



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

INFLUENCIA DE NORTES EN LA DINÁMICA LITORAL DE LAS
COLORADAS, YUCATÁN

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

PRESENTA:
IVETTE ALEJANDRA HEREDIA BATÚN

TUTORES PRINCIPALES
CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN, Instituto de Ingeniería

SISAL, HUNUCMÁ, YUCATÁN. NOVIEMBRE DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Torres Freyermuth Alec

Secretario: Dra. Medellín Mayoral Gabriela

Vocal: Dr. Appendini A. Christian M.

1^{er.} Suplente: Dra. Enríquez Ortiz Cecilia E.

2^{d o.} Suplente: Dr. López González José

Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Sisal, Yucatán, México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Christian Mario Appendini Albrechtsen

FIRMA

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos (kx - \omega t)$$

“Una ola a la vez”

RESUMEN

En el litoral yucateco el paso de los eventos extremos ha resultado en problemas frecuentes de erosión que pone en peligro la infraestructura costera. En Las Coloradas, Yucatán, el cordón dunar ha funcionado como estructura de protección natural durante muchos años para dividir el mar de las lagunas salineras y la erosión es una de las constantes preocupaciones. En particular, existen zonas donde el daño a la duna es permanente y el paso constante de eventos extremos representa un grave riesgo a la industria salinera. En este trabajo se tiene por objetivo evaluar y caracterizar los cambios en el cordón dunar de Las Coloradas, Yucatán, debido al paso de nortes. Para lograr esto se realizó un análisis de oleaje y viento del hindcast de 30 años disponible para el Golfo de México, del cual se seleccionaron los eventos de nortes más representativos. Con dichos datos se habilitaron modelos de oleaje, hidrodinámica y transporte de sedimentos, complementados con datos de campo para generar un dominio computacional que represente las condiciones actuales de la zona de estudio. Dentro de los resultados obtenidos se observó que en los 5 eventos de norte analizados existe una elevación de la superficie libre que ocasiona inundación en las zonas más bajas y presentando valores de corrientes mayores a 0.30 m/s cerca de la costa. También se encontró una zona en donde las corrientes van en direcciones opuestas (este-oeste) lo que implica la presencia de una socavación ya considerable. El transporte de sedimentos, si bien es de baja magnitud, ocasiona cíclicos en cambios en la línea de costa sin generar una erosión neta, lo cual puede resultar en una erosión permanente si ésta dinámica se altera. Como resultado de los estudios, se plantea una alternativa para la restauración del cordón dunar, presentando las características necesarias para que la duna garantice la estabilidad de la salina.

ABSTRACT

In the Yucatan coast, the passage of extreme events has resulted in frequent erosion problems that endanger the coastal infrastructure. In Las Coloradas, Yucatan, the dune cord has functioned as a natural protection structure for many years to divide the sea from saline lagoons and erosion is one of the constant concerns. In particular, there are zones where the damage to the dune is permanent and the constant passage of extreme events represents a serious risk to the salt industry. The objective of this work is to evaluate and characterize the changes in the dune cord of Las Coloradas, Yucatán, due to the passage of the “Nortes”. To accomplish this, a wave and wind analysis of the 30-year hindcast available for the Gulf of Mexico was carried out, from which the most representative events of “Norte” were selected. With these data, wave, hydrodynamic and sediment transport models were enabled, complemented with field data to generate a computational domain that represents the current conditions of the study area. Within the obtained results it was observed that in the 5 northern events analyzed there is an elevation of the surface that causes flooding in the lower areas and presenting values of currents higher than 0.30 m/s near of the coast. An area where the currents go in opposite directions (east-west) was also found, which implies the presence of a considerable scour. The transport of sediments, although of low magnitude, causes cyclical changes in the coastline without generating a net erosion, which can result in permanent erosion if this dynamic is altered. As a result of the studies, an alternative is proposed for the restoration of the dune cord, presenting the necessary characteristics for the dune to secure the stability of the saline.

DEDICATORIA

To god, my family and friends that if they did not exist, this thesis would have been completed a year earlier, but their presence has made my walk through life more interesting...

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado de Ingeniería de la UNAM, ya que ha sido una gran satisfacción formar parte de esta institución y experimentar nuevas experiencias, permitiéndome conocer a personas que merece la pena conservar. Para el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería en Yucatán y a los doctores que aportaron conocimiento para desarrollar y terminar ésta tesis.

A Chrisitan Mario Appendini Albrechtsen por aceptarme como tutorada y agilizar lo más posible la culminación de esta tesis. Por la paciencia, apoyo y conocimiento que aportó a mi desarrollo estudiantil y personal.

Mención a AXIS ingeniería por su acogida y apoyo en brindarme información esencial para la culminación de éste trabajo.

Quiero agradecer por la beca otorgada a CONACYT, sin éste apoyo económico el estudio de ésta maestría hubiera sido más complicado.

También se agradece a DHI group por brindarme una licencia académica del software MIKE21/3 FM y Litdrift para realizar la modelación numérica que se implementó en ésta tesis.

Personalmente agradecimientos a Dios por darme fortaleza e iluminarme en los momentos más fragmentados que se me han presentado en los últimos años. A mi familia que alentaron a no darme por vencida a pesar de las adversidades.

A Carla, Claudia y Leticia por escuchar los lamentos e intrepresar los silencios, a Liliana por enseñarme que darse por vencida es solo cuestión de percepción. A Yuly, Diego, Aurora, Glendy, Ivan y Franco por hacerme sonreír y brindarme de momentos efímeros de felicidad sin saberlo.

A Clemente, Macario, Luis, Fernando y Álvaro por toda su ayuda y por hacer que el paso por ésta etapa fuera más divertida.

ÍNDICE

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	III
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
CAPÍTULO I	3
ASPECTOS GENERALES.....	3
<i>I.I. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....</i>	<i>3</i>
<i>I.II. ANTECEDENTES.....</i>	<i>4</i>
<i>I.III. OBJETIVOS DEL ESTUDIO</i>	<i>8</i>
<i>I.IV. ÁREA DE ESTUDIO</i>	<i>9</i>
<i>I.V. ALCANCE DEL ESTUDIO.....</i>	<i>10</i>
CAPÍTULO II	11
MODELOS NUMÉRICOS	11
<i>II.I. MODELO UNIDIMENSIONAL LITDRIFT</i>	<i>13</i>
<i>II.II. MODELO ACOPLADO MIKE 21/3.....</i>	<i>17</i>
CAPÍTULO III	25
METODOLOGÍA	25
<i>III.I. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE</i>	<i>29</i>
<i>III.II. PERFILES DE PLAYA Y LÍNEA DE COSTA.....</i>	<i>33</i>
<i>III.III. BATIMETRÍA.....</i>	<i>34</i>
<i>III.IV. GRANULOMETRÍA</i>	<i>35</i>
<i>III.V. IMPLEMENTACIÓN DE MODELACIÓN NUMÉRICA.....</i>	<i>38</i>

III.V.II <i>Evaluación del transporte longitudinal (Modelo Litpack)</i>	39
III.V.III <i>Modelo Acoplado (SW, ST, HD)</i>	42
CAPÍTULO IV	47
RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
IV.I. <i>CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE</i>	49
IV.II. <i>GRANULOMETRÍA</i>	52
IV.III. <i>RESULTADOS DE MODELADO LITDRIFT</i>	54
IV.IV. <i>RESULTADOS DE MODELACIÓN BIDIMENSIONAL</i>	55
CAPÍTULO V	69
CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXO	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Daños ocasionados a la duna por el huracán Wilma. Fuente: Axis ingeniería (2005)	5
Figura 2. Primeras soluciones para la estabilidad y recuperación de la duna. Fuente: Axis ingeniería (2005)	6
Figura 3. Proceso de instalación de geotextiles para la duna costera. Fuente: Axis ingeniería (2006).....	7
Figura 4. Situación actual del geotextil en zonas críticas.	7
Figura 5. Ubicación de la Reserva Biosfera Ría Lagartos.....	9
Figura 6. Zona crítica de estudio	10
Figura 7. Diagrama de la metodología utilizada.....	28
Figura 8. Ubicación de boya para descargar datos	29
Figura 9. Valores máximos anuales tomados de la serie de oleaje del hindcast.....	31
Figura 10. Ubicación del punto de control	33
Figura 11. Recorrido realizado para la obtención de un perfil de playa.....	34
Figura 12. Batimetría de la zona de estudio.....	35
Figura 13. A) Cadenamientos para la obtención de muestras de sedimento	37
B) Ubicación de muestras tomadas en cada perfil.....	37
Figura 14. Malla computacional.....	39
Figura 15. Perfil transversal característico de la zona de estudio.....	40
Figura 16. Curva alpha-Q obtenida por Appendini et al. 2012 en la Playa de Progreso, siendo el eje X la orientación de la línea de costa en grados (ortogonal) y el eje Y la de tasa de transporte longitudinal en m ³ /año	41
Figura 18. Histograma para obtener las frecuencias de las alturas de olas significativa.....	50
Figura 19. Diagrama de distribución conjunta de Hs-Tp para los datos del Hindcast. La barra de colores indica la frecuencia de cada combinación.....	50
Figura 17. Serie de tiempo de la boya utilizada de los datos disponibles del Hindcast	50
Figura 21. Gráfico del régimen medio de oleaje para el punto extraído del Hindcast, ajustado a la distribución Log-Normal.....	50
Figura 20. Dirección e intensidad de oleaje. La línea punteada indica la orientación de la playa.....	50
Figura 22. Rosas de oleaje y viento para el evento de Norte 1	51
Figura 23. Distribución de sedimentos.....	52
Figura 24. Representación de la curva de densidad de la zona seca	53
Figura 25. Representación de la curva de densidad de la zona de swash	53
Figura 26. Representación de la curva de densidad de la barra inner.....	53
Figura 27. Curva alpha-Q del perfil transversal seleccionado. La posición de la flecha azul indica la orientación de la playa y la flecha roja expresa la orientación de equilibrio.....	54
Figura 28. Cambio de volumen en el transporte longitudinal de la zona de estudio (m ³ /año x 1000)	55
Figura 29. Propagación del oleaje del evento de Norte 1. La línea blanca indica la línea de costa.....	56
Figura 30. Envolvente máxima de la variación de superficie libre del evento de Norte 1.	57
Los puntos de color indican los zoom in en la parte de abajo donde se muestra su afectación. La línea blanca indica la línea de costa. Las coordenadas están en UTM y la variación en metros.....	57
Figura 31. Envolventes máximas de velocidades de corriente bajo efecto del evento de Norte 1 (A) y evento de Norte 4 (B)	59
Figura 32. Envolvente máxima de superficie libre del evento de Norte 1.	62
Figura 33. Envolvente máxima de corrientes del evento de Norte 1	63
Figura 34. Envolvente máxima de corrientes del evento de Norte 2	64
Figura 35. Envolvente máxima de corrientes del evento de Norte 3	65
Figura 36. Envolvente máxima de corrientes del evento de Norte 4	66
Figura 37. Envolvente máxima de corrientes del evento de Norte 5	67
Figura 38. Rosas de oleaje y viento para los eventos de Norte.....	76
Figura 39. Envolvente máxima de superficie libre del evento de Norte 2.	77
Figura 40. Envolvente máxima de superficie libre del evento de Norte 3.	77
Figura 41. Envolvente máxima de superficie libre del evento de Norte 4.	77
Figura 42. Envolvente máxima de superficie libre del evento de Norte 5.	77

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Coordenadas geográficas en UTM de los puntos en donde se obtuvieron las muestras de sedimentos.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2. Coordenadas geográficas en UTM de los límites de la malla computacional.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3. Especificaciones del modelo LITDRIFT</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4. Especificaciones del modelo de propagación de oleaje SW.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5. Especificaciones del modelo hidrodinámico HD.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6. Especificaciones del modelo de transporte de sedimentos ST</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 7. Eventos seleccionados para las simulaciones.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 8. Registro de los tamaños de sedimentos para cada cadenamiento.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 9. Alternativas propuestas para evaluar el comportamiento de la duna</i>	<i>60</i>

CAPÍTULO I
ASPECTOS GENERALES

Capítulo I

ASPECTOS GENERALES

I.I. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Capítulo I: Establece una visión general de Las Coloradas y explica parte de la historia de la problemática y las medidas que se han tomado para resolverlo. También se presentan los objetivos y el alcance de ésta investigación.

Capítulo II: En general se describen las bases de los modelos LITDRIFT y el modelo acoplado MIKE21/3 FM.

Capítulo III: Se establece la metodología utilizada en el desarrollo de éste trabajo para la caracterización de la hidrodinámica y transporte de sedimentos en el área de estudio. La obtención de datos y el procesamiento que se llevó a cabo para implementar dichos modelos.

Capítulo IV: Contiene la descripción de los resultados obtenidos en la modelación, así como las discusiones y conclusiones generales a las que se llegó a partir de dichos resultados.

I.II. ANTECEDENTES

Nortes

Los *Nortes* son una condición meteorológica que se presentan cuando una masa de aire frío choca con una masa de aire caliente, al ser más denso el aire frío, éste penetra como una cuña por debajo del aire caliente generando movimiento e inestabilidad en la atmósfera. En México, éstos eventos ocurren de septiembre a mayo de cada año, cuando el aire frío del Polo Norte comienza a moverse hacia al sur con sistemas de alta presión, favoreciendo el incremento de la velocidad del viento y alcanzando gran parte del Golfo de México (GM). La misma circulación del sistema propicia la dirección característica del Norte y afecta al clima dentro del GM (Martín Cortés, 2017), generando descenso de temperaturas, fuertes lluvias, vientos intensos que llegan alcanzar más de 20m/s, y oleajes de hasta 5.5m de altura (Appendini, Torres-freyermuth, et al., 2012). Aunque su frecuencia y duración sean variables, en promedio se presentan 24.5 eventos por año en el GM por lo que afecta a industrias petroleras, embarques y pesquerías al ofrecerles tiempo de inactividad (Appendini, 2017), mientras que en el estado de Yucatán se presenta un promedio de 16 eventos anuales teniendo duraciones de un día a dos semanas (Reding, 1992).

La zona de impactos de los *Nortes* puede ser muy extensa por lo que su estudio en ocasiones es limitado o demasiado general. Por ejemplo, Appendini et al. (2014) realizaron una caracterización del clima de oleaje en el GM donde mencionan que las olas que se derivan del Norte son un factor importante en la modificación del clima de oleaje invernal aumentando sus alturas. Osorio Tai (2015), realizó una modelación numérica de los vientos en la zona de Veracruz donde obtuvo que los vientos relacionados a los *Nortes* generan un oleaje intenso. Mientras que Mendoza et al. (2013) hicieron caracterizaciones de tormentas para establecer peligros costeros en la Península de Yucatán y establecieron que las tormentas de invierno eran derivadas de los Nortes, indicando que Río Lagartos es una zona con un alto potencial de erosión.

Las Coloradas

En Las Coloradas se encuentra ISYSA, la segunda planta más grande en producción de sal en México, superada por Essa ubicada en Guerrero Negro (Valladares García, 2014). ISYSA cuenta con más de 10 km de lagunas costeras que están adaptadas como vasos de evaporación de sal. Estas lagunas están protegidas del mar abierto gracias a la duna costera. Sin embargo a través de los años, la duna se vio afectada por el paso de eventos naturales extremos como el huracán Gilberto en Septiembre de 1988, quien destruyó casi por completo la infraestructura de campo. En Octubre de 2005, se dio lugar al paso del huracán

Wilma, siendo éste el evento más reciente y que más repercusiones ocasiono a la planta y la duna. Wilma ocasionó la rotura de la duna costera dejando mezclar el agua de mar con el agua de las pozas de evaporación (Figura 1), deteniendo la producción de sal y obteniendo pérdidas económicas considerables.

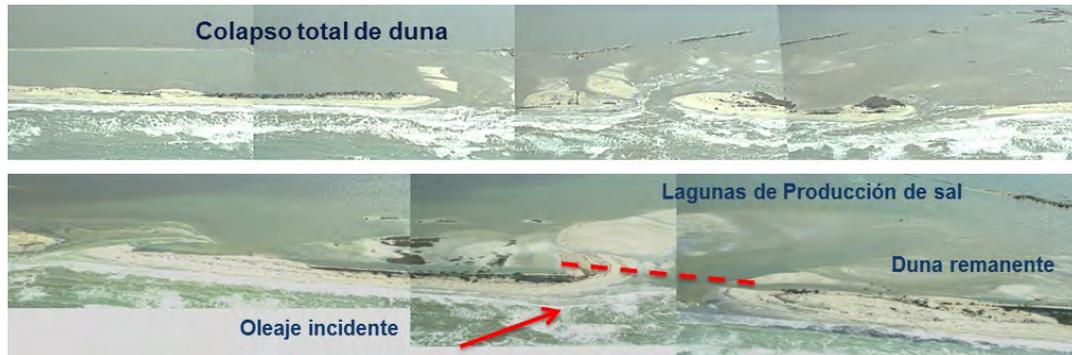


Figura 1. Daños ocasionados a la duna por el huracán Wilma. Fuente: Axis ingeniería (2005)

A partir de dichos acontecimientos la empresa se ha encargado de buscar soluciones para garantizar la estabilidad de la zona y así evitar futuras afectaciones. Una de las primeras soluciones fue colocar estructuras de concreto, costales de arena y también trabajos de relleno (Figura 2), sin embargo todas estas acciones fueron insuficientes para aminorar o solucionar el problema. La siguiente medida fue realizar una duna artificial mediante la colocación de tubos geotextiles que fueron cubiertos de arena para que la vegetación se produjera de nuevo, instalando aproximadamente 7 km de geotextiles en las zonas más afectadas.



Figura 2. Primeras soluciones para la estabilidad y recuperación de la duna. Fuente: Axis ingeniería (2005)

Desde su instalación en el año 2006 (Figura 3), se han llevado a cabo monitoreos en la zona para evaluar la evolución de la línea de costa. Si bien se han registrado avances y regresiones en la línea de costa, estas se han considerado normales por los ciclones anuales y se ha concluido que el geotextil ha cumplido con su función. Sin embargo en la actualidad existen zonas en donde el deterioro del geotextil es evidente y se han creado lugares críticos en toda la costa. Después de 12 años y con el paso constante de eventos extremos, el tubo ha quedado expuesto en diversos puntos. (Figura 4).



Figura 3. Proceso de instalación de geotextiles para la duna costera.. Fuente: Axis ingeniería (2006)



Figura 4. Situación actual del geotextil en zonas críticas.

La zona más crítica es la denominada “Chocolatera” que abarca unos 2.5 km aproximadamente. Esta zona se vio afectada justo después de su instalación debido al paso de *Nortes* en el año 2006. Durante los años siguientes la variación en su mejoría ha sido casi nula y continua el deterioro del tubo al aumentar la longitud de la zona dañada.

A pesar de los esfuerzos para la planeación en la recuperación de playas en Yucatán, es necesario realizar estudios detallados de su dinámica litoral para establecer soluciones exitosas. A pesar de que se han realizado trabajos enfocados a entender la dinámica litoral de diversas zonas de la península, con excepción del trabajo de Mendoza et al. (2013), ninguno se ha centrado en evaluar específicamente los comportamientos de la costa a partir de los eventos de *Norte*.

I.III. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo de esta tesis es evaluar y caracterizar los cambios en la dinámica litoral debido a la influencia del paso de Nortes en Las Coloradas, Yucatán, así como proponer alternativas para la restauración del cordón dunar. Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Caracterizar la zona de estudio
 - Topo-batimetría
 - Sedimentos
 - Vientos
 - Oleaje
2. Modelación numérica de la dinámica litoral, incluyendo oleaje, corrientes y transporte de sedimentos
 - Evaluación del transporte de sedimentos en base a modelación unidimensional
 - i. Pre-procesamiento de datos de entrada
 - ii. Evaluación de la contribución del oleaje al transporte longitudinal
 - Modelación bidimensional de la dinámica litoral bajo condiciones de eventos de Nortes
 - i. Generación de malla computacional
 - ii. Selección de casos de eventos de Norte
 - iii. Pre-procesamiento de datos de entrada al modelo y condiciones de frontera
 - iv. Simulación de condiciones bajo eventos seleccionados
3. Estudio de rehabilitación de dunas como estructuras de protección a la laguna
 - Simulación numérica de alternativas

I.IV. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en Las Coloradas, que es un puerto pequeño ubicado en el municipio de Río Lagartos, al noreste del estado de Yucatán. Las Coloradas se localizan sobre la isla de barrera que separa al mar de la Ría de Lagartos, por tal motivo se le considera también dentro del área natural protegida de la Reserva de la Biosfera de Ría Lagartos (Figura 5) y contempla una población de alrededor de 1151 habitantes (INEGI, 2016). El clima presente es cálido subhúmedo, con temperatura media anual de 25.6°C y máximas de 36°C con humedad relativa del 84.7% (DIGAOHM SEMAR, 2006), precipitaciones del mes más seco menor a 60mm, se presentan dos estaciones bien definidas, la primera es la de lluvias que abarca de junio a octubre, mientras que la época de secas se da de febrero a mayo (Vázquez-Lule, 2009).



Figura 5. Ubicación de la Reserva Biosfera Ría Lagartos

En la península de Yucatán el viento predominante es del Este y del Noreste con velocidades entre 3 y 6 m/s. Sin embargo, estas condiciones se ven afectadas debido a la posibilidad del paso de ciclones tropicales de mayo a noviembre y tormentas tropicales y Nortes de octubre a febrero (Sturges, Wiseman, & W.J, 1999). Como de los vientos, el clima de oleaje de las costas se caracteriza por una baja energía, con direcciones predominantes del primer cuadrante (NE)(Cuevas Jiménez & Euan Ávila, 2009). En Las Coloradas las olas llegan de un mismo sector direccional en más de un 45%, dominando la ocurrencia de alturas no mayores de 0.5m. En temporada de *Nortes* el oleaje cercano a la costa alcanza alturas de hasta 1.84m mientras que el oleaje mar adentro llega a 3.06m con períodos de 12 segundos (DIGAOHM SEMAR, 2006).

La zona de estudio abarca 15 km aproximadamente, iniciando en la coordenada 395723.62 m E, 2389935.86 m N y terminando en 410439.77 m E, 2385847.70 m N. La zona crítica denominada “Chocolatera” cubre alrededor de 2.7 km de extensión (Figura 6).

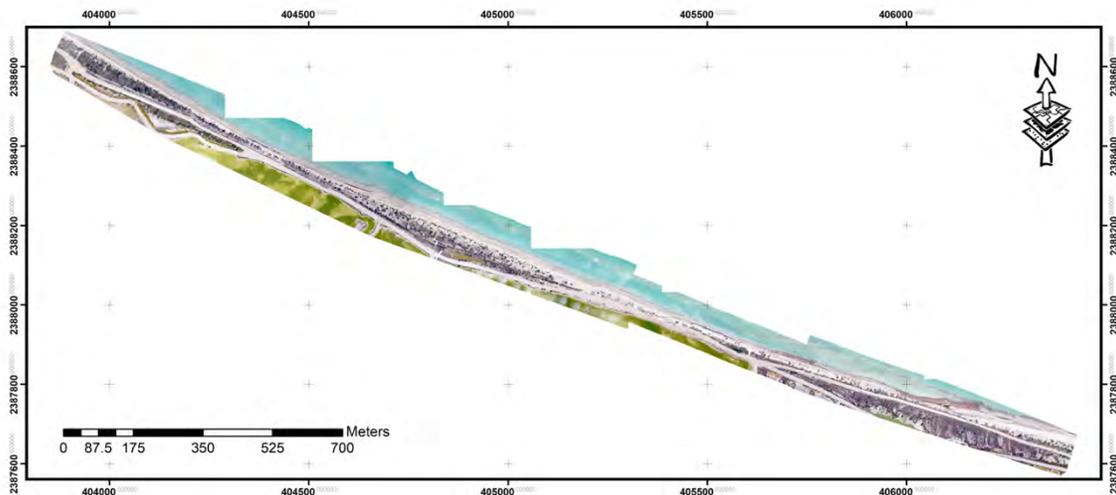


Figura 6. Zona crítica de estudio

I.V. ALCANCE DEL ESTUDIO

Este trabajo busca evaluar los efectos en la dinámica litoral que se presentan en la zona debido a los eventos de Norte, y con ello mostrar un panorama más detallado de las implicaciones que dichos eventos generan en Las Coloradas. Se busca que los resultados puedan ser utilizados en el futuro para establecer mejores alternativas para la solución del problema constante de erosión.

CAPÍTULO II
MODELOS NUMÉRICOS

Capítulo II

MODELOS NUMÉRICOS

II.1. MODELO UNIDIMENSIONAL LITDRIFT

LITDRIFT es un modelo unidimensional que se puede aplicar al estudio de corrientes generadas por oleaje, así como a la estimación de transporte longitudinal de sedimentos no cohesivos en una playa larga y uniforme, a partir de un clima de oleaje. LITDRIFT también se puede usar para calcular los tensores de radiación, corriente de larga distancia y velocidad del transporte de sedimentos en la costa.

El modelo LITDRIFT se compone de un módulo de cálculo de corriente longitudinal y otro de transporte de sedimentos. El primero incluye la descripción de las olas regulares e irregulares, es decir, corresponde a un modelo hidrodinámico en donde la transformación del oleaje, distribución transversal de la corriente longitudinal, la altura de ola y la sobre elevación del mar se obtienen a partir de las ecuaciones de balance de momento. Por otro lado el módulo del transporte de sedimentos calcula el transporte a partir de los parámetros hidrodinámicos obtenidos de la simulación del oleaje mediante el modelo de transporte de sedimentos para ondas y corrientes STP (Sediment Transport Program) por sus siglas en inglés. Las tasas de transporte se obtienen en función de las condiciones del oleaje local, corrientes y características del sedimento, dando como resultado una descripción de la distribución del transporte a lo largo de la costa a partir de un perfil batimétrico. Este módulo ofrece 4 opciones de cálculos:

- ❖ Corrientes longitudinales: Ofrece el cálculo de condiciones de oleaje y distribución de corrientes longitudinales a partir de un perfil transversal.

- ❖ Tasas de transporte litoral: Calcula la distribución del sedimento a lo largo de un perfil de playa mediante los resultados obtenidos en la sección de corrientes longitudinales.
- ❖ Transporte anual: Representa la cantidad anual de transporte longitudinal de sedimentos neto y bruto, y su distribución en la sección transversal perpendicular a la costa. Esto se calcula a partir de una serie temporal de oleaje y a través de un perfil transversal dado.
- ❖ Transferencia del clima del oleaje: Este modelo calcula las condiciones de onda en un punto específico del perfil transversal dado.

II.I.I Cálculo de transporte de sedimento

Para el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos, el modelo LITDRIFT utiliza las ecuaciones básicas para oleaje regular e irregular, donde los fenómenos considerados incluyen la fricción de fondo no uniforme, la refracción, asomeramiento y rotura de oleaje.

Rotura del oleaje

El modelo utiliza el criterio para rotura de oleaje desarrollado por McCowan (1891), quien explica que las ondas rompen cuando su altura de rotura se convierte en una fracción de la profundidad del agua:

$$\gamma = \frac{H}{D} = 0.78 \quad \text{Ecuación i}$$

Refracción

Para la refracción se usa la ley de Snell donde el coeficiente de refracción refleja el cambio en la altura de ola provocada por el giro o cambio de dirección de la misma y que esta dada por:

$$\text{sen } \theta = \frac{(\text{sen } \theta^*) L}{L^*} \quad \text{Ecuación ii}$$

Donde

* es el punto de referencia en el perfil

L es la longitud de onda calculada a partir de la ecuación de dispersión de donde deriva el factor Kh, dado por:

$$Kh = \frac{w^2 h}{g} \quad \text{Ecuación iii}$$

Donde:

- ❖ w^2 = frecuencia angular
- ❖ h = profundidad
- ❖ g = gravedad

Si $Kh < 1$ entonces la longitud de onda es calculada mediante la siguiente expresión

$$L_o = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad \text{Ecuación iv}$$

Si $Kh > 1$ el modelo usa la expresión dada por

$$L = \frac{2\pi h}{\sqrt{Kh} \left(1 + \frac{Kh}{6} \left(1 + \frac{Kh}{5} \right) \right)} \quad \text{Ecuación v}$$

Donde:

- ❖ T = período de la ola

Asomeramiento

El modelo calcula la altura de ola mediante la ecuación de la conservación del flujo de energía

$$H^2 * c(1 + G) * \cos \theta \approx \text{constante} \quad \text{Ecuación vi}$$

Donde: c es la celeridad (L/T)

$$G = \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \quad \text{Ecuación vii}$$

Los datos de entrada requeridos para utilizar el modelo de transporte de sedimentos son el perfil transversal de la playa con las características físicas del sedimento y el clima de oleaje seleccionado.

Los parámetros del clima de oleaje requeridos son:

- ❖ H = altura de ola
- ❖ T = período de ola
- ❖ Velocidad de corriente
- ❖ Rotura
- ❖ Gradiente de fondo

Las características del sedimento en el perfil:

- ❖ Tamaño medio de grano (D_{50})
- ❖ Dispersión geométrica del sedimento
- ❖ Fricción de fondo
- ❖ Velocidad media de caída
- ❖ Temperatura del agua

Dispersión geométrica del sedimento

La dispersión del sedimento se expresa por los tamaños de grano asociados a los percentiles D_{16} y D_{84} y se utiliza para obtener una clasificación de los sedimentos dependiendo del intervalo en el que se encuentren (Pedrozo Acuña, 2011). Una forma de medir dicha distribución es a través de la dispersión geométrica tal que:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad \text{Ecuación viii}$$

Fricción de fondo

El modelo utiliza la relación entre el número de Manning y la rugosidad de Nikuradse (K_s) que está relacionado con el diámetro de grano medio (D_{50}):

$$M = \frac{25.4}{K_s^{\frac{1}{6}}} \quad \text{Ecuación ix}$$

$$K_s = 2.5D_{50}$$

Ecuación x

Velocidad media de caída

La expresión para obtener la velocidad de caída de una partícula esta dada por:

$$w = \left[\frac{4}{3} \frac{1}{Cd} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g D \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación xi

Donde: γ_s y γ son el peso específico del sedimento y del líquido en el que cae respectivamente, g es la gravedad, D es el diámetro de la partícula y Cd es el parámetro adimensional denominado coeficiente de arrastre que depende del número de Reynolds

$$Rw = \frac{wD}{\nu}$$

Ecuación xii

Siendo ν la viscosidad cinemática del líquido

II.II. MODELO ACOPLADO MIKE 21/3

El modelo acoplado MIKE21/3 comprende diversos módulos que incluyen:

- ❖ Hidrodinámico
- ❖ Transporte
- ❖ Derrames de petróleo
- ❖ Transporte de lodos
- ❖ Seguimiento de partículas
- ❖ Transporte de sedimentos
- ❖ Ondas espectrales

Los módulos usados en el desarrollo de este trabajo serán descritos a continuación:

II.II.I Olas espectrales SW

El modelado de oleaje es la base para desarrollar actividades en ingeniería costera, tales como la restauración de playas o estudios morfo-dinámicos. Este módulo de propagación de oleaje tiene como objetivo obtener los parámetros de oleaje de cualquier zona de estudio y los componentes del tensor de radiación. Simula la transformación del oleaje generado por el viento a partir de un dominio, y sus resultados son los requeridos para la simulación de la hidrodinámica y transporte de sedimentos. El modelo incluye los principales fenómenos físicos, como es la interacción de onda a onda, disipación, refracción y shoaling (asomeramiento).

Para su solución numérica, el modelo incluye dos tipos de formulaciones. La primera es la solución paramétrica direccional desacoplada que se basa en la parametrización de la ecuación de conservación de onda, introduciendo el primer momento del espectro de acción de onda como variable dependiente siguiendo a Holthuijsen & Booij (1989). Esta formulación exige menos tiempo de cómputo y es suficiente para varias aplicaciones como la transformación de olas a pequeña escala, donde domina el oleaje totalmente desarrollado. Sin embargo, esta formulación no incluye los forzamientos debido al viento y no se puede utilizar si se desea generar el oleaje a partir de campos de viento.

La segunda formulación se denomina totalmente espectral y se basa en la ecuación de conservación de onda que describen Komen et al. (1994) y Young (1999). En esta formulación, el espectro de acción de oleaje de frecuencia direccional es la variable dependiente, se usa esta formulación para estudios de oleaje donde involucra el crecimiento de las olas y su generación a partir de campos de viento. En este trabajo se utilizó la formulación totalmente espectral para poder simular el oleaje junto con los campos de vientos de los *Nortes* seleccionados.

El modelo describe la dinámica de onda mediante la resolución de la ecuación de transporte para la densidad de acción de onda, la formulación esta dada en términos de la dirección de oleaje y la frecuencia angular relativa. Entonces la acción de densidad de onda está relacionada con la densidad de energía del espectro por:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad \text{Ecuación xiii}$$

Así, la ecuación que rige en el modelo totalmente espectral es la ecuación de balance de acción del oleaje (Ecuación de gobierno):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{\partial}{\partial t} N + \nabla \cdot (\bar{v} N) = \frac{S}{\sigma}$$

Ecuación xiv

Donde la primera parcial indica la tasa de cambio de densidad de acción en el tiempo, el segundo y el tercero término son las parciales de la propagación en el espacio, la cuarta y la quinta son los desplazamientos de la frecuencia relativa y direccional (refracción) respetivamente. El término $\bar{v}(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ representa la velocidad de propagación de un grupo de onda y el término $S(S(\sigma, \theta))$ es la fuente de energía que describe varios fenómenos físicos como todos los efectos de disipación e interacciones no lineales del oleaje:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Ecuación xv

Donde:

- ❖ S_{in} = energía del viento
- ❖ S_{nl} = transferencia de energía de onda debida a la interacción no lineal de ola-ola
- ❖ S_{ds} = disipación de energía del oleaje
- ❖ S_{bot} = disipación de energía por fricción de fondo descrita por Johnson & Kofoed-Hansen (2000)
- ❖ S_{surf} = disipación de energía debida a la rotura de oleaje descrita por Battjes & Janssen (1978) y Eldeberky & Battjes (1996)

Para la propagación del oleaje, la relación entre la frecuencia angular relativa y la frecuencia angular absoluta esta dada por medio de ecuación de dispersión lineal:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kh)} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$$

Ecuación xvi

Siendo:

- ❖ g = gravedad
- ❖ k = número de onda
- ❖ h = profundidad

- ❖ \vec{k} = vector de número de onda con magnitud k y dirección θ
- ❖ \vec{U} = vector de velocidad de corriente

II.II.II Hidrodinámico HD

Es un modelo de dos dimensiones que simula la variación de la superficie libre del mar y su circulación a partir de la resolución de las ecuaciones para la conservación de la masa, momento, salinidad y temperatura en respuesta a la variedad de forzamientos que le sean asignados, siendo la densidad dependiente de la salinidad y temperatura. Dichas ecuaciones son derivadas de las de Navier-Stokes con promedios de Reynolds, considerando incompresibilidad, flujo de Boussinesq y presión hidrostática.

Así, la ecuación de conservación de la masa está dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad \text{Ecuación xvii}$$

Junto con las ecuaciones de momento para las componentes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - g \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial sxx}{\partial x} + \frac{\partial sxy}{\partial y} \right) + Fu + \frac{\partial}{\partial z} \left(vt \frac{\partial u}{\partial z} \right) + uxS$$

Ecuación xviii

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = fu - g \frac{\partial n}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial sxy}{\partial x} + \frac{\partial syy}{\partial y} \right) + Fv + \frac{\partial}{\partial z} \left(vt \frac{\partial v}{\partial z} \right) + vxS$$

Ecuación xix

Donde:

- ❖ x, y, z = coordenadas cartesianas
- ❖ u, v, w = componentes de velocidad
- ❖ t = tiempo
- ❖ f_u, f_v = fuerza de coriolis dada por $2\Omega \sin\phi$
 - Ω = velocidad angular

- ϕ = latitud
- ❖ n = elevación de superficie libre
- ❖ h = profundidad total
- ❖ g = aceleración
- ❖ ρ_0 = densidad
- ❖ P_a = presión atmosférica
- ❖ S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} = componentes del tensor de radiación
- ❖ u_x, u_y = velocidades de descarga de las fuentes de agua
- ❖ S = magnitud de descarga
- ❖ F_u, F_v = son componentes de fricción
 - A = viscosidad de Eddy

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad \text{Ecuación xx}$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad \text{Ecuación xxi}$$

A partir de las ecuaciones anteriores el modelo realiza la solución numérica mediante la discretización espacial, tiempo de integración y condiciones de frontera usando el método euleriano del elemento finito, éstos aspectos determinan la precisión de los resultados y el tiempo de simulación. Para la discretización se utiliza un dominio que puede ser de elementos triangulares o rectangulares. El modelo ofrece dos tipos de solución para controlar la discretización, denominadas de primer orden y de orden mayor; la primera solución ofrece un tiempo de cálculo computacional más rápido pero la precisión es menor, mientras que el de orden mayor ofrece un tiempo computacional más deficiente sin embargo los resultados obtenidos son más precisos. Para la estabilidad del modelo se usa el número de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), que es una condición de convergencia de ecuaciones dada a partir del cociente entre la velocidad física de propagación y la velocidad numérica. Este valor debe estar entre 0 y 1, en esta ocasión el número CFL crítico usado es 0.80 pues ha demostrado mejorar la estabilidad y reducir el tiempo computacional.

II.II.III Transporte de Sedimento ST

Este módulo permite estimar la tasa de transporte de arena considerando solo la carga del lecho mediante la opción de dos tipos de modelos; por corriente o por la combinación de corrientes y olas. Sus cálculos se basan en las condiciones hidrodinámicas, condiciones de oleaje y propiedades del sedimento, utilizando la componente de velocidad horizontal. Para el modelo de corriente las tasas de transporte se calculan directamente de las simulaciones en función de las condiciones reales, mientras que para la opción de corrientes y olas la velocidad de transporte se calcula por interpolación lineal en una tabla de transporte de sedimentos. Éste trabajo utilizó el modelo de corrientes y olas.

Para la estimación de las tasas volumétricas de transporte por unidad de ancho, el modelo lo calcula mediante:

$$q_t = q_b + q_s \quad \text{Ecuación xxii}$$

En donde q_b y q_s se obtienen a partir de:

$$q_b = 0.005Uh \left[\frac{U - U_{cr}}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \right]^{2.4} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2} \quad \text{Ecuación xxiii}$$

$$q_s = 0.0125Uh \left[\frac{U - U_{cr}}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \right]^{2.4} \left(\frac{d_{50}}{h} \right) \left(\frac{1}{D_*} \right)^{0.6} \quad \text{Ecuación xxiv}$$

Siendo:

- ❖ U = velocidad horizontal promediada en vertical en m/s
- ❖ U_{cr} = velocidad umbral de inicio del sedimento en m/s
- ❖ h = profundidad del agua en m
- ❖ g = gravedad m^2/s
- ❖ d_{50} = diámetro medio del grano en m
- ❖ s = densidad específica en kg/m^3
- ❖ D_* = es un diámetro adimensional del sedimento que se expresa como:

$$D_* = d_{50} \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación xxv}$$

❖ ν = viscosidad cinemática del agua en m^2/s

Para el forzamiento se utilizan también dos opciones; la primera puede ser tomada del oleaje directo del modelo acoplado SW o bien, puede ser especificado mediante una serie de tiempo, de esta manera se puede mantener dichas variables constantes en el dominio pero variables en el tiempo.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

Capítulo III

METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un análisis de la dinámica litoral en Las Coloradas, Yucatán, para poder tener información disponible que permita elaborar estrategias de mitigación de erosión y recuperación del cordón dunar para la protección de las lagunas salineras. Por lo que es indispensable caracterizar la zona de estudio mediante la hidrodinámica y transporte de sedimentos. En este apartado se describe la metodología utilizada para cumplir con dicho objetivo.

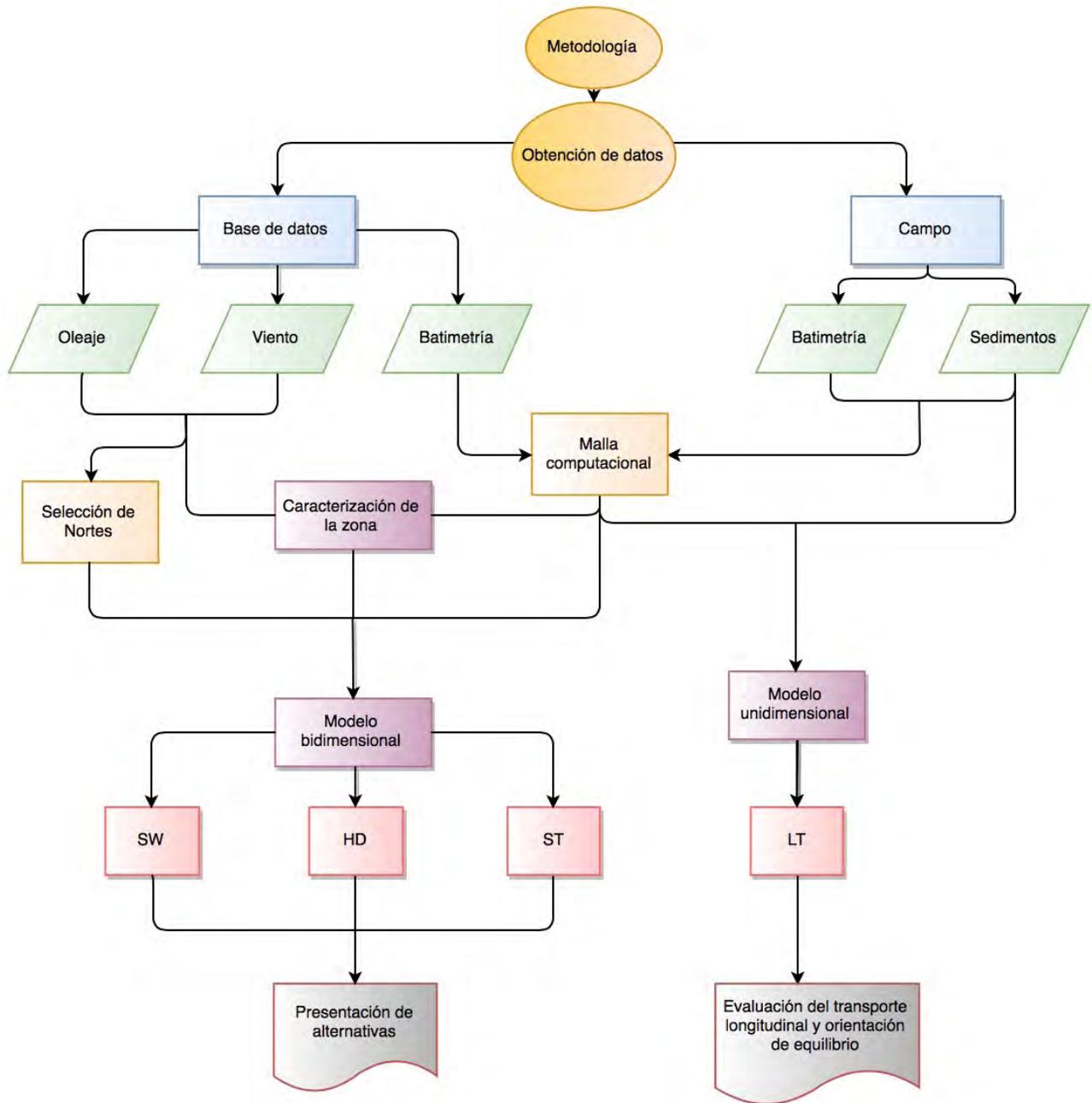


Figura 7. Diagrama de la metodología utilizada

III.I. CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE

Debido a la falta de series largas de datos medidos de oleaje, para la caracterización se utilizaron los datos disponibles de un hindcast, que son predicciones que se realizan en base a condiciones de viento del pasado, lo que permite obtener series largas de tiempo de oleaje, viento o corrientes de un área específica. El Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) generó en el modelo MIKE 21 SW una base de datos para el Golfo de México y Mar Caribe utilizando datos de vientos obtenidos del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR). El hindcast fue realizado a partir de una malla flexible con resolución de 30km en el Mar Caribe y 20km en el Golfo de México, con resolución de 3.5km. Obteniendo datos de oleaje con cobertura de 30 años que abarcan del 01 de enero de 1979 hasta el 31 de diciembre del 2008 y proporcionan información a cada 3 horas de altura significativa de ola (H_s), período pico de oleaje (T_p), dirección media de oleaje, velocidad y dirección del viento (Appendini, Torres-freyermuth, et al., 2012).

Para la caracterización del oleaje se determinó el clima medio de oleaje medio, mientras que para la selección de los diferentes casos de eventos de norte se realizó el análisis de oleaje extremal, para ello se descargo la información que esta ubicada en la boya con Latitud 21.70963669 y Longitud -87.89785004 a una profundidad de 10 metros aproximadamente (Figura 8).

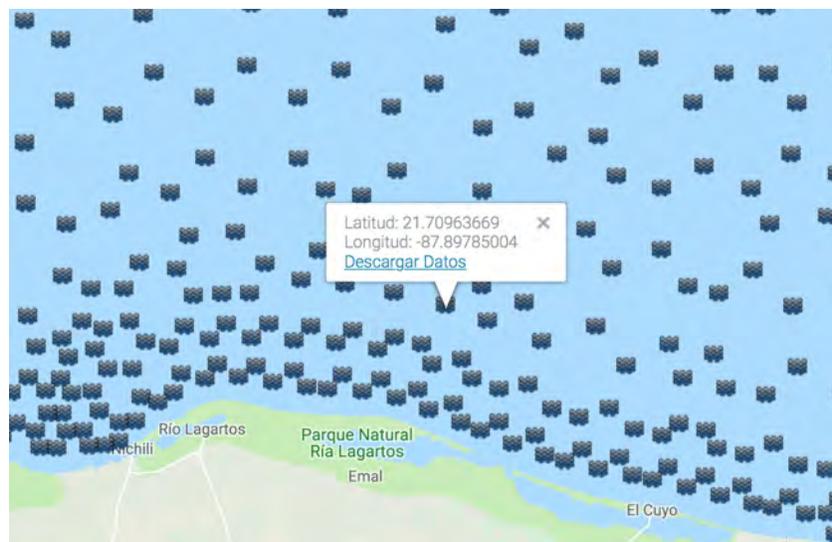


Figura 8. Ubicación de boya para descargar datos

III.I.I Análisis medio de oleaje

El objetivo de éste análisis es reproducir aquellas condiciones frecuentes del oleaje en el año climático medio, es decir obtener la probabilidad de que un valor no sea superado en la serie temporal media de la zona de estudio. Para el análisis de dicho régimen se ajustaron los datos de Hs y Tp a una serie de funciones de distribución para encontrar la que mejor represente su comportamiento. Para dichas distribuciones, tabla de probabilidades direccional y diagrama de distribución conjunta de Hs-Tp se utilizó el software CAROL® (desarrollado por el IH-Cantabria) y Matlab®. Los datos se ajustaron a funciones de distribución del tipo Normal, Log-Normal, Weibull de mínimos y Gumbel de máximos para obtener el mejor coeficiente de relación (R2). En este análisis, el mejor ajuste fue el de Log-Normal dada por la función de densidad:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{[\ln(x)-\mu]^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ecuación xxvi}$$

Donde σ y μ son la desviación estándar y la media de la función de $Y = \ln(x)$.

III.I.II Análisis extremal de oleaje

El análisis por valores extremos tiene muchas aplicaciones en la práctica, un ejemplo claro mencionado por Coles, (2001) por ejemplo es que para los criterios en el diseño de defensas costeras, es necesario un rompeolas que proteja la costa de todas las alturas de ola que se espera ocurran durante 100 años. Según Coles, para obtener dichos valores es necesario usar datos de años anteriores para hacer extrapolaciones usando los valores extremos. Por lo que el análisis extremal se realiza para la caracterización de eventos extremos para determinada zona de estudio a partir de un conjunto de datos. Dicho análisis, puede ser mediante dos métodos; el primero a partir de datos máximos alcanzados en un período fijo comúnmente anuales y el segundo, usando datos máximos que se encuentran sobre un umbral establecido o presentado en eventos extremos. Para la evaluación de los diferentes escenarios oceanográficos y selección de casos de estudio, se determinó el clima de oleaje extremal a partir de la serie de oleaje de 30 años tomada del Hindcast (Figura 9).

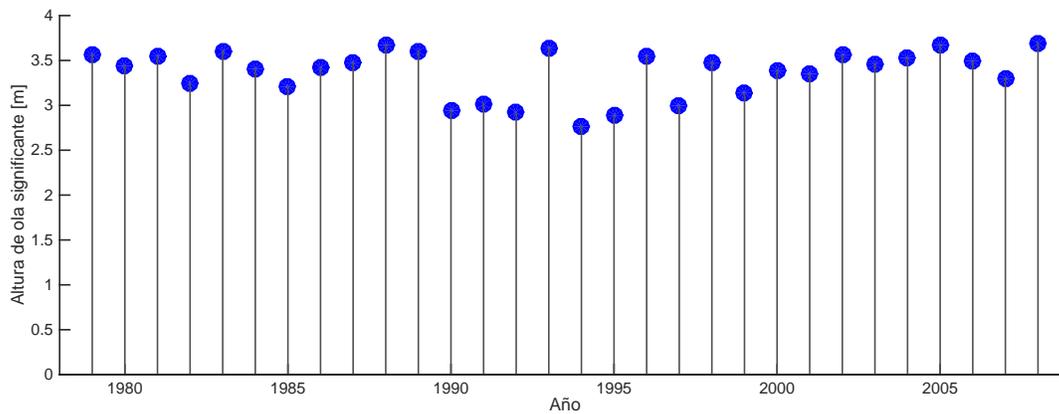


Figura 9. Valores máximos anuales tomados de la serie de oleaje del hindcast

EL análisis se realizó mediante la caja de herramientas de Mike ZERO llamado EVA (Extreme Value Analysis) que comprende un conjunto de rutinas para los análisis de valores extremos. EVA utilizó el método de Weibull junto con los períodos de retorno considerados como los cuantiles de la distribución de valores extremos, es decir que dicho período es el tiempo medio entre esos sucesos independientes y se mide a partir de la inversa de la probabilidad de que el evento ocurra (Ibañez Rosales, 2011). La función de distribución de probabilidad del método es:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad \text{Ecuación xxvii}$$

Donde k es el parámetro de forma, λ el parámetro de escala y x la variable.

Mientras que la función de densidad de probabilidad viene dada por:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x - \theta}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-\theta}{\lambda}\right)^k} \quad \text{Ecuación xxviii}$$

Siendo θ el parámetro de localización.

Una vez definida la función a utilizar, se procedió a definir el método de ajuste que consiste en estimar los parámetros de distribución antes mencionados para ajustar la función lo máximo posible a los datos. Para este análisis se utilizó el método de los L momentos, que son de creación más reciente similares al método de los momentos (media, varianza o

momentos superiores) pero tienen menores varianzas muestrales y son más robustos a la influencia de los valores dispersos (Campos-Aranda, 2015).

Cuando el oleaje se presenta en condiciones extremas, es común que esté sometido a una gran incertidumbre ya que el tamaño de las muestras o el número de datos que se tienen es limitado en comparación a los períodos de retorno a los que se extrapola, es por ello que cuando se trabaja con técnicas estadísticas, es de gran utilidad dar medidas de la exactitud de las estimaciones realizadas, es decir establecer intervalos de confianza. Existen diversos métodos para obtener dichos intervalos, esto a partir de lo que se conoce como bondad de ajuste que consiste en combinar la función de distribución y los métodos de ajuste para obtener un intervalo de confianza seleccionado. Para obtener un intervalo de confianza razonable se utilizó el método conocido como PPCC1 (Coeficiente de correlación del gráfico de probabilidad basado en la correlación entre observaciones ordenadas y las estadísticas de orden correspondientes).

III.I.III Selección de eventos de Norte

Debido a los estudios limitados que se encuentran acerca de los Nortes, el estudio implícito de éstos en la caracterización del clima de oleaje (Appendini, 2017) permite conocer las implicaciones que estos fenómenos producen al oleaje. Es por ello que para éste trabajo la selección de los eventos se realizó mediante el análisis extremal de oleaje y viento. En el análisis extremal se obtuvieron las alturas de ola más alta de cada año (Figura 9), considerando que el período de ocurrencia para tormentas tropicales y huracanes es distinto al de los Nortes, basándose con datos de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) se evaluaron las fechas de cada evento y se eliminaron las provenientes de tormentas y huracanes, quedando solo los eventos en fechas de Noviembre a Febrero considerados meses en donde la presencia de Nortes es mayor, posteriormente se analizó la dirección del oleaje y del viento así como su duración dentro de la serie de tiempo para comprobar que el evento cumpla las características definidas para considerarlo un Norte.

III.II. PERFILES DE PLAYA Y LÍNEA DE COSTA

Los perfiles de playa son medidas precisas de la inclinación y del ancho de la playa, siendo un método práctico para caracterizar y hacer el seguimiento a los cambios morfológicos de una playa. El perfil es el resultado de complejos procesos de transporte y acumulación por lo que su información es útil para el estudio de la dinámica de las costas (Zetina et al., 2008) y debe contemplar desde la zona supra mareal hasta la profundidad en donde el fondo comienza a ser afectado por las olas.

Para realizar los perfiles de playa es necesario ubicar un punto de control, en este trabajo se ubicó el punto de control ligado a la Red Geodésica Nacional (RGNA) de INEGI, lo que permitió georreferenciar todos los perfiles levantados. El punto se fijó utilizando un equipo GPS RTK marca LEICA modelo GS09 ubicado en la azotea de una de las construcciones de la villa de playa de ISYSA (Figura 10). El equipo consiste en 2 aparatos; uno que funciona como estación base (punto de control) y el otro como estación móvil o rover, montada en un vehículo de apoyo para poder mantener constante la altura de la antena con respecto a la morfología del terreno. Las estaciones fueron programadas en el sistema de coordenadas UTM zona 16 N para sus posiciones geográficas y datum WGS84 para las elevaciones.



Figura 10. Ubicación del punto de control

La campaña se realizó del 10 al 15 de abril de 2017 y se consideraron perfiles de playa a cada 200 metros aproximadamente, mientras que en la zona más dañada se colocaron perfiles a cada 50 metros para obtener una mayor precisión de la línea de costa. El levantamiento se realizó caminando en dirección perpendicular a la costa desde la parte superior de la duna, hasta una profundidad aproximada de 1m o hasta donde el vehículo permitió (Figura 11).

La información obtenida fue corregida y procesada para referir los datos al nivel medio del mar (nmm) local y obtener las coordenadas (x,y,z) de los puntos del levantamiento para cada perfil mediante el programa Leica Geo Office. Los datos obtenidos fueron utilizados para generar una mejor batimetría cerca de la costa, de igual manera se hizo la línea de costa para utilizarla como frontera en el modelo. Para obtener la línea de costa (cota 0) se utilizó el programa AutoCAD con ayuda de CivilCAD.

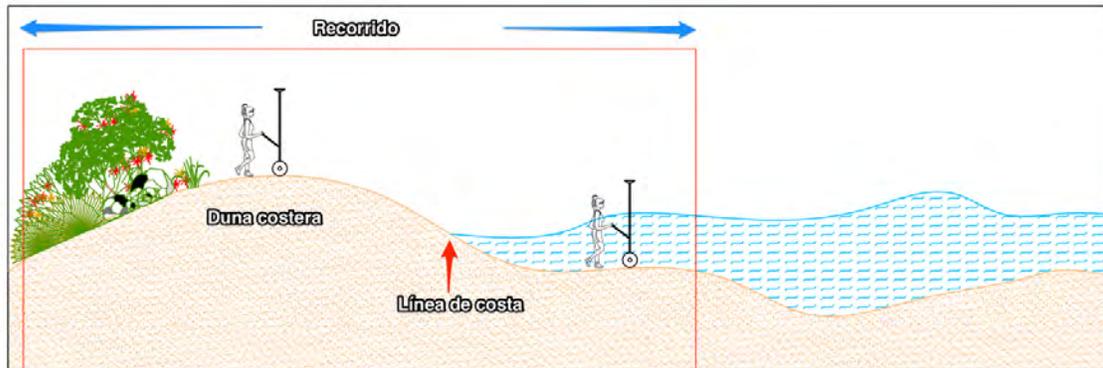


Figura 11. Recorrido realizado para la obtención de un perfil de playa

III.III. BATIMETRÍA

Los datos batimétricos se obtuvieron de las mediciones realizadas en campo por la empresa Axis Ingeniería frente al área de estudio (Figura 12), la doctora Cecilia E. Enríquez Ortiz de la facultad de ciencias de la unidad académica de Sisal de la UNAM colaboró con una batimetría realizada dentro de la laguna y por último se complementó la información con la base de datos ETOPO1 para la zona más lejana.

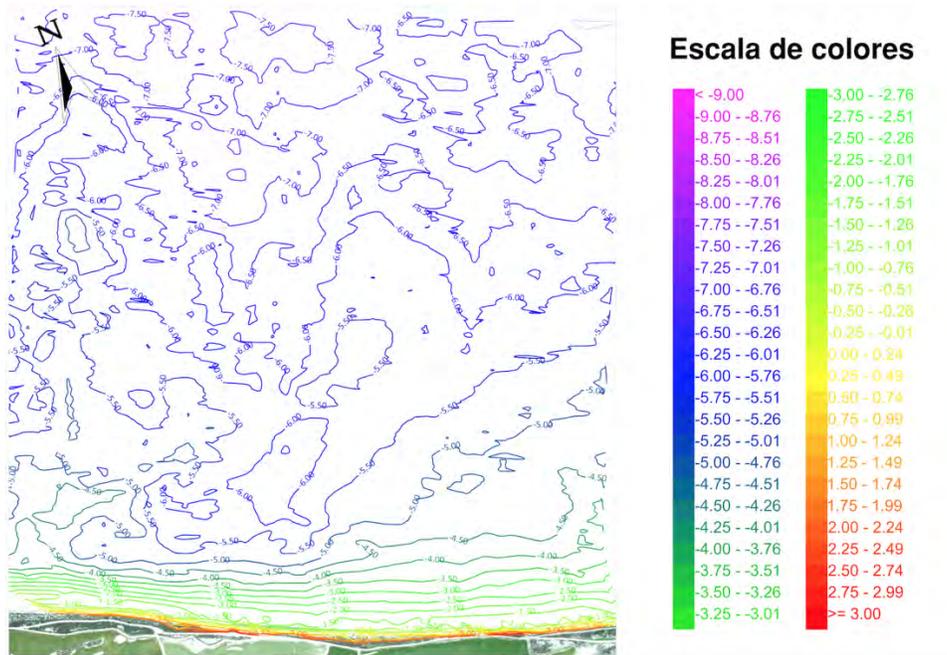


Figura 12. Batimetría de la zona de estudio

III.IV. GRANULOMETRÍA

Las playas y dunas son los lugares donde existe mayor acumulación de sedimentos que son transportados por vientos y corrientes marinas, es decir que representan los ambientes de sedimentación más importantes del mundo y son considerados ecosistemas sumamente dinámicos (Moreno-Casasola, n.d.). La granulometría es un estudio que se realiza para conocer las características de los sedimentos ya que están constituidos por una gran variedad de partículas que difieren entre sí, siendo las principales características que interesan en un él: su densidad y peso específico, tamaño de grano, forma y velocidad de caída (García Flores & Maza Álvarez, 1998). Obtener dichas características permite conocer y clasificar los ambientes sedimentarios y juega un papel importante en el transporte y deposición de material granular, siendo el tamaño de grano la propiedad más fundamental de las partículas granulares (Blott & Pye, 2001). Para éste trabajo se realizó el análisis granulométrico a muestras tomadas de la zona de estudio para la obtención del tamaño de grano D50, D16 y D84 y para la obtención de las muestras se realizó una salida de campo el día 28 de octubre de 2017. Debido a la extensión de la línea de costa, se recolectaron un total de 18 muestras en 6 perfiles de playa, 4 a cada 5 km, uno en 8.5km y otro en 12 km iniciando en la estación 0 + 000 y finalizando en el 15 + 000 (Figura 13A). En cada perfil se sacaron

3 muestras; uno en la zona seca (A), otro en la zona de swash (B) y por último en la barra interna (C) (Figura 13B), se tomaron aproximadamente 500 gramos de cada muestra y fueron recolectadas en bolsas de plástico tipo Ziploc previamente etiquetadas y georreferenciadas. Los puntos geográficos de las muestras se presentan en la Tabla 1.

Para el análisis en el laboratorio fue necesario realizar un tratamiento a las muestras para que se eliminen todos los elementos no contemplados como sedimentos. Uno de los métodos que se ha ido desarrollando en los últimos años, es el que usan sistemas de visión industrial destinados a estimar la granulometría de un material en donde el objetivo principal es la individualización de cada partícula. Uno de los aparatos utilizados para la obtención de la granulometría por este método es el CAMSIZER (Pirad, 2003), el cual se utilizó en este trabajo. El proceso que se llevó a cabo para el análisis inició con el cuarteo de cada muestra para obtener una representativa, luego se pusieron a secar durante 24 horas para después poder realizar la eliminación de materia orgánica (MO) presente. El método consiste en quitar manualmente la MO visible y luego lavar el sedimento con agua oxigenada para eliminar la MO no visible y de menor tamaño, por lo que la muestra fue colocada en un vaso de precipitado y posterior se agitó suavemente hasta observar que las partículas de MO más pequeñas hubieran desaparecido ocurriendo esto hasta que el agua oxigenada ya no genere burbujas al moverse y después se lavó varias veces con agua purificada para eliminar todo el agua oxigenada y dejar limpia la muestra. Finalmente las muestras se secaron de nuevo en el horno por 36 horas aproximadamente.

Para el análisis en el CAMSIZER fue necesario programar el software y establecer los parámetros a utilizar en las muestras, indicando los input y los outputs. Una vez que el software fue configurado se procedió a colocar una muestra (previamente pesada) en la canaleta vibratoria para iniciar con las mediciones. La carga de la muestra en dicho canal vibratorio permitió la separación de las partículas antes de que pasen por el área de medición. Otra característica que el CAMSIZER ofrece, es que cuenta con dos cámaras para cubrir todo el rango granulométrico, por lo que cada cámara cumplió una tarea diferente. La cámara base captó las partículas grandes y la cámara de zoom las partículas finas, lo que permitió registrar de manera más precisa toda la variación presente en la muestra.

Tabla 1. Coordenadas geográficas en UTM de los puntos en donde se obtuvieron las muestras de sedimentos

Estación	Zona seca (A)		Zona de swash (B)		Primera barra interna (C)	
	E	N	E	N	E	N
0 + 000	395812.00	2389942.00	395808.00	2389959.00	395805.00	2389977.00
5 + 000	400655.50	2389851.35	400653.00	2389866.00	400653.38	2389877.60
8 + 500	403940.14	2388651.41	403943.42	2388663.34	403940.29	2388677.31
10 + 000	405445.61	2387954.65	405442.00	2387969.00	405440.00	2387983.00
12 + 000	406428.37	2387648.93	406427.81	2387676.49	406426.20	2387685.14
15 + 000	409927.51	2386054.94	409933.18	2386069.85	409934.99	2386079.36

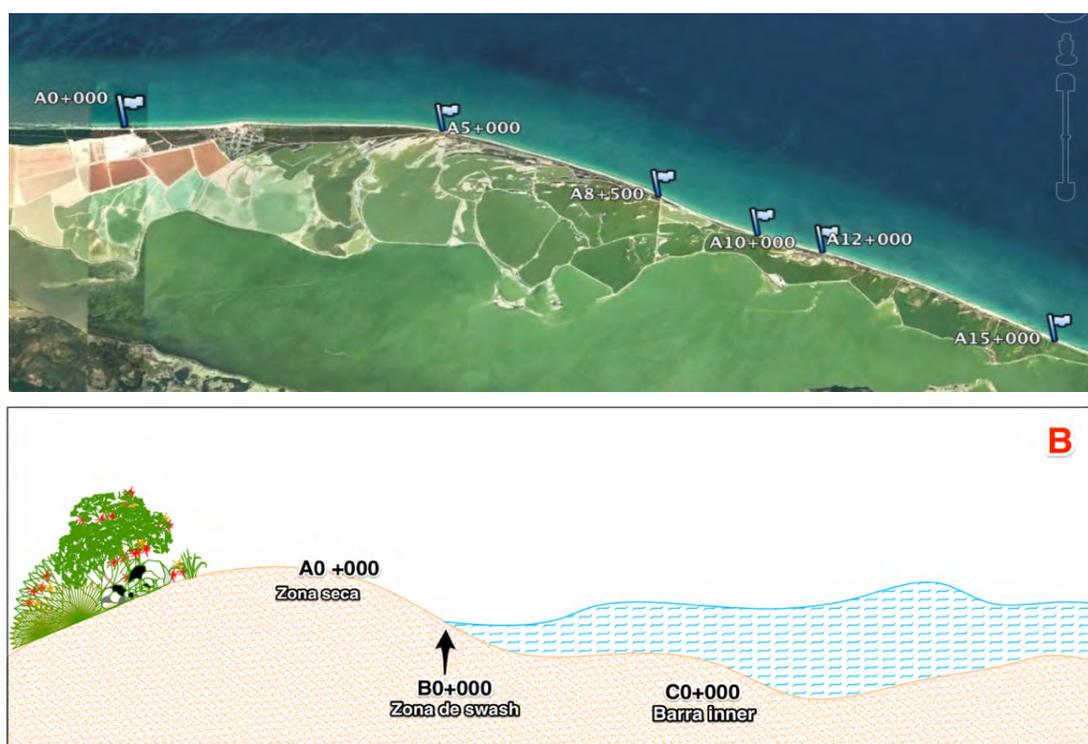


Figura 13. A) Cadenamientos para la obtención de muestras de sedimento
 B) Ubicación de muestras tomadas en cada perfil

III.V. IMPLEMENTACIÓN DE MODELACIÓN NUMÉRICA

Para la implementación de los modelos numéricos es necesario el uso de un dominio que represente las características físicas de la zona de estudio, de igual manera se requieren de ciertos parámetros y condiciones para que los resultados obtenidos sean lo mas cercanos posible a la realidad. En esta sección se presentan la metodología y los parámetros que se utilizaron para implementación de los modelos y la obtención de resultados.

III.V.I Malla computacional

Para poder implementar las simulaciones de los fenómenos físicos, la modelación numérica requiere de la creación de un dominio que represente el área de estudio. Dicho dominio puede dividirse en elementos más pequeños cuya unión y continuidad generan la malla computacional. Existen dos tipos de mallas, las estructuradas y las no estructuradas (Bern & Eppstein, 1992). Las mallas estructuradas consisten en que cada elemento de control esta rodeado del mismo número de elementos vecinos y se resuelven mediante el método de diferencias finitas, mientras que las no estructuradas utilizan el método del elemento finito y los elementos que la forman pueden tener diferentes resoluciones (García, 2009). La generación de la malla es un trabajo muy importante y requiere de numerosas modificaciones de los datos recolectados y su dominio debe considerar una zona más grande para que la propagación de las condiciones simuladas sean lo más estable posible al momento de llegar a la zona de estudio, por ello para su creación se utilizó el módulo disponible de MIKE Zero denominado Mesh Generator en donde se interpolaron los datos batimétricos para que cada elemento de la malla obtenga un valor. La malla que se utilizó es del tipo no estructurada (Figura 14), compuesta de 43692 elementos triangulares (flexible) con límites espaciales presentados en la Tabla 2 y con distintas resoluciones (distancia entre vértices) que van desde los 0.5km hasta los 25m, siendo la resolución más fina en la zona de estudio.

Tabla 2. Coordenadas geográficas en UTM de los límites de la malla computacional

Frontera	Punto inicial		Punto final	
	E	N	E	N
Sur	383321.71	2386971.13	420932.60	2377148.64
Este	420932.60	2377148.64	427690	2397071.24
Norte	427690	2397071.24	388559.55	2408296.67
Oeste	388559.55	2408296.67	383321.71	2386971.13

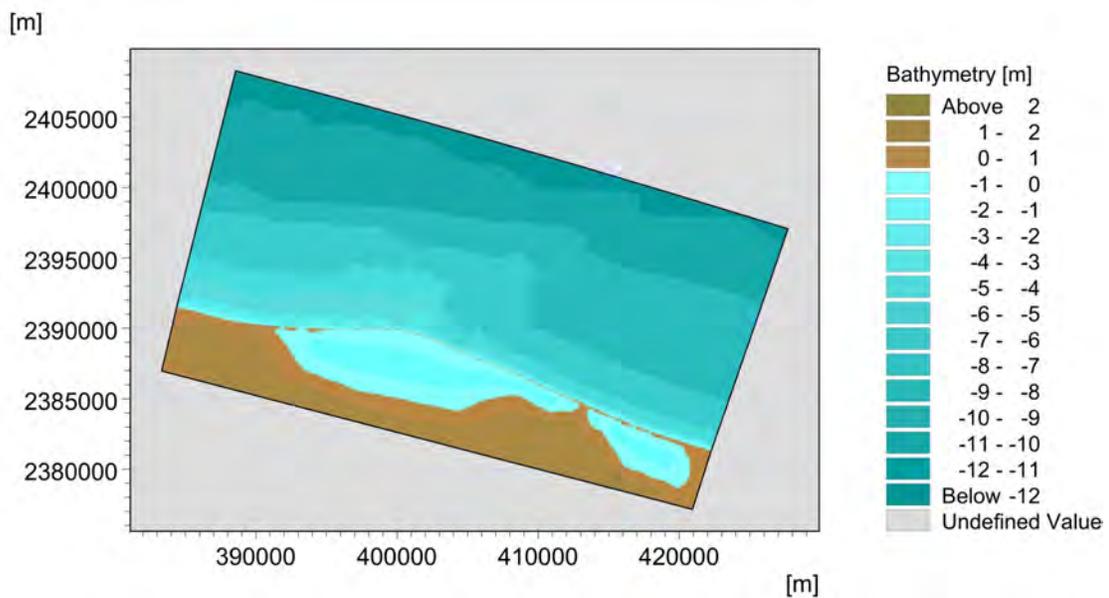


Figura 14. Malla computacional

III.V.II Evaluación del transporte longitudinal (Modelo Litpack)

Mediante el modelo LITDRIFT del paquete LITPACK del MIKE21 (DHI, 2016), es posible calcular la distribución del transporte de sedimentos no cohesivos a lo largo de un perfil transversal representativo de la zona de estudio, considerando condiciones uniformes a lo largo de la playa. Este modelo permite calcular la contribución del oleaje al transporte de sedimentos en base a su altura, dirección y período.

Para realizar la modelación con LITDRIFT y evaluar la contribución al transporte de sedimentos, se realizó el perfil transversal de la zona de estudio de acuerdo a las características del terreno y del sedimento (Figura 15).

Figura 15. Perfil transversal característico de la zona de estudio

Con los resultados obtenidos en este modelo fue posible elaborar un mapa de transporte litoral anual ($m^3/y/m$) para el perfil dado, de igual manera variando la orientación del perfil se obtuvo la variación del transporte de sedimentos lo que permitió determinar la orientación de equilibrio a lo largo de la zona de estudio. Esto se hizo mediante la elaboración de la gráfica alpha-Q (Figura 16), técnica que permite tener un conocimiento más amplio para la toma de decisiones en cuanto al manejo de la erosión costera (Appendini et al. 2012).

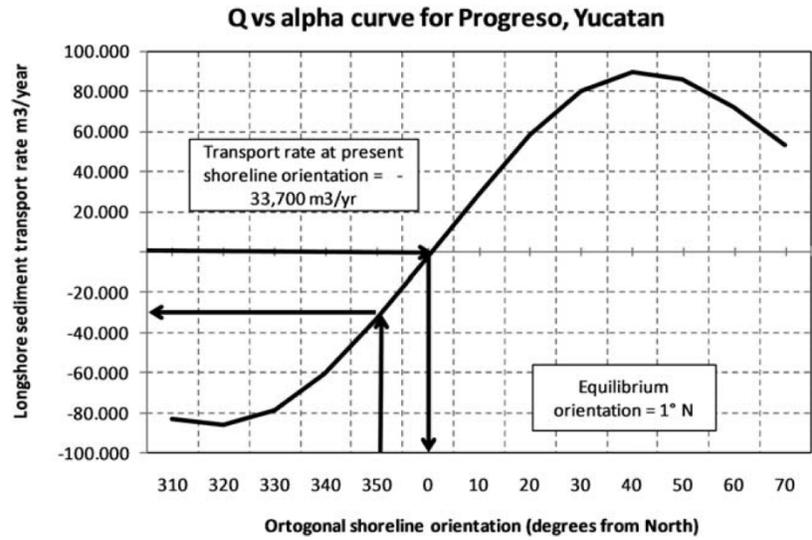


Figura 16. Curva alpha-Q obtenida por Appendini et al. 2012 en la Playa de Progreso, siendo el eje X la orientación de la línea de costa en grados (ortogonal) y el eje Y la de tasa de transporte longitudinal en m³/año

Los parámetros de entrada para el modelo se presentan en la Tabla 3

Tabla 3. Especificaciones del modelo LITDRIFT

Parámetro	Definición
Dominio	Malla no estructurada (Figura 14)
Selección del modelo	Litoral Drift
Tiempo	Fecha inicial de simulación Duración = Pasos de tiempo de interés
Batimetría	Perfil transversal Orientación del perfil (23°)
Fricción de fondo	0.026 [m] [Ecuación ix]
Elevación del nivel del mar	Constante
Corrientes	Constante
Oleaje	Variable en el tiempo, constante en el dominio
Descripción espectral de oleaje	Battjes-Janssen
Propiedades del sedimento	$D_{50} = 0.316$ [mm] Dispersión geométrica = 0.36 [Ecuación viii] Velocidad de caída = 0.05 [m/s] [Ecuación xi]
Temperatura del agua	25°C
Cálculo de sedimento	Teoría de Stokes de primer orden

III.V.III Modelo Acoplado (SW, ST, HD)

En el capítulo anterior se describieron los modelos que se utilizaron en éste trabajo, a continuación se presentan los detalles y parámetros para la implementación del modelo acoplado. El modelo de oleaje se presenta en la Tabla 4, el hidrodinámico en la Tabla 5 y el de transporte de sedimento en la Tabla 6.

Tabla 4. Especificaciones del modelo de propagación de oleaje SW

Parámetro	Definición
Dominio	Malla computacional (Figura 14)
Ecuaciones básicas	Formulación espectral = Totalmente espectral Formulación de tiempo = Estacionaria
Tiempo	Fecha inicial de simulación Duración = Pasos de tiempo de interés
Discretización espacial	Frecuencia logarítmica de discretización Número de direcciones = 16
Solución Técnica	De bajo orden y logaritmo rápido
Elevación del nivel del mar	Variación de los niveles generados de la simulación hidrodinámica
Corrientes	Variación de la corriente generadas de la simulación hidrodinámica
Viento	De cada evento de Norte
Rotura de oleaje	Especificada Gamma = 0.8 constante
Fricción de fondo	Tamaño de grano D ₅₀ = 0.316 [mm]
Condiciones iniciales	Cero espectral
Condiciones de frontera	Límite Este y Oeste = frontera lateral Limite Norte = Clima de oleaje de cada evento

Tabla 5. Especificaciones del modelo hidrodinámico HD

Parámetro	Definición
Dominio	Malla computacional (Figura 14)
Ecuaciones Básicas	Formulación espectral = Totalmente espectral Formulación de tiempo = Estacionaria
Período de simulación	Lo que dure cada evento
Solución Técnica	De alto orden y logaritmo rápido Incremento de tiempo = 0.01 [seg]
Áreas secas y mojadas	Profundidad seca = 0.005 [m] Profundidad mojada = 0.1 [m] Profundidad de inundación = 0.05 [m]
Densidad	Barotrópica
Viscosidad Turbulenta	Smagorinsky = 0.28 [m ² /s] Valor constante
Fricción de fondo	Número de Manning = 32 [m ^{1/3} /s] Valor constante
Viento	De cada evento de Norte
Tensor de radiación	Acoplado a la simulación del modulo SW
Condiciones iniciales	Elevación de superficie = 0 [m]
Condiciones de frontera	Límite Este y Oeste = Nivel de agua 0 [m] constantes Limite Norte = Flujo constante, componentes 0 [m ³ /s/m]

Tabla 6. Especificaciones del modelo de transporte de sedimentos ST

Parámetro	Definición
Dominio	Malla computacional (Figura 14)ia
Definición del modelo	Con oleaje y corriente
Propiedades del sedimento	Porosidad = 0.4 Tamaño de grano = $D_{50} = 0.316$ [mm]
Solución Técnica	De alto orden y logaritmo rápido Incremento de tiempo = 0.01 [seg]
Forzamiento	Oleaje de la simulación SW

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIONES

Capítulo IV

RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en la caracterización del oleaje y la influencia que tienen los eventos de *Norte* seleccionados en la dinámica del cordón dunar en Las Coloradas Yucatán. También se presentan los resultados de las simulaciones de las alternativas propuestas para la rehabilitación de la zona. Cabe recordar que todos los resultados de las simulaciones están basados en condiciones de oleaje, hidrodinámica y transporte de sedimentos.

IV.I. CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE

El análisis estadístico de oleaje permitió caracterizar el oleaje de la zona en base a sus porcentajes de ocurrencia por sectores direccionales y de intensidad. La Figura 17 representa la serie de tiempo de los 30 años del hindcast de la boya utilizada, a partir de lo cual se obtuvo la probabilidad discreta de las alturas de olas. En dicha distribución se observa que el mayor porcentaje de altura de ola registrado se encuentra entre el rango de 0.6 y 0.9m (Figura 18). Por otro lado, la distribución conjunta de $H_s - T_p$ (Figura 19) indica que éstas olas presentan períodos de entre 3 y 5 segundos. En la rosa de oleaje realizada para la serie (Figura 20), se aprecia que existe un gran porcentaje de oleaje incidente del NE y ENE con intensidades y alturas de ola en su mayoría entre 0.75 y 1.5m, coincidiendo en que provienen de la misma dirección que la información recolectada de (DIGAOHM SEMAR, 2006). Sin embargo, la altura de ola es mayor, esto puede deberse a que en este análisis el oleaje corresponde a aguas profundas. Así, el oleaje de mayor intensidad es proveniente de la dirección Norte con alturas mayores a 2.75m. El régimen medio fue definido ajustando los datos a la distribución Log-Normal debido a que se obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) del 99.52% como se

observa en la Figura 21.

Figura 17. Serie de tiempo de la boya utilizada

Figura 18. Histograma para obtener las

Figura 19. Diagrama de distribución conjunta

Figura 20. Dirección e intensidad de oleaje. La línea punteada indica la orientación de la playa

Figura 21. Gráfico del régimen medio de oleaje

A partir del análisis de oleaje extremal fue posible extraer los eventos de *Norte* para las simulaciones, donde se comprobó que las fechas seleccionadas (Tabla 6) presentan oleajes dominantes en dirección Norte, Noreste y Noroeste con alturas superiores a los 3 metros. Por otro lado, el viento presente en cada evento tiene una variación entre los 10 y 17 m/s con mayor ocurrencia también en las mismas direcciones del oleaje. Sin embargo cabe mencionar que existen vientos de otras direcciones procedentes de las brisas. La figura 22 presenta la rosa de oleaje y viento del evento 1, los demás gráficos pueden encontrarse en el anexo al final del documento.

Tabla 7. Eventos seleccionados para las simulaciones

Evento	Fecha	Altura de ola [m]	Dirección [°]	Viento [m/s]	Dirección [°]
Norte 1	23 de Diciembre de 1989	3.6	357	17	356
Norte 2	2 de Enero del 2008	3.69	3.9	15.3	9.6
Norte 3	27 de Febrero del 2002	3.55	3.1	13.4	19
Norte 4	4 de Noviembre del 2001	3.35	20	10.4	22.4
Norte 5	29 de Noviembre del 2003	3.46	356	11.8	10.5

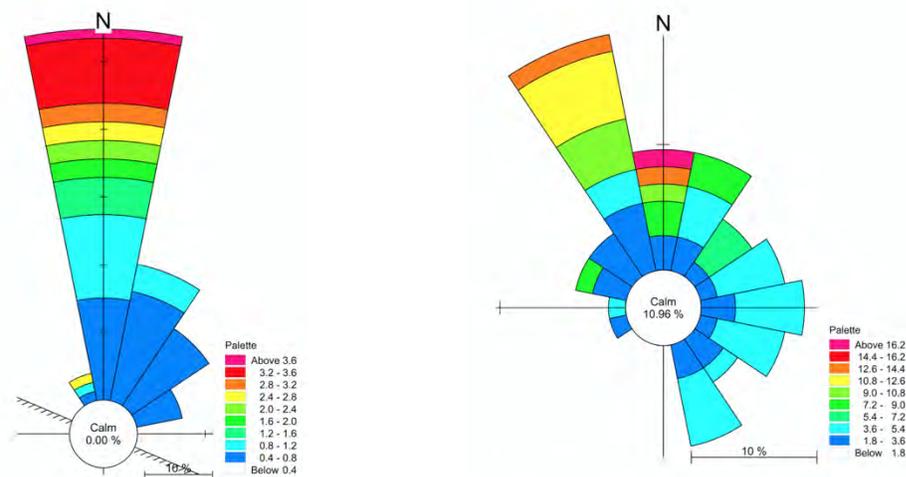


Figura 22. Rosas de oleaje y viento para el evento de Norte 1

IV.II. GRANULOMETRÍA

Los resultados de la granulometría se representan por el diámetro medio de grano conocido como D_{50} a lo largo de la zona de estudio. En la Figura 23 se puede observar la distribución y variación que se presenta a lo largo de los cadenamientos dentro de la zona de estudio. La zona seca (A), presenta una variación del D_{50} entre 0.2318 y 0.4193mm, mientras que los sedimentos tomados en la zona de swash (B) varían de 0.3782 a 0.5585mm y por último en la barra interna (C) la variación es mínima. Se observa que las muestras tomadas en el cadenamiento 15 + 000 presenta una variación considerable en comparación de los demás resultados, posiblemente debido a las complicaciones en la eliminación de materia orgánica durante el proceso de limpieza en el laboratorio.

En la Tabla 7, se muestran los registros de los tamaños de sedimentos, en donde la barra inner (C) presenta los sedimentos más finos, mientras que los sedimentos más gruesos están presentes en la zona de swash (B). Adicionalmente se presentan las densidades acumuladas de las 3 zonas (Figura 24, 25 y 26), donde se aprecian las variaciones del tamaño de sedimento y el porcentaje del peso retenido entre cada cadenamiento. Sin embargo, se consideró un tamaño de grano D_{50} constante de 0.31mm, que representa el promedio de los tamaños obtenidos en la zona, a fin de que en los modelos numéricos se pueda evaluar de manera adecuada el agente forzante sin introducir ruido por diferencias en transporte debido al tamaño de grano.

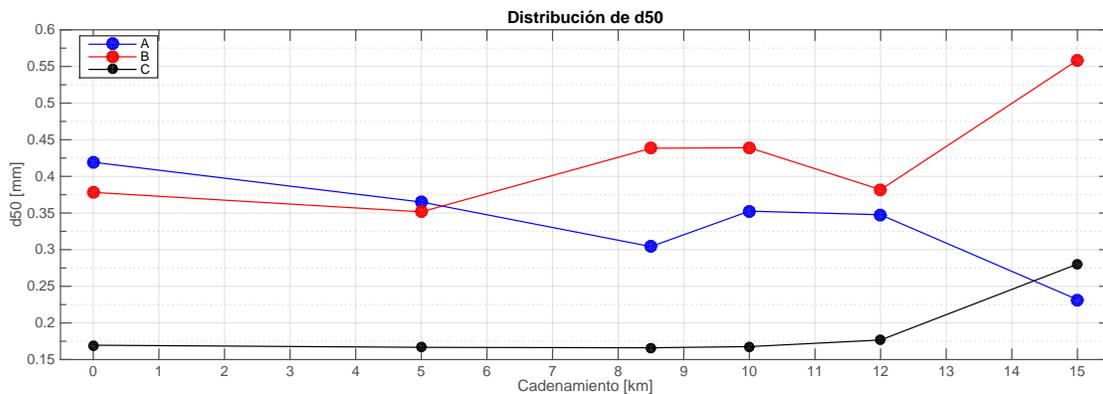


Figura 23. Distribución de sedimentos

Tabla 8. Registro de los tamaños de sedimentos para cada cadenamiento

Punto	D ₅₀		
	A	B	C
0 + 000	0.4193	0.3782	0.1696
5 + 000	0.3650	0.3516	0.1667
8.5 + 000	0.3042	0.4383	0.1661
10 + 000	0.3526	0.4391	0.1677
12 + 000	0.3476	0.3819	0.1767
15 + 000	0.2318	0.5585	0.2803

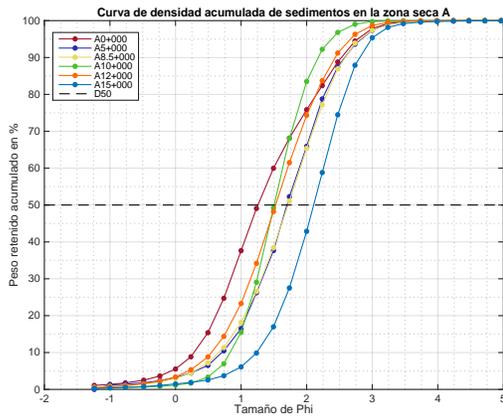


Figura 24. Representación de la curva de densidad de la zona seca

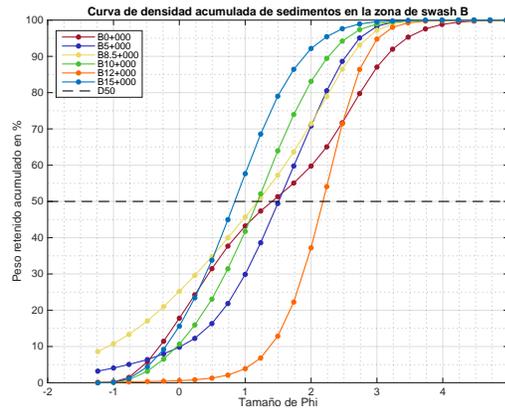


Figura 25. Representación de la curva de densidad de la zona de swash

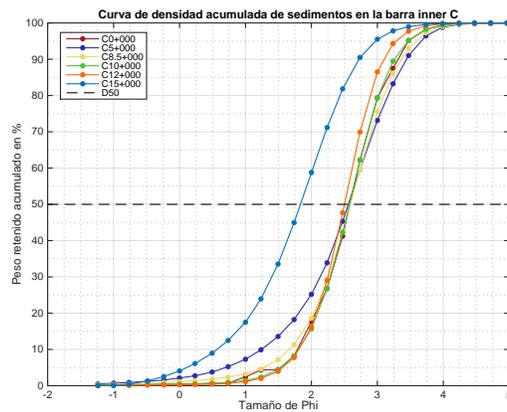


Figura 26. Representación de la curva de densidad de la barra inner

IV.III. RESULTADOS DE MODELADO LITDRIFT

Para conocer las tasas de transporte de sedimento de acuerdo a la orientación de la playa y poder obtener la orientación de equilibrio, se realizó la curva alpha-Q que se muestra en la Figura 27. La orientación de la costa en Las Coloradas es de 23° , que resulta en una tasa de transporte longitudinal de $16,000 \text{ m}^3/\text{año}$ con dirección Oeste, mientras que la orientación de equilibrio, donde el gradiente de transporte es nulo, se presenta con una orientación de la costa de 57° . Esta información es útil para analizar áreas más detalladas e identificar puntos específicos de erosión a partir de la orientación costera (Appendini, et al., 2012), lo que resulta importante o indispensable para estudios posteriores en donde se requiera garantizar la ganancia o la menor pérdida posible de sedimentos en la zona.

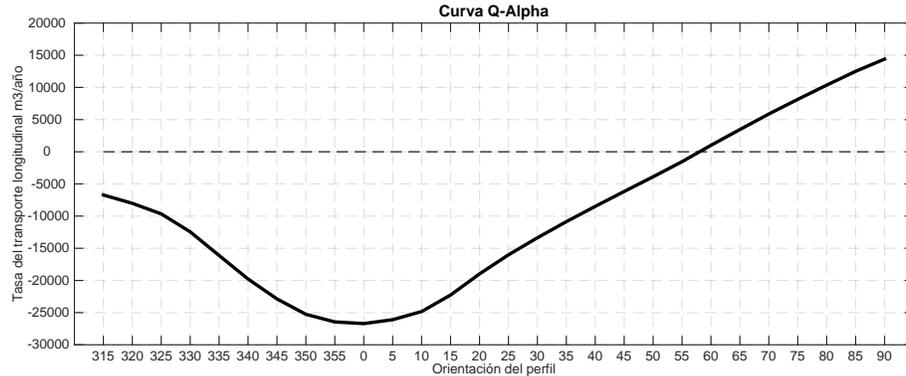


Figura 27. Curva alpha-Q del perfil transversal seleccionado. La posición de la flecha azul indica la orientación de la playa y la flecha roja expresa la orientación de equilibrio

Se calculó el transporte longitudinal para la zona de estudio a partir de un perfil característico, el cambio de volumen que se obtuvo se presenta en la Figura 28. Iniciando en la zona de estable hacia al Este, se aprecia que existe una erosión considerable de aproximadamente $11,000 \text{ m}^3/\text{año}$. Esta zona erosiva es el área de mayor interés ya que la erosión ha sido la preocupación constante de la salinera siendo que ahí fue donde se generó la ruptura de la duna tras el paso del huracán Wilma. Al continuar al Este, se ubica una zona de depositación cerca de El Cuyo, siendo de aproximadamente $24,000 \text{ m}^3/\text{año}$. De la zona estable al Oeste, primero se presenta una zona de depositación de aproximadamente $8,000 \text{ m}^3/\text{año}$, seguido de una zona de erosión de aproximadamente $6,000 \text{ m}^3/\text{año}$.

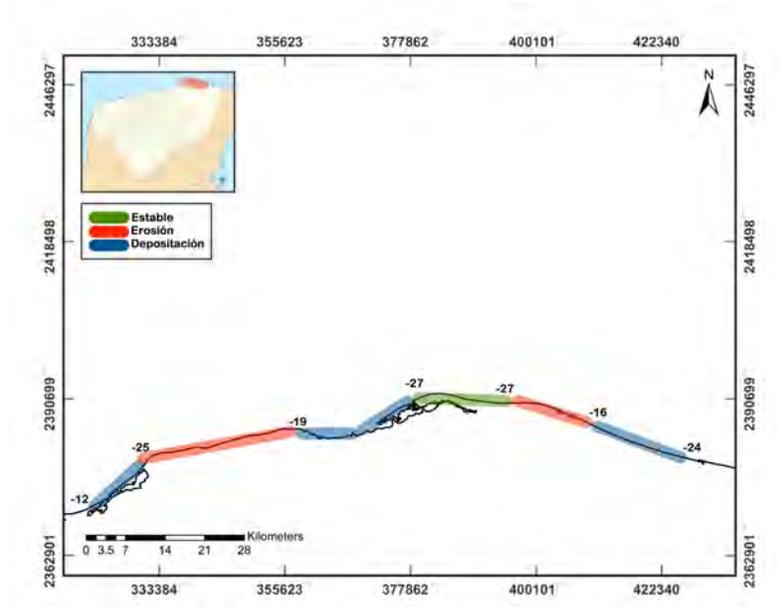


Figura 28. Cambio de volumen en el transporte longitudinal de la zona de estudio ($m^3/año \times 1000$)

IV.IV. RESULTADOS DE MODELACIÓN BIDIMENSIONAL

IV.IV.I Modelo de oleaje e hidrodinámico

Los casos de oleaje simulados corresponden a los eventos de *Norte* seleccionados con base en la altura y dirección del oleaje así como la intensidad y dirección del viento. A partir de las simulaciones de *Norte* se obtuvieron los parámetros del oleaje cerca de la costa así como los tensores de radiación que se utilizaron después para la generación de corrientes.

La Figura 29 muestra la distribución de las envolventes máximas del oleaje del evento de *Norte* 1 con las condiciones actuales de la zona de estudio. Se puede observar que la altura de ola profunda es mayor a los 3 metros propagándose hasta la costa, donde se obtiene una altura aproximada de 2 metros y después se disipa por rotura.

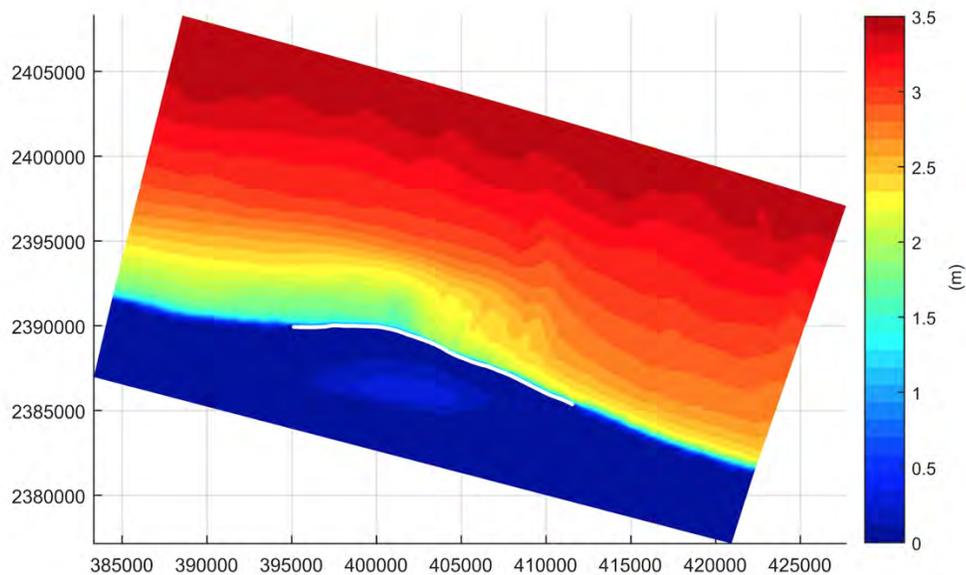


Figura 29. Propagación del oleaje del evento de Norte 1. La línea blanca indica la línea de costa.

Por otro lado, el modelo hidrodinámico permitió conocer las variaciones del nivel del mar (Figura 30). Para esto se seleccionaron 4 puntos a lo largo de la costa, donde si bien la variación del nivel del mar fue de 0.1 a 0.2m, se demostró que existen zonas donde la elevación del nivel del mar supera la duna y ocasiona inundaciones con distintas intensidades a lo largo de la costa (Figura 30). Cabe mencionar que en este trabajo no se le atribuyó ningún forzamiento a la laguna, por lo que la inundación se genera del mar hacia la costa. Las figuras de los eventos de *Norte 2* al evento de *Norte 5* se encuentran en el anexo al final del documento, en general se presentan alturas y afectaciones similares en cada caso.

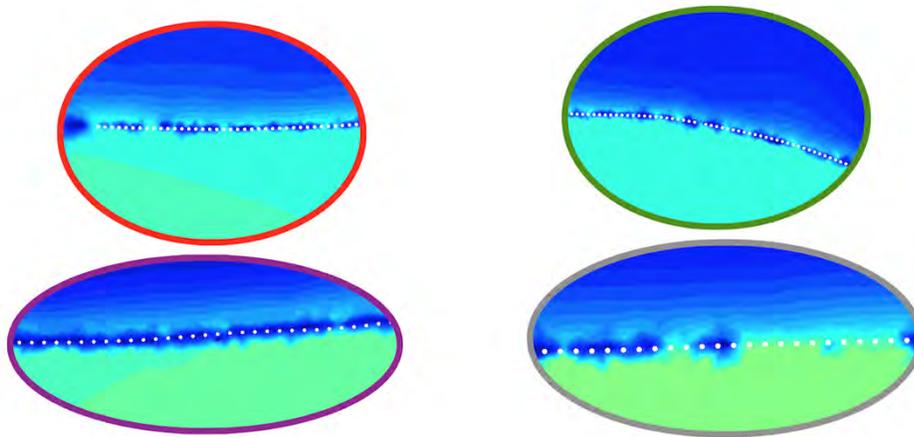
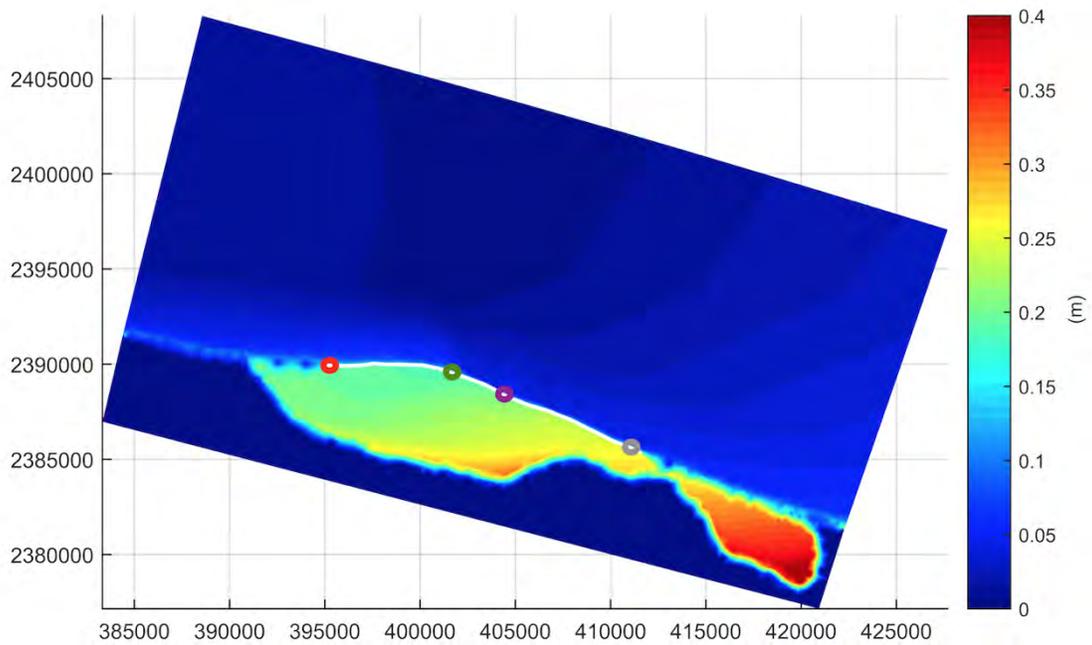


Figura 30. Envolvente máxima de la variación de superficie libre del evento de Norte 1. Los puntos de color indican los zoom in en la parte de abajo donde se muestra su afectación. La línea blanca indica la línea de costa. Las coordenadas están en UTM y la variación en metros

Las corrientes inducidas por oleaje para el evento de *Norte 1* se muestran en la Figura 31. Se obtuvo que las magnitudes de corrientes cerca de la costa presentan un rango de entre 0.2 y 0.45 m/s en dirección Noroeste mar adentro. Sin embargo, en la zona somera señalada con círculo rojo en la Figura 31, se presentan direcciones contrarias (Este - Oeste) con magnitudes de 0.4 m/s ocasionando un área de daño constante en donde se presenta una socavación considerable. Por otro lado, la zona rodeada de color negro (Figura 31) presentó

una corriente circular que también afecta a la línea de costa, puesto que genera una socavación en la zona y un cambio de dirección de corriente al llegar a la costa. Si bien las magnitudes de corriente son similares en la mayoría de los casos de estudio y las más intensas se encuentran principalmente en las zonas someras y hacia el Este de la costa, en el evento de *Norte 4* (Figura 31B) presenta una corriente mayor a 3 m/s a lo largo de toda la línea de costa. Aunque los eventos son de períodos relativamente cortos, sus corrientes y oleaje intenso pueden ocasionar cambios significativos en la línea de costa. Cabe mencionar que su transporte de masa en promedio es de 5.2 m³/evento/m, aunado a ello la presencia recurrente de estos eventos durante el año hacen que la dinámica natural de la línea de costa se vea afectada, provocando daños permanentes en la zona.

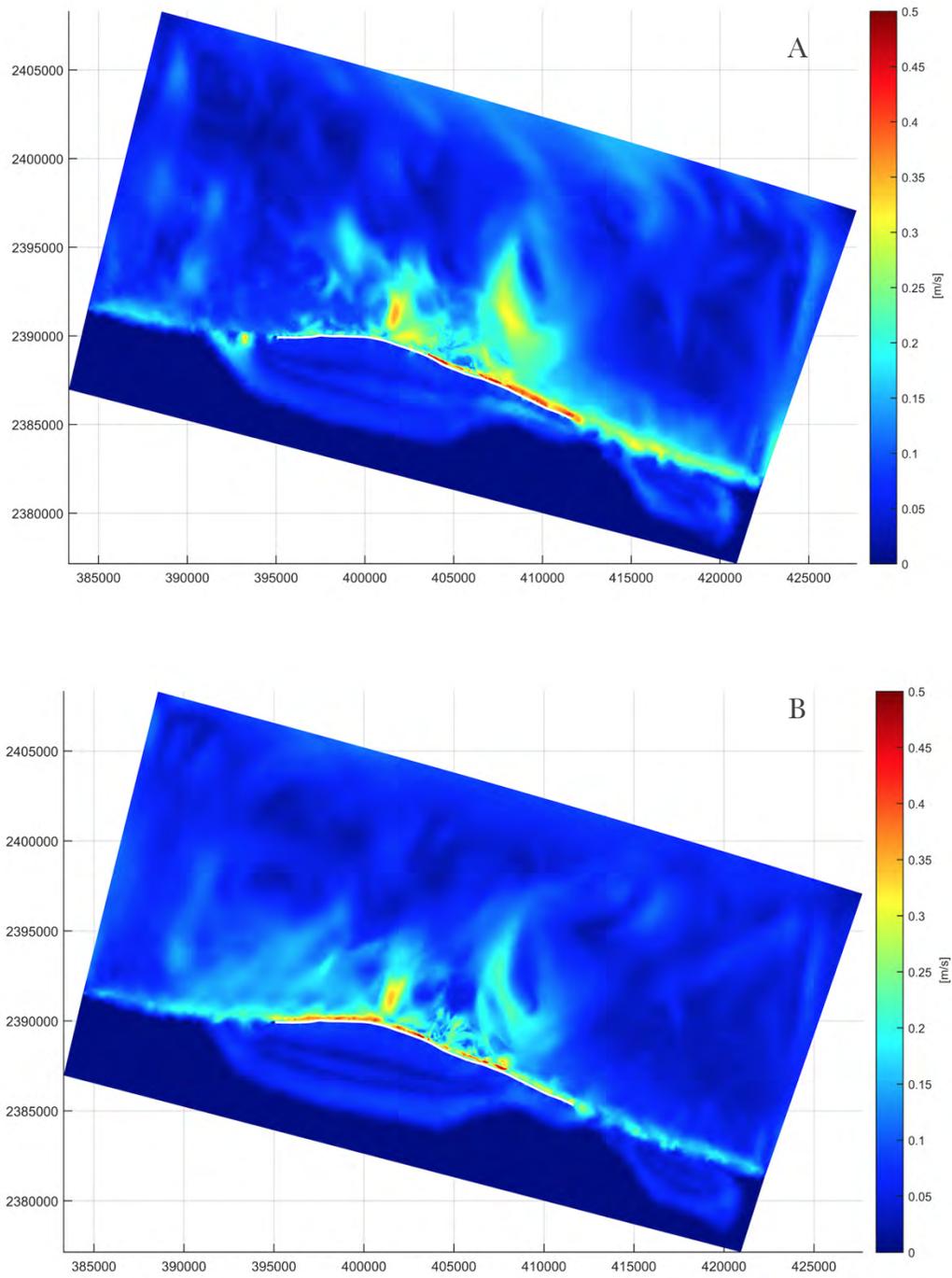


Figura 31. Envolventes máximas de velocidades de corriente bajo efecto del evento de Norte 1 (A) y evento de Norte 4 (B)

IV.IV.II Estudio de rehabilitación de dunas como estructuras de protección a la laguna

La presencia de la duna costera es un factor importante para la estabilidad de la línea de costa pues funcionan como reservas de sedimentos y como barreras naturales de protección que actúan como defensa ante la presencia de eventos extremos. Cuando existen problemas de erosión y la duna presenta deterioro, pueden construirse estructuras de protección que sean capaces de reducir la energía del oleaje, sin embargo esto debe considerarse como último recurso pues alteran otros procesos costeros. La restauración de un sistema de duna por medio de relleno es una buena alternativa cuando los problemas de erosión son crónicos (Pedroza et al., 2013). Los resultados de la modelación demostraron que la erosión es un problema constante y bajo las condiciones actuales de la duna se presentan diversas zonas de inundación. Como parte del estudio se consideran algunas alternativas para evaluar su comportamiento. Las alternativas que se analizaron consisten en distintas configuración de la duna, para lo cual se crearon nuevas mallas computacionales con modificaciones en las dimensiones de la duna. En primera instancia se realizó un aumento únicamente en su ancho, luego se consideró un cambio en su altura y por último se evaluó con un cambio tanto en ancho como altura. Las alternativas se presentan en la Tabla 8 y se evaluaron para cada uno de los eventos de *Norte* seleccionados.

Tabla 9. Alternativas propuestas para evaluar el comportamiento de la duna

Duna	Ancho [m]	Alto [m]
Condición Actual	25	2
Alternativa 1	30 - 35	2
Alternativa 2	25	2.5 - 3
Alternativa 3	30 - 35	2.5 - 3

La Figura 32 presenta los resultados obtenidos a partir de las alternativas propuestas para el caso de evento de *Norte* 1, donde se observó que cuando la duna se aumenta en ancho a 35 metros aún existen zonas donde el nivel de superficie libre supera la duna (Figura 32B). Aunque las áreas de inundación disminuyen considerablemente. Por otro lado, las otras alternativas propuestas donde se aumentó la altura (Figura 32C) y posterior se modificó en

ancho y alto (Figura 32D), indicaron que ya no se generan zonas de inundación aún cuando los valores máximos de sobreelevación generados fueron más altos (0.25m) que en los casos anteriores.

En los otros 4 casos de *Norte* las condiciones son muy similares, la alternativa 1 en todos los casos evaluados presentó situaciones de inundación, donde si bien su magnitud disminuyó, el aumento de ancho de duna no fue suficiente para estabilizar las zonas de mayor afectación. El nivel de superficie libre que se observó fue de entre 0.2 y 0.25m en todos los casos para las alternativas 2 y 3 presentando una área mayor, mientras que para la alternativa 1 (Tabla 8), la elevación de superficie libre se mantuvo igual que en la condición actual.

Por otro lado, las velocidades que representan las máximas magnitudes de corriente que se pueden alcanzar cerca de la costa en el evento de *Norte* 1, varían entre 0.25 y 0.48 m/s. Se observó que en las alternativas 2 y 3 (Figura 33C y 33D) existen zonas donde la corriente es de mayor intensidad que en la alternativa 1 (Figura 33B). En todos los casos del primer evento de *Norte* las corrientes más intensas se presentan en la parte Este de la costa, mientras que en el lado Oeste las magnitudes se disipan debido a que su dirección predominante es hacia el Este. Sin embargo, también se presenta un cambio de dirección hacia el Oeste debido a la dirección del viento y la orientación de la playa, ocasionando que exista erosión constante hacia el lado Este de la zona.

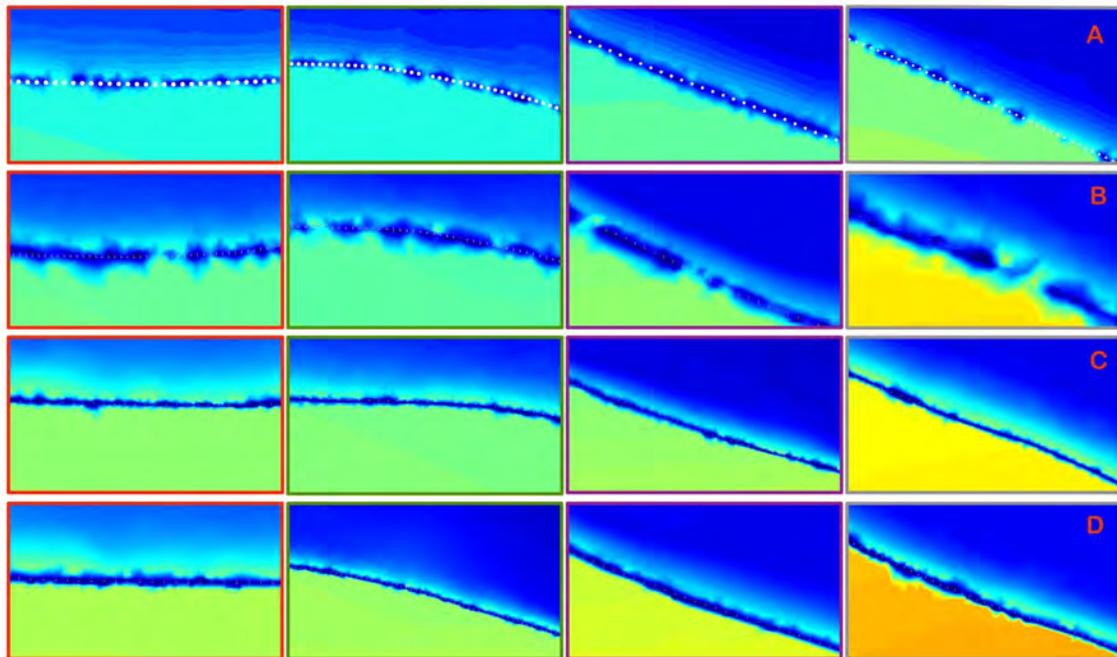
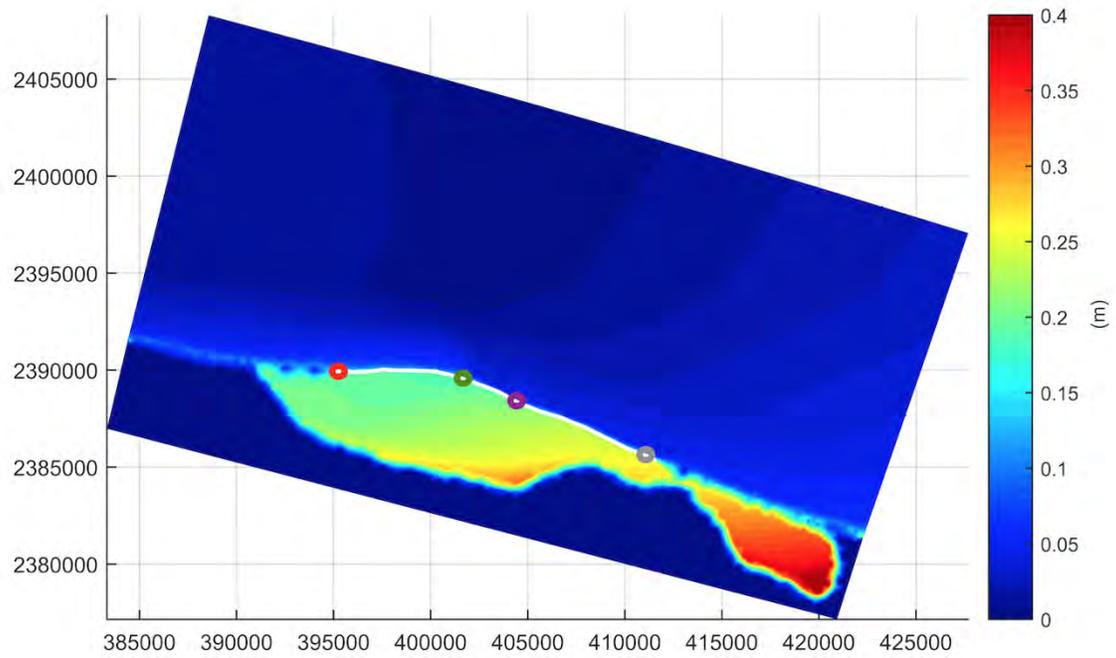


Figura 32. Envoltente máxima de superficie libre del evento de Norte 1.

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 -3m
- D) Duna modificada en ancho y altura

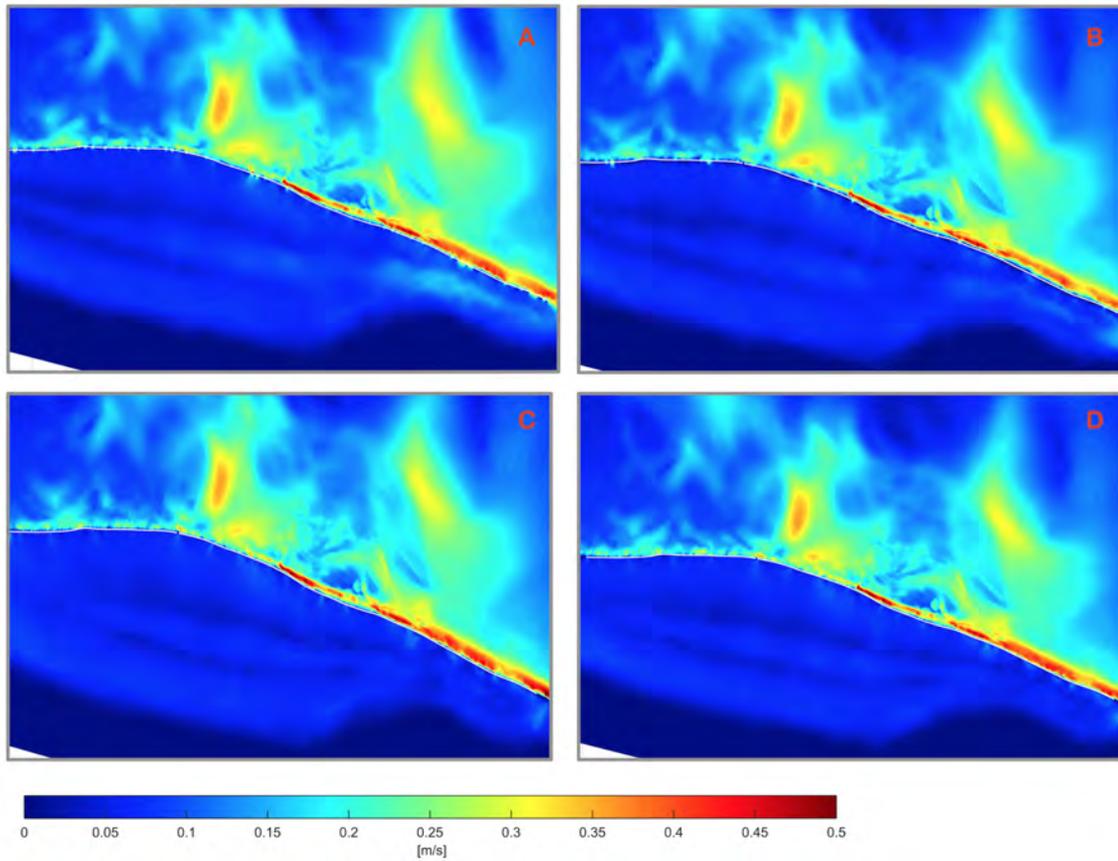


Figura 33. Envoltura máxima de corrientes del evento de Norte 1

- A) Condición actual*
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m*
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 - 3m*
- D) Duna modificada en ancho y altura*

Las corrientes en el segundo caso de evento de *Norte* disminuyeron considerablemente en todas las alternativas y se observó que las corrientes más intensas se generaron en el lado Oeste de la costa (Figura 34). Aunque el oleaje de este evento fue mayor que en el primero, la intensidad del viento es menor y su dirección cambio hacia el Noreste. Se mostró que las alternativas 2 y 3 presentaron zonas donde las corrientes máximas llegan hasta 4 m/s conservando las mismas direcciones como las del primer evento.

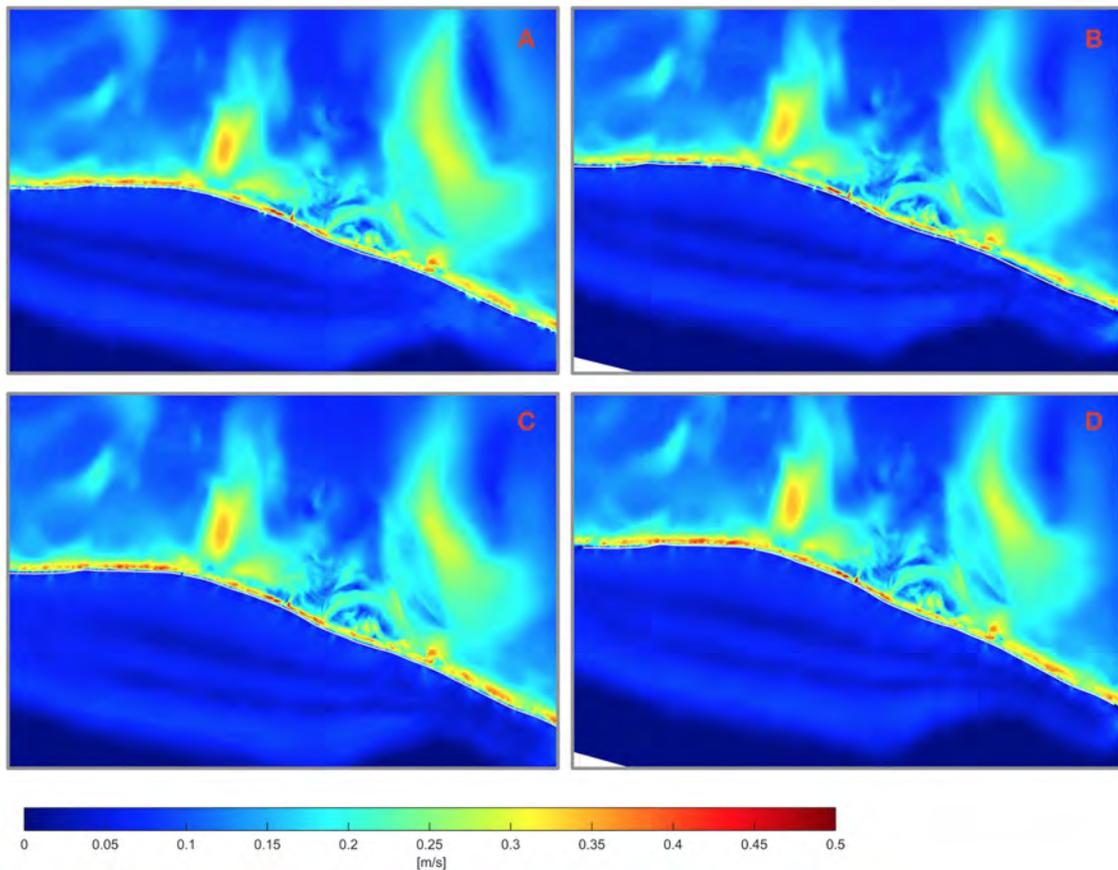


Figura 34. Envoltura máxima de corrientes del evento de Norte 2

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 -3m
- D) Duna modificada en ancho y altura

Para el evento 3 las corrientes de mayor velocidad se encontraron al Este de la costa igual que como ocurrió en el primer evento, sin embargo dichas velocidades son menores llegando a alcanzar hasta 0.42 m/s (Figura 35). También se pudo observar que aunque el oleaje y viento son menores y con diferentes direcciones, las corrientes que se generaron en el lado Oeste de la costa son mayores que los que se presentaron en el evento 1, llegando hasta 0.35 m/s, mientras que en el primer evento el máximo alcanzado fue de 0.3 m/s. Otro hecho importante de mencionar es que en las alternativas 2 y 3 las corrientes que se presentaron en el lado Oeste de la zona son mayores.

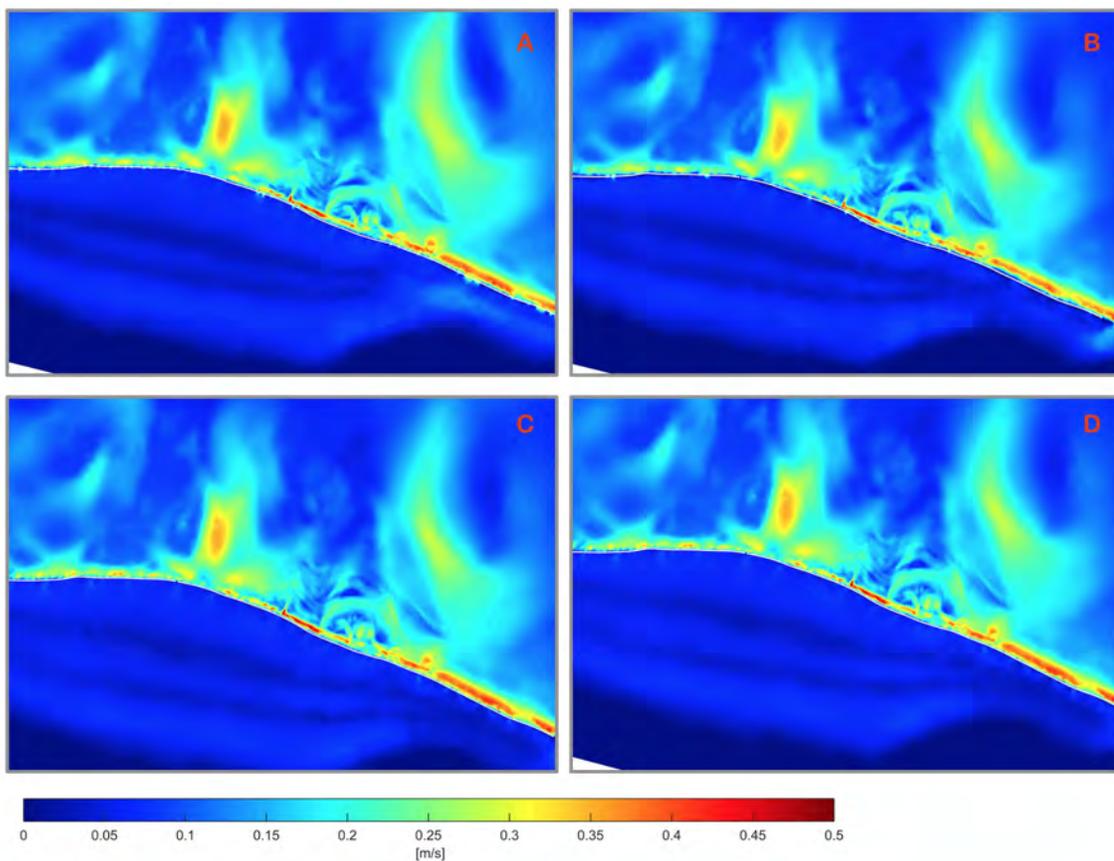


Figura 35. Envoltura máxima de corrientes del evento de Norte 3

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 - 3m
- D) Duna modificada en ancho y altura

En el evento de *Norte 4* se presentaron corrientes intensas en toda la extensión de la zona de estudio (Figura 36), a pesar que el oleaje y viento del evento fueron menores que todos los demás eventos. Las velocidades máximas de corriente llegaron hasta los 0.48 m/s presentándose con mayor frecuencia en el lado Oeste de la costa, sus direcciones fueron hacia lados paralelos de la costa (Oeste-Este) y todas en las alternativas las condiciones fueron similares.

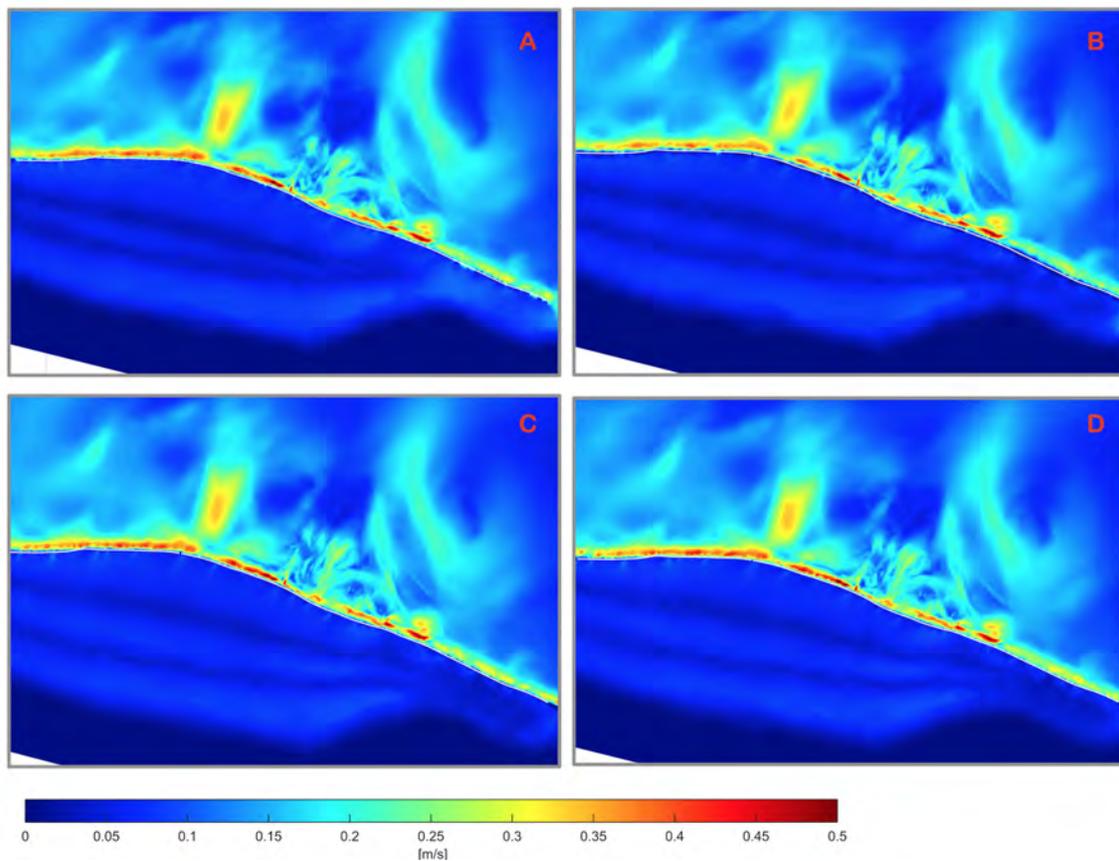


Figura 36. Envoltente máxima de corrientes del evento de Norte 4

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 -3m
- D) Duna modificada en ancho y altura

En el evento 5 las características que se presentaron fueron similares a las del evento 4, sin embargo las velocidades de corrientes fueron más pequeñas (Figura 37). La zona donde se presentaron las corrientes más altas fue en el centro de la costa justo donde se está el cambio de dirección, alcanzando los 0.43 m/s.

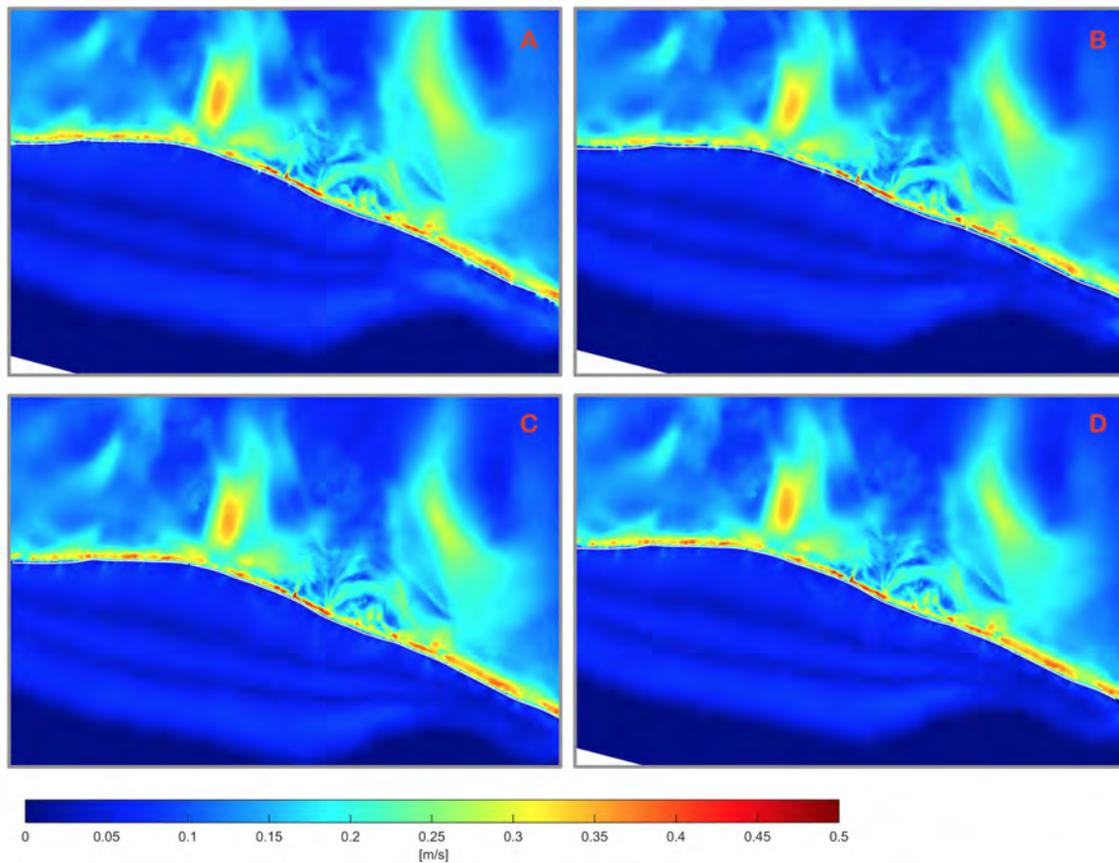


Figura 37. Envoltura máxima de corrientes del evento de Norte 5

- A) Condición actual*
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m*
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 - 3m*
- D) Duna modificada en ancho y altura*

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES

Capítulo V

CONCLUSIONES

El estudio realizado en este trabajo se dedicó al análisis del comportamiento de la duna en Las Coloradas bajo el efecto de los eventos de *Norte*. Los datos e información con los que se contó del área de estudio permitió implementar modelos numéricos de oleaje, hidrodinámico y de transporte de sedimentos.

En primera instancia se realizó un estudio de propagación de oleaje de datos de 30 años, donde se pudo demostrar que el oleaje característico de la zona es predominante del NE y que el oleaje de mayor energía (de eventos extremos) proviene del N.

El modelo unidimensional de transporte de sedimento permitió generar las curvas alpha-Q, indicando un transporte neto anual de 16,000 m³/s en la zona de estudio con una orientación de equilibrio de la playa de 57°. Siendo que la orientación actual de la costa dista mucho de la orientación de equilibrio, existen gradientes de transporte que generan zonas de erosión a lo largo de la costa. Además, al no existir un suministro constante de sedimentos, necesariamente la playa debe ser erosionada para satisfacer la capacidad de carga del sistema.

A partir de los 5 eventos de *Norte* seleccionados se implementaron los modelos bidimensionales de oleaje, hidrodinámico y de transporte. Los resultados muestran que la duna fue rebasada en diversas zonas aún cuando el nivel de superficie libre no fue considerable. Por otro lado el modelo hidrodinámico arrojó que las velocidades de corrientes máximas cercanas a la costa fueron de 4 m/s. Asimismo, durante cada evento se genera un transporte promedio de 5.2 m³/evento/m por lo que la erosión representa ya un problema evidente.

De las tres alternativas propuestas de rehabilitación de la duna como sistema de protección de la laguna y por lo tanto de la salinera, únicamente la alternativa de aumentar solo el ancho no fue suficiente para evitar inundación, a pesar de disminuir

considerablemente las zonas afectadas. Las zonas donde se presentaron las corrientes con direcciones opuestas ya presentan erosión permanente debido al gradiente de transporte que éstas corrientes generan. Aunque las intensidades de corriente fueron similares en la mayoría de los casos, se observó que en las alternativas donde se aumentó el alto de duna, su intensidad fue ligeramente más intensa. Asimismo, la presencia de la corriente circular (Figura 31A) estuvo en todos los casos, éste fenómeno generó también un cambio de dirección de corriente al llegar a la costa.

Del estudio de alternativas se puede concluir que la conservación de una duna con un ancho y altura definidos, es la mejor opción para proteger la laguna y la salina de inundaciones marinas. El uso de geotextiles ha permitido mantener la duna durante los últimos años, sin embargo la presencia de eventos extremos y el transporte de sedimentos de todos los días, ha ocasionado erosión evidente en varias zonas. Lo anterior implica que la playa ya presenta una menor capacidad de recuperar el material erosionada durante los eventos de *Norte* y por tanto es imprescindible tomar acciones para restaurar y estabilizar el cordón dunar.

Si bien, este trabajo evaluó la duna como alternativa de protección, haciendo variar sus dimensiones para conocer su desempeño, es importante considerar que una vez se haya establecido el origen de la fuente de degradación es necesario realizar acciones sobre el cordón dunar. Entre las diversas alternativas para la recuperación de dunas se encuentran la rehabilitación, que se refiere a la reconstrucción del sistema con acciones periódicas de mantenimiento puesto que la capacidad de la duna de regenerarse naturalmente ya no es suficiente. También existe la revegetación que consiste en la siembra de especies vegetales de la zona para cubrir parte de la arena expuesta, o bien realizando rellenos de playa (Moreno-Casasola et al., n.d.).

BIBLIOGRAFÍA

- Appendini, C. M. (2017). *OLEAJE EXTREMO Y CAMBIO CLIMATICO EN EL GOLFO DE MEXICO EXTREME WAVES AND CLIMATE CHANGE IN THE GULF OF MEXICO*.
- Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., & Torres-freyermuth, A. (2012). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula, 1404–1417. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1>
- Appendini, C. M., Torres-freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., Jose, L., & Mendoza, T. (2012). Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment, *39*, 20–30.
- Appendini, C. M., Torres-freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., López, J., & Mendoza, E. T. (2014). Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico : A 30-Yr Wave Hindcast, 1619–1632. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1>
- Battjes, J. a., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves (pp. 569–587).
- Bern, M., & Eppstein, D. (1992). Mesh generation and optimal triangulation. *Computing in Euclidean Geometry*. https://doi.org/10.1142/9789812831699_0003
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). Technical Communication Gradistat : a Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments, *1248*, 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Campos-Aranda, D. F. (2015). Ajuste de las distribuciones GVE , LOG y PAG con momentos L depurados (1 , 0), *VI(10)*, 153–167.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=2nugUEaKqFEC>
- Cuevas Jiménez, A., & Euan Ávila, J. (2009). Morfodinámica del perfil de playa con sedimentos carbonatados en la Península de Yucatán.
- DHI. (2016). Longshore Current and Littoral Drift, 98.
- DIGAOHM SEMAR. (2006). Las Coloradas, Yucatán.
- Eldeberky, Y., & Battjes, J. a. (1996). Spectral modeling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. *Journal of Geophysical Research*, *101(C1)*, 1253–1264. <https://doi.org/10.1029/95JC03219>
- García, F. (2009). Generación De Mallas No Estructuradas Para La Implementacion De Modelos Numéricos, *157*, 17–25.

- García Flores, M., & Maza Álvarez, J. A. (1998). Origen y propiedades de los sedimentos. In *Manual de Ingeniería de Ríos* (p. 118).
- Ibañez Rosales, A. (2011). *Análisis estadísticos de valores extremos y aplicación*.
- INEGI. (2016). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Retrieved September 15, 2017, from http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825217860.pdf
- Johnson, H. K., & Kofoed-Hansen, H. (2000). Influence of Bottom Friction on Sea Surface Roughness and Its Impact on Shallow Water Wind Wave Modeling. *Journal of Physical Oceanography*, 30(7), 1743–1756. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<1743:IOBFOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<1743:IOBFOS>2.0.CO;2)
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. E. M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press. Retrieved from https://books.google.com.mx/books?id=7sg_PN_PDUkC
- Martín Cortés, J. (2017). Meteored.
- McCowan, J., & Society, E. M. (1891). *On the Solitary Wave*. publisher not identified. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=9kcCMwAACAAJ>
- Mendoza, E. T., Trejo-Rangel, M. A., Salles, P., Appendini, C. M., Lopez-Gonzalez, J., & Torres-Freyermuth, A. (2013). Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 65(65), 790–795. <https://doi.org/10.2112/SI65-134.1>
- Moreno-Casasola, P. (n.d.). LAS PLAYAS Y DUNAS DEL GOLFO DE MEXICO. UNA VISION DE LA SITUACION ACTUAL.
- Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Infante, D. M., Jiménez-Orocio, Ó., Lithgow, D., & Martínez, M. L. (n.d.). Costa Sustentable. Retrieved October 18, 2018, from <http://proyectos.incol.edu.mx/costasustentable/esp/presentacion.htm>
- Osorio Tai, M. E. (2015). *Estudio de la intensificación de los vientos en el puerto de Veracruz mediante modelación numérica*.
- Pedroza, D., Cid, A., García, O., Silva, R. C., Villatoro, M., Delgadillo, M. Á., ... Infante, D. M. (2013). *Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias*. Semarnat. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pedrozo Acuña, A. (2011). *Procesos costeros y morfodinámica de playas*.
- Pirad, E. (2003). Granulometría y Morfometría de materiales granulares por métodos ópticos. Retrieved from https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/41052/1/PUB_2003_02_EP_Granulometria%2528espanol%2529.pdf
- Reding, P. J. (1992). *THE CENTRAL AMERICAN COLD SURGE: AN OBSERVATIONAL*

ANALYSIS OF THE DEEP SOUTHWARD PENETRATION OF NORTH AMERICAN COLD FRONTS.

- Sturges, W., Wiseman, & W.J. (1999). The Gulf of México large marine ecosystem: Assessment, sustainability and management. *Blackwell Science*, 77–91.
- V, E. S. P. B., Holthuijsen, L. H., & Booij, N. (1989). A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents, *13*, 23–54.
- Valladares García, M. (2014). Tiene México la salinera más grande del mundo. Retrieved from <http://pulsoslp.com.mx/2014/02/17/tiene-mexico-la-salinera-mas-grande-del-mundo/>
- Vázquez-Lule, A. . (2009). Caracterización del sitio de manglar Ría Lagartos (Las Coloradas). *Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad (CONABIO), Sitios de*. Retrieved from http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/caracterizacion/PY71_Ria_Lagartos_Las_coloradas_caracterizacion.pdf
- Young, I. R. (1999). *Wind generated ocean waves. Coastal Engineering* (Vol. 2). [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00061-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00061-2)
- Zetina, M. C. ., Sanchez, P. ., R.H, O., T.I, M., Castillo, C. R. ., & Cauich, T. J. . (2008). Análisis de modelos de perfil de playa en equilibrio aplicados a una playa de Yucatán , México Equilibrium beach profiles analysis applied to a Yucatan beach , Mexico.

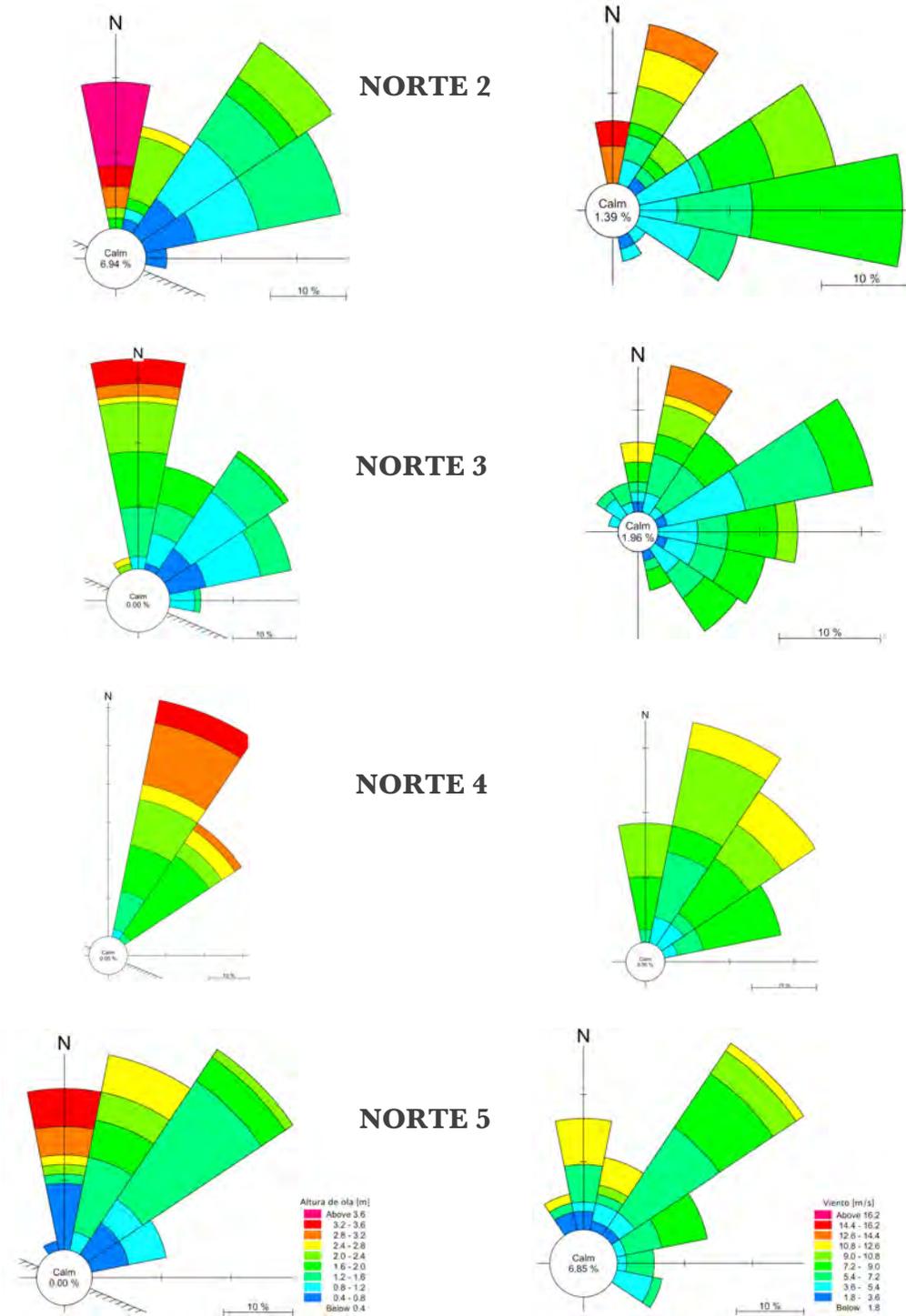


Figura 38. Rosas de oleaje y viento para los eventos de Norte

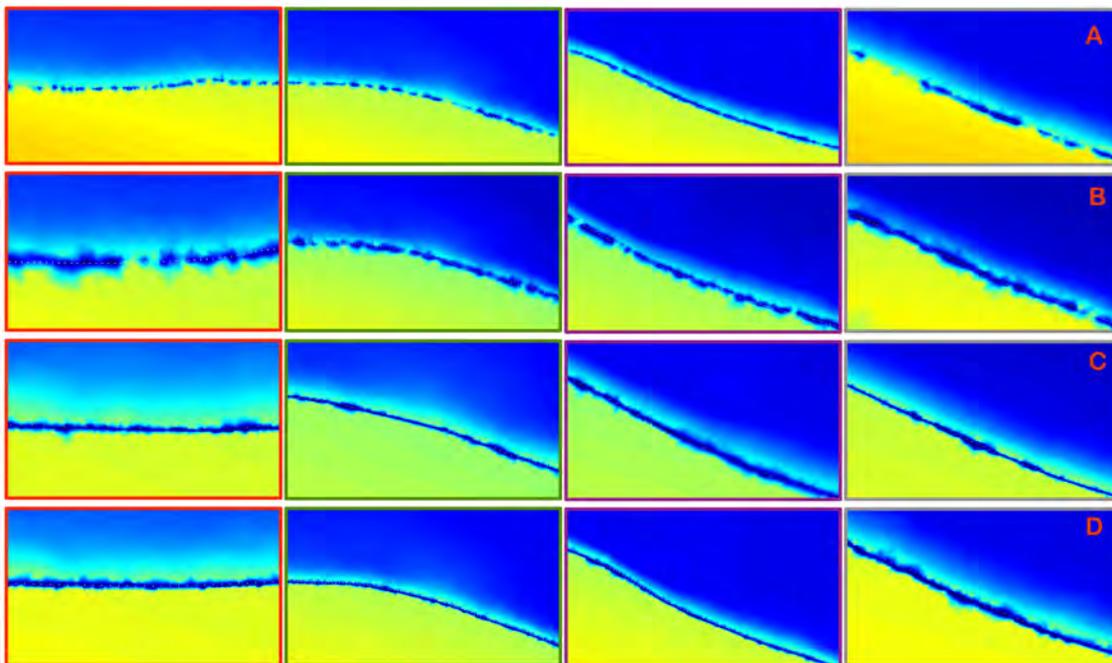
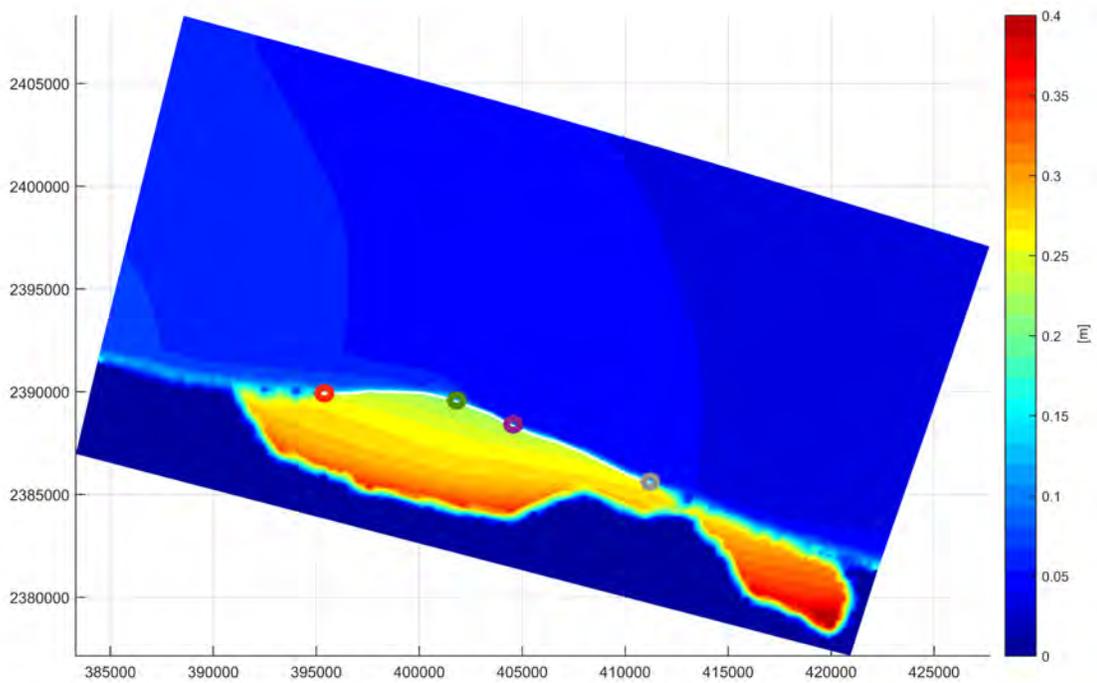


Figura 39. Envolvente máxima de superficie libre del evento de Norte 2.

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 -3m
- D) Duna modificada en ancho y altura

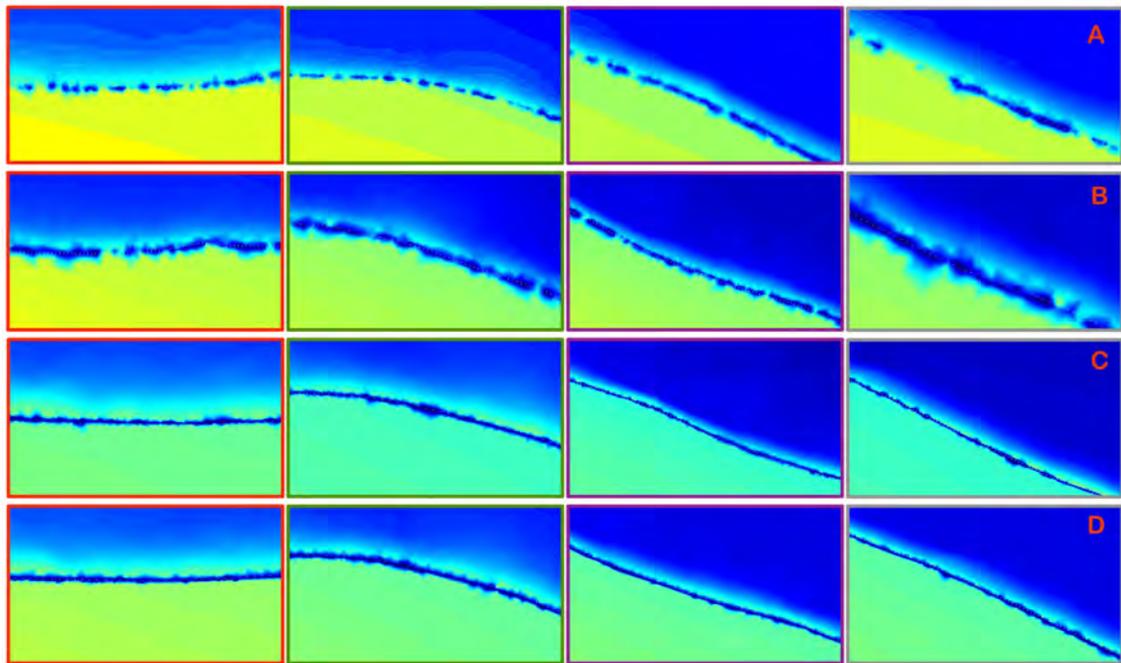
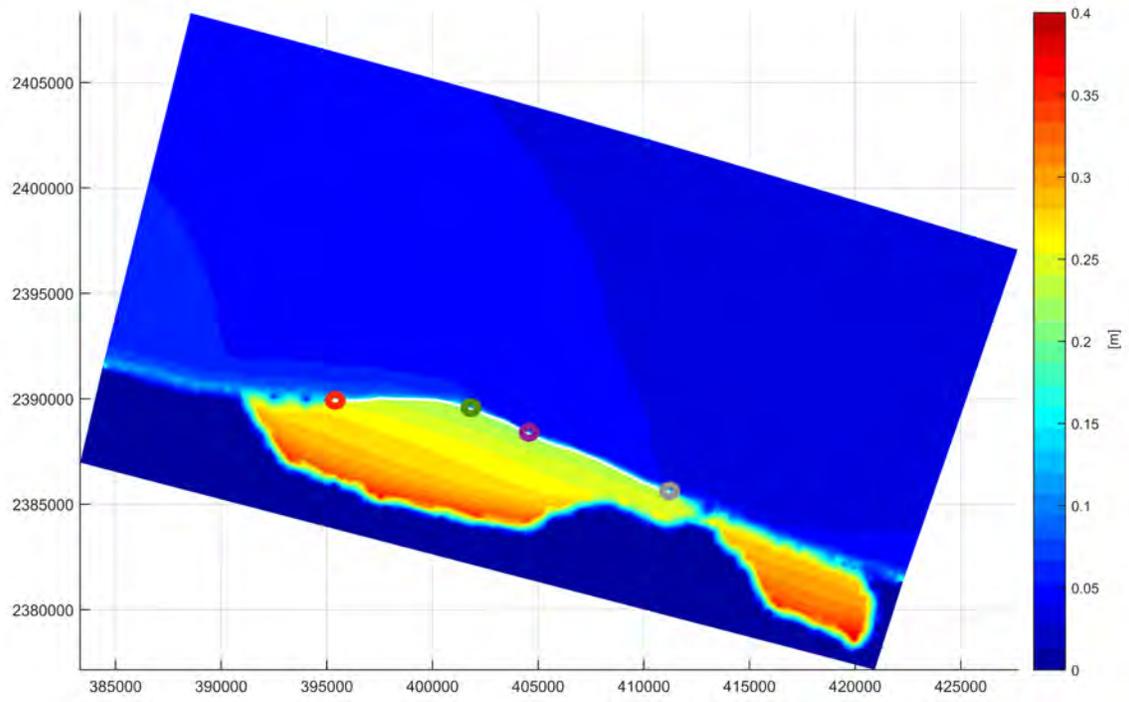


Figura 40. Envolverte máxima de superficie libre del evento de Norte 3.

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 - 3m
- D) Duna modificada en ancho y altura

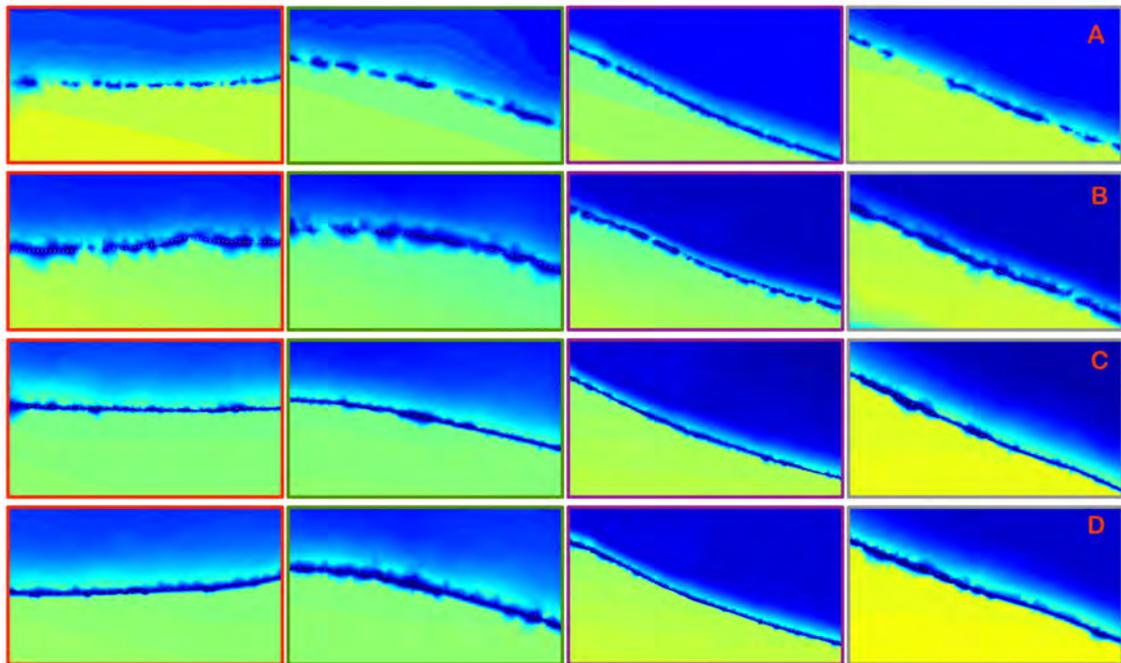
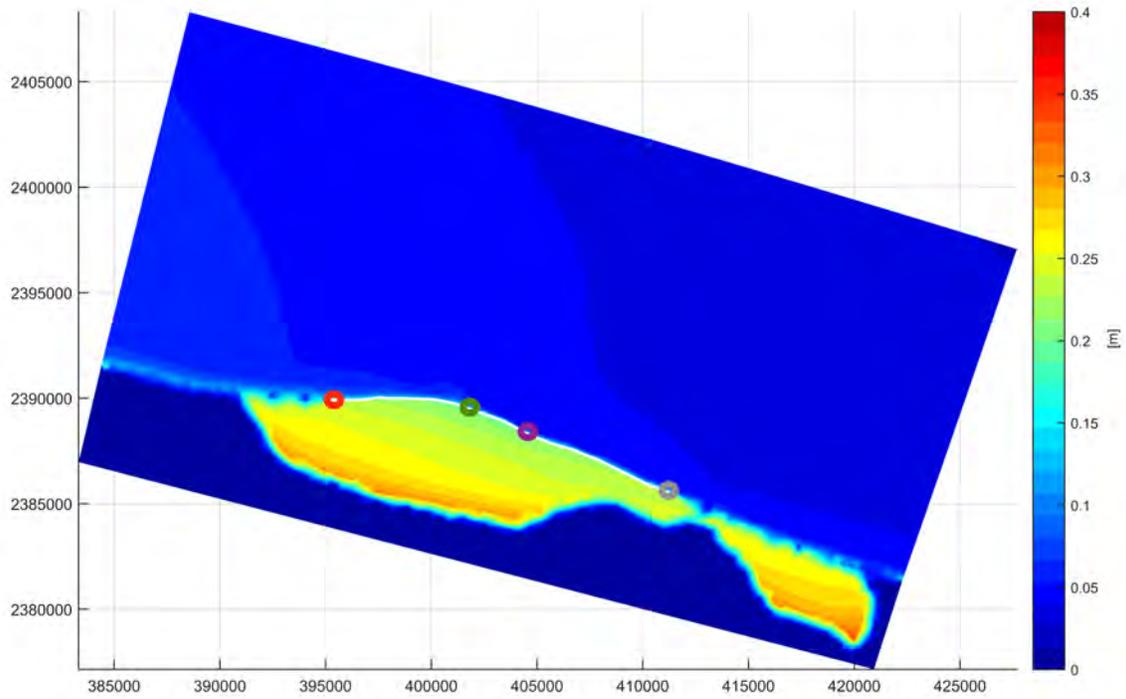


Figura 41. Envoltente máxima de superficie libre del evento de Norte 4.

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 -3m
- D) Duna modificada en ancho y altura

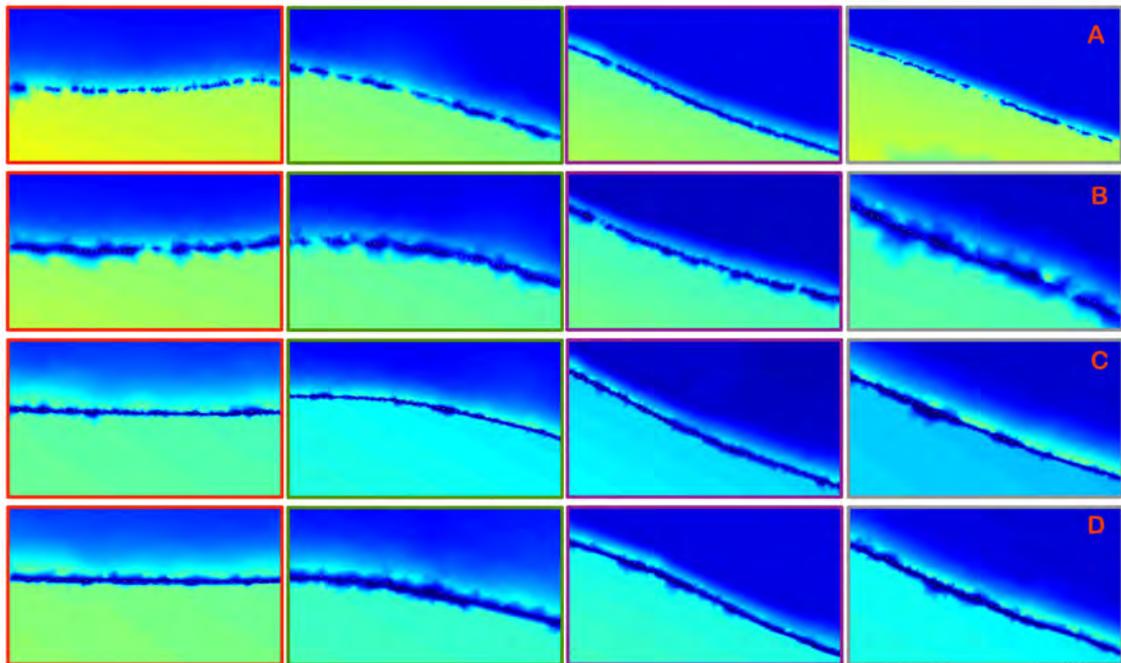
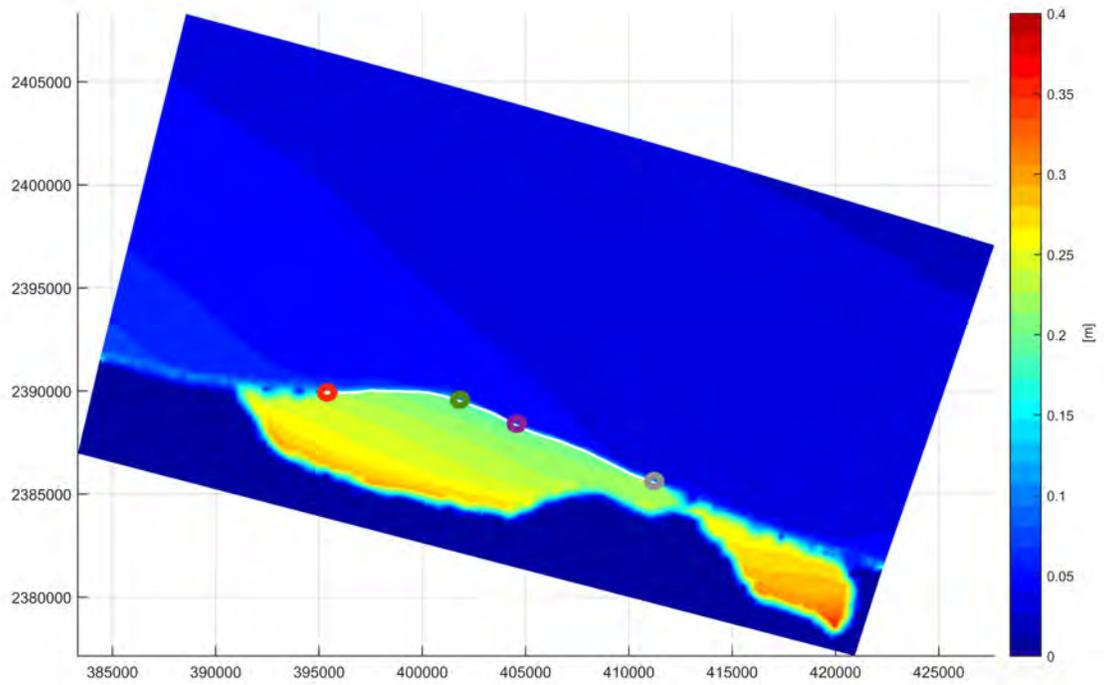


Figura 42. Envolvente máxima de superficie libre del evento de Norte 5.

- A) Condición actual
- B) Duna modificada en su ancho a 30 - 35 m
- C) Duna modificada en su altura a 2.5 -3m
- D) Duna modificada en ancho y altura