de todos los continentes donde interactúan la tierra, la atmósfera, el mar y el agua dulce. Su adaptabilidad le permite amortiguar la energía del oleaje, del viento y de las corrientes. Por ello, uno de los principales beneficios que brinda a la sociedad es su protección, a sus posesiones, a su riqueza ecológica y a sus medios de vida (Silva et al., 2018).

Los procesos que gobiernan la dinámica litoral como la variación de aporte de sedimentos y los cambios de energía originados por el oleaje y las corrientes marinas causan diferencias en el ancho, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año. Actualmente, el papel de la actividad antropogénica también ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento que se construyen vías de comunicación, infraestructura energética y petrolera, hoteles, casas, restaurantes, etc., en su parte continental (supraplaya), hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina (infraplaya) alterando el transporte litoral y la morfología de la playa (Torres et al., 2010).

La costa del estado de Campeche tiene una longitud de 425 km (INEGI, 2016). Prácticamente todo el litoral de Campeche se encuentra en proceso de erosión. Este proceso dominante se alterna con episodios de acreción en algunas playas y la dinámica costera obedece a los ciclos climáticos de la región. Así, durante la temporada de secas generalmente se estabilizan las playas, para reiniciar el proceso de erosión durante las lluvias y nortes. Pero es precisamente en la temporada de nortes en la que ocurren los episodios de erosión más severos (Bolongaro y Márquez, 2010).

En este contexto es importante y necesario conocer la dinámica de la zona costera, debido a que los cambios morfológicos de la línea de costa y la erosión de la playa, son los principales factores que impactan los ecosistemas costeros afectando el hábitat de diversas especies, y de igual forma estas alteraciones llegan a causar daños a la infraestructura.

En vista de lo anterior, se han llevado a cabo trabajos de investigación para conocer las características y evolución morfodinámica en zonas de la costa del estado de Campeche.

Entre los trabajos realizados se puede mencionar el de Palacio et al., (1999) en el cual realizaron un reconocimiento de los estragos causados por el paso del huracán Roxanne en la costa de la isla del Carmen, mediante la interpretación de imágenes verticales.

Con el propósito de conocer la dinámica costera del litoral norte del municipio del Carmen como parte del diseño y construcción de obras marítimas en el litoral y así como determinar el efecto que podrían tener en el entorno, PEMEX (2008) analizó la costa de la zona comprendida entre la desembocadura del río San Pedro - San Pablo y la desembocadura del río Champotón por medio de imágenes satelitales de diferentes fechas, con las que calcularon los gradientes de erosión que se presentan a lo largo de la costa.

De igual forma, Torres et al., (2010) realizaron estudios para conocer el desplazamiento de la línea de costa y determinar las tasas de erosión. La zona de estudio comprendió desde la Punta Disciplina hasta la desembocadura del río Champotón, en un periodo de análisis del año 1974 al 2008.

A su vez, Bolongaro y Márquez (2010) evaluaron el impacto de la erosión de las playas y el aumento en el nivel del mar en las costas de Campeche, sobre la anidación de las tortugas marinas *Eretmochelys imbricata* (tortuga carey) y *Chelonia mydas* (tortuga blanca). Para evaluar el proceso de erosión realizaron una comparación de la línea de costa con imágenes de satélite y una caracterización morfológica y sedimentológica durante tres temporadas del año: lluvias, nortes y secas.

Con el objetivo de comparar las variaciones morfológicas y sedimentológicas entre las playas del sur del Golfo de México y de la Riviera Maya; Carranza-Edwards et al., (2015) realizaron muestreos de sedimentos de playa, así como el levantamiento de perfiles topográficos en 23 estaciones de muestreo antiguas y recientes, con el fin de entender los posibles cambios que han sufrido las playas en zonas de crecimiento demográfico importante como son Tabasco, Campeche y el norte de Quintana Roo.

De igual manera, Canul (2015) analizó los procesos naturales que influyen en la evolución morfológica de la línea de costa del campamento tortuguero Chenkán, para evaluar los efectos de erosión y sedimentación en el litoral, para lo cual realizó mediciones de perfiles de playa, un análisis estadístico de muestras de sedimentos, digitalización de imágenes de satélite y la aplicación de un modelo numérico hidrodinámico de oleaje y transporte de sedimentos.

### **3.3. Manejo basado en ecosistemas**

Globalmente, las tormentas y otros agentes costeros amenazan a cientos de millones de personas e infraestructura en las costas y causan importantes impactos económicos (McGranahan, Balk, y Anderson, 2007).

Tradicionalmente, la protección de la zona costera se aborda desde una perspectiva de ingeniería. Esto implica la identificación de una amenaza o un conjunto de amenazas a la costa, haciendo uso de estructuras de ingeniería (como rompeolas, revestimientos de roca y diques) para reducirlas. En el proceso de construcción de estas estructuras, los ecosistemas naturales son destruidos y reemplazados por paredes de roca y revestimientos. Aunque estas estructuras han tenido éxito en la protección de áreas locales, a veces tienden a erosionar las zonas costeras vecinas y pueden dañar o destruir los ecosistemas circundantes. Posteriormente, un enfoque de ingeniería convencional puede conducir a impactos negativos en la morfología, la hidrodinámica, así como en el transporte de sedimentos y nutrientes (Cheong et al., 2013).

Cada vez más, se reconoce que los ecosistemas costeros juegan un papel importante en la protección de las costas, reduciendo la vulnerabilidad de las comunidades costeras ante los peligros costeros. Esto ha llevado a crecientes llamados para la incorporación de este tipo de ecosistemas en la planificación de la adaptación costera (Hale et al., 2009; Heath et al., 2009).

Los ecosistemas costeros, en particular los humedales y sistemas dunares, pueden desempeñar un papel fundamental en la reducción de la vulnerabilidad de las comunidades costeras, a través de sus múltiples funciones en la atenuación del oleaje, la captura de sedimentos, la acreción vertical y la reducción de la erosión (Spalding et al., 2014).

Dos razones principales pueden ser indicadas para la incorporación de la ecología y de los servicios ecosistémicos en la protección costera. En primer lugar, existe una fuerte necesidad de soluciones innovadoras, sostenibles y rentables de protección costera. En segundo lugar, existe la necesidad de medidas que minimicen los impactos antropogénicos de las estructuras de protección costera en los ecosistemas y que incluso podrían ofrecer posibilidades para mejorar el funcionamiento del ecosistema (Day, Psuty, y Perez, 2000).

La ingeniería ecológica para la protección costera se basa en gran medida en la teoría emergente de la conservación y restauración (Campbell et al., 2009; Gedan y Silliman, 2009; Halpern et al., 2007). Los objetivos de la ingeniería ecológica, como lo describe Mitsch y Jørgensen (2003) son:

1. La restauración de los ecosistemas que han sido perturbados sustancialmente por las actividades humanas, como la contaminación del medio ambiente o la alteración de la tierra.
2. El desarrollo de nuevos ecosistemas sostenibles que tengan tanto valores humanos como ecológicos.

La incorporación de elementos naturales de los hábitats en estabilización de la costa puede reducir los impactos ecológicos, sin afectar a su eficacia para detener la erosión (Bulleri y Chapman, 2010).

Sin embargo, los altos estándares de seguridad provocan la necesidad de combinar estructuras basadas en la naturaleza con estructuras de ingeniería civil tradicional. Es por ello que los conceptos de diseño de la ingeniería ecológica se han clasificado en cinco categorías según su contribución a mantener un ecosistema de forma saludable, productiva y condición resistente (Tabla 6) (van der Nat et al., 2016; Silva et al., 2017).

Tabla 6. Clasificación de la ingeniería ecológica (Tomada de van der Nat et al., 2016).

<b>Tipo de ingeniería ecológica</b>	<b>Definición</b>
Basado en la naturaleza	La conservación y restauración del hábitat son viables y pueden estar acompañadas de otras medidas para aumentar la resiliencia ecológica de los ecosistemas que brindan servicios ecosistémicos de interés.
Ecosistemas intervenidos por la ingeniería	Rehabilita los ecosistemas y tiene un nivel similar de complejidad natural. Las características naturales (por ejemplo, vegetación) pueden modificar los ecosistemas en cierto grado, como un medio de intervención para devolver los sistemas a una forma más natural.

Ingeniería flexible	Las medidas tradicionales de ingeniería dura se modifican para cambiar los procesos físicos y ciertos beneficios pueden obtenerse indirectamente de los procesos naturales que se mantienen (por ejemplo, la formación de dunas después de un relleno de playa). La ingeniería flexible solo depende en parte de los procesos ecológicos para tener éxito.
Infraestructura rígida ecológicamente mejorada	Se trata de una infraestructura civil tradicional que en su diseño incluye adaptaciones para imitar el funcionamiento natural del ecosistema.
Des-ingeniería	Las estructuras rígidas o flexibles se eliminan para recuperar el sistema y avanzar hacia un funcionamiento más natural.

Por lo tanto, la ingeniería ecológica deja tras la ingeniería convencional, y utiliza un método combinado de ecosistemas que son inherentemente auto-sostenibles y sensibles, generando interacciones positivas entre las especies. También proporciona posibilidades de diseño de uso múltiple que incorpora la protección costera, recreación y servicios de los ecosistemas (Cheong et al., 2013).

### 3.3.1. Humedales

La Convención de Ramsar aplica una definición amplia de los humedales, que abarca todos los lagos, ríos, acuíferos subterráneos, pantanos, marismas, pastizales húmedos, turberas, oasis, estuarios, deltas, bajos de marea, manglares, sitios artificiales como estanques piscícolas, arrozales, embalse y salinas (Ramsar, 2016).

Los humedales costeros a nivel mundial se consideran importantes para una amplia gama de servicios ecosistémicos, tales como proporcionar hábitats para los animales, captura de carbono, purificación de agua, recreación, protección contra inundaciones y control de la erosión (Barbier, 2013).

Estudios indican que la vegetación costera de los humedales impacta significativamente en la reducción del oleaje, medida por la reducción de la altura de ola por unidad de distancia a través de un humedal (Koch et al., 2009; Gedan et al., 2011; Shepard, Crain, y Beck, 2011). Tal evidencia se cita a menudo para apoyar la restauración de los humedales en todo el mundo con el propósito de proteger a las comunidades costeras de los huracanes y tormentas (Day et al., 2007; Barbier, 2013).

En general, se reconoce que los humedales tienen el potencial de reducir la energía de las olas, pero el grado en que lo hacen es objeto de debate y es difícil de evaluar. La comprensión de la interacción entre los huracanes y los humedales es necesaria en la planificación de protección contra inundaciones (Wamsley et al., 2010), lo cual podría ayudar a los encargados del diseño y construcción de diques considerar la inclusión o mantenimiento de la vegetación como un complemento importante para el refuerzo de la estructura (Borsje et al., 2011; Vuik et al., 2016).

Los humedales no disminuyen la masa de agua impulsada por la tormenta, si no que cambian el impulso y redistribuyen el oleaje. Esta compleja interacción entre una tormenta y los humedales

depende de la intensidad, la trayectoria y la velocidad de avance de la tormenta, así como el tipo de vegetación en los humedales, la altura y la densidad, al igual que de la batimetría y topografía local. Esta correlación ha sido analizada en algunos estudios mediante simulación matemática, como es el caso de Wamsley et al., (2010) en el sur de Louisiana empleando diferentes condiciones de tormenta en el humedal Caernarvon que se encuentra al este del río Mississippi y el humedal Barataria localizado al oeste del río y al sur de Nueva Orleans y por Zhang et al., (2012) utilizando las condiciones del huracán Wilma sobre un bosque de manglar ubicado el al sur de la Florida. De igual forma, se han llevado a cabo mediciones en campo para conocer el comportamiento físico de los humedales en la reducción del oleaje, ayudando en la defensa contra las inundaciones y reduciendo la erosión costera (Möller et al., 1999; Mazda et al., 2006; Quartel et al., 2007; McIvor et al., 2012)

### **3.3.2. Playas y dunas**

Las playas y dunas son los ambientes de sedimentación más importantes; es decir, son lugares donde hay mayor acumulación de gran parte de los sedimentos (granos de arena de distintos tamaños) que han sido transportados por corrientes marinas y vientos. Ambas son consideradas como ecosistemas extremadamente dinámicos y cambiantes que amortiguan las interacciones entre tres grandes sistemas: el mar, la tierra y la atmósfera (Moreno-Casasola, 2004).

La estructura porosa de las playas de arena y dunas, permite absorber y disipar la energía de las olas, además de proporcionar material adicional, que vuelve a entrar en el sistema de transporte marítimo y que contribuye a la formación de nuevos perfiles de playa después de los eventos erosivos.

Estos procesos naturales permiten a las costas adaptar su morfología, manteniendo su función de defensa costera natural con una mínima intervención humana necesaria, siempre que haya espacio para permitir esta dinámica natural.

A través de su capacidad de disipación de energía, las dunas de arena también pueden apoyar las defensas artificiales; lo que reduce el costo de las soluciones de ingeniería tradicional (Everard, Jones, y Watts, 2010).

A nivel mundial las playas y dunas de arena desempeñan un papel primordial en la defensa, las cuales actúan como amortiguador entre el mar y tierra adentro que generalmente se encuentra densamente poblado (French, 2001; Hansom, 2001; Arens y Geelen, 2006).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Evaluación de los cambios de la costa

Los cambios en la costa pueden deberse a uno o varios factores de diferentes orígenes (naturales o antropogénicos), escalas espacio-temporales y permanencia. Los cambios pueden ser temporales o continuos, ocurren repentinamente o durante décadas y son locales o regionales.

Para el análisis de la variación de la costa de Sabancuy, se utilizaron imágenes satelitales obtenidas de la base de datos de Google Earth para el período comprendido entre 2004 – 2015 (Figura 6). Se utilizó el software ArcGIS para geo-referenciar las imágenes, con base en puntos de control tomados *in situ*, posteriormente se convirtieron a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) para la zona 15 norte sobre un esferoide definido por WGS84 (*World Geodetic System 84*). A partir de estas imágenes georreferenciadas, la línea de costa se digitalizó manualmente considerando la zona intermareal interpretada en cada una de las imágenes.

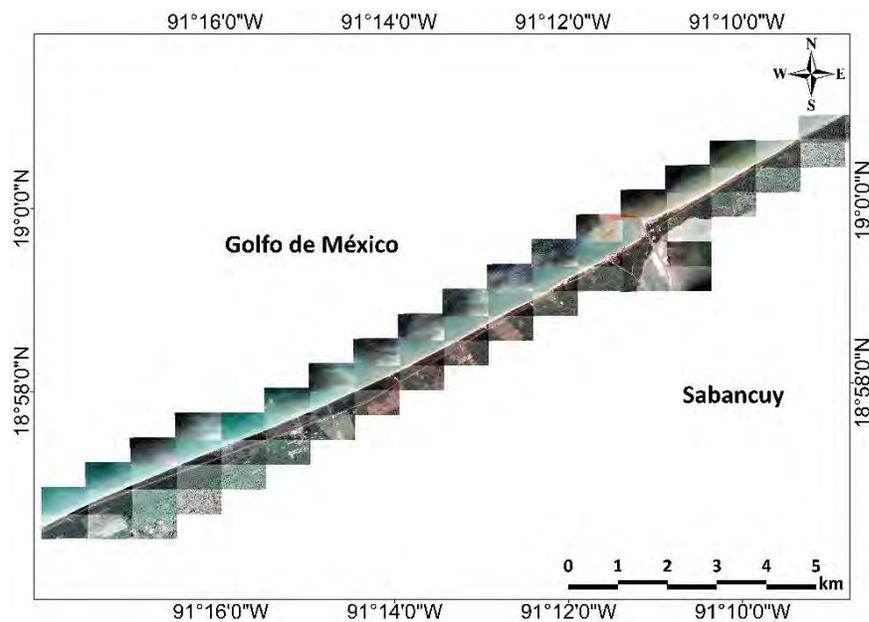


Figura 6. Mosaico de imágenes satelitales de la playa de Sabancuy.

Para determinar las áreas de erosión/acreción entre imágenes de diferentes años, se utilizó el método de áreas de referencia. Este método consiste en dibujar un polígono que cubra la zona intermareal en la imagen más antigua, el cual sirve como base de referencia. Los vértices de este polígono se toman como los límites del polígono intermareal para las imágenes posteriores. El área producida por la intersección de un polígono y la de la imagen posterior corresponde al desplazamiento de la costa, a partir del cual se calculan las áreas de erosión y acreción. En este estudio, los valores de desplazamiento negativo representan erosión y los valores positivos denotan acreción (Torres et al., 2010).

## 4.2. Determinación de la tasa de cambio de la línea de costa

La geometría y posición de la línea de costa son indicadores básicos con los cuales se puede evaluar los cambios en las regiones costeras.

Para determinar la evolución de la línea de costa en la franja litoral del área de estudio, se utilizó la herramienta *Digital Analysis Shoreline System* (DSAS) versión 4.3, como complemento del programa ArcGIS. El DSAS fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, siglas en inglés) y permite el análisis de las líneas de costa a partir de varios parámetros estadísticos.

La herramienta DSAS se basa en utilizar las líneas de costa referenciadas espacial y temporalmente para calcular parámetros de variabilidad entre ellas. Para llevar a cabo el análisis, se precisan cuatro elementos básicos, los cuales se describen a continuación (Thieler et al., 2009).

1. Geodatabase personal. Es una base de datos de Microsoft Access que puede almacenar, consultar y administrar datos espaciales y no espaciales. Todos los datos y ficheros empleados en DSAS deben gestionarse desde una geodatabase personal, que actúa como un fichero en el que se almacenan tanto los datos de entrada como los resultados obtenidos. Es por ello que se creó una geodatabase para la zona de estudio en la que se almacenó las líneas de costa correspondientes a cada año de análisis, la línea base y los transectos generados.
2. Líneas de costa. Todas las líneas de costa que se analizaron se unieron e importaron los archivos a la geodatabase creada.

Para el correcto funcionamiento del DSAS, es necesario que las tablas de atributos de los ficheros de entrada sigan la estructura definida por la herramienta (Tabla 7), las tres primeras filas (OBJECTID, SHAPE y SHAPE\_Length) son generadas automáticamente al importar los datos a la geodatabase, por lo que fue necesario crear en un nuevo campo el formato de fecha (DATE\_) puesto que las fechas de las líneas de costa deben expresarse como mes/día/año. De igual forma, se incluyó en la tabla de datos una columna que hiciera referencia a la incertidumbre de los datos (UNCERTAINTY) que básicamente representa el error que tienen las líneas.

Tabla 7. Requerimientos de la línea de costa.

<b>Nombre de campo</b>	<b>Tipo de dato</b>	
OBJECTID	Identificador de objeto	Autogenerado
SHAPE	Geometría	Autogenerado
SHAPE_Length	Doble	Autogenerado
DATE	Texto	Creado por el usuario
UNCERTAINTY	Cualquier campo numérico	Creado por el usuario

3. Línea base. Para realizar el análisis de las líneas de costa resulta necesario definir una línea localizada paralelamente a ellas, y que se emplea como referencia para medir la evolución o cambios registrados entre las diferentes líneas de costa. Al mismo tiempo, esta línea se toma como base a la hora de generar los transectos. En este trabajo la línea base se creó dibujando una línea paralela a la costa a unos 200 m tierra adentro.
4. Transectos. Con ayuda de DSAS se definió una serie de transectos perpendiculares a las líneas de costa, distribuidos de forma equidistante a lo largo de la línea base, que permiten medir las diferentes distancias registradas entre las intersecciones con las diferentes líneas de costa y la línea base. De igual forma, fue necesario definir la localización de los transectos, en este caso se eligió la opción *on shore* o tierra adentro, de manera que los transectos se crearon en la dirección opuesta para así poder intersectar a las diferentes líneas de costa.

Para garantizar que los algoritmos estadísticos ofrezcan una precisión aceptable, se establecieron 105 transectos ortogonales de 500 m de largo distribuidos cada 100 m de separación. Este fichero, al igual que las líneas de costa y la línea base, se colocó en la geodatabase.

Finalmente se obtuvo un conjunto de líneas de costa localizadas en paralelo a la línea base, y cruzadas por los diferentes transectos (Figura 7).

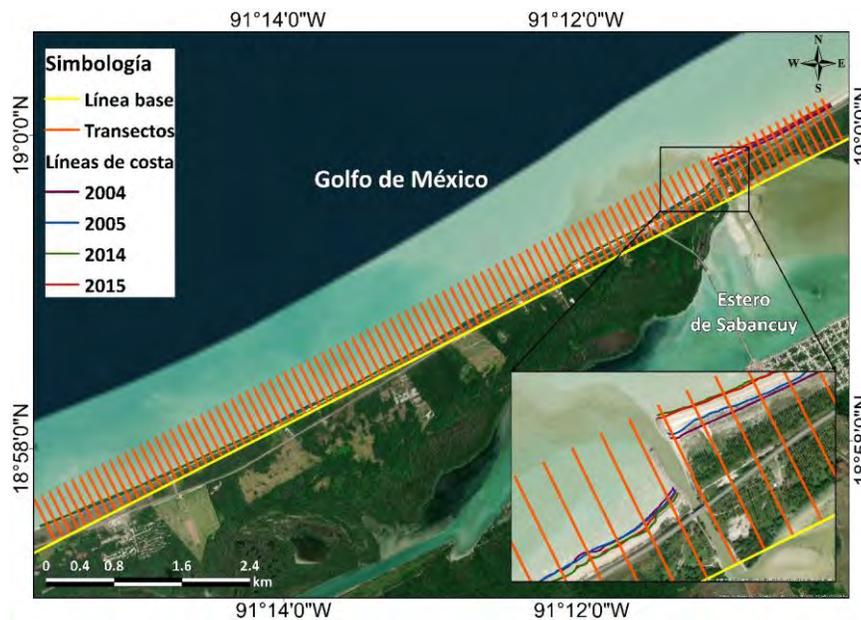


Figura 7. Transectos transversales utilizados para el análisis de la costa de la playa de Sabancuy.

De los diferentes estadísticos que ofrece el DSAS, en este estudio se han seleccionado los que más se ajustan a los objetivos y son los siguientes:

- *Net Shoreline Movement* (NSM). Expresa el movimiento neto de la línea de costa. Este estadístico muestra la distancia recorrida entre la línea de costa más antigua y la más reciente. Resulta de utilidad para definir una tendencia global.
- *End Point Rate* (EPR). Es una tasa, producto de dividir la distancia entre la línea de costa más reciente y la más antigua por el tiempo transcurrido entre los años estudiados.

### **4.3. Recolección y análisis de datos de campo para la descripción de la dinámica sedimentaria**

El levantamiento de perfiles de playa constituye un método práctico y rápido para caracterizar una playa y hacer el seguimiento de los cambios en su morfología (Posada-Posada y Rangel-Buitrago, 2013). Un perfil de playa o sección transversal es una medición de la pendiente y ancho de la playa que muestra si una playa presenta algún proceso de erosión o acreción (UNESCO, 2012).

El método que se empleó para el levantamiento de perfiles de playa consiste en los siguientes pasos:

- Localización del perfil. Con ayuda de imágenes de satélite se delimitó las zonas a medir considerando como punto intermedio el canal de acceso al estero, de tal modo que se obtuvieron dos áreas de medición contemplando una longitud de 5 km en ambos costados del canal, abarcando una longitud total de 10 km de playa.
- Número de perfiles. Se determinó medir un total de 26 perfiles de playa (13 en cada zona) de los cuales 22 tendrían un espaciado longitudinal a cada 300 m y 4 a una distancia de 1 km entre perfiles. La medición de los perfiles se llevó a cabo los días 29 de noviembre y 1 de diciembre de 2017.
- Levantamiento del perfil. Se empleó un GPS diferencial Leica de 2 bandas modelo GS15 con una estación base y una estación móvil. La estación base se fijó a un punto de control con coordenadas establecidas y con la estación móvil se tomaron puntos a cada 5 m sobre el perfil o cuando se tenía un cambio importante en la pendiente de la playa con el fin de obtener la información necesaria que permita conocer el relieve (Figura 8). Para cada perfil se tomó como punto de inicio la Carretera Federal 180, con excepción de 4 perfiles, que dadas las condiciones del terreno no fue posible acceder hasta la carretera. De igual forma, se hizo un registro fotográfico en cada perfil.

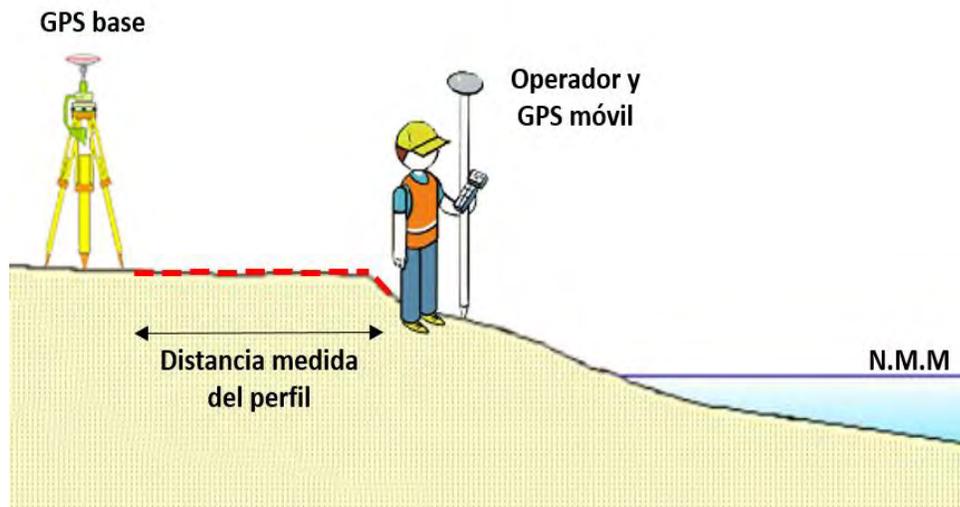


Figura 8. Esquema de levantamiento de perfiles de playa con GPS diferencial.

#### 4.3.1. Toma de muestras y análisis de las características granulométricas

En cada perfil medido se tomaron muestras de sedimento en tres zonas: duna, zona de lavado (zona donde existe un vaivén del agua por efecto del oleaje) y zona sumergida a una profundidad de 1 m. Se tomó un peso de 1 kg por cada muestra y se colocaron en bolsas de plástico identificadas con el número de perfil, la zona correspondiente así como la fecha del muestreo. En total fueron tomadas 70 muestras de sedimento en los perfiles localizados a 1 km de separación en la zona de lavado, ya que no se pudieron extraídas en otras partes.

Para quitar el exceso de agua del sedimento, cada muestra fue colocada en recipientes metálicos y secadas en hornos de convección a una temperatura de 75 °C durante 72 horas (Figura 9).



Figura 9. Secado de muestras de sedimento en hornos de convección.

Para determinar la clasificación de cualquier muestra de sedimento, es necesario realizar la prueba de cribado por medio de la cual se obtiene la curva de distribución granulométrica. En

este trabajo se tomaron 100 g representativos de cada muestra y mediante el equipo CAMSIZER (Figura 10) se hizo el análisis granulométrico.

Este equipo emplea el análisis dinámico de imágenes para medir simultáneamente la distribución granulométrica, la forma de las partículas y otros parámetros. El sedimento pasa entre la fuente de luz y dos cámaras digitales, las sombras proyectadas por las partículas son ópticamente registradas, digitalizadas y procesadas en el ordenador conectado al equipo, el cual realiza el análisis estadístico de la muestra en función del número de partículas detectadas o del volumen de la muestra (Ventura, 2014; Cortes, 2017).



Figura 10. Equipo CAMSIZER.

#### **4.3.2. Parámetros texturales del sedimento**

Una forma de conocer la dinámica sedimentaria es a través de los parámetros texturales (tamaño gráfico medio, desviación estándar gráfica inclusiva, asimetría gráfica inclusiva y curtosis gráfica), que se relacionan con la constancia energética de los procesos costeros (Folk, 1974).

Teniendo el análisis granulométrico de las muestras de sedimento de la playa de Sabancuy que se realizó a través del equipo CAMSIZER, se procedió a utilizar el programa SANDY (Ruiz-Martínez et al., 2016), que calcula la distribución del tamaño del sedimento y sus parámetros de textura a partir de una muestra de sedimento cribada.

La herramienta emplea un algoritmo que utiliza varios tipos de análisis estadísticos, entre los que se encuentran los propuestos por Folk y Ward (1957) para obtener las principales características de textura de la muestra de sedimento (tamaño gráfico medio, desviación estándar gráfica inclusiva, asimetría gráfica inclusiva y curtosis gráfica).

El tamaño medio de la muestra se toma como una medida de tendencia central. En una distribución normal, la media es el diámetro que representa el centro de gravedad de la distribución de frecuencia (Inman, 1952) y señala el modo y distancia de transporte, teniendo que cuanto más fino es el tamaño de sedimento indica una mayor distancia de transporte y cuando se tiene un tamaño de sedimento más grueso muestra que la sedimentación se debe a condiciones de alta energía.

La clasificación (desviación estándar) mide el grado de uniformidad o clasificación de las partículas de sedimento. La relevancia de estimar esta variable estadística radica en el deseo de medir la dispersión de los diámetros de los sedimentos con respecto a la media (Ruiz-Martínez et al., 2016).

La asimetría mide la falta de normalidad de la función de distribución, se refiere al desplazamiento de la media hacia la izquierda o derecha. Si la asimetría es positiva indica que hay un exceso de material fino, por el contrario, si la asimetría es negativa se tiene un exceso de material grueso (Folk, 1974).

La curtosis mide la angulosidad de la curva de frecuencia. Representa la dispersión de los tamaños de clases alrededor del valor promedio y está directamente relacionada con la clasificación. Una curva con un pico muy agudo (leptocúrtica) es resultado de un número de clases pequeño, es decir, la mayoría de las partículas tienen el mismo tamaño lo que sugiere una misma fuente y procesos constantes. En contraste, una curva extensa y aplanada (platicúrtica), responde a una amplia distribución de tamaños, reflejando procesos no constantes o diferentes fuentes (Folk, 1974).

El método estadístico de Folk y Ward (1957) para la obtención de los parámetros texturales, considera el 90% de la distribución de la curva de frecuencia acumulada. Su método requiere que el tamaño de los sedimentos se convierta de mm a unidades  $\phi$ , por lo cual fue necesario convertir los datos resultantes del análisis granulométrico aplicando el logaritmo base 2, lo cual permite minimizar el error en las colas de la curva de frecuencia acumulada ya que amplía la escala.

Las fórmulas de obtención de los parámetros que se emplean son las siguientes:

- Tamaño gráfico promedio ( $Mz\phi$ )

$$Mz\phi = \frac{(\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})}{3} \quad (1)$$

- Desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_I\phi$ )

$$\sigma_I = \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{4} + \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{6.6} \quad (2)$$

- Grado de asimetría gráfica inclusiva ( $SK_I$ )

$$SK_I = \frac{(\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{(\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (3)$$

- Curtosis ( $K_G$ )

$$K_G = \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (4)$$

El límite de los valores de los parámetros texturales se presenta en el siguiente cuadro (Tabla 8).

Tabla 8. Límites de los parámetros texturales.

Parámetro textural	Categoría	Límites
Tamaño gráfico promedio	Arena muy gruesa	$-1\phi$ a $0\phi$
	Arena gruesa	$0\phi$ a $1\phi$
	Arena media	$1\phi$ a $2\phi$
	Arena fina	$2\phi$ a $3\phi$
	Arena muy fina	$3\phi$ a $4\phi$
Desviación estándar gráfica inclusiva	Muy bien clasificado	$< 0.35\phi$
	Bien clasificado	$0.35\phi$ a $0.50\phi$
	Moderadamente bien clasificado	$0.50\phi$ a $0.71\phi$
	Moderadamente clasificado	$0.71\phi$ a $1\phi$
	Mal clasificado	$1\phi$ a $2\phi$
	Muy mal clasificado	$2\phi$ a $4\phi$
Grado de asimetría gráfica inclusiva	Extremadamente mal clasificado	$> 4\phi$
	Muy asimétrico hacia finos	$1\phi$ a $0.30\phi$
	Asimétrico hacia finos	$0.30\phi$ a $0.10\phi$
	Simétrico	$0.10\phi$ a $-0.10\phi$
	Asimétrico hacia gruesos	$-0.10\phi$ a $-0.30\phi$
	Muy asimétrico hacia gruesos	$-0.30\phi$ a $-1\phi$
Curtosis gráfica	Muy platicúrtico	$< 0.67\phi$
	Platicúrtico	$0.67\phi$ a $0.90\phi$
	Mesocúrtico	$0.90\phi$ a $1.11\phi$
	Leptocúrtico	$1.11\phi$ a $1.50\phi$
	Muy leptocúrtico	$1.50\phi$ a $3\phi$
	Extremadamente leptocúrtico	$> 3\phi$

#### 4.4. Delimitación de celdas litorales

Las celdas se pueden definir como unidades en las que se divide el litoral. En ellas los sedimentos se mueven dentro de cada celda y pasan de una celda a otra, dependiendo de la dirección de aproximación del oleaje y de las características que existan en los límites entre ellas (Anfuso, 2004). Forman el marco para comprender las fuentes, el transporte, los sumideros y el almacenamiento de arena en la zona costera a lo largo de la costa (Patch y Griggs, 2007).

Las celdas litorales para este estudio se delimitaron utilizando los criterios propuestos por van Rijn (2011):

- a) Geomorfología costera: Se localizaron barreras naturales (promontorios) y artificiales (grandes obras de protección costera) para el transporte de sedimentos.
- b) Aportes sedimentarios y transporte litoral: Se identificaron las fuentes de sedimentos, la dirección del transporte litoral y las rutas de depósito o salida de sedimentos.

Los límites de las celdas litorales se establecieron utilizando como referencia imágenes satelitales para localizar las características naturales de la costa y la infraestructura portuaria o de protección que representan un obstáculo en el transporte de sedimentos.

#### **4.5. Determinación del Índice Integrado Relativo de Antropización (INRA)**

Para estudiar el efecto de la transformación por acción humana sobre los diversos sistemas biológicos, son necesarios métodos sistemáticos, comparativos y cuantitativos, que permitan establecer el efecto de la antropización sobre los diferentes elementos de los ecosistemas para la toma de decisiones y medidas de acción.

El concepto de antropización se entiende como el grado de modificación de un ecosistema original por efectos antropogénicos, sumado a la dificultad que esa modificación representa para que el ecosistema se regenere y a la cantidad de elementos antropogénicos que contenga (Martínez-Dueñas, 2010).

Para estimar el grado relativo de antropización, el método propuesto por Martínez-Dueñas (2010) fue modificado y aplicado al área de estudio, considerando los siguientes pasos:

1. Definición de unidades de análisis (UA). Primero se definieron las unidades de análisis (UA). En este trabajo, cada UA se toma como la celda litoral en la que se encuentra la zona de estudio, considerando su ancho como la distancia entre la línea de costa y el asentamiento humano más cercano.
2. Delimitación de subunidades de análisis (SUA). Cada una de las UA delimitadas, se dividieron en partes más pequeñas que se llaman subunidades de análisis (SUA). Las dimensiones de cada SUA se establecieron en 250 m por cada lado.
3. Identificación de intervenciones. Se tomaron en cuenta todas aquellas intervenciones humanas que generan una merma o alteración en el ecosistema dentro de cada SUA. En este estudio, los cambios en el uso del suelo se consideran los principales indicadores de la antropización, por lo que el INRA se estimó para 1981 (un años después de la construcción de las escolleras) y 2015, a partir de los mapas de uso de suelo y vegetación de la CONABIO (2013, 2016b).
4. Valor de antropización. Definidas las coberturas o usos de suelo sobre el área de estudio, se evaluó el grado de alteración y se les asignó un valor entre 0 (sin modificación antropogénica) y 1 (totalmente intervenida).

5. Grado relativo de antropización. Identificados los valores de antropización para cada uso de suelo, se calculó el área que ocupa cada cobertura dentro de las SUA y se ponderó dicha superficie con el valor de antropización otorgado a cada uso de suelo. La asignación de valores para cada cobertura se basó en estudios previos (Martínez-Dueñas, 2010; Plaza-Ortega, Valencia-Rojas, y Figueroa-Casas, 2017) y se complementó con las opiniones de expertos. Tras el cálculo anterior, se computó el total de todas las áreas dentro de una misma SUA y se puso en relación con la superficie total de la SUA correspondiente, obteniendo un coeficiente que oscila entre 0 y 1.
6. Clasificación de las SUA: Los valores resultantes fueron clasificados de acuerdo a lo propuesto por Mateo-Rodríguez y Ortiz-Pérez (2001) en donde 0 equivale a una SUA con nula antropización y 1 a un alto grado de antropización (Tabla 9).

Tabla 9. Intervalos de grado de antropización.

<b>INRA</b>	<b>Grado de antropización</b>	<b>Características del paisaje</b>
0.75 - 1	Muy alterada.	Paisaje con matriz semi-artificial urbana con parches de vegetación secundaria de baja densidad.
0.50 – 0.75	Alterada.	Paisaje con matriz semi-transformada con parches de vegetación secundaria.
0.25 – 0.50	Semi-Transformada.	Paisaje con matriz natural con parches escasos de alteración.
0 – 0.25	Natural.	Paisaje con matriz sin alteración evidente.

7. Representación gráfica: Para facilitar la interpretación de grandes extensiones de la zona costera, se empleó un método basado en el concepto de unidad pictórica (píxel), donde las SUA analizadas se trazaron en un mapa con una interpretación de escala de color.

#### **4.6. Valoración de servicios ecosistémicos**

Un ecosistema puede definirse en el nivel más básico como una unidad natural de seres vivos (animales, plantas y microorganismos) y su entorno físico. Los elementos vivos y no vivos funcionan juntos como un sistema interdependiente, si una parte está dañada, puede tener un impacto en todo el sistema. Los ecosistemas pueden ser terrestres o marinos, interiores o costeros, rurales o urbanos. También pueden variar en escala de lo global a lo local (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2007).

Los ecosistemas naturales brindan una variedad de servicios directos e indirectos y beneficios intangibles para los seres humanos y otros organismos vivos (Costanza et al., 1997), a estos se les llama servicios de los ecosistemas y, debido a su relevancia para la sociedad, se han convertido en un foco de interés para científicos, responsables de políticas y partes interesadas durante la última década (Troy y Wilson, 2006). La provisión de servicios ecosistémicos está directamente relacionada con la funcionalidad de los ecosistemas naturales de los que dependen los procesos ecológicos y las estructuras de los ecosistemas (de Groot, Wilson, y Boumans,

2002). Por lo tanto, cuanto mejor conservados están los ecosistemas naturales, más servicios ecosistémicos pueden proporcionar a la sociedad (Balvanera et al., 2001).

El concepto de servicios de los ecosistemas ganó una mayor atención en el año 2005, cuando las Naciones Unidas publicaron su Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, siglas en inglés).

Si bien no existe un método único y acordado para categorizar todos los servicios de los ecosistemas, el marco de la MEA es ampliamente aceptado y se lo considera un punto de partida útil (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2007). La MEA identifica cuatro categorías amplias de servicios ecosistémicos:

1. Servicios de aprovisionamiento.
2. Servicios de regulación.
3. Servicios culturales.
4. Servicios de apoyo.

Bajo la presión para responder a problemas inmediatos, pero obstaculizada por la falta de información y análisis de alta calidad, los tomadores de decisiones a menudo tienen que tomar decisiones rápidas sin tener un conocimiento completo de las implicaciones a largo plazo de sus decisiones. Tener acceso a información confiable que describe los costos, valores y riesgos del cambio ambiental facilita una toma de decisiones más objetiva, transparente y mejor informada (Brander, 2013). El tipo de técnica de valoración a utilizar, depende del tipo de servicio ecosistémico a valorar, el ecosistema en sí mismo, así como la calidad y cantidad de la información disponible (Mendoza-González et al., 2012).

Por esta razón, hay interés en utilizar la información primaria existente para tomar las decisiones sobre los impactos en los ecosistemas que son de interés actual. Esta transferencia de información de valor de un contexto a otro se denomina transferencia de valor o transferencia de beneficios (Brander, 2013).

La transferencia de valor implica obtener una estimación del valor de los servicios de los ecosistemas a través del análisis de un solo estudio o grupo de estudios que se han realizado previamente para valorar bienes o servicios similares. La transferencia en sí misma, se refiere a la aplicación de valores derivados y otra información del sitio de estudio original a un sitio de análisis (Brookshire y Neill, 1992; Desvousges, Naughton, y Parsons, 1992).

Actualmente el impacto de las actividades humanas es generalizado en todos los ecosistemas naturales del mundo; sin embargo, las costas se han visto particularmente afectadas. México no es una excepción a esta tendencia global, ya que el turismo se ha desarrollado rápidamente a lo largo de la costa, especialmente durante las últimas décadas (Mendoza-González et al., 2012).

Para la zona de Sabancuy, se determinó cuáles son los ecosistemas dentro de nuestro sitio de estudio, y se calculó el valor económico para aquellos servicios ecosistémicos que se consideraron de mayor importancia (protección contra tormentas, control de la erosión, hábitat, refugio y guardería; suministro de agua, estética y recreación), con el fin de estimar el potencial impacto al haber un cambio en el uso del suelo.

Se emplearon diferentes trabajos encontrados en la literatura, así como bases de datos que proporcionaron la información necesaria para completar una valoración a partir de una transferencia de valor. Entre las bases de datos utilizadas se encuentra el Inventario de Referencia de Valoración Ambiental (EVRI, siglas en inglés) y de La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad (TEEB, siglas en inglés).

Los valores económicos de los servicios de los ecosistemas (ESV, siglas en inglés) que se encontraron corresponden a diferentes años y metodologías, por lo que fue necesario estandarizarlos para comparar los estudios.

Para estandarizar todas estas valoraciones económicas se ajustaron a dólares estadounidenses (US\$), utilizando el Índice de Precios al Consumidor (CPI, siglas en inglés) y de Paridad de Poder de Compra (PPP, siglas en inglés) para el año 2017, estos indicadores se obtuvieron del Banco Mundial. Finalmente el ajuste de los valores originales estimados en los diferentes estudios que se seleccionaron, se realizó utilizando la siguiente fórmula (Envalue, 2007; Mendoza-González et al., 2012).

$$ESV = \frac{(valor/CPI) \times 100}{PPP} \times EUA\ PPP \quad (5)$$

Donde:

Valor: Es el valor en la moneda y año del estudio original.

CPI: Es un índice de inflación de los datos de origen con base en el año 2017.

PPP: Es la paridad de poder adquisitivo entre la moneda original y el dólar estadounidense en el año 2017.

#### **4.7. Modelación matemática**

Un modelo se puede definir como la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso o uso, con el objetivo de entenderlo y generar sus respuestas ante diferentes acciones sobre él.

Algunos modelos tratan de describir el sistema natural por medio de fórmulas matemáticas y secuencias lógicas.

El modelo XBeach es la herramienta elegida para estimar la propagación del oleaje, la velocidad de corrientes y los cambios morfológicos. Esta herramienta fue desarrollada para calcular el comportamiento y la respuesta a variaciones temporales de la zona costera ante los impactos de ciclones y tormentas. El modelo consiste en una serie de fórmulas que representan la propagación de onda corta, ecuaciones no estacionarias para aguas someras, ecuaciones para transporte de sedimentos y la variación de la batimetría (Roelvink et al., 2009).

Para realizar las modelaciones matemáticas de la costa de Sabancuy los datos de entrada necesarios fueron los siguientes:

- Modelo topobatimétrico.
- Parámetros de oleaje medio y de tormenta.
- Datos de marea astronómica y de tormenta.

#### 4.8. Modelo topobatimétrico

Para la aplicación de un modelo matemático a un área determinada se requiere la creación de una malla de cálculo que contenga todas las características físicas necesarias.

El área de estudio se discretizó mediante una malla de celdas rectangulares de dimensiones variables, lo que permitió un mayor detalle en la zona de interés. El tamaño de celda fue de 5 a 50 m, dependiendo de la zona de interés, teniendo que en el área del canal de acceso al estero la malla se refinó a 5 m, mientras en las zonas más alejadas de la costa el tamaño fue incrementando hasta llegar a los 50 m. El dominio computacional usado abarca un área de 80 km<sup>2</sup> (aproximadamente 15.5 km de largo por 5.2 km de ancho) (Figura 11).

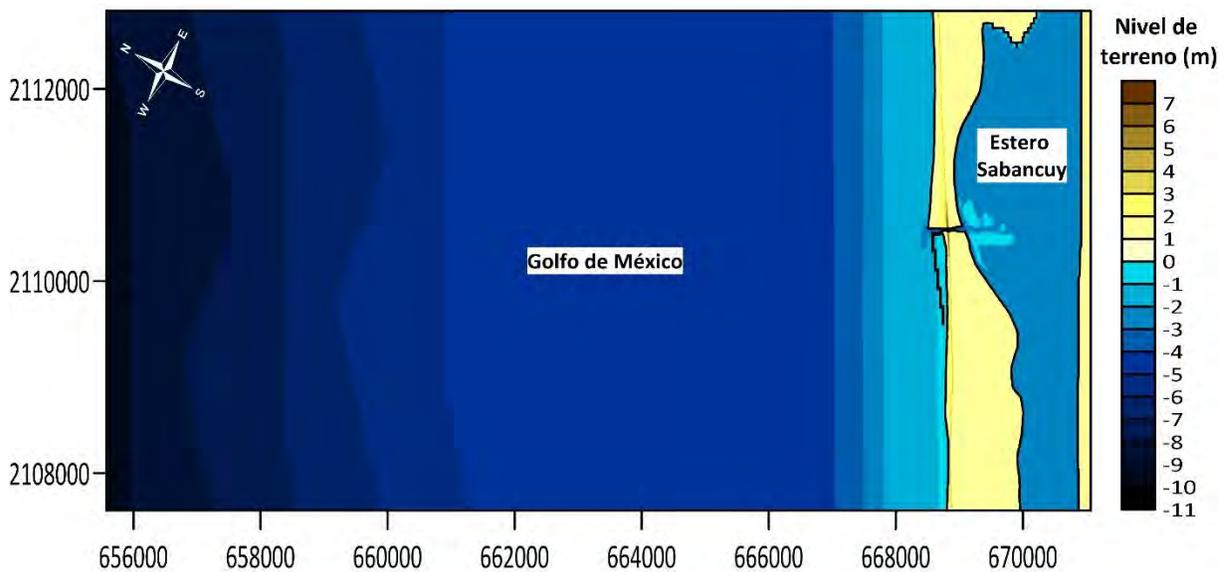


Figura 11. Modelo topobatimétrico de Sabancuy.

Para la elaboración del modelo topobatimétrico fue necesario contar con la información topográfica y batimétrica del área de estudio.

Los datos de batimetría del canal artificial y del interior del estero de Sabancuy se obtuvieron de trabajos previos (Gobierno del estado de Campeche, 2008). Respecto a los datos de batimetría en la zona correspondiente al Golfo de México, los datos se tomaron de cartas náuticas de la Secretaría de Marina (SEMAR, 2011).

Con relación a la topografía de la zona, se empleó un modelo digital de elevaciones (MDE) con resolución espacial de 20 m, esta información fue complementada con los datos recopilados de la medición de perfiles de playa.

#### 4.9. Análisis de oleaje

En la gran mayoría de las regiones alrededor del mundo, principalmente en los países en vías de desarrollo, las series de datos medidos en aguas someras no existen o no son suficientemente largas para caracterizar el clima marítimo (Bonanata et al., 2009). Por lo tanto, es necesario el

uso de series de datos provenientes de programas de reanálisis de olas en agua profundas para caracterizar el oleaje y posteriormente trasladar esos resultados hacia la costa mediante un modelo de propagación (Fernández, 2018).

En este trabajo, los datos usados para el análisis y caracterización del oleaje se obtuvieron del módulo de reanálisis del modelo WAVEWATCH III (WWIII) el cual posee valores en intervalos de tiempo de tres horas.

El WWIII es un modelo de tercera generación desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, siglas en inglés) y el Centro Nacional de Predicción Ambiental de los Estados Unidos (NCEP, siglas en inglés). Este modelo asume que las propiedades del medio (profundidades y corrientes) así como el campo de ondas, varían en escalas espaciales y temporales superiores a las escalas de variación de una única onda (Tolman, 2016).

Los datos de oleaje (altura de ola significativa  $H_s$ , periodo pico  $T_p$  y dirección de incidencia  $Dir$ ) se extrajeron del elemento de la cuadrícula de cálculo ubicado en las coordenadas  $19.3334^\circ$  N y  $-91.3333^\circ$  O, a 40 km de la costa, para el periodo comprendido entre el 01 de febrero del 2005 al 31 de diciembre de 2018 (Figura 12).

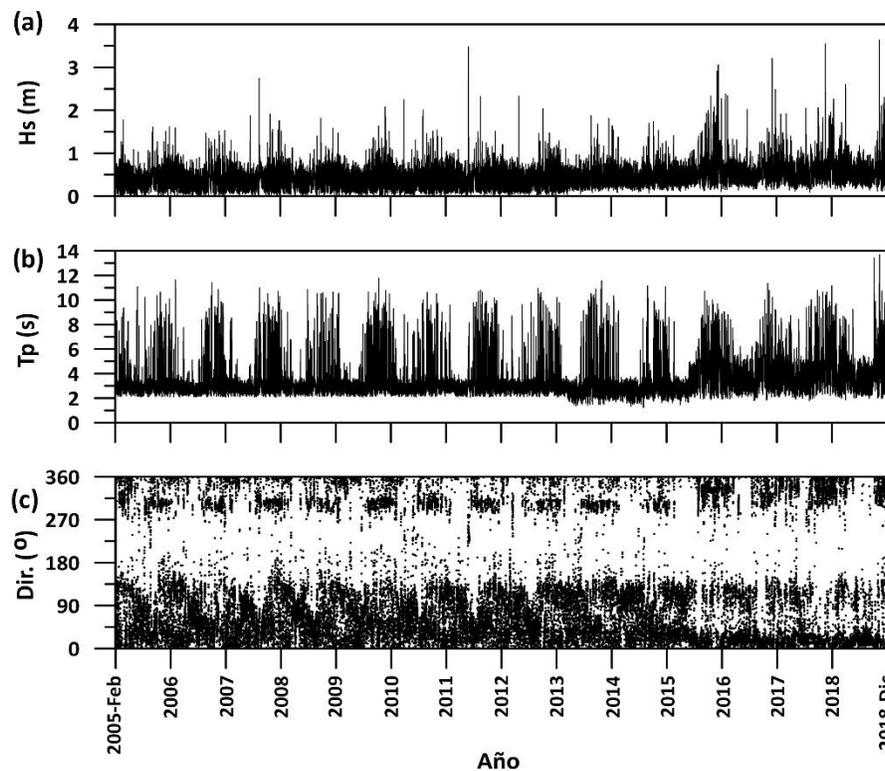


Figura 12. Serie de datos de oleaje de 2005 a 2018. (a) Altura de ola significativa ( $H_s$ ); (b) periodo pico ( $T_p$ ); (c) dirección de oleaje.

A partir de los datos del clima de ola, se caracterizó el régimen medio y extremal del oleaje, mediante el empleo del software CAROL, desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental (IH-Cantabria).

El régimen medio fue definido ajustando los datos a distribuciones del tipo Normal, Log-Normal, Weibull de Mínimos y Gumbel de Máximos, observando cual tenía el mejor ajuste de acuerdo con el coeficiente de correlación.

Para el régimen extremal, el CAROL ofrece dos métodos de caracterización: 1) método de máximos anuales utilizando las distribuciones Gumbel de Máximos y la función de Distribución Generalizada de Valores Extremos (GVE); y 2) método de Excedencias Sobre un Umbral (POT, siglas en inglés) usando la función GVE.

La elección entre un método y otro, depende de la longitud de la serie de datos a analizar, de tal manera que, si se cuenta con una serie de datos larga (más de 25 años) es conveniente utilizar el método de máximos anuales, pero si la serie a analizar es corta (menor a 25 años) se recomienda utilizar el método POT.

Para este estudio, el análisis extremal se hizo con el método POT, ya que la serie de datos analizada correspondía a 14 años.

El método POT se basa en suponer que los máximos que superan un cierto umbral y que están separados por un cierto intervalo de tiempo son independientes entre sí. Esto implica que si en un año ha habido tormentas importantes no es a causa de que los sucesos tiendan a concentrarse en ciertos años, sino que esta concentración ha sido por azar. Si las tormentas son independientes, el hecho de que en un año haya habido una gran tormenta no significa que la probabilidad de que en ese mismo año existieran otras tormentas importantes sea mayor o menor. Aceptada la hipótesis, la muestra a analizar estará constituida por los máximos locales o bien por los picos de tormentas que superen un determinado umbral de altura (Solano, 2009).

Por otro lado, mediante códigos de MATLAB, se estimó la probabilidad conjunta de altura significativa y periodo pico de ola, con la finalidad de obtener el periodo pico que caracteriza a la serie de datos del oleaje. De igual forma, para determinar la dirección de incidencia del oleaje se generaron rosas de oleaje.

#### **4.10. Condiciones de marea**

De acuerdo con la norma N-PRY-PUE-1-0-001/8 de la SCT que trata sobre los estudios de mareas, las mareas pueden ser de dos tipos: astronómica y meteorológica.

La marea astronómica es el movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso de las aguas del mar, producido por las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol, combinadas con la fuerza centrífuga y el efecto causado por la rotación de la Tierra.

La marea meteorológica o de tormenta es el aumento o disminución del nivel del agua respecto al plano horizontal de referencia, debido a la acción de la fuerza del viento ciclónico o huracanado y a los cambios de la presión atmosférica. En el caso del aumento de la marea, el viento sopla contra la costa y en caso de disminución de la marea, el viento sopla en la dirección opuesta (de tierra hacia el mar).

Para determinar el comportamiento de la marea en la zona de estudio se generó el pronóstico a partir de componentes de marea obtenidas de trabajos previos (Pulido, 2011) (Tabla 10).

Tabla 10. Componentes armónicas.

Parámetro	Componentes de la marea						
	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1
Frecuencia (1/s)	0.08051	0.08333	0.07899	0.08356	0.04178	0.03873	0.041552
Amplitud (m)	0.092	0.0232	0.0057	0.0027	0.1148	0.134	0.0172

De igual manera la marea de tormenta se tomó del trabajo presentado por Posada et al., (2010), en dicho estudio realizaron un análisis considerando todos los huracanes que han pasado por lo menos a 200 km de las costas de México en el periodo de 1949 a 2009. Posteriormente obtuvieron la marea de tormenta provocada por cada huracán en diferentes puntos de la zona costera, realizando un análisis extremal que permitió calcular las funciones de marea de tormenta (Figura 13).

Para la costa de Sabancuy se consideró una altura de marea de tormenta para un periodo de retorno de 10 años, teniendo una sobre elevación de 0.93 m.

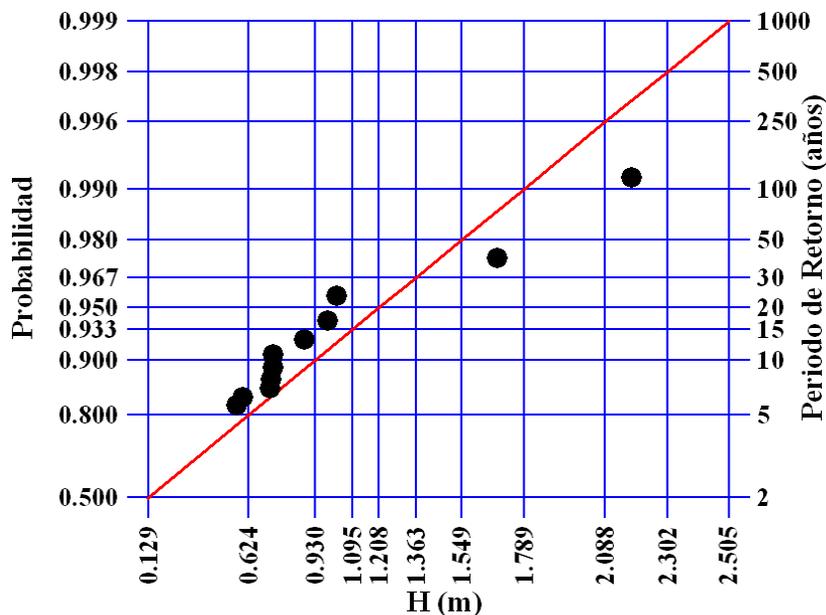


Figura 13. Función de marea de tormenta de Sabancuy.

#### 4.11. Propuestas para el control de la erosión

Actualmente la ingeniería ecológica está comenzando a proporcionar a los profesionales, desarrolladores y tomadores de decisiones opciones para el diseño y la gestión de estructuras artificiales en los entornos costeros para apoyar la biodiversidad y proporcionar servicios deseables del ecosistema (O'Shaughnessy et al., 2020).

A continuación, se presenta algunas propuestas para la mitigación de la erosión, las cuales se basaron en las características del área a proteger. De acuerdo con la clasificación de la ingeniería ecológica (van der Nat et al., 2016; Silva et al., 2017), se tiene una medida completamente natural donde la restauración del ecosistema ayudaría a la retención de sedimentos, un enfoque de ingeniería flexible con ingeniería rígida mediante realización de un relleno artificial de playa mejorado con vegetación de duna y apoyado con la colocación de estructuras que permitan la disminución de la energía de las olas.

#### **4.11.1. Restauración de manglar**

Los manglares son un tipo de humedal costero o estuarino, caracterizado por la presencia de árboles y arbustos adaptados a la sal, que crece a lo largo de la costa en latitudes tropicales o subtropicales en todo el mundo (Naturally Resilient Communities, 2015).

Como se ha mencionado, los manglares son capaces de absorber la energía y reducir la altura de las olas estabilizando las costas, es por ello que se contempla la restauración ecológica del manglar como una medida de protección para la playa de Sabancuy.

Desde el punto de vista técnico se debe entender que la restauración es un proceso complejo que implica recuperar las condiciones ambientales de un lugar. Para el caso de los manglares los factores que se deben tomar en consideración son los siguientes:

- Patrón e intensidad del oleaje.
- Hidroperíodo. Se refiere a la frecuencia, nivel y duración de las inundaciones.
- Microtopografía. Son las pequeñas variaciones en la topografía.
- Tipo de suelo.
- Salinidad del suelo

#### **4.11.2. Diseño de diques en talud**

En la playa de Sabancuy se han identificado problemas de erosión en la zona oeste del canal de acceso al estero, estos cambios son debidos a que se han modificado los patrones hidrodinámicos y de transporte de sedimentos como resultado de la construcción de las escolleras que protegen el canal de comunicación entre el estero y el mar.

Como parte de la propuesta para mitigar el proceso erosivo se ha considerado la construcción de una serie de diques exentos, que ayuden en disminuir la energía del oleaje y que permita la restauración y estabilización de la playa.

Los diques exentos son estructuras, paralelas generalmente a la costa, que protegen de la acción del oleaje un determinado tramo, y que son capaces de crear zonas de acreción en ella (Bricio, Negro, y Diez, 2007).

El diseño de los diques se consideró que fueran en talud, para lo cual fue necesario obtener las características geométricas (determinado en función del comportamiento hidráulico requerido) y mecánicas (determina el tamaño y peso de las piezas que conformaran el dique).

Para facilitar el diseño de los diques, se hizo un código en MATLAB, en donde se introducen los datos necesarios para los diferentes cálculos. Los parámetros de diseño y la formulación empleada en cada uno, son los que se describen a continuación.

#### 4.11.2.1. Altura de ola

Dado que las olas tienen una profundidad limitada en la zona donde se propone la colocación de los diques, la altura significativa de las olas se calculó con las ecuaciones:

$$H_s = 0.8 * h \quad (6)$$

$$H_s = 0.6 * h \quad (7)$$

Donde:

$H_s$ : Altura significativa de ola

$h$ : Profundidad de agua

#### 4.11.2.2. Número de Iribarren

El tipo de rotura se puede identificar por el llamado parámetro de semejanza de la rompiente o número de Iribarren, el cual se define como:

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (8)$$

Donde:

$Ir$ : Número de Iribarren

$\alpha$ : Ángulo de inclinación del talud

$H$ : Altura de ola

$L$ : Longitud de onda

Los tipos de rompiente y su valor asociado de número de Iribarren para un talud se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Tipos de rotura sobre taludes.

Nombre	Parámetro
Descrestamiento	$Ir < 0.5$
Voluta	$0.5 < Ir < 3$
Colapso	$Ir \approx 3.0 - 3.5$
Oscilación	$Ir > 3.5$

#### 4.11.2.3. Ascenso máximo (Run-up)

Es la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el máximo nivel que alcanza la superficie libre del agua sobre el paramento exterior de la estructura sometida a flujo oscilatorio.

Este valor es importante en el diseño de las estructuras costeras porque de él depende el nivel del francobordo ( $R_c$ ) lo que, a su vez, define si la obra será rebasable o no.

$$\begin{aligned}
 &= A Ir \quad \text{para } 1.0 < Ir \leq 1.5 \\
 Ru &= B Ir^C \quad \text{para } 1.5 < Ir \leq (D/B)^{1/C} \quad (9) \\
 &= D \quad \text{para } (D/B)^{1/C} \leq Ir < 7.5
 \end{aligned}$$

Donde los coeficientes A, B, C y D se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Coeficientes para estimar el ascenso máximo en taludes permeables.

Porcentaje de excedencia	A	B	C	D
0.1	1.12	1.34	0.55	2.58
2.0	0.96	1.17	0.46	1.97
5.0	0.86	1.05	0.44	1.68
10	0.77	0.94	0.42	1.45
33	0.72	0.88	0.41	1.35
50	0.47	0.6	0.34	0.82

Para el diseño de los diques, se consideró un Run-up con 10% de excedencia.

#### 4.11.2.4. Diámetro y peso nominal de las piezas del dique

Losada y Gimenez-Curto (1979), propusieron un modelo exponencial para la función  $\Psi$  mediante el cual analizaron la estabilidad de diques en talud de piezas sueltas sometidas a oleaje regular. La expresión propuesta, corresponde a la curva de mejor ajuste a los datos, es la siguiente:

$$\Psi = A_w (Ir - Ir_0) e^{(B_w (Ir - Ir_0))} \quad \text{para } Ir > Ir_0 \quad (10)$$

$$Ir_0 = 2.654 \tan \alpha \quad (11)$$

Donde:

$\Psi$ : Número de estabilidad.

$Ir$ : Número de Iribarren.

$A_w$  y  $B_w$  son coeficientes de ajuste que dependen del tipo de pieza, de la pendiente del talud, del nivel de avería y de la forma de colocación de las piezas. Sus valores se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de  $A_w$  y  $B_w$  para la formulación de Losada.

Tipo de pieza	Cota	$A_w$	$B_w$	$I_{r0}$	BC 95%	BC- $\Psi_{max}$
Escollera (Inicio de avería)	1.50	0.09035	-0.5879	1.77	1.41	0.0797
	2.00	0.05698	-0.6627	1.33	1.46	0.0462
	3.00	0.04697	-0.8084	0.88	1.35	0.0289
	4.00	0.04412	-0.9339	0.66	1.64	0.0285
Escollera sin clasificar (Daño nulo)	2.50	0.18340	-0.5764	1.06	1.57	0.1838
	3.50	0.18190	-0.6592	0.76	1.5	0.1523
	5.00	0.1468	-0.06443	0.53	1.52	0.1274
Tetrápodos (Inicio de avería)	1.33	0.03380	-0.3141	1.99	1.64	0.0649
	1.50	0.02788	-0.3993	1.77	2.27	0.0583
	2.00	0.02058	-0.5078	1.33	1.93	0.0288
Bloques 1.5A*A*A (Inicio de avería)	1.50	0.06819	-0.5148	1.77	3.28	0.1598
	2.00	0.03968	-0.6247	1.33	2.37	0.0554
	3.00	0.03410	-0.7620	0.88	1.77	0.0291

Con el número de estabilidad se obtiene el peso y tamaño de las piezas, de la siguiente manera:

$$W_{50} = \frac{\Psi \gamma_s H^3}{S_r^3} \quad (12)$$

$$S_r = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (13)$$

$$D_{50} = \left( \frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (14)$$

Donde:

$W_{50}$ : Peso de las piezas.

$\Psi$ : Número de estabilidad.

$\gamma_s$ : Peso específico del material de las piezas.

$\gamma_w$ : Peso específico del agua.

$S_r$ : Densidad relativa.

$D_{50}$ : Diámetro nominal de las piezas.

De igual forma se empleó la formulación propuesta por Kramer y Burcharth (2004), la cual se aplica para olas que tienen una profundidad limitada y cuando las condiciones más críticas suceden cuando el dique se encuentra ligeramente sumergido. La expresión propuesta es la siguiente:

$$D_{50} = 0.3 * Hc \quad (15)$$

Donde:

$D_{50}$ : Diámetro nominal de las piezas.

$H_c$ : Altura del dique.

El cálculo del peso y diámetro de los elementos del dique se hicieron usando ambos métodos para hacer una comparación y determinar cuál da mejores resultados.

#### 4.11.2.5. Transmisión

Se define como la relación entre la altura de ola transmitida y la altura de la ola incidente ( $H_{sr}$  y  $H_s$ ) o como la raíz cuadrada de la relación entre las energías transmitida e incidente ( $E_t$  y  $E_i$ ) promediadas en el tiempo.

Para el cálculo de la transmisión se empleó la formulación propuesta por van der Meer y Daemen (1994), donde consideran el uso del diámetro nominal  $D_{n50}$  para describir la influencia de la altura de la corona en la transmisión de las olas, también se incluye la influencia del francobordo y el ancho de corona.

$$K_t = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b \quad (16)$$

$$a = 0.031 \frac{H}{D_{n50}} - 0.024 \quad (17)$$

$$b = -5.42S_{op} + 0.0323 \frac{H}{D_{n50}} - 0.017 \left( \frac{B}{D_{n50}} \right)^{1.84} + 0.51 \quad (18)$$

$$S_{op} = \frac{2\pi H}{gT^2} \quad (19)$$

Donde:

$K_t$ : Coeficiente de transmisión.

$D_{n50}$ ; Diámetro nominal de los elementos que conforman el dique.

$H$ : Altura de ola incidente.

$B$ : Ancho de corona.

$S_{op}$ : Inclinación de las olas.

Para el diseño de los diques, se consideró hasta un 30% de transmisión como un valor aceptable.

#### 4.11.2.6. Reflexión

Es el resultado del rebote de las olas contra un obstáculo, cuando dicha reflexión es significativa, la interacción entre las ondas incidente y reflejada puede crear un estado de oleaje caótico.

La expresión usada en el cálculo de la reflexión es la propuesta por Allsop (1990).

$$K_r = \frac{aIr^2}{Ir^2 + b} \quad (20)$$

Donde:

$K_r$ : Coeficiente de reflexión.

$I_r$ : Número de Iribarren.

Los coeficientes a y b para la ecuación se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de a y b.

<b>Tipo de manto principal</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
Liso	0.96	4.80
Escollera (2 capas)	0.64	8.85
Escollera (1 capa)	0.64	7.22
Grandes rocas (2 capas)	0.64	9.64
Grandes rocas (1 capa)	0.67	7.87

#### 4.11.2.7. Respuesta de la costa

Los cambios morfológicos que tienen lugar en un tramo de la costa tras la construcción de un dique exento constituyen la respuesta del litoral a la alteración de las condiciones de contorno del tramo en cuestión, de la hidrodinámica local y de los patrones de transporte.

Para determinar dicha respuesta, se usó la relación entre las características geométricas de los diques que son: la longitud del dique (B) y la distancia de la estructura a la línea inicial de costa (X).

Esta relación empírica se esquematiza en la Tabla 15, mediante los valores límites que separan un tipo de respuesta de otro.

Tabla 15. Condiciones límite para la clasificación del tipo de respuesta de la costa tras un dique exento.

<b>Autor (año)</b>	<b>Tómbolo B/X &gt;...</b>	<b>Saliente B/X &lt;...</b>	<b>Respuesta limitada B/X &lt;...</b>
Ahrens y Cox (1990)	2.5	2.5	0.76

#### 4.11.3. Relleno de playa y restauración de dunas

Las dunas costeras son ecosistemas terrestres únicos situados en la transición entre ambientes continentales y marinos, ajustados en su formación, desarrollo y evolución a procesos naturales y fácilmente vulnerables frente a la acción humana (Ley Vega de Seoane, Gallego, y Vidal, 2007).

Actualmente entre los métodos utilizados para la regeneración de sistemas degradados o para la construcción de dunas en aquellas áreas donde éstas no existan, se encuentra el aporte de arena mediante maquinaria (Ley Vega de Seoane, Gallego, y Vidal, 2007).

Debido a que en la zona de Sabancuy se ha observado la pérdida de sedimento afectando la estabilidad de la costa, se propone realizar un relleno de playa, el cual consiste en la colocación mecánica de arena en la playa para incrementar la línea de costa o para mantener el volumen de arena en el sistema litoral.

Con el relleno de playa se pretende lograr varios objetivos:

- Incrementar el área usada para recreación.
- Ofrecer protección contra tormentas (reduciendo la energía de las olas).
- Proporcionar hábitat para especies en peligro de extinción.

El Método Holandés (Verhagen, 1992) fue usado en este trabajo para determinar el volumen de arena a colocar en la playa. Este método es básico y directo, y consta de cinco pasos:

- 1) Realizar mediciones costearas (durante al menos 10 años).
- 2) Calcular la pérdida de arena en metros cúbicos por año por sección costera.
- 3) Añadir 40% de pérdidas.
- 4) Multiplicar esa cantidad por una vida útil conveniente (por ejemplo 5 años)
- 5) Colocar el volumen resultante en algún lugar de la playa entre la línea de -1 m y el pie de duna.

En el caso de Sabancuy no se cuenta con un registro de mediciones de por lo menos 10 años, por lo que se decidió tomar un perfil de playa ubicado en la zona sin problemas de erosión (lado este) y hacer la comparación con un perfil localizado en la zona donde se propone el relleno (lado oeste) obteniendo así la tasa de erosión anual.

La presencia de vegetación, si bien no es esencial para la formación de dunas costeras, tiene una influencia importante en la morfología dunar. La cobertura vegetal participa en la fijación de las arenas y modifica las características de la superficie en relación al flujo del viento (Packham y Willis, 1997).

Una vez que se haya realizado la colocación de la arena a lo largo de la playa, se propone vegetar la zona recuperada mediante el uso de especies nativas de modo que ayuden atrapando la arena y así mantener las dunas.

Una de las causas más importantes de la degradación y desaparición de la cubierta vegetal es el pisoteo de los usuarios de la playa (Ley Vega de Seoane, Gallego, y Vidal, 2007). La afluencia masiva, especialmente durante los meses de verano a las playas, origina la pérdida de la vegetación, por lo cual se contempla la construcción de pasarelas transversales al cordón dunar que faciliten el acceso de las personas que hacen uso de la playa con el objetivo de evitar el pisoteo de la vegetación.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Evolución de la línea de costa

Las imágenes utilizadas para el análisis de los cambios en la línea de costa, obtenidas de la base de datos de Google Earth, tienen fecha de 28/02/2004, 11/02/2005, 09/12/2014 y 20/02/2015, respectivamente. Las fechas en las que fueron tomadas las imágenes corresponden a los meses de época de secas y nortes.

El área de estudio se dividió en dos secciones, como se muestra en la Figura 14. Con los datos disponibles, se analizaron 1.6 km de costa al este del canal y 9 km al oeste.



Figura 14. Secciones en la playa de Sabancuy.

Como resultado del análisis de las imágenes de satélite, se encontraron las áreas de acreción y erosión entre 2004 y 2015 (Tabla 16). Se observa acreción en la sección este de la playa, habiendo ganado 70,933 m<sup>2</sup> de playa seca. A su vez, la playa al oeste muestra una acumulación de 32,583 m<sup>2</sup> y una erosión de 48,349 m<sup>2</sup>, generando un retroceso de 15,766 m<sup>2</sup> de playa seca (Figura 15). Esto corresponde a la respuesta esperada de la costa a estructuras como las que se encuentran en Sabancuy. La zona con mayor afectación es la ubicada a un costado de la escollera oeste, abarcando una longitud de 1 km de playa.

Tabla 16. Balance de áreas de acreción y erosión.

Periodo	Zona	Acreción (m <sup>2</sup> )	Erosión (m <sup>2</sup> )	Balance de sedimentos (m <sup>2</sup> )
2004-2015	Playa este	70,933	0	70,933
	Playa oeste	32,583	48,349	-15,766



Figura 15. Detalle de las áreas de acreción y erosión en la zona del canal de acceso.

Los resultados estadísticos obtenidos del análisis de los transectos, 2004 – 2015 muestran una tendencia de acumulación, con un avance máximo de 74.14 m y una tasa de desplazamiento anual de 6.75 m para la sección este de la playa (Figura 16). Esta acumulación de arena se debe al bloqueo del transporte de sedimentos a lo largo de la costa producido por las escolleras del canal artificial.

Por otro lado, la sección oeste de la playa muestra procesos de acreción y erosión, aunque la erosión es mayor, con un retroceso máximo de 30.53 m con una tasa de desplazamiento anual de 2.78 m (Figura 17).

Estos resultados ayudan a entender cuál es la evolución ocurrida en la costa en un periodo de tiempo, así como determinar si existen patrones erosivos o acumulativos en los diferentes sectores estudiados.

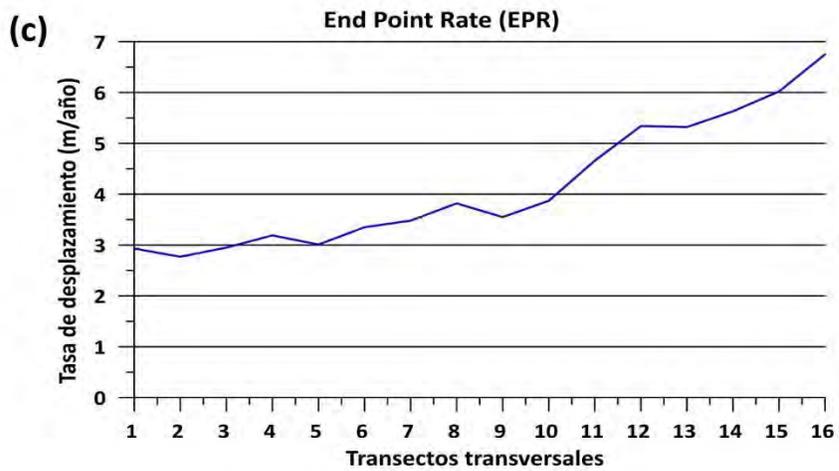
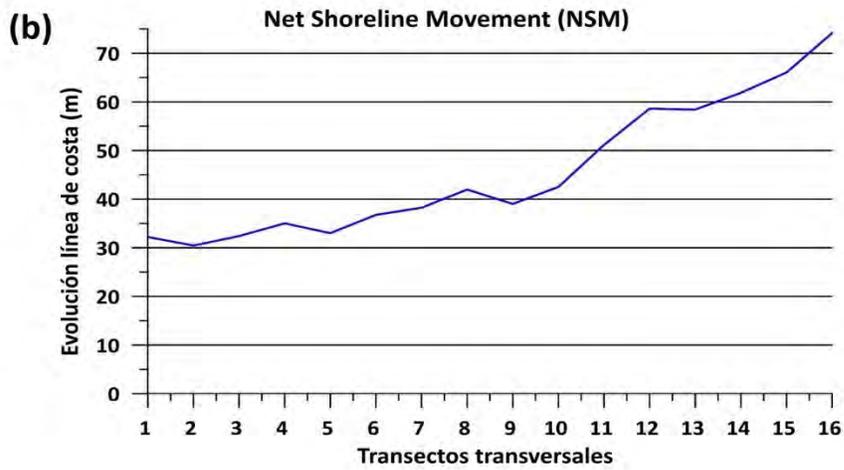


Figura 16. (a) Evolución de la costa entre 2004 y 2015 en la sección este de la playa; (b) NSM es el cambio neto de la costa y (c) EPR es la tasa anual de desplazamiento de la costa.

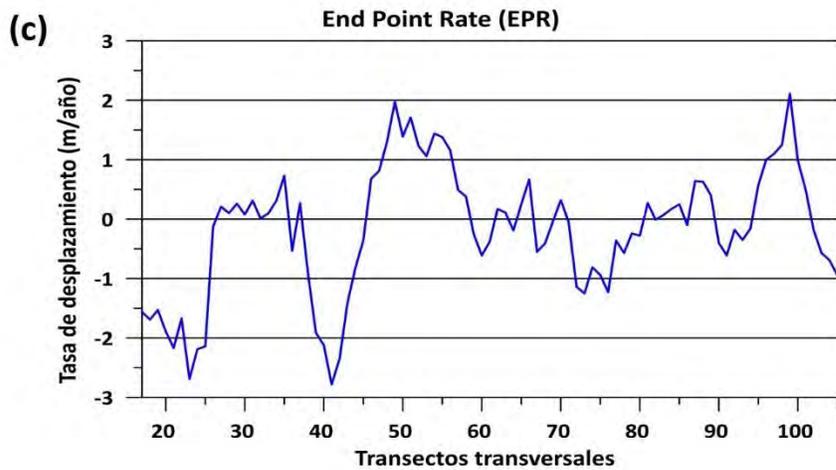
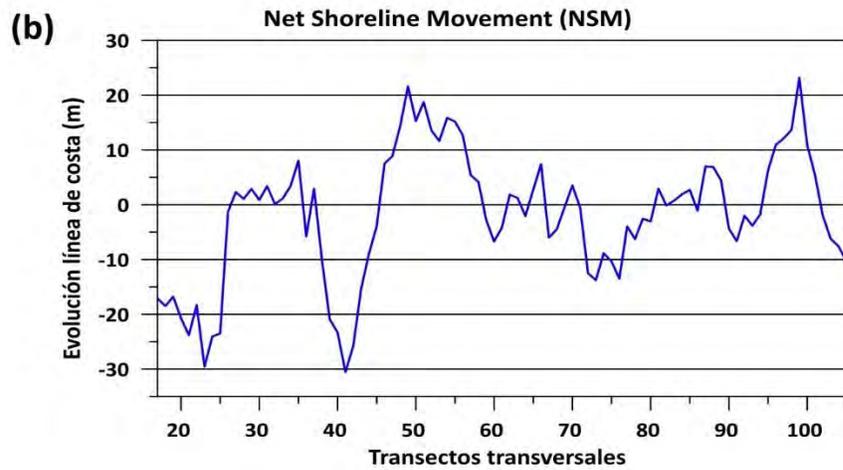
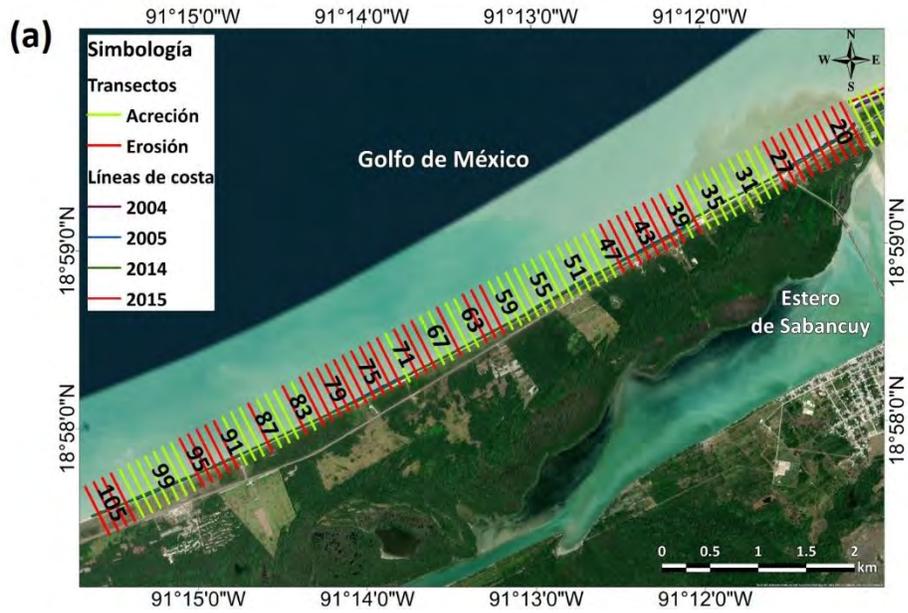


Figura 17. (a) Evolución de la costa entre 2004 y 2015 en la sección oeste de la playa; (b) NSM es el cambio neto de la costa y (c) EPR es la tasa anual de desplazamiento de la costa.

## 5.2. Perfiles de playa

Para conocer la morfología de la playa se realizó el levantamiento de 26 perfiles a lo largo de 10 km de playa (Figura 18).



Figura 18. Localización de perfiles de playa en la costa de Sabancuy.

Las mediciones muestran que el relieve emergido de Sabancuy es casi plano, teniendo elevaciones máximas que no rebasan los 8 m sobre el nivel medio del mar, las cuales se localizan hacia el puente que cruza el canal artificial (Figura 19).



Figura 19. Puente Carretera Federal 180, vía de acceso principal a la Península de Yucatán.

La costa este se caracteriza por la acumulación de arena llegando a tener anchos de playa seca (medido desde el límite de la carretera) de 76 m en promedio. Por el lado contrario, la costa oeste es donde se presenta un retroceso debido al problema de erosión, por lo que el ancho de playa se ve reducido presentando valores en promedio de 65 m. En ambos sectores de la costa se pudieron observar medidas de protección en la parte emergida de la playa, estas consistían en gaviones y enrocamientos sobre la duna, las cuales se registraron en el levantamiento de los

perfiles. En las siguientes Figuras (20 a 23) se muestran la forma y condiciones de algunos perfiles medidos en ambos sectores de la costa.

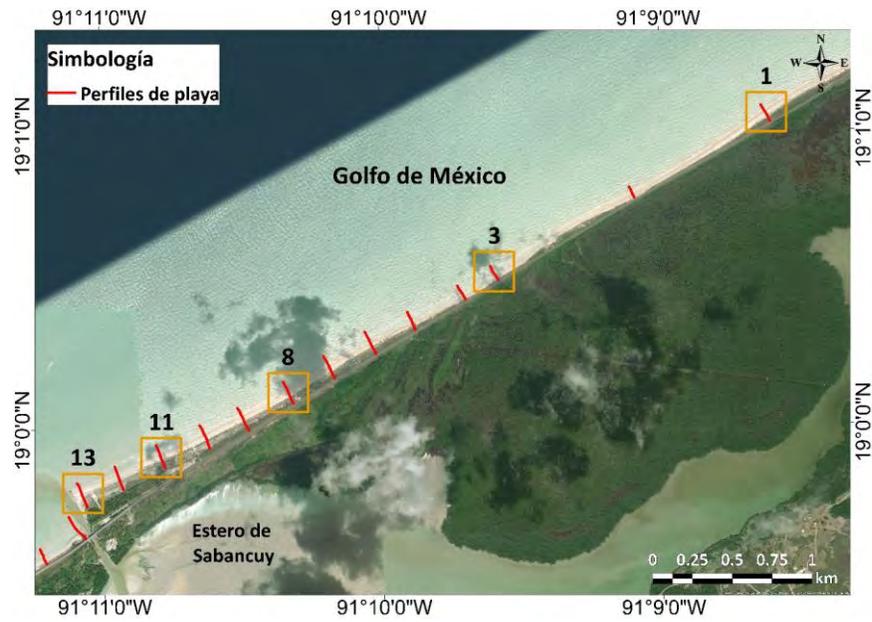
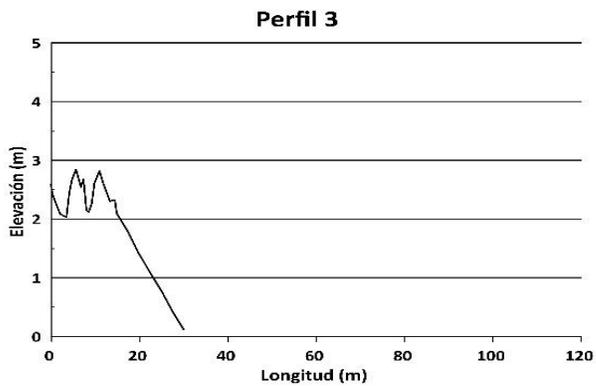
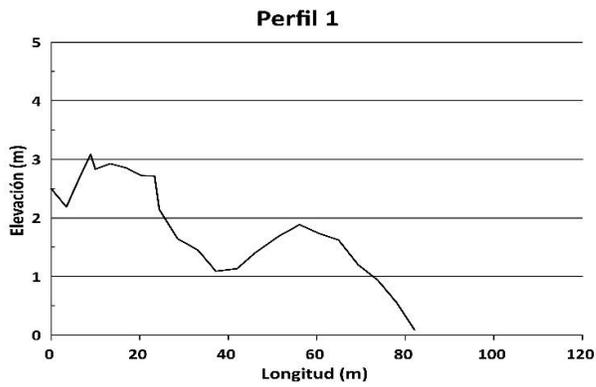


Figura 20. Perfiles medidos en la playa este.



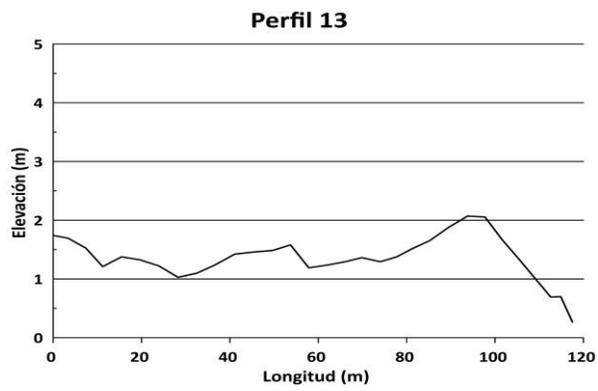
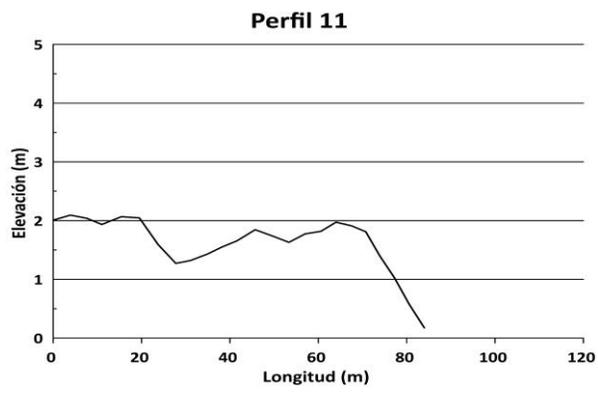
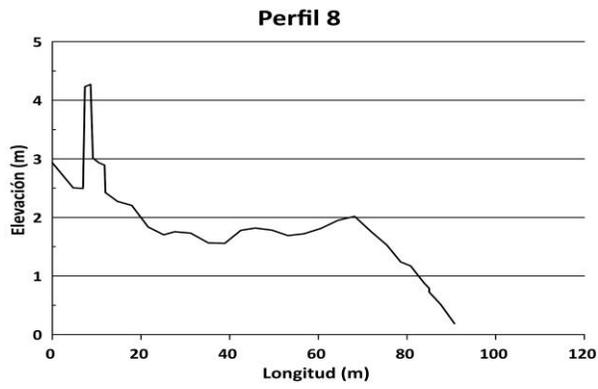
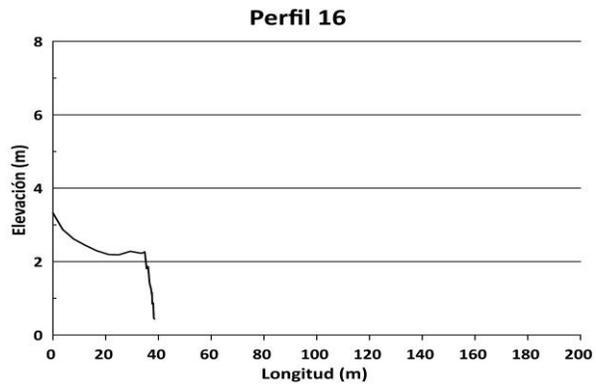
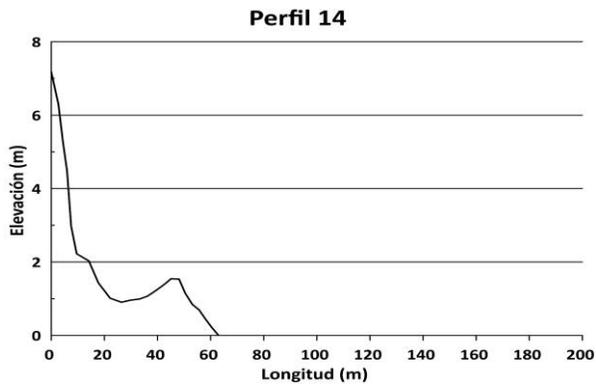


Figura 21. Perfiles de playa, lado este.



Figura 22. Perfiles medidos en la playa oeste.



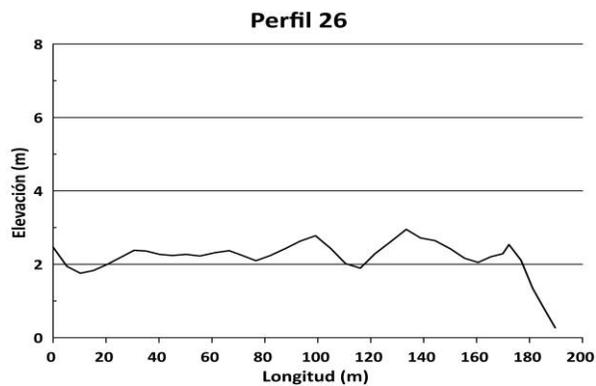
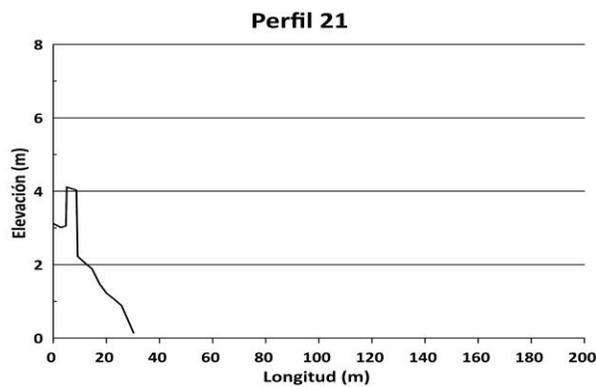
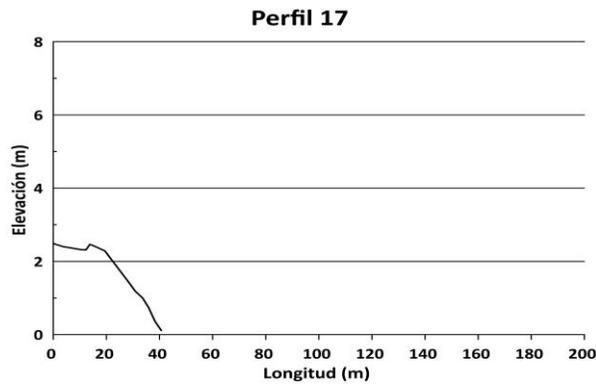


Figura 23. Perfiles de playa, lado oeste.

### 5.3. Sedimentos

Como resultado del análisis de las muestras de sedimento se tiene que el tamaño medio de grano en la playa este presenta diámetros que varían entre arena media a gruesa en la zona de duna. Para la zona de lavado se observa una predominancia de arena media, en tanto que para la zona sumergida se tiene arena muy fina, lo que nos indica que existe sedimentación en este sector de la playa.

Para la playa ubicada al oeste se observa que la duna está conformada por arena de grano medio. La zona de lavado muestra que la mitad de los perfiles cuentan con arena de tamaño medio, mientras que, la otra mitad presenta variaciones de diámetros que van de arena fina a gruesa.

Finalmente, en la parte sumergida se tiene que la mayoría de los perfiles presentan arena clasificada como fina (Tabla 17 y Figura 24).

Tabla 17. Tamaño medio de grano, utilizando una escala de colores para facilitar su interpretación.

Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina
-1 $\phi$ a 0 $\phi$	0 $\phi$ a 1 $\phi$	1 $\phi$ a 2 $\phi$	2 $\phi$ a 3 $\phi$	3 $\phi$ a 4 $\phi$

Perfiles playa este	Zona			Perfiles playa oeste	Zona		
	Duna	Lavado	Sumergida		Duna	Lavado	Sumergida
1		1.52		14	1.62	2.44	2.56
2		1.19		15	1.80	1.51	3.34
3	1.75	1.87	3.13	16	2.32	1.91	3.20
4	0.79	1.34	3.00	17	1.48	0.42	2.99
5	1.40	1.02	3.13	18	1.56	1.13	2.88
6	1.52	1.84	2.21	19	1.88	2.39	0.55
7	0.97	1.99	3.49	20	1.57	1.93	1.33
8	1.13	1.48	3.35	21	1.54	2.38	2.27
9	1.38	1.49	3.08	22	1.93	1.22	2.11
10	0.39	0.87	3.28	23	1.85	0.96	2.38
11	0.37	1.04	3.40	24	1.98	1.42	2.48
12	0.87	1.02	3.07	25		1.45	
13	1.15	1.17	3.04	26		1.36	

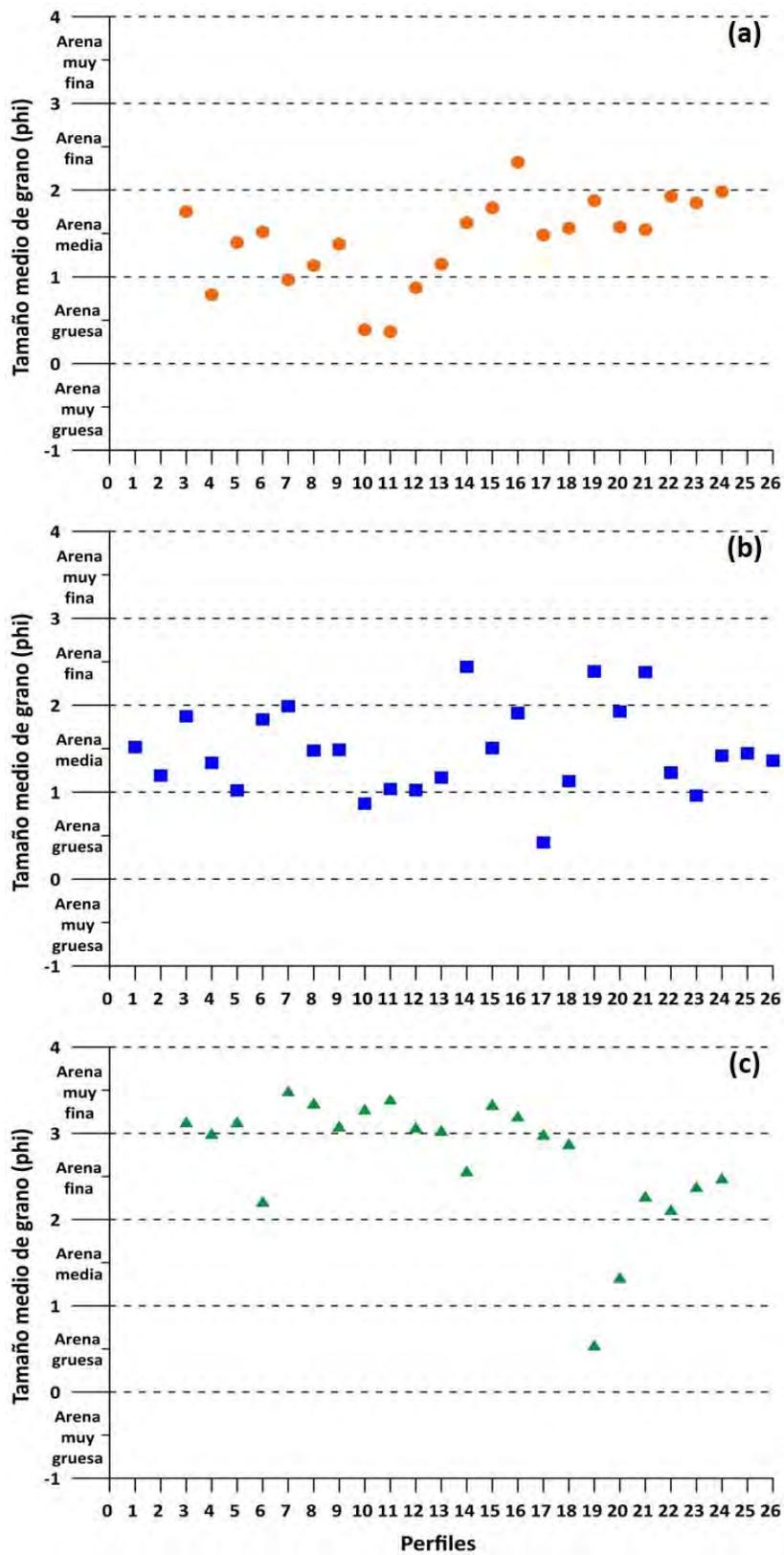


Figura 24. Variación del tamaño gráfico promedio de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.

Con respecto a la clasificación (desviación estándar), los valores muestran que el sedimento en todas las zonas del perfil (duna, lavado y sumergida) en ambas secciones de la playa, se presenta como muy bien clasificado, esto nos indica que existe uniformidad entre las partículas (Tabla 18 y Figura 25).

Tabla 18. Clasificación (desviación estándar), utilizando una escala de colores para facilidad de interpretación.

Bien clasificado	Muy bien clasificado
0.35 $\phi$ a 0.50 $\phi$	<0.35 $\phi$

Perfiles playa este	Zona			Perfiles playa oeste	Zona		
	Duna	Lavado	Sumergida		Duna	Lavado	Sumergida
1		0.09		14	-0.10	0.04	-0.34
2		0.10		15	0.07	0.03	0.15
3	0.10	0.01	0.15	16	0.18	0.00	0.15
4	0.11	0.05	0.29	17	0.09	0.08	0.17
5	0.10	-0.05	0.16	18	0.13	0.08	0.13
6	0.06	-0.06	0.13	19	0.12	0.24	0.01
7	0.09	-0.02	0.19	20	0.11	0.01	-0.16
8	0.04	-0.05	0.14	21	0.11	0.16	0.10
9	0.04	0.01	0.19	22	0.14	0.09	0.02
10	0.14	0.06	0.14	23	0.12	0.08	0.15
11	0.10	0.24	0.13	24	0.14	0.08	0.30
12	0.14	0.23	0.18	25		0.08	
13	0.10	-0.14	0.28	26		0.07	

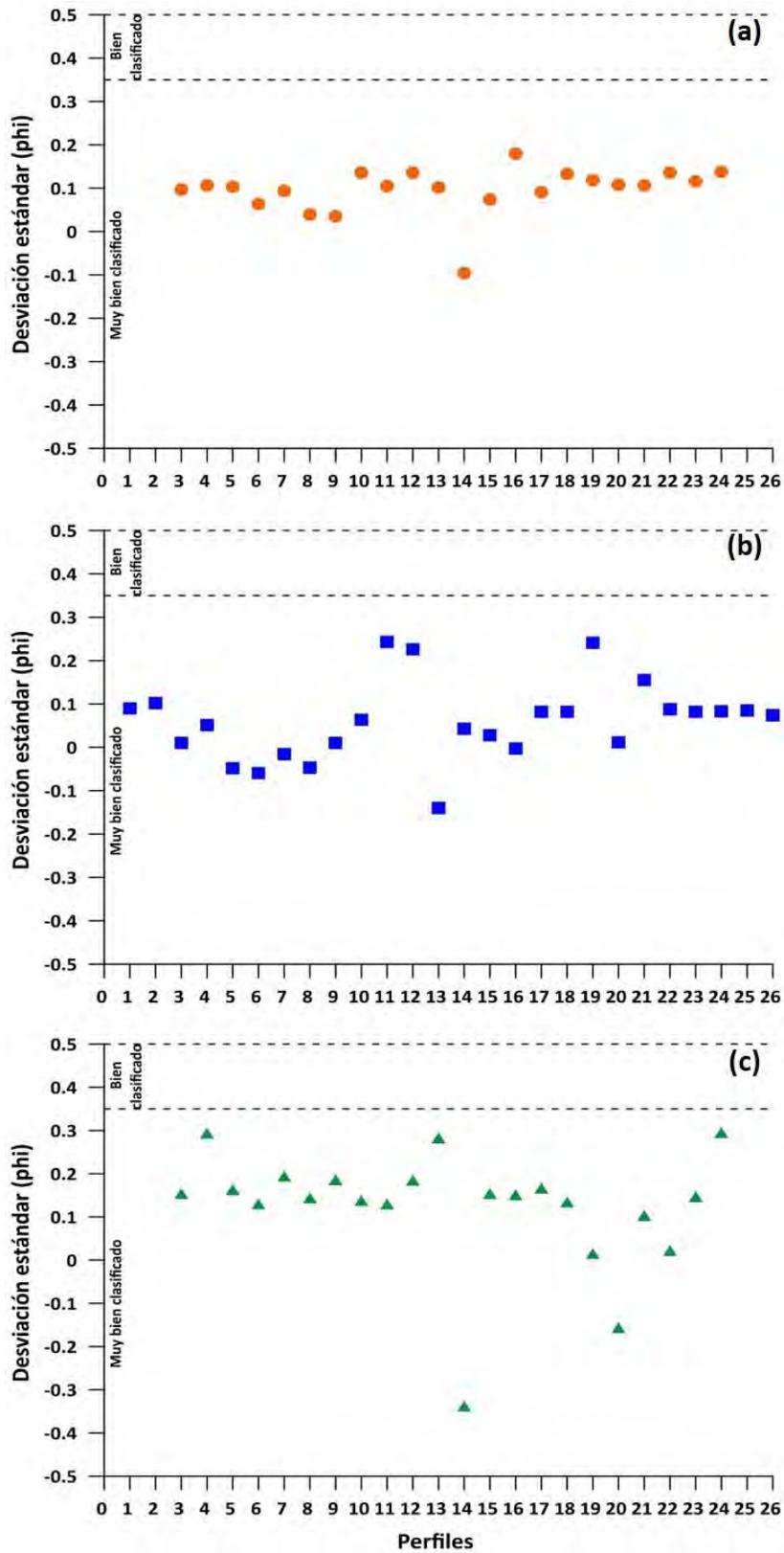


Figura 25. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.

Respecto al grado de asimetría, los datos señalan que en el sector este de la playa la duna presenta en la mitad de los perfiles sedimento que se puede considerar simétrico, lo que indica que en la arena existe un balance entre granos de fracciones finas y gruesas. Para la zona de lavado se tiene una clara tendencia de arena hacia gruesos, esto es debido a la alta energía de las olas en este sector. En tanto que, para la zona sumergida, los sedimentos se clasifican entre simétricos y asimétricos hacia finos, lo que sugiere que en esta zona de la playa existen procesos de sedimentación.

Para el sector oeste de la playa se observa que la arena ubicada en la duna tiende a la simetría en más de la mitad de los perfiles, resultando los perfiles localizados en el área cercana al canal de acceso, los que muestran variación de asimetría hacia finos y hacia gruesos. En la zona de lavado, al igual como sucede en la duna, los perfiles cercanos a la estructura del canal presentan cambios en el sedimento que van de muy asimétricos hacia finos hasta asimétrico hacia gruesos, en los perfiles restantes se tiene una predominancia hacia la simetría. En el caso del área sumergida el comportamiento es similar al que se observa en el sector este de la playa, en donde la arena se clasifica entre simétrica y asimétrica hacia finos (Tabla 19 y Figura 26).

Tabla 19. Asimetría, utilizando una escala de colores para facilidad de interpretación.

Muy asimétrico hacia gruesos (MAHG)	Asimétrico hacia gruesos (AHG)	Simétrico (S)	Asimétrico hacia finos (AHF)	Muy asimétrico hacia finos (MAHF)
-0.30 $\phi$ a -1 $\phi$	-0.10 $\phi$ a -0.30 $\phi$	0.10 $\phi$ a -0.10 $\phi$	0.30 $\phi$ a 0.10 $\phi$	1 $\phi$ a 0.30 $\phi$

Perfiles playa este	Zona		
	Duna	Lavado	Sumergida
1		-0.103	
2		-0.259	
3	0.034	0.109	0.103
4	-0.137	-0.213	0.253
5	-0.067	-0.347	0.067
6	-0.116	0.102	0.220
7	-0.233	0.149	0.189
8	-0.093	-0.269	0.048
9	-0.207	-0.147	0.067
10	-0.257	-0.202	0.060
11	-0.054	-0.282	0.131
12	-0.092	-0.261	0.096
13	-0.244	-0.310	0.238

Perfiles playa oeste	Zona		
	Duna	Lavado	Sumergida
14	-0.264	0.325	0.386
15	0.158	-0.198	0.077
16	0.159	0.045	0.117
17	-0.102	-0.211	0.111
18	-0.039	-0.234	0.053
19	-0.051	0.284	-0.287
20	0.028	0.062	-0.106
21	-0.009	0.110	0.220
22	0.035	-0.084	0.078
23	0.022	-0.025	0.125
24	0.069	-0.050	0.166
25		0.044	
26		-0.050	

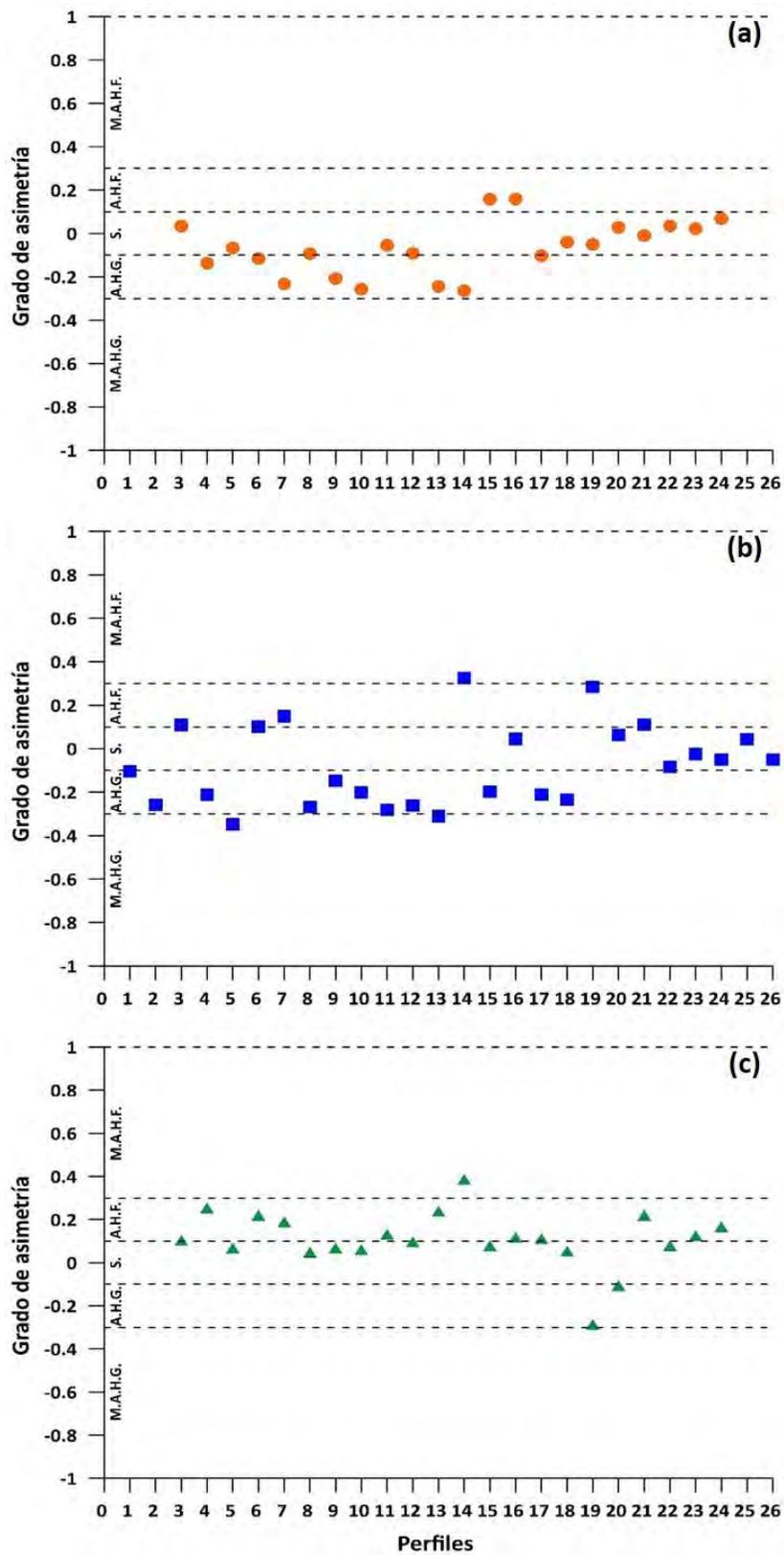


Figura 26. Variación de asimetría gráfica inclusiva de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.

Por otro lado, la curtosis indica que en ambos sectores de la playa (este y oeste) tanto los sedimentos de la duna y zona de lavado presentan una tendencia de mesocúrtica a platicúrtica. Mientras que en la zona sumergida los sedimentos tienen una mayor variación pasando de leptocúrticos a platicúrticos. Esta diferencia entre las zonas del perfil es debido a las variaciones energéticas del oleaje y las corrientes litorales que se llegan a presentar en la costa (Tabla 20 y Figura 27).

Tabla 20. Curtosis, utilizando una escala de colores para facilitar su interpretación.

Platicúrtica	Mesocúrtica	Leptocúrtica
0.67 $\phi$ a 0.90 $\phi$	0.90 $\phi$ a 1.11 $\phi$	1.11 $\phi$ a 1.50 $\phi$

Perfiles playa este	Zona			Perfiles playa oeste	Zona		
	Duna	Lavado	Sumergida		Duna	Lavado	Sumergida
1		0.917		14	0.680	1.015	0.742
2		0.969		15	0.916	0.817	1.140
3	0.936	0.794	1.075	16	1.115	0.783	1.058
4	0.965	0.865	1.267	17	0.917	0.940	1.094
5	0.954	0.821	1.092	18	1.028	0.924	1.072
6	0.869	0.722	1.091	19	0.981	1.250	0.883
7	0.957	0.771	1.268	20	0.975	0.796	0.711
8	0.866	0.732	1.100	21	0.947	1.076	1.031
9	0.829	0.800	1.093	22	1.047	0.921	0.850
10	1.026	0.904	1.101	23	0.985	0.920	1.064
11	0.970	1.316	1.091	24	1.056	0.898	1.336
12	1.050	1.212	1.141	25		0.906	
13	0.964	0.717	1.252	26		0.885	

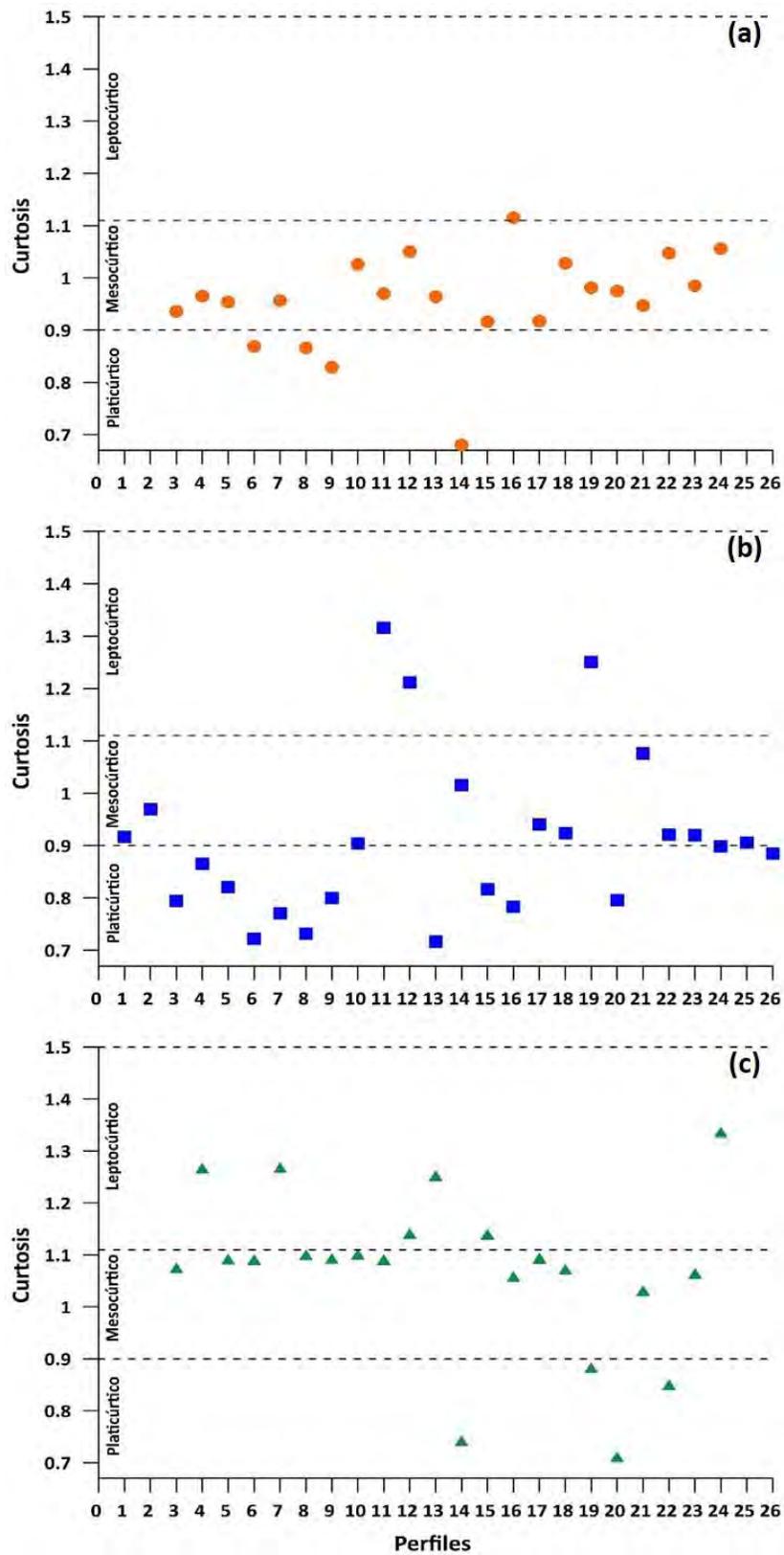


Figura 27. Variación de la curtosis de los sedimentos en la zona de (a) duna, (b) lavado y (c) sumergida para la playa de Sabancuy.

De acuerdo con el análisis de los cambios en la línea de costa se ha identificado que la playa de Sabancuy se divide en dos zonas, una donde se tiene la mayor retención de sedimentos (lado este) y otra donde el proceso erosivo es constante (lado oeste). Sin embargo, al hacer la descripción de los parámetros de sedimento pareciera que el comportamiento de la costa es invertido, teniendo erosión en la zona este y sedimentación en la oeste. Esto puede deberse a la fecha en que fueron tomadas las muestras de arena, la cual corresponde a la temporada de nortes. Por lo que se observa en la zona sumergida arena de grano fino que puede tener su origen de las partes altas del perfil (duna) producto de las tormentas propias de la época climática. Este proceso puede identificarse en la asimetría y curtosis, pues en la playa este tanto en la zona de duna como lavado, los sedimentos presentan asimetrías hacia fracciones gruesas con curvas del tipo platicúrtica.

De igual forma, en la playa oeste se identifica el área de influencia que tienen las estructuras que conforman el canal, alterando la corriente litoral, debido a que en la zona de duna y lavado para los perfiles localizados en el área próxima al canal, la asimetría muestra un comportamiento hacia tamaños gruesos producto de la remoción de sedimento fino por efecto del oleaje, mientras que en los perfiles más alejados el sedimento muestra simetría.

#### 5.4. Celdas litorales e índice de antropización (INRA)

Del análisis de las características del litoral, siguiendo los criterios de van Rijn (2011), se obtuvo que el estado de Campeche se divide en 12 celdas litorales (Figura 28), de las cuales 2 corresponden a la zona de Sabancuy (Figura 29) consideradas como UA para el índice de antropización. Los límites de estas 2 celdas se localizan entre el complejo hotelero Aak Bal y la laguna de Términos (boca de Puerto Real) teniendo como punto intermedio el canal de acceso al estero.



Figura 28. Límites entre celdas litorales para el estado de Campeche.



Figura 29. Límites entre celdas litorales, Sabancuy.

Como la longitud de las SUA utilizadas para obtener el valor del índice de antropización es de 250 m, se obtuvieron un total de 6,444 SUA dentro de las 2 UA. La mayoría de las SUA son cuadradas, pero para seguir con precisión la orientación de la costa, algunas SUA estaban distorsionadas, con diversas formas y áreas. Este ajuste no modificó el INRA dado que el valor obtenido está normalizado por área.

De los mapas de uso de suelo y vegetación de la CONABIO (1981 y 2015), fue posible diferenciar 14 tipos de cobertura en el área de estudio. La Tabla 21 muestra cada cobertura, junto con su valor de antropización asignado.

Tabla 21. Valores de antropización parciales y coberturas correspondientes.

<b>Tipo de cobertura identificada</b>	<b>Valor de antropización parcial</b>
Población urbana	1
Desarrollo antrópico	1
Carretera asfaltada	1
Pozos/estanques acuicultura	1
Camino o vía	0.8
Asentamientos dispersos	0.7
Agrícola-Pecuaria	0.7
Sin vegetación	0.6
Vegetación secundaria	0.2
Manglar perturbado	0.2
Manglar	0
Otros humedales	0
Duna	0
Cuerpos de agua	0

En las Figuras 30 y 31, se muestran los valores del INRA para 1981 y 2015. Se pueden observar pequeños cambios en el grado de alteración entre estos años, lo que indica que no ha habido un aumento significativo en las actividades antropogénicas en el área.

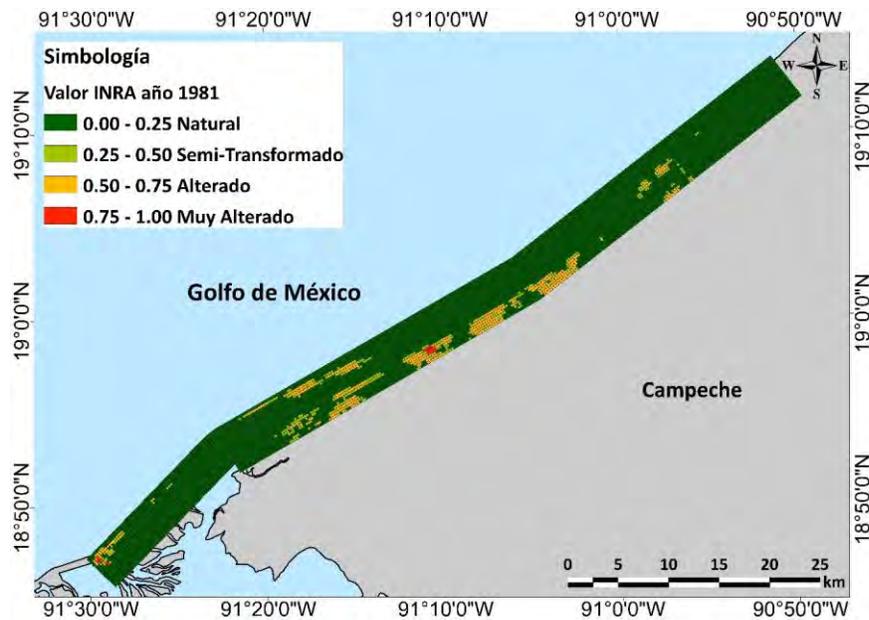


Figura 30. Grado de antropización para cada subunidad de análisis (SUA), 1981.



Figura 31. Grado de antropización para cada subunidad de análisis (SUA), 2015.

Los resultados muestran que el 85% del área de estudio se encuentra todavía en estado conservado, el 14% tiene un nivel moderado de alteración, la mayor parte se utiliza para la agricultura, y solo el 1% puede considerarse altamente alterado, que es donde se ubican las áreas urbanas (Figura 32). El estado de conservación que se observa se debe a que la principal actividad económica en el área es la pesca y agricultura, por lo que no ha habido un gran

desarrollo de la infraestructura turística. Además, se observa que hay un gradiente de antropización, que es mayor en el interior, disminuyendo hacia la costa.

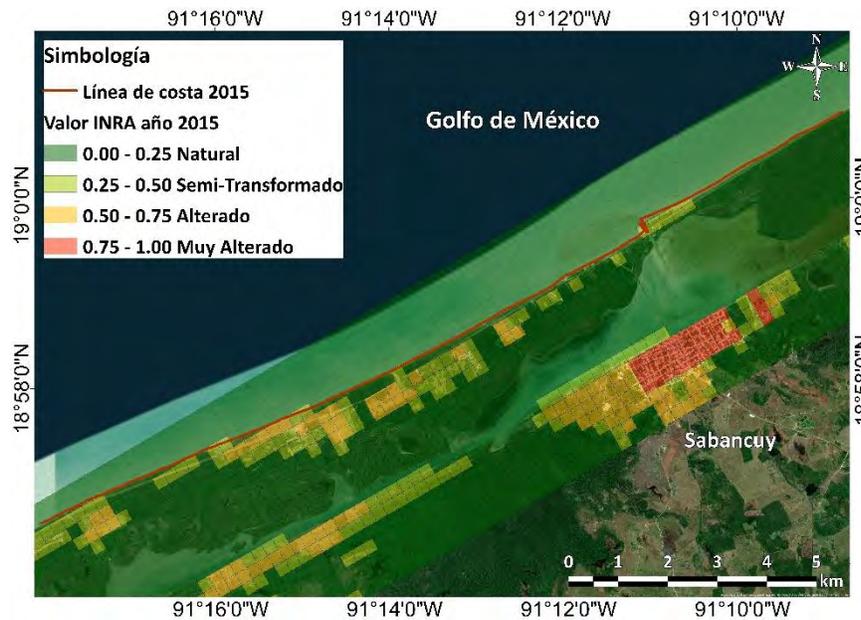


Figura 32. Grado de antropización para los SUA alrededor del poblado de Sabancuy, 2015.

### 5.5. Servicios ecosistémicos

Basado en los mapas de uso de suelo y vegetación de la zona de Sabancuy, se identificó que los humedales, playas y dunas, son los ecosistemas presentes en el área de estudio.

Para este trabajo los servicios ecosistémicos considerados de mayor importancia fueron la protección contra tormentas, control de la erosión, hábitat, refugio y guardería; suministro de agua, estética y recreación.

Se sabe que los manglares son un tipo de humedal; sin embargo, al momento de hacer la revisión de la literatura se encontraron diversos trabajos donde consideran a los manglares como un tipo especial de ecosistema valorando sus servicios de manera individual a los demás tipos de humedales. Por esta razón y siguiendo lo encontrado en la bibliografía se presenta la valoración de los servicios proporcionados por las playas y dunas; manglares y otros humedales.

En las siguientes Tablas (22, 23 y 24) se muestran los valores encontrados para cada servicio ecosistémico.

Tabla 22. Servicios ecosistémicos proporcionado por las playas y dunas.

Servicio ecosistémico	Referencia	Sitio de estudio	CPI	PPP del país estudiado 2017	Valoración en US\$ (2017)/ha/año
Protección contra tormentas	Brenner et al., 2010	España	108.375335	0.657571	94,577.27

Protección contra tormentas	Liu et al., 2010	EUA	112.411557	1	9,819.47
Protección contra tormentas	Kauffman, 2011	EUA	112.411557	1	17,512.03
Protección contra tormentas	Mendoza- González et al., 2012	México	130.197802	9.230019	5,648.03
Protección contra tormentas	Molnar, Kocian y Batker, 2012	Canadá	111.984831	1.251257	48,904.59
Protección contra tormentas	Pérez- Maqueo et al., 2013	EUA	112.411557	1	10,152.87
Protección contra tormentas	Pérez- Maqueo et al., 2013	México	130.197802	9.230019	5,470.70
<b>Promedio</b>					<b>27,440.71</b>
Estética y recreación	Brenner et al., 2010	España	108.375335	0.657571	51,480.07
Estética y recreación	Earth Economics, 2010	Costa Rica	123.458303	391.596909	247.40
Estética y recreación	Liu et al., 2010	EUA	112.411557	1	13,207.72
Estética y recreación	Mendoza- González et al., 2012	México	130.197802	9.230019	1,047.24
Estética y recreación	Molnar, Kocian y Batker, 2012	Canadá	111.984831	1.251257	324.00
Estética y recreación	Pérez- Maqueo et al., 2013	EUA	112.411557	1	5,526.12
Estética y recreación	Pérez- Maqueo et al., 2013	México	130.197802	9.230019	1,014.54
Estética y recreación	Ballard, Pezda y Spencer, 2015	EUA	112.411557	1	6,716.39
<b>Promedio</b>					<b>9,945.44</b>

Tabla 23. Servicios ecosistémicos proporcionado por los manglares.

Servicio ecosistémico	Referencia	Sitio de estudio	CPI	PPP del país estudiado 2017	Valoración en US\$ (2017)/ha/año
Hábitat, refugio y guardería.	Barbier y Strand, 1998	México	130.197802	9.230019	99.71
Hábitat, refugio y guardería.	Lara-Domínguez, Yañez y Seijo, 1998	México	130.197802	9.230019	827.81
Hábitat, refugio y guardería.	Bann, 1999	Malasia	119.605066	1.45321388	302.63
Hábitat, refugio y guardería.	Barbier, Strand y Sathirathai, 2002	Tailandia	111.286809	12.5240792	5.00
Hábitat, refugio y guardería.	Samonte-Tan et al., 2007	Filipinas	120.211352	18.0579895	11.19
<b>Promedio</b>					<b>249.27</b>
Control de la erosión	Sathirathai, 1998	Tailandia	111.286809	12.5240792	11.84
Control de la erosión	Sathirathai, 1998	Tailandia	111.286809	12.5240792	5.49
Control de la erosión	Camille Bann, 1999	Malasia	119.605066	1.45321388	486.16
Control de la erosión	Gunawardena y Rowan, 2005	Sri Lanka	147.087858	48.3841351	4.22
Control de la erosión	Janekarnkij, 2010	Tailandia	111.286809	12.5240792	2.74
<b>Promedio</b>					<b>90.23</b>
Protección contra tormentas	Barbier, Strand y Sathirathai, 2002	Tailandia	111.286809	12.5240792	171.29
Protección contra tormentas	Barbier, 2007	Tailandia	111.286809	12.5240792	575.18
Protección contra tormentas	Cooper, Burke y Bood, 2008	Belice	105.1	1.16872173	808.29
Protección contra tormentas	Earth Economics, 2010	Costa Rica	123.458303	391.596909	26.22

Protección contra tormentas	Camacho- Valdez et al., 2013	México	130.197802	9.230019	246.06
<b>Promedio</b>					<b>365.41</b>
Estética y recreación	Bennett y Reynolds, 1993	Malasia	119.605066	1.45321388	243.90
Estética y recreación	Cooper, Burke y Bood, 2008	Belice	105.1	1.16872173	401.24
Estética y recreación	Earth Economics, 2010	Costa Rica	123.458303	391.596909	6.69
Estética y recreación	Janekarnkij, 2010	Tailandia	111.286809	12.5240792	32.52
Estética y recreación	Mendoza- González et al., 2012	México	130.197802	9.230019	12.90
Estética y recreación	Camacho- Valdez et al., 2013	México	130.197802	9.230019	35.45
<b>Promedio</b>					<b>122.11</b>

Tabla 24. Servicios ecosistémicos proporcionado por los humedales.

Servicio ecosistémico	Referencia	Sitio de estudio	CPI	PPP del país estudiado 2017	Valoración en US\$ (2017)/ha/año
Hábitat, refugio y guardería.	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	73.31
Hábitat, refugio y guardería.	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	174.93
Hábitat, refugio y guardería.	Brenner et al., 2010	España	108.375335	0.657571	697.40
Hábitat, refugio y guardería.	Earth Economics, 2010	Costa Rica	123.458303	391.596909	16.81
Hábitat, refugio y guardería.	Liu et al., 2010	EUA	112.411557	1	82.80
Hábitat, refugio y guardería.	Ballard, Pezda y Spencer, 2015	EUA	112.411557	1	554.21
<b>Promedio</b>					<b>231.25</b>

Suministro de agua	Tong et al., 2007	China	119.088052	3.54975927	404.04
Suministro de agua	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	16.80
Suministro de agua	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	44.81
Suministro de agua	Earth Economics, 2010	Costa Rica	123.458303	391.596909	42.10
Suministro de agua	Tianhong, Wenkai y Zhenghan, 2010	China	119.088052	3.54975927	3,549.61
<b>Promedio</b>					<b>689.43</b>
Protección contra tormentas	Tong et al., 2007	China	119.088052	3.54975927	541.24
Protección contra tormentas	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	551.10
Protección contra tormentas	Brenner et al., 2010	España	108.375335	0.657571	1,074.87
<b>Promedio</b>					<b>742.70</b>
Estética y recreación	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	74.07
Estética y recreación	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	231.91
Estética y recreación	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	26.91
Estética y recreación	Batker et al., 2010	EUA	112.411557	1	86.07
Estética y recreación	Brenner et al., 2010	España	108.375335	0.657571	89.81
Estética y recreación	Liu et al., 2010	EUA	112.411557	1	9.36
Estética y recreación	Tianhong, Wenkai y Zhenghan, 2010	China	119.088052	3.54975927	1270.99
<b>Promedio</b>					<b>184.57</b>

De la revisión de la literatura se observa que los manglares y los diversos tipos de humedales son los ecosistemas que cuentan con el mayor número de valoraciones, siendo la protección costera y el hábitat los servicios más apreciados.

Sin embargo, se encontró que los servicios proporcionados por las playas y dunas costeras, muestran las valoraciones más altas. Para el caso de la protección contra tormentas se obtuvo un valor promedio de 27,440.71 US\$/ha/año, mientras que en la cuestión de estética y recreación el valor promedio estimado es de 9,945.44 US\$/ha/año, lo que nos indica la gran relevancia que tienen las playas y dunas costeras.

## 5.6. Condiciones de oleaje

De la caracterización del oleaje para establecer las condiciones promedio representativas durante un ciclo anual se obtuvo una altura de ola significativa de 0.45 m (Figura 33) con un periodo asociado de 3 segundos (Figura 34), teniendo una dirección proveniente del Nor-Noreste (NNE) el que domina el clima de ola anual de la región (Figura 35).

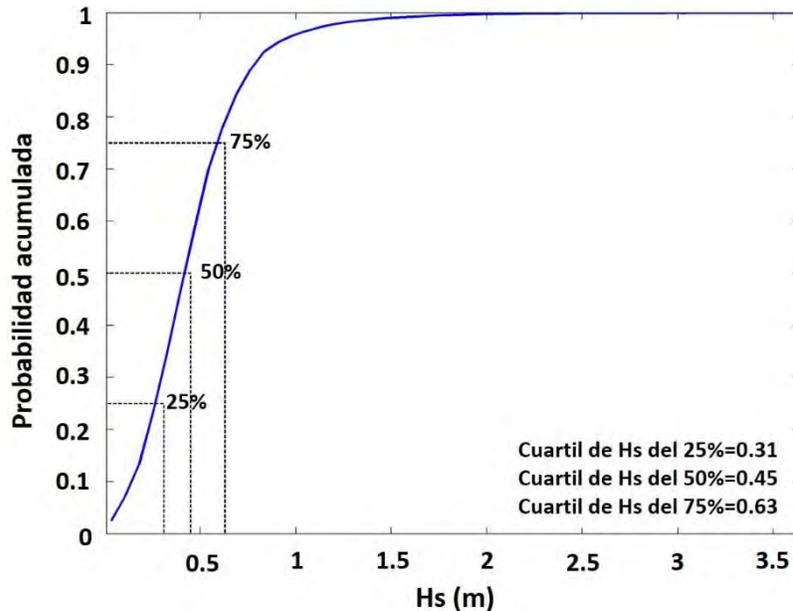


Figura 33. Función de distribución de altura de ola significativa (Hs), anual.

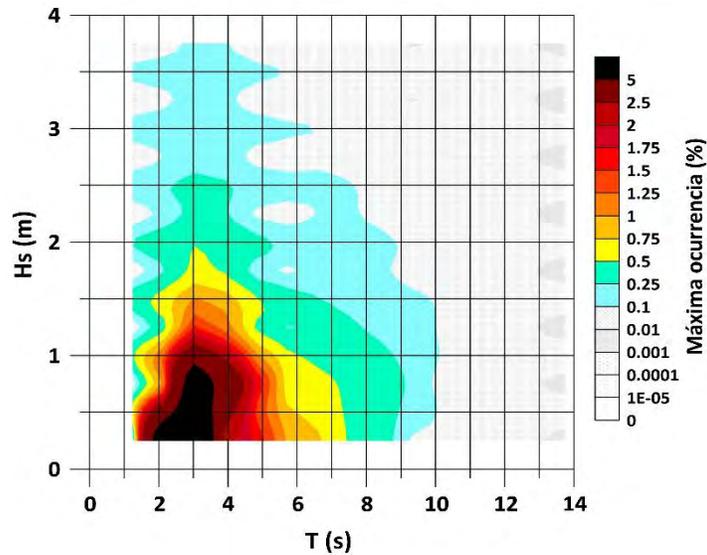


Figura 34. Probabilidad conjunta de altura de ola significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ), anual.

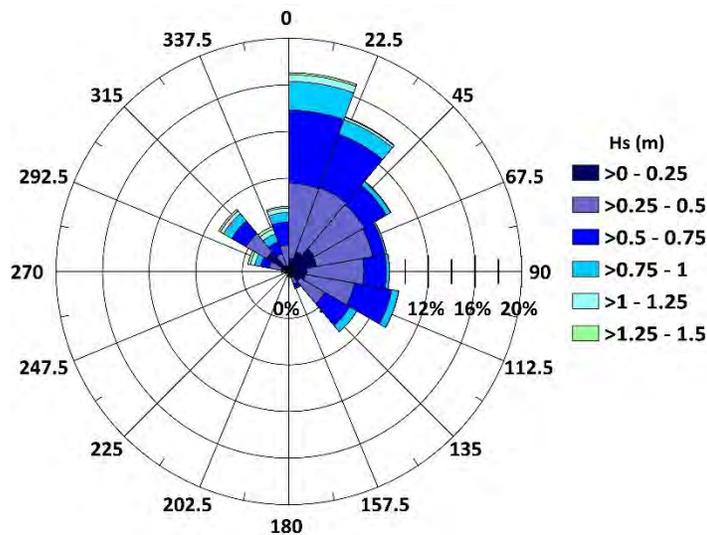


Figura 35. Rosa de oleaje anual.

A partir de las series de clima marítimo obtenidas, se caracterizó el régimen extremal del oleaje en el origen del dominio. Para caracterizar las tormentas, se estableció un valor umbral de corte. Para la zona de estudio, se obtuvo un umbral de 0.98 m (Figura 36), este valor se estableció para facilitar la identificación de episodios de oleaje más energéticos, el cual considera que el tiempo que transcurre entre la presentación de dos temporales independientes es igual o mayor a 12 horas, esto permite obtener un nuevo registro de oleaje donde los datos representan únicamente las condiciones asociadas a tormentas, con lo cual se obtuvo un promedio de 13 tormentas por año. El análisis de probabilidad conjunta de altura de ola frente a periodo pico dio como resultado periodos de entre 4 y 8 segundos (Figura 37). También se obtuvo que las direcciones de incidencia predominantes son del Oeste-Noroeste (WNW) y, Nor-Noroeste (NNW) (Figura 38).

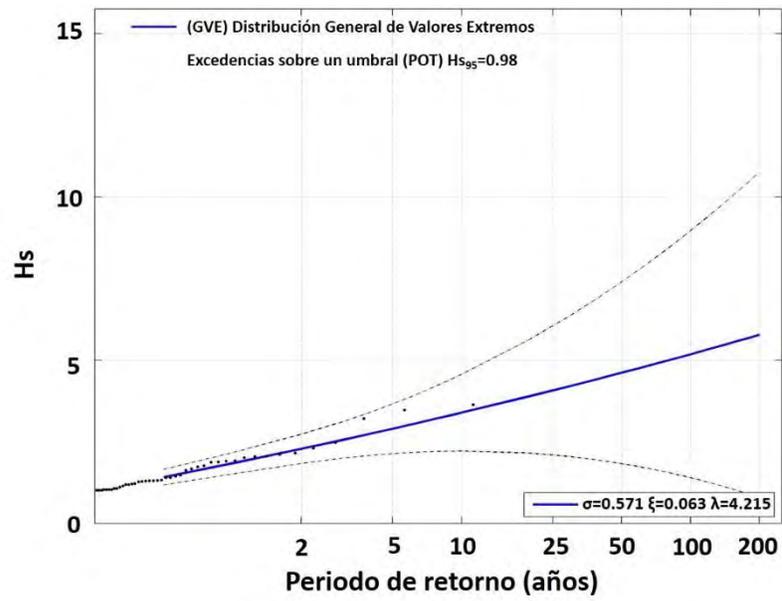


Figura 36. Análisis de valores extremos para altura de ola significativa ( $H_s$ ) por el método POT (Peak Over Threshold) pico sobre un umbral a 95% con la función GVE.

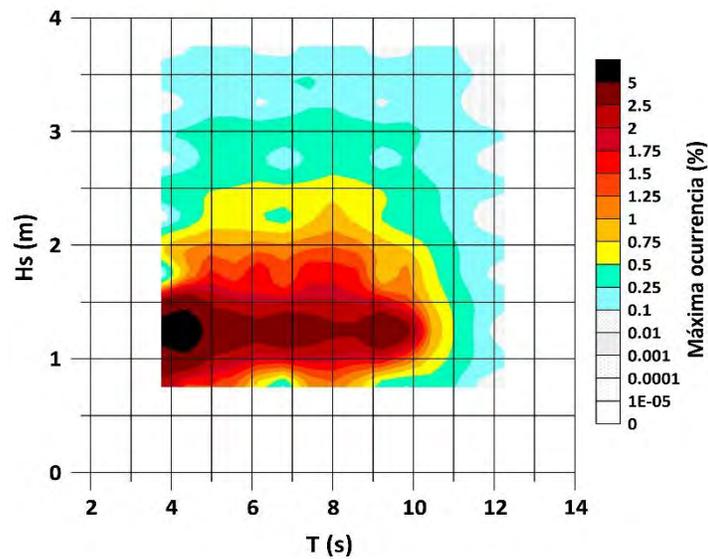


Figura 37. Probabilidad conjunta de altura de ola significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ), tormentas.

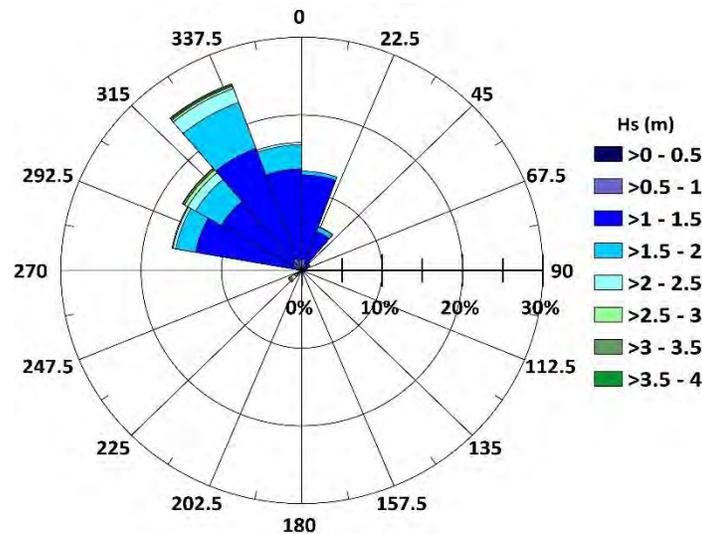


Figura 38. Rosa de oleaje de tormenta.

### 5.7. Justificación para la selección de las medidas para el control de la erosión

Como se ha descrito a lo largo de este documento, la erosión crónica en la costa de Sabancuy se debe a la interrupción en el flujo de sedimentos causada por las estructuras que conforman el canal que comunica al estero de Sabancuy con el Golfo de México. Este proceso de erosión se ha visto amplificado por la ocurrencia de tormentas que periódicamente afectan la región, lo que ha puesto en estado de riesgo sitios de anidación para las tortugas carey y blanca, espacios para uso recreativo y la integridad estructural de la Carretera Federal 180, la cual es una arteria principal que comunica a la Península de Yucatán con el resto del país.

Ante este problema, es imperioso implementar medidas para el control de la erosión que permitan, a su vez, recuperar la dinámica del ecosistema de Sabancuy, sin dejar de lado la protección de los bienes y servicios de la zona. Esto llevó a recurrir a principios de ingeniería ecológica, los cuales fusionan criterios de ingeniería y conocimiento ecológico con el objetivo de crear mejoras en el medio ambiente para proteger a personas y bienes (Mitsch y Jørgensen, 2003; Browne y Chapman, 2011; Roy et al., 2011).

Actualmente, las técnicas silvícolas como la reforestación, rehabilitación y restauración de los ecosistemas de manglar se consideran alternativas para el mejoramiento del hábitat, lo que permite reducir los impactos de las tormentas y limitar la erosión (Hamilton y Snedaker, 1984; Agraz et al., 2010; Cheong et al., 2013). Tomando ello en consideración, y dado el estado actual del problema en la costa de Sabancuy, se consideró colocar una barrera de manglar como una posible medida para el control de la erosión.

Como primer paso para determinar la factibilidad de dicha solución, se analizó el cambio de uso de suelo y el estado de conservación de la zona mediante el índice de antropización (INRA). El INRA mostró que el área seleccionada para la restauración mantiene un buen estado de conservación, pero también se encontró que en dicha zona no se tienen registros de existencia previa de especies de mangle (Figura 39). Esta ausencia histórica de vegetación, constituye un primer indicio de que las condiciones naturales del sitio a intervenir podían no ser propicias para

la colocación de manglar. Lo anterior tiene fundamento en que, al utilizar soluciones con elementos vivos, se busca que el sistema sea autosustentable o requiera el menor mantenimiento posible. Si las condiciones del sitio, incluso antes de ser degradado no contaba con flujos y distribución de salinidad, tipo de sustrato, fluctuación de las mareas y energía de las olas que permitiera el desarrollo de bosques de manglar, es posible que colocarlo como medida de intervención, no pueda ser exitoso (Naturally Resilient Communities, 2015).



Figura 39. Mapa de uso y vegetación de la playa de Sabancuy, año 1981.

De acuerdo con los reportes y trabajos de restauración previos en el estero de Sabancuy, se sabe que las especies nativas en regiones cercanas son *Avicenia germinans* (mangle negro) como especie dominante, *Rhizophora mangle* (mangle rojo) y *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) con una baja densidad y unos pocos ejemplares de *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) (Agraz et al., 2015). El mangle negro es una especie que crece mejor en suelos de alta salinidad, en comparación con el rojo, blanco y botoncillo (Naturally Resilient Communities, 2015). Ello podría indicar que dicha especie es adecuada para la restauración debido a que la zona a reforestar se localiza en el frente costero expuesto a la acción de las mareas y el oleaje, es decir, a valores altos de salinidad. Sin embargo, dado que el tipo de suelo es arenoso, se puede prever crecimiento de mangle botoncillo, pues las demás especies, incluyendo el mangle negro, prefieren los suelos anegados y lodosos (SEMARNAT, 2009).

En vista de condiciones ambientales tan heterogéneas, es complicado determinar la especie de mangle a usar, puesto que no se cumple con todos los requerimientos para un tipo específico de mangle, lo que puede llevar al fracaso de la intervención.

Otra limitante a la aplicación de colocación de manglar es que se requiere espacio amplio tanto para el funcionamiento del ecosistema, como para alcanzar eficiencia aceptable en la atenuación de la energía del oleaje. Estudios sobre esto, señalan que puede haber una reducción en la altura del oleaje del 20% al 45% en olas de 1 m a través de 100 m de manglar (Mazda et al., 1997,

2006); otros informan que olas de 1 m se disipan casi por completo en una franja de manglar de 30 a 50 m de ancho (Midun y Lee, 1989).

La reducción de la altura del oleaje dentro de un bosque de manglar depende del ancho de la franja, de la profundidad del agua, pendiente del fondo, altura de la ola, así como por la especie, tamaño y edad de los árboles (McIvor et al., 2012).

En la playa de Sabancuy, la colocación de una franja de manglar de un ancho mayor a 40 m implica la remoción de un volumen importante de vegetación nativa y el flujo de agua está interrumpido por el terraplén de la carretera, lo cual limita la supervivencia del manglar y podría constituirse en una alteración tan dañina como la erosión misma.

Otro componente relevante es el tiempo. Desde el punto de vista de la ingeniería civil, el valor más relevante de los manglares es su capacidad para proteger las costas contra las cargas hidrodinámicas (Midun y Lee, 1989). Trabajos disponibles en la literatura, donde se midió la disminución de las olas en bosques de manglar, señalan que las zonas donde se encontraban árboles de 1 a 3 años mostraron poco o ningún efecto en las olas incidentes, en tanto que en los sitios con árboles más maduros, de entre 5 y 6 años, se obtuvo una influencia mayor en la reducción de las olas (Mazda et al., 1997; McIvor et al., 2012). Esto lleva a considerar que la colocación de manglar debe ser trasplantando individuos maduros o colocar juveniles, y esperar entre 2 y 3 años a que se alcance la máxima eficiencia en el servicio de protección. Este periodo de espera puede ser fatal para el ecosistema en fase de adaptación y estabilización en caso de ocurrir una tormenta intensa.

De lo anterior se desprende también que las plántulas quedarán expuestas al oleaje ya que no existe otro medio de protección. Si bien, actualmente existen algunos rompeolas que fueron colocados con la finalidad de proteger la costa, se han visto rebasadas dejando de ser funcionales. Ello hace contemplar dentro del plan de restauración, la colocación de barreras para controlar el oleaje, ya que este tipo de acciones se han realizado en algunos proyectos de restauración en México (Nayarit y Sinaloa) empleando estructuras para proteger la playa del oleaje y estimular la sedimentación (Flores-Verdugo, Agraz, y Benítez, 2005).

Como se ha mencionado, la playa de Sabancuy es un sitio de uso recreativo, lo cual es argumento en contra de la colocación de manglar. Es claro que, se ganaría el valor y servicio ecosistémico de protección costera, pero se perdería el servicio de uso lúdico de la playa. Una opción es dejar corredores para el paso de personas; sin embargo, ello requiere mayor estudio y mantenimiento recurrente.

Del mismo modo, la anidación de tortugas marinas ocurre en sitios arenosos, los cuales quedarían muy reducidos dado el espacio que se requiere para desarrollar un humedal autosustentable. En la zona de bosque no ocurre desove debido a que las raíces y troncos de los mangles representan un obstáculo (FAO, 2005).

Si bien se busca que los esfuerzos deban centrarse en maximizar los beneficios ecológicos de la intervención, en muchos casos no es posible la aplicación de medidas o estructuras que sean completamente naturales. En el caso de Sabancuy, la aplicación de una restauración de manglar no es una opción viable de acuerdo con las características y condiciones del sitio descritas

anteriormente, ya que se verían afectados otros servicios provistos por el ecosistema, por lo que fue necesario evaluar otro tipo de medidas que pudieran ayudar con el problema de estudio.

A primera vista, la eliminación de las escolleras en los márgenes del canal parecía una solución factible para restaurar el estado anterior de la playa. Sin embargo, esto ya no es posible por razones sociales y económicas.

La localidad de Sabancuy cuenta con una población total de 7,286 habitantes (3,705 hombres y 3,581 mujeres) (INEGI, 2010) donde la principal actividad laboral es la pesca ribereña, aportando el 7.5% de la captura total del estado de Campeche (Canepa y Cú, 2010; CONAPESCA, 2017; Campos y Crespo, 2018; García, Santiago, y Wicab, 2018).

Del total de la población de Sabancuy, 734 personas son pescadores, los cuales se encuentran organizados en 36 cooperativas pesqueras y 65 permisionarios, sumando un total de 367 embarcaciones que hacen uso del canal (Figura 40) (Campos y Crespo, 2018).



Figura 40. Lancha pesquera transitando por el canal de Sabancuy.

La remoción de las estructuras que conforman el canal implicaría que se azolve impidiendo el tránsito de lanchas pesqueras. Debido a que el estero es utilizado como puerto, es importante que el canal de acceso proporcione una navegación segura, lo que convierte al canal en un área de gestión política y económica y, por lo tanto, se debe hacer uso de otra alternativa para el control de la erosión que se observa en la costa.

Dentro de la clasificación de las soluciones basadas en ecosistemas, se encuentra la ingeniería rígida ecológicamente mejorada. Esto significa que, en algunas ocasiones, los ecosistemas costeros no pueden ofrecer, por sí solos, el nivel de protección exigido por las sociedades costeras. Por lo tanto, el potencial de los ecosistemas a menudo sólo puede utilizarse en combinación con estructuras de ingeniería tradicional (Everard, Jones, y Watts, 2010; Berry, Fahey, y Meyers, 2013; van der Nat et al., 2016) dando lugar a medidas híbridas para la protección de la costa. Los métodos híbridos consisten en combinar elementos naturales (como vegetación) con estructuras construidas para mitigar la erosión (O'Shaughnessy et al., 2020).

Estructuras como los diques exentos se han convertido en medidas de protección costera muy comunes (Mahalingaiah et al., 2015; Pranzini, Wetzel, y Williams, 2015). Su propósito es

reducir la carga hidráulica a un nivel requerido que mantenga el equilibrio dinámico de la línea de costa.

Partiendo de lo anterior y considerando la necesidad de reforzar la costa de Sabancuy, se propone la construcción de una serie de diques exentos que protejan de los impactos de las tormentas. De igual manera, se considera dentro del plan de acción realizar un relleno de playa con la finalidad de complementar a los diques (Hanson et al., 2002), que permita establecer vegetación de duna, y así proporcionar una importante reserva de sedimentos que ayude en el mantenimiento de la línea de playa, ofreciendo áreas atractivas para la anidación de tortugas marinas como para uso recreativo.

Para el proceso de plantación sobre la duna, es importante el uso de vegetación propia de la zona y no introducir especies invasoras, como es el caso de la Casuarina, la cual es una especie originaria de las costas tropicales y subtropicales de Australia, Malasia y el sudeste asiático (March y Martínez, 2007).

Las plantaciones de Casuarina se han utilizado con frecuencia para estabilizar las dunas costeras en algunos sitios de México (Veracruz) teniendo un impacto negativo en los atributos locales del suelo, así como en los niveles de población de otras especies (Gordon, 1998). También afecta a la fauna nativa cuando se colocan estos árboles en las dunas frontales pues se caen fácilmente cuando hay fuertes vientos, lo que hace que el hábitat de anidación se inaccesible para las tortugas marinas (Schmid et al., 2008), caso contrario con la vegetación en la parte superior de la duna, debido a que sus raíces vuelven la arena más compacta haciéndola sitios preferidos para la anidación (Whitmore y Dutton, 1985; Horrocks y Scott, 1991; Chen y Cheng, 1995; Wang y Cheng, 1999; Guzmán, 2006; Ferrer, Díaz-Fernández, y Díaz, 2007).

Se tiene conocimiento que las estructuras para la protección de las playas, como es el caso de los diques, obstaculizan el paso de las tortugas hacia la playa (Rincón-Díaz y Rodríguez-Zárate, 2004; Bolongaro Crevenna et al., 2010). A pesar de esto, y haciendo un balance sobre la anidación se tiene que el sector donde se propone la construcción de los diques es donde menor números de nidos se han registrado, teniendo un total de 359 nidos (estaciones 5 y 6) (Figura 41) durante el periodo 2001 – 2012, lo cual se relaciona con la pérdida de playa. Algo que es importante señalar es la posibilidad de que el área de playa protegida sea un sitio de anidación que puede llegar a perderse debido al obstáculo que representan los diques, no obstante, y pensando en los demás espacios de anidación, se estaría protegiendo y haciendo más estable el sector próximo, justo donde se tiene el mayor número de anidaciones con 5421 nidos (estaciones 1 a la 4) (Figura 41) en el mismo periodo, con lo cual se estaría obteniendo más impactos positivos que negativos.



Figura 41. Localización de estaciones de anidación en el campamento Tortuguero La Escollera, playa oeste.

Actualmente se empieza a notar un interés en detonar la actividad turística de Sabancuy, pues se observa que en algunos sitios ya se ofrecen diversos servicios (palapas, camastros, zona de comida, regaderas, baños) (Figura 42) con el fin de atraer al turismo local y nacional. Así mismo, hasta la fecha de redactado este documento, existe un proyecto bajo el nombre “Playa Mundo Maya” donde se contempla la creación de un complejo hotelero en una extensión de 60 hectáreas en la región de Sabancuy, con una inversión de 200 millones de dólares (Drillinger, 2020; Ortiz, 2020).



Figura 42. Servicios turísticos presentes en la costa de Sabancuy.  
Tomado de: “La Playita Sabancuy”.

En los siguientes apartados se describe con mayor detalle la estrategia de protección seleccionada, mostrando cuales serían los efectos sobre la costa una vez que se hayan colocados.

## 5.8. Alternativas para el control de la erosión

Dada las condiciones en las que se encuentra la playa de Sabancuy debido al proceso de erosión que se ha presentado a través de los años, es necesaria la pronta intervención para mitigar dicho proceso. De acuerdo con las características observadas en la costa se determinó que la mejor alternativa para el control de la erosión desde el punto de vista ingenieril y que tenga el menor impacto negativo en el ecosistema, es la colocación de diques exentos en combinación con un relleno artificial de playa que ayude a la regeneración de las dunas. Al trabajar en conjunto estas medidas se tiene que los diques disminuirían la energía de las olas que llegan a la playa, mientras que con el relleno se consigue la ampliación del ancho de playa, y la vegetación ayudará en la estabilización y captura de la arena, lo que resulta favorable para el uso turístico y para algunas especies en peligro como lo son las tortugas marinas, debido a que el aporte adicional de sedimentos es una alternativa flexible que permitirá que la forma del perfil se adapte a las condiciones hidrodinámicas de la zona beneficiada.

Como propuesta se tiene la construcción de 5 diques de forma paralela a la costa, protegiendo una longitud de 1 km, que es la zona de mayor afectación. La colocación de cada estructura está considerada que sea a diferentes distancias de la costa, teniendo que la más alejada estaría a una distancia de 215 m, empezando en la escollera oeste del canal, y la más cercana se considera a una distancia de 55 m. Para determinar la extensión de los diques, se analizó el comportamiento hidrodinámico ante diferentes longitudes de las estructuras (Anexo I). Como resultado se obtuvo que los diques deben tener una longitud de 205 m, contemplando un traslape de 10 m y una separación transversal de 40 m (Figura 43).

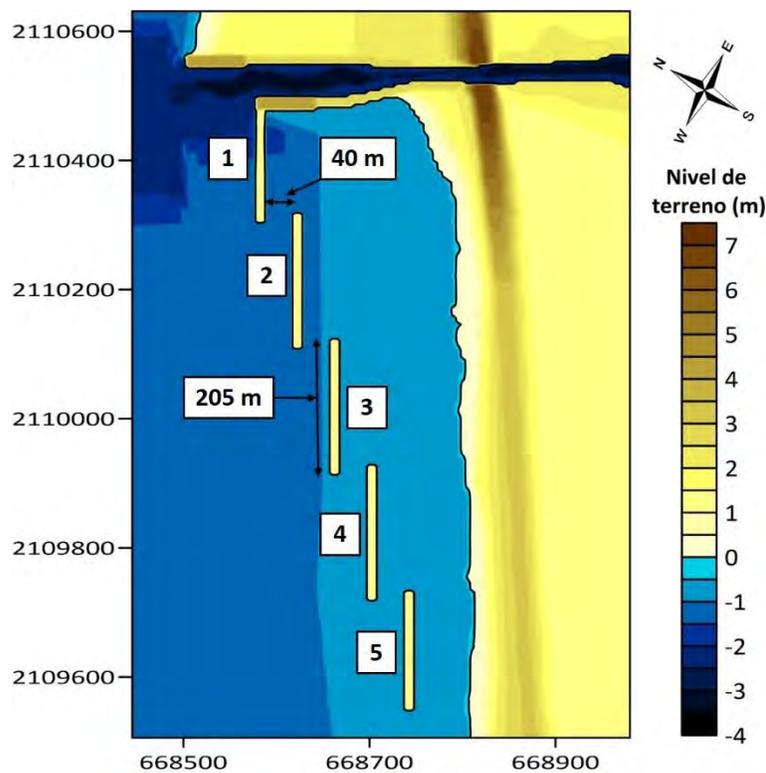


Figura 43. Localización de diques propuestos.

En las siguientes Tablas (25, 26 y 27) se muestra un resumen de los resultados obtenidos mediante los diferentes cálculos en el diseño de cada dique, señalando las dimensiones seleccionadas.

Tabla 25. Resumen de resultados para el diseño de los diques exentos (parte 1).

No. Rompeolas	Formulación para H	H (m)	T (s)	Profundidad	Tipo de rotura	Run up (Ru)	Francobordo (Rc)
1	0.8*h	1.9	8	2.34	Oscilación	1.45	1.5
	0.8*h	1.9	8	2.34	Oscilación	1.45	1.5
	0.6*h	1.4	4	2.34	Voluta	1.29	1.3
	0.6*h	1.4	4	2.34	Voluta	1.29	1.3
2	0.8*h	1.8	8	2.23	Oscilación	1.45	1.5
	0.8*h	1.8	8	2.23	Oscilación	1.45	1.5
	0.6*h	1.35	4	2.23	Voluta	1.29	1.3
	0.6*h	1.35	4	2.23	Voluta	1.29	1.3
3	0.8*h	1.75	8	2.15	Oscilación	1.45	1.5
	0.8*h	1.75	8	2.15	Oscilación	1.45	1.5
	0.6*h	1.3	4	2.15	Voluta	1.30	1.3
	0.6*h	1.3	4	2.15	Voluta	1.30	1.3
4	0.8*h	1.7	8	2.11	Oscilación	1.45	1.5
	0.8*h	1.7	8	2.11	Oscilación	1.45	1.5
	0.6*h	1.3	4	2.11	Voluta	1.30	1.3
	0.6*h	1.3	4	2.11	Voluta	1.30	1.3
5	0.8*h	1.7	8	2.07	Oscilación	1.45	1.5
	0.8*h	1.7	8	2.07	Oscilación	1.45	1.5
	0.6*h	1.25	4	2.07	Voluta	1.31	1.35
	0.6*h	1.25	4	2.07	Voluta	1.31	1.35

Tabla 26. Resumen de resultados para el diseño de los diques exentos (parte 2).

No. Rompeolas	Peso y diámetro de piezas				Ancho corona (m)	Ancho base (m)
	Losada y Gimenez		Kramer y Burcharth			
	W50 (kg)	D50 (m)	W50 (kg)	D50 (m)		
1	300	0.5	x	x	4	20
	x	x	3650	1.15	5	21
	103	0.35	x	x	2	17
	x	x	3194	1.1	2	17
2	300	0.5	x	x	3	18
	x	x	3650	1.15	5	20
	103	0.35	x	x	2	17
	x	x	3194	1.1	2	17
3	300	0.5	x	x	3	18
	x	x	3194	1.1	5	20

	103	0.35	x	x	2	16
	x	x	2400	1	2	16
4	219	0.45	x	x	3	18
	x	x	3194	1.1	5	20
	103	0.35	x	x	2	16
	x	x	2400	1	2	16
5	219	0.45	x	x	3	18
	x	x	3194	1.1	5	20
	103	0.35	x	x	2	16
	x	x	2400	1	2	16

Tabla 27. Resumen de resultados para el diseño de los diques exentos (parte 3).

No. Rompeolas	Transmisión, Kt (%)	Reflexión, Kr (%)	Long. Dique (m)	Dist. Costa (m)	Respuesta
1	0.03	0.41	205	215	Saliente
	0.24	0.41	205	215	Saliente
	0.29	0.24	205	215	Saliente
	0.21	0.24	205	215	Saliente
2	0.33	0.42	205	175	Saliente
	0.24	0.42	205	175	Saliente
	0.28	0.25	205	175	Saliente
	0.22	0.25	205	175	Saliente
3	0.32	0.46	205	135	Saliente
	0.22	0.46	205	135	Saliente
	0.27	0.26	205	135	Saliente
	0.23	0.26	205	135	Saliente
4	0.29	0.43	205	95	Saliente
	0.22	0.43	205	95	Saliente
	0.27	0.26	205	95	Saliente
	0.23	0.26	205	95	Saliente
5	0.29	0.43	205	55	Tómbolo
	0.22	0.43	205	55	Tómbolo
	0.26	0.26	205	55	Tómbolo
	0.24	0.26	205	55	Tómbolo

El resultado para las dimensiones de la sección transversal en los diques muestra pequeñas variaciones, por tal motivo y para tener un diseño homogéneo se toma como medidas un ancho de corona de 2 m, 17 m para la base y un francobordo de 1.35 m (Figura 44).

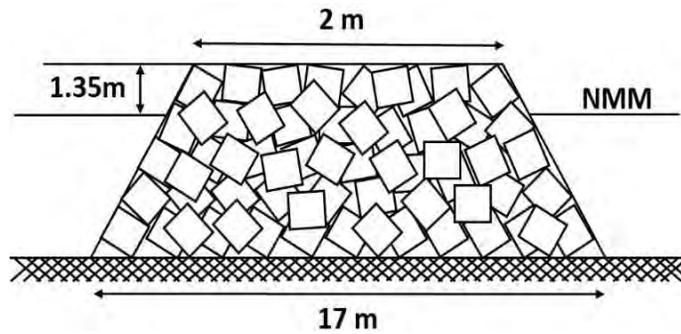


Figura 44. Sección transversal de los diques.

Respecto a las piezas que conformaran las estructuras, se seleccionó que fueran cubos de concreto, obteniendo para los diques 1 y 2 piezas con un diámetro de 1.1 m y peso 3194 kg, para los diques 3, 4 y 5 el diámetro de las piezas corresponde a 1 m con un peso de 2400 kg. Dado que las condiciones del oleaje no difieren mucho entre las zonas de emplazamiento de los diques y para fines constructivos prácticos, se considera que todas las estructuras sean de cubos de concreto de 1 m de diámetro y 2400 kg de peso.

Como se mencionó, el Método Holandés fue elegido para estimar el volumen de arena necesario para el relleno de playa. Haciendo la comparación entre perfiles se obtuvo una tasa de erosión anual de  $1.86 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$ , aumentando el 40% de pérdidas y considerando un tiempo de vida de 5 años se estimó un volumen de  $13,020 \text{ m}^3$  de arena, los cuales por cuestiones del modelo numérico se redondeó a  $15,000 \text{ m}^3$ .

Mediante el relleno de playa se pretende la restauración de las dunas degradadas en la zona con mayor afectación por efecto de la erosión, las cuales serán apoyadas con vegetación de duna, para lo cual es importante seleccionar especies que sean nativas y poder conseguir un equilibrio similar al natural. Durante el recorrido realizado en las mediciones de perfiles de playa, se observaron áreas con abundante vegetación (Figura 45) las cuales se considerarían como zonas para la toma de plantas para posteriormente ser trasplantadas.





Figura 45. Vegetación de duna en la playa de Sabancuy.

De igual manera, se contempla la construcción de 5 pasarelas de madera en la zona de balneario, debido a que es donde existe un mayor tránsito de personas las cuales aplastarían la vegetación (Figura 46). Las pasarelas se sugieren sean elevadas entre 30 y 50 cm sobre el suelo, dejando espacio suficiente que permita el establecimiento de las plantas.



Figura 46. Localización de pasarelas.

En lo referido a la selección de la zona de préstamo de sedimentos para la ejecución del relleno de playa, se contempla los bancos de sedimento que se han formado al interior del estero producto del azolvamiento de la arena que es introducida por las corrientes. Esta zona ha sido objeto de trabajos de dragado debido a que la gran cantidad de sedimento depositado ocasiona problemas en la navegación de las embarcaciones pesqueras de la zona. El volumen de arena que se ha dragado en trabajos previos asciende a poco más de 450,000 m<sup>3</sup>, lo cual indica que es una zona con suficiente material de préstamo.

Para evaluar la distribución y colocación de la arena en la playa se consideraron dos alternativas:

- La primera consiste en que a partir de la cota 0 y hacia 15 m mar adentro, se rellene 1 m sobre la cota correspondiente de cada zona.
- En la segunda se contempló la creación de una duna a lo largo del kilómetro de playa a conservar, de tal modo que haga la función de depósito de arena, esperando que con acción del oleaje se distribuya en la costa.

### **5.9. Hidrodinámica de la costa en condiciones actuales y con las medidas de protección**

Con base en los resultados obtenidos de la caracterización del oleaje y marea se obtuvo 14 diferentes condiciones para la simulación hidrodinámica, de los cuales 13 representan el número promedio de tormentas ocurridas anualmente y 1 corresponde al régimen medio.

Adicionalmente para determinar los cambios en la morfología de la playa se consideraron 3 diferentes configuraciones de la costa, teniendo la playa en condiciones actuales y con la colocación de medidas de protección.

Los datos de entrada para la modelación numérica son las condiciones de oleaje definidas por la altura de ola, periodo pico, dirección de propagación de la ola, tiempo de simulación, así como la elevación de marea en cada escenario de simulación (Tabla 28).

Tabla 28. Parámetros de oleaje definidos para cada escenario de simulación.

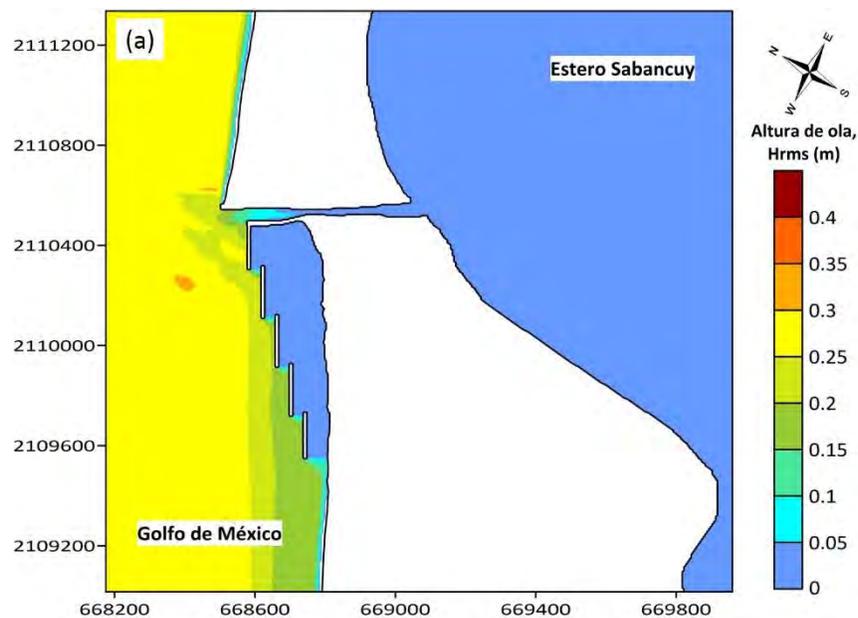
<b>Escenario</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>Dirección (°)</b>	<b>Tiempo simulación(hr)</b>
Régimen medio	0.45	3	22.5	720
	1.05	4	349	24
	1.36	4	330	27
	1.25	4	293	33
	1.43	4	309	27
	1.11	4	330	18
	1.61	5	349	24
Tormentas	1.66	5	309	33
	1.15	4	330	12
	1.44	4	293	36
	1.37	4	330	15
	1.31	4	309	45
	1.74	8	330	45
	1.96	8	293	48

Debido a que la colocación de cualquier obstáculo en la costa puede ocasionar cambios en su hidrodinámica, se simuló numéricamente las condiciones de oleaje y marea en condiciones de régimen medio para determinar el comportamiento de la playa ante la colocación de las estructuras de protección.

Los resultados muestran que los diques tienen un impacto significativo en la reducción de la altura de ola, teniendo olas con alturas por debajo de los 0.1 m lo que genera un estado de calma en el área protegida (Figura 47).

En cuestión de las corrientes se observa que las mayores velocidades ocurren en el sector central del canal de acceso al estero, justo donde existe una reducción de área, alcanzando valores superiores a los 2 m/s. Así mismo, entre la separación de los diques las velocidades varían entre 0.1 y 0.25 m/s (Figura 48), las cuales son generadas principalmente por la variación de la marea astronómica y cuyos niveles de agua oscilan entre los -0.5 y 0.5 m (Figura 49).

Debido a la baja energía de las olas que llegan a la costa detrás de los diques no se obtuvieron cambios en la playa, lo que indica que la evolución morfológica en estas condiciones ocurre a largo plazo y no en cuestión de días, como sucede durante una tormenta.



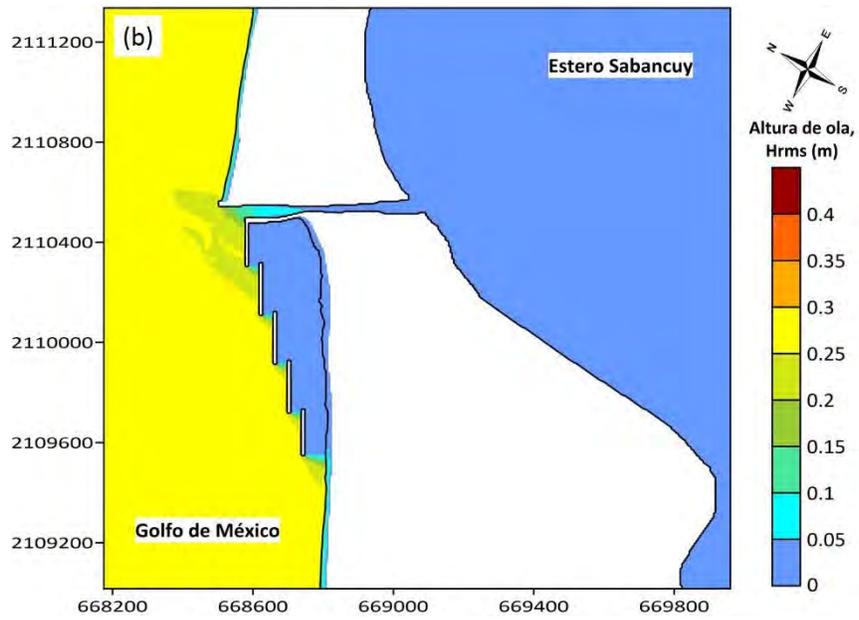
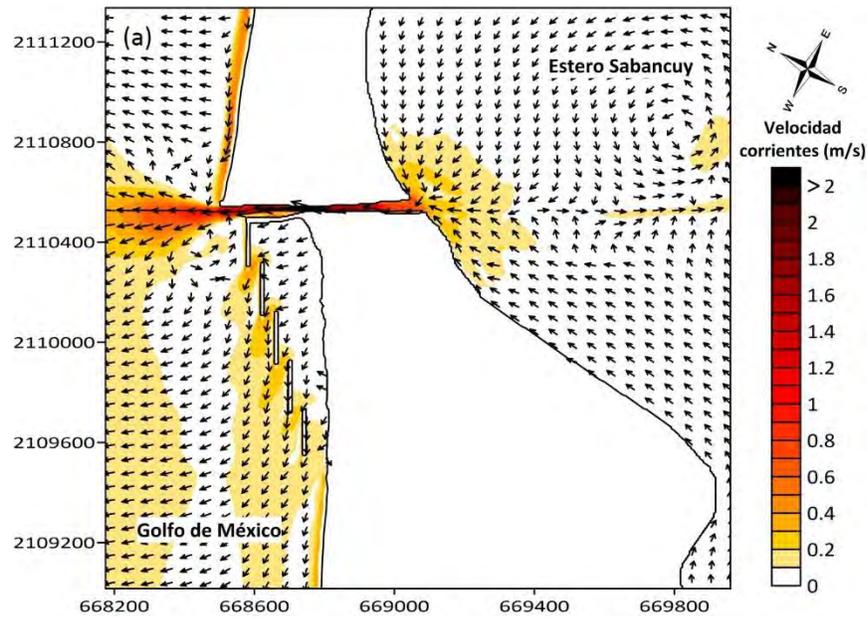


Figura 47. Altura de ola media cuadrática (Hrms) en régimen medio, playa con estructuras de protección, (a) Bajamar; (b) Pleamar.



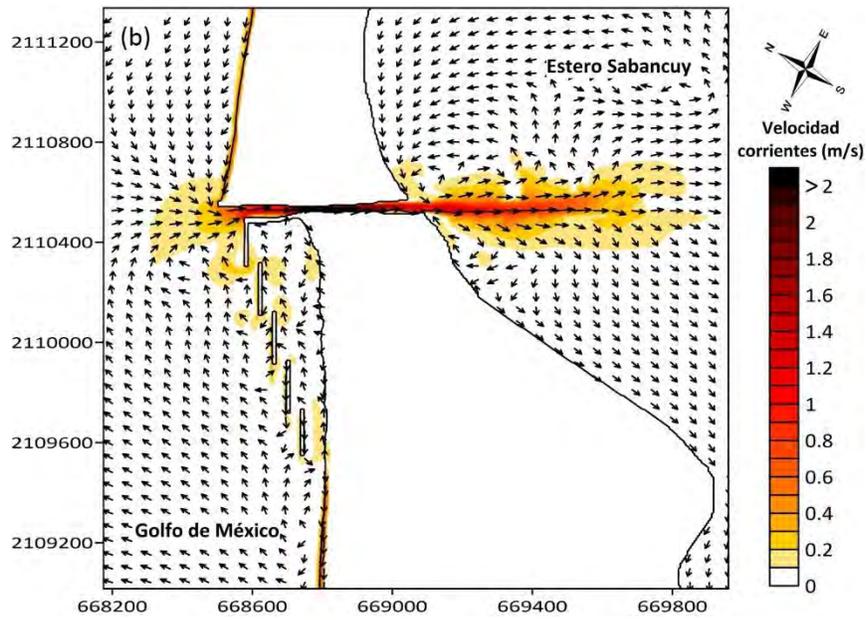
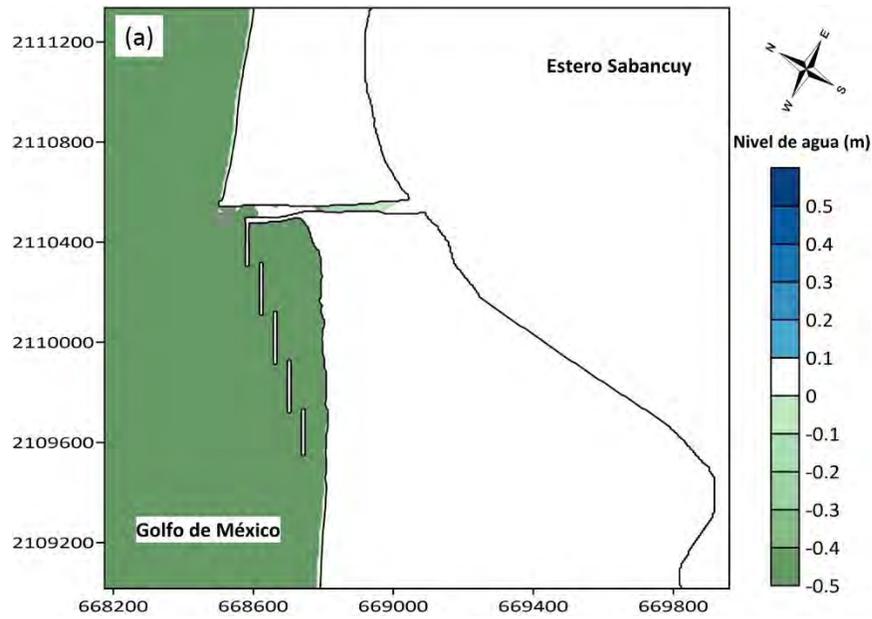


Figura 48. Velocidad y dirección de corrientes en régimen medio, playa con estructuras de protección, (a) Bajamar; (b) Pleamar.



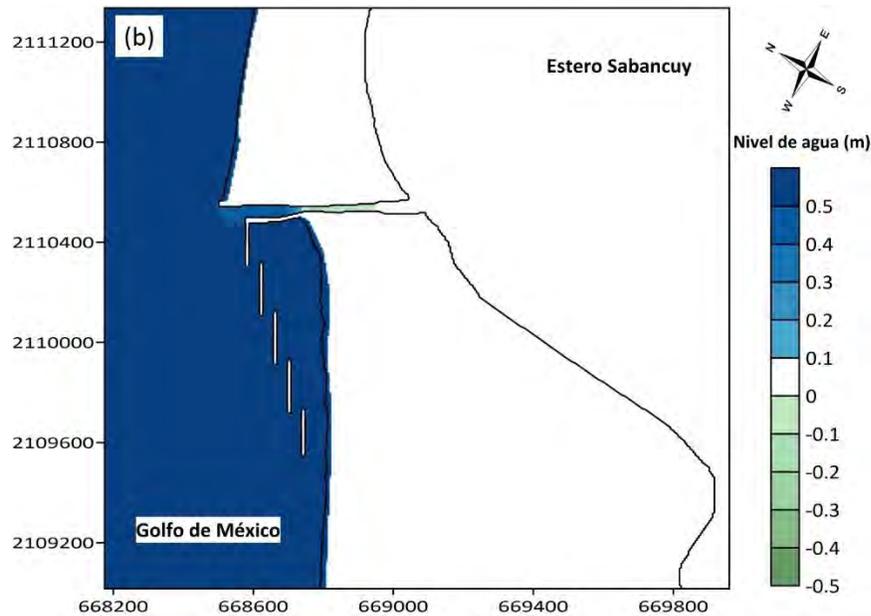


Figura 49. Nivel de agua en régimen medio, playa con estructuras de protección, (a) Bajamar; (b) Pleamar.

Para las condiciones de tormenta y siendo que estos eventos son los que provocan los mayores cambios en la costa, se hizo una comparación entre los resultados de la playa en las condiciones actuales y considerando la realización de las medidas de protección propuestas, a través del escenario de mayor intensidad. Por lo que, a continuación se presenta por medio de mapas los resultados de altura de ola, la velocidad y dirección de corrientes, así como el nivel de agua.

Actualmente en la playa de Sabancuy se cuenta con 6 rompeolas que fueron construidos en 2012 para tratar de controlar el proceso erosivo, como resultado de la propagación del oleaje de tormenta se tiene que las olas llegan a la costa con altura de entre 0.2 y 0.6 m (Figura 50), se observa que en la bajamar los rompeolas cumplen con su función de reducir la altura del oleaje, sin embargo, cuando se presenta la pleamar las estructuras se ven rebasadas permitiendo el paso de olas con mayor altura.

Considerando la colocación de los 5 diques como alternativa para mitigar la erosión de la playa se obtuvo en el área protegida, tanto en bajamar como pleamar, oleaje con alturas que no superan los 0.3 m (Figura 51).

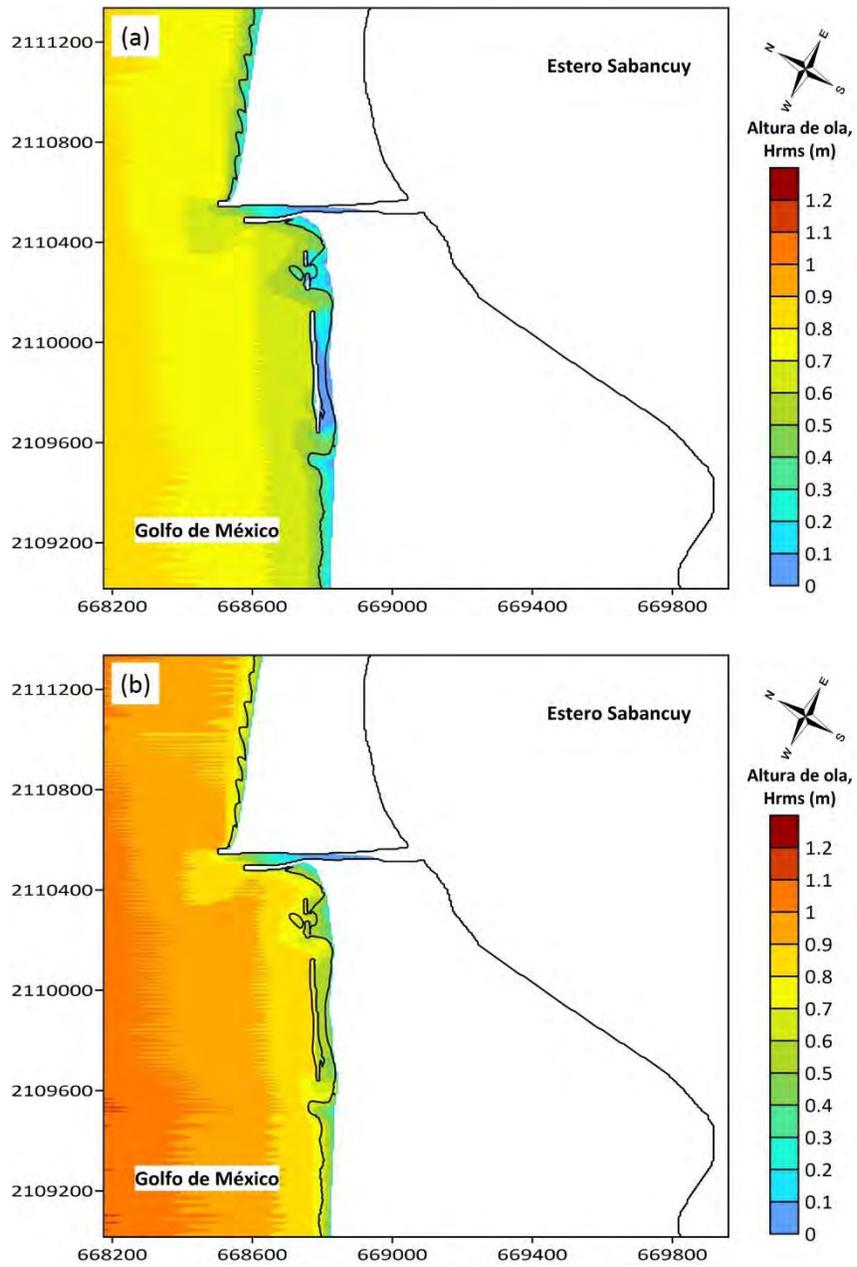


Figura 50. Altura de ola media cuadrática ( $H_{rms}$ ) en condiciones de tormenta, playa en estado actual, (a) Bajamar; (b) Pleamar.

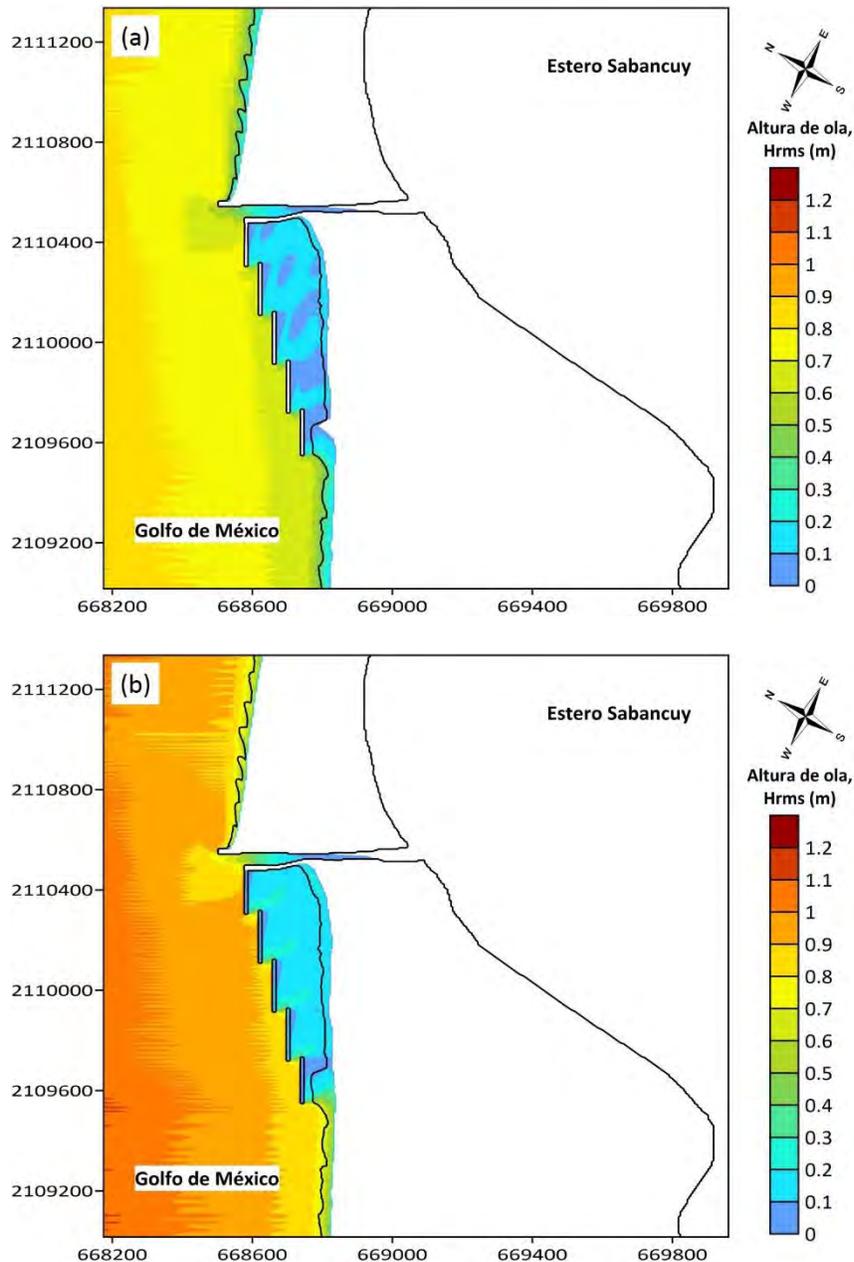


Figura 51. Altura de ola media cuadrática (Hrms) en condiciones de tormenta, playa con estructuras de protección, (a) Bajamar; (b) Pleamar.

Respecto a las corrientes litorales se tiene que las mayores velocidades, al igual que en régimen medio, se presentan en la sección más angosta del canal cuando ocurre el intercambio de agua entre el estero y el mar, llegando a superar los 2 m/s. Con la configuración actual de la playa se observa que entre la costa y los rompeolas existen corrientes con velocidades que varían entre los 0.2 y 0.8 m/s (Figura 52), esto se debe a la poca separación de las estructuras respecto a la costa, lo que ocasiona una reducción del área para el flujo del agua, propiciando un incremento en las velocidades lo que favorece el transporte de sedimentos acelerando el proceso erosivo.

Al observar el efecto que tienen los rompeolas actuales debido a su ubicación en relación a la playa, se consideró en la propuesta aumentar esta distancia pasando de 20 m (distancia actual) a 55 m para la colocación del dique más cercano a la playa, permitiendo así un mejor flujo de agua. Como resultado se observa que en este sector es donde se concentran las mayores velocidades con variaciones de 0.2 a 0.6 m/s. De igual forma, se observa una elevación en la velocidad de las corrientes en la separación de las estructuras presentando valores de 0.3 m/s hasta 0.7 m/s. Para el resto del área protegida las velocidades no sobrepasan los 0.3 m/s lo que contribuye a una buena circulación en el área y así evitar estancamientos de agua (Figura 53).

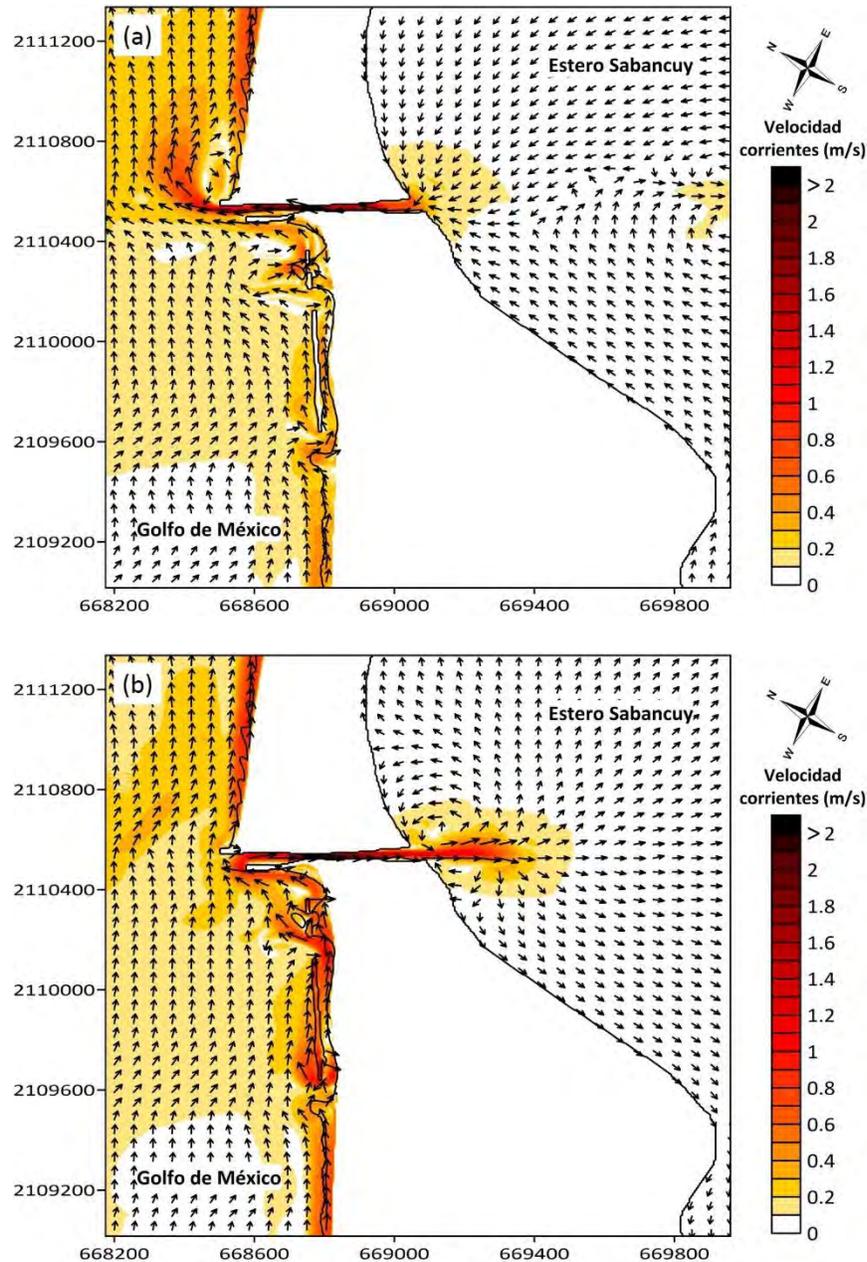


Figura 52. Velocidad y dirección de corrientes en condiciones de tormenta, playa en estado actual, (a) Bajamar; (b) Pleamar.

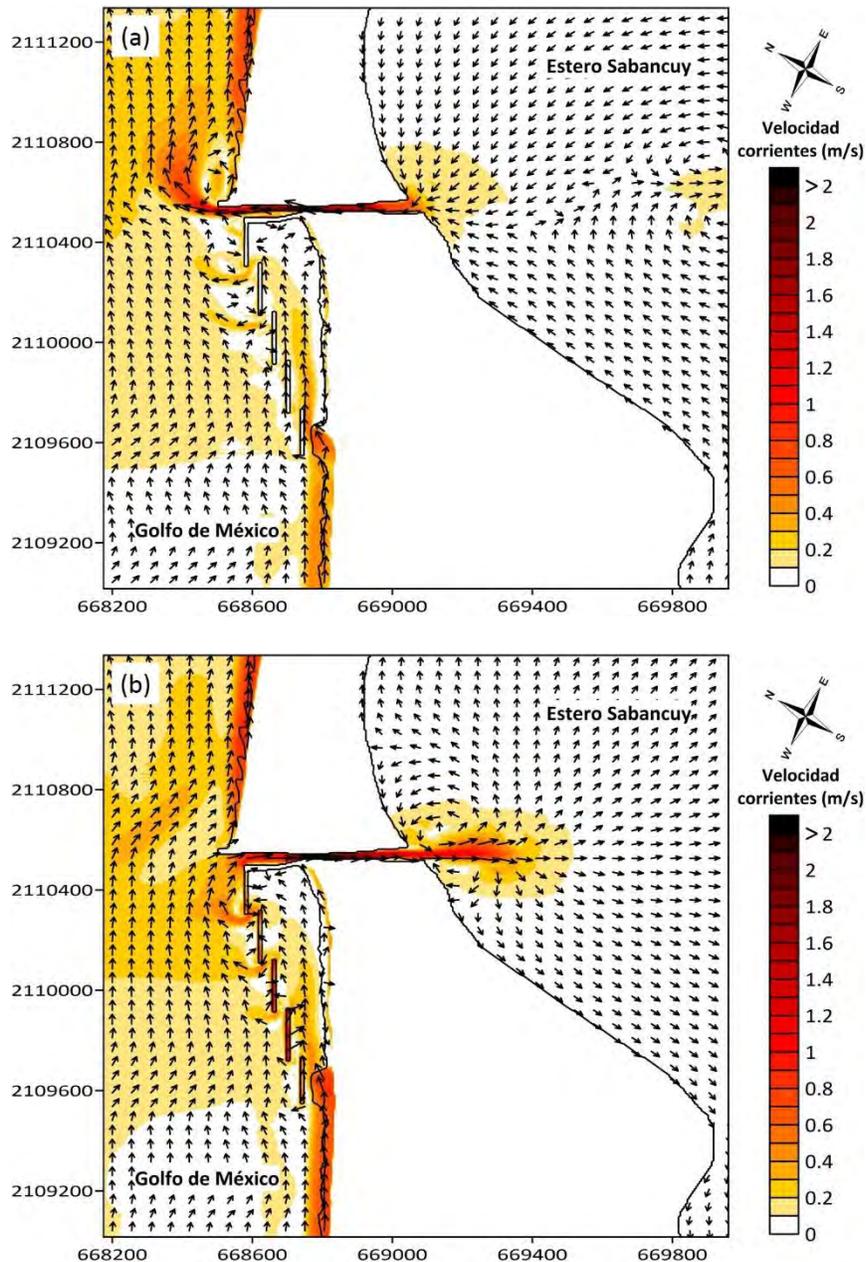


Figura 53. Velocidad y dirección de corrientes en condiciones de tormenta, playa con estructuras de protección, (a) Bajamar; (b) Pleamar.

En lo referido al nivel de agua, se tienen comportamientos y alturas iguales para ambas configuraciones de la costa, mostrando alturas que no rebasan los 0.8 m durante la bajamar. Cabe mencionar que los niveles de agua presentados corresponden a la marea astronómica en combinación con la marea de tormenta, por lo que las alturas alcanzadas en pleamar sobrepasan y cubren las estructuras de protección, alcanzando alturas que no superan los 1.4 m, estos niveles son suficientes para inundar los primeros metros del frente de la playa (Figuras 54 y 55).

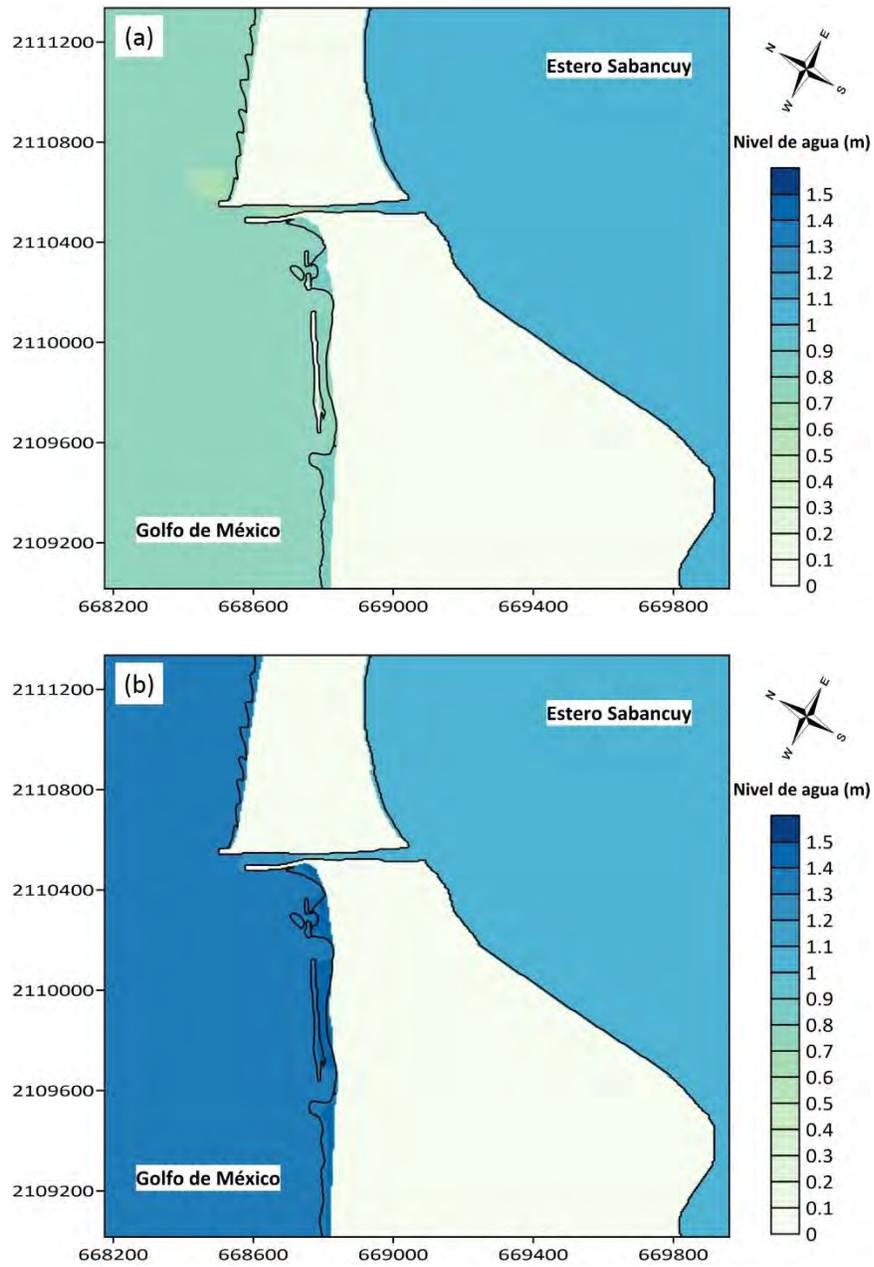


Figura 54. Nivel de agua en condiciones de tormenta, playa en estado actual, (a) Bajamar; (b) Pleamar.

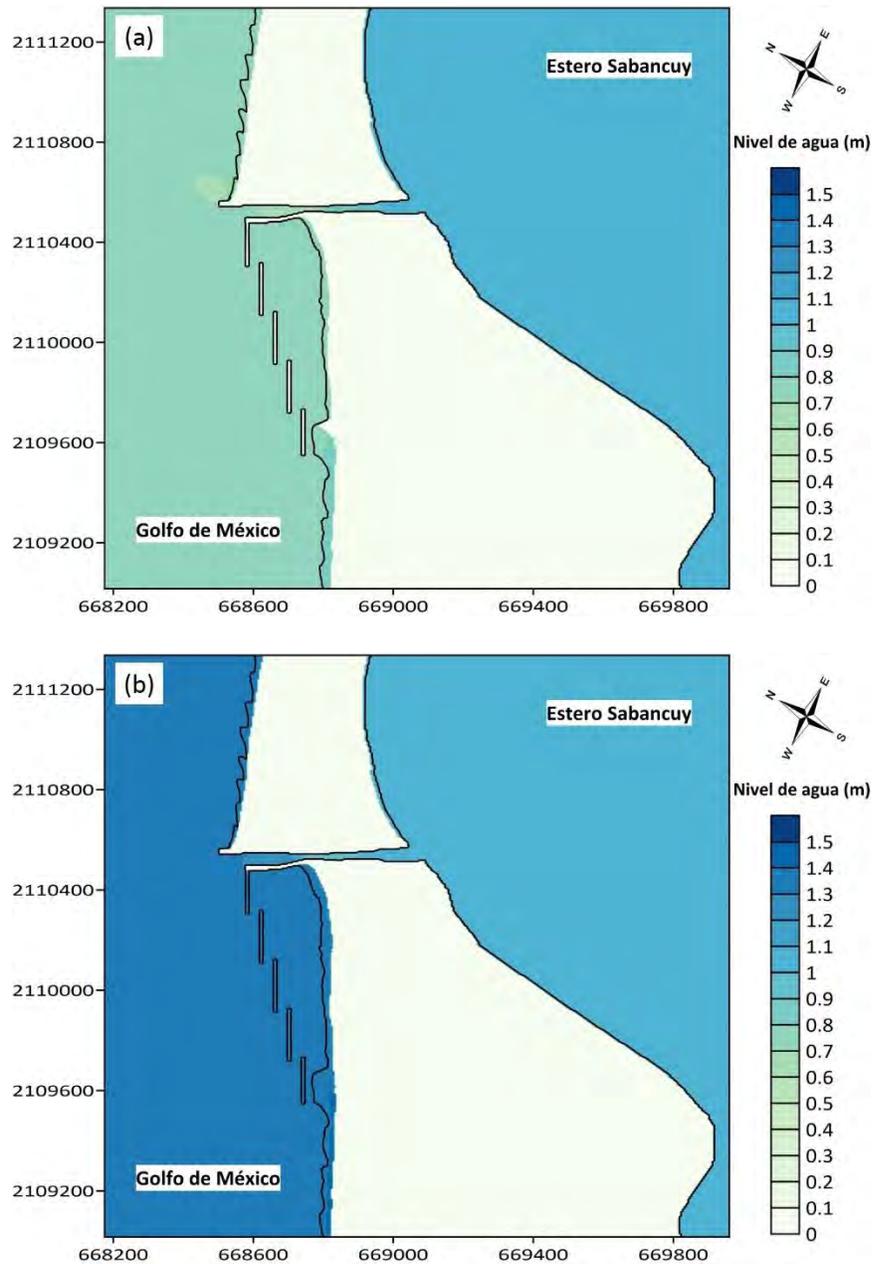


Figura 55. Nivel de agua en condiciones de tormenta, playa con estructuras de protección, (a) Bajamar; (b) Pleamar.

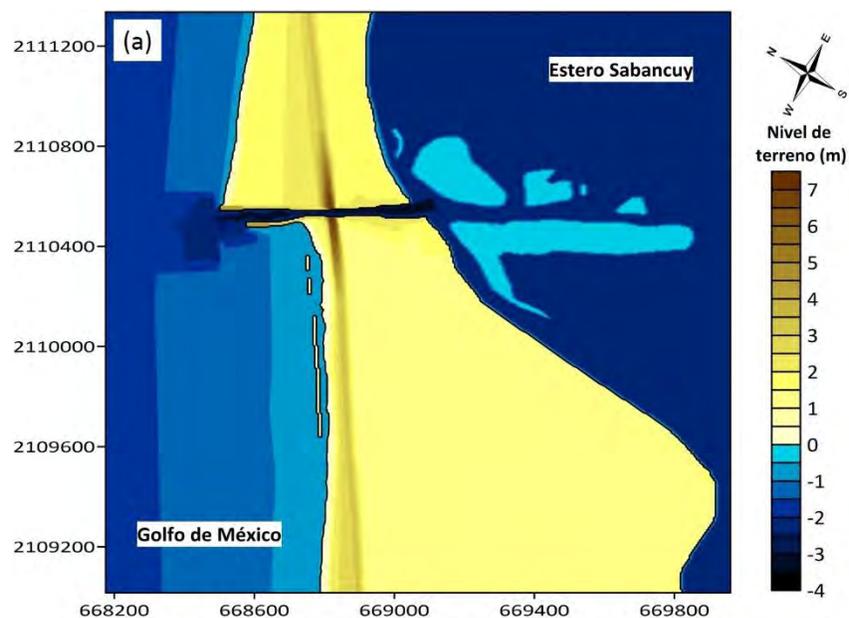
Los cambios en la morfología de la playa fueron más evidentes en la modelación del estado actual de la playa, debido a la casi nula protección que se tiene.

A primera vista el cambio ocurrido en la playa ante el oleaje de tormenta parece indicar que hubo un incremento en el ancho de playa llegando a formar tómbolos con los rompeolas (Figura 56), sin embargo, al hacer un análisis más detallado, mediante 5 perfiles transversales, se observa que el sedimento retenido en las estructuras es arena que fue removida de las partes altas del perfil de playa y desplazada hacia el mar lo que nos señala que existe erosión (Figuras 58 a 62). De igual forma, se puede observar profundidades mayores en las secciones

extremas de los rompeolas, debido al incremento en la velocidad de las corrientes ocasionado por su cercanía a la línea de costa.

Como se mencionó, la realización de un relleno artificial de playa forma parte de las medidas de protección consideradas, de tal modo que en conjunto con la colocación de los diques se tenga un sistema de defensa más efectivo.

Para evaluar cuál sería la mejor forma de colocar el sedimento a lo largo de la costa se contempló incrementar el ancho de playa en 15 m o crear una duna. Los resultados de la modelación mostraron cambios menores en la morfología mostrando estabilidad en el perfil de playa en ambas propuestas para la colocación del relleno (Figura 57). Únicamente en el área cercana al dique 5 hubo una mayor distribución de la arena llegándose a formar una saliente (Figuras 58 a 62).



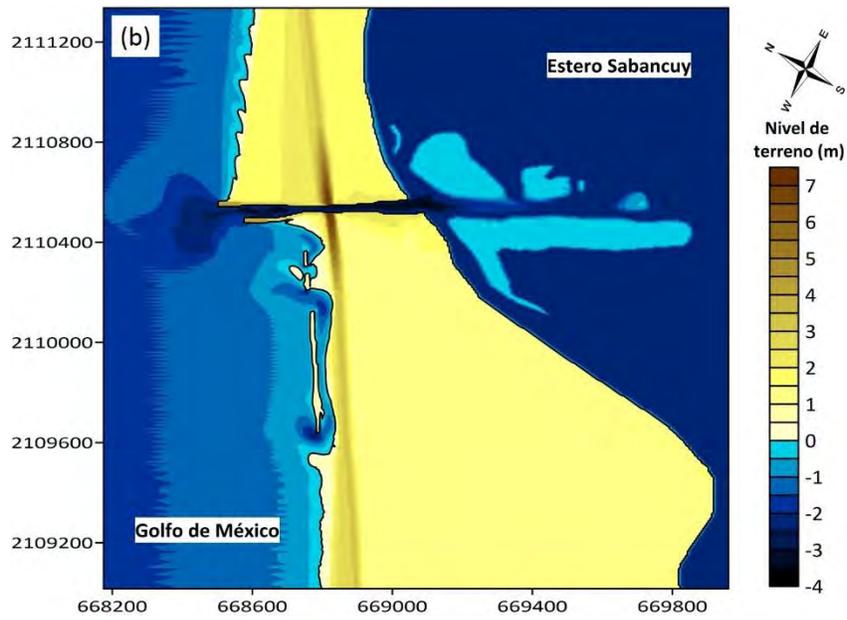
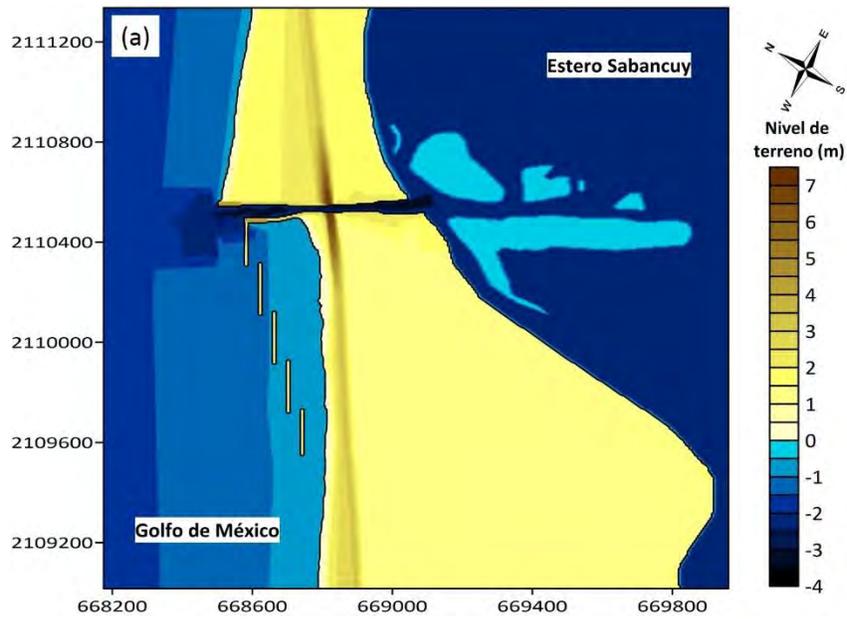


Figura 56. Morfología de playa en condiciones de tormenta, playa en estado actual, (a) Inicial; (b) Final.



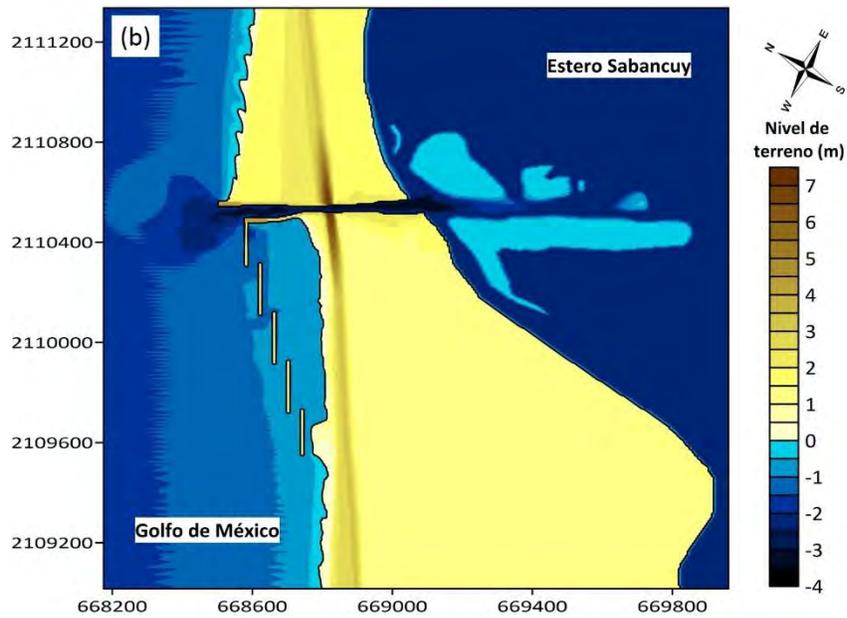
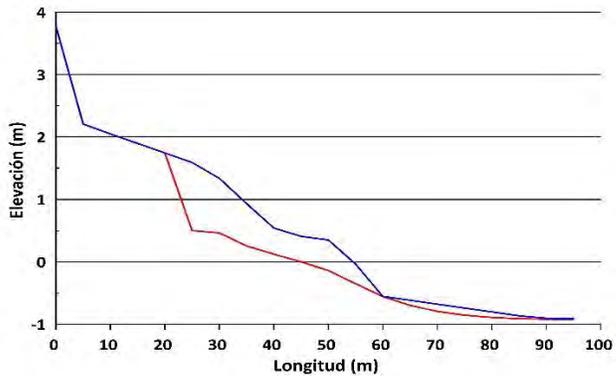
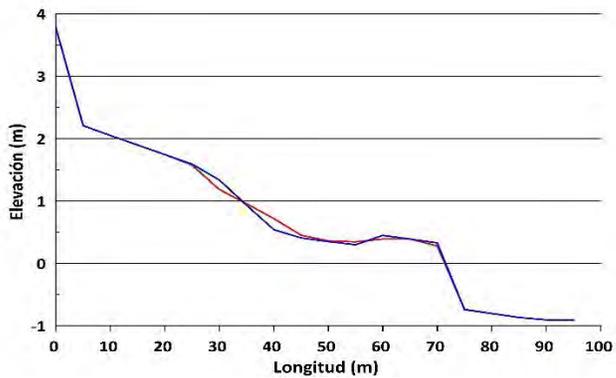


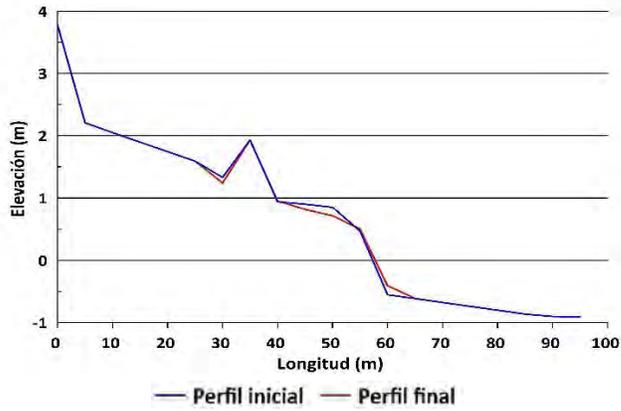
Figura 57. Morfología de playa en condiciones de tormenta, playa con estructuras de protección, (a) Inicial; (b) Final.



Playa en condiciones actuales

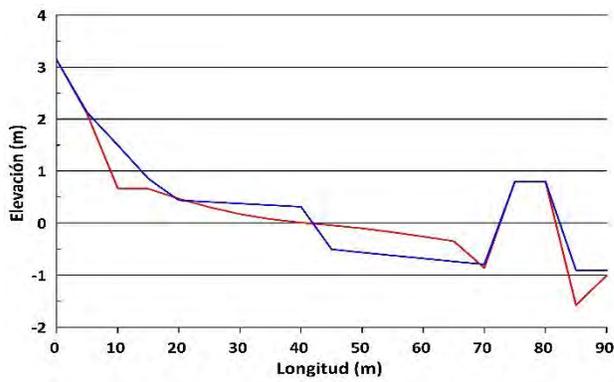


Playa con ancho aumentado

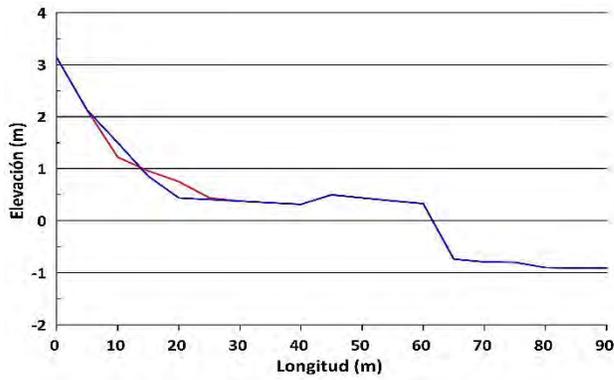


Playa con duna artificial

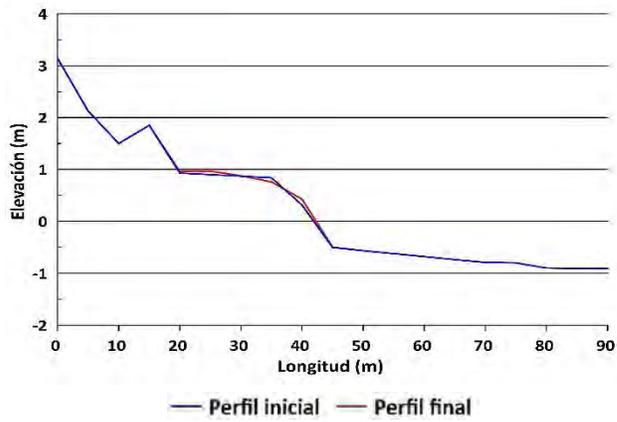
Figura 58. Perfil transversal 1.



Playa en condiciones actuales

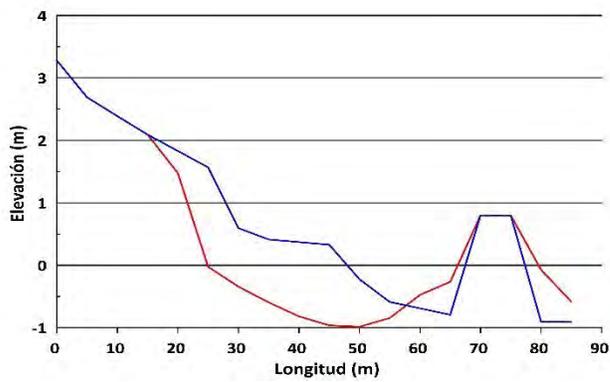


Playa con ancho aumentado

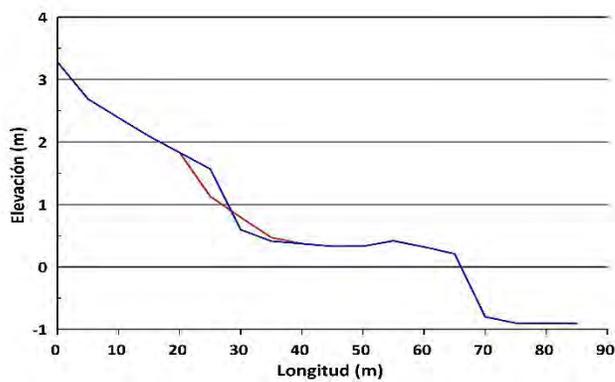


Playa con duna artificial

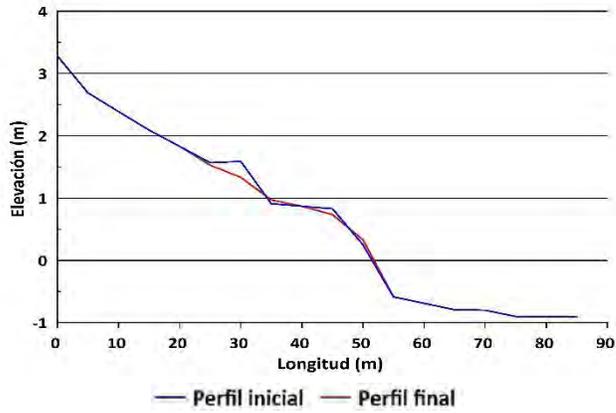
Figura 59. Perfil transversal 2.



Playa en condiciones actuales

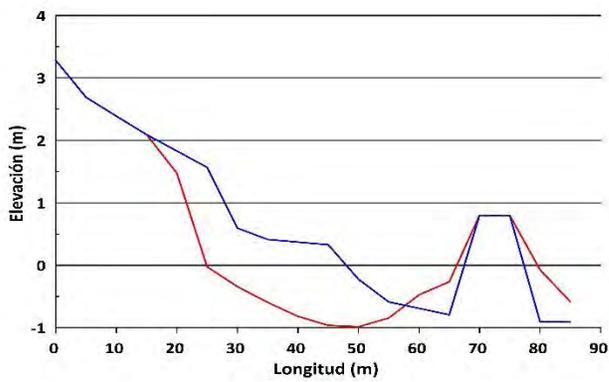


Playa con ancho aumentado

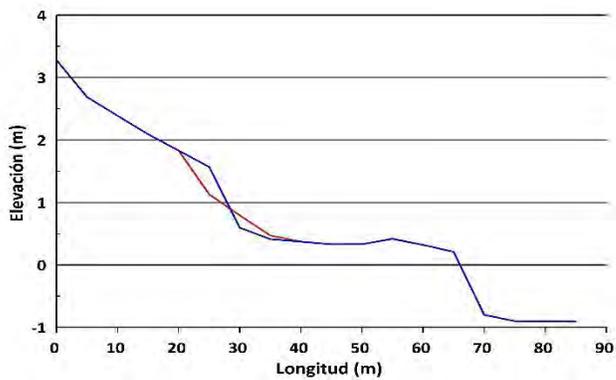


Playa con duna artificial

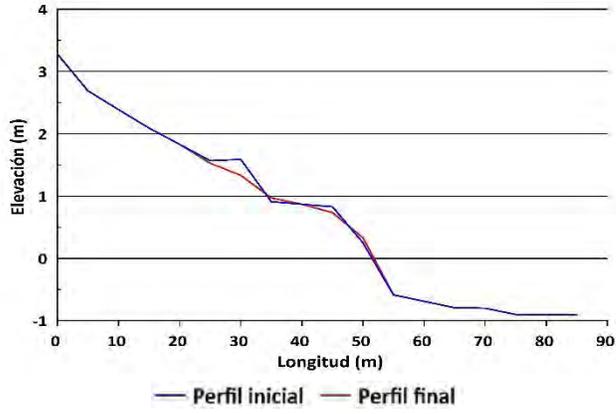
Figura 60. Perfil transversal 3.



Playa en condiciones actuales

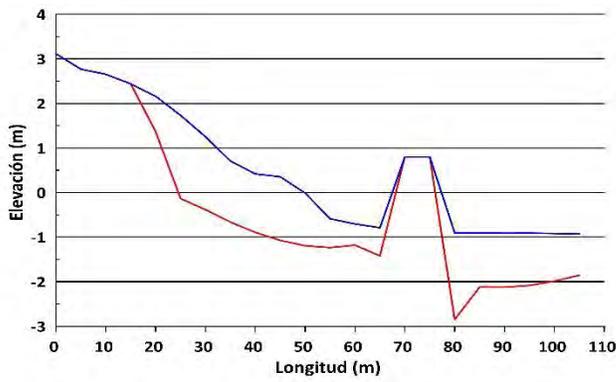


Playa con ancho aumentado

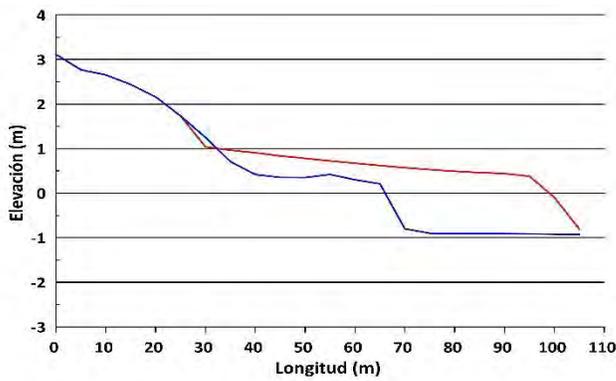


Playa con duna artificial

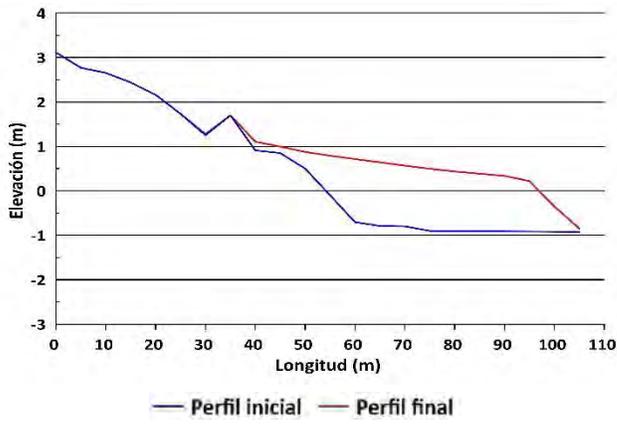
Figura 61. Perfil transversal 4.



Playa en condiciones actuales



Playa con ancho aumentado



Playa con duna artificial

Figura 62. Perfil transversal 5.

## 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los problemas de erosión en la playa de Sabancuy han dañado la costa hasta el punto de poner en riesgo la infraestructura del sitio.

Dado que las actividades recreativas y pesqueras en esta área son vitales para el bienestar socioeconómico de la zona, sumado a la relevancia ecológica del sitio; se requiere que cualquier solución propuesta deba favorecer la coexistencia de las actividades humanas con el sistema natural costero.

Con base en el análisis de imágenes satelitales, la playa al este del canal ha tenido un crecimiento de 70,933 m<sup>2</sup> con un avance de 6.75 m/año, mientras que la playa al oeste ha presentado un retroceso de 15,766 m<sup>2</sup> con una tasa de erosión de 2.78 m/año. Estos resultados indican el grave problema de erosión que se tiene en Sabancuy, tal como lo reportó López et al., (2014) demostrando que es una zona con alta tasa de erosión en la costa del estado de Campeche llegando a tener pérdidas de 6.8 m/año.

De igual forma el INEGI (2013) señala a Sabancuy como un área con susceptibilidad de erosión, determinando que el sector este de la playa es un área estable con tasa de erosión menor a los 250 m<sup>2</sup> por año, en tanto que el sector oeste presenta una condición aguda, lo que significa que hay pérdidas de playa entre los 2,500 y 5,000 m<sup>2</sup> por año.

La erosión costera no es problema únicamente de Sabancuy, es un problema de ámbito global que se muestra de forma severa en las playas del mundo (Cai et al., 2009; Brenner et al., 2010); es por ello, que en los últimos años, las soluciones de protección costera basadas en ingeniería ecológica o híbridas, se han implementado ampliamente como medidas más sostenibles y rentables frente a los esquemas convencionales de ingeniería costera (Temmerman et al., 2013). Sin embargo, existen limitaciones importantes para su aplicación; ya que estas defensas requieren de más espacio entre las áreas urbanizadas y la costa que las estructuras convencionales (Temmerman et al., 2013).

El análisis del grado de antropización, es una herramienta que facilita la comprensión del estado de conservación del área de estudio, indicando si el ecosistema conserva un estado natural, degradado o fragmentado, lo que ayuda en la toma de decisiones al momento de establecer medidas de protección.

En el área de Sabancuy López-González, et al. (2017), evaluaron el cambio actual del uso de suelo para determinar los efectos en la zona costera, mostrando que los manglares se han visto afectados tanto por causas naturales y antropogénicas (deforestación). De acuerdo al análisis de antropización realizado en este proyecto, se encontró que el 85% del área de estudio se considera como conservado, el 14% presenta un nivel medio de alteración y solo el 1% corresponde a un alto grado de alteración. Si bien el INRA ofrece una visión general de la situación en el área de estudio, muestra que es necesaria más investigación para evaluar si las condiciones del sitio permiten la colocación de las alternativas propuestas.

Actualmente las políticas de desarrollo no consideran los impactos ambientales del cambio en el uso del suelo en términos de servicios ecosistémicos (Mendoza-González et al., 2012). Por

este motivo, mediante la transferencia de valor se evaluaron los servicios proporcionados por los ecosistemas previamente identificados con el índice de antropización, encontrando que la protección contra tormentas proporcionado por las playas y dunas representan un valor promedio de cerca de 28,000 US\$/ha/año, mientras que en la cuestión estética y recreación el valor promedio estimado es de aproximadamente 10,000 US\$/ha/año.

Las valoraciones citadas sirven para que los tomadores de decisiones y población se involucren e inviertan en la protección y restauración de estos ecosistemas, ya que se requiere de una mayor inversión y esfuerzo para la restauración para la prevención y protección de las costas.

En algunos países costeros (Estados Unidos, Dinamarca y los Países Bajos) que cuentan con fuentes suficientes de arena, la erosión costera se mitiga principalmente mediante esquemas intensivos de rellenos de playa bajo el concepto de “construcción con la naturaleza”. A pesar de ello, en algunos lugares donde no se cuenta con disponibilidad de arena, se recurre a la colocación de estructuras en combinación con rellenos de playa, lo que permite el mantenimiento de la playa a largo plazo (L. van Rijn, 2013).

En sitios donde existe una fuerte actividad turística, el paisajismo juega un papel importante en el diseño de medidas de protección, en estas zonas se opta por el relleno artificial de playa frente a la colocación de estructuras rígidas, obteniendo mayor valor recreativo y estético. En México, Cancún, Quintana Roo, es el mayor ejemplo en donde se ha recurrido al relleno de playas, ejecutando proyectos de rellenos artificiales con un volumen de arena aproximado de 8 millones de m<sup>3</sup> (Martell, 2013).

Dado el estado actual en el que se encuentra la playa de Sabancuy y debido a la hidrodinámica de la zona, se llegó a que una solución híbrida es la más adecuada para mitigar el proceso de erosión, para lo cual se propone la construcción de 5 diques exentos en combinación con un relleno artificial de playa mejorado con vegetación de duna.

Los resultados de la simulación hidrodinámica muestran que los diques son capaces de disminuir la energía del oleaje de tormenta, evitando el arrastre de arena de la playa hacia el mar. Respecto al relleno de playa, para ambas disposiciones del sedimento analizadas se obtuvo pequeños cambios en el perfil de la playa, lo que nos demuestra la efectividad de los diques.

El volumen y colocación del relleno artificial propuesto en este trabajo no se pueden considerar como definitivos, debido a que no se cuenta con un monitoreo y un registro confiable de los cambios en el perfil de playa que sea lo suficientemente largo para poder estimar un correcto volumen de arena. No obstante, los resultados obtenidos muestran un panorama de cómo sería el comportamiento de la costa ante la presencia de sistemas de protección costera, los cuales pueden mejorarse al tener la información adecuada haciendo un ajuste en los parámetros contemplados.

De acuerdo al análisis sedimentario de la playa de Sabancuy, se obtiene que el tamaño promedio del sedimento en la zona de duna (sitio preferido de anidación de tortugas marinas) se encuentra clasificado como arenas medias a gruesas, por lo que es una playa adecuada para la anidación de las especies Carey y Blanca (García-Vicario, 2008; Bolongaro et al., 2010; Márquez-García, Campos-Verduzco, y Castro-Soriano, 2010), principalmente en el lado oeste de la playa donde

predominan granos de tamaño medio, lo cual está directamente relacionado con que en este sector de la playa es donde se han tenido la mayor cantidad de nidos de acuerdo a lo reportado.

El tamaño de sedimento es un factor muy importante a tomar en cuenta al momento de llevar a cabo un relleno de playa. Porque la colocación de arena que sea drásticamente diferente a la nativa, podría afectar la selección del sitio de los nidos, el comportamiento de excavación, la temperatura de incubación y el contenido de humedad de los nidos, o si se permite el relleno durante la temporada de anidación, los nidos también pueden enterrarse muy por debajo de la superficie o ser arrollados por maquinaria pesada (Kana y Mohan, 1998; Benedet et al., 2004; Elko y Wang, 2007; Cisneros, Roberts Briggs, y Martin, 2017). Sin embargo, los proyectos de relleno implementados adecuadamente pueden ayudar a las poblaciones de tortugas marinas al aumentar el hábitat de anidación que de otro modo no estaría disponible (Kana y Mohan, 1998; Benedet et al., 2004; Byrd, 2004; Elko y Wang, 2007; Brock, Reece, y Ehrhart, 2009).

Después de estas intervenciones, crear un plan de gestión y monitoreo del área será indispensable para asegurar su efectividad. Se esperará como resultado se tenga una playa estable, con ciclos similares a los que ocurren naturalmente, teniendo un impacto positivo en la conservación del área de anidación de tortugas marinas, así como en la protección de la Carretera Federal 180 y la mejora de los servicios turísticos en la playa; además se mantendría la actividad pesquera en la región ya que las escolleras del canal de acceso al estero no tendrían que ser removidas. Por lo tanto, esta combinación de intervenciones genera una solución híbrida para el control de la erosión y la acumulación de sedimentos en el área útil para evitar el empeoramiento de los problemas, requiriendo intervenciones a mayor escala. El éxito de la solución aquí propuesta, dependerá de un buen manejo costero que permita la restauración de los ecosistemas del área.

Finalmente, en este documento se resalta la importancia de la ingeniería ecológica como una opción de protección para la costa prioritaria cuando sea necesaria y posible su aplicación. Sin embargo, también se quiere dejar claro que en ocasiones dado el estado de conservación y la necesidad inmediata para proteger el litoral, como es el caso de Sabancuy, es necesario recurrir a enfoques híbridos, teniendo así una amplia gama de opciones que deben ser evaluadas para su adecuada implementación.

## **8. RECOMENDACIONES**

Parte del desarrollo de este trabajo de investigación consistió en describir aspectos físicos así como la dinámica costera de un sector en el litoral del estado de Campeche con el objetivo de obtener la mejor solución al problema planteado. Teniendo en cuenta la metodología desarrollada y los resultados obtenidos se hacen las siguientes recomendaciones:

- Realizar un monitoreo constante de la playa por medio de levantamientos de perfiles de playa, durante las diferentes épocas climáticas para generar una base de datos robusta que permita mejorar la propuesta aquí presentada.
- Tomar muestras de arena en las tres épocas climáticas que rigen el área y crear un registro de parámetros de textura para determinar los cambios en la conformación del sedimento.
- Instalar equipos de medición que permitan registrar datos de marea, oleaje y viento en la zona de estudio.
- Actualizar la batimetría de la costa, del interior del estero y del canal de acceso.

## **9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO**

Durante el progreso de este trabajo existieron rubros que no fueron incluidos o estudiados a fondo debido al tiempo que se requiere para llevarlo a cabo, pero que son de importancia para la generación de conocimiento base para proyectos posteriores.

Como futuras líneas de investigación se propone:

- Simular numéricamente la variabilidad del nivel del mar considerando escenarios de cambio climático.
- Valorar económicamente la realización de las medidas de protección propuestas.
- Evaluar desde un punto de vista completamente biológico las alternativas de restauración del ecosistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agraz Hernández, C. M., Chan Keb, C. A., Iriarte-Vivar, S., Posada Vanegas, G., Vega Serratos, B., y Osti Sáenz, J. (2015). Phenological variation of *Rhizophora mangle* and ground water chemistry associated to changes of the precipitation. *Hidrobiológica*, 25(1), 49–61.
- Agraz Hernández, C. M., Osti Sáenz, J., Chan Keb, C., Arriaga Martínez, V., Acosta Velázquez, J., Castillo Domínguez, S., Gómez Ramírez, D., Reyes Castellanos, J., Conde Medina, P., y Martínez Kumul, J. (2015). Grado de conservación del ecosistema de mangle en la laguna de Términos, Campeche. Propuesta de políticas ambientales y acciones de restauración. En J. Ramos Miranda & G. J. Villalobos-Zapata (Eds.), *Aspectos socioambientales de la región de la laguna de Términos* (pp. 117–132). Universidad Autónoma de Campeche.
- Agraz Hernández, C. M., Osti Sáenz, J., García Zaragoza, C., Chan Keb, C., Chan Canul, E., Arana Lezama, R., y Torcuato Hidalgo, M. (2010). Estrategias de restauración de ecosistemas de manglar en México. *Jaina*, 21(2), 5–27.
- Allsop, N. W. H. (1990). Reflection Performance of Rock Armoured Slopes in Random Waves. *Coastal Engineering 1990*, 1460–1472.
- Anfuso, G. (2004). Caracterización de celdas litorales en un tramo costero aparentemente homogéneo del litoral de Cádiz (SO de España). *Revista C & G*, 18(1–2), 25–36.
- Arens, S. M., y Geelen, L. H. W. T. (2006). Dune Landscape Rejuvenation by Intended Destabilisation in the Amsterdam Water Supply Dunes. *Journal of Coastal Research*, 2006(225), 1094–1107.
- Ballard, J., Pezda, J., y Spencer, D. (2015). *An Economic Valuation of Southern California Coastal Wetlands*.
- Balvanera, P., Daily, G. C., Ehrlich, P. R., Ricketts, T. H., Bailey, S. A., Kark, S., Kremen, C., y Pereira, H. (2001). Conserving Biodiversity and Ecosystem Services. *Science*, 291.
- Bann, C. (1999). *A Contingent Valuation of the Mangroves of Benut, Johor State, Malaysia*.
- Barbier, B. E. (2013). Valuing Ecosystem Services for Coastal Wetland Protection and Restoration: Progress and Challenges. *Resources*, 2(3).
- Barbier, E. B. (2007). Valuing Ecosystem Services as Productive Inputs. *Economic Policy*, 22(49), 177–229.
- Barbier, E. B., y Strand, I. (1998). Valuing Mangrove-Fishery Linkages – A Case Study of Campeche, Mexico. *Environmental and Resource Economics*, 12(2), 151–166.
- Barbier, E. B., Strand, I., y Sathirathai, S. (2002). Do Open Access Conditions Affect the Valuation of an Externality? Estimating the Welfare Effects of Mangrove-Fishery Linkages in Thailand. *Environmental and Resource Economics*, 21(4), 343–365.

- Bates, P. D., Dawson, R. J., Hall, J. W., Horritt, M. S., Nicholls, R. J., Wicks, J., y Mohamed Ahmed Ali Mohamed Hassan. (2005). Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. *Coastal Engineering*, 52(9), 793–810.
- Batker, D., de la Torre, I., Costanza, R., Swedeen, P., Day, J. W., Boumans, R., y Bagstad, K. (2010). *Gaining Ground: Wetlands, Hurricanes and the Economy: The Value of Restoring the Mississippi River Delta (Part 1/2)*.
- Benedet, L., Finkl, C. W., Campbell, T., y Klein, A. (2004). Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment. *Coastal Engineering*, 51(8), 839–861.
- Bennett, E. L., y Reynolds, C. J. (1993). The value of a mangrove area in Sarawak. *Biodiversity & Conservation*, 2(4), 359–375.
- Berry, A., Fahey, S., y Meyers, N. (2013). Changing of the Guard: Adaptation Options That Maintain Ecologically Resilient Sandy Beach Ecosystems. *Journal of Coastal Research*, 29(4), 899–908.
- Bologaro Crevenna, A., Márquez García, A. Z., Torres Rodríguez, V., y García Vicario, A. (2010). Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el estado de Campeche. En A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, & J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (pp. 73–96). Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Bonanata, R., Media, R., Silveira, L., y Benedet, L. (2009). Metodología para la caracterización del clima marítimo en un punto cerca de la costa a partir de una serie de datos en aguas profundas. *VI Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria Seminario Latinoamericano “Desarrollo Sustentable de la Infraestructura Portuaria Marítima y Fluvial en América Latina”*, 1–14.
- Borsje, B. W., van Wesenbeeck, B. K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T. J., van Katwijk, M. M., y de Vries, M. B. (2011). How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering*, 37(2), 113–122.
- Brander, L. (2013). *Guidance Manual Value Transfer Methods for Ecosystem Services*.
- Brenner, J., Jiménez, J. A., Sardá, R., y Garola, A. (2010). An assessment of the non-market value of the ecosystem services provided by the Catalan coastal zone, Spain. *Ocean & Coastal Management*, 53(1), 27–38.
- Bricio Garberí, L., Negro Valdecantos, V., y Diez González, J. J. (2007). Parámetros geométricos de diques exentos en el litoral catalán. *Ingeniería civil*, 147, 91–104.
- Briseño Dueñas, R., y Abreu Grobois, A. (1994). *Las tortugas marinas y sus playas de anidación en México*.

- Brock, K. A., Reece, J. S., y Ehrhart, L. M. (2009). The Effects of Artificial Beach Nourishment on Marine Turtles: Differences between Loggerhead and Green Turtles. *Restoration Ecology*, 17(2), 297–307.
- Brookshire, D. S., y Neill, H. R. (1992). Benefit transfers: Conceptual and empirical issues. *Water Resources Research*, 28(3), 651–655.
- Browne, M. A., y Chapman, M. G. (2011). Ecologically Informed Engineering Reduces Loss of Intertidal Biodiversity on Artificial Shorelines. *Environmental Science & Technology*, 45(19), 8204–8207.
- Buitrago, J., y Ziegler, J. (2004). Sand grain size characteristics and incubation temperature at the green nesting beach in Aves Island, Venezuela. En M. S. Coyne & R. D. Clark (Eds.), *Annual Symposium on the Sea Turtle Biology and Conservation*.
- Bulleri, F., y Chapman, M. G. (2010). The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments. *Journal of Applied Ecology*, 47(1), 26–35.
- Byrd, J. I. (2004). *The effect of beach nourishment on loggerhead sea turtle (Caretta caretta) nesting in South Carolina*. College of Charleston.
- Cai, F., Su, X., Liu, J., Li, B., y Lei, G. (2009). Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Progress in Natural Science*, 19(4), 415–426.
- Camacho-Valdez, V., Ruiz-Luna, A., Ghermandi, A., y Nunes, P. A. L. D. (2013). Valuation of ecosystem services provided by coastal wetlands in northwest Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 78, 1–11.
- Campbell, A., Kapos, V., Scharlemann, J. P. W., Bubb, P., Chenery, A., Coad, L., Dickson, B., Doswald, N., Khan, M. S. I., Kershaw, F., y Rashid, M. (2009). Review of the Literature on the Links Between Biodiversity and Climate Change: Impacts, Adaptation, and Mitigation. En *Diversity* (Vol. 42, Número 42). Secretariat of the Covention on Biological Diversity.
- Campos Flores, G. J., y Crespo Guerrero, J. M. (2018). Organización espacial de la pesca comercial ribereña en el área de protección de flora y fauna Lguna de Términos, México. *Investigaciones Geográficas*, 96.
- Canepa Pérez, I. M., y Cú Quijano, F. (2010). Indicadores socioeconómicos de desarrollo humano y desarrollo relativo al género en la sección municipal de Sabancuy, Carmen, Campeche. *Revista de Economía*, 27(75), 73–102.
- Canul Turriza, R. A. (2015). *Comportamiento morfodinámico de la línea de costa cercana al campamento tortugero Chenkán, Campeche, México*. Universidad Autónoma de Campeche.

- Carranza-Edwards, A., Gutiérrez-Estrada, M., y Rodríguez Torres, R. (1975). Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas. *Anales Del Centro De Ciencias Del Mar Y Limnología*, 2(1), 81–88.
- Carranza-Edwards, A., Márquez-García, A. Z., Tapia-Gonzalez, C. I., Rosales-Hoz, L. R., y Alatorre-Mendieta, M. A. (2015). Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67, 21–43.
- Chen, H.-C., Cheng, I.-J., y Hong, E. (2007). The Influence of the Beach Environment on the Digging Success and Nest Site Distribution of the Green Turtle, *Chelonia mydas*, on Wan-An Island, Penghu Archipelago, Taiwan. *Journal of Coastal Research*, 1277–1286.
- Chen, T.-H., y Cheng, I.-J. (1995). Breeding biology of the green turtle, *Chelonia mydas*, (Reptilia: Cheloniidae) on Wan-An Island, Peng-Hu Archipelago, Taiwan. I. Nesting ecology. *Marine Biology*, 124(1), 9–15.
- Cheong, S.-M., Silliman, B., Wong, P. P., van Wesenbeeck, B., Kim, C.-K., y Guannel, G. (2013). Coastal adaptation with ecological engineering. *Nature Climate Change*, 3, 787–791.
- Cisneros, J. A., Roberts Briggs, T., y Martin, K. (2017). Placed sediment characteristics compared to sea turtle nesting and hatching patterns: A case study from Palm Beach County, FL. *Shore and Beach*, 85(2), 35–40.
- CONABIO. (2013). *Mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares, Región Península de Yucatán (1981)*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- CONABIO. (2016). *Mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares, Región Península de Yucatán (2015)*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- CONAPESCA. (2017). *Datos estadísticos por oficina de CONAPESCA, Subdelegación Campeche*.
- Cooper, E., Burke, L., y Bood, N. (2008). *Coastal Capital: Economic Contribution of Coral Reefs and Mangroves to Belize*.
- Cortes López, L. (2017). *Desarrollo de un índice de riesgo sobre la ocurrencia de opresión costera en el Centro-Norte del estado de Veracruz*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., y van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260.

- Day, J. W., Boesch, D. F., Clairain, E. J., Kemp, G. P., Laska, S. B., Mitsch, W. J., Orth, K., Mashriqui, H., Reed, D. J., Shabman, L., Simenstad, C. A., Streever, B. J., Twilley, R. R., Watson, C. C., Wells, J. T., y Whigham, D. F. (2007). Restoration of the Mississippi Delta: Lessons from Hurricanes Katrina and Rita. *Science*, 315(5819), 1679 LP – 1684.
- Day, J. W., Psuty, N. P., y Perez, B. C. (2000). The Role of Pulsing Events in the Functioning of Coastal Barriers and Wetlands: Implications for Human Impact, Management and the Response to Sea Level Rise BT - Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology. En M. P. Weinstein & D. A. Kreeger (Eds.), *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology* (pp. 633–659). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/0-306-47534-0\\_29](https://doi.org/10.1007/0-306-47534-0_29)
- de Groot, R. S., Wilson, M. A., y Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408.
- De la Lanza, G., y Cáceres, C. (1994). *Lagunas costeras y el litoral mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Department for Environment Food and Rural Affairs. (2007). An introductory guide to valuing ecosystem services. En *An introductory guide to valuing ecosystem services*.
- Desvousges, W. H., Naughton, M. C., y Parsons, G. R. (1992). Benefit transfer: Conceptual problems in estimating water quality benefits using existing studies. *Water Resources Research*, 28(3), 675–683.
- Drillinger, M. (2020). Developers turn attention toward Campeche state. *Travel Weekly*. <https://www.travelweekly.com/Mexico-Travel/Insights/Developers-turn-attention-toward-Campeche-state>
- Earth Economics. (2010). *Nature's Value in the Terraba-Sierpe National Wetlands: The Essential of Ecosystem Services*.
- Elko, N. A., y Wang, P. (2007). Immediate profile and planform evolution of a beach nourishment project with hurricane influences. *Coastal Engineering*, 54(1), 49–66.
- Envalue. (2007). *New South Wales Environment Protection Authority*.
- Everard, M., Jones, L., y Watts, B. (2010). Have we neglected the societal importance of sand dunes? An ecosystem services perspective. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 20(4), 476–487.
- FAO. (2005). *Mangrove management*. <http://www.fao.org/forestry/mangrove/3645/en/>
- Fernández Díaz, V. (2018). *Evaluación del aumento del riesgo físico y socioeconómico asociado al incremento del nivel del mar en la zona costera de Ensenada, Baja California, México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Ferrer Sánchez, Y., Díaz-Fernández, R., y Díaz Fernández, R. (2007). Características de la anidación de la tortuga verde *Chelonia mydas* (Testudinata, Cheloniidae) en la playa Caleta de los Piojos, Cuba, a partir de marcaciones externas. *Animal Biodiversity and Conservation*, 30.2, 211–218.
- Flores-Verdugo, F. J., Agraz Hernández, C. M., y Benítez Pardo, D. (2005). Creación y restauración de ecosistemas de manglar: Principios básicos. En P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa Rojas, & A. C. Travieso Bello (Eds.), *Manejo integral de la zona costera: Un enfoque municipal* (pp. 1093–1110). Instituto de Ecología.
- Folk, Robert L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company.
- Folk, Robert Louis, y Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3–26.
- French, P. W. (2001). *Coastal Defences. Processes, Problems and Solutions*. Routledge.
- Fuentes, M. M. P. B., Dawson, J. L., Smithers, S. G., Hamann, M., y Limpus, C. J. (2010). Sedimentological characteristics of key sea turtle rookeries: potential implications under projected climate change. *Marine & freshwater research*, 61(4), 464–473.
- Gallien, T. W. (2016). Validated coastal flood modeling at Imperial Beach, California: Comparing total water level, empirical and numerical overtopping methodologies. *Coastal Engineering*, 111, 95–104.
- García-Vicario, A. (2008). *Impacto de la erosión costera de las playas del litoral de Campeche, México, sobre la anidación de las tortugas marinas*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- García Gómez, M. A., Santiago Antonio, G., y Wicab Cámara, G. (2018). Desarrollo ambiental y humano en cooperativas pesqueras de Sabancuy, Carmen, Campeche. *Administración Contemporánea*, 10(33), 63–77.
- Gedan, K B, y Silliman, B. R. (2009). Using Facilitation Theory to Enhance Mangrove Restoration. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(2), 109.
- Gedan, Keryn B, Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B., y Silliman, B. R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7–29.
- Gobierno del estado de Campeche. (2008). *Obras de dragado y mantenimiento en Sabancuy*.
- Gordon, D. R. (1998). Effects of invasive, non-indigenous plant species on ecosystem processes: Lessons from Florida. *Ecological Applications*, 8(4), 975–989.

- Gunawardena, M., y Rowan, J. S. (2005). Economic Valuation of a Mangrove Ecosystem Threatened by Shrimp Aquaculture in Sri Lanka. *Environmental Management*, 36(4), 535–550.
- Guzmán Hernández, V. (2001). *Evaluación de las poblaciones de tortugas marinas de Campeche. Sinopsis de la protección e investigación 1977-2001.*
- Guzmán Hernández, V. (2004). *Informe final de la temporada de anidación 2004 de tortugas marinas en Isla Aguada, Campeche.*
- Guzmán Hernández, V. (2006). *Informe técnico final del programa de conservación de tortugas marinas de Campeche, México en 2005.*
- Hale, L. Z., Meliane, I., Davidson, S., Sandwith, T., Beck, M., Hoekstra, J., Spalding, M., Murawski, S., Cyr, N., Osgood, K., Hatziolos, M., Eijk, P. van, Davidson, N., Eichbaum, W., Dreus, C., Obura, D., Tamelander, J., Herr, D., McClennen, C., y Marshall, P. (2009). Ecosystem-based adaptation in marine and coastal ecosystems. *Renewable Resources Journal*, 25(4), 21–28.
- Halpern, B. S., Silliman, B. R., Olden, J. D., Bruno, J. P., y Bertness, M. D. (2007). Incorporating Positive Interactions in Aquatic Restoration and Conservation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(3), 153–160.
- Hamilton, L. S., y Snedaker, S. C. (1984). *Handbook for mangrove area management.* East West Centre.
- Hansom, J. D. (2001). Coastal sensitivity to environmental change: a view from the beach. *CATENA*, 42(2), 291–305.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H. H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., y Spanhoff, R. (2002). Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview. *Coastal Engineering*, 47(2), 81–111.
- Heath, M., Phillips, J., Munroe, R., y Langley, N. (2009). *Partners with Nature. How Healthy Ecosystems Are Helping the World's Most Vulnerable Adapt to Climate Change.* Birdlife International.
- Hirth, H. F. (1971). *Synopsis of biological data on the green turtle Chelonia mydas (Linnaeus) 1758.*
- Horrocks, J. A., y Scott, N. H. (1991). Nest site location and nest success in the hawksbill turtle *Eretmochelys imbricata* in Barbados, West Indies. *Marine Ecology Progress Series*, 69, 1–8.
- IH-Cantabria. (s/f). *CAROL.*

- INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/default.aspx?ev=5>
- INEGI. (2013). *Mapa de Susceptibilidad del Fenómeno de Erosión Costera en el Litoral del Estado de Campeche*.
- INEGI. (2016). *Litorales de México*. <http://www.inegi.org.mx/>
- Inman, D. L. (1952). Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 22(3), 125–145.
- Janekarnkij, P. (2010). *Assessing the Value of Krabi River Estuary Ramsar Site: Conservation and Development*.
- Kana, T. W., y Mohan, R. K. (1998). Analysis of nourished profile stability following the fifth Hunting Island (SC) beach nourishment project. *Coastal Engineering*, 33(2), 117–136.
- Kauffman, G. J. (2011). *Economic Value of Stormwater in Delaware*.
- Koch, E. W., Barbier, E. B., Silliman, B. R., Reed, D. J., Perillo, G. M., Hacker, S. D., Granek, E. F., Primavera, J. H., Muthiga, N., Polasky, S., Halpern, B. S., Kennedy, C. J., Kappel, C. V., y Wolanski, E. (2009). Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 29–37.
- Kramer, M., y Burcharth, H. (2004). Stability of Low-Crested Breakwaters in Shallow Water Short Crested Waves. En *Coastal Structures 2003* (pp. 137–149).
- Lara-Domínguez, A. L., Yañez Arancibia, A., y Seijo, J. C. (1998). Valuación económica de los ecosistemas. Estudio de caso de los manglares en Campeche. En H. Benítez, E. Vega, A. Peña Jimenez, & S. Ávila Foucat (Eds.), *Aspectos Económicos sobre la Biodiversidad de México* (p. 199). CONABIO, Instituto Nacional de Ecología.
- Ley Vega de Seoane, C., Gallego Fernández, J., y Vidal Pascual, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas.
- Limpus, C. J., Miller, J. D., Parmenter, C. J., y Limpus, D. J. (2003). The green turtle, *Chelonia mydas*, population of Raine Island and the northern Great Barrier Reef: 1843-2001. *Memoirs of the Queensland Museum.*, 49(1), 349–440.
- Liu, S., Costanza, R., Troy, A., D’Aagostino, J., y Mates, W. (2010). Valuing New Jersey’s Ecosystem Services and Natural Capital: A Spatially Explicit Benefit Transfer Approach. *Environmental Management*, 45(6), 1271–1285.
- López-González, E., Márquez-García, A. Z., y Toledo-Guzmán, A. (2017). Cambio de uso de suelo en la zona litoral entre Ciudad del Carmen y Sabancuy en el estado de Campeche, México. En A. Botello, S. Villanueva, J. Gutiérrez, & J. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático* (pp. 105–116).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Campeche.

- López Rosas, H., Moreno-Casasola, P., Infante Mata, D., Espejel, I., Jiménez-Orocio, Ó., Martínez, M. L., Rodríguez-Revelo, N., Espejel González, V. E., y Monroy, R. (2014). Campeche. En Ma. Luisa Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, Ó. Jiménez-Orocio, D. Infante Mata, & N. Rodríguez-Revelo (Eds.), *Diagnóstico de las dunas costeras de México* (pp. 169–180). CONAFOR.
- Losada, M. A., y Gimenez-Curto, L. A. (1979). The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number. *Coastal Engineering*, 3, 77–96.
- Mahalingaiah, A. V, Tayade, B. R., Gokhale, N. V, y Kudale, M. D. (2015). Design of Submerged Offshore Reefs for the Coastal Protection Measures. *Aquatic Procedia*, 4, 198–205.
- March Mifsut, I., y Martínez, M. L. (2007). *Especies invasoras de alto impacto a la biodiversidad. Prioridades en México*. IMTA-CONABIO-GECI-AridAmérica-The Nature Conservancy.
- Márquez-García, A. Z., Campos-Verduzco, R., y Castro-Soriano, B. S. (2010). Sedimentología y morfología de la playa de anidación para tortugas marinas, El Carrizal, Coyuca de Benítez, Guerrero. *Hidrobiológica*, 20(2), 101–112.
- Martell, R. (2013). *Hidrodinámica litoral y evolución morfológica en playas con aporte sedimentario escaso*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez-Dueñas, W. A. (2010). INRA - Índice integrado relativo de antropización: propuesta técnica-conceptual y aplicación. *Intropica*, 5.
- Mateo Rodríguez, J. M., y Ortiz Pérez, M. A. (2001). La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica. En *Serie varia - Instituto de Geografía. UNAM* (Número 1). Instituto de Geografía, UNAM. <https://biblat.unam.mx/es/revista/serie-varia-instituto-de-geografia-unam/articulo/la-degradacion-de-los-paisajes-como-concepcion-teorico-metodologica>
- Mazda, Y., Magi, M., Ikeda, Y., Kurokawa, T., y Asano, T. (2006). Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp. *Wetlands Ecology and Management*, 14(4), 365–378.
- Mazda, Y., Magi, M., Kogo, M., y Hong, P. N. (1997). Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam. *Mangroves and Salt Marshes*, 1(2), 127–135.
- McGranahan, G., Balk, D., y Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19(1), 17–37.

- McIvor, A. L., Möller, I., Spencer, T., y Spalding, M. (2012). *Reduction of wind and swell waves by mangroves. Natural Coastal Protection Series: Report 1.*
- Mendoza-González, G., Martínez, M. L., Lithgow, D., Pérez-Maqueo, O., y Simonin, P. (2012). Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico. *Ecological Economics*, 82, 23–32.
- Midun, Z., y Lee, S. (1989). Mud Coast Protection - The Malaysian Experience. En O. Magoon (Ed.), *Coastal Zone '89 Conference Proceeding* (pp. 806–820).
- Mitsch, W. J., y Jørgensen, S. E. (2003). Ecological engineering: A field whose time has come. *Ecological Engineering*, 20(5), 363–377.
- Möller, I., Spencer, T., French, J. R., Leggett, D. J., y Dixon, M. (1999). Wave Transformation Over Salt Marshes: A Field and Numerical Modelling Study from North Norfolk, England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49(3), 411–426.
- Molnar, M., Kocian, M., y Batker, D. (2012). *Valuing the Aquatic Benefits of British Columbia's Lower Mainland: Nearshore Natural Capital Valuation.*
- Morán García, D. (2005). *Estimación de los tiempos de residencia en la Laguna de Términos, Campeche.* Universidad Nacional Autónoma de México.
- Moreno-Casasola, P. (2004). Las playas y dunas del Golfo de México. Una visión de la situación actual. En M. Caso, I. Pisanty, & E. Ezcurra (Eds.), *Diagnóstico ambiental del Golfo de México* (pp. 491–520). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Mortimer, J. A. (1990). The Influence of Beach Sand Characteristics on the Nesting Behavior and Clutch Survival of Green Turtles (*Chelonia mydas*). *Copeia*, 3, 802–817.
- Naturally Resilient Communities. (2015). *Mangroves*. <http://nrcsolutions.org/mangroves/>
- O'Shaughnessy, K. A., Hawkins, S. J., Evans, A. J., Hanley, M. E., Lunt, P., Thompson, R. C., Francis, R. A., Hoggart, S. P. G., Moore, P. J., Iglesias, G., Simmonds, D., Ducker, J., y Firth, L. B. (2020). Design catalogue for eco-engineering of coastal artificial structures: a multifunctional approach for stakeholders and end-users. *Urban Ecosystems*, 23(2), 431–443.
- Ortiz, Á. (2020). Llegará inversión a Sabancuy. *Sensor Informativo*. <https://sensorinformativo.com/noticia/llegara-inversion-a-sabancuy/>
- Packham, J. R., y Willis, A. J. (1997). *Ecology of dunes, salt marsh and shingle*. Chapman & Hall.

- Palacio Prieto, J. L., Ortíz Pérez, M. A., y Garrido Pérez, A. (1999). Cambios morfológicos costeros en Isla del Carmen, Campeche, por el paso del huracán “Roxanne”. *Investigaciones geográficas*, 40, 48–57.
- Patch, K., y Griggs, G. (2007). *Development of sand budgets for California’s major littoral cells*. Institute of Marine Sciences, University of California.
- PEMEX. (2008). *Estudio de la dinámica costera del litoral norte del municipio del Carmen, Campeche*.
- Pérez-Maqueo, O., Martínez, M. L., Lithgow, D., Mendoza-González, G., Feagin, R. A., y Gallego-Fernández, J. B. (2013). The Coasts and Their Costs. En María Luisa Martínez, P. A. Hesp, & J. B. Gallego-Fernández (Eds.), *Restoration of Coastal Dunes* (p. 347). Springer-Verlag.
- Plaza-Ortega, V., Valencia-Rojas, M. P., y Figueroa-Casas, A. (2017). Aplicación Del Índice Integrado Relativo De Antropización (Inra), En Un Ecosistema De Alta Montaña. *Luna Azul*, 44, 80–93.
- Posada Posada, B. O., y Rangel-Buitrago, N. G. (2013). Metodologías para el levantamiento y análisis de perfiles topográficos de playa. En J. Alcántara Carrió, I. Montoya Montes, & I. D. Correa Arango (Eds.), *II Manual de Métodos en Teledetecciones Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales en el Litoral* (pp. 159–175). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Posada Vanegas, G. (2015). *Análisis de Manifestaciones de Impacto Ambiental, Sabancuy, Campeche*.
- Posada Vanegas, G., Durán Valdez, G., Silva Casarín, R., Maya Magaña, M. E., y Salinas Prieto, J. A. (2010). Vulnerability to coastal flooding induced by tropical cyclones. *Coastal Engineering 2010*, 1–14.
- Pranzini, E., Wetzel, L., y Williams, A. T. (2015). Aspects of coastal erosion and protection in Europe. *Journal of Coastal Conservation*, 19(4), 445–459.
- Pulido Yah, A. J. (2011). *Identificación de marea de tormenta para el estado de Campeche por medio de sensores de presión*. Universidad Autónoma de Campeche.
- Quartel, S., Kroon, A., Augustinus, P. G. E. F., Van Santen, P., y Tri, N. H. (2007). Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(4), 576–584.
- Ramsar. (2016). *La importancia de los humedales*. <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-de-los-humedales>
- Reyes Cabañas, P. (2015). *Dimensionamiento de un sistema de bypass de arena en el puerto de Sisal, Yucatán*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Rincón-Díaz, M. P., y Rodríguez-Zárate, C. J. (2004). Caracterización de playas de anidación y zonas de alimentación de tortugas marinas en el archipiélago de San Bernardo, Caribe Colombiano. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR)*, 33, 137–158.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., y Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11), 1133–1152.
- Roy, E. D., Martin, J. F., Irwin, E. G., Conroy, J. D., y Culver, D. A. (2011). Living within dynamic social-ecological freshwater systems: System parameters and the role of ecological engineering. *Ecological Engineering*, 37(11), 1661–1672.
- Ruiz-Martínez, G., Rivillas-Ospina, G. D., Mariño-Tapia, I., y Posada-Vanegas, G. (2016). SANDY: A Matlab tool to estimate the sediment size distribution from a sieve analysis. *Computers & Geosciences*, 92, 104–116.
- SAGARPA. (2018). *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2017*.
- Samonte-Tan, G. P. B., White, A. T., Tercero, M. A., Diviva, J., Tabara, E., y Caballes, C. (2007). Economic Valuation of Coastal and Marine Resources: Bohol Marine Triangle, Philippines. *Coastal Management*, 35(2–3), 319–338.
- Sathirathai, S. (1998). *Economic Valuation of Mangroves and the Roles of Local Communities in the Conservation of Natural Resources: Case Study of Surat Thani, South of Thailand*.
- Schmid, J. L., Addison, D. S., Donnelly, M. A., Shirley, M. A., y Wibbels, T. (2008). The Effect of Australian Pine (<span class="genus-species">Casuarina equisetifolia</span>) Removal on Loggerhead Sea Turtle (<span class="genus-species">Caretta caretta</span>) Incubation Temperatures on Keewaydin Island, Florida. *Journal of Coastal Research*, 2008(10055), 214–220.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2001). *Listado de Puertos*.
- SEMAR. (2011). *Carta Náutica Bahía de Campeche, SM 840*.
- SEMARNAT. (2009). *La reforestación de los manglares en la costa de Oaxaca*. Comisión Nacional Forestal.
- Shepard, C. C., Crain, C. M., y Beck, M. W. (2011). The Protective Role of Coastal Marshes: A Systematic Review and Meta-analysis. *PLOS ONE*, 6(11), e27374.
- Silva, R., Lithgow, D., Esteves, L. S., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Martell, R., Pereira, P., Mendoza, E., Campos-Cascaredo, A., Winckler Grez, P., Osorio, A. F., Osorio-Cano, J. D., y Rivillas, G. D. (2017). Coastal risk mitigation by green infrastructure in Latin America. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 170(2), 39–54.

- Silva, R., Martínez, M., Moreno, P., Mendoza, E., López-Portillo, J., Lithgow, D., Vazquez, G., Martínez, R., y Ibarra, R. (2018). *Aspectos Generales de la Zona Costera*.
- Soberón-Chávez, G. (1985). *Mecanismos de producción natural de las poblaciones de peces demersales de la plataforma continental del sur del Golfo de México: variables físicas de interacción ecológica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Solano Puente, M. (2009). *Caracterización extremal del oleaje en la costa catalana*.
- Spalding, M. D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L. Z., Shepard, C. C., y Beck, M. W. (2014). The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*, 90, 50–57.
- Stancyk, S. E., y Ross, J. P. (1978). An Analysis of Sand from Green Turtle Nesting Beaches on Ascension Island. *Copeia*, 1, 93–99.
- Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M. J., Ysebaert, T., y De Vriend, H. J. (2013). Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 504(7478), 79–83.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., y Ergul, A. (2009). The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change. En *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change*.
- Tianhong, L., Wenkai, L., y Zhenghan, Q. (2010). Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen. *Ecological Economics*, 69(7), 1427–1435.
- Tolman, H. (2016). *User manual and system documentation of WAVEWATCHIII version 5.16*.
- Tong, C., Feagin, R. A., Lu, J., Zhang, X., Zhu, X., Wang, W., y He, W. (2007). Ecosystem service values and restoration in the urban Sanyang wetland of Wenzhou, China. *Ecological Engineering*, 29(3), 249–258.
- Torres Rodríguez, V., Márquez García, A. Z., Bolongaro Crevenna, A., Chavarria Hernández, J., Expósito Díaz, G., y Márquez García, E. (2010). Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático. En A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, & J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (pp. 325–344). Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Troy, A., y Wilson, M. A. (2006). Mapping ecosystem services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. *Ecological Economics*, 60(2), 435–449.
- UNESCO. (2012). *Guardarenas: Adaptarse al cambio climático y educar para el desarrollo sostenible* (G. Cambers & P. Diamond (eds.)).

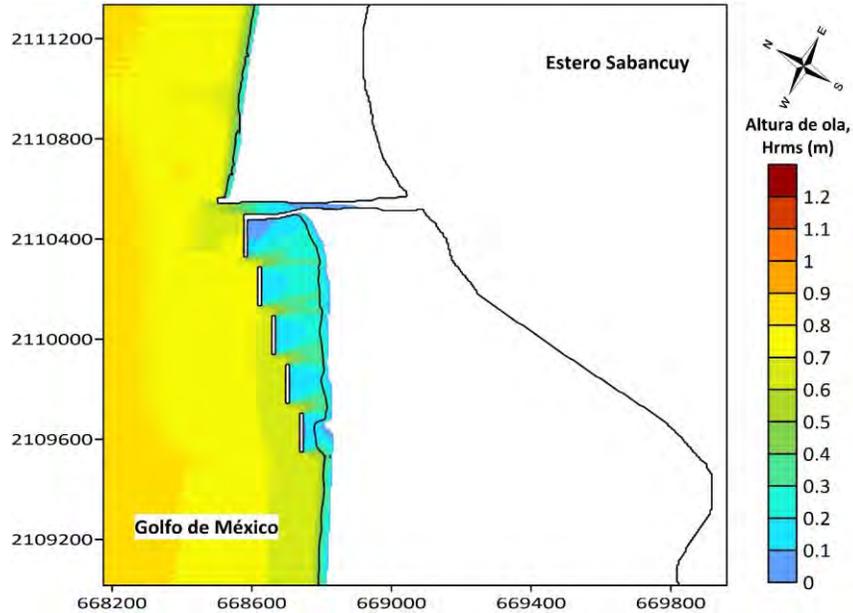
- Universidad Autónoma del Carmen. (2018). *Programa de Protección y Conservación de Tortugas Marinas en Campeche*.
- van der Meer, J. W., y Daemen, I. F. R. (1994). Stability and Wave Transmission at Low-Crested Rubble-Mound Structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 120(1), 1–19.
- van der Nat, A., Vellinga, P., Leemans, R., y van Slobbe, E. (2016). Ranking coastal flood protection designs from engineered to nature-based. *Ecological Engineering*, 87, 80–90.
- van Rijn, L. (2013). *Beach restoration*. LeovanRIJN-SEDIMENT. <https://www.leovanrijn-sediment.com/>
- van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867–887.
- Ventura Valdés, A. I. (2014). *Análisis numérico del papel de la duna costera en la estabilidad de la playa*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Verhagen, H. J. (1992). Method for Artificial Beach Nourishment. *Proceedings of 23rd Conference on Coastal Engineering*, 2474–2485.
- Villalobos-Zapata, G. J., y Mendoza Vega, J. (2010). *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado* (G. J. Villalobos-Zapata & J. Mendoza Vega (eds.)). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur.
- Vuik, V., Jonkman, S. N., Borsje, B. W., y Suzuki, T. (2016). Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes. *Coastal Engineering*, 116, 42–56.
- Wamsley, T. V, Cialone, M. A., Smith, J. M., Atkinson, J. H., y Rosati, J. D. (2010). The potential of wetlands in reducing storm surge. *Ocean Engineering*, 37(1), 59–68.
- Wang, H.-C., y Cheng, I.-J. (1999). Breeding biology of the green turtle, *Chelonia mydas* (Reptilia: Cheloniidae), on Wan-An Island, PengHu archipelago. II. Nest site selection. *Marine Biology*, 133(4), 603–609.
- Whitmore, C. P., y Dutton, P. H. (1985). Infertility, embryonic mortality and nest-site selection in leatherback and green sea turtles in Suriname. *Biological Conservation*, 34(3), 251–272.

- Yañez Arancibia, A., Lara-Domínguez, A. L., Sánchez-Gil, P., Vargas-Maldonado, I., García-Abad, M. C., Álvarez-Guillén, H., Tapia-García, M., Flores-Hernández, D., y Amezcua-Linares, F. (1985). Ecology and evaluation to fish community in coastal ecosystems: estuary-shelf interrelationships in the southern Gulf of Mexico. En A. Yañez Arancibia (Ed.), *Fish community ecology in estuaries and coastal lagoons: Towards an Ecosystem Integration* (pp. 473–498). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zavaleta Lizárraga, L. (2013). *Factores que influyen en la anidación de tortuga verde (Chelonia mydas) en Veracruz*. Universidad Veracruzana.
- Zhang, K., Liu, H., Li, Y., Xu, H., Shen, J., Rhome, J., y Smith, T. J. (2012). The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 102–103, 11–23.

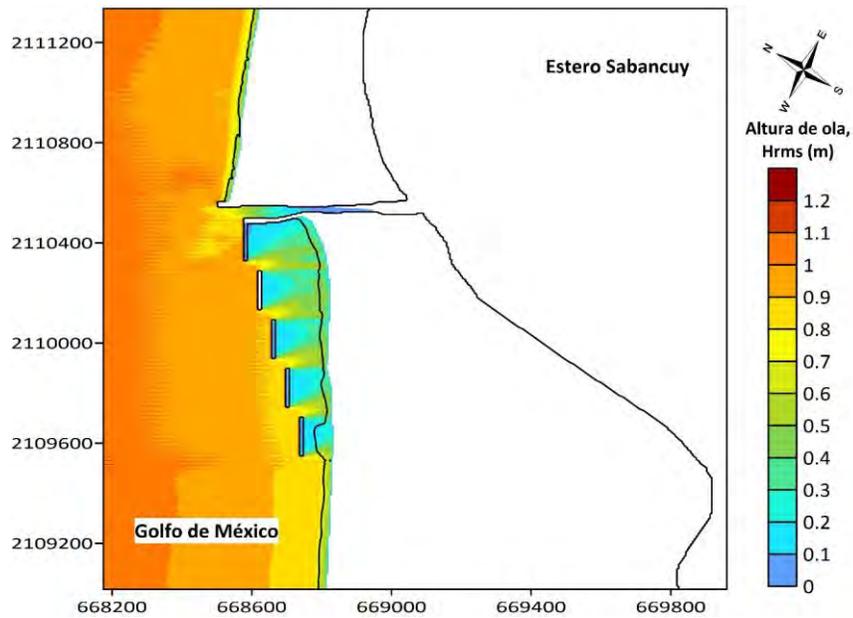
# ANEXO I

Resultados modelación hidrodinámica para las diferentes longitudes de los diques.

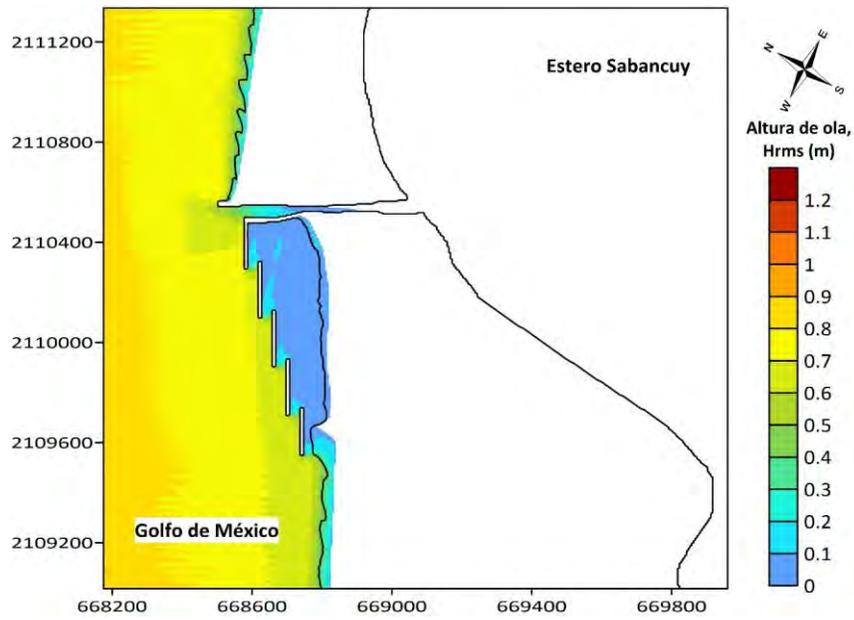
## Altura de ola media cuadrática (Hrms)



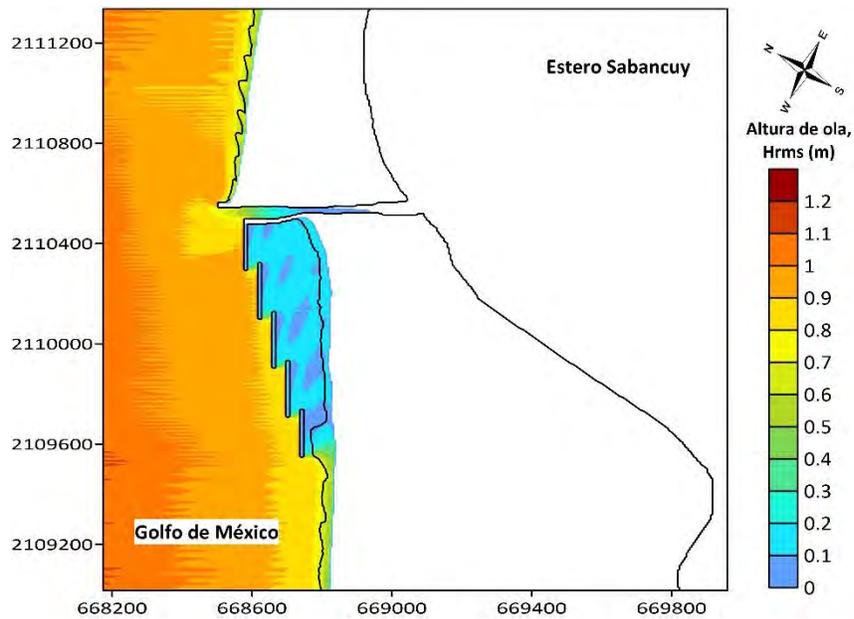
Longitud dique: 150 m, Separación longitudinal: 45 m, Separación transversal: 40 m, Bajamar.



Longitud dique: 150 m, Separación longitudinal: 45 m, Separación transversal: 40 m, Pleamar.

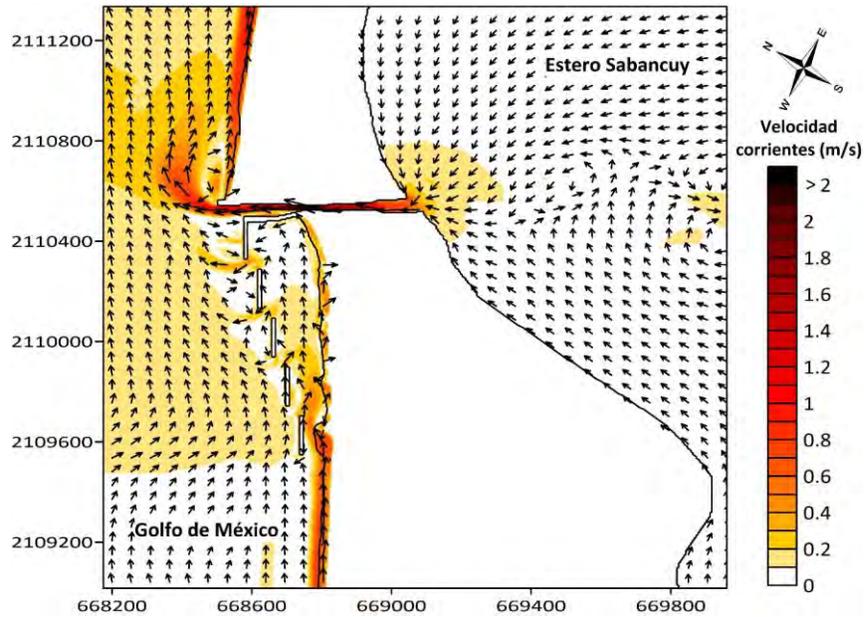


Longitud dique: 220 m, Traslape entre diques: 25 m, Separación transversal: 40 m, Bajamar.

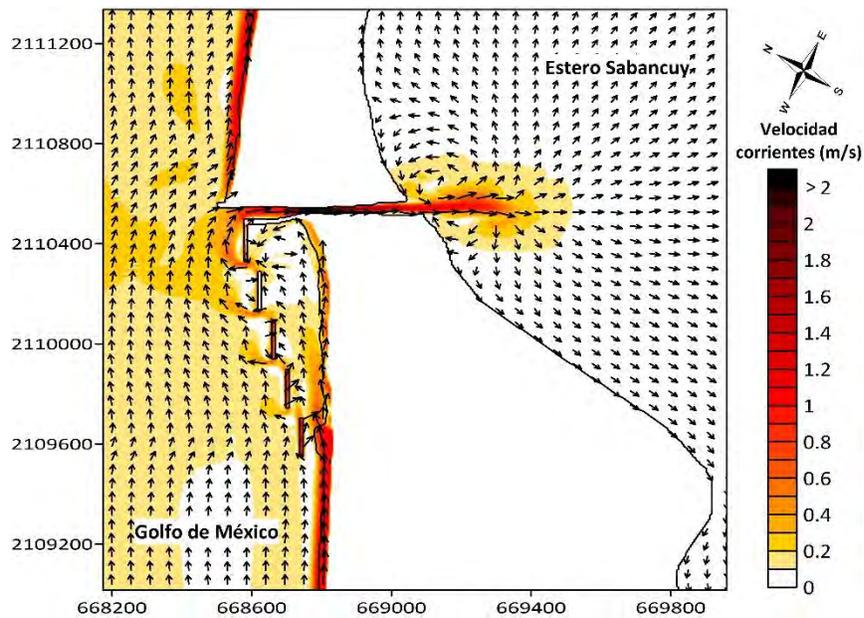


Longitud dique: 220 m, Traslape entre diques: 25 m, Separación transversal: 40 m, Pleamar.

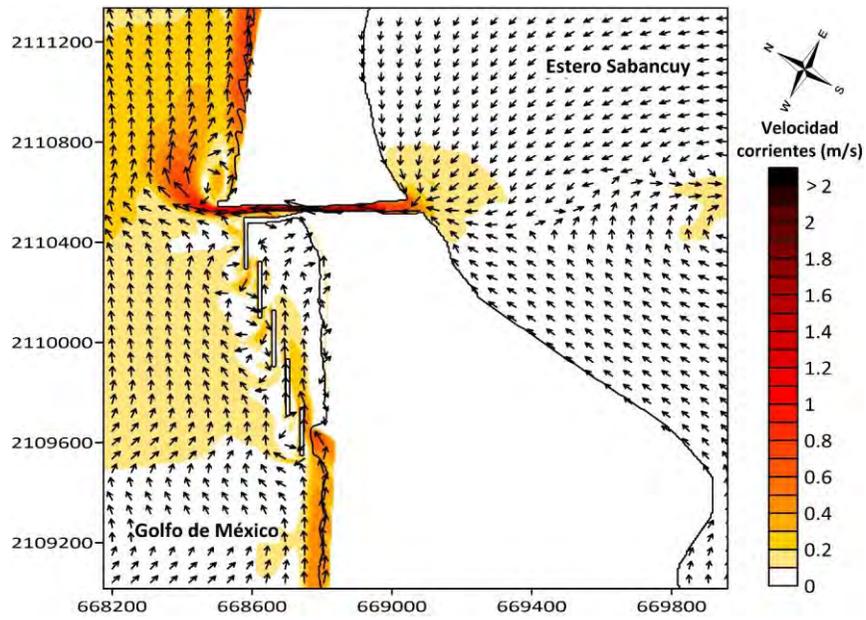
## Velocidad y dirección de corrientes



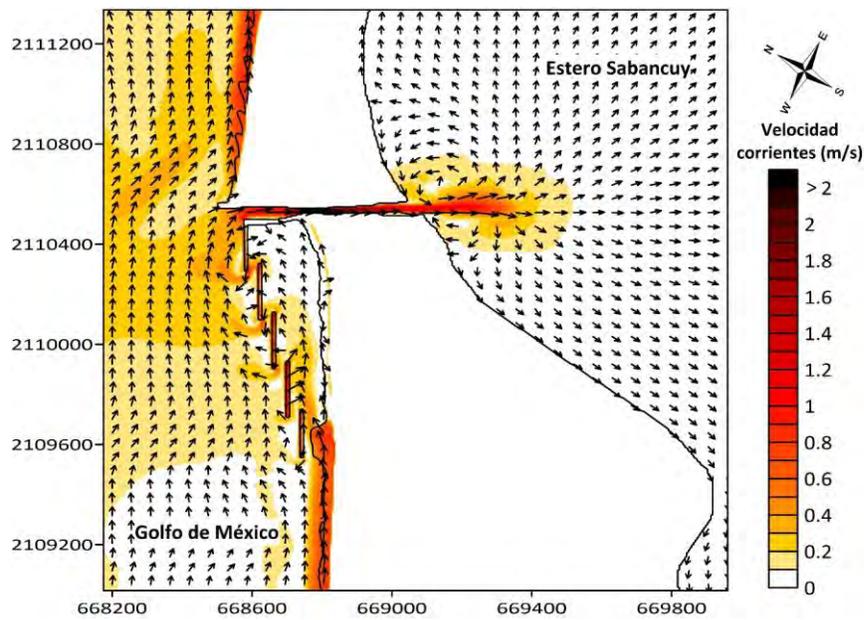
Longitud dique: 150 m, Separación longitudinal: 45 m, Separación transversal: 40 m, Bajamar.



Longitud dique: 150 m, Separación longitudinal: 45 m, Separación transversal: 40 m, Pleamar.

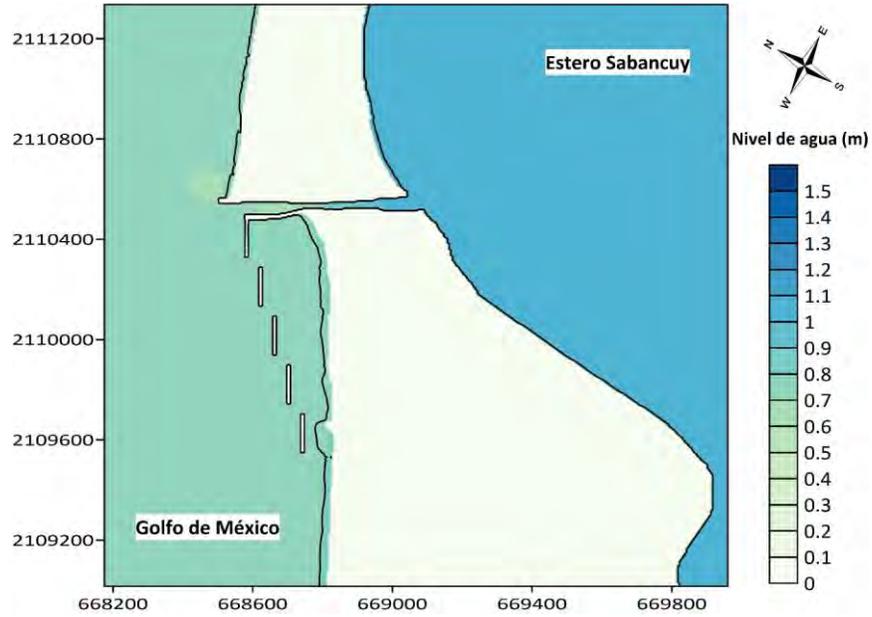


Longitud dique: 220 m, Traslape entre diques: 25 m, Separación transversal: 40 m, Bajamar.

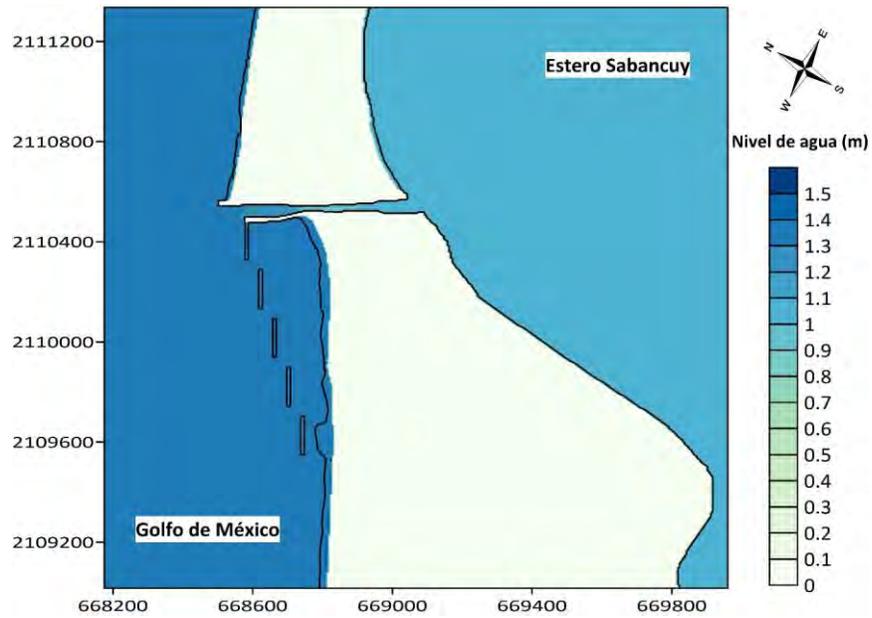


Longitud dique: 220 m, Traslape entre diques: 25 m, Separación transversal: 40 m, Pleamar.

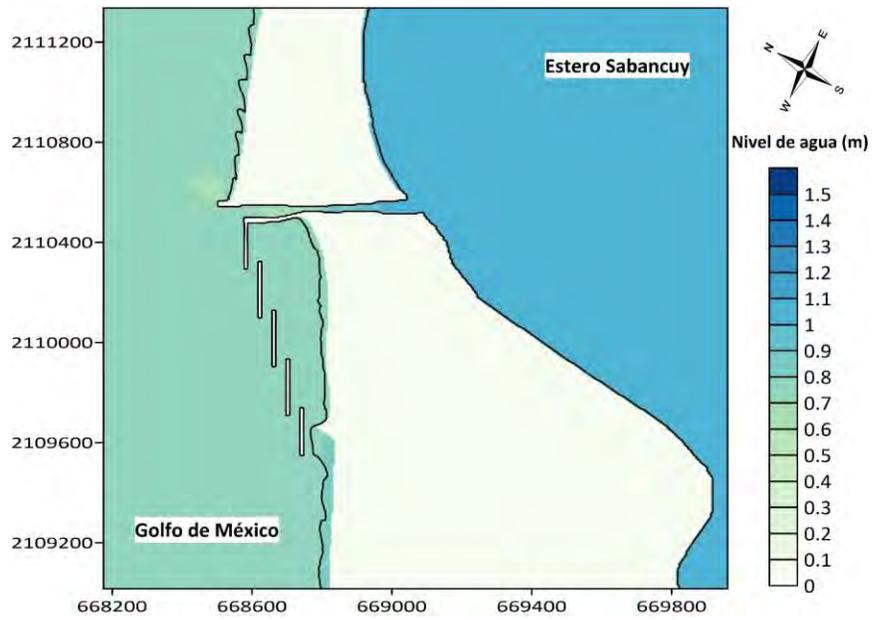
## Nivel de agua



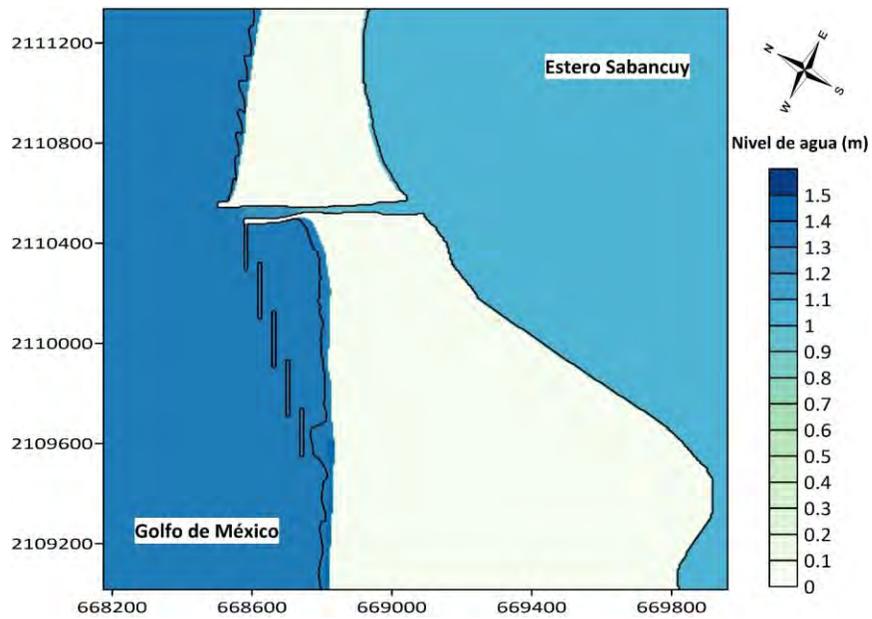
Longitud dique: 150 m, Separación longitudinal: 45 m, Separación transversal: 40 m, Bajamar.



Longitud dique: 150 m, Separación longitudinal: 45 m, Separación transversal: 40 m, Pleamar.



Longitud dique: 220 m, Traslape entre diques: 25 m, Separación transversal: 40 m, Bajamar.

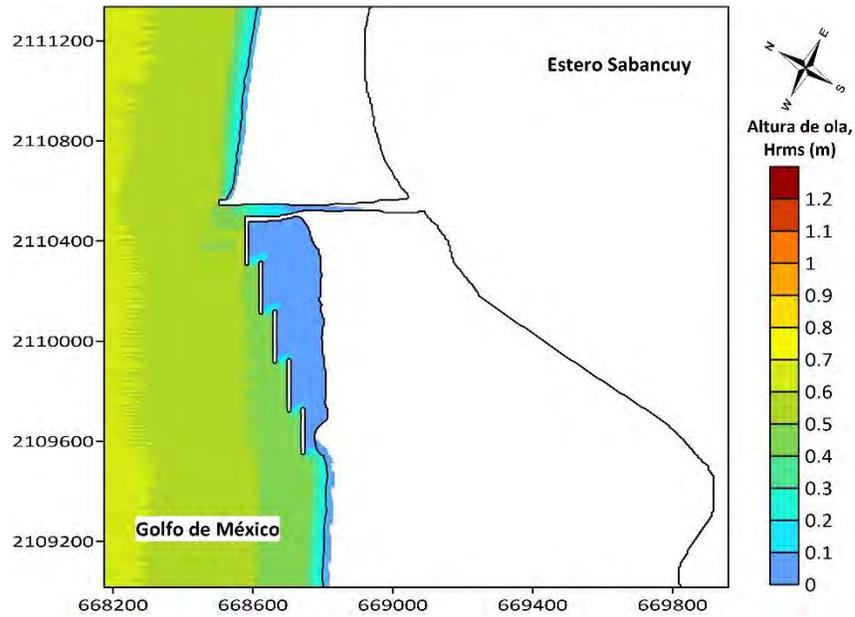


Longitud dique: 220 m, Traslape entre diques: 25 m, Separación transversal: 40 m, Pleamar.

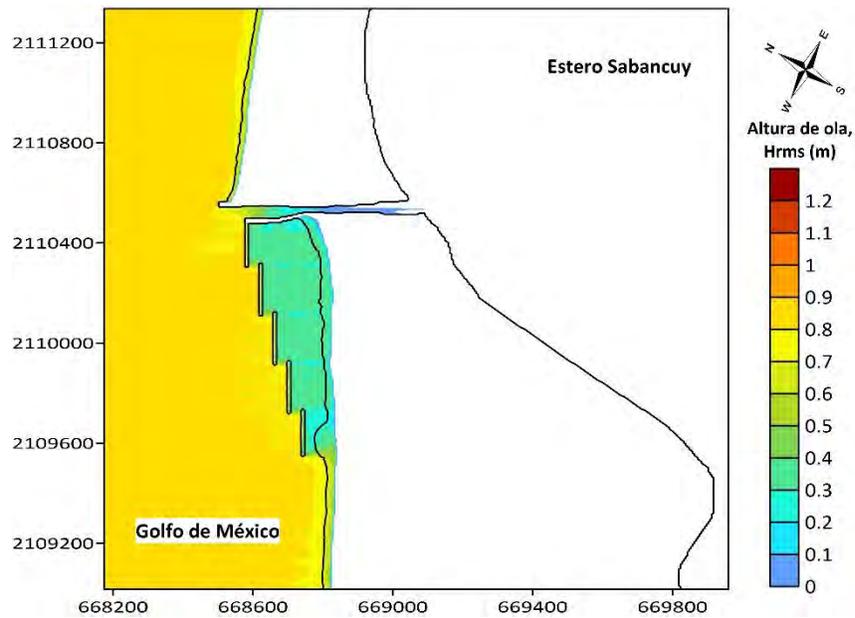
## ANEXO II

Resultados modelación hidrodinámica para diferentes alturas y direcciones de oleaje.

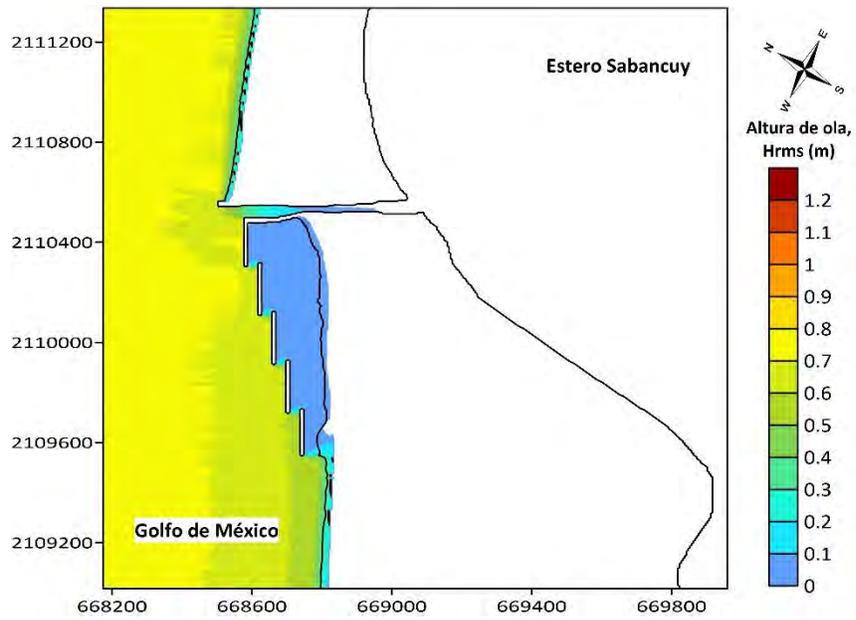
### Altura de ola media cuadrática (Hrms)



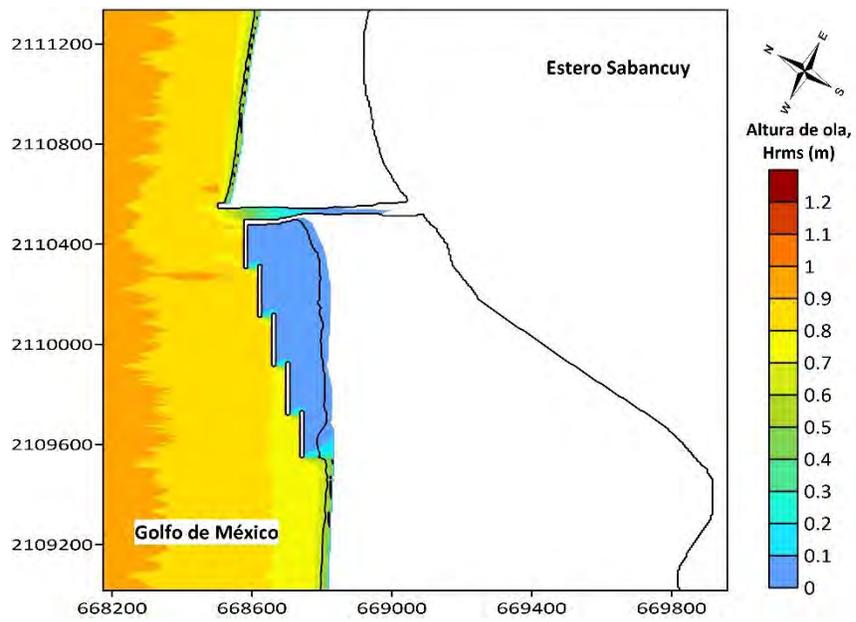
Hr= 1.31 m, T= 4 s, Dir= 309 grados, Bajamar.



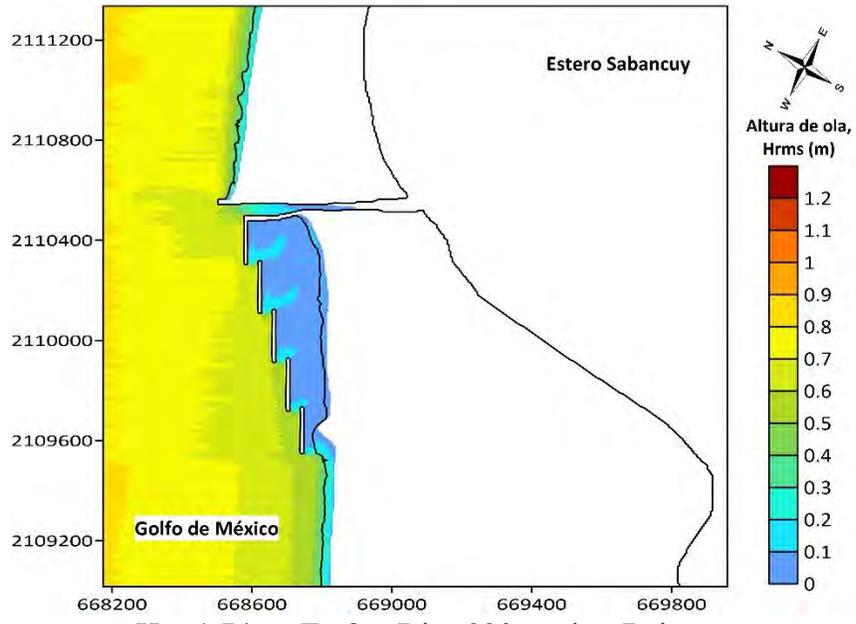
Hr= 1.31 m, T= 4 s, Dir= 309 grados, Pleamar.



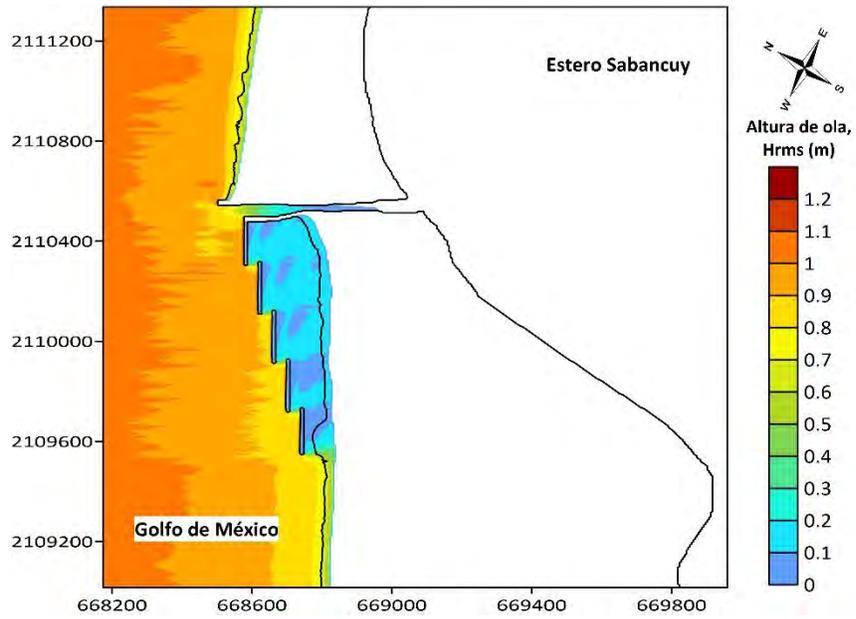
Hr= 1.61 m, T= 5 s, Dir= 349 grados, Bajamar.



Hr= 1.61 m, T= 5 s, Dir= 349 grados, Pleamar.

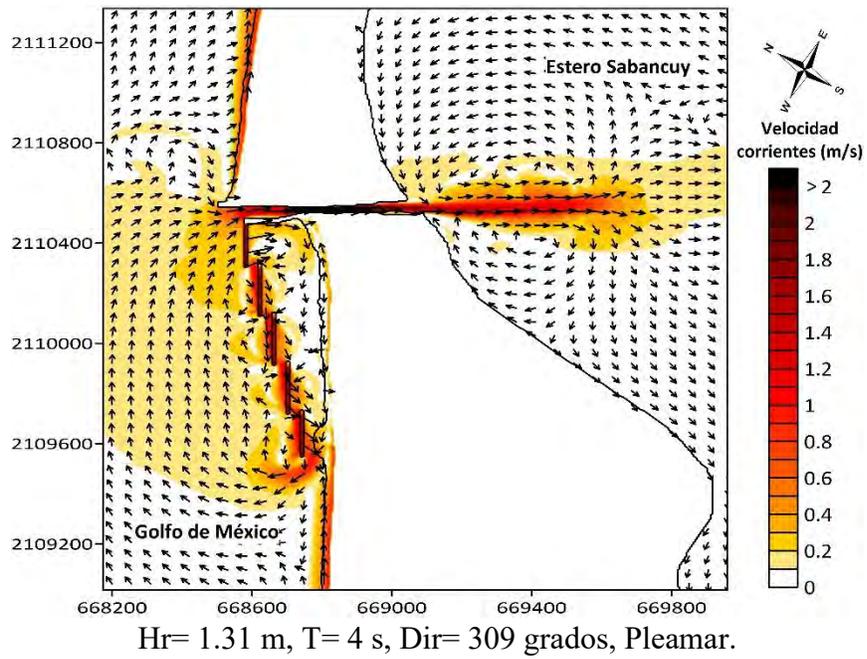
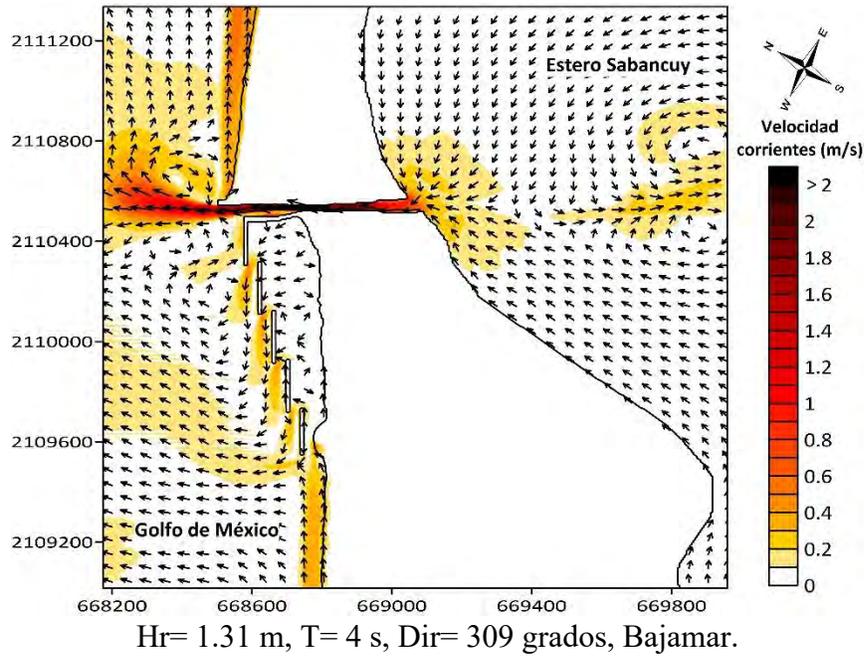


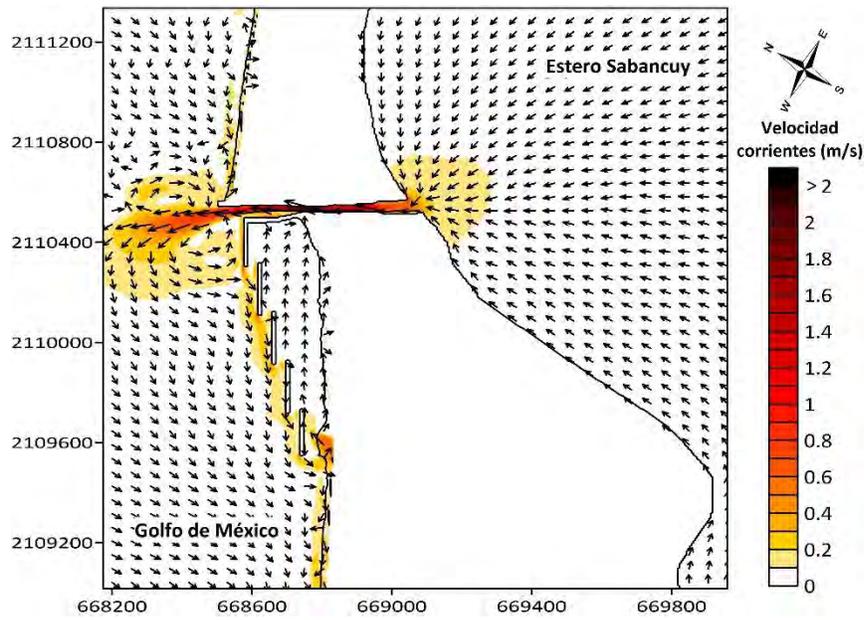
Hr= 1.74 m, T= 8 s, Dir= 330 grados, Bajamar.



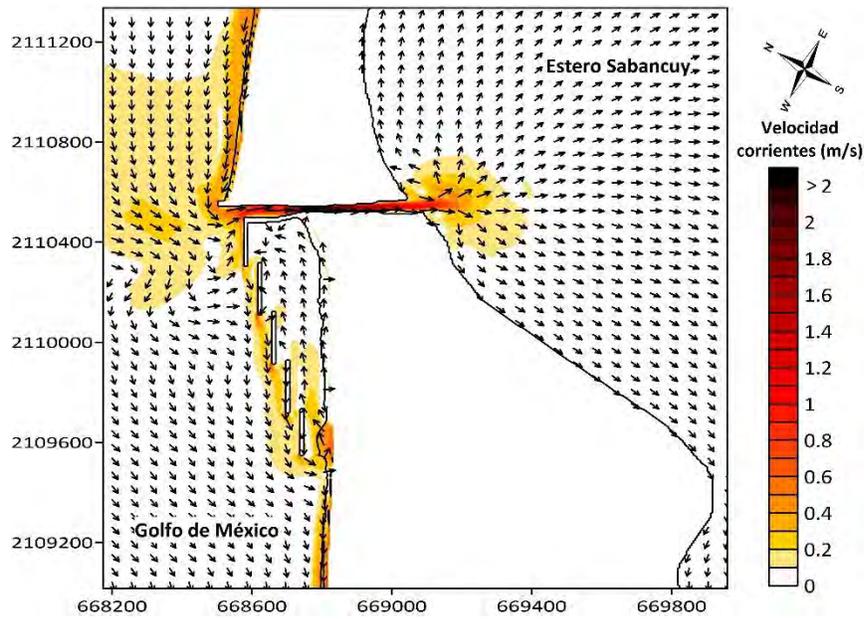
Hr= 1.74 m, T= 8 s, Dir= 330 grados, Pleamar.

## Velocidad y dirección de corrientes

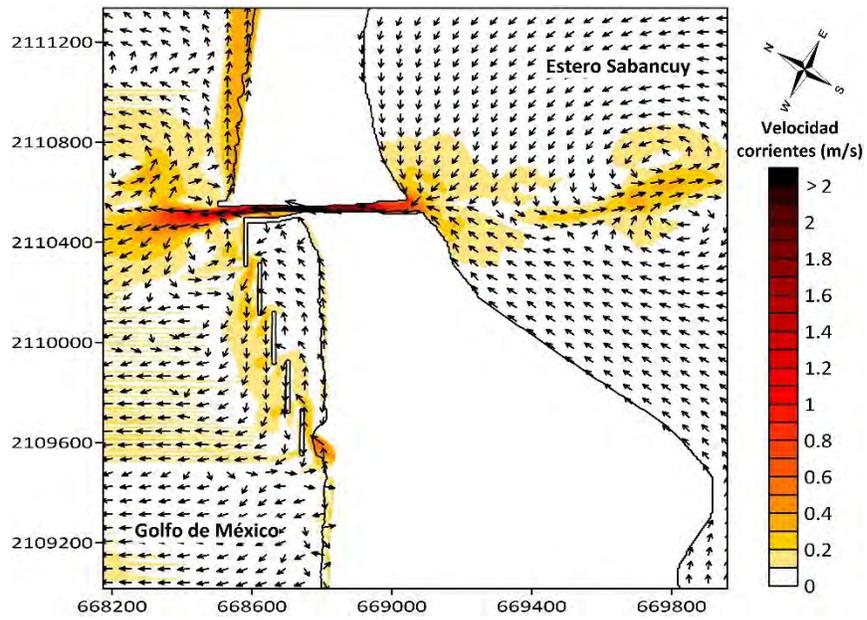




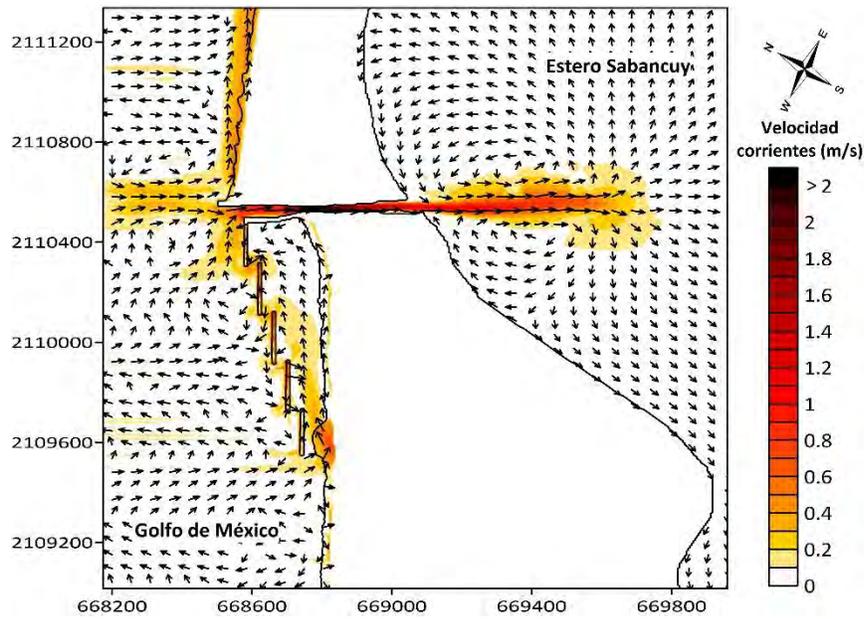
Hr= 1.61 m, T= 5 s, Dir= 349 grados, Bajamar.



Hr= 1.61 m, T= 5 s, Dir= 349 grados, Pleamar.

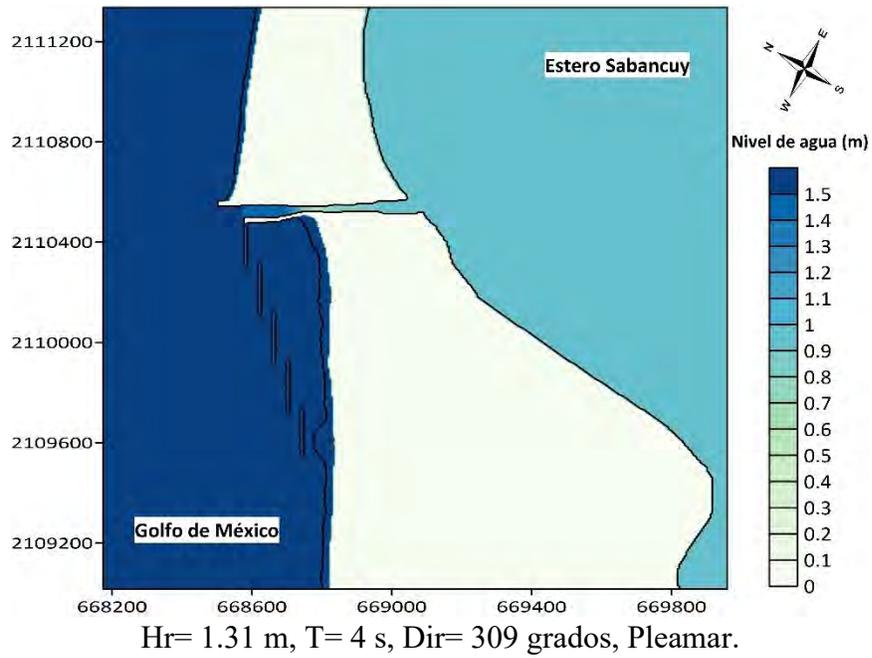
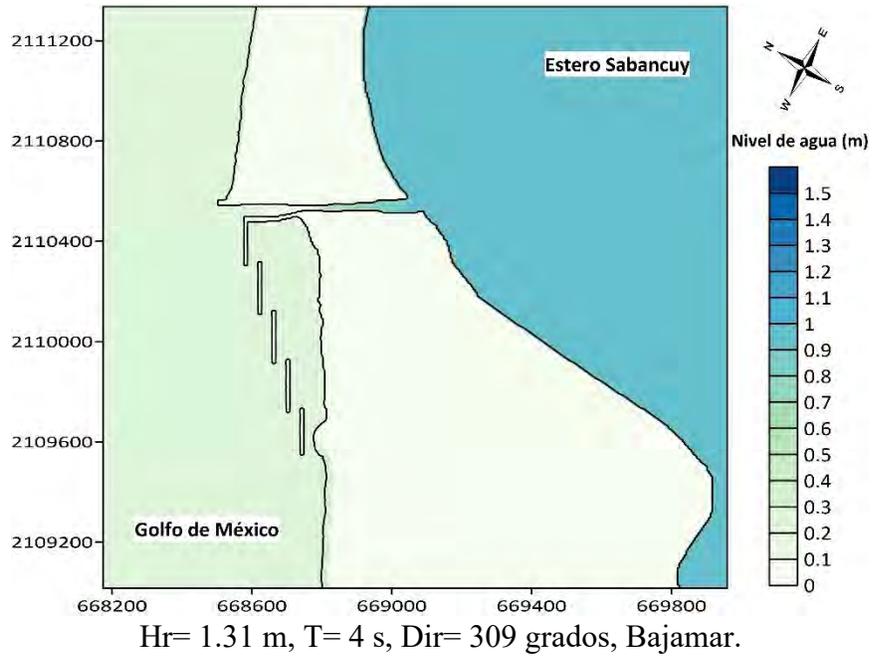


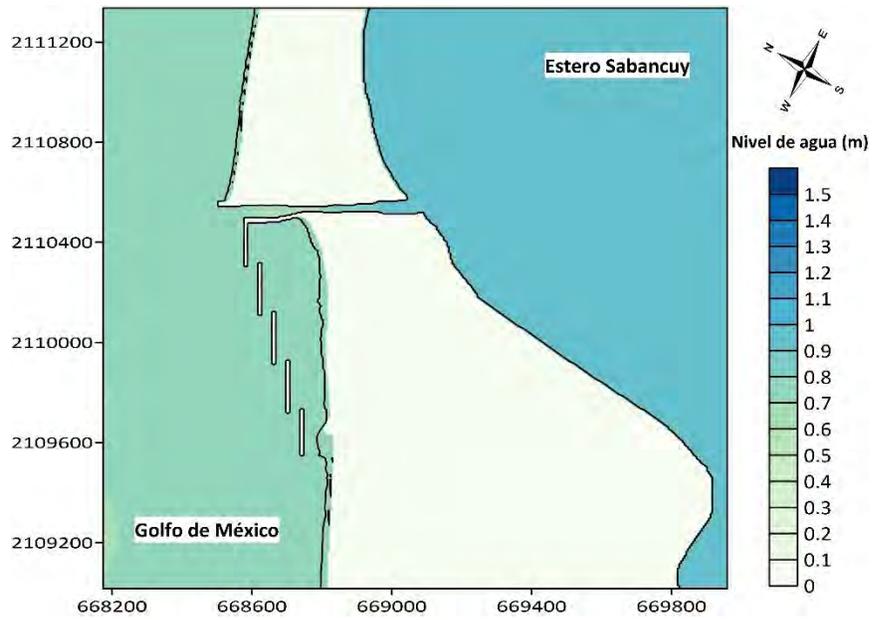
Hr= 1.74 m, T= 8 s, Dir= 330 grados, Bajamar.



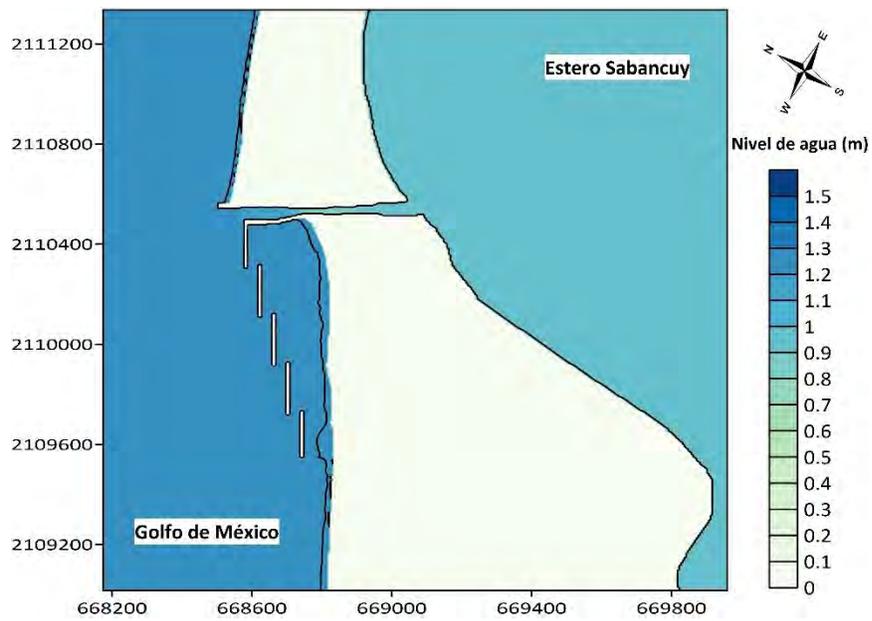
Hr= 1.74 m, T= 8 s, Dir= 330 grados, Pleamar.

## Nivel de agua

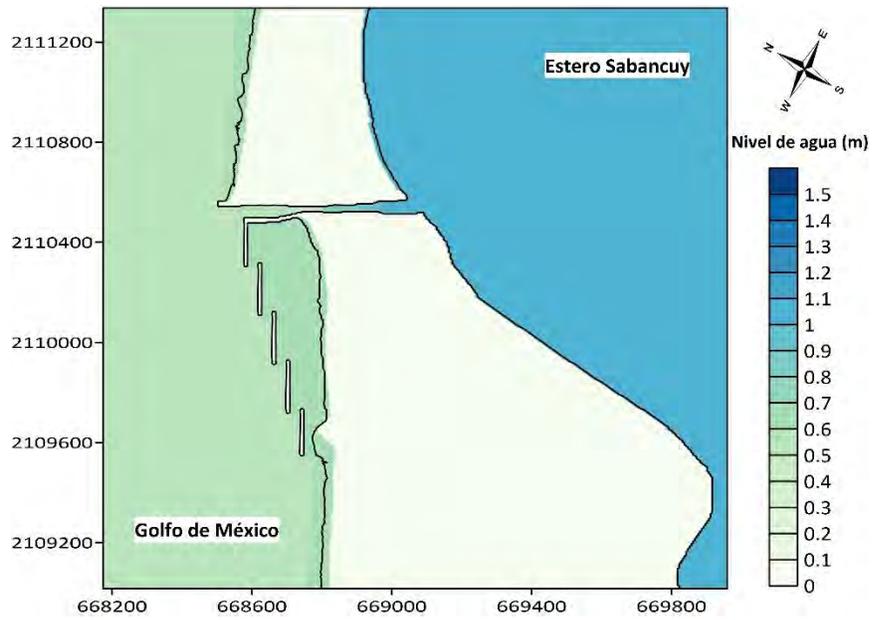




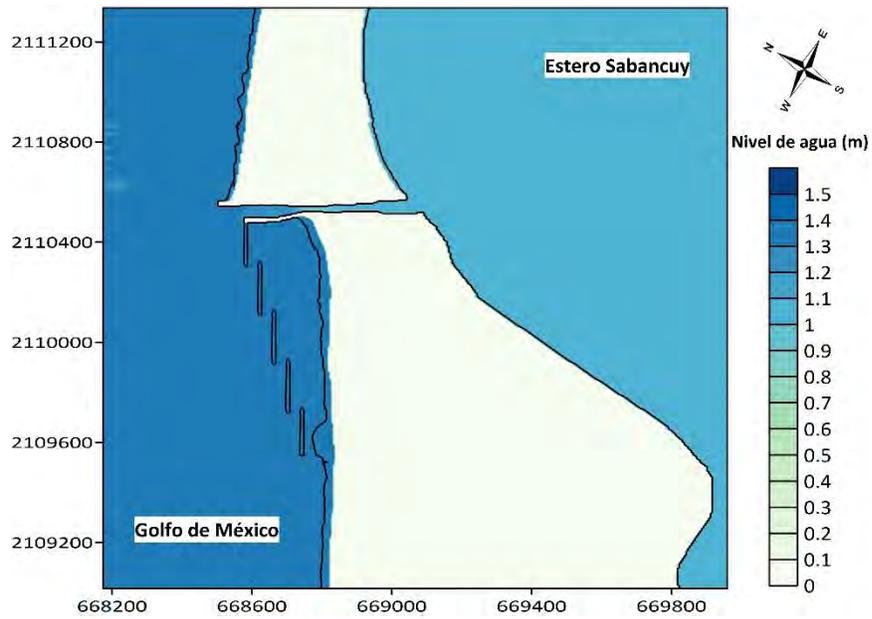
Hr= 1.61 m, T= 5 s, Dir= 349 grados, Bajamar.



Hr= 1.61 m, T= 5 s, Dir= 349 grados, Pleamar.



Hr= 1.74 m, T= 8 s, Dir= 330 grados, Bajamar.



Hr= 1.74 m, T= 8 s, Dir= 330 grados, Pleamar.