



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



EVALUACIÓN DE CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN LA BARRERA ARENOSA DEL ESTERO SAN JOSÉ B. C. S.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

GERMAN ROJAS SILVA

LA PAZ, B, C, S., NOVIEMBRE DEL 2018



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 08 del mes de Noviembre del año 2018

El (la) que suscribe ING. GERMAN ROJAS SILVA Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro B160957 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES Y DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ

y cede los derechos del trabajo titulado:

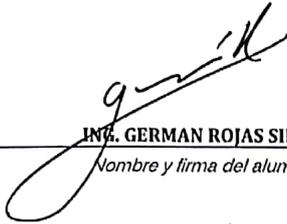
"EVALUACIÓN DE CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN LA BARRERA ARENOSA

DEL ESTERO DE SAN JOSÉ DEL CABO, B.C.S."

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: ing.german.rojas@gmail.com - gmflores@lecc.org - epaconava@gmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


ING. GERMAN ROJAS SILVA

Nombre y firma del alumno

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer especialmente al Dr. Guillermo Martínez por compartir sus conocimientos, brindarme siempre su apoyo y sobretodo su paciencia. Al Dr. Enrique H. Nava, por sus lecciones y consejos a lo largo de la maestría. A los Doctores Víctor Gómez, Rubén Antelmo y Sergio Aguíñiga por sus aportaciones realizadas a este trabajo.

Al personal del CICIMAR, por brindarme apoyo cuando fue necesario; a Humberto Ceseña y Cesar Casas, del departamento de servicios educativos, por las atenciones brindadas, ya que más que ser personal de CICIMAR, fueron amigos durante mi estancia en la institución.

A mis padres y hermanas, por darme fuerza en todo momento. A mi esposa e hijas por los sacrificios que hicieron junto conmigo, ya que este esfuerzo no solo es mío sino también de ellos

A mis compañeros de estadística aplicada Cristina, Lili, Mike, Ana, Virginia Vargas, David, Luis, por los momentos divertidos que pasamos juntos y hacer del estudio algo más llevadero.

Por ultimo quiero agradecer de manera muy especial a mi compañero de cubículo Gerardo. Le agradezco enormemente por toda la ayuda que me brindo, desde las salidas al campo arriesgando su dron, así como el apoyo técnico en gabinete. Aprendí muchas cosas de él que me son muy útiles para mi trabajo. Definitivamente fue importante para el desarrollo de esta investigación, es un gran compañero y le deseo mucho éxito en su vida.

DEDICATORIA

A mi mis hijas, quiero que nunca se den por vencidas, estudien y prepárense lo mejor que puedan, el estudio te hace libre.

A mis padres y hermanas, por ser estar siempre apoyándome, dándome aliento y no dejarme caer cuando la situación se pone difícil.

A mi esposa, por ser mi compañera en la vida y ser mi complemento por estar para mí en las buenas y en las malas.

Este logro no es solo mío, sino de todos ustedes.

ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS.....	5
INDICE DE TABLAS	8
GLOSARIO.....	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Antecedentes.....	17
1.2. Justificación	20
1.3. Hipótesis.....	22
1.4. Objetivos	22
1.4.1. Objetivo general.....	22
1.4.2. Objetivos específicos	22
1.5. Área de estudio	22
2. DATOS Y MÉTODOS.....	24
2.1. Levantamiento topográfico	24
2.1.3. Cálculo de volúmenes y zonas de erosión-acreción	32
2.2. Levantamiento batimétrico	33
2.3.1. Datos de entrada	35
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3.1. Levantamientos topográficos	40
3.2. Levantamiento batimétrico	42
3.3. Volúmenes y zonas de erosión-acreción	44
3.4. Modelación en XBeach	55
3.4.1. Simulación en condiciones previas a la tormenta Lidia.....	56
3.4.2. Simulación en condiciones posteriores a la tormenta Lidia.....	64
4. CONCLUSIONES	78
5. REFERENCIAS	79
6. ANEXOS.....	85

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Macrolocalización de la barrera arenosa del Estero San José.	23
Figura 2. Esquema conceptual de la metodología de la investigación.	24
Figura 3. Cobertura de los planes de vuelo generados en la aplicación para teléfono inteligente Pix4Dcapture.	27
Figura 4. Georreferenciación de puntos de control con equipo GNSS Leica Viva Gs14.	28
Figura 5. Nube de puntos generada con el software Agisoft Photoscan (levantamiento del 15/feb/2018).	29
Figura 6. Nube de puntos clasificada generada con el software Agisoft Photoscan (levantamiento del 15/feb/2018).	30
Figura 7. Malla que representa la superficie del terreno generada por la triangulación de la nube de puntos clasificada (levantamiento del 15/feb/2018).	30
Figura 8. Modelo digital del terreno (MDT) texturizado con los valores RGB de las fotografías procesadas (levantamiento del 15/feb/2018).	31
Figura 9. Trayectoria para el levantamiento batimétrico definida en QGIS.	33
Figura 10. Malla generada en RGFGGRID en coordenadas UTM Zona 12.	36
Figura 11. a) Malla con elevaciones del MDT de la batimetría y la topografía. b) Malla con valores puntales por nodo tomadas del MDT.	37
Figura 12. Malla con ubicación de estructuras rígidas (escollera de la Marina Puerto Los Cabos).	38
Figura 13. Angulo de incidencia y altura de oleaje promedio. (a) del 23/jun/2010 al 23/jul/2010. (b) del 06/sep/2010 al 06/oct/2010.	39
Figura 14. Modelos digitales de elevación (MDT) resultado de la restitución fotogramétrica para cada uno de los levantamientos topográficos. Las elevaciones (en metros) están referidas al nivel medio del mar.	41
Figura 15. Mapa del levantamiento batimétrico referido al NMM realizado el día 6/abr/2017.	43
Figura 16. Perfiles batimétricos correspondientes a la figura 15.	44
Figura 17. Cambios morfológicos en la barrera arenosa del Estero San José en las fechas indicadas. La escala de colores indica pérdida o acumulación del sedimento en metros por pixel.	45
Figura 18. Curvas de la variación de las tasas de erosión y acreción trimestral y anual (m^3/m) a lo largo de la barrera arenosa (ver referencia de ubicación en figura 19). ...	50
Figura 19. Sentido de orientación y ubicación de la cuadrícula base (200 m de línea de costa) para el cálculo de volúmenes por metro lineal de playa de la figura 18.	51

Figura 20. Ubicación de los 5 transectos sobre los que se midieron los perfiles topográficos comparados en los MDT generados a partir de los 5 levantamientos.	52
Figura 21. Transecto A-A' sobre el cual se levantaron 5 perfiles de playa. El mar se encuentra del lado derecho y donde termina cada perfil es hasta donde se logró medir la playa con el dron por el efecto del oleaje.	53
Figura 22. Transecto B-B'	53
Figura 23. Transecto C-C'	54
Figura 24. Transecto D-D'	54
Figura 25. Transecto E-E'	55
Figura 26. Morfología resultante del modelo del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 (condición inicial $t=0$, a 10, 20 y 30 días) con la presencia de la escollera.	57
Figura 27. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (24/feb/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/pixel.	58
Figura 28. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 10,20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la presencia de la escollera.	60
Figura 29. Morfología resultante del modelo del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 (condición inicial $t=0$, a 10, 20 y 30 días) sin la presencia de la escollera.	61
Figura 30. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (24/feb/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 sin la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/pixel.	62
Figura 31. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 10,20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 sin la presencia de la escollera.	64
Figura 32. Morfología resultante del modelo del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 (condición inicial $t=0$, a 10, 20 y 30 días) con la presencia de la escollera.	65
Figura 33. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (06/sep/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/pixel.	66
Figura 34. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 10,20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera.	68
Figura 35. Morfología resultante del modelo del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 (condición inicial $t=0$, a 10, 20 y 30 días) sin la presencia de la escollera.	69
Figura 36. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (06/sep/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 sin la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/pixel.	70

Figura 37. Volúmenes (m ³ /m) de erosión y acreción a los 10,20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 sin la presencia de la escollera.....	72
Figura 38. Volúmenes (m ³ /m) de erosión y acreción a los 30 días de simulación para las condiciones previas y posteriores a la tormenta Lidia.....	73
Figura 39. Perfiles de los levantamientos topográficos y del modelo previo a tormenta (t=30 días) con la influencia de la escollera. a) Transecto 400, b) Transecto 1000...	76
Figura 40. Perfiles de los levantamientos topográficos y del modelo posterior a tormenta (t=30 días) con la influencia de la escollera. a) Transecto 200, b) Transecto 1000.	77
Figura 41. Mapa de MDT del 24/feb/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	88
Figura 42. Mapa de MDT del 26/may/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	89
Figura 43. Mapa de MDT del 06/sep/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	90
Figura 44. Mapa de MDT del 29/nov/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	91
Figura 45. Mapa de MDT del 15/feb/2018 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	92
Figura 46. Mapa de comparación entre MDT del 24/feb/2017 y 26/may/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	93
Figura 47. Mapa de comparación entre MDT del 26/may/2017 y 06/sep/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	94
Figura 48. Mapa de comparación entre MDT del 06/sep/2017 y 29/nov/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	95
Figura 49. Mapa de comparación entre MDT del 29/nov/2017 y 15/feb/2018 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	96
Figura 50. Mapa de comparación entre MDT del 24/feb/2017 y 15/feb/2018 ((De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características y errores obtenidos de los MDT comparados con mediciones RTK-DGPS.	32
Tabla 2. Volúmenes de sedimento por periodos.....	50
Tabla 3. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la presencia de la escollera.	59
Tabla 4. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 sin la presencia de la escollera.....	63
Tabla 5. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera.....	67
Tabla 6. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 sin la presencia de la escollera	71
Tabla 7. Volúmenes de sedimento para mediciones topográficas y simulaciones previas y posteriores a la tormenta Lidia con influencia de la escollera.....	74
Tabla 8. Puntuación de Brier (BSS) para las simulaciones previas y posteriores a la tormenta Lidia.....	75
Tabla 9. Cuantificación de la Puntuación de Brier (BSS) (Van Rijn et al., 2003).	75

GLOSARIO

Ecosonda: Aparato electrónico que permite medir la distancia entre la superficie del agua y el fondo marino.

Estación total: Instrumento electro-óptico utilizado en topografía, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica. Consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico.

Fotogrametría: Técnica para obtener mapas y planos de grandes extensiones de terreno por medio de la fotografía aérea.

GPS: Global Positioning System (sistema de posicionamiento global).

GNSS-RTK: Global Navigation Satellite System-Real Time Kinematic (sistema global de navegación por satélite en tiempo real).

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Isobatas: Curva para la representación cartográfica de puntos de igual profundidad del fondo marino.

LiDAR: Light Detection and Ranging (dispositivo que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado).

MDT: (Modelo Digital del terreno) representación de las elevaciones sobre el terreno natural, el cual no incluye las plantas y los edificios o algún otro elemento.

MDE: (Modelo digital de elevaciones) representación de las elevaciones sobre un terreno, incluyendo las plantas y los edificios.

Píxel: Unidad básica de una imagen digitalizada en pantalla a base de puntos a color o en escala de grises.

VANT: (Vehículo aéreo no tripulado) aeronave que vuela sin tripulación, generalmente guiado por un piloto que lo controla de manera remota o mediante el uso de aplicaciones de planes de vuelo. También se les conoce como drones.

Ràster: En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.

SIG: (Sistema de información geográfica) conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos

Shapefile: Formato de representación vectorial, consta de un número variable de archivos, en los que se almacena digitalmente la localización de los elementos geográficos junto con sus atributos o características. Los elementos geográficos de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos.

RESUMEN

Las playas son entornos morfodinámicos que se erosionan, acrecen o se mantienen estables, dependiendo de las tasas de suministro o retiro de sedimento derivadas de los procesos litorales que ocurren en la zona costera. La barrera arenosa del estero San José, ubicada en la desembocadura de la cuenca hidrográfica del mismo nombre, es una zona en la que la distribución del sedimento no se ha evaluado de forma cuantitativa. El objetivo de este trabajo es estimar los cambios volumétricos del sedimento en la barrera arenosa en un periodo anual (2017-2018). Para ello, se realizaron levantamientos topográficos trimestrales con la técnica de la fotogrametría aérea con un dron DJI PHANTOM 4 Pro, las imágenes obtenidas fueron sometidas a un proceso fotogramétrico digital para obtener Modelos Digitales del Terreno (MDT) con resolución espacial de 8 cm. Se realizaron 5 levantamientos topográficos entre el 24 de febrero del 2017 y el 15 de febrero del 2018. Los MDT resultantes fueron comparados entre sí para calcular la distribución espacio-temporal de los cambios volumétricos. De los volúmenes de sedimento calculados, el mayor se valoró entre las mediciones del 26 de mayo y el 6 de septiembre del 2017 en la cual se estimó una erosión de 155,993 m³ y una acreción de 190,998.00 m³, estos volúmenes representan los cambios notorios que experimentó la barrera por la incidencia de la Tormenta Tropical Lidia el primero de septiembre del 2017, donde la descarga extraordinaria del arroyo San José, ocasiono una ruptura en la barrera con una longitud aproximada de 610 m y una ampliación en el delta del arroyo con una superficie de 10.83 Has. Para complementar el entendimiento de la dinámica de la barrera arenosa se implementó el modelo numérico XBeach, en el cual se realizaron cuatro simulaciones con duración de 30 días cada una, estas consistieron en simular la morfodinámica de la barrera arenosa antes y después de la afectación de la tormenta tropical Lidia, con y sin la presencia de las escolleras de la Marina Puerto Los Cabos. La mayor dinámica del sedimento se presentó en la desembocadura del arroyo San José, mientras que la zona adyacente a la escollera de la Marina Puerto Los Cabos fue la más estable.

ABSTRACT

Beaches are morphodynamic environments that are eroded, accreted or remain stable, depending on sediment supply or removal rates derived from the coastal processes that occur in the coastal zone. The sandy barrier of the San José estuary, located at the mouth of the hydrographic basin of the same name, is an area in which the distribution of sediment has not been evaluated quantitatively. The objective of this work is to estimate the volumetric changes of the sediment in the sandy barrier in an annual period (2017-2018). For this, quarterly topographic surveys were carried out with the aerial photogrammetry technique with a UAV DJI PHANTOM 4 Pro. The images obtained were submitted to a digital photogrammetric process to obtain Digital Terrain Models (DTM) with a spatial resolution of 8 cm. Five topographic surveys were conducted between February 24, 2017 and February 15, 2018. The resulting MDT were compared to calculate the spatio-temporal distribution of the volumetric changes. Of the sediment volumes calculated, the highest was valued between the measurements of May 26 and September 6, 2017 in which an erosion of 155,993 m³ and an accretion of 190,998.00 m³ were estimated, these volumes represent the notorious changes experienced the barrier due to the impact of Tropical Storm Lidia on September 1, 2017, where the extraordinary discharge of the San José stream caused a break in the barrier with an approximate length of 610 m and an expansion in the delta of the stream with an area of 10.83 Has. To complement the understanding of the dynamics of the sandy barrier, the numerical model XBeach was implemented, in which four simulations were carried out with a duration of 30 days each, these consisted in simulating the morphodynamics of the sandy barrier before and after the affectation of tropical storm Lidia, with and without the presence of the breakwaters of the Marina Puerto Los Cabos. The greatest sediment dynamics occurred at the mouth of the San José stream, while the area adjacent to the Puerto Los Cabos pier was the most stable.

1. INTRODUCCIÓN

La costa es el lugar donde el océano se encuentra con el continente, y la zona costera es la mayor región influenciada por los procesos que ocurren por la interacción del continente con el océano. Una playa arenosa puede formar la línea de costa en un área, pero la zona costera incluye pantanos, dunas de arena y acantilados justo al interior de la playa, así como bancos de arena y valles submarinos (Garrison, 2010).

Las zonas costeras son de las regiones más dinámicas de la Tierra, con cambios que ocurren en amplias escalas temporales y espaciales, por lo que la sistematización de cartografía de estas zonas es un reto. Por otra parte, existe la necesidad de mejorar el entendimiento de la morfología costera, con la finalidad de obtener modelos más precisos de su evolución para su aplicación en la toma de decisiones y evaluación de riesgos (Finkl *et al.*, 2014). La morfodinámica de las zonas costeras es controlada por procesos litorales, resultado de la incidencia de fenómenos naturales, principalmente el viento, oleaje, marea y corrientes. Las playas se erosionan, acrecen o permanecen estables dependiendo de su tasa de transporte sedimentario (CERC, 1984). El origen del sedimento de las playas puede tener diferentes aportes, como la erosión de acantilados, escurrimientos fluviales, transporte eólico, de procedencia biógena y sedimento en la plataforma continental. Además de los factores naturales que modifican la morfología costera, también existen causas antrópicas, como la construcción de obras que interrumpen el transporte litoral, el dragado y el abastecimiento de arena en playas. Una vez que el sedimento está disponible en la zona costera éste es transportado en dirección tanto perpendicular como paralela a la línea de costa. Este arrastre de sedimento se produce principalmente entre la línea de playa y la zona de rompiente (CERC, 1984).

Las interacciones entre los factores mencionados anteriormente que influyen en la dinámica litoral, aumentan la complejidad para predecir patrones de cambio en la línea costera. Sin embargo, este es un tema de primordial importancia, ya que la mejor comprensión los procesos que controlan la morfología costera, puede contribuir significativamente a un manejo adecuado de los riesgos relacionados con los cambios en la zona costera (Del Río *et al.*, 2013).

Aunque los cambios morfológicos que ocurren en la zona costera pueden considerarse en diferentes escalas de tiempo, los más dinámicos tienen lugar durante eventos extremos de fuerte oleaje y aumento del nivel del mar por marea de tormenta. La erosión de playas y dunas se presenta como resultado de la incidencia de tormentas y oleaje elevado, que puede rebasar y romper la duna, inundando la trasplaya. Estas áreas suelen estar habitadas y en algunos casos cuentan con una infraestructura turística bien desarrollada. Modelar dichos procesos crea la posibilidad de predecir los riesgos para la costa y constituye un elemento crucial como una herramienta aplicada al manejo de costas (Bugajny *et al.*, 2013). La forma ideal de monitorear estos cambios es calcular el volumen total de arena que se pierde o se gana (Farris and List, 2007).

La erosión costera es uno de los principales procesos que definen la evolución del litoral. A lo largo de las playas, los procesos erosivos eliminan el sedimento del sistema costero y lo transporta hacia el mar a través de la acción de las olas y las corrientes. En general, la erosión costera se considera un problema que requiere de manejo cuando ocurre en áreas densamente pobladas (Casella *et al.*, 2016). Las playas arenosas expuestas a mar abierto suministran sedimento al sistema costero. La erosión y acreción de playas expuestas se correlacionan con las condiciones del oleaje. El oleaje de alta energía erosiona el sedimento de la playa, mientras que el oleaje de baja lo acumula (Ariffin *et al.*, 2016). Para evaluar la erosión de una playa es necesario adquirir datos morfológicos detallados del litoral y los cambios volumétricos de la playa en una variedad de escalas temporales y espaciales usando técnicas eficientes de topografía de alta precisión y diseños de levantamientos apropiados (Jeong *et al.*, 2013)

El estudio y la práctica de la ingeniería costera requieren mediciones topográficas continuas de la morfología costera. La importancia de monitorear la morfología costera se ha vuelto crítica, especialmente en los últimos años, en virtud de que la tasa de erosión de las playas se ha acelerado a nivel mundial por las actividades humanas, así como por los cambios en el nivel del mar relacionado con los cambios climáticos

(Fox, 1978; Birkemeier, 1999; Anfuso, 2001; Masselink, 2001; Swales, 2002; Jeong et al., 2013).

La toma de decisiones para el manejo de costas por lo general se basa en estudios que investigan la dinámica costera derivadas de diversas técnicas de monitoreo de playas, ya sea de manera directa (mediciones con GPS o transectos topográficos) o indirecta (LiDAR o fotografía aérea). Por lo tanto, las técnicas para el monitoreo en la playa se basan en observaciones *in situ* o en datos obtenidos mediante percepción remota (Morton et al., 1993; Casella et al., 2016)

Los productos generados por levantamientos topográficos precisos y de alta resolución espacial son cada vez más convenientes para comprender los cambios y procesos morfológicos de las playas en escalas de días, meses o años, así como en el monitoreo de eventos episódicos como las tormentas. Existen varias técnicas para monitorear la morfología y evolución playas a partir de la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT). Estos incluyen sistemas ARGUS de videograbación, sensores LiDAR aéreotransportados, exploración láser terrestre (TLS), monitoreo topográfico tradicional usando un GPS diferencial en Tiempo Real (RTK-DGPS), estación total, y técnicas fotogramétricas. Cada una de estas técnicas tiene sus ventajas y limitaciones en términos de cobertura espacial y temporal, precisión, experiencia operativa, necesidades y costos de software (Brunier et al., 2015; James et al., 2013). Entre las más populares destacan las mediciones con GPS topográficos de alta precisión (Morton et al., 1993; Casella et al., 2016), las estaciones totales o los escáneres láser terrestres (Saye et al., 2005; Theuerkauf and Rodríguez 2012; Casella et al., 2016). Estas técnicas son relativamente económicas y tienen una precisión de 2 a 6 cm en la vertical (Lee et al., 2013; Casella et al., 2016). Sin embargo, requieren grandes esfuerzos para cartografiar grandes áreas, y no proporcionan ortofotografías útiles para detectar elementos específicos del terreno (Casella et al., 2016).

Las estaciones totales y los sistemas de posicionamiento global en tiempo real (RTK-GPS) han sido utilizados para generar la topografía detallada de playas (Morton, 1993;

Rizos, 1999; Featherstone, 2001; Jeong *et al.*, 2013). Aunque la topografía tradicional mediante el uso de estaciones totales o equipos RTK-GPS han sido ampliamente utilizadas para mediciones precisas (Saghravani, 2009; Kizil, 2010; Jeong *et al.*, 2013), este procedimiento no es práctico para recopilar datos suficientemente densos como para construir una morfología tridimensional detallada, especialmente en playas arenosas macromareales, donde el tiempo disponible para realizar un reconocimiento de la zona intermareal durante un día está sujeto al ciclo de marea (Quartel, 2008; Jeong *et al.*, 2013).

Los Modelos Digitales del Terreno (MDT) de alta resolución espacial y precisión vertical son insumos imprescindibles para las ciencias de la Tierra que requieren la reconstrucción tridimensional del entorno. Entre estos, la geomorfología costera requiere información topográfica cada vez más precisa de los sistemas de playa-duna para implementar modelos confiables de algunos procesos costeros, como la erosión, fenómenos de inundación y la evaluación de volúmenes de sedimento. Para tales estudios, la disponibilidad de un conjunto de datos topográficos es fundamental, en particular para aquellos sistemas caracterizados por una morfología compleja. La presencia y evolución de dunas debe ser considerada con especial atención por su función natural de protección de la zona costera, proporcionando suministro de sedimentos a las playas y protegiéndolas de las mareas de tormenta (Mancini *et al.*, 2013; Giambastiani *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2004). El uso de la topografía tradicional (estación total y equipos GNSS) para crear MDT puede ser más costosa y requerir de mayor tiempo dependiendo de la topografía del lugar (1200 pesos/ha con un con un equipo GNSS, mientras que con un dron alrededor de 500 pesos/ha). A partir de los últimos 10 años, la fotogrametría digital se ha convertido en uno de los principales métodos para generar MDT (Uysal *et al.*, 2015; Polat and Uysal, 2015).

Recientemente se han empezado a utilizar nuevas técnicas para la generación de MDT con VANT (vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como drones) en geomorfología y estudios ecológicos (Casella *et al.*, 2016; Floreano and Wood, 2015; Colomina and Molina, 2014; Anderson and Gaston, 2013; Everaerts 2008). Estos se

establecen como una alternativa a la topografía tradicional, especialmente cuando se trata de cartografiar con alta resolución espacial y temporal, además de ser una alternativa de bajo costo a la fotogrametría aérea clásica (Uysal et al., 2015; Eisenbeiss, 2009; Colomina *et al.*, 2008). La captura de datos solo requiere un dron con un sistema de control y cámara digital estándar comercial (Haala et al., 2011)

1.1. Antecedentes

Entre los estudios que han utilizado técnicas modernas de topografía, se encuentra el trabajo de Mancini *et al.*, (2013) quienes realizaron mediciones en dunas situadas en Ravenna (Italia), al norte de la costa Adriática. Los autores utilizaron dos técnicas de medición topográfica para comparar los MDT generados a partir de datos obtenidos con un escáner láser terrestre con los obtenidos con un VANT y fotogrametría digital. El VANT utilizado fue un hexacóptero con cámara Canon EOS 550D con resolución de 18 Mp. Los autores establecieron 10 PCT (puntos de control terrestre) para la georreferenciación con un equipo GNSS RTK, realizaron el vuelo a una altura de 40 m y obtuvieron GSD (resolución en la fotografía) de 6 mm/pixel. Como resultado, generaron MDT con un RMSE (raíz del error cuadrático medio) de 7.8 cm en los puntos de control. Los autores concluyen que los productos generados con el escáner láser terrestre y el dron, tienen muy buen grado de coincidencia ($R^2=0.9915$ para el dron y $R^2=0.9869$ para el escáner) con las mediciones efectuadas con el equipo GNSS RTK, mostrando discrepancias con un RMSE de hasta 22 cm para el MDT generado a partir de los datos obtenidos con el escáner láser terrestre.

Brunier *et al.*, (2016) realizaron mediciones directas en campo y estimaron cambios volumétricos en la playa Montjoly de la provincia Cayenne, Guyana Francesa. La técnica de medición usada fue la fotogrametría aérea, con mediciones trimestrales en el transcurso de un año. Para ello realizaron vuelos en una avioneta a la cual adaptaron una cámara DSLR CANON 5D Mark II sincronizada con un GPS para obtener la coordenada de cada fotografía. En la playa establecieron puntos de control terrestres los cuales fueron medidos con un GPS diferencial para mejorar la precisión del levantamiento. Para el procesamiento de los datos capturados en campo, la playa fue

dividida en 6 transectos, obteniendo un MDT para cada transecto. Con la sobreposición de los MDT de los cuatro periodos de medición, los autores identificaron los cambios volumétricos que experimentó la playa. Como resultado encontraron que la playa presentó una erosión de 65,786.40 m³ al noroeste y una acreción de 21,890.60 m³ al sureste.

Moloney *et al.*, (2017) efectuaron mediciones topográficas en Kilda Beach (Nueva Zelanda). Los autores, compararon las mediciones realizadas con equipo tradicional (estación total y GNSS-RTK) con las obtenidas con un escáner láser terrestre y las de un VANT con fotogrametría digital. El dron utilizado fue un DJI Phantom 3 Advance con una cámara Sony EXMOR de 12.4 Mp de resolución. Para georreferenciar el levantamiento fotogramétrico los autores establecieron 23 PCT con un equipo GNSS RTK, el vuelo se realizó a una altura de 50 m con la que obtuvieron GSD de 2.5 cm/pixel. El traslape entre fotografías fue de 85% en el sentido longitudinal al vuelo y de un 70% en el transversal. Como resultado, generaron un MDT con un RMSE de 1.7 cm en los puntos de control. Con sus resultados concluyeron que los levantamientos topográficos con drones de bajo costo son accesibles, flexibles, automatizados y económicos, proporcionando datos de elevación y fotografía aérea a gran detalle, logrando medir de manera eficiente y precisa un sistema playa-duna.

Otro enfoque para estudiar la morfodinámica de la zona costera es con la implementación de modelos numéricos. Córdova *et al.*, (2014) evaluaron el proceso de erosión en la playa Varadero, Cuba, como consecuencia del impacto de tres huracanes (Michelle en el 2001, Rita y Wilma en el 2005). Con el modelo numérico XBeach establecieron las condiciones de oleaje para cada huracán y cuantificaron los cambios morfológicos en tres secciones de la playa. Definieron las siguientes variables morfológicas como indicadores de los diferentes procesos: volumen de erosión, volumen de acreción, balance sedimentario y longitud de retroceso de la línea de costa. Los autores concluyeron que la zona central fue la más activa ante el paso del huracán Michelle, la cual presentó los mayores valores de erosión de la línea de costa (105.75 m³/m).

Lodewijk *et al.*, (2015) implementaron el modelo numérico XBeach para evaluar la erosión de las dunas y los procesos de ruptura que ocurrieron en Fire Island (Nueva York, E.U.A.), durante el evento del huracán Sandy. Los autores modelaron la erosión de las dunas, y los procesos de rebosamiento y ruptura que ocurrieron durante el huracán. Los autores mencionan que al utilizar la configuración predeterminada del modelo XBeach, las tasas de erosión se sobrestiman sustancialmente.

Bugajny *et al.*, (2013) demostraron la utilidad de XBeach para modelar cambios en la morfología de de playa y duna en términos de la influencia de tormenta en la costa arenosa de Dziwnow Spit, en la región occidental de la costa polaca. El objetivo de estos autores fue desarrollar un sistema operacional de alerta temprana para riesgos costeros basado en el modelo XBeach. Para la calibración del modelo simularon un evento de tormenta registrado en 2009 y compararon con datos morfológicos previos y posteriores a la tormenta (mediciones geodésicas y levantamientos LiDAR aéreos). El modelo XBeach fue empleado para simular 8 perfiles transversales con diferentes configuraciones de parámetros del modelo. Los autores concluyeron que XBeach modela razonablemente los cambios morfológicos como la erosión de dunas y playas inducidas por condiciones de tormenta en el Báltico meridional y que puede aplicarse con éxito para crear una herramienta eficaz para la predicción de riesgos.

Referente a investigaciones de la morfodinámica de playas en regiones cercanas al área de estudio, existe poca documentación en la península de Baja California y Golfo de California.

Bañuelos-Montero (2017) analizó cambios de posición en la línea de costa en la Bahía San José del Cabo B.C.S mediante imágenes SPOT (2004, 2007, 2011 y 2014) y Sistemas de Información Geográfica, para ubicar y cuantificar las áreas de erosión y depósito. El análisis de líneas de costa digitalizadas le permitió ubicar zonas de cambio, con erosión y depósito entre imágenes consecutivas, así entre las de 2004 y 2014, calculando sus respectivas áreas. Los resultados indican que la pérdida de playa va en aumento, con una erosión neta de 16.31 ha entre 2004 y 2014.

Montaño y Peraza (1984) cuantificaron el transporte litoral en dos playas de la costa sur de Sinaloa, aplicando formulas empíricas con un modelo predictivo, siguiendo la metodología de Walton & Chiu (1979). Para aplicar el modelo los autores usaron factores como el coeficiente de fricción, flujo de energía y parámetros de olas de aguas profundas. En la playa arenosa que se encuentra en la desembocadura del Rio Quelite, 30 km al noroeste de Mazatlán el transporte neto fue de 53,700 yd³/año (40,468 m³/año) con dirección Norte, mientras que en la playa que se encuentra frente al estero el Huizache, 25 km al sureste de Mazatlán, el transporte fue 234,700 yd³/año (179,205 m³ /año) con dirección Sur.

Lizárraga *et al.*, (2007) determinaron los ciclos de erosión/acreción relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California. Para ello realizaron mediciones directas en la playa con un nivel fijo, estatal y cinta, efectuando 1,860 perfiles topográficos en 29 transectos de playa, haciendo mediciones mensuales durante 8 años. Los perfiles de playa presentaron cambios morfológicos con una marcada estacionalidad, observando la máxima acreción en verano y la máxima erosión en invierno. La contribución al movimiento de arena en el ciclo anual fue de 80 m³/m, mientras que el transporte inducido por el ciclo de 36 meses fue de 50 m³/m, ambos con dirección noroeste.

1.2. Justificación

El estero San José es un humedal de agua dulce, considero de gran importancia para las aves migratorias y playeras debido a la escasez de cuerpos de agua en la península de Baja California. Es reconocido como un área de importancia para la conservación de las aves (AICA No. 59) bajo la categoría G1 por contener una población de una especie considerada como globalmente amenazada según el libro rojo de BIRDLIFE (Guzmán Poo y Palacios 1999). Se le reconoce a nivel global y fue recategorizada como Important Bird Area (IBA) por contener la población más importante de una especie de ave Críticamente en Peligro a nivel mundial, la Mascarita Peninsular (*Geothlypis beldingi*) (PRONATURA ,2010). En 2009 fue designado como un humedal de Importancia Internacional por la Convención RAMSAR, con el nombre de “Sistema Ripario de la Cuenca y Estero de San José del Cabo”.

La barrera arenosa del estero represa la escorrentía de la cuenca San José dando lugar al cuerpo de agua. Cuando la barrera presenta una ruptura generada por oleaje de tormenta o descarga extraordinaria del arroyo, el agua del estero desciende su nivel o se vacía completamente dependiendo de la abertura en la barrera. Conforme se va depositando el sedimento en la zona de ruptura y se va conformando nuevamente la barrera, el estero comienza a aumentar su nivel de agua. Valorar la tasa de recuperación que presenta este ciclo, permitirá tener un estimado del tiempo en que se represa nuevamente el agua del estero después de una ruptura en la barrera.

La morfodinámica de la barrera depende de factores naturales (oleaje, mareas, huracanes, descargas de sedimento de arroyos) y antrópicos como la presencia de las estructuras costeras de la Marina Puerto Los Cabos. Las estructuras costeras pueden llegar a modificar la dinámica de la zona, como sucedió en la zona de Las Playitas (playa ubicada al este de la Marina Puerto Los Cabos). La cual presenta una modificación severa de la línea de costa, alteración que puede estar relacionada por influencia en la distribución del sedimento de las estructuras costeras de la Marina Puerto Los Cabos (construidas en 2006), así como de las características batimétricas de la zona. La pérdida de playa en Las Playitas va en aumento con una erosión neta de 16.31 ha entre 2004 y 2014 (Bañuelos-Montero, 2017). El autor calculó una extensión de playa erosionada, sin embargo, se desconoce el volumen de sedimento que se está perdiendo, siendo este un parámetro que permite precisar la magnitud de la tendencia erosiva. Una alternativa para conocer el volumen del sedimento que se erosiona, es calcular los cambios de volumen de sedimento en la barrera arenosa del estero San José, la cual se encuentra del lado oeste de la Marina Puerto Los Cabos, dicha barrera es una zona de distribución de sedimento abastecida por la cuenca hidrográfica San José y forma parte del sistema litoral. Calcular el ciclo erosión-acreción, nos permitirá conocer la cantidad de sedimento que aporta al sistema y que debería de aportar a la zona erosionada de Las Playitas.

1.3. Hipótesis

Los volúmenes de erosión y acreción del sedimento en la barrera arenosa varían a lo largo de la playa, presentando una dinámica del sedimento heterogénea entre las zonas noreste y suroeste al delta del arroyo San José.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Estimar los volúmenes de erosión y acreción del sedimento para un periodo anual (2017-2018) en la playa de la barrera arenosa del Estero San José.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones iniciales de la topografía y batimetría de la zona de estudio.
- Cuantificar los cambios volumétricos trimestrales e identificar las zonas de erosión y acreción.
- Implementar un modelo numérico de la morfodinámica de la barrera arenosa con el software XBeach.

1.5. Área de estudio

El área de estudio se encuentra al sureste de la Ciudad de San José del Cabo Municipio de Los Cabos, B. C. S., en la desembocadura del arroyo San José el cual drena a la cuenca hidrográfica San José, con una superficie de 1,275 km² y pertenece a la subprovincia fisiográfica de la Discontinuidad del Cabo, que a su vez se ubica dentro de la provincia fisiográfica Península de Baja California (Fig. 1).



Figura 1. Macrolocalización de la barrera arenosa del Estero San José.

Se trata específicamente de la barrera arenosa que delimita al estero San José, formada por el oleaje de alta energía del Golfo de California (Fig. 2). Sus dunas y vegetación costera conforman en conjunto un área de amortiguamiento de los procesos costeros y terrestres, por lo que su configuración está influenciada por causas naturales como mareas, corrientes, fenómenos meteorológicos de gran impacto (huracanes), y por causas antropogénicas como alteraciones del cauce natural de los arroyos y modificaciones en la playa por estructuras costeras como la presencia de escolleras. La barrera arenosa también es un componente importante en la hidrodinámica del estero San José, ya que su ruptura permite el intercambio de agua con el mar (salida de agua dulce y entrada de agua de mar). La extensión de esta barrera se define desde el hotel Holiday Inn Resort, en su margen suroeste, hasta la escollera de la marina de Puerto Los Cabos, en su margen noreste, con una longitud aproximada de 2,000 m (PRONATURA, 2010).

2. DATOS Y MÉTODOS

En la figura 3 se muestra el diagrama conceptual de la metodología general contemplada en la realización de este trabajo. Ésta se divide en dos partes: la primera consiste en una serie de levantamientos topográficos trimestrales con la técnica de la fotogrametría digital, utilizando un dron Phantom 4 Pro y un equipo GNSS diferencial Leica GS14. La segunda consiste en modelar los cambios en la barrera arenosa con el software XBeach, con el que se realizaron cuatro simulaciones con duración de 30 días cada una, estas consistieron en simular la morfodinámica de la barrera arenosa antes y después de la afectación de la tormenta Lidia, con y sin la presencia de la escollera suroeste de la marina Puerto Los Cabos.

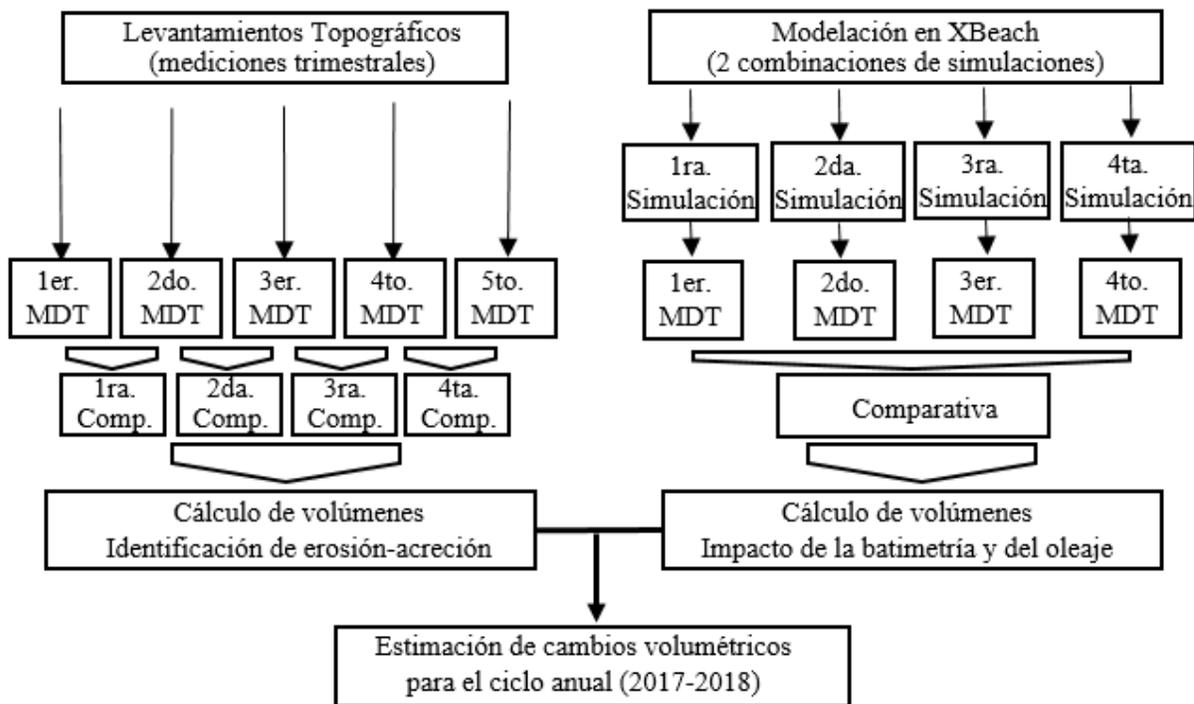


Figura 2. Esquema conceptual de la metodología de la investigación.

2.1. Levantamiento topográfico

La medición del terreno se realizó con la técnica de fotogrametría digital, la cual se realizó en tres etapas, el trabajo en campo, procesamiento de fotografías aéreas y cálculo de volúmenes. A continuación, se detallan los procedimientos que se llevaron a cabo en estas etapas.

2.1.1. Etapa de campo: fotogrametría aérea

Trabajo preliminar. Antes de realizar los vuelos se establecieron cuatro mojoneras (monumentos de concreto de 1.20 m de largo y 7.5 cm de diámetro), que fueron utilizados como bancos de nivel distribuidos cada 400 m a lo largo del área de estudio. Los bancos de nivel fueron georreferenciados con un equipo GPS diferencial Leica Viva GS14, asignándoles coordenadas UTM ligadas a la red geodésica del INEGI. Estos bancos de nivel sirven como referencia y enlace entre los levantamientos topográficos realizados, en un sistema de coordenadas común.

La etapa de campo consta de los siguientes pasos:

a).- Definir la cobertura del levantamiento topográfico. Se estableció la cobertura del polígono a medir (la barrera arenosa), que comprende aproximadamente 1,800 m de playa entre el Hotel Holiday Inn y la Marina Puerto Los Cabos, con un área de 20 ha.

b).- Establecer la altura del vuelo. La altura del vuelo está en función de la precisión deseada para el levantamiento topográfico y a su vez, la precisión del levantamiento depende de la resolución de la imagen.

Para definir la altura del vuelo según la resolución deseada (2 cm en este caso) se usó la siguiente expresión:

$$GSD = \frac{H}{f} * \frac{d}{p} \quad (1)$$

Donde:

H , altura del vuelo (m)

f , longitud focal de la cámara (8.8 mm)

d , longitud del sensor (CMOS) de la cámara (13.20 × 8.80 mm)

p , Resolución de la cámara (5472 × 3648 pixeles)

Los parámetros f , d y p son valores para la cámara del dron Phantom 4 Pro.

Puesto que se desea una resolución espacial de 2 cm aproximadamente, se despeja la variable de altura (H) en la ecuación (1):

$$H = \frac{GSD * f * p}{d} = \frac{0.02 * 8.80 * 5,472}{13.20} \quad H = 72.96$$

En virtud de que la aplicación utilizada para volar el dron Pix4Dcapture, no tiene la opción de volar a esta altura de manera automática, se define una altura de 80 m, lo que resulta en una resolución espacial de 2.19 cm.

c).- Plan de vuelo. Una vez definido el polígono a medir y la altura del vuelo, se establece el plan de vuelo. Este se generó con la aplicación para dispositivo móvil Pix4Dcapture, en la cual se especifica el tipo de trayectoria y porcentaje de traslape entre fotografías, con lo cual la aplicación estima el tiempo de vuelo. El traslape de la fotografía es el empalme que presentan dos fotografías consecutivas. En estas zonas de traslape es en donde el software calcula las elevaciones del terreno. Se definieron 4 planes de vuelo con una cobertura de 6 ha y una duración de 18 min para cada levantamiento topográfico. El tipo de trayectoria elegido fue de doble malla (recorrido cuadrulado con dos trayectorias, una en sentido longitudinal y otra en sentido transversal a la línea de costa), especificando un traslape del 80% en las fotografías en ambas trayectorias (de acuerdo con Turner *et al.*, 2016).

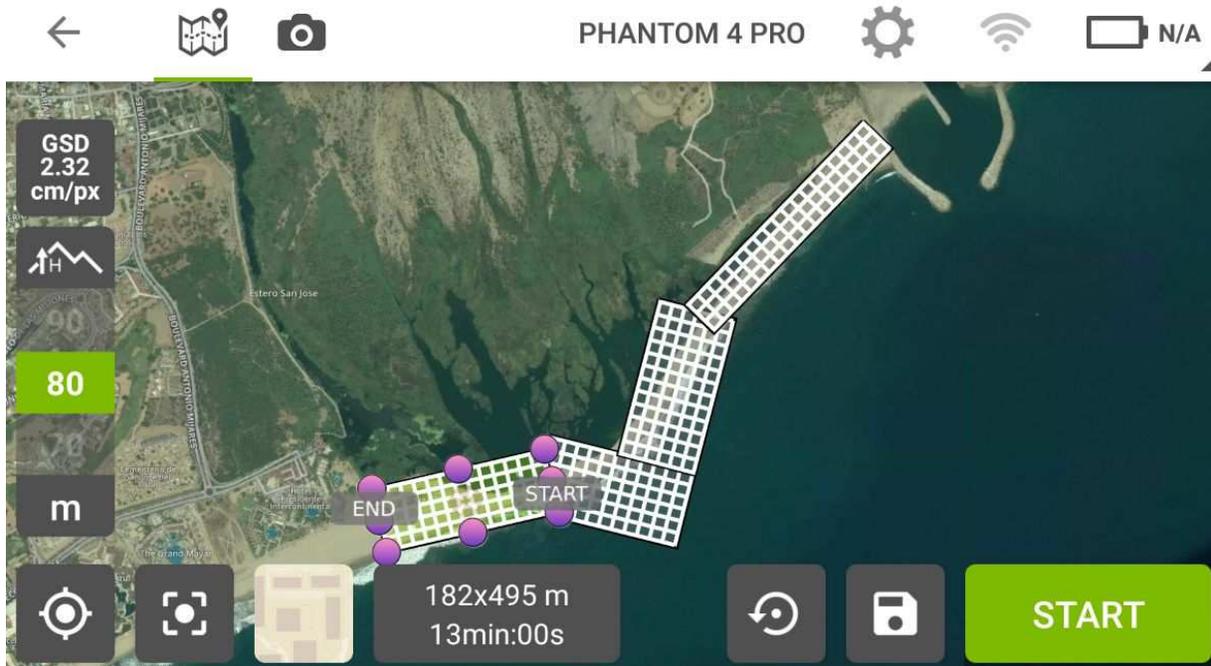


Figura 3. Cobertura de los planes de vuelo generados en la aplicación para teléfono inteligente Pix4Dcapture.

d). Puntos de control terrestre. Los puntos de control terrestre (PCT) tienen la función de ubicar, orientar y escalar los productos generados como resultado del procesamiento de las imágenes (nube de puntos y MDT descritos en la sección 2.1.2). Estos puntos se ubicaron con marcas de triplay de madera de 6 mm de espesor y de 50 × 60 cm por lado. En estas marcas se dibujaron cuatro cuadrantes y se pintaron de negro los cuadrantes opuestos con la finalidad de identificarlos fácilmente en las fotografías aéreas. Se distribuyeron las marcas sobre la barrera y posteriormente fueron georreferenciadas con un equipo GPS diferencial Leica Viva GS14 obteniendo su ubicación en coordenadas UTM (x, y, z). Para el primer levantamiento se colocaron 81 PCT, para el segundo 55, en el tercero 64, para el cuarto y quinto levantamiento se colocaron 15. Los puntos de control obtenidos con este procedimiento, fueron utilizados en la etapa de gabinete para la georreferenciación y procesamiento de las fotografías aéreas.



Figura 4. Georreferenciación de puntos de control con equipo GNSS Leica Viva Gs14.

e) Vuelo y captura de fotografías. Una vez georreferenciados los puntos de control se procedió a realizar el vuelo vinculando la aplicación Pix4Dcapture con el dron para seguir la trayectoria previamente especificada en el plan de vuelo. Para realizar los vuelos se consideró que la velocidad del viento fuera menor a 20 km/h según lo recomendado por Brunier *et al.*, (2016), así como la marea en bajamar para obtener fotografías con una mayor superficie de la playa.

2.1.2. Etapa de gabinete: Procesamiento de imágenes

Esta etapa consistió en el procesamiento de las imágenes captadas con el dron y los puntos de control obtenidos en campo utilizando el software Agisoft Photoscan, para generar los Modelos Digitales de Elevación (MDT). El flujo de trabajo fotogramétrico implementado en este software está basado en el protocolo de la estructura del movimiento (SfM por las siglas en inglés de Structure from Motion), el cual ha sido descrito por James *et al.*, (2013), Javernick *et al.*, (2014) y Gonçalves & Henriques

(2015). El flujo de trabajo y la reconstrucción de MDT se describen brevemente a continuación.

a) Alineación de las imágenes. En esta etapa se identificaron los puntos de control en las fotografías, asignándoles las coordenadas correspondientes (las obtenidas en campo con el GPS diferencial). Photoscan utiliza un algoritmo de seguimiento de rasgos (feature tracking) para identificar, igualar y supervisar la ubicación de los rasgos únicos (Brunier *et al.*, 2016; Agisoft, 2015).

b). Generación de nubes de puntos. Con base en la posición estimada de cada imagen, el software Agisoft Photoscan calcula la profundidad por correlación entre los traslapes de cada par de imágenes y luego combina todas estas en una sola nube de puntos (Agisoft, 2015). En esta etapa también se llevó a cabo el proceso de enmascarado de fotografías, que consiste en editar manualmente cada fotografía para eliminar las regiones que contienen superficie del agua (de mar y del estero), así como de las personas que transitaban por la playa durante el levantamiento. La nube de puntos resultante se generó con una densidad promedio (resolución del levantamiento topográfico) de 150 puntos/m².



Figura 5. Nube de puntos generada con el software Agisoft Photoscan (levantamiento del 15/feb/2018).

La nube de puntos generada fue clasificada por rangos de alturas y por la pendiente del terreno, eliminando puntos correspondientes a vegetación, así como los

encontrados en los límites del levantamiento y las elevaciones erróneas calculadas por el efecto del oleaje.

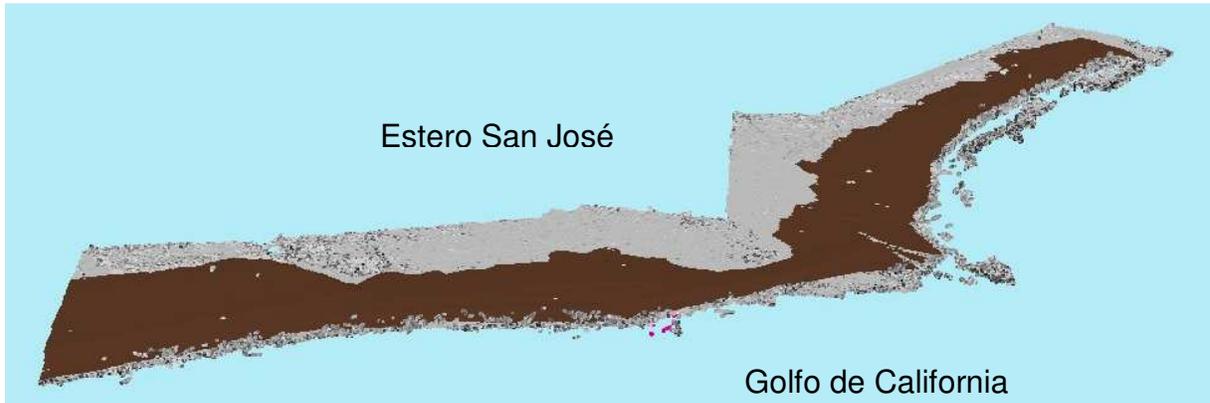


Figura 6. Nube de puntos clasificada generada con el software Agisoft Photoscan (levantamiento del 15/feb/2018).

c).- Creación de malla y textura. A partir de la triangulación de la nube de puntos, el software Agisoft Photoscan reconstruye una malla poligonal 3D que representa la superficie de terreno. Esta malla se editó manualmente eliminando puntos aislados que generan distorsión en el MDT (principalmente en la cara de la playa por el efecto del oleaje).



Figura 7. Malla que representa la superficie del terreno generada por la triangulación de la nube de puntos clasificada (levantamiento del 15/feb/2018).

Una vez editada la malla se procedió a generar la de textura del MDT. En esta etapa el software Agisoft Photoscan asigna la textura y colores de las fotografías aéreas al MDT.



Figura 8. Modelo digital del terreno (MDT) texturizado con los valores RGB de las fotografías procesadas (levantamiento del 15/feb/2018).

Finalmente, los MDT generados fueron sometidos a un análisis estadístico para evaluar la precisión de los levantamientos topográficos. El análisis consistió en comparar las coordenadas generadas con el MDT en los puntos de control y en puntos arbitrarios de perfiles aleatorios georreferenciados con el equipo GNSS diferencial. El análisis estadístico (basado en Höhle and Höhle, 2009), emplea como estimador la raíz del error cuadrático medio (RMSE). En la tabla 1 se muestran los errores obtenidos durante el procesamiento fotogramétrico para cada levantamiento topográfico.

Tabla 1. Características y errores obtenidos de los MDT comparados con mediciones RTK-DGPS.

Fecha	24-feb-17	26-may-17	06-sep-17	29-nov-17	15-feb-18
# fotografías	2201	1608	1950	1069	893
Densidad	156 pts/m ²	168 pts/m ²	163 pts/m ²	122 pts/m ²	127 pts/m ²
(a) Error (PC)					
# (PC)	81	55	64	15	15
error en X (cm)	3.6	3.06	1.92	0.47	0.65
error en Y (cm)	4.4	2.15	1.38	0.23	0.43
error en Z (cm)	3.32	0.91	0.78	0.33	0.93
RMSE (cm)	6.58	3.85	2.49	0.62	0.9
(b) Error (PA)					
# Puntos aleatorios	60	131	-	-	-
RMSE (cm)	13.26	5.1	-	-	-

Una vez realizado el análisis estadístico, las ortofotos y Modelos Digitales del Terreno (MDT) se exportaron en formato GeoTIFF (coordenadas UTM) para su procesamiento en un SIG (descrito en el apartado 2.1.3).

Para realizar el procesamiento de las fotografías descrito en este apartado, se utilizó una computadora con un CPU de 8 núcleos, una tarjeta gráfica (GPU) Nvidia GeForce GTX 1080 Ti y 32 Gb en memoria RAM.

2.1.3. Cálculo de volúmenes y zonas de erosión-acreción

Los MDT generados con el proceso de fotogrametría aérea para cada levantamiento topográfico se compararon entre sí, con la finalidad de evaluar los cambios morfológicos que presentó la barrera en los periodos de medición. Para la interpretación de estas variaciones se identificaron las zonas de cambio (erosión/acreción) calculando el volumen del sedimento entre levantamientos topográficos consecutivos (diferencia entre dos MDT).

Por ejemplo, para estimar los cambios entre los levantamientos de febrero y mayo, se restó el MDT de febrero al de mayo. La resta aritmética de elevaciones pixel a pixel se realizó con ArcGIS. Los valores positivos se interpretan como erosión, si es negativo

como acreción y si es cero como estable. Posteriormente, se generaron una serie de perfiles en los que se representan con mayor detalle los cambios en la morfología de la playa (avance o retroceso de la línea de costa en el tiempo transcurrido entre los levantamientos).

2.2. Levantamiento batimétrico

2.2.1. Etapa preliminar

Se definió la cobertura de la región del levantamiento, que comprende una superficie de 900 ha (un rectángulo de aproximadamente 6 km a lo largo de la línea de costa y 1.5 km mar adentro). La trayectoria del levantamiento batimétrico se definió en el software QGIS (Fig. 9) y se exportó al software MotionX-GPS para seguir la ruta en un dispositivo móvil.



Figura 9. Trayectoria para el levantamiento batimétrico definida en QGIS.

2.2.2. Etapa de campo

El levantamiento consistió en una serie de perfiles perpendiculares a la línea de costa, donde cada perfil tuvo una longitud aproximada de 1,500 m y una separación de 200 m a lo largo de 6 km sobre la línea de costa, cubriendo la extensión del área de estudio (la cual tiene una longitud aproximada de 1,800 m de línea de costa).

Para el levantamiento batimétrico se usó una ecosonda Garmin GPSmap 431s, instalada con una base de herrería a una embarcación de 30 pies de eslora. Partiendo de la Marina Puerto los Cabos a las 8:00 am del día 6 de abril del 2017. La ecosonda se programó para realizar mediciones (latitud, longitud, profundidad, hora) cada 2 segundos a una velocidad de desplazamiento de 10 km/h con la trayectoria antes descrita terminando el recorrido a las 1:30 pm.

2.2.3. Etapa de gabinete

Se exportaron las 9,981 mediciones registradas en la ecosonda a una computadora utilizando el software Garmin HomePort. Los datos se importaron a Excel para seleccionar los campos de interés. Adicionalmente, con el software Marv10 (CICESE) se obtuvieron los datos de marea para el día y periodo en el que se realizó el levantamiento batimétrico. Estos dos archivos (batimetría y mareas) fueron procesados con un script en MATLAB para eliminar de las mediciones batimétricas las variaciones de profundidad provocadas por el efecto de la marea durante la medición. Una vez realizada esta corrección se utilizó el software ArcGIS para procesar las mediciones y generar un modelo digital de la batimetría en formato GeoTIFF, a partir del cual se generaron las isóbatas del área de estudio.

2.3. Implementación del modelo XBeach

Para complementar el estudio de la morfodinámica de la barrera arenosa se implementó el modelo numérico XBeach. Se realizaron cuatro simulaciones con duración de 30 días cada una. Estas consistieron en simular la morfodinámica de la barrera arenosa antes y después de la afectación de la tormenta Lidia, con y sin la presencia de la escollera suroeste de la Marina Puerto Los Cabos.

XBeach es un modelo numérico en dos dimensiones que simula la propagación del oleaje, ondas largas, flujo medio, transporte de sedimento y cambios morfológicos en la zona de playa, dunas y barreras al interior de la costa durante la ocurrencia de eventos extremos (Hernández y Córdova, 2016). El software es de código abierto y fue desarrollado por el UNESCO-IHE y el instituto de investigación DELTARES (Países Bajos). Originalmente fue diseñado para evaluar procesos e impactos hidrodinámicos y morfodinámicos en costas arenosas en condiciones de tormenta.

El modelo XBeach resuelve las ecuaciones de balance de acción de la ola, de energía del roller, de la masa y del momentum en aguas poco profundas, fórmulas de transporte de sedimento, así como las de actualización del fondo descritas por Hernández-Valdés y Córdova-López (2016).

Las ecuaciones que utiliza XBeach para calcular la morfología resultante están descritas en su manual Roelvink *et al.*, (2010).

2.3.1. Datos de entrada

XBeach es un software autónomo que dispone de herramientas de Matlab para configurar y ejecutar modelos. Para llevar a cabo la configuración, se generaron seis archivos de entrada con los datos requeridos:

- grid_D3D.grd (malla de nodos que contiene las coordenadas X, Y)
- bed_D3D.dep (datos de profundidad del par de coordenadas X, Y)
- escollera.bed (posición de la escollera)
- jonswap.txt (serie de tiempo del oleaje)
- tide.txt (serie de tiempo de la marea)
- params.txt (definición de los parámetros de simulación)

Estos archivos fueron generados con los módulos RFGRID y QUICKIN de Delf3D. Como salida, el modelo genera archivos en formato NetCDF, que contienen arreglos matriciales que representan los cambios morfológicos de la zona de estudio. A partir de éstas matrices se generan los MDT simulados.

A continuación, se describen los archivos de entrada que requiere XBeach para realizar las simulaciones.

Malla (grid_D3D.grd)

La malla se generó en el módulo RGFGRID de Delf3D. Consistió en un arreglo reticular de 62×387 nodos, con espaciamiento de 25 m en el sentido longitudinal a la costa y de 1 a 35 m en sentido perpendicular a la línea de costa, cubriendo una distancia de 1,625 m a lo largo de la costa y 1,660 m perpendicularmente.

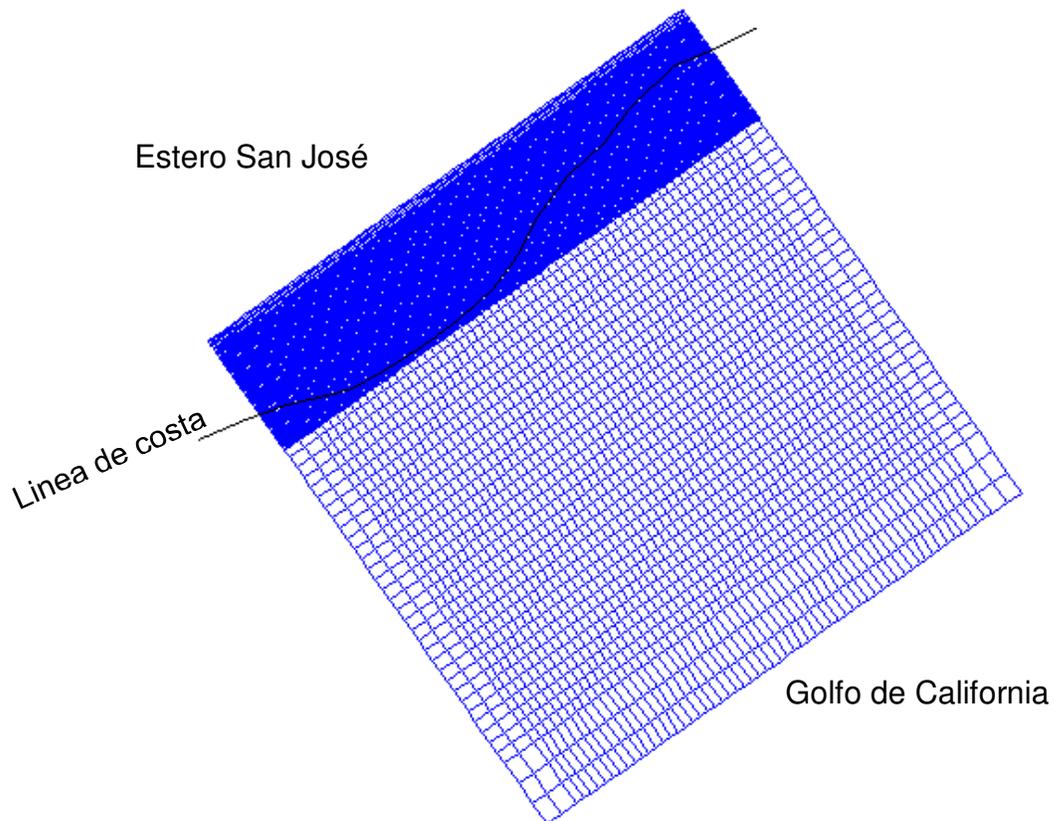


Figura 10. Malla generada en RGFGRID en coordenadas UTM Zona 12.

Profundidad (bed_D3D.dep)

En el módulo QUICKIN se importó la malla generada en RGFGGRID, así como un MDT de la topografía y batimetría (en formato .xyz), cubriendo completamente la superficie de la malla. Posteriormente, se tomaron los valores de elevación del MDT en cada punto de la malla y se exportaron (extensión .dep).

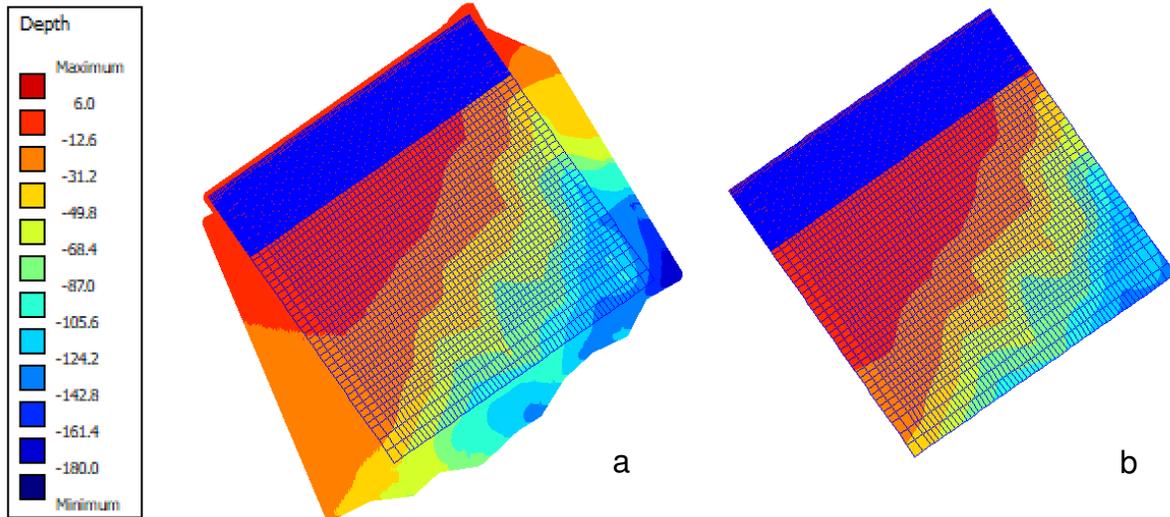


Figura 11. a) Malla con elevaciones del MDT de la batimetría y la topografía. b) Malla con valores puntales por nodo tomadas del MDT.

Estructura (escollera.dep)

En este archivo se definió la posición de la escollera. Se importó la malla (**grid_D3D.grd**) en QUICKIN y se le asignó un valor uniforme de 5 m que representa el espesor del estrato del sedimento. A la región de la escollera, se asignó cero, representando una estructura rígida sin sedimento.

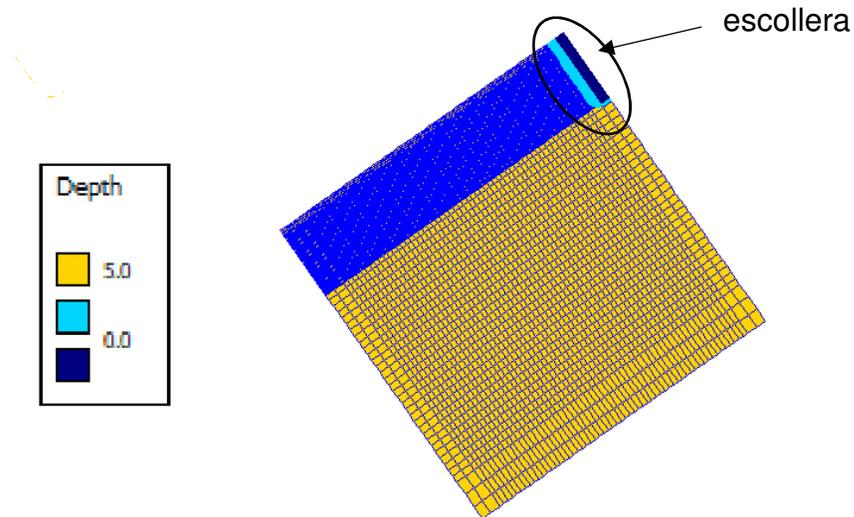


Figura 12. Malla con ubicación de estructuras rígidas (escollera de la Marina Puerto Los Cabos).

Oleaje (jonswap.txt)

Los datos de oleaje fueron tomados de un ológrafo ubicado frente a Cabo Falso del 23/jun/2010 al 23/jul/2010 y del 06/sep/2010 al 06/oct/2010 (figura 13).

La serie de tiempo del oleaje se organizó en una tabla con 6 variables: altura (m), periodo (s), ángulo de incidencia ($^{\circ}$), factor de mejoramiento, dispersión y tiempo de duración sobre la frontera (s).

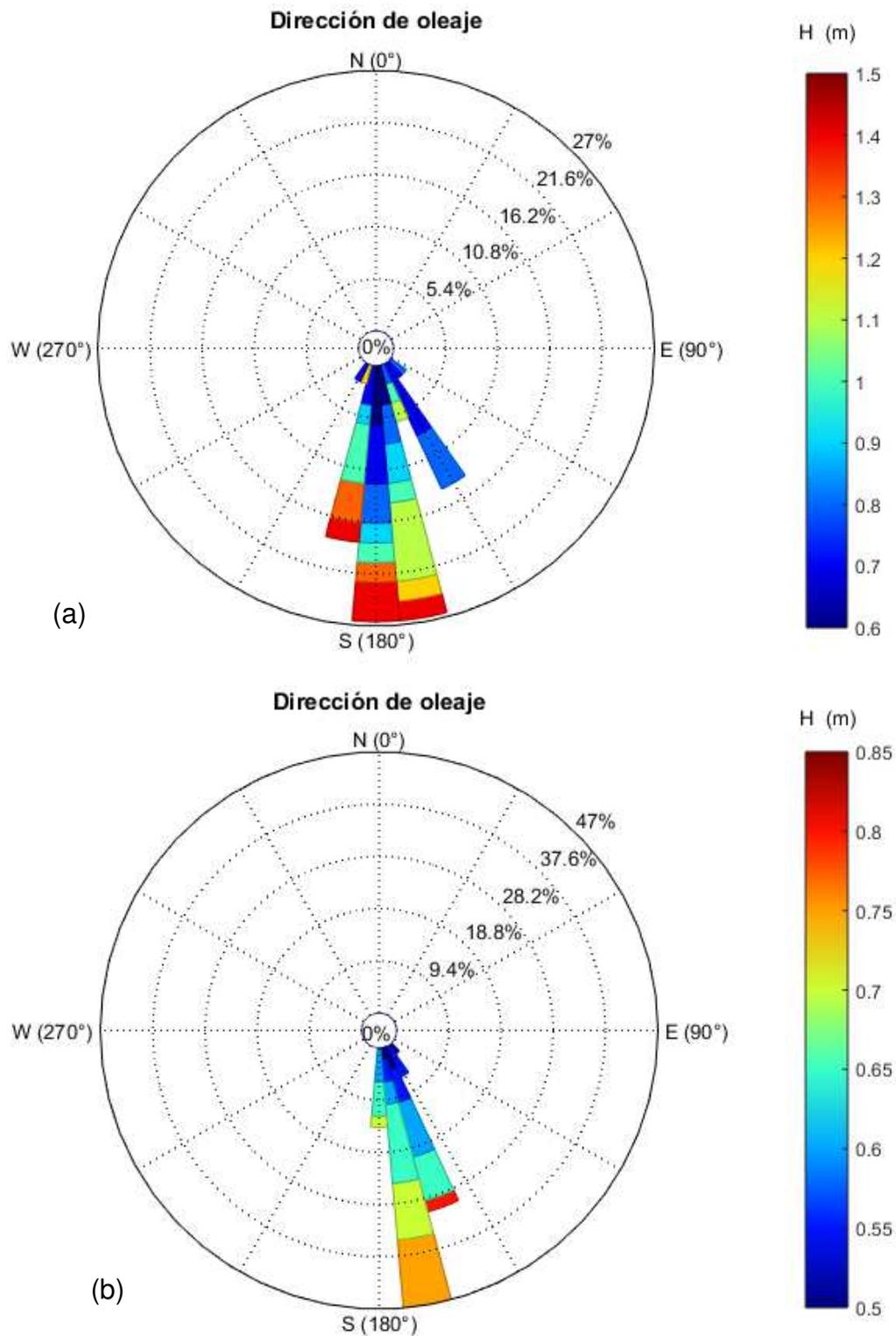


Figura 13. Angulo de incidencia y altura de oleaje promedio. (a) del 23/jun/2010 al 23/jul/2010. (b) del 06/sep/2010 al 06/oct/2010.

Marea (tide.txt)

Los datos de marea fueron obtenidos del programa MARV del CICESE tomando las predicciones de mareas para los periodos de los datos de oleaje. La serie de tiempo del oleaje se organizó en una tabla con 2 variables: altura (m) y tiempo (s).

Configuración de parámetros (params.txt)

En este archivo se especificaron los parámetros de las modelaciones realizadas. Estos valores se especifican en el anexo 1.

Cálculo de volúmenes y zonas de erosión-acreción

Se utilizó el software Panoply (Panoply, 2018) para extraer (en formato extensión csv) los datos del archivo NetCDF generado por XBeach. Estos archivos se importaron a ArcGis y se generaron los MDT en formato GeoTiff. A estos MDT se les aplicó un procedimiento similar al descrito en el apartado 2.1. Se identificaron las zonas de cambio (erosión/acreción), se calcularon los volúmenes de sedimento y se compararon en las cuatro simulaciones realizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con la metodología descrita en la sección anterior. Se muestran los resultados de los levantamientos topográficos y el batimétrico, posteriormente las comparaciones entre levantamientos topográficos y, por último, las simulaciones generadas con el modelo XBeach.

3.1. Levantamientos topográficos

En la figura 14 se representan los 5 levantamientos topográficos realizados. Con el primer levantamiento (24/feb/2017) se establecen las condiciones iniciales de la topografía de la barrera. El último levantamiento topográfico (15/feb/2018) se utilizó para calcular la variación anual de la barrera arenosa.

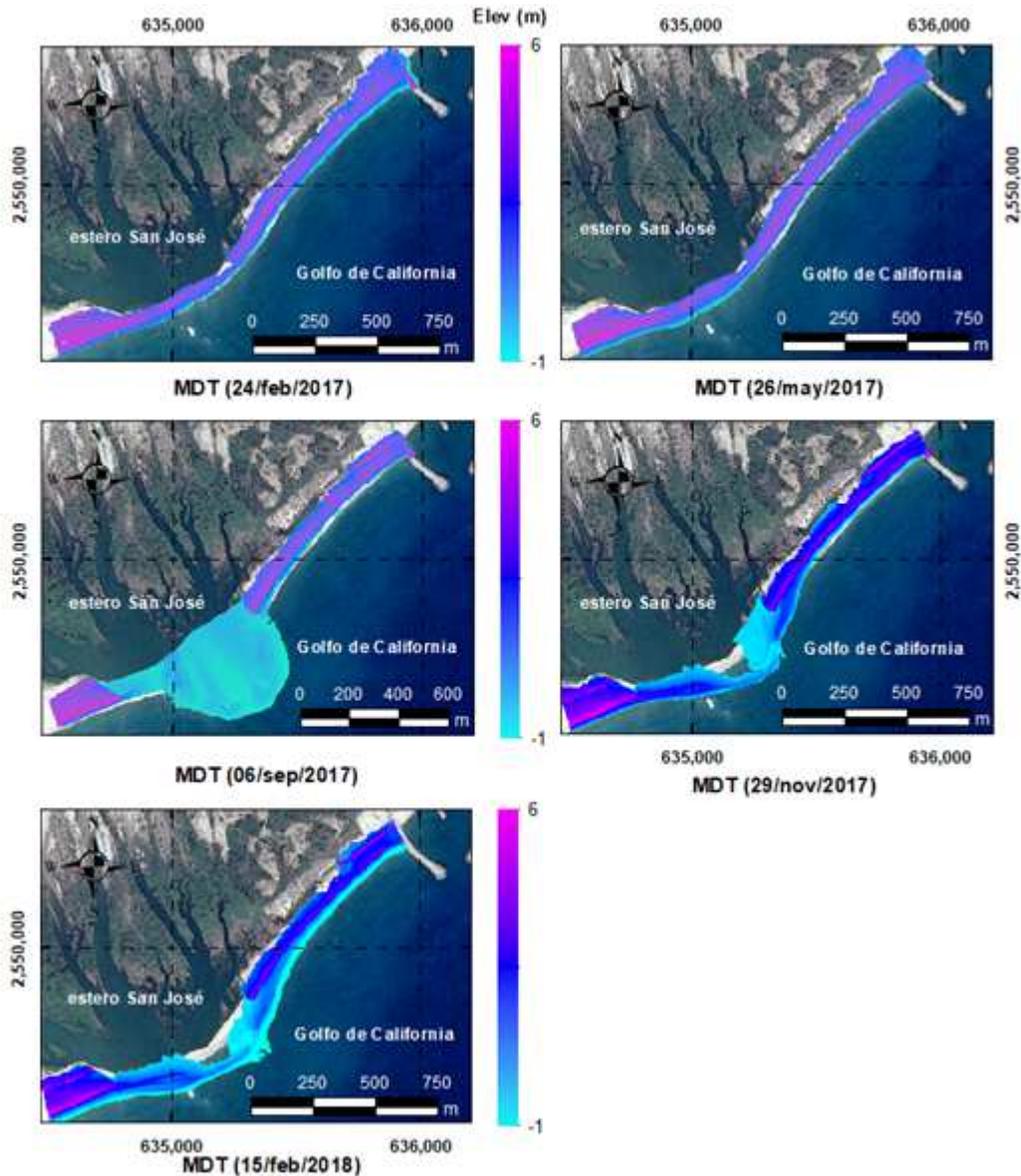


Figura 14. Modelos digitales de elevación (MDT) resultado de la restitución fotogramétrica para cada uno de los levantamientos topográficos. Las elevaciones (en metros) están referidas al nivel medio del mar.

El MDT del 24/feb/2017 representa la topografía inicial de la barrera arenosa, se levantaron 1800 m de longitud de playa en los cuales se observa que la playa tiene un ancho de entre 100 a 130 m en las partes más amplias y de entre 30 a 50 m en la parte estrecha, presentando una pendiente en la cara de la playa de entre 11° a 14° . Para El MDT del segundo levantamiento (26/may/17) la playa conserva los rasgos descritos del primer levantamiento, presentando estabilidad en la trasplaya y un avance de hasta

50 cm de línea de costa al centro y sureste de la barrera, así como un retroceso de hasta 1.5 m en los 400 m adyacentes a la escollera de la marina. En el MDT del levantamiento del 06/sep/2017, se aprecian cambios notorios en la morfología de la barrera arenosa (ruptura de 610 m a lo largo de la costa, formación de un delta con una superficie de 10.83 ha con avance de ~250 m hacia el mar) que fueron generados principalmente por la descarga del arroyo San José, inducida por la tormenta tropical Lidia el 01/sep/2017. Para el levantamiento del 29/nov/2017, se advierte que el delta disminuye 5 ha aproximadamente incrementado su elevación de 50 cm a un rango de 1.5 a 3 msnm con respecto a la medición anterior, observándose que el sedimento se distribuye hacia el noreste de la barrera. En la última medición (15/feb/2018), se observa que en la zona suroeste del delta del arroyo se presentaron cambios más evidentes en la morfología de la barrera, con un avance de hasta 25 m y un crecimiento de una hectárea aproximadamente, con respecto a la medición del 29/nov/2017.

3.2. Levantamiento batimétrico

El levantamiento batimétrico frente a la barrera arenosa (figura 15) se realizó el día 06/abr/2017. En el mapa batimétrico se ilustran las isóbatas que representan el relieve marino, se aprecian las pendientes y profundidades del fondo marino que se encuentran frente a la barrera arenosa. Al suroeste de la barrera (perfil 1 de la figura 16) se encuentra la zona menos profunda y con pendiente uniforme hasta los 25 m de profundidad, en la zona central frente al estero se encuentra una zona somera que alcanza aproximadamente 500 m mar adentro, después del bajo aumenta la pendiente del fondo marino y la profundidad hasta los 100 m. Frente a la marina Puerto los Cabos se observan pendientes pronunciadas con relación de talud de 2:1 y profundidades que alcanzan los 180 m, esta región corresponde a la cabecera del cañón submarino San José.

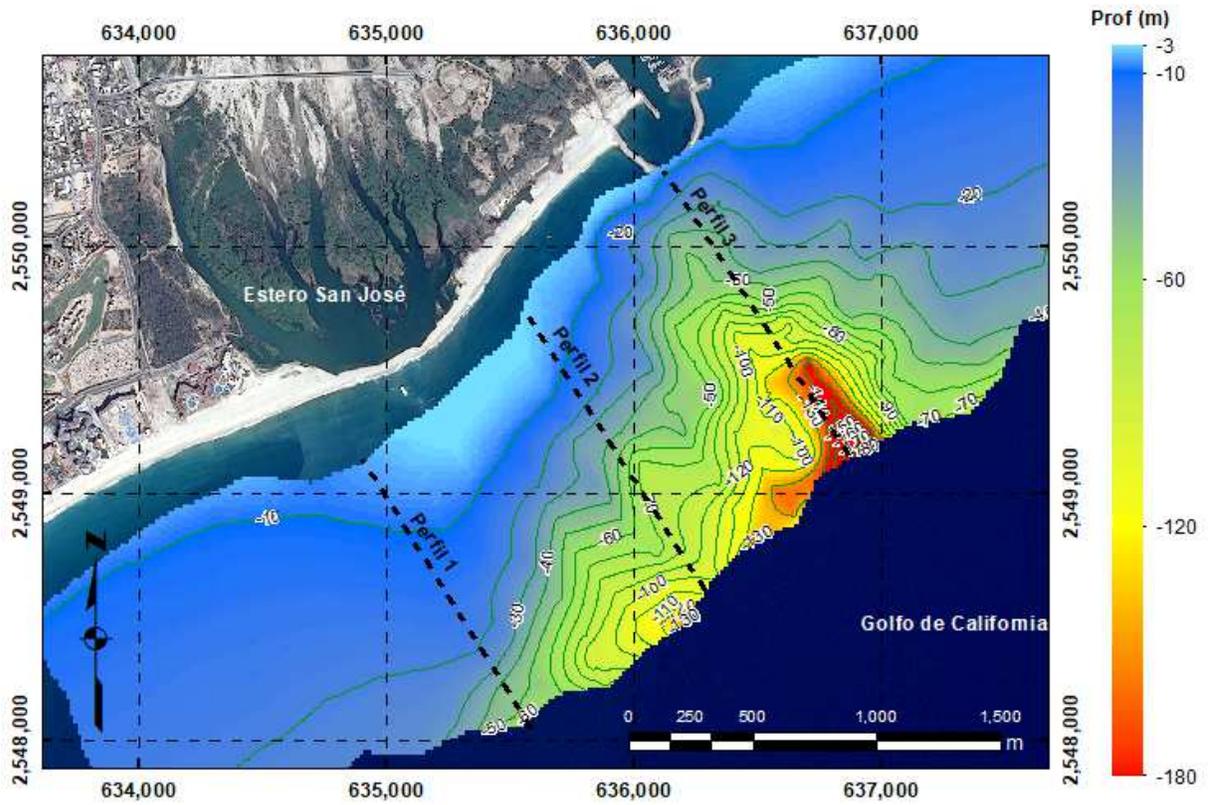


Figura 15. Mapa del levantamiento batimétrico referido al NMM realizado el día 6/abr/2017.

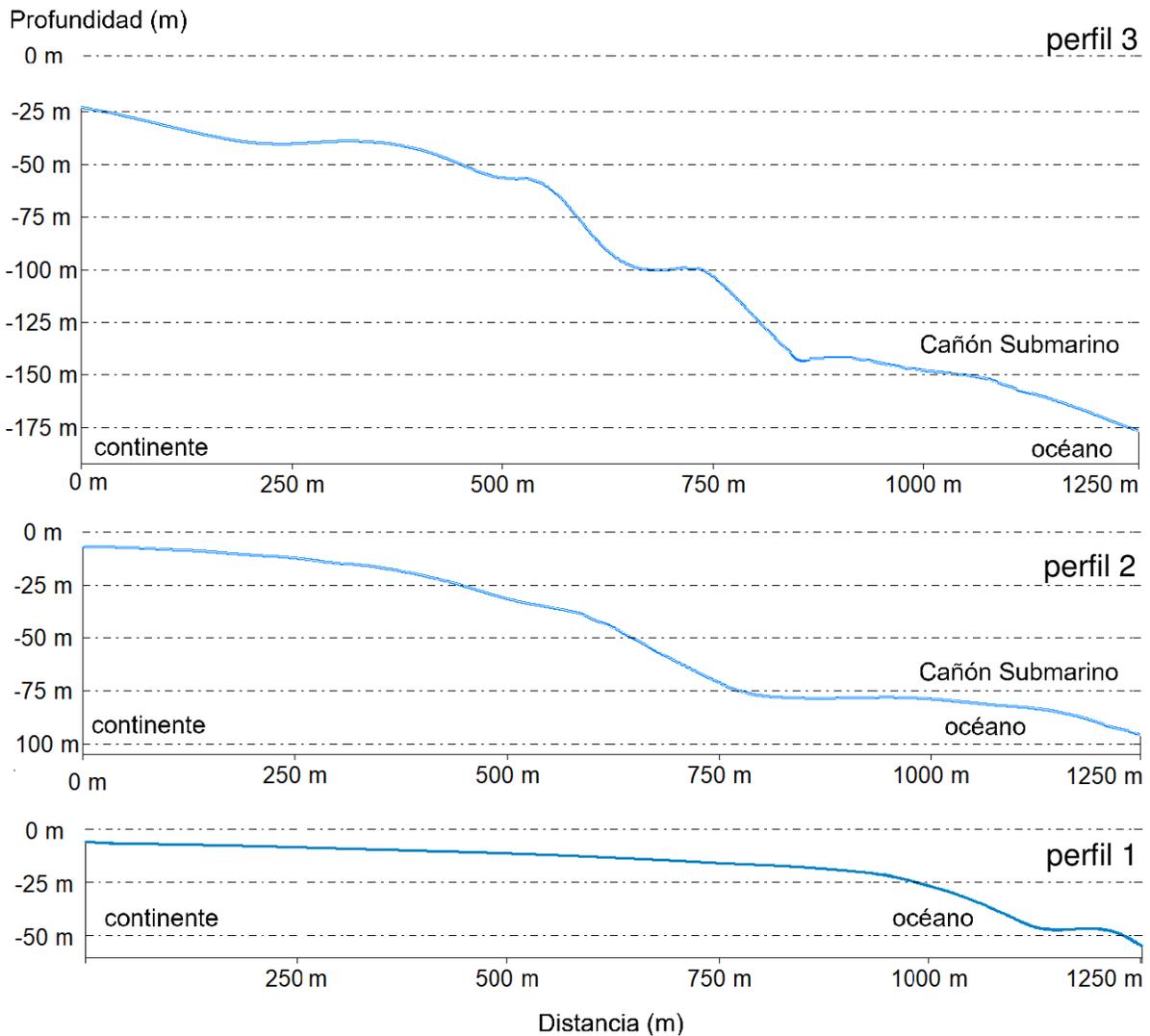


Figura 16. Perfiles batimétricos correspondientes a la figura 15.

3.3. Volúmenes y zonas de erosión-acreción

En la figura 17 se representan 5 comparaciones entre los MDT generados con los levantamientos topográficos. Las primeras 4, son comparaciones trimestrales y la última es la comparación entre el primer (24/feb/2017) y último (15/feb/2018) levantamiento mostrando la variación anual. Para una mayor apreciación, los mapas se presentan a mayor escala en el anexo 2 del presente documento.

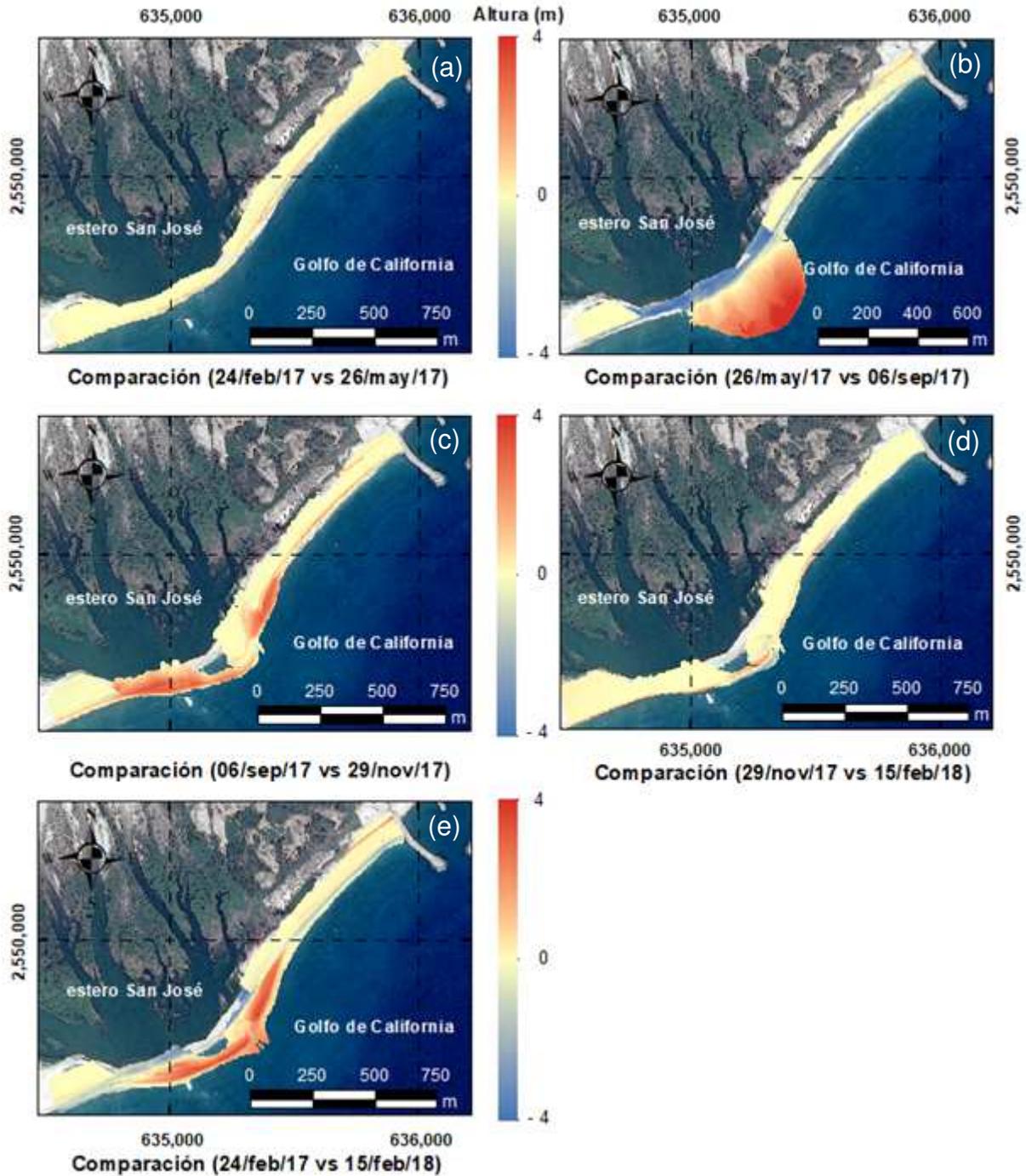


Figura 17. Cambios morfológicos en la barrera arenosa del Estero San José en las fechas indicadas. La escala de colores indica pérdida o acumulación del sedimento en metros por píxel.

Comparación del 24/feb/2017 y 26/may/2017

En esta comparación se observa que los mayores cambios en la morfología ocurren en la cara de la playa, en tanto que la trasplaya se mantiene estable (figura 17a). La zona suroeste de la playa presentó ligeras variaciones de 10 a 25 cm en la componente vertical quedando prácticamente con la misma morfología. En la zona del delta, se presentó un avance de 3 a 4 m en la línea de costa con variaciones de 0.25 a 1.5 m en la elevación. Al noreste de la playa, se identificó erosión en la cara de la playa y una acreción en la berma, evidenciando un movimiento de sedimento en la componente perpendicular a la línea de costa. Se calculó una erosión de 8,788 m³ y una acreción de 24,690 m³, resultando una acreción neta de 15,902 m³.

Al realizar la comparación por secciones de 200 m (figura 19) se tiene que los segmentos S3 y S8 fueron los que presentaron mayor acreción neta con una tasa media de 13.40 y 10.85 m³/m respectivamente. El segmento S6 presentó una tasa de erosión media de 11.94 m³/m y una tasa de acreción media de 12.59 m³/m, resultando una tasa neta de acreción de 0.65 m³/m. Ésta se puede considerar estable en términos del balance sedimentario, sin embargo, morfológicamente existe variación ya que el sedimento fue transportado de la base de la cara de la playa a la berma. El resto de los segmentos presentaron una tasa de acreción neta que osciló entre los 5.28 y 8.11 m³/m.

Comparación del 26/may/2017 y el 6/sep/2017

Esta comparación es la que muestra mayores cambios en la morfología de la barrera (figura 17b). El oleaje de tormenta provocó un retroceso de la línea de costa, que alcanzó aproximadamente 20 m. Para este periodo, los volúmenes de acreción y erosión estimados fueron de 155,993 m³ y 190,998 m³ respectivamente, con una acreción neta de 35,005 m³. Los volúmenes calculados de mayor magnitud se localizan en la zona deltaica de la barrera, entre los transectos 400 y 1000 correspondiente a los segmentos S3, S4 y S5 (figura 18 y 19). En estos segmentos la tasa de acreción media fue de 128.78, 491.67 y 382.49 m³/m respectivamente. La acreción se dio en la zona de rompiente, frente al delta, en donde el sedimento descargado por el arroyo y

el removido de la barrera por la ruptura, formaron el delta antes mencionado. Para los segmentos S2, S3, S4 y S5 se estimó una tasa de erosión media de 175.15, 220.96, 160.32 y 141.76 m³/m respectivamente, en estos segmentos fue donde se presentó la ruptura en la barrera. El volumen (m³/m) de erosión calculado corresponde al que presentaba la barrera antes de su ruptura. Para las secciones S1, S6, S7, S8 y S9 la tasa de erosión fue de 42.86, 32.23, 48.08, 34.43 y 19.43 m³/m, cantidades que representan el volumen medio de erosión originado por el oleaje de la tormenta Lidia.

Los cambios más evidentes en la barrera, representados con mayores diferencias de volumen en las comparaciones, corresponden al levantamiento del 06/sep/2017. Para este periodo se calcularon tasas erosivas máximas del orden de 500 m³/m, sin embargo, esta tasa erosiva no se puede asociar con el oleaje de la tormenta, ya que esta erosión se presentó en el área de ruptura por la descarga del arroyo San José. En las secciones de la barrera donde no hubo ruptura se presentaron tasas erosivas de 20 a 45 m³/m, con retroceso de hasta 20 metros de la línea de costa, erosión que fue ocasionada por el oleaje de la tormenta. Estas tasas son menores a las calculadas por Scott *et al.*, (2016), quienes estimaron una tasa erosiva de 243 m³/m, un retroceso de la línea de costa de 73 m, en el periodo invernal 2013-2014 en Perranporth, costa oeste de Cornwall, Inglaterra. Sin embargo, la tasa erosiva calculada por estos autores contempla un periodo de 8 semanas de un temporal con oleaje de una altura significativa promedio de 4.4 m. Morton *et al.*, (1995) estimaron tasas erosivas de 51 a 73 m³/m en diversos perfiles topográficos en la isla Galveston (Texas, EUA) tras el paso del Huracán Alicia de categoría 3 (escala Saffir-Simpson). Las tasas erosivas calculadas por Morton *et al.*, (1995) tienen una mayor aproximación con las calculadas en el presente trabajo que las estimadas por Scott *et al.*, (2016). Esto puede deberse a que los volúmenes calculados en la barrera arenosa se atribuyen a un solo evento (tormenta Lidia) de igual manera que los calculados por Morton *et al.*, (1995). En contraste, la estimación de Scott *et al.*, (2016) contempla un periodo invernal (doce semanas).

Comparación del 6/sep/2017 y el 29/nov/2017

Se observa un incremento en la altura de la playa en ambos lados de la ruptura (figura 17c), lo que indica un proceso de recuperación después de la erosión ocasionada por la tormenta Lidia. En este periodo, el sedimento se acumula en la zona deltaica formándose una nueva barrera arenosa que se desplazó aproximadamente 130 m hacia el mar con respecto a su posición medida el 24/feb/2017. Para este periodo los volúmenes de erosión y de acreción fueron 8,325 y 113,116 m³ respectivamente, con una acreción neta de 104,791 m³. La mayor acreción se presentó en el segmento S3 (área de ruptura) con una tasa de acreción neta de 211.14 m³/m. Para los segmentos S2, S4, S5 y S6 la tasa de acreción neta se redujo a 60.34, 89.43, 104.56 y 77.54 m³/m. Los segmentos con cambios menores fueron S1, S7 y S8 con tasas de acreción neta de 11.74, 10.61 y 16.20 m³/m. El único segmento con balance negativo fue el S9 con una tasa de erosión neta de 1.12 m³/m, por lo que esta sección de 200 metros de playa adyacente a la escollera de la Marina Puerto Los Cabos, permaneció prácticamente estable.

Comparación del 29/nov/2017 y el 15/ feb/2018

A partir de esta comparación se observa que el sedimento se redistribuye sobre la barrera arenosa, aumentando su altura. Sin embargo, se advierte que hay menos desplazamiento de sedimento en la barrera a diferencia de la comparación del 06/sep/2017 y 29/nov/2017.

Para este periodo los volúmenes de acreción y de erosión fueron 25,858 y 11,957 m³ respectivamente, con 13,901 m³ de acreción neta. Las tasas de variación se redujeron notablemente para este periodo. Todos los segmentos, excepto el S5, presentaron una acreción neta. Los segmentos con mayores tasas de acreción fueron S1 (23.48 m³/m) y S3 (15.23 m³/m). Los segmentos S2, S6 y S7 tuvieron tasas de acreción de 9.07, 12.41 y 10.55 m³/m respectivamente. Los segmentos S4, S8 y S9 presentaron valores menores a 3.1 m³/m, y el único segmento que presentó erosión fue el S5 con 6.93 m³/m.

Comparación anual (24/feb/2017 - 15/feb/2018)

En este periodo anual se observa una acreción en la zona deltaica del segmento S2 al S6, presentando el máximo avance en el segmento S5 con respecto a la posición del primer levantamiento de febrero del 2017 (figura 17e).

La variación anual fue de 74,474 m³ de erosión y 131,282 m³ de acreción, resultando un volumen neto de acreción de 56,808 m³. De los volúmenes calculados, la acreción se presentó en los segmentos S3, S4, S5 y S6 con una tasa de 75.03, 126.68, 167.77 y 38.37 m³/m. Los segmentos erosivos fueron S1, S2, S7, S8 y S9 con una tasa de erosión neta de 43.64, 58.88, 19.27, 13.11 y 25.32 m³/m respectivamente.

La recuperación de la playa fue variable a lo largo de la barrera, entre el 06/sep/2017 y 15/feb/2018 al oeste del delta (segmentos S1 y S2), la tasa de acreción neta que oscilo entre 35 a 69 m³/m. Ésta resultó mayor que del lado este (segmentos S7 y S8) de alrededor de 20 m³/m. Los 200 m adyacentes a la escollera de la marina (segmento S9) permanecieron prácticamente estables (1.26 m³/m), y los segmentos con mayor recuperación son los que abarcan el delta del arroyo (S4, S5 y S6) con una tasa de recuperación de 90 m³/m, siendo el segmento S3 el que presentó mayor acreción (226 m³/m). Estos valores que se encuentran por encima de los estimados por Morton *et al.*, (1995), que oscilaron entre 5 y 30 m³/m en un año a diferencia de la barrera donde el tiempo de recuperación evaluado posterior a la tormenta fue de 6 meses. La razón de que los valores sean contrastantes independientemente de su ubicación geográfica puede deberse a la disponibilidad del sedimento, ya que en el área de estudio se cuenta con un excedente de sedimento en zona de rompientes por la descarga del arroyo San José.

Tabla 2. Volúmenes de sedimento por periodos

Periodo	24/feb/17 - 26/may/17	26/may/17 - 06/sep/17	06/sep/17 - 29/nov/17	29/nov/17 - 15/feb/17	24/feb/17 - 15/feb/17
Volumenes (m ³)					
Erosión	15,902	155,993	8,325	11,957	74,474
Acreción	24,690	190,998	113,116	25,858	131,282
Transporte neto	8,788 (acreción)	35,005 (acreción)	104,791 (acreción)	13,901 (acreción)	56,808 (acreción)

La figura 18 muestra las zonas y magnitudes de erosión y acreción a lo largo de la barrera en volumen por metro lineal de playa (m³/m) entre los levantamientos realizados.

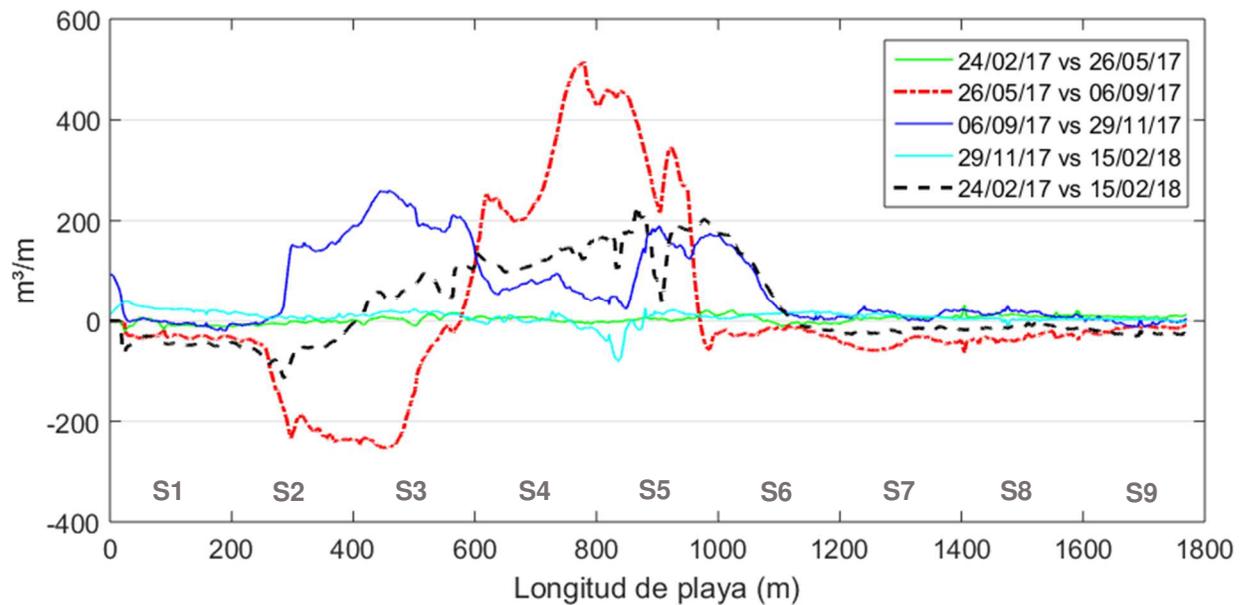


Figura 18. Curvas de la variación de los volúmenes de erosión y acreción trimestral y anual (m³/m) a lo largo de la barrera arenosa (ver referencia de ubicación en figura 19).

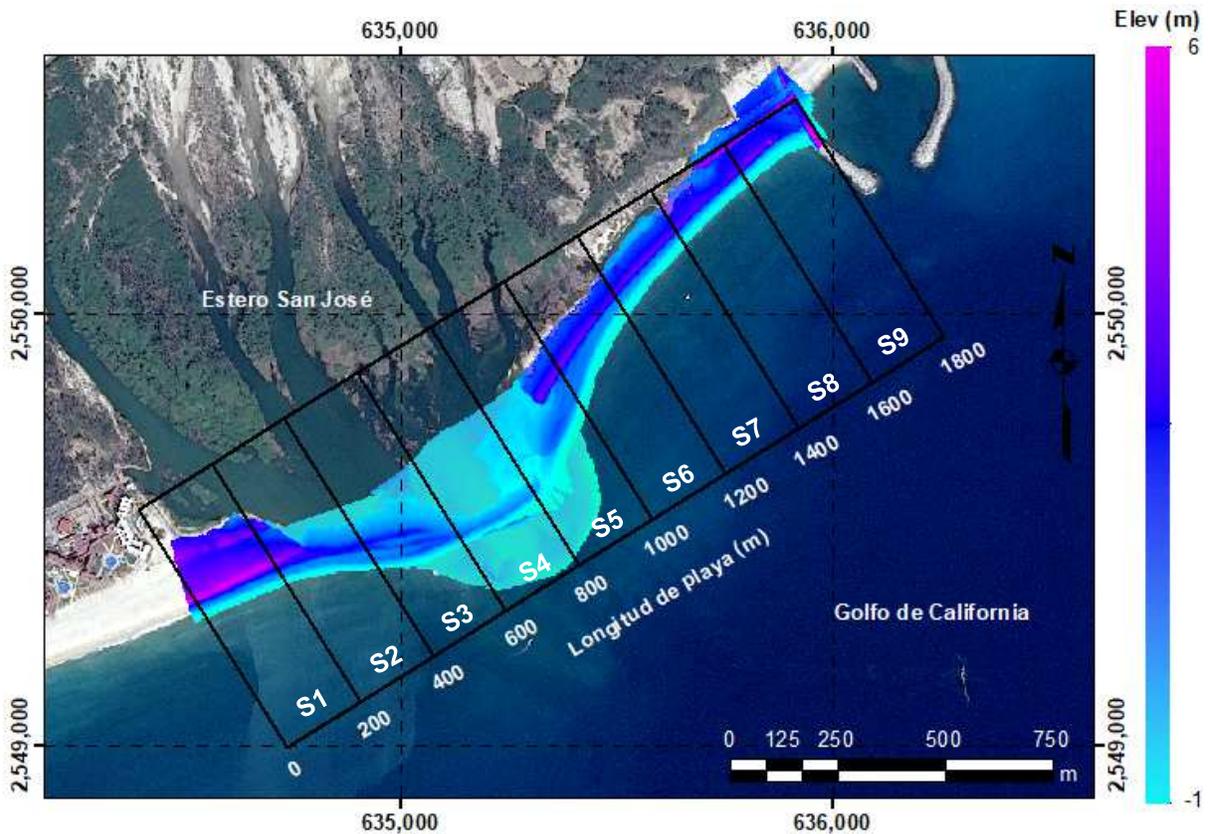


Figura 19. Cuadrícula base (200 m de línea de costa) para el cálculo de volúmenes por metro lineal de playa de la figura 18.

3.3.1. Comparación de perfiles topográficos

Con la intención de tener una interpretación a mayor detalle de los cambios morfológicos de la barrera, se ilustran 5 perfiles topográficos transversales a la playa (figura 20). Se manejan dos perfiles del lado oeste de la barrera, dos del lado de la escollera y uno al centro de la barrera.

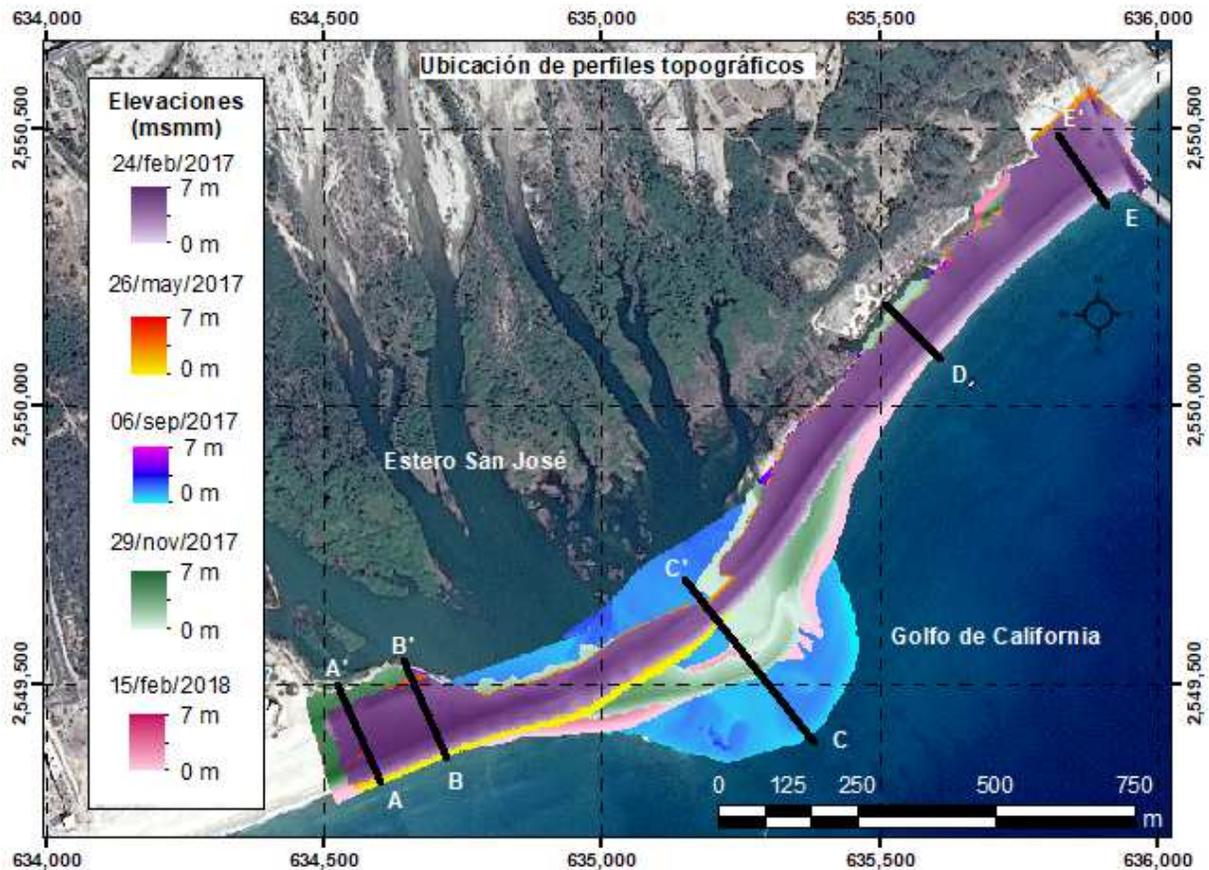


Figura 20. Ubicación de los 5 transectos sobre los que se midieron los perfiles topográficos comparados en los MDT generados a partir de los 5 levantamientos.

Los transectos A-A' (figura 21) y B-B' (figura 22) se ubican al suroeste del delta del arroyo San José. Al comparar los perfiles del 24/feb/2017 y el 26/may/2017 se aprecia que se mantuvieron estables. Después de la tormenta Lidia (perfil 06/sep/2017), la playa presentó un retroceso aproximado de 20 metros. Para los levantamientos del 29/nov/2017 y 15/feb/2018 se aprecia una recuperación de la playa.

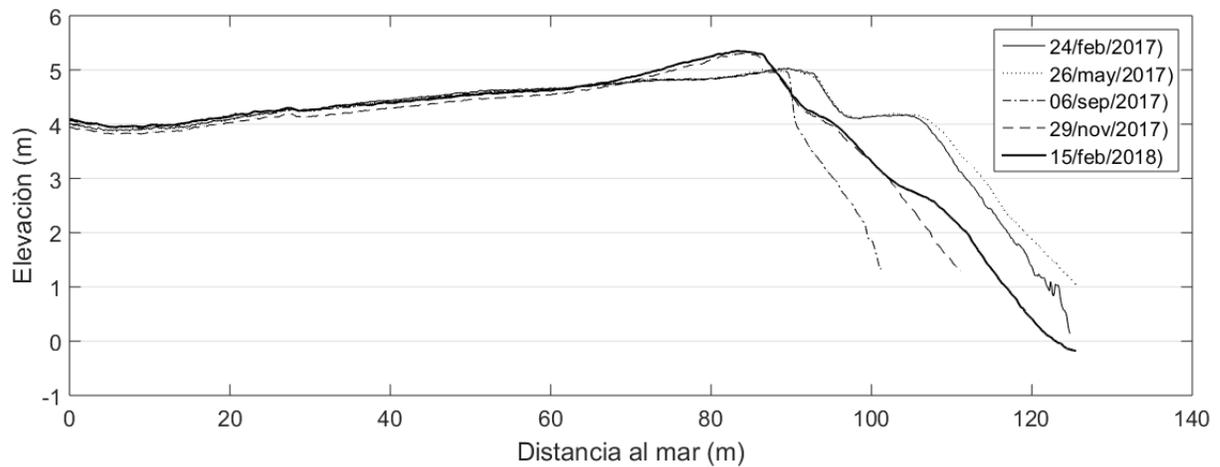


Figura 21. Transecto A-A' sobre el cual se levantaron 5 perfiles de playa. El mar se encuentra del lado derecho y el límite de cada perfil está determinado por el alcance del oleaje durante el levantamiento con el dron.

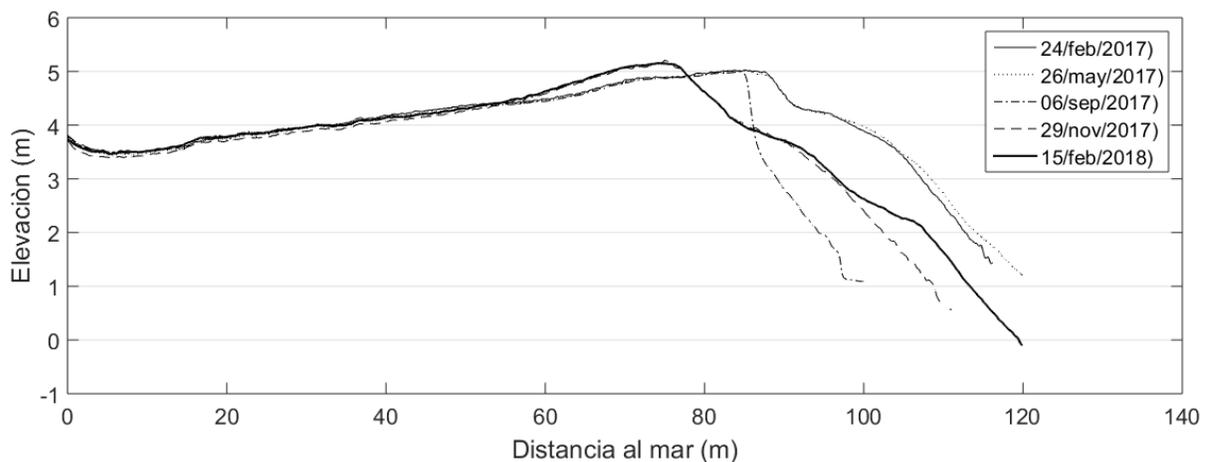


Figura 22. Transecto B-B'

El transecto C-C' (figura 23) se encuentra al centro de la barrera, en la desembocadura del arroyo. Entre los perfiles del 24/feb/2017 y 26/may/2017 se observa erosión en la base del talud de la playa y acreción en la berma. El perfil del 06/sep/2017 muestra la modificación provocada por la tormenta Lidia, que consiste en la formación de un delta con una longitud de avance hacia el mar de 250 m. En el perfil del 29/nov/2017 se aprecia una acumulación de sedimentos en la zona deltaica aproximadamente 120 m frente a la posición de la barrera del 24/feb/2017. Para el último levantamiento (15/feb/2018) la acumulación de sedimentos en la zona deltaica retrocede cerca de 30

m con respecto a la posición del 29/nov/2017 y queda 90 m frente a la ubicación del levantamiento del 24/feb/2017.

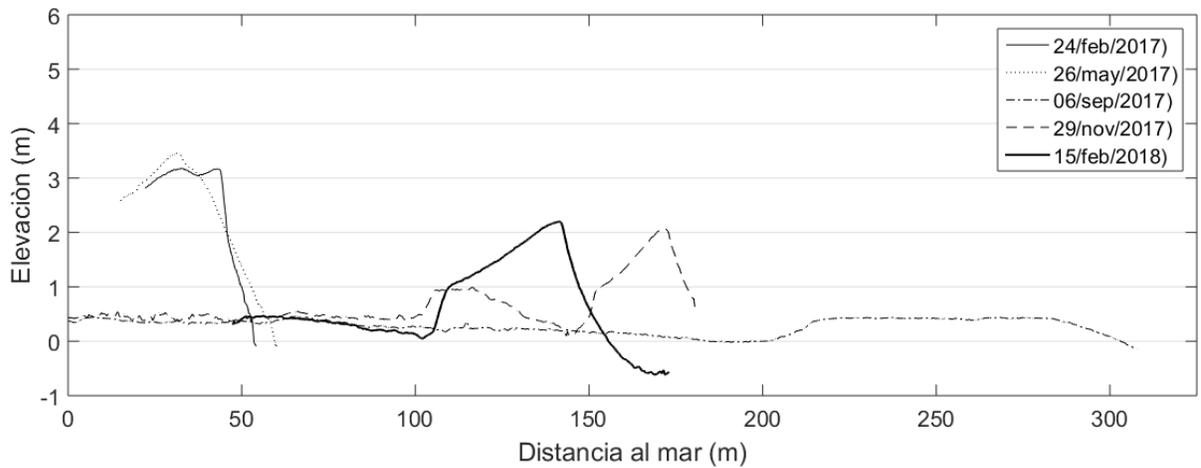


Figura 23. Transecto C-C'

Los perfiles de los transectos D-D' (figura 24) y E-E' (figura 25) se encuentran al noreste del delta del arroyo. En estos se observa erosión en la base de la cara de la playa y una acreción en la berma entre el 24/feb/2017 y el 26/may/2017. Esto se interpreta como un transporte de sedimento perpendicular a la línea de costa en esa zona, desde la base del talud a la berma.

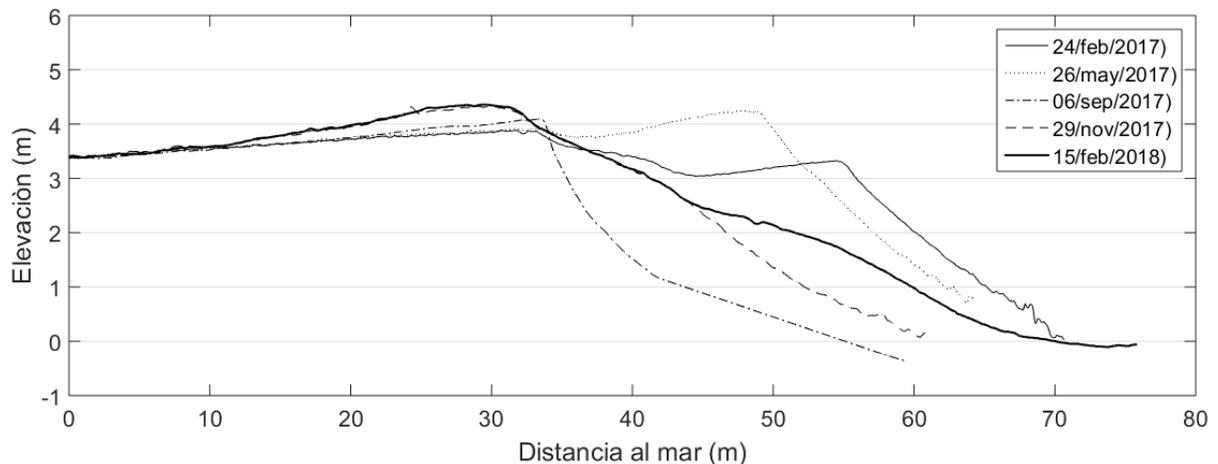


Figura 24. Transecto D-D'

Entre el 26/may/2017 y el 06/sep/2017 la playa retrocedió cerca de 20 metros, sin embargo en la zona adyacente a la escollera de la Marina Puerto Los Cabos (figura

25) la erosión fue menor (~10 m). En las mediciones del 29/nov/2017 y 15/feb/2017 se aprecia una recuperación de la playa (transecto D-D') mientras que para la zona adyacente a la escollera (transecto E-E') no hay recuperación alguna.

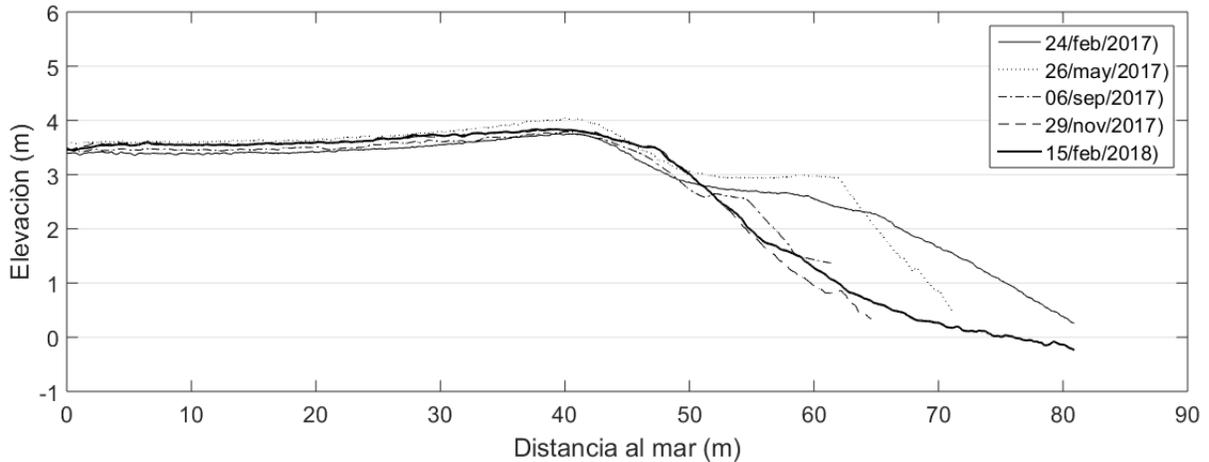


Figura 25. Transecto E-E'

3.4. Modelación en XBeach

En esta sección se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo numérico XBeach. Primeramente se muestran simulaciones con las condiciones previas a la tormenta Lidia (topografía del 26/feb/2017 con y sin la presencia de escollera, y posteriormente las simulaciones considerando como condición inicial la topografía del 06/sep/2017 (después de la tormenta Lidia) con y sin la presencia de la escollera. El objetivo de elegir estas condiciones para el modelo fue el de evaluar la dinámica de la barrera en condiciones normales (previas a la tormenta Lidia) y la otra con una acumulación de sedimentos en el delta (condiciones posteriores a tormenta). De los datos de oleaje medidos por el ológrafo se utilizaron las fechas más acordes con las mediciones topográficas para realizar las simulaciones. Con datos de oleaje del 23/jun/2010 al 23/jul/2010 y la topografía realizada el 24/feb/2017 se simuló las condiciones previas a la tormenta Lidia, y con datos de oleaje del 06/sep/2010 al 06/oct/2010 y la topografía realizada el 06/sep/2017 se simuló las

condiciones posteriores a la tormenta. En todas las simulaciones se especificó como variable de cálculo la denominada “zb” en XBeach, que es la posición de la superficie de sedimentos (topografía y batimetría) calculada en el modelo.

3.4.1. Simulación en condiciones previas a la tormenta Lidia

En este apartado se presentan los resultados de la morfología generados por el modelo XBeach con las condiciones previas a la tormenta Lidia con y sin la presencia de la escollera. La condición inicial para el procesamiento es la combinación de la topografía del 24/feb/2017 con la batimetría del 06/abr/2017. El oleaje utilizado para las dos simulaciones se representa en la figura 13a con un ángulo de incidencia de entre 150° a 200° y una altura de 0.6 m a 1.4 m oleaje medido entre los meses de junio y julio del 2010.

3.4.1.1 Simulación con escollera

En la figura 26 se presentan los resultados del modelo con las condiciones previas a la tormenta Lidia con la presencia de la escollera.

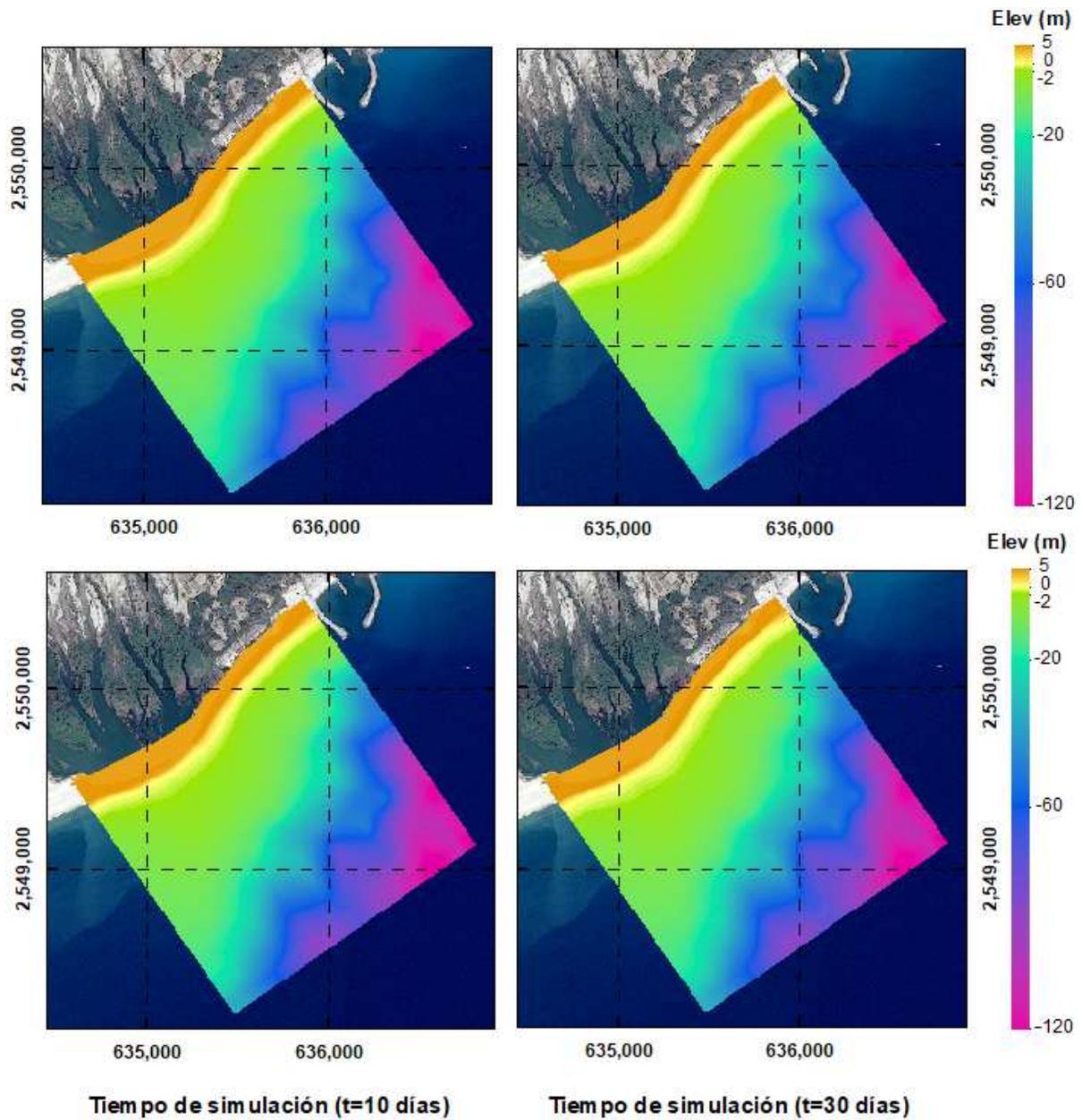


Figura 26. Morfología resultante del modelo del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 (condición inicial $t=0$, a 10, 20 y 30 días) con la presencia de la escollera.

En la figura 27 se representan las variaciones calculadas en la topografía y batimetría. Se obtienen las diferencias entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial ($t=0$) y los 10, 20 y 30 días de simulación.

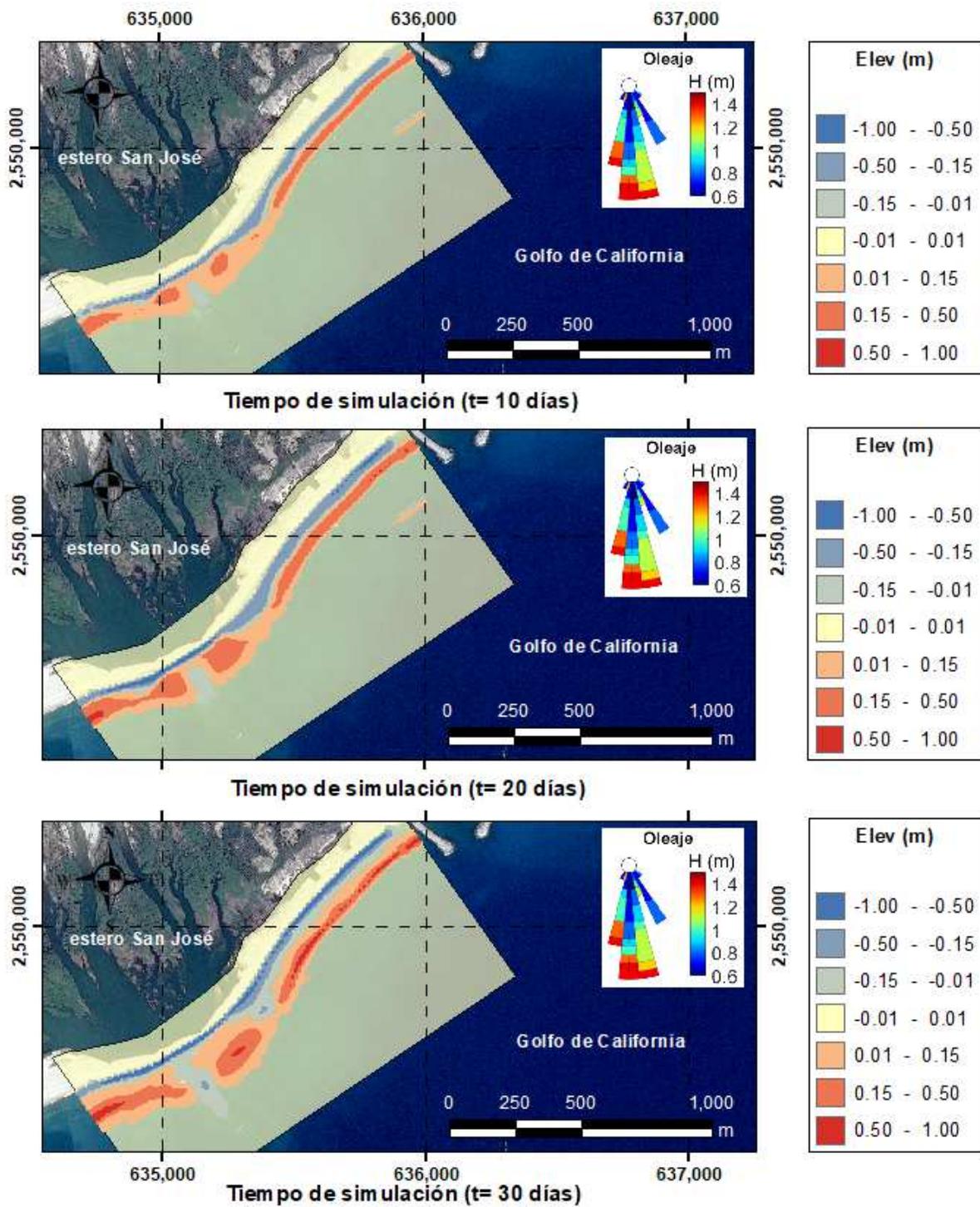


Figura 27. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (24/feb/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/píxel.

Tabla 3. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la presencia de la escollera.

Segmento		Volumen (m ³)			Volumen por ml (m ³ /m)		
		Neto	Erosión	Acreción	Neto	Erosión	Acreción
0-200	(S1)	3,368.31	933.46	4,301.78	51.82	14.36	66.18
200-400	(S2)	1,574.38	5,678.58	7,252.91	7.87	28.39	36.26
400-600	(S3)	-3,074.70	7,382.96	4,308.22	-15.37	36.91	21.54
600-800	(S4)	6,283.20	4,236.88	10,520.18	31.42	21.18	52.60
800-1000	(S5)	-4,838.08	7,263.56	2,425.39	-24.19	36.32	12.13
1000-1200	(S6)	2,108.36	5,312.66	7,421.00	10.54	26.56	37.11
1200-1400	(S7)	-374.73	6,057.53	5,682.95	-1.87	30.29	28.41
1400-1600	(S8)	-1,430.41	7,132.69	5,702.34	-7.15	35.66	28.51
1600-1800	(S9)	2,421.80	2,431.51	4,853.30	15.62	15.69	31.31
Total		6,038.13	46,429.83	52,468.07	t=30 días		
0-200	(S1)	1,639.79	448.40	2,088.22	25.23	6.90	32.13
200-400	(S2)	-87.95	2,676.48	2,588.45	-0.44	13.38	12.94
400-600	(S3)	-340.99	3,244.41	2,903.29	-1.70	16.22	14.52
600-800	(S4)	2,454.42	1,905.70	4,360.06	12.27	9.53	21.80
800-1000	(S5)	-2,165.50	3,370.46	1,205.02	-10.83	16.85	6.03
1000-1200	(S6)	586.94	2,411.57	2,998.57	2.93	12.06	14.99
1200-1400	(S7)	38.91	2,593.34	2,632.17	0.19	12.97	13.16
1400-1600	(S8)	-264.78	3,104.54	2,839.79	-1.32	15.52	14.20
1600-1800	(S9)	935.35	1,209.65	2,145.05	6.03	7.80	13.84
Total		2,796.19	20,964.55	23,760.62	t=20 días		
0-200	(S1)	839.07	274.87	1,113.89	12.91	4.23	17.14
200-400	(S2)	-85.44	1,455.72	1,370.23	-0.43	7.28	6.85
400-600	(S3)	-34.86	1,760.53	1,725.63	-0.17	8.80	8.63
600-800	(S4)	961.95	1,119.45	2,081.49	4.81	5.60	10.41
800-1000	(S5)	-990.21	1,905.41	915.10	-4.95	9.53	4.58
1000-1200	(S6)	290.06	1,483.53	1,773.69	1.45	7.42	8.87
1200-1400	(S7)	128.84	1,539.64	1,668.64	0.64	7.70	8.34
1400-1600	(S8)	-70.11	1,873.41	1,803.27	-0.35	9.37	9.02
1600-1800	(S9)	414.00	738.13	1,152.21	2.67	4.76	7.43
Total		1,453.30	12,150.69	13,604.15	t=10 días		

La figura 28 muestra los volúmenes (m³/m) de erosión y acreción calculados en el modelo a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la

presencia de la escollera. Se incorporan en la misma figura los volúmenes estimados entre los levantamientos topográficos del 24/feb/2017 y 26/may/2017.

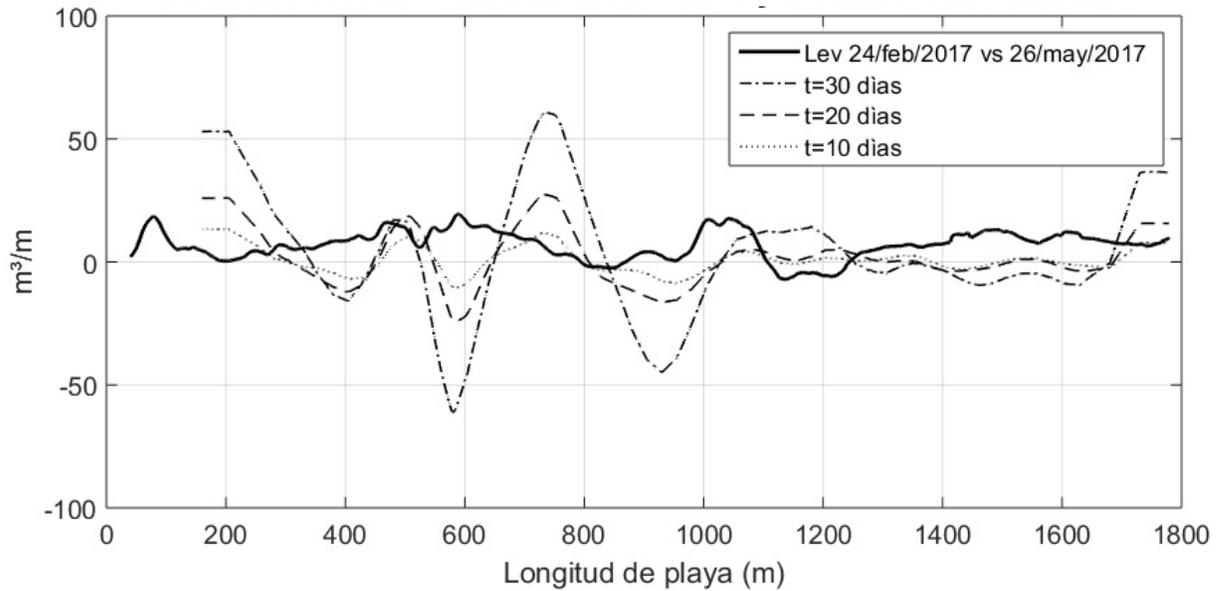


Figura 28. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la presencia de la escollera.

3.4.1.2 Simulación sin escollera

En la figura 29 se presentan los resultados del modelo con las condiciones previas a la tormenta Lidia sin la presencia de la escollera. De igual manera que en la simulación con escollera, la condición inicial para este caso es la combinación de la topografía del 24/feb/2017 con la batimetría del 06/abr/2017 y el oleaje representado en la figura 13a con un ángulo de incidencia de entre 150° a 200° y una altura de 0.6 m a 1.4 m.

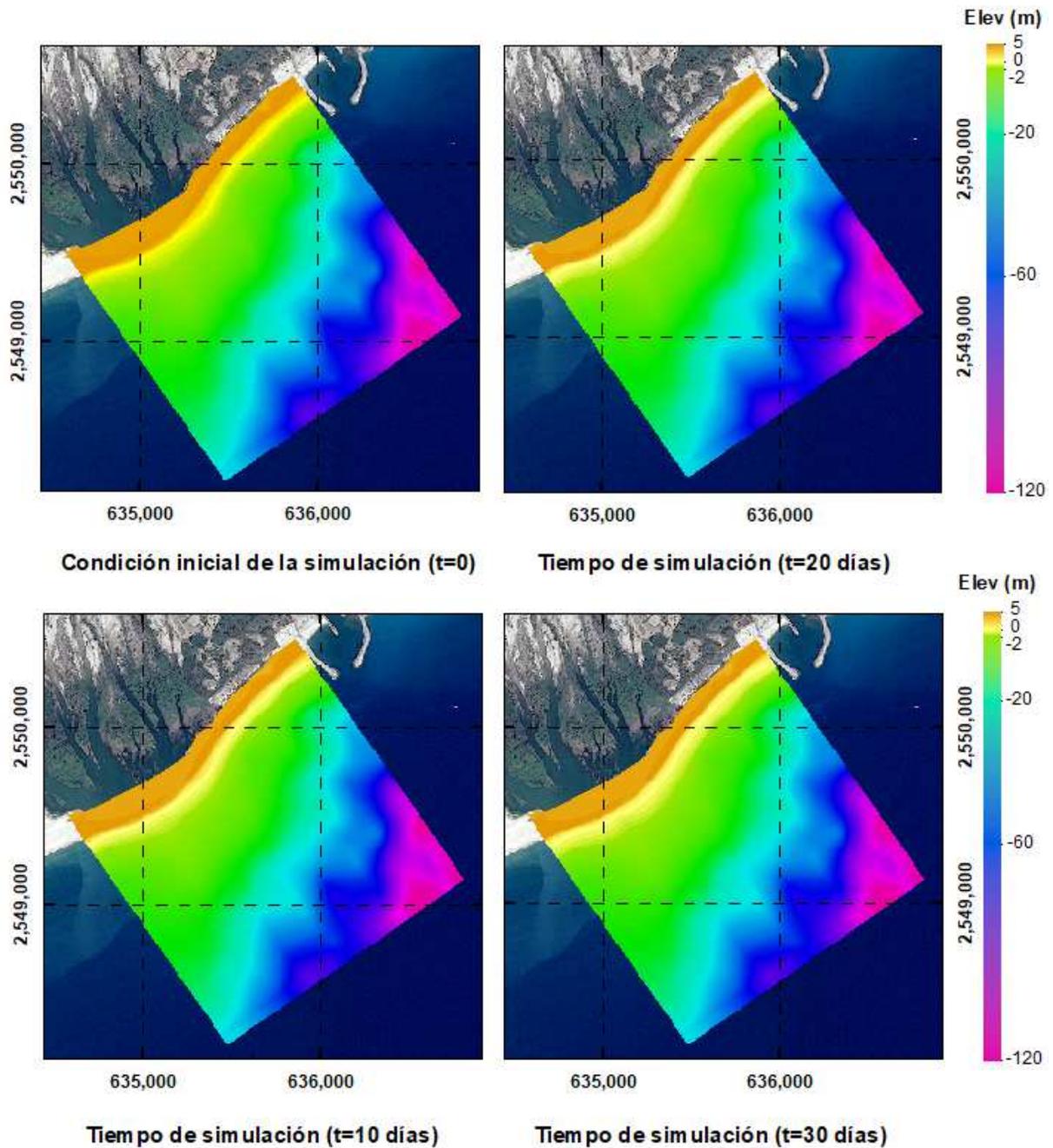


Figura 29. Morfología resultante del modelo del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 (condición inicial t=0, a 10, 20 y 30 días) sin la presencia de la escollera.

En la figura 30 se ilustran las variaciones entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (t=0) y los 10, 20 y 30 días de simulación.

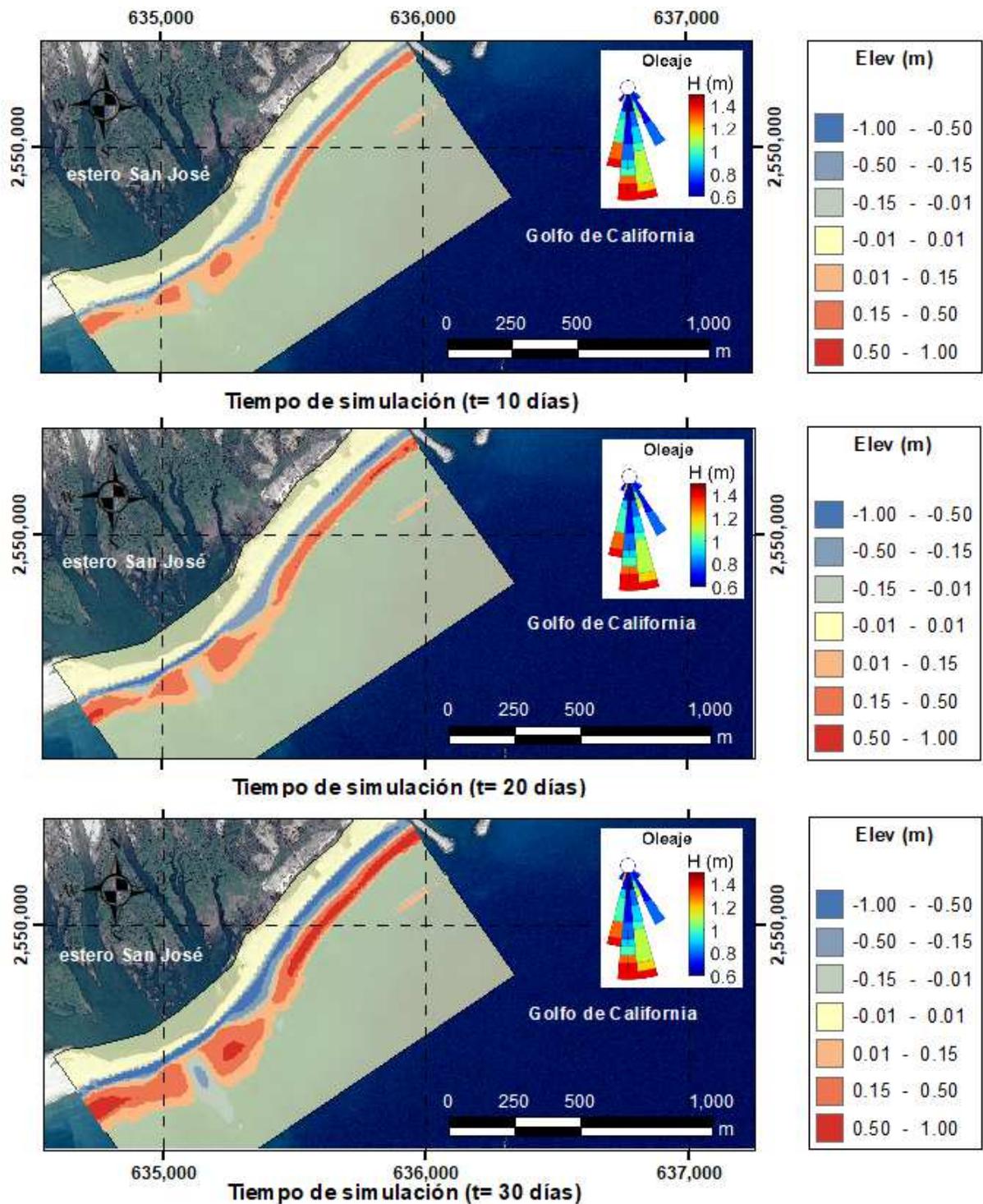


Figura 30. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (24/feb/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 sin la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/píxel.

Tabla 4. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 sin la presencia de la escollera.

Segmento	Volumen (m ³)			Volumen por ml (m ³ /m)		
	Neto	Erosión	Acreción	Neto	Erosión	Acreción
0-200 (S1)	3,369.06	967.10	4,336.18	51.83	14.88	66.71
200-400 (S2)	1,758.98	5,596.43	7,355.41	8.79	27.98	36.78
400-600 (S3)	-2,779.23	7,131.60	4,352.40	-13.90	35.66	21.76
600-800 (S4)	5,777.81	4,208.32	9,986.07	28.89	21.04	49.93
800-1000 (S5)	-4,513.14	6,958.36	2,445.25	-22.57	34.79	12.23
1000-1200 (S6)	1,813.24	4,850.40	6,663.75	9.07	24.25	33.32
1200-1400 (S7)	-16.85	5,650.31	5,633.42	-0.08	28.25	28.17
1400-1600 (S8)	-1,202.66	6,485.99	5,283.32	-6.01	32.43	26.42
1600-1800 (S9)	1,842.34	3,379.31	5,221.63	11.89	21.80	33.69
Total	6,049.55	45,227.82	51,277.43			t=30 días
0-200 (S1)	1,684.51	460.41	2,144.98	25.92	7.08	33.00
200-400 (S2)	-211.95	2,768.93	2,556.97	-1.06	13.84	12.78
400-600 (S3)	-42.99	3,044.47	3,001.48	-0.21	15.22	15.01
600-800 (S4)	2,256.99	1,986.79	4,243.64	11.28	9.93	21.22
800-1000 (S5)	-2,196.37	3,481.66	1,285.37	-10.98	17.41	6.43
1000-1200 (S6)	643.95	2,368.66	3,012.70	3.22	11.84	15.06
1200-1400 (S7)	83.55	2,597.53	2,681.13	0.42	12.99	13.41
1400-1600 (S8)	-204.12	3,040.57	2,836.56	-1.02	15.20	14.18
1600-1800 (S9)	691.66	1,831.88	2,523.59	4.46	11.82	16.28
Total	2,705.23	21,580.90	24,286.42			t=20 días
0-200 (S1)	910.84	301.18	1,212.01	14.01	4.63	18.65
200-400 (S2)	-119.53	1,554.62	1,435.03	-0.60	7.77	7.18
400-600 (S3)	18.24	1,787.90	1,806.22	0.09	8.94	9.03
600-800 (S4)	1,009.50	1,264.31	2,273.79	5.05	6.32	11.37
800-1000 (S5)	-1,085.72	2,020.47	934.77	-5.43	10.10	4.67
1000-1200 (S6)	376.15	1,495.45	1,871.62	1.88	7.48	9.36
1200-1400 (S7)	100.45	1,529.41	1,629.94	0.50	7.65	8.15
1400-1600 (S8)	-26.36	1,821.49	1,795.08	-0.13	9.11	8.98
1600-1800 (S9)	297.61	1,111.18	1,408.90	1.92	7.17	9.09
Total	1,481.18	12,886.01	14,367.36			t=10 días

En la figura 31 se grafican los volúmenes (m³/m) de erosión y acreción calculados en el modelo a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 con la presencia de la escollera, integrando en la misma figura los volúmenes calculados entre los levantamientos topográficos del 24/feb/2017 y 26/may/2017.

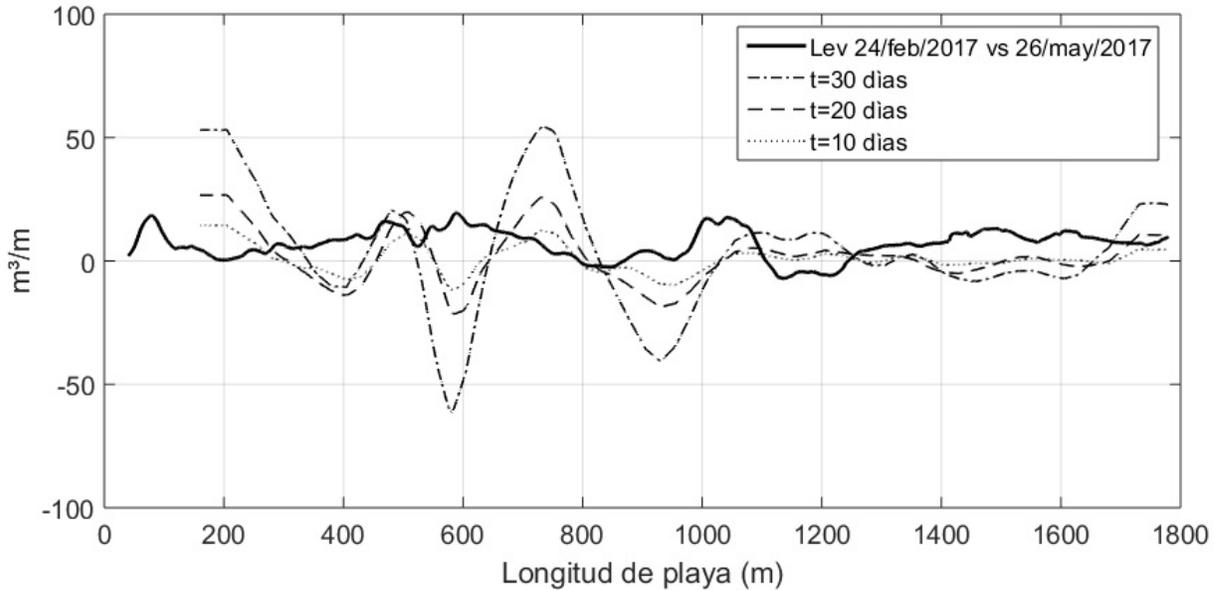


Figura 31. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 10, 20 y 30 días de simulación del 24/feb/2017 al 23/mar/2017 sin la presencia de la escollera.

3.4.2. Simulación en condiciones posteriores a la tormenta Lidia

En esta sección se muestran los resultados del modelo con las condiciones posteriores a la tormenta Lidia con y sin la presencia de la escollera. La condición inicial para el procesamiento es la combinación de la topografía del 06/sep/2017 con la batimetría del 06/abr/2017. El oleaje utilizado para las simulaciones con y sin escollera se representó en la figura 13b con un ángulo de incidencia de entre 150° a 180° y una altura de 0.5 m a 0.85 m, el oleaje fue medido en el mes de septiembre y del 2010.

3.4.2.1 Simulación con escollera

En la figura 32 se presentan los resultados del modelo con las condiciones posteriores a la tormenta Lidia con la presencia de la escollera. La condición inicial para el procesamiento fue la combinación de la topografía del 06/sep/2017 con la batimetría del 06/abr/2017 y datos de oleaje del 06/sep/2010 al 06/oct/2010.

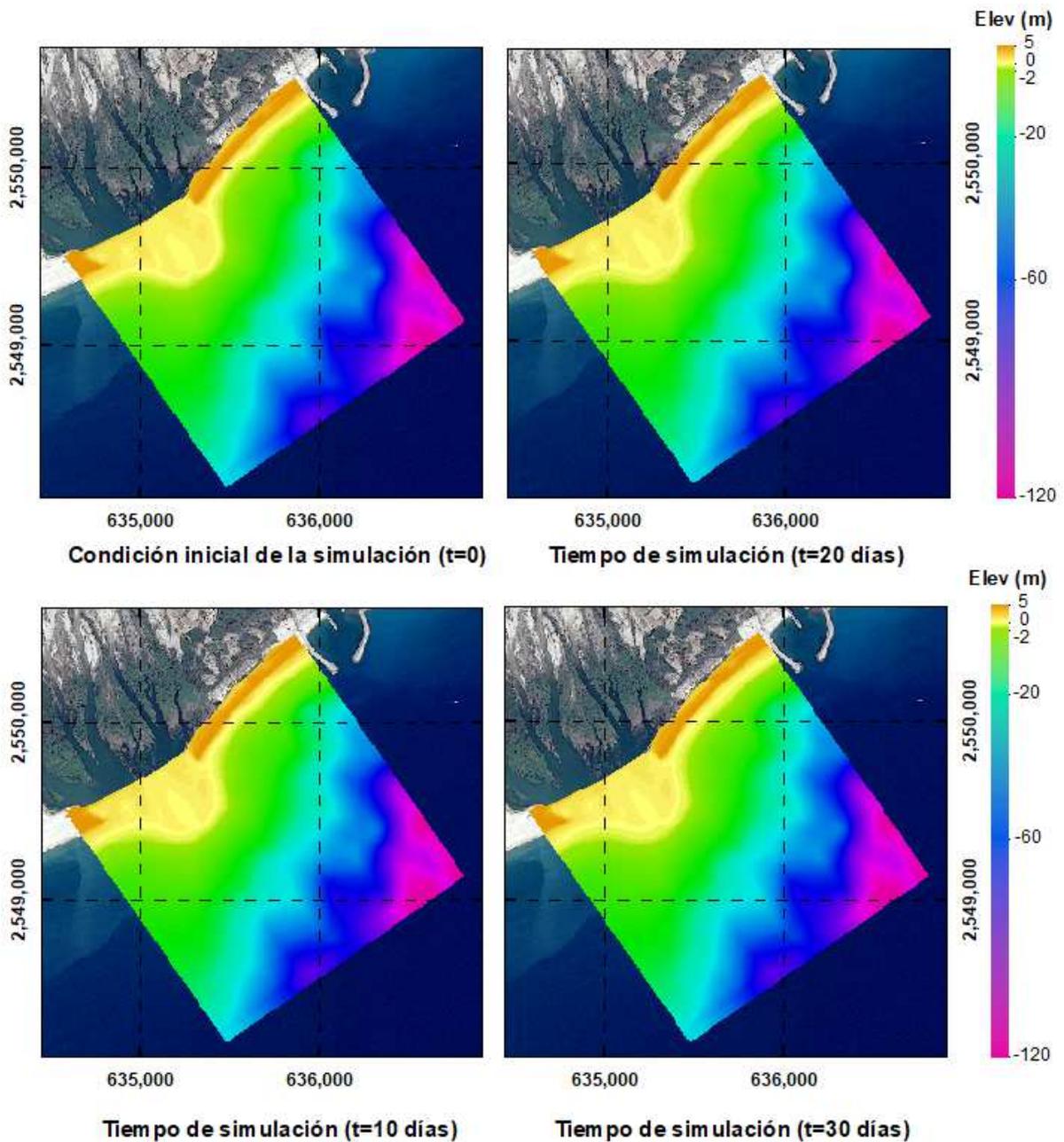


Figura 32. Morfología resultante del modelo del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 (condición inicial $t=0$, a 10, 20 y 30 días) con la presencia de la escollera.

En la figura 33 se representan las variaciones calculadas en la topografía y batimetría. Se obtienen las diferencias entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial ($t=0$) y los 10, 20 y 30 días de simulación.

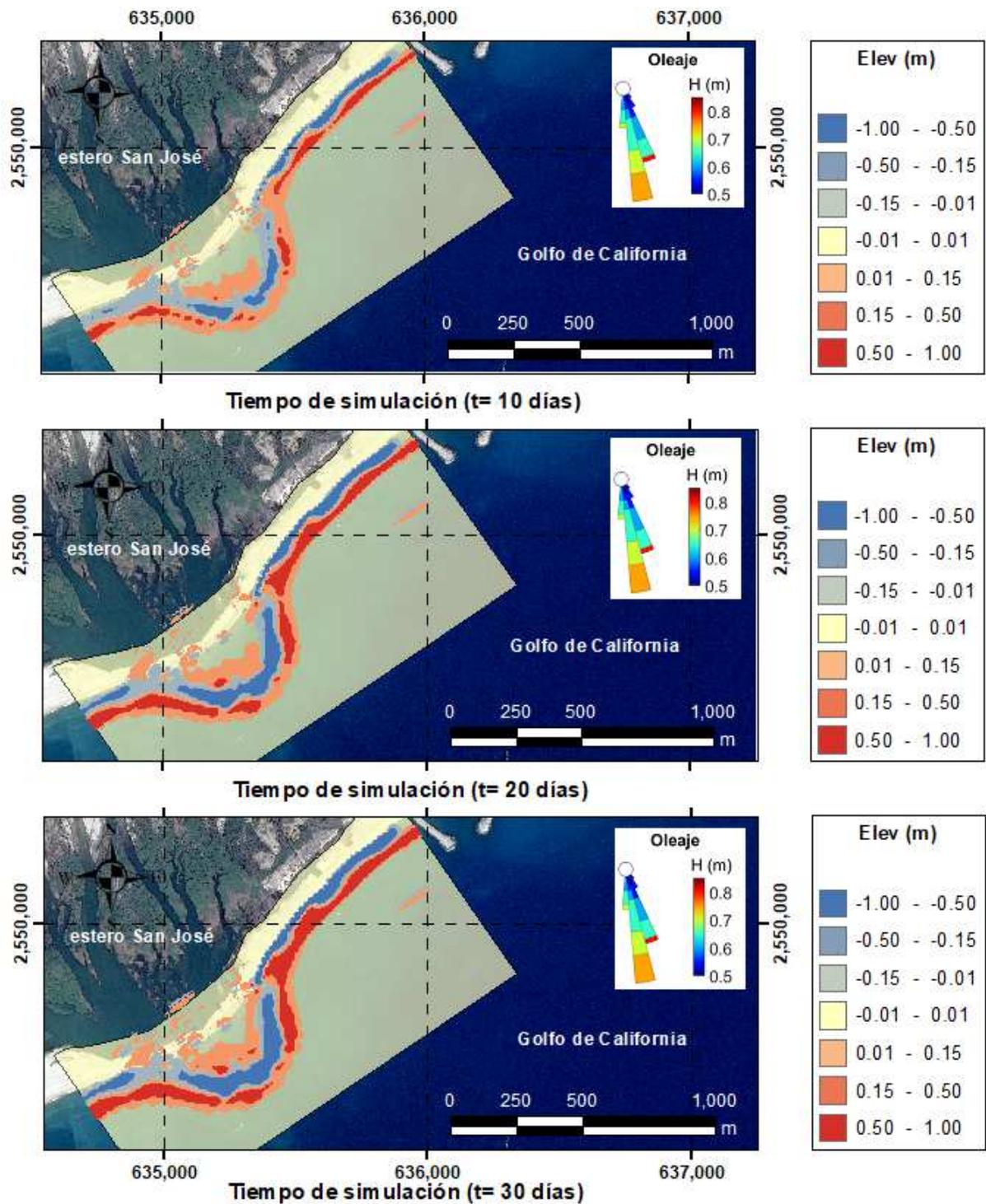


Figura 33. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (06/sep/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/píxel.

Tabla 5. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera

Segmento	Volumen (m³)			Volumen por ml (m³/m)		
	Neto	Erosión	Acreción	Neto	Erosión	Acreción
0-200 (S1)	972.89	387.68	1,360.57	14.97	5.96	20.93
200-400 (S2)	1,339.48	1,803.43	3,142.91	6.70	9.02	15.71
400-600 (S3)	74.25	3,640.28	3,714.53	0.37	18.20	18.57
600-800 (S4)	-1,339.27	4,681.70	3,342.43	-6.70	23.41	16.71
800-1000 (S5)	-519.06	4,821.87	4,302.81	-2.60	24.11	21.51
1000-1200 (S6)	1,039.86	2,773.50	3,813.36	5.20	13.87	19.07
1200-1400 (S7)	-423.69	3,196.75	2,773.06	-2.12	15.98	13.87
1400-1600 (S8)	490.80	2,823.26	3,314.06	2.45	14.12	16.57
1600-1800 (S9)	348.15	1,526.80	1,874.95	2.25	9.85	12.10
Total	1,983.41	25,655.27	27,638.68			t=30 días
0-200 (S1)	773.57	344.65	1,118.22	11.90	5.30	17.20
200-400 (S2)	1,024.43	1,448.03	2,472.46	5.12	7.24	12.36
400-600 (S3)	-43.58	3,096.31	3,052.73	-0.22	15.48	15.26
600-800 (S4)	-911.15	3,561.82	2,650.67	-4.56	17.81	13.25
800-1000 (S5)	-384.65	3,825.80	3,441.15	-1.92	19.13	17.21
1000-1200 (S6)	756.50	2,137.81	2,894.31	3.78	10.69	14.47
1200-1400 (S7)	-282.70	2,522.84	2,240.14	-1.41	12.61	11.20
1400-1600 (S8)	418.80	2,338.37	2,757.17	2.09	11.69	13.79
1600-1800 (S9)	242.14	1,270.91	1,513.05	1.56	8.20	9.76
Total	1,593.36	20,546.54	22,139.90			t=20 días
0-200 (S1)	476.53	226.52	703.05	7.33	3.48	10.82
200-400 (S2)	443.41	929.72	1,373.13	2.22	4.65	6.87
400-600 (S3)	-191.67	2,069.76	1,878.09	-0.96	10.35	9.39
600-800 (S4)	-190.54	1,805.01	1,614.47	-0.95	9.03	8.07
800-1000 (S5)	-75.45	2,170.45	2,095.00	-0.38	10.85	10.48
1000-1200 (S6)	307.72	1,160.10	1,467.82	1.54	5.80	7.34
1200-1400 (S7)	-222.73	1,463.83	1,241.10	-1.11	7.32	6.21
1400-1600 (S8)	339.00	1,415.33	1,754.33	1.69	7.08	8.77
1600-1800 (S9)	97.40	756.68	854.08	0.63	4.88	5.51
Total	983.67	11,997.40	12,981.07			t=10 días

En la figura 34 se muestran las zonas y magnitudes de volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción calculados en el modelo a los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera. Se incorporan en la misma figura los volúmenes estimados entre los levantamientos topográficos del 06/sep/2017 y 29/nov/2017.

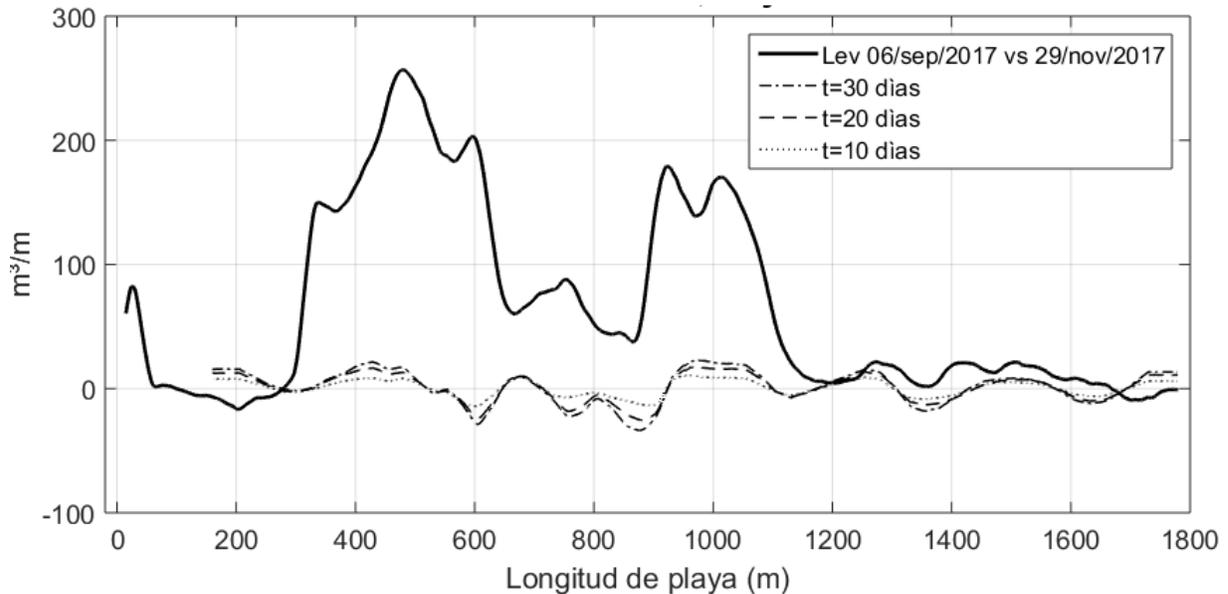


Figura 34. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera.

3.4.2.2 Simulación sin escollera

La figura 35 muestra los resultados del modelo con las condiciones posteriores a la tormenta Lidia sin la presencia de la escollera. De igual manera que en la simulación anterior, la condición inicial para este caso es la combinación de la topografía del 06/sep/2017 con la batimetría del 06/abr/2017 y el oleaje representado en la figura 13b con un ángulo de incidencia de entre 150° a 180° y una altura de 0.5 m a 0.85 m.

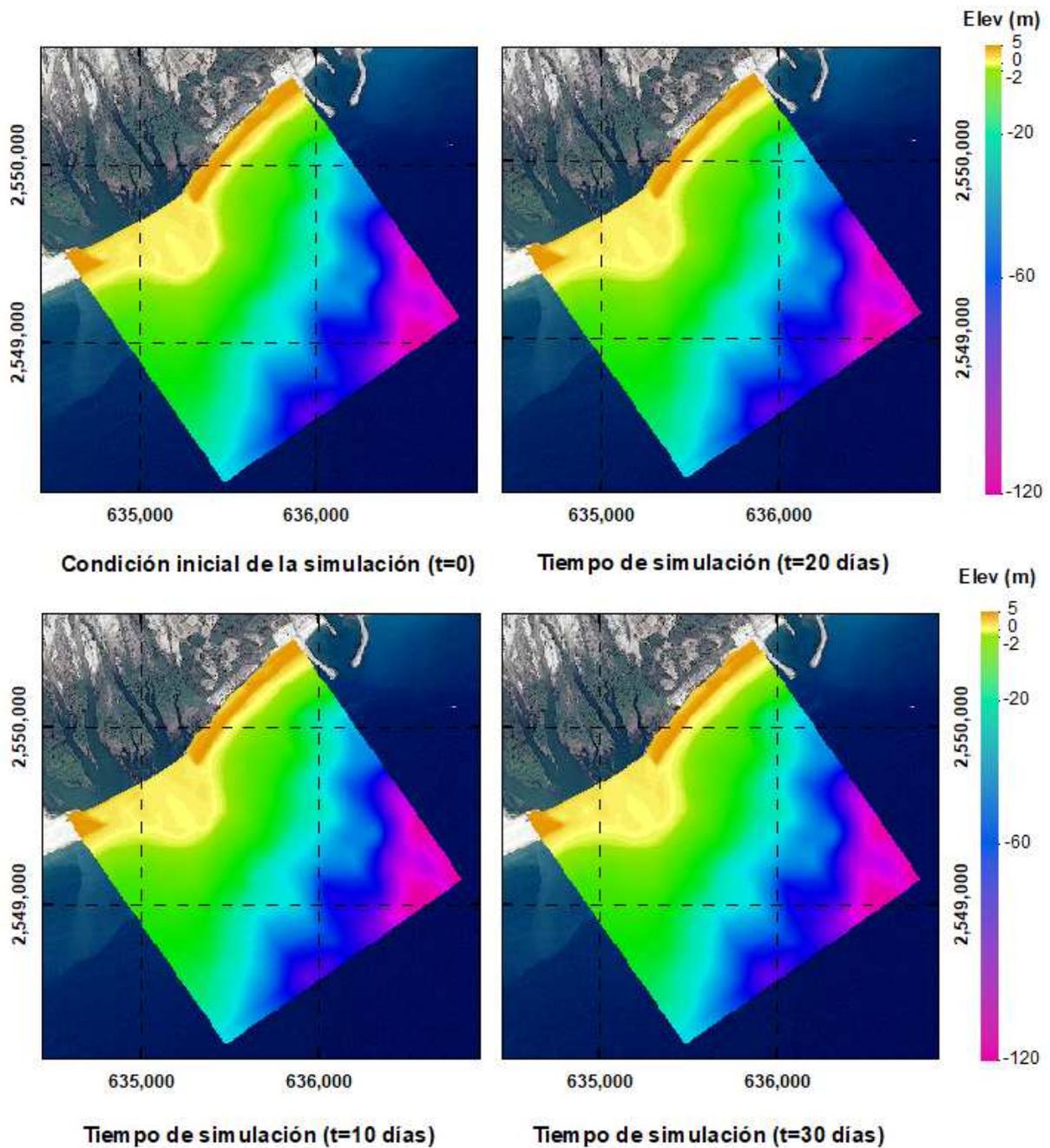


Figura 35. Morfología resultante del modelo del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 (condición inicial t=0, a 10, 20 y 30 días) sin la presencia de la escollera.

En la figura 36 se representan las variaciones estimadas en la topografía y batimetría. Se calculan las diferencias entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (t=0) y los 10, 20 y 30 días de simulación.

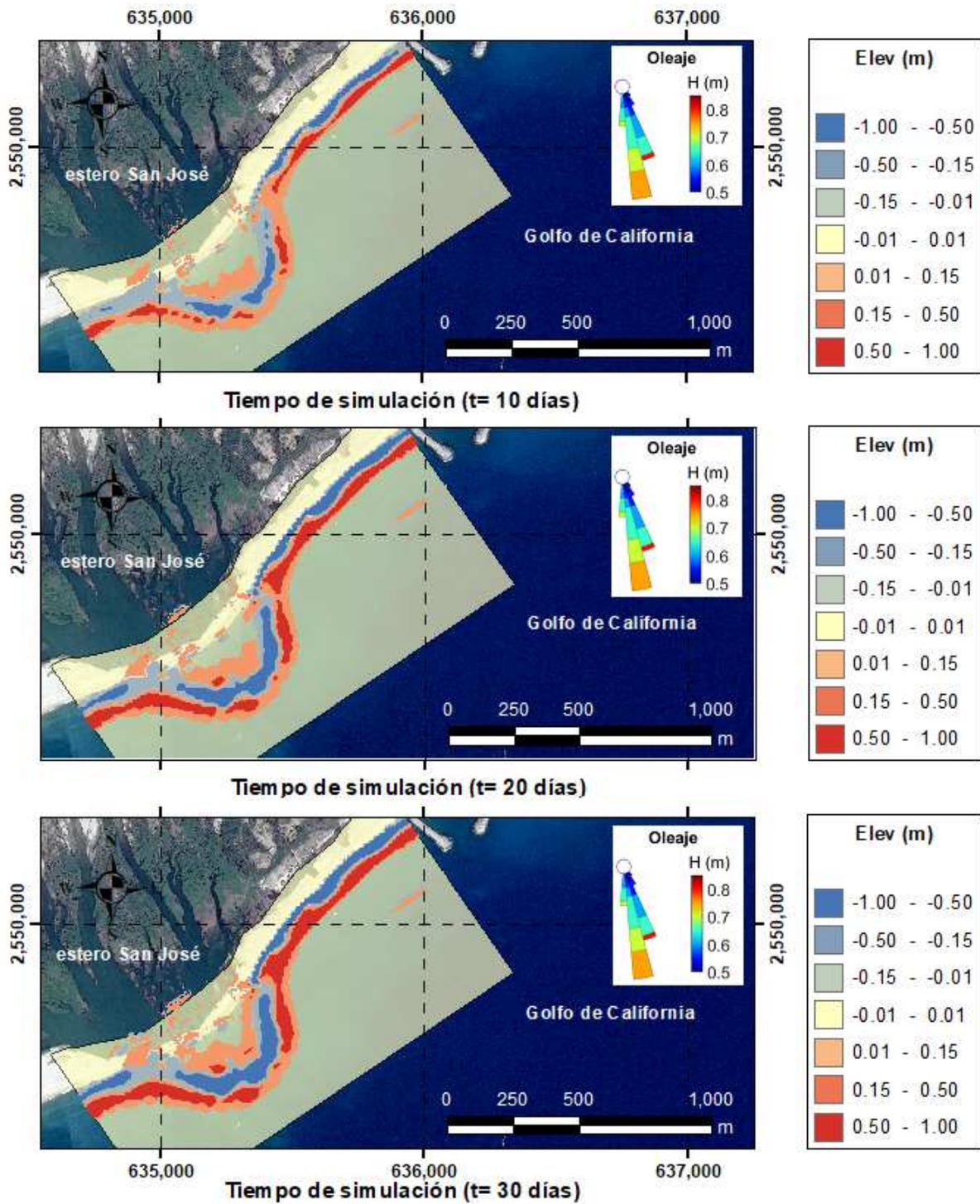


Figura 36. Diferencia entre los MDT generados por el modelo entre la condición inicial (06/sep/2017) y los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 sin la presencia de la escollera. Los colores indican pérdida o ganancia de sedimento en m/píxel.

Tabla 6. Volúmenes de sedimento a los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 sin la presencia de la escollera

Segmento	Volumen (m ³)			Volumen por ml (m ³ /m)		
	Neto	Erosión	Acreción	Neto	Erosión	Acreción
0-200 (S1)	973.15	411.17	1,384.32	14.97	6.33	21.30
200-400 (S2)	1,273.21	1,884.36	3,157.57	6.37	9.42	15.79
400-600 (S3)	80.10	3,711.46	3,791.56	0.40	18.56	18.96
600-800 (S4)	-1,237.72	4,586.78	3,349.06	-6.19	22.93	16.75
800-1000 (S5)	-274.58	4,551.78	4,277.20	-1.37	22.76	21.39
1000-1200 (S6)	855.23	2,696.29	3,551.52	4.28	13.48	17.76
1200-1400 (S7)	-361.75	3,123.31	2,761.56	-1.81	15.62	13.81
1400-1600 (S8)	457.31	2,863.66	3,320.97	2.29	14.32	16.60
1600-1800 (S9)	214.37	2,023.26	2,237.63	1.38	13.05	14.44
Total	1,979.32	25,852.07	27,831.39			t=30 días
0-200 (S1)	800.29	357.09	1,157.38	12.31	5.49	17.81
200-400 (S2)	972.32	1,546.57	2,518.89	4.86	7.73	12.59
400-600 (S3)	-4.63	3,062.51	3,057.88	-0.02	15.31	15.29
600-800 (S4)	-937.08	3,523.88	2,586.80	-4.69	17.62	12.93
800-1000 (S5)	-173.29	3,602.57	3,429.28	-0.87	18.01	17.15
1000-1200 (S6)	645.57	2,088.38	2,733.95	3.23	10.44	13.67
1200-1400 (S7)	-287.10	2,536.00	2,248.90	-1.44	12.68	11.24
1400-1600 (S8)	406.34	2,385.94	2,792.28	2.03	11.93	13.96
1600-1800 (S9)	159.69	1,685.86	1,845.55	1.03	10.88	11.91
Total	1,582.11	20,788.80	22,370.91			t=20 días
0-200 (S1)	488.35	233.01	721.36	7.51	3.58	11.10
200-400 (S2)	467.86	955.41	1,423.27	2.34	4.78	7.12
400-600 (S3)	-182.53	2,065.95	1,883.42	-0.91	10.33	9.42
600-800 (S4)	-251.52	1,871.19	1,619.67	-1.26	9.36	8.10
800-1000 (S5)	-124.49	2,206.36	2,081.87	-0.62	11.03	10.41
1000-1200 (S6)	356.06	1,139.84	1,495.90	1.78	5.70	7.48
1200-1400 (S7)	-221.13	1,520.91	1,299.78	-1.11	7.60	6.50
1400-1600 (S8)	293.43	1,524.31	1,817.74	1.47	7.62	9.09
1600-1800 (S9)	111.17	1,018.44	1,129.61	0.72	6.57	7.29
Total	937.20	12,535.42	13,472.62			t=10 días

En la figura 37 se muestran los volúmenes (m³/m) de erosión, acreción y volumen neto calculados en el modelo a los 10, 20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 con la presencia de la escollera.

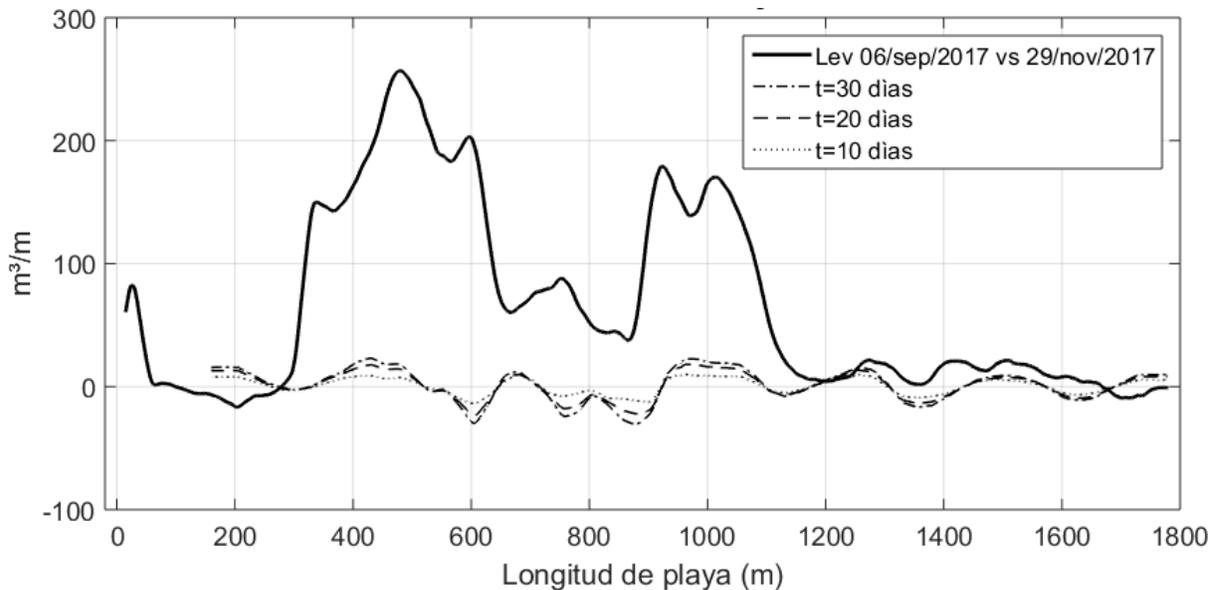


Figura 37. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 10,20 y 30 días de simulación del 06/sep/2017 al 05/oct/2017 sin escollera.

3.4.2 Comparación de resultados

Para realizar una comparación general entre la topografía y el modelo (de igual forma que las figuras 28, 31,34 y 37) de manera conjunta en la figura 38 se grafican los volúmenes (m^3/m) calculados con los MDT resultados del modelo para las simulaciones previas y posteriores a la tormenta Lidia con y sin la presencia de la escollera comparados con los volúmenes calculados con la topografía de la barrera arenosa. De acuerdo con la figura 38 se observa que los volúmenes estimados con los MDT de las topografías realizadas difieren de los volúmenes calculados con los resultados del modelo XBeach, esto tanto para las condiciones previas y posteriores a tormenta con y sin la influencia de la escollera. Se esperaba que los resultados difirieran entre si ya que los periodos de medición son trimestrales y las simulaciones fueron de 30 días, además la topografía solo muestra los cambios del sedimento en la zona de playa y con el modelo se contempla la dinámica de la zona de playa y de rompientes. Sin embargo, aunque se esperaban diferencias en los volúmenes, estas diferencias se pensaban de menor magnitud y mayor congruencia, es decir que coincidieran zonas de erosión y acreción en diferentes magnitudes.

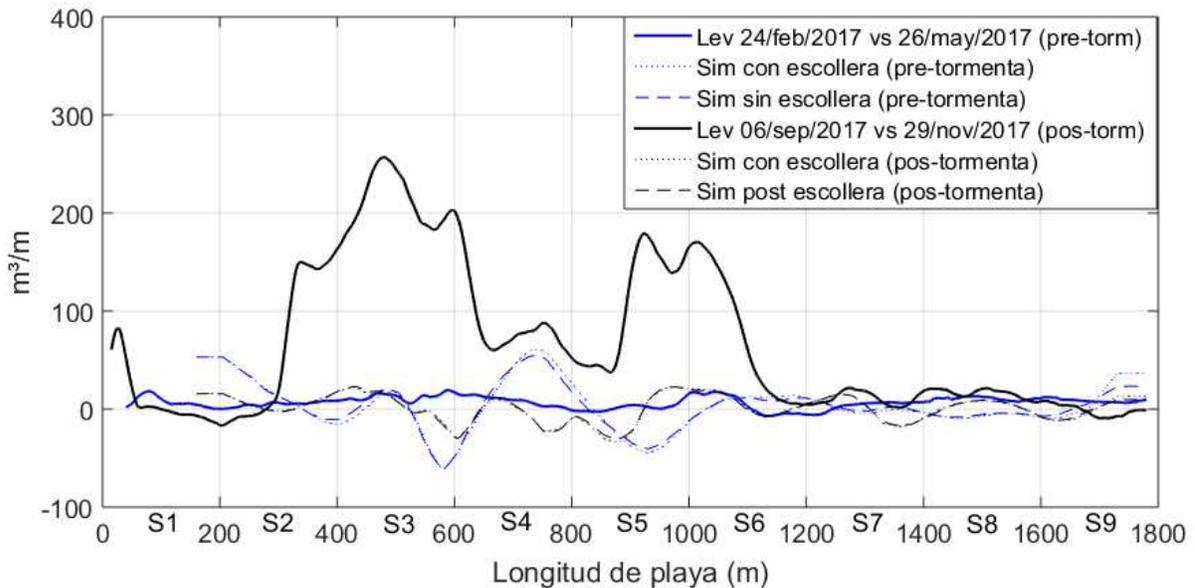


Figura 38. Volúmenes (m^3/m) de erosión y acreción a los 30 días de simulación para las condiciones previas y posteriores a la tormenta Lidia.

En la tabla 7 se muestran los valores de los volúmenes calculados correspondientes a lo graficado en la figura 38. En la tabla observamos que los valores más cercanos entre sí se dan para las condiciones previas a la tormenta Lidia. Comparando los resultados del modelo con la topografía se observa se tiene mayor aproximación de volumen en los segmentos S2 y S9, en los segmentos S1, S4, S6 se coincide en la acumulación de sedimento en diferente magnitud, mientras que para los segmentos S3, S5, S7 y S8 no se presenta coincidencia en el patrón de erosión y acumulación del sedimento. Para el caso de las mediciones topográficas y la simulación posterior a la tormenta Lidia, se tiene que el segmento S1 es el que presenta la mejor aproximación, los segmentos S2, S3, S6 y S8 coincide en ser zonas de acumulación de sedimento pero con diferente magnitud y los segmentos S4, S5, S7 y S9 difieren en magnitud y su esquema de erosión y acumulación del sedimento.

Tabla 7. Volúmenes de sedimento para mediciones topográficas y simulaciones previas y posteriores a la tormenta Lidia con influencia de la escollera.

Segmento	Volumen neto (m ²)		Volumen neto por ml (m ² /m)		Volumen neto (m ²)		Volumen neto por ml (m ² /m)	
	24/feb/2017 - 26/may/2017	Simulación pre-tormenta	24/feb/2017 - 26/may/2017	Simulación pre-tormenta	06/sep/2017 - 29/nov/2017	Simulación post-tormenta	06/sep/2017 - 29/nov/2017	Simulación post-tormenta
0-200 (S1)	1,241.56	3,368.31	6.24	51.82	2,335.89	972.89	11.74	14.97
200-400 (S2)	1,363.10	1,574.38	6.82	7.87	12,068.36	1,339.48	60.34	6.70
400-600 (S3)	2,680.28	-3,074.70	13.40	-15.37	42,227.51	74.25	211.14	0.37
600-800 (S4)	1,055.06	6,283.20	5.28	31.42	17,885.84	-1,339.27	89.43	-6.70
800-1000 (S5)	1,093.08	-4,838.08	5.47	-24.19	20,912.74	-519.06	104.56	-2.60
1000-1200 (S6)	130.08	2,108.36	0.65	10.54	15,507.88	1,039.86	77.54	5.20
1200-1400 (S7)	1,296.34	-374.73	6.48	-1.87	2,121.13	-423.69	10.61	-2.12
1400-1600 (S8)	2,169.90	-1,430.41	10.85	-7.15	3,240.76	490.80	16.20	2.45
1600-1800 (S9)	1,248.25	2,421.80	8.11	15.62	-220.36	348.15	-1.12	2.25
Total	12,277.65	6,038.13			116,079.75	1,983.41		

De acuerdo con el método que aplicó Bugajny *et al.*, (2013), los resultados de las simulaciones previas y posteriores a la tormenta se evaluaron con el criterio BSS (Brier Skill Score, BSS por sus siglas en inglés) el cual es un indicador estadístico usado comúnmente para evaluar modelos numéricos especialmente para cambios morfológicos

La correlación entre la topografía realizada (topografía base Z_b0 , topografía subsecuente $Z_b m$) y la morfología resultante del modelo $Z_b C$ se expresa de la siguiente manera:

$$BSS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Z_b c - Z_b m)^2}{\sum_{i=1}^N (Z_b 0 - Z_b m)^2} \quad (2)$$

Se evaluaron 8 transectos separados 200 m entre sí (del 200 al 1600) para las condiciones previas y posteriores a la tormenta Lidia representándose en la tabla 8 los valores obtenidos para cada uno.

Tabla 8. Puntuación de Brier (BSS) para las simulaciones previas y posteriores a la tormenta Lidia.

Simulación	Transectos							
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Previa-Tormenta (Con escollera)	-7.90	-20.49	-2.13	-2.88	0.89	0.78	-0.53	-1.40
Post-Tormenta (Con escollera)	0.60	0.13	-0.03	-0.02	-0.13	0.04	0.00	0.01

La clasificación de la efectividad del modelo por BSS se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Cuantificación de la Puntuación de Brier (BSS) (Van Rijn et al., 2003).

Calificación	Brier Skill Score (BSS)
Excelente	1.0 - 0.8
Bueno	0.8 - 0.6
Razonable	0.6 - 0.3
Pobre	0.3 - 0.00
Malo	< 0.0

Como se aprecia en la tabla 8, en las condiciones previas a tormenta solo los transectos tuvieron una calificación adecuada el 1000 y 1200 con excelente y buena respectivamente, mientras que el transecto 400 tuvo la peor calificación. Para las condiciones posteriores a la tormenta solo un transecto alcanzó una puntuación satisfactoria, siendo el 200 con calificación razonable.

En la figura 39 se muestran los transectos con mayor y menor puntuación (BSS) para la simulación de las condiciones previas a la tormenta Lidia. En el transecto 400 vemos que el modelo calcula erosión en el talud de la cara de la playa, cuando en realidad con el levantamiento topográfico se observa que hay acreción. Mientras que en el transecto 1000 vemos como los perfiles se empalman en la mayor parte de la longitud del perfil.

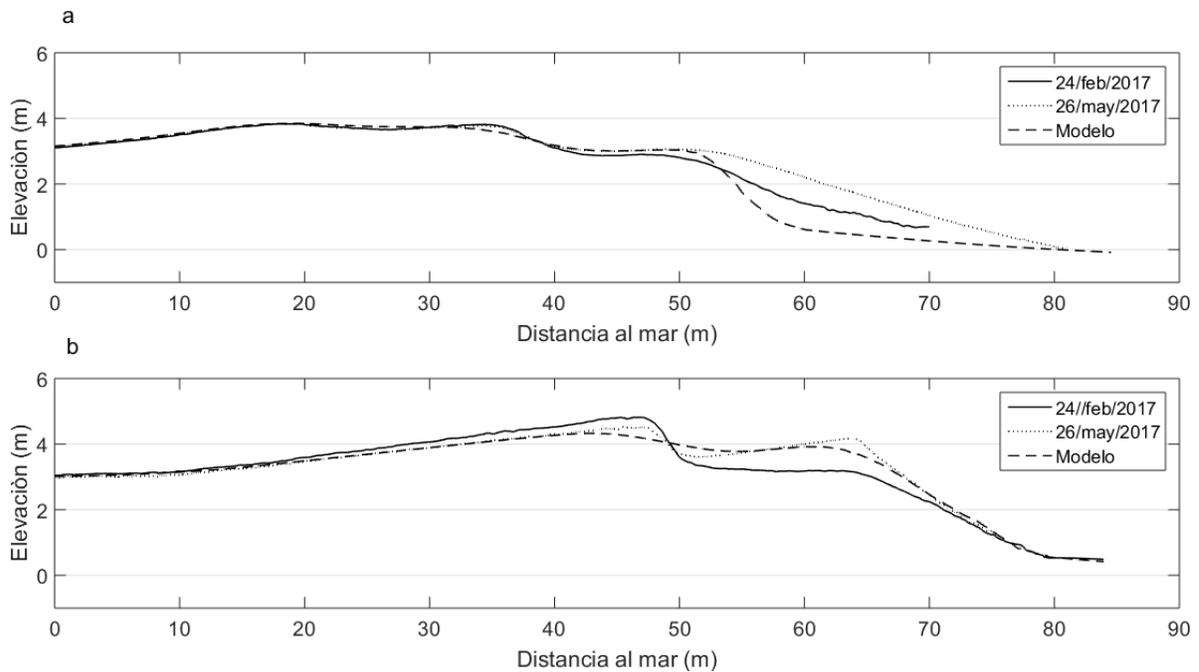


Figura 39. Perfiles de los levantamientos topográficos y del modelo previo a tormenta ($t=30$ días) con la influencia de la escollera. a) Transecto 400, b) Transecto 1000.

Para la simulación posterior a la tormenta Lidia (figura 40), se aprecia como en el transecto 200 el perfil del modelo hay erosión en el quiebre de la berma y deposita el sedimento en la cara de la playa, siguiendo el mismo patrón que se midió con los levantamientos topográficos con la salvedad de que fue mayor la cantidad de volumen de sedimento la que se acumuló en el talud. Para el transecto 1000 notamos como los perfiles del modelo y el de la medición del 29/nov/2017 difieren completamente ya que el perfil del modelo muestra erosión de la berma y coloca el sedimento en la cara de la playa, cuando lo que pasó en realidad fue una acumulación de sedimento frente a la barrera alcanzando una altura cercana a los 3 m.

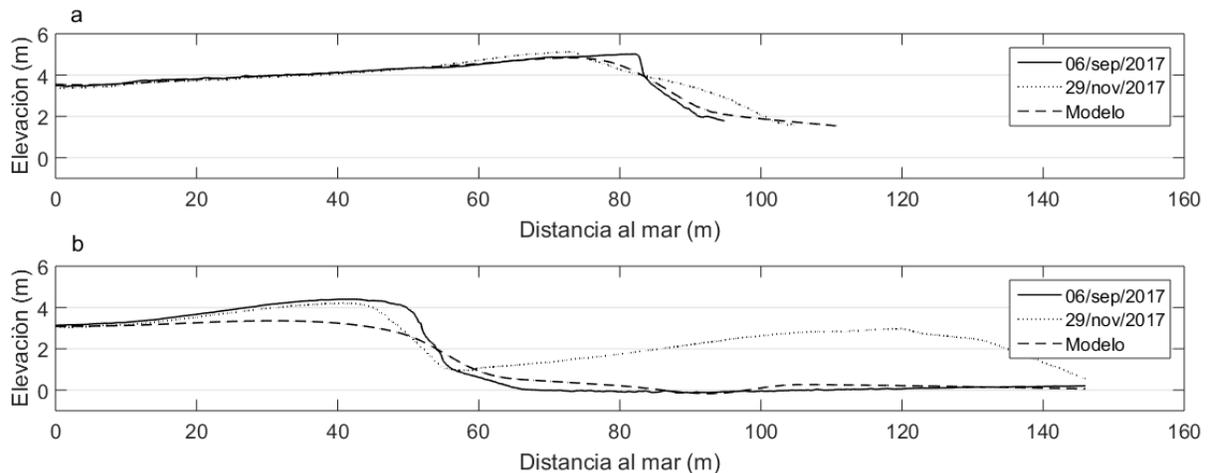


Figura 40. Perfiles de los levantamientos topográficos y del modelo posterior a tormenta ($t=30$ días) con la influencia de la escollera. a) Transecto 200, b) Transecto 1000.

La diferencia de los volúmenes y las zonas de erosión y acreción estimadas con la topografía a las del modelo (Tabla 7) se debe a que este último no presenta correlación con la topografía. Las razones de que esto suceda pueden atribuirse a diferentes factores. El tiempo de simulación (1 mes) no corresponde con la periodicidad de los levantamientos topográficos (3 meses). También puede deberse a falta de datos, como lo fue la topografía de la zona de rompientes y datos de oleaje y marea en los periodos en los que se realizó la topografía que se está comparando. Del ajuste de parámetros del propio modelo, Bugajny *et al.*, (2013) realizó una serie de simulaciones enfocadas en los parámetros: *lws*, *facua* *wetslp* y *dryslp*. En su investigación, el parámetro *lws* provoca gran erosión en la playa y en la duna cuando está activado, el parámetro *facua* con valores elevados provoca menor erosión en la playa y en la duna, incrementando el valor *wetslp* se genera mayor erosión en la duna que en la playa, y el ultimo *dryslp* no provocò diferencias visibles en el proceso de erosión. Una razón más de que el modelo no se ajuste a la topografía puede deberse a que XBeach no modele procesos de recuperación de playa como lo confirma en su investigación Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, (2011).

4. CONCLUSIONES

La metodología seguida para realizar los levantamientos topográficos es eficiente, conforme se desarrolló la investigación se realizaron diversas pruebas y se concluyó que aumentar la cantidad de puntos de control no mejora la precisión del levantamiento topográfico. Se obtuvo una mejor precisión cuando se disminuyó la cantidad de puntos de control, logrando reducir la cantidad de 81 puntos a 15 para una superficie de 30 ha, facilitando el trabajo de campo y de gabinete. En el procedimiento se observó que las fronteras de los MDT generados con el proceso fotogramétrico presentan distorsión, por lo que se recomienda hacer una cobertura de mayor tamaño que envuelva a la superficie de interés para que estas distorsiones queden fuera de la región de interés.

La barrera arenosa presentó modificaciones notables en su morfología por la incidencia de la tormenta tropical Lidia, donde la descarga del arroyo San José aportó un volumen de sedimento mayor a 200,000 m³. Los cambios más notables en la morfología de la barrera ante este tipo de eventos meteorológicos se dan por el aporte de sedimento del arroyo cuando hay ruptura en la barrera. Esto genera una acreción súbita de sedimentos, que la capacidad del oleaje de tormenta para redistribuirlo en el corto periodo (meses). El sedimento disponible con la descarga se distribuye a lo largo de la barrera. Con las mediciones realizadas se puede deducir que la dirección del transporte es al oeste, donde se encuentran los mayores variaciones volumétricas, mientras que al este, las variaciones son menores.

Al analizar los resultados del modelo XBeach y estimar los volúmenes de manera general, se esperaba encontrar semejanza entre las mediciones topográficas y el modelo. Sin embargo, al calcular las tasas de erosión y acreción por metro de playa, así como la correlación de la topografía y del modelo con el indicador de BSS (Brier Skill Score) se encontró que no existe una buena correlación entre la topografía y el modelo. Esto significa que el modelo debe ser perfeccionado y dada la cantidad de variables que interactúan, es necesario seguir realizando pruebas para mejorar la

correlación y poder ser utilizado para predecir la dinámica de la barrera arenosa. Los volúmenes de erosión y acreción calculados con el modelo, para la simulación de las condiciones posteriores a la tormenta son aproximadamente 50% menores a los calculados para las condiciones previas a la tormenta. Esto se debe a que en serie de tiempo del oleaje con la que se modela la altura promedio varió de 0.5 a 0.8 para la simulación previa a la tormenta y de 0.6 a 1.4 para la simulación posterior a la tormenta. En los análisis realizados no se observó un cambio en la morfología de la barrera debido a la presencia de la escollera de la Marina Puerto Los Cabos.

5. REFERENCIAS

- Anderson K, Gaston K.J., 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Front. Ecol. Environ.* 11; 138–146. doi:10.1890/120150
- Andrews, D.G., & McIntyre, M. E., 1978. An Exact Theory of Nonlinear Waves on a Lagrangian-Mean Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 89(4), 609-646.
- Anfuso, G., Benavente, J. and Gracia, J., 2001. Morphodynamic responses of nourished beaches in SW Spain, *Journal of Coastal Conservation*, 7, 71-80.
- Ariffin, E.H.; Sedrati, M., Akhir, M.F., Yaacob, R., and Husain, M.L., 2016. Open Sandy Beach Morphology and Morphodynamic as Response to Seasonal Monsoon in Kuala Terengganu, Malaysia. In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia)*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 75; 1032 – 1036.
- Baldock, T., Holmes, P., Bunker, S., & Van Weert, P., 1998. Cross-Shore Hydrodynamics within an Unsaturated Surf Zone. *Coastal Engineering*, 34(3-4), 173-196.
- Bañuelos M., M. Y., 2017. Evolución de la línea de costa en playas de la bahía de San José del Cabo, Baja California Sur (1993-2014). Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional.
- Brunier G., Fleury J., J. Anthony, Gardel A. Dussouillez P., 2016. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Journal of Geomorphology* 261; 76–88.

- Bugajny, N., Furmańczyk, K., Dudzińska-Nowak, J., Paplińska-Swerpel, B., 2013. Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit) In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65; 672-677.
- Birkemeier, W.A., Nicholls, R.J., Lee, G., 1999. Storms, storm groups and nearshore morphologic change. In: Kraus, N.C., McDougal, W. (Eds.), Coastal Sediments '99, vol. 2. ASCE, Long Island, U.S.A; 1109– 1122.
- Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A. et al., 2016. Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 36, (2). DOI <https://doi.org/10.1007/s00367-016-0435-9>
- Chen, J.S.; Li, L.; Wang, J.Y.; Barry, D.A.; Sheng, X.F.; Gu, W.Z.; Zhao, X.; Chen, L., 2004. Water resources: Groundwater maintains dune landscape. *Nature*, 432, 459–460.
- Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore Protection Manual. Vol. I. U.S. Department of the Army.
- Colomina, I., M. Blázquez, P. Molina, M.E. Parés, M. Wis., 2008. Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing, *IAPRS&SIS*; 1201–1206.
- Colomina, I., Molina P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 92: 79–97
- Córdova, L., Salgueiro G., Lamazares R., y Díaz A., 2014. Sistema de ingeniería de costas: evaluación del proceso de erosión en la playa Varadero. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXXV, No. 1; 17-31
- Córdova, L. L., 2014. Evaluación del proceso de erosión en la playa de Varadero, Cuba. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 175-183.
- Dean, R. G. and P. S. Eagleson., 1966. *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. Editor A. T. Ippen, Mc Graw-Hill; 737 p.
- Del Río, L., Gracia, F.J. and Benavente, J., 2013. Morphological and evolutionary classification of sandy beaches in Cadiz coast (SW Spain). In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65;. 2113-2118.
- Deigaard, R., 1993. A Note on the Three-Dimensional Shear Stress Distribution in a Surf Zone. *Coastal Engineering*, 20, 157-171, doi: 10.1016/0378-3839(93)90059-h

- De Vriend, H. J., 1994. Two - dimensional horizontal and weakly threedimensional models of sediment transport due to waves and currents. En: Coastal, estuarial and Harbour Engineer's Reference Book, M.Abbott y W.Price (editors), editorial E & FN SPON: 215-238.
- Eisenbeiss H., 2009. UAV Photogrammetry, Diss. ETH No. 18515, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, 2009, pp. 235.
- Everaerts J., 2008. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci* 37:1187–1192
- Farris, A.S. and list, J.H., 2007. Shoreline change as a proxy for subaerial beach volume change. *Journal of Coastal Research*, 23(3), 740–748.
- Featherstone, W. E. and Stewart M. P., 2001. Combined analysis of Real- Time Kinematic GPS equipment and its users for height determination. *Journal of Surveying Engineering*, 127, 31-51.
- Floreano D, Wood RJ., 2015.Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature* 521(7553): 460–466
- Finkl, C.W., Makowski, C. Vollmer, H. Klemas, V., Lira, C., Rui Taborda., João Mendes., 2014. Remote Sensing and Modeling, *Advances in Coastal and Marine Resources*. Department of Geosciences Florida Atlantic University Boca Raton, USA, Springer.
- Fox, W.T., & Davis, R.A., 1978. Seasonal variation in beach erosion and sedimentation on the Oregon coast. *Geological Society of America Bulletin*, 89, 1541–1549.
- Galapatti, R., & Vreugdenhil, C. B., 1985. A DepthIntegrated Model for Suspended Sediment Transport. *Journal of Hydraulic Research*, 23(4): 359-377.
- Garrison T., 2010. *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Belmont CA, USA . Ed. Earth Science.
- Giambastiani, B.M.S., Antonellini, M., Gualbert, H.P., Essink, O., Stuurman, R.J., 2007. Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): A numerical model. *J. Hydrol.*, 340, 91–104.
- Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 104, 101–111.
- Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., Trittler, M., 2011. Performance test on UAV-based photogrammetric data collection, *ISPRS ICWG I/V UAV-g Conference*, Zurich, Switzerland.
- Hernández-Valdés, Kenia; Córdova-López, Luis F., 2016. Calibración y validación de un modelo matemático para la simulación de los cambios morfológicos durante eventos extremos en una playa del Caribe. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Mayo-Junio, 135-153.

- Höhle, J., Höhle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (5), 398–406.
- James, M.R., Ilic, S., Ruzic, I., 2013. Measuring 3D coastal change with a digital camera. *Coastal Dynamics*. 893–904.
- Jeong-Min Lee, Jun-Yong Park, Jin-Yong Choi, 2013. Evaluation of Sub-aerial Topographic Surveying Techniques Using Total Station and RTK-GPS for applications in Macro-tidal Sand Beach Environment., *Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65; 535- 540.*
- Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B., 2014. Modelling the topography of shallow braided rivers using structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology* 213, 166–182
- Komar, P., 1994. Boundary Layer Flow Under Steady Unidirectional Currents. En: *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, D. J. Stanley and D. J. P. Swift (editors), John Wiley and Sons: 4-26.
- Komar, P., 1995. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall. 543 p.
- Lee JM, Park JY, Choi JY., 2013. Evaluation of sub-aerial topographic surveying techniques using total station and RTKGPS for applications in macrotidal sand beach environment. *Journal of Coastal Research Special Issue 65: 535–540*
- Lizárraga R., Martínez A., Delgado O., Torres CR., Galindo La., 2007. Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México. *Ciencias Marinas* vol.33 no.3
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., Gabbianelli, G., 2013. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sens.* 5 (12), 6880–6898.
- Masselink, G., Pattiaratchi, C.B., 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia. *Marine Geology*, 172, 243–263.
- Moloney, J.G.; Hilton, M.J.; Sirguey, P., and Simons-Smith, T., 2017. Coastal dune surveying using a low-cost remotely piloted aerial system (RPAS). *Journal of Coastal Research*,.
- Montaño, Y. Peraza, R., 1984. Aplicación de un modelo de tipo predictivo para cuantificar el transporte litoral de arenas en dos playas de la costa sur de Sinaloa. *Contribución 436 del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*

- Morton, R.A., Leach, M.P.; Paine, J.G., and Cardoza, M.A., 1993. Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *Journal of Coastal Research*, 9, 702–720.
- Morton, R.A., Gibeaut, J.C., Paine, J.G., 1995. Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology* 126; 161–179
- N. Polat, M. Uysal., 2015. Investigating performance of airborne lidar data filtering algorithms for DTM generation, *Measurement* 63; 61–68.
- Panoply, 2018. NASA Goddard Institute for Space Studies 2880 Broadway, New York, NY 10025 USA. <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/credits.html>
- Pronatura Noroeste, A.C., 2010. Plan de Conservación del Estero de San José del Cabo. B.C.S, México
- P. Lodewijk m. De Vet, Robert T. McCall, Joost P. Den Bieman, Marcel J.F. Stive, Maarten Van Ormondt., 2015. Modelling dune erosion, overwash and breaching at Fire Island (NY) during Hurricane Sandy. *The Proceedings of the Coastal Sediments*.
- Quartel, S., Kroon, A., Ruessink, B.G., 2008. Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, 250, 19–33.
- Reniers, A. J., 1999. Longshore Current Dynamics. Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- Reniers, A. J., Roelvink, J. A., & Thornton, E., 2004. Morphodynamic Modelling of an Embayed Beach under Wave Group Forcing. *Journal of Geophysical Research*, 109(C1), doi: 10.1029/2002JC001586.
- Rizos, C., 1999. Quality Issues in Real-Time GPS Positioning. Report of International Association of Geodesy SSG 1154 IUGG Congress, Birmingham U.K.
- Roelvink, J. A., 1993. Dissipation in Random Wave Groups Incident on a Beach. *Coastal Engineering*, 19, 127-150.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R., 2010. XBeach Model Description and Manual. Report 1200116/1002266. Delft, Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Williams, J. J. and Masselink, G., 2011. Application of XBeach to model storm response on a macrotidal gravel barrier. In: Smith, J.K., and Lynnet, P. (eds.), *Proceedings 32nd Conference on Coastal Engineering (Shanghai, China)*, Coastal Engineering, Special Issue No. 32, sediment. 39. doi:10.9753/icce.v32.sediment.39.

- Scott Tim, Gerd Masselink, Tim O'Hare , Andrew Saulter, Tim Poate, Paul Russell, Mark Davidson, Daniel Conley, 2016. The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England. *Marine Geology* 382 (2016) 224–241
- Svendsen, I. A., 1984. Wave Heights and Set-Up in a Surf Zone. *Coastal Engineering*, 8, 303-329.
- Saye SE, Van der Wal D, Pye K, Blott SJ., 2005. Beach–dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology* 72(1):128–155
- Swales, A., 2002. Geostatistical estimation of short-term changes in beach morphology and sand budget. *Journal of Coastal Research*, 18, 338–351.
- Theuerkauf EJ, Rodriguez AB., 2012. Impacts of transect location and variations in along-beach morphology on measuring volumen change. *J Coast Res* 28(3):707–718.
- Troyo Diéguez, S., 2003. Oleaje de viento y ondas de infragravedad en la zona costera de Baja California Sur. Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-IPN, La Paz, B. C. S.
- Ian L. Turner , Mitchell D. Harley, Christopher D. Drummond., 2016. UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114,19-24.
- M. Uysal , A.S. Toprak , N. Polat., 2015. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement* 73 539–543
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S. and Sierra, J.P., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using processbased Profile models. *Coastal Engineering*, 47 (3), 295-327.
- Van Rijn, L. C., 2007. Unified View of Sediment Transport by Current and Waves, Part I, II, III and IV. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 649-689 (part I & part II); 761793 (part III & part IV).
- WALTON, T. L. y T. Y. CHIU., 1979. Littoral sand transport on beaches. Coastal and Oceanographic Engineering Department. Univ. of Florida. Gainesville, Fla. 1979. 135 p.

6. ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de modelación en XBeach

```
%% XBeach parameter settings input file
%%
%% date: 01-Mar-2017 10:58:43
%%
%% function: xb_write_params
```

```
%% Flow boundary condition parameters
```

```
morfac = 10
cyclic = 0
```

```
%% Bed composition parameters
```

```
D50 = 0.000440
```

```
%% Flow parameters
```

```
bedfriction = manning
```

```
%% Grid parameters
```

```
gridform = delft3d
xyfile = grid_D3D.grd
depfile = bed_D3D.dep
posdwn = -1
alfa = 0
thetamin = 55
thetamax = 235
dtheta = 180
dtheta_s = 10
thetanaut = 1
```

```
%% Model time
```

tstop = 259200
CFL = 0.7000

%% Physical processes %%%%%%%%%%

single_dir = 1
struct = 1
ne_layer = escollera.dep

%% Physical constants %%%%%%%%%%

g = 9.8100
rho = 1025

%% Tide boundary conditions %%%%%%%%%%

zs0file = tide.txt
tideloc = 1

%% Wave boundary condition parameters %%%%%%%%%%

instat = 41

%% Wave-spectrum boundary condition parameters %%%%%%%%%%

bcfile = jonswap.txt
dtbc = 2
rt = 3600

%% Output variables %%%%%%%%%%

outputformat = netcdf
tintg = 86400
tintm = 86400
tintp = 1
tstart = 0
taper = 100

npoints = 5
634587 2548440

635088	2548567
635355	2548860
635568	2549141
635809	2549348

nglobalvar = 1
zb

npointvar = 1
zb

Anexo 2. MDT de cada uno de los levantamientos topográficos realizados.

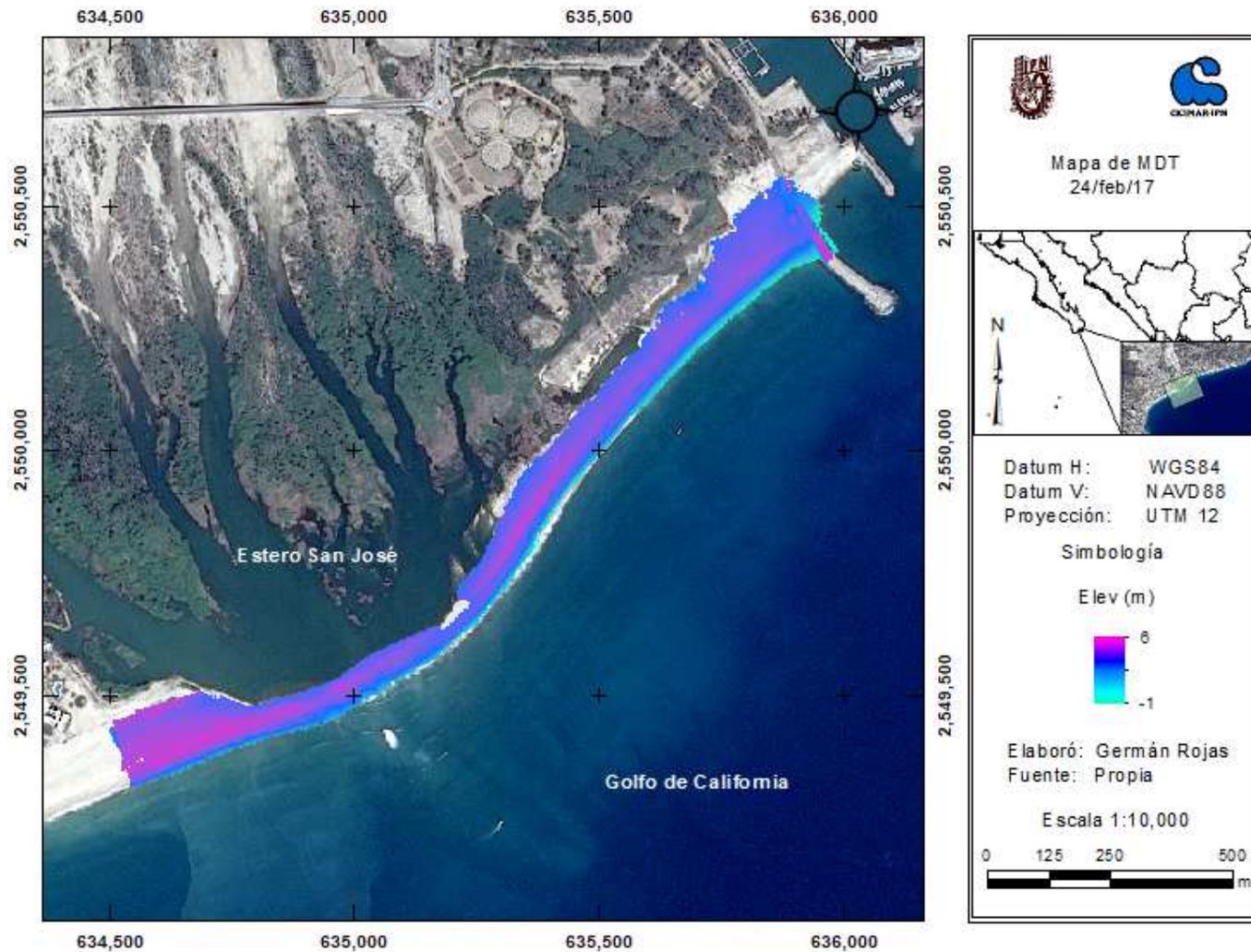


Figura 41. Mapa de MDT del 24/feb/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

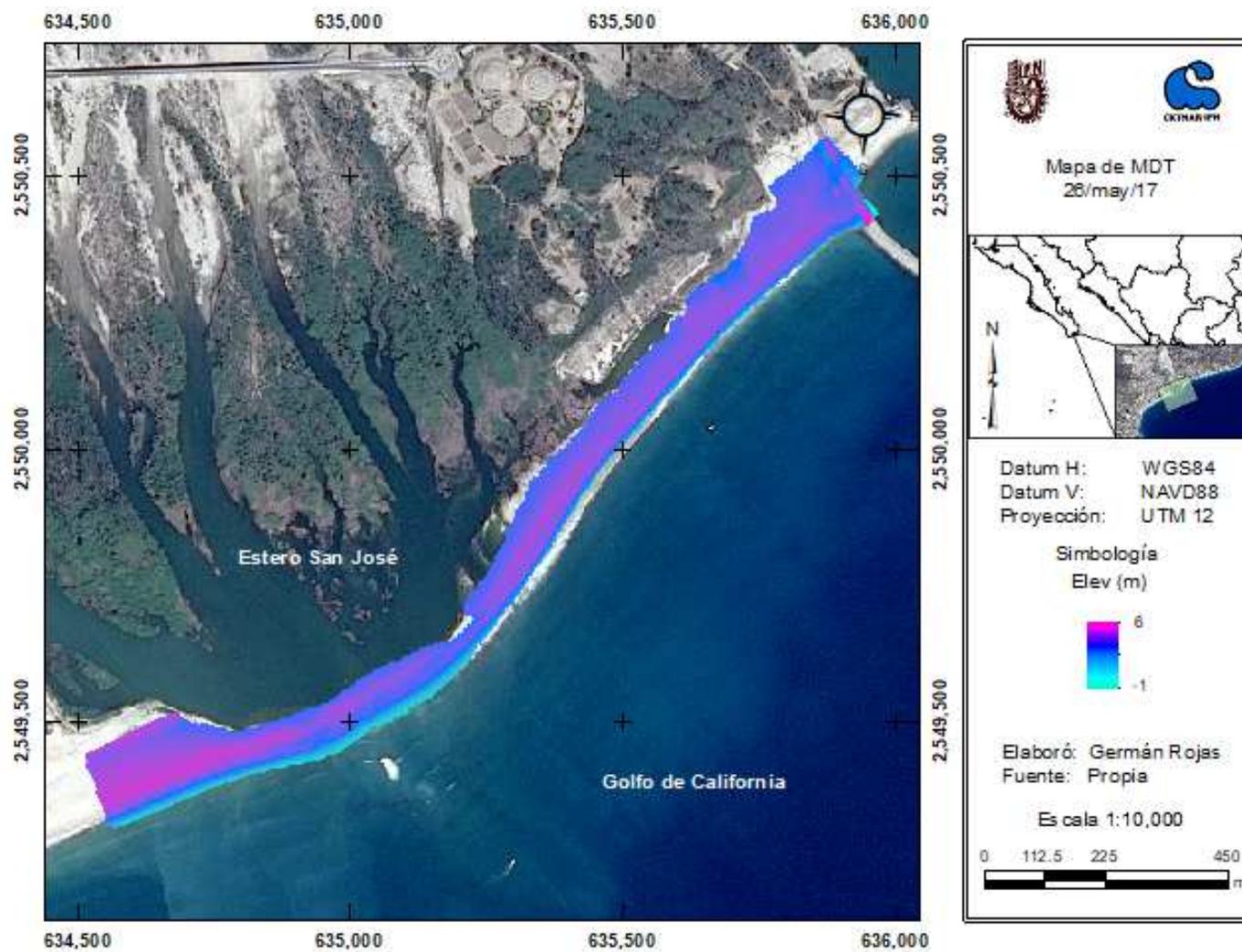


Figura 42. Mapa de MDT del 26/may/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

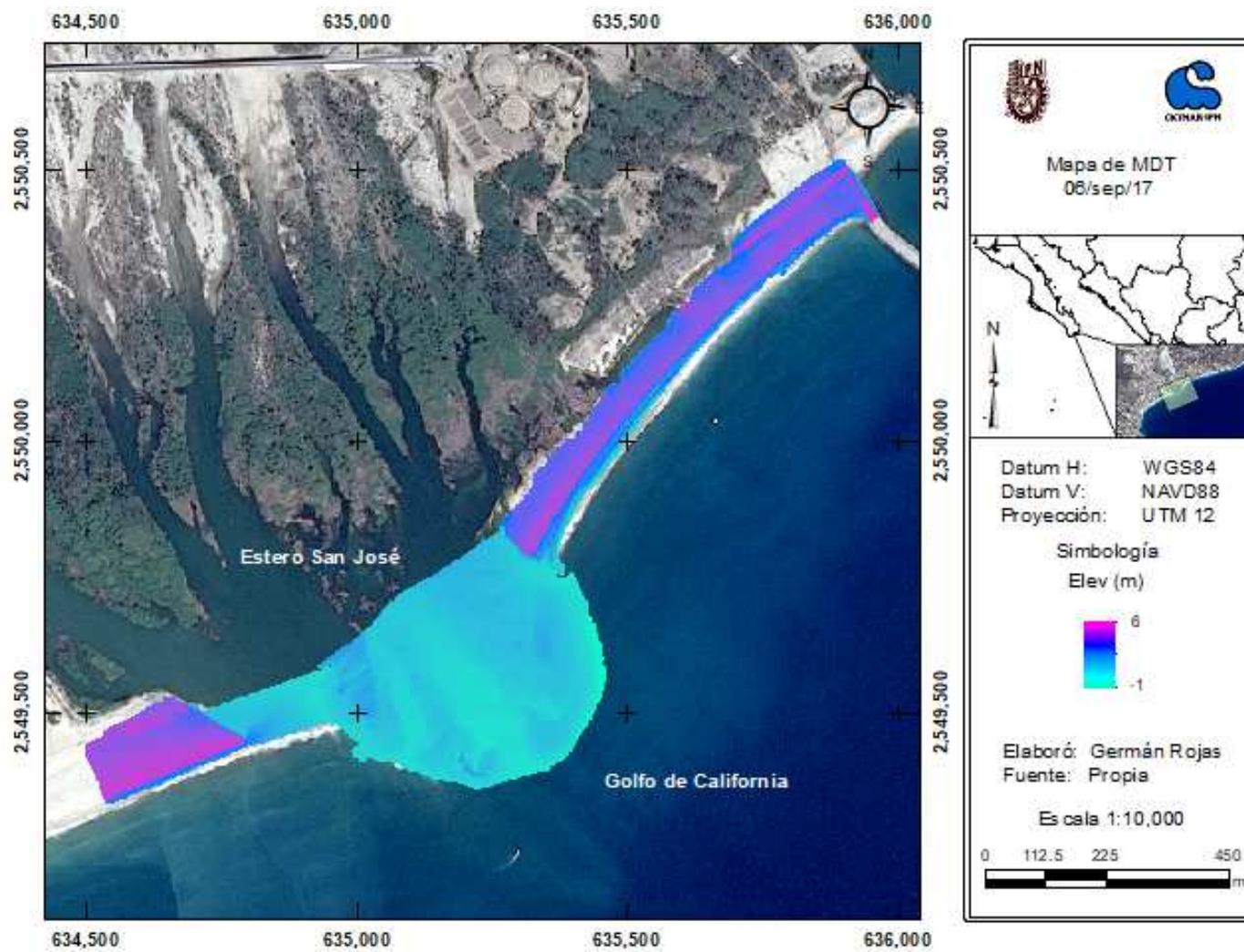


Figura 43. Mapa de MDT del 06/sep/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

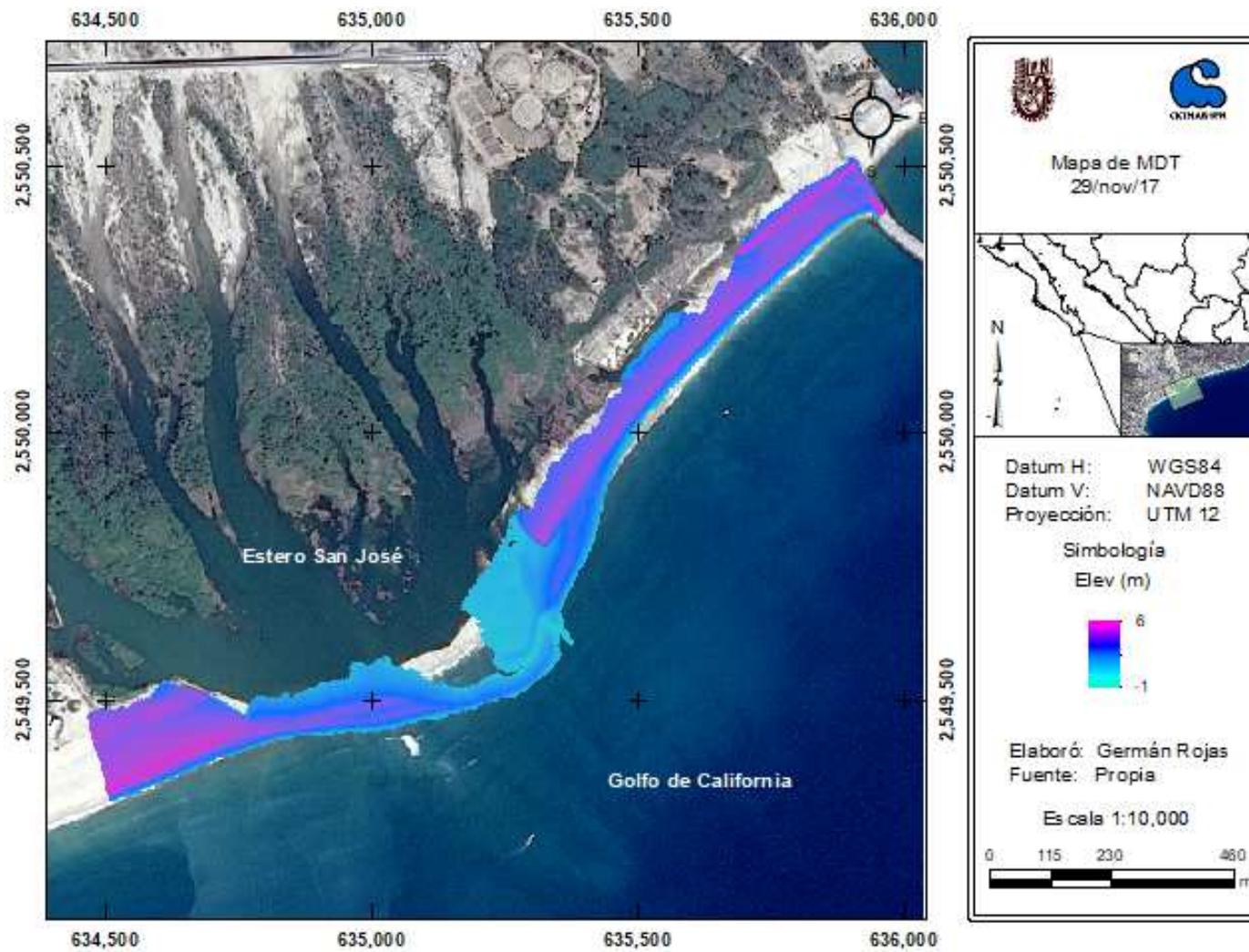


Figura 44. Mapa de MDT del 29/nov/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

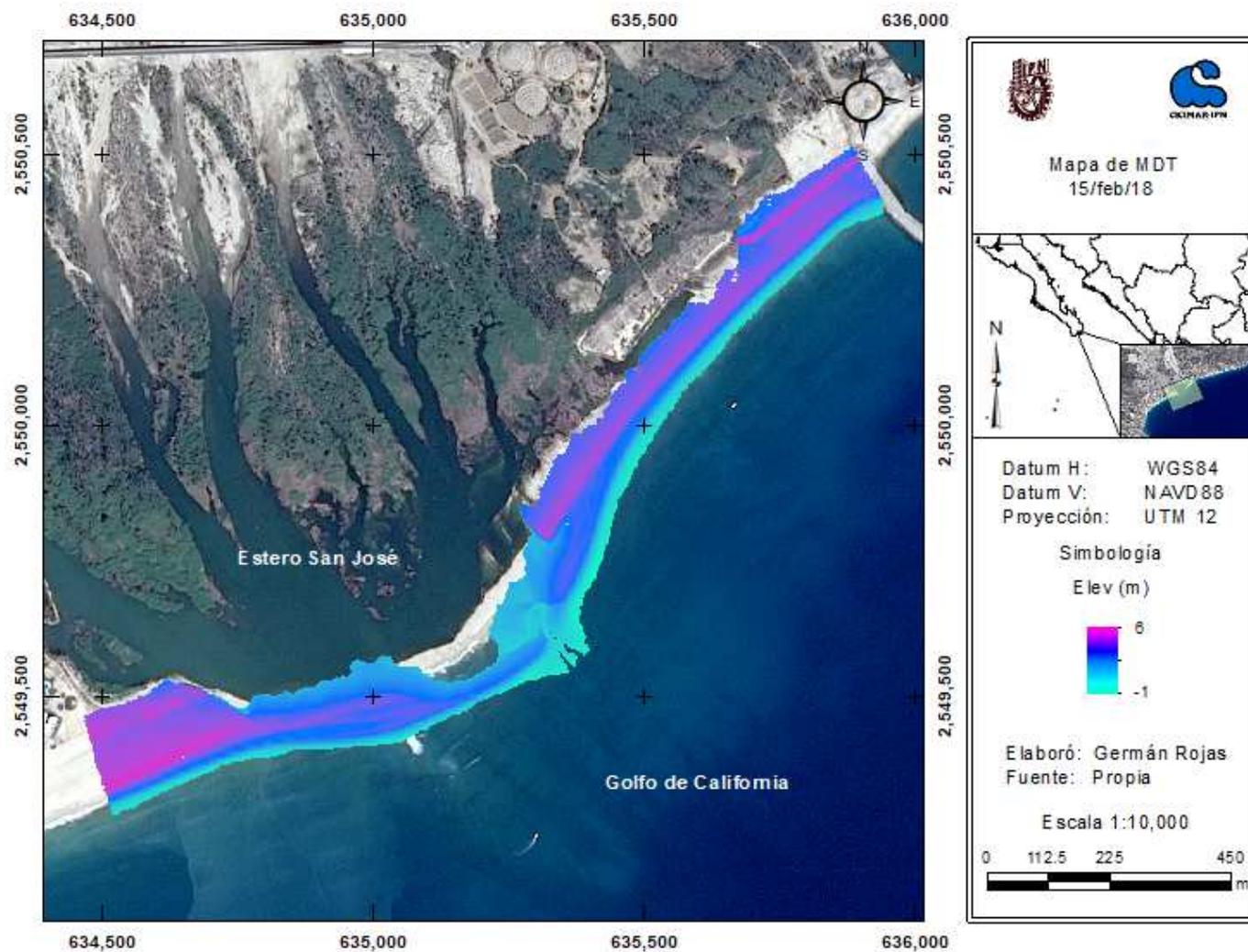


Figura 45. Mapa de MDT del 15/feb/2018 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

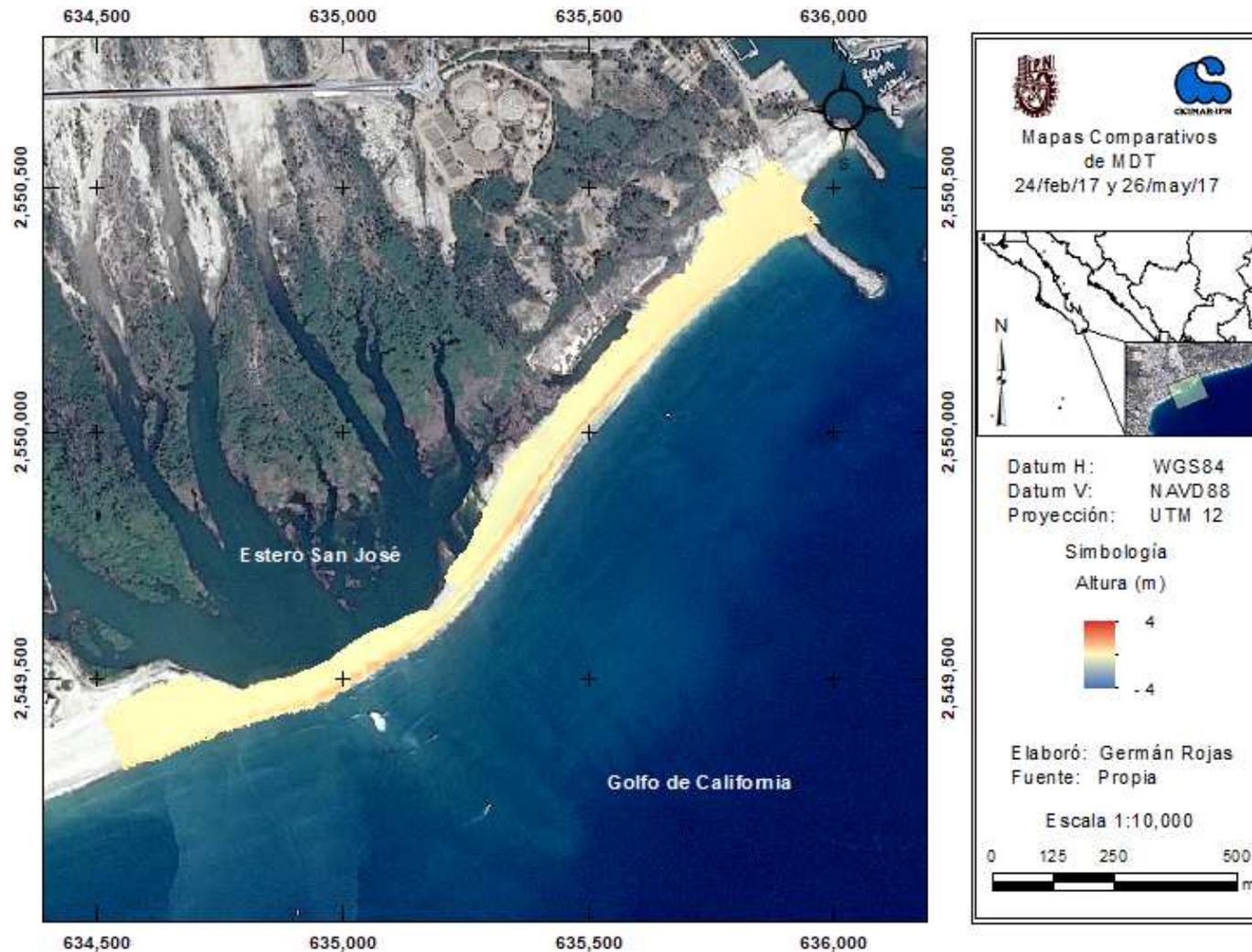


Figura 46. Mapa de comparación entre MDT del 24/feb/2017 y 26/may/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

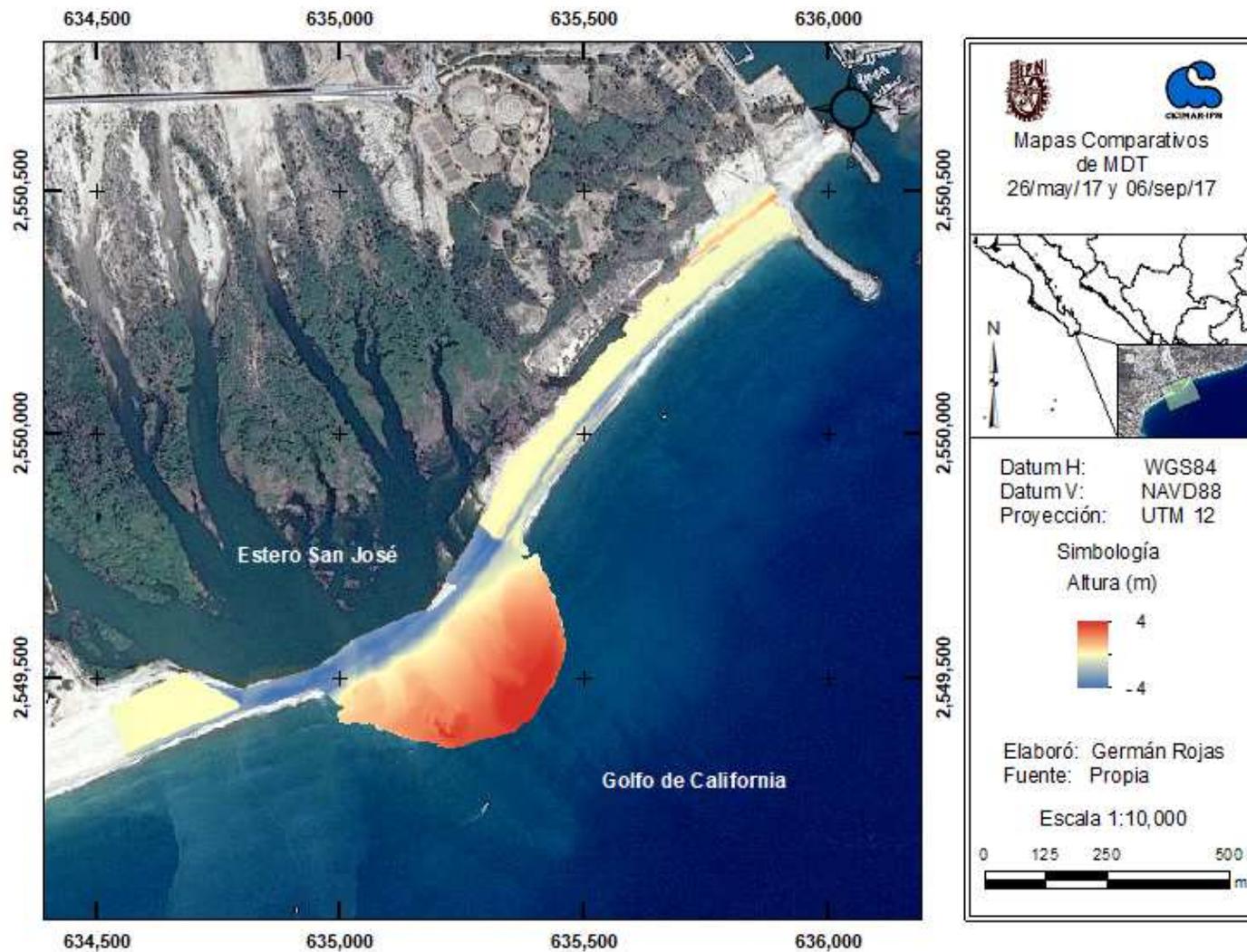


Figura 47. Mapa de comparación entre MDT del 26/may/2017 y 06/sep/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

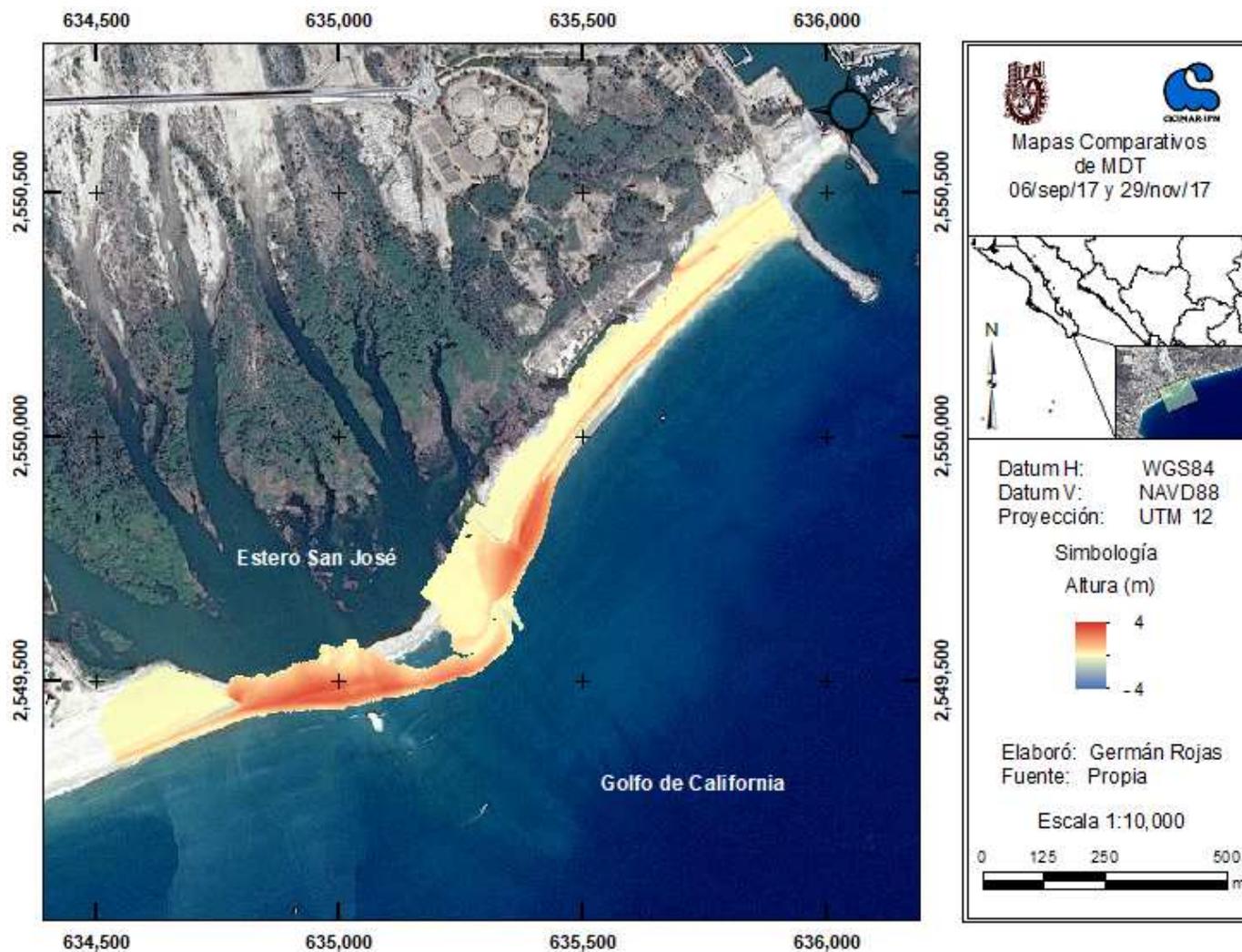


Figura 48. Mapa de comparación entre MDT del 06/sep/2017 y 29/nov/2017 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

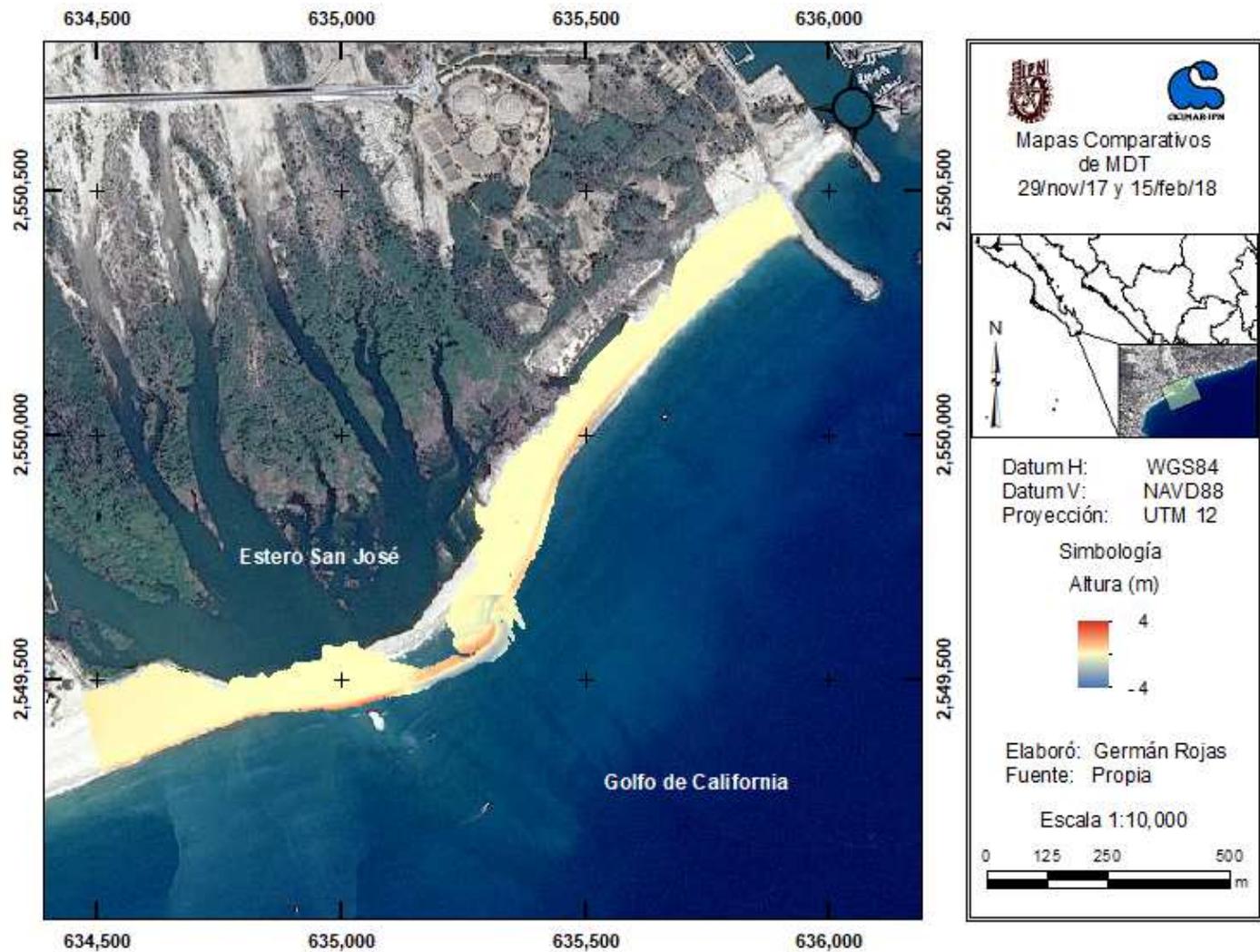


Figura 49. Mapa de comparación entre MDT del 29/nov/2017 y 15/feb/2018 (De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).

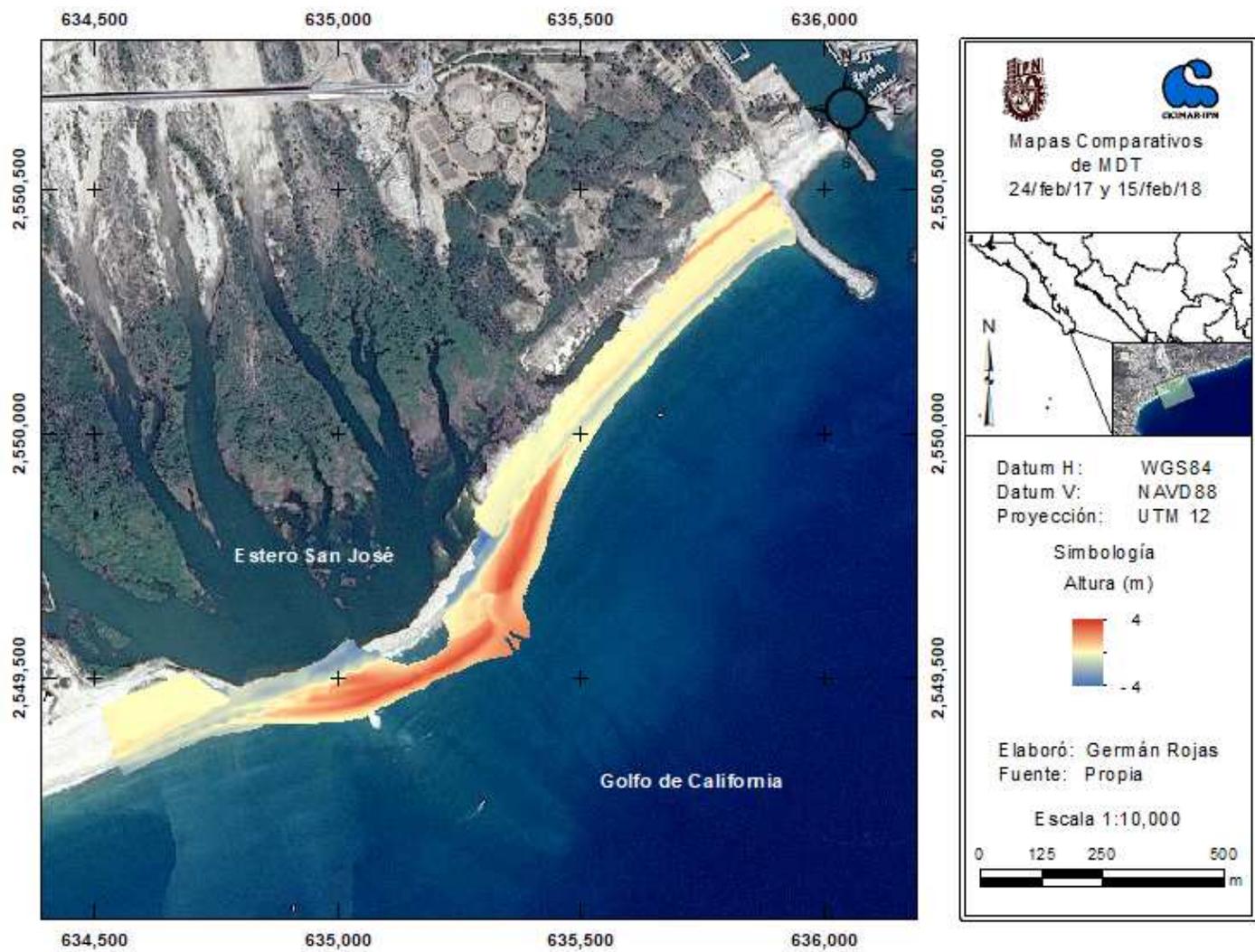


Figura 50. Mapa de comparación entre MDT del 24/feb/2017 y 15/feb/2018 ((De fondo Imagen SPOT 7, de 2014 (© Astrium Services 2015)).