



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

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS NUMÉRICOS HDUNAM Y DELFT3D:
EJECUCIÓN DE SIMULACIONES HIDRODINÁMICAS EN LA LAGUNA DE TÉRMINOS,
CAMPECHE.

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

PRESENTA:
ARTURO MÉNDEZ LEYVA

TUTOR PRINCIPAL
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN — INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTORAL
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN — INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. RAÚL MARTELL DUBOIS — CONABIO
DRA. MIREILLE DEL C. ESCUDERO CASTILLO — INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. VALERIA CHÁVEZ CERÓN — FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo
Secretario:	Dr. Martell Dubois Raúl
1 er. Vocal:	Dr. Silva Casarín Rodolfo
2 do. Vocal:	Dra. Escudero Castillo Mireille Del C.
3 er. Vocal:	Dra. Chávez Cerón Valeria

Posgrado de Ingeniería, UNAM
Ciudad Universitaria, Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

RODOLFO SILVA CASARÍN

FIRMA

SIN TESIS NO HAY SINTESIS POSIBLE

Contar algo
sin contenido
es una
incontinencia.

Luis Eduardo Aute

DEDICATORIA

No me importa mostrarme débil mientras escribo, de sobra sabes que eres mi inspiración, sabes que no existe Sabina, sabes que eres la esmeralda de la sierra que representa mi vida. Esta dedicatoria es porque a ti te debo las mejores y las peores horas de mi vida, por lo tanto, entenderás que es un vínculo que no se puede romper.

Gracias Teresa Güitron Gaviño.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

Al Instituto de Ingeniería, por brindarme un espacio para poder desarrollar este estudio.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, por brindarme la oportunidad de viajar a bordo del B/O El Puma, por todo ese conocimiento brindado.

A los miembros del jurado:

Dr. Rodolfo Silva Casarín

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Dra. Mireille Del C. Escudero Castillo

Dra. Valeria Chávez Cerón

Dr. Raúl Martell Dubois

Por sus comentarios y valiosas sugerencias.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Al momento de iniciar a escribir estos agradecimientos, es necesario hacer un recuento de las cosas que pasaron para que yo pudiera estar en este punto de mi vida. En este apartado agradezco a todas esas personas que me han acompañado por mucho o poco tiempo en mi vida y que me han ayudado a ser lo que soy hoy en día.

Agradecimiento eterno a mi amada Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de ser orgullosamente azul y oro desde mi paso por la gloriosa Prepa 7, FES Aragón, FES Acatlán y C.U. (la sagrada ciudad universitaria). Gracias UNAM de mi alma por dejarme cumplir uno de mis sueños más grandes.

A mi tutor, el Dr. Rodolfo Silva Casarín por darme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo, por compartirme un poco de su conocimiento, inteligencia y experiencia, por todo el apoyo para poder finalizar este estudio.

Al Dr. Edgar Mendoza Baldwin, por compartirme parte de su conocimiento, por sus observaciones llenos de rudeza y realeza, por tomarse el tiempo de ayudarme en mis estudios de posgrado.

A mi madre Valeria Leyva porque siempre me ha apoyado sea cual sea mi decisión, por ser la mejor maestra que la vida me ha brindado, por enseñarme a ser siempre honesto, sin ti nada de esto hubiera sido posible.

A mi padre Arturo Méndez, gracias por no dejarme nunca y seguir presente en mi vida.

A mis hermanos, Karla, Estefanía y Erick, que siempre me han ayudado a lograr mis objetivos, me dan el cariño necesario para sentirme siempre fuerte y me alientan a seguir adelante sea cuál sea la dificultad.

A Yosajandi, por el cariño, por la amistad, por ser la culpable de hacerme estudiar una ingeniería, aún recuerdo ese último día de clases en Prepa 7 donde me convenciste de estudiar ingeniería civil y no arquitectura, por los consejos de vida, por enseñarme la literatura y alimentar el alma de esa forma, por enseñarme a luchar diario por un mundo justo. Sabes que has estado presente en todo desde que te conocí, bien sabes que te quiero y mucho.

A Maycu, por la amistad y el acompañamiento en este viaje desde que estábamos estudiando la licenciatura, no necesito decir más, las palabras no alcanzan.

A Ana, por ser sincera, por ser mi hermana de cubículo. Sin tu ayuda este trabajo no habría sido posible. Gracias infinitas por el tiempo, los regaños, el apoyo desinteresado y las recomendaciones literarias.

A Débora, ¡mi cuatita! Por las enseñanzas del HD, por las risas, por ayudarme a creer más en mí mismo, por la confianza brindada y que ha provocado que seamos grandes amigos.

A Ziomara, por esas inolvidables charlas en donde el tiempo no transcurría, por esa tranquilidad que brindas y posees, por la sincera compañía, sabes que eres especial y por eso te quiero.

A Omar, mi gran hermano punk que fue un gran sustento para culminar la licenciatura, por convencerme de estudiar un posgrado, por los momentos “curados” en los partidos del Victoria Harley y por el acompañamiento a los “tokines” de punk sin importar el lugar donde fueran.

A Mariana, por ser un bálsamo que me alivió en momentos muy difíciles, por permitirme conocerte más a través de tu literatura, aún recuerdo ese hermoso cuento que ganó el concurso del restaurante Lamocca, lo llevaré siempre conmigo.

A mi maestro Martín por el tiempo y amistad, por darme consejos y enseñanzas, aunque no haya tenido la fortuna de tomar clases con usted.

A Roberto (Charro), por compartir esos momentos mientras viajábamos y trabajamos por la frontera donde fuimos adoptados como sobrinos por la Tía Juana (664), por los partidos de fútbol memorables.

A mis queridos amigos de la “office” de la Prepa 7, Enrique, Angelina, Miguel (pata), Divanny, Lucas, Cecilia, Karla, Miguel (Mumm-ra), Tony (changoleón), por hacer siempre fiestas bien “curadas” donde la noche se quedaba corta, por tirar “carrilla” y reírnos de nosotros mismos, por soportarme y por todos los bellos momentos que hemos coleccionado.

A mis amigos de la FES Aragón, Capi, Miriam y el Washa.

A mis amigos de la FES Acatlán, Edith, Jessi (pleititos), Axel, Jesús, Raúl, Bonnie, por provocar que esos cursos sabatinos de inglés siempre fueran bien “curados” y no aburridos, por esas tardes llenas de cerveza y platicas interesantes, por amanecer siempre cantando, por todo, gracias.

A mis amigos del posgrado, Javier y Tony.

A la vida que me ha enseñado el fracaso, el triunfo. A mis ángeles locos, a las noches llenas de soledad, poesía, desvelos, alegrías. A los días llenos de ingeniería, Jack, cerveza y cosas volubles y locas como el amor.

Espero no hacer omisión involuntaria de alguien, sepan que todos han sido y serán muy importantes para mí, ustedes han contribuido para que yo *“el sobrino de la Tía Juana”* sea lo que soy hoy, como lo dijo Newton *“Si he podido ver más allá es porque estoy sentado sobre hombros de gigantes”*, a todos ustedes gracias por llenar mi vida de alegrías.

De corazón ranchero. Gracias infinitas a todos.



CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	VI
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS PARTICULARES	4
CAPÍTULO 1	5
ÁREA DE ESTUDIO	5
1.1 LOCALIZACIÓN	5
1.2 HIDROLOGÍA	6
1.3 BATIMETRÍA	7
1.4 HIDRODINÁMICA COSTERA	9
1.4.1 VIENTOS	9
1.4.2 CORRIENTES	9
1.4.3 MAREAS	10
1.5 RELIEVE	11
1.6 CLIMA	12
CAPÍTULO 2	13
MODELOS NUMÉRICOS Y OBTENCIÓN DE DATOS	13
2.1 MODELOS NUMÉRICOS	13
2.1.1 HDUNAM	14
2.1.1.1 ECUACIONES DE GOBIERNO	14
2.1.2 DELFT3D	15
2.1.2.1 ECUACIONES DE GOBIERNO	17
2.2 DATOS DE ENTRADA	18
2.3 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA	20
2.4 ARCHIVOS DE SALIDA	23
CAPÍTULO 3	25
METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	25
3.1 OBTENCIÓN DE DATOS	25
3.1.1 CAUDALES	25
3.1.2 MAREAS	25
3.1.3 VIENTO	26
3.2 ANÁLISIS DE CAUDALES	26

3.3 SERIES DE TIEMPO DE MAREAS Y VIENTO	26
3.4 PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	27
3.4.1 ESCENARIO 1: TEMPORADA DE SECAS	27
3.4.2 ESCENARIO 2: TEMPORADA DE LLUVIAS.....	30
3.4.3 ESCENARIO 3: TEMPORADA DE NORTES	33
CAPÍTULO 4	38
RESULTADOS E INTERPRETACIÓN	38
4.1 RESULTADOS	38
4.1.1 TEMPORADA DE SECAS	39
4.1.2 TEMPORADA DE LLUVIAS.....	54
4.1.3 TEMPORADA DE NORTES.....	69
4.2 CORRIENTES	84
4.3 EFICIENCIA COMPUTACIONAL	85
CAPÍTULO 5	87
DISCUSIÓN	87
5.1 SUPERFICIE LIBRE	87
5.2 VELOCIDAD DE CORRIENTES	89
5.3 CIRCULACIÓN GENERAL	91
5.4 EFICIENCIA COMPUTACIONAL	93
CAPÍTULO 6	97
CONCLUSIONES	97
REFERENCIAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de Laguna de Términos	6
Figura 2. Zonas hidrológicas de Laguna de Términos	7
Figura 3. Carta náutica S.M. 842.1 año 2005 (Fuente: Secretaria de Marina).....	8
Figura 4. Batimetría de Laguna de Términos.....	8
Figura 5. Comportamiento de marea mixta diurna.....	10
Figura 6. Modelo digital de elevaciones de Laguna de Términos.	11
Figura 7. Organigrama general de modelos numéricos	13
Figura 8. Arquitectura del sistema Delft3D. (Fuente: Delft3D-FLOW, Deltares 2014).....	16
Figura 9. Dominio computacional para modelo HDUNAM	19
Figura 10. Dominio computacional para modelo Delft3D	19
Figura 11. Fronteras abiertas para modelo HDUNAM	21
Figura 12. Fronteras abiertas para modelo Delft3D	21
Figura 13. Rugosidad uniforme sobre malla computacional HDUNAM.....	21
Figura 14. Rugosidades variables en malla computacional Delft3D	21
Figura 15. Hidrogramas de los Ríos a) Candelaria, b) Mamantel, c) Palizada en temporada de secas. (Fuente: CONAGUA)	28
Figura 16. Niveles de marea en temporada de secas año 2015 (Fuente de datos: MAR V1.0)	29
Figura 17. Dirección y velocidad de viento en temporada de secas (Fuente: NOAA, CFSRv2)	30
Figura 18. Hidrogramas de los Ríos a) Candelaria, b) Mamantel, c) Palizada en temporada de lluvias. (Fuente: CONAGUA)	31
Figura 19. Niveles de marea en temporada de lluvias año 2015 (Fuente: MAR V1.0).....	32
Figura 20. Dirección y velocidad de viento en temporada de lluvias (Fuente: NOAA, CFSRv2).....	33
Figura 21. Hidrogramas de los Ríos a) Candelaria, b) Mamantel, c) Palizada en temporada de nortes. (Fuente: CONAGUA)	34
Figura 22. Niveles de marea en temporada de nortes año 2015 (Fuente: MAR V1.0).....	35
Figura 23. Dirección y velocidad de viento en temporada de nortes (Fuente: NOAA, CFSRv2).....	36
Figura 24. Puntos de control para ambos modelos numéricos.	39
Figura 25. Resultados de superficie libre con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D	40
Figura 26. Resultados de superficie libre con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM	41
Figura 27. Resultados de velocidad con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D	43
Figura 28. Resultados de velocidad con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM	44

Figura 29. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D	46
Figura 30. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM	47
Figura 31. Resultados de velocidad con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D	49
Figura 32. Resultados de velocidad con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM	50
Figura 33. Superficie libre en temporada de secas en punto de control boca Del Carmen.....	51
Figura 34. Superficie libre en temporada de secas en punto de control boca Puerto Real.....	52
Figura 35. Velocidades en temporada de secas en punto de control boca Del Carmen.....	53
Figura 36. Velocidades en temporada de secas en punto de control Boca Puerto Real.....	53
Figura 37. Resultados de superficie libre con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D	55
Figura 38. Resultados de superficie libre con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM	56
Figura 39. Resultados de velocidad con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D	58
Figura 40. Resultados de velocidad con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM	59
Figura 41. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D	61
Figura 42. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM	62
Figura 43. Resultados de velocidad con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D	64
Figura 44. Resultados de velocidad con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM	65
Figura 45. Superficie libre en temporada de lluvias en punto de control boca Del Carmen.....	66
Figura 46. Superficie libre en temporada de lluvias en punto de control boca Puerto Real	67
Figura 47. Velocidades en temporada de lluvias en punto de control boca Del Carmen	68
Figura 48. Velocidades en temporada de lluvias en punto de control boca Puerto Real	68
Figura 49. Resultados de superficie libre con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D	70
Figura 50. Resultados de superficie libre con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM	71
Figura 51. Resultados de velocidad con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D	73
Figura 52. Resultados de velocidad con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM.....	74

Figura 53. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D	76
Figura 54. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM	77
Figura 55. Resultados de velocidad con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D	79
Figura 56. Resultados de velocidad con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM	80
Figura 57. Superficie libre en temporada de nortes en punto de control boca Del Carmen	81
Figura 58. Superficie libre en temporada de nortes en punto de control boca Puerto Real	82
Figura 59. Velocidades en temporada de nortes en punto de control boca Del Carmen	83
Figura 60. Velocidades en temporada de nortes en punto de control boca Puerto Real	83
Figura 61. Dirección de corrientes en flujo.....	84
Figura 62. Dirección de corrientes en refluo.....	85
Figura 63. Circulación inferida de la topografía dinámica (Tomado de Monreal-Gómez et al., 2004)	92
Figura 64. Dominio para modelo HDUNAM a) detalle de celdas cuadradas, b) detalle del río Palizada, c) detalle del río Mamantel, d) detalle del río Candelaria	94
Figura 65. Dominio para modelo Delft3D-FLOW a) detalle de celdas ortogonales, b) detalle de río Palizada, c) detalle de río Mamantel, d) detalle de río Candelaria	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Módulos de Delft3D (Fuente: Deltares, 2014)	17
Tabla 2. Generalidades del dominio computacional de los modelos HDUNAM y Delft3D-FLOW.....	19
Tabla 3. Condiciones de frontera de los modelos HDUNAM y Delft3D-FLOW	20
Tabla 4. Archivos de salida de los modelos HDUNAM y Delft3D.....	24
Tabla 5. Parámetros de entrada para modelos numéricos HDUNAM y Delft3D-FLOW.....	37
Tabla 6. Resultados de superficie libre en puntos de control en temporada de secas (los resultados están representados en m)	51
Tabla 7. Resultados de velocidades en puntos de control en temporada de secas (los resultados están representados en m/s)	52
Tabla 8. Resultados de superficie libre en puntos de control en temporada de lluvias (los resultados están representados en m)	66
Tabla 9. Resultados de velocidades en puntos de control en temporada de lluvias (los resultados están representados en m/s)	67
Tabla 10. Resultados de superficie libre en puntos de control en temporada de nortes (los resultados están representados en m)	81
Tabla 11. Resultados de las velocidades en puntos de control en temporada de nortes (los resultados están representados en m/s)	82
Tabla 12. Comparación de los tiempos de ejecución y eficiencia del modelo HDUNAM y Delft3D-FLOW para un periodo de 123 días	86
Tabla 13. Valores máximos de superficie libre reportados en bocas Del Carmen y Puerto Real de la Laguna de Términos con distintos modelos numéricos	87
Tabla 14. Velocidades reportadas para bocas Del Carmen y Puerto Real de la Laguna de Términos, Campeche	90

CERVEZA

las escolleras están en el mar
y yo sentado en el bar pensándote
te beso y ninguno lo sabe o ven
a un ciudadano pálido bebiendo su cerveza hace calor
y en la espuma del baso hay más historias
sobre el oleaje que te acerca y aleja
como esta mesa donde
te recito por milésima vez

Juan Gelman

INTRODUCCIÓN

Las modelaciones numéricas utilizan métodos y algoritmos computacionales que permiten resolver y analizar el comportamiento de los fluidos a través del ordenador, llegando a ser de uso común en la ingeniería y una aproximación significativa en la solución de problemas complejos (Liu y Liu, 2003). En la actualidad existen modelos numéricos que permiten representar soluciones reales a problemas de diversa índole utilizando ecuaciones con aproximaciones en 1D, 2D e incluso en 3D; empleando esquemas en diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Cada uno de ellos tiene ventajas e inconvenientes, relacionados principalmente con su dimensionalidad, las ecuaciones empleadas, la cantidad de información requerida y el tiempo de cálculo (Chaudhry, 2008).

En los modelos unidimensionales (1D) se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo, por ejemplo, del eje del río o canal (Ojeda, 2003).

Los modelos bidimensionales (2D) consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad y otras magnitudes de interés en la columna de agua se promedian y se asumen como un único valor (Ojeda, 2003). Mediante la simulación matemática del flujo en dos dimensiones se obtienen velocidades y tirantes, con lo que se puede determinar las corrientes dentro de una laguna y así conocer su comportamiento hidrodinámico, el cual es muy útil para distintas aplicaciones en la ingeniería (Osnaya, 1991).

Los modelos tridimensionales (3D) representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad y, por lo tanto, pueden aplicarse a cualquier caso práctico (Ojeda, 2003).

Para el desarrollo de este trabajo se eligieron dos modelos numéricos: HDUNAM y el módulo FLOW del programa Delft3D (desarrollado por Deltares), este módulo realiza simulaciones generalmente en 3D, pero para este estudio se ejecutará en 2D. Ambos modelos se ejecutarán con la finalidad de realizar un análisis hidrodinámico de la Laguna de Términos, debido a que el uso de estos modelos se adapta correctamente a la propagación de mareas en ríos, estuarios y zonas costeras.

El algoritmo de los modelos HDUNAM y Delft3D-FLOW se basa en el desarrollo de ecuaciones bidimensionales resueltas a través del método de diferencias finitas. Ambos forman parte de un grupo de modelos numéricos en 2D que han sido ampliamente utilizados para simulaciones hidrodinámicas en cuerpos de agua de poca profundidad.

Para poder realizar una modelación numérica con cualquiera de los modelos mencionados, es necesario contar con cierta información detallada de la zona de interés, ya que la calidad de ésta repercutirá directamente en los resultados. De manera general, la información que se necesita para ejecutar una modelación es la siguiente:

- Topografía y batimetría de la zona de estudio.
- Estudios hidrológicos.
- Condiciones iniciales y de contorno.

A pesar de las particularidades de cada uno de los modelos numéricos existentes hay que destacar que contienen numerosas interpretaciones subjetivas y su validación sólo se logra mediante la aplicación de técnicas específicas.

El objetivo principal de este trabajo es comparar la eficiencia computacional de HDUNAM y Delft3D-FLOW como modelos de simulación hidrodinámica. De igual manera, se analizará la capacidad de cada uno para modelar diversos forzamientos en un área de estudio determinada para indicar cuál es el modelo idóneo y más práctico para realizar simulaciones numéricas en zonas de estuarios considerando el dominio y los parámetros de tiempo utilizados para cada modelo. A pesar de las diferencias inherentes en la configuración de cada uno de los modelos, la ventaja principal de Delft3D-FLOW sobre HDUNAM es que puede acoplarse y realizar simulaciones numéricas de manera

simultánea con otros módulos que ofrece Delft3D. Una modelación realizada con HDUNAM predice resultados de distribución de velocidades y superficie libre, sin embargo, los módulos de Delft3D permiten obtener resultados relacionados con el arrastre de sedimentos, las características morfológicas de la zona de interés, así como el comportamiento del oleaje. En cuanto al recurso informático, se determinó que Delft3D tiene una mayor eficiencia computacional comparado con HDUNAM.

OBJETIVO GENERAL

Comparar la eficiencia computacional de modelos numéricos, HDUNAM y Delft3D-FLOW para indicar cuál es más práctico e idóneo en la gestión de las zonas costeras.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Comprender el funcionamiento, la capacidad de análisis y el tipo de resultados que se obtienen con cada uno de los modelos numéricos.
- Ejecutar simulaciones hidrodinámicas, con HDUNAM y Delft3D-FLOW, a fin de conocer la distribución de las velocidades y superficie libre en la Laguna de Términos.
- Hacer una comparación de las simulaciones hidrodinámicas para diferentes temporadas climáticas en la Laguna de Términos.
- Describir las ventajas y desventajas de cada uno de los modelos utilizados en este estudio.

CAPÍTULO 1

ÁREA DE ESTUDIO

1.1 LOCALIZACIÓN

La Laguna de Términos es una laguna costera, por lo que puede definirse como un cuerpo de agua paralelo a la línea de costa que tiene una comunicación permanente con el mar. Posee una hidrodinámica compleja regida por la aportación de agua continental mediante ríos, la dinámica de mareas y por procesos de evaporación-precipitación (Contreras y Castañeda, 2003). La Laguna de Términos (Figura 1) forma parte de la plataforma de la península de Yucatán. Se ubica en la zona costera del estado de Campeche, entre el Río San Pedro y San Pablo al occidente y el área de drenaje del Estero de Sabancuy hacia el oriente, con una superficie de 706, 147.67 ha. Geopolíticamente se ubica en los municipios de Carmen, Palizada y Champotón; cuyas coordenadas extremas se encuentran entre los 18°25' y 19°00' de latitud Norte y 92°20' y 91°00' de longitud Oeste.

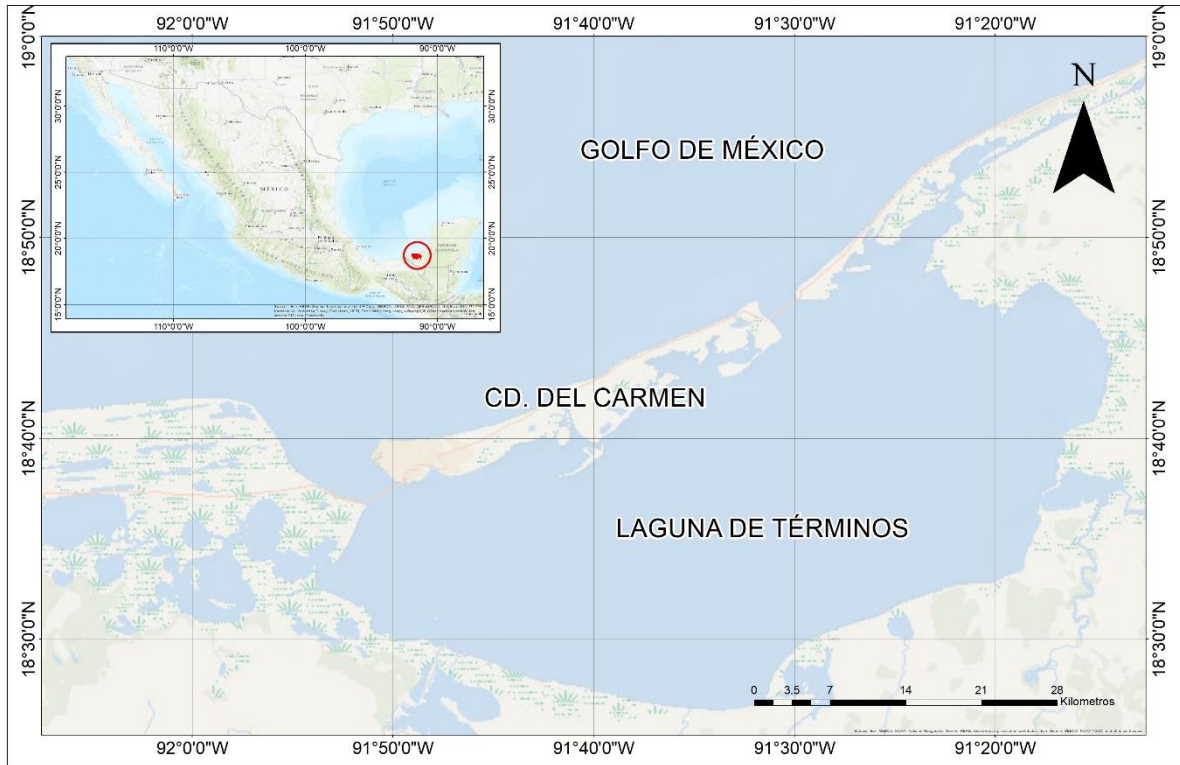


Figura 1. Localización de Laguna de Términos

1.2 HIDROLOGÍA

La Laguna de Términos es el sistema de descarga fluvial más grande y también el mayor ecosistema costero del país (SEMARNAT, 1997) y se ubica en la región hidrológica Grijalva-Usumacinta (Figura 2). Dentro de la región de la Laguna de Términos desemboca una parte de la principal red hidrológica de la zona costera mexicana del Golfo de México, constituida por los ríos Mezcapala, Grijalva y Usumacinta, los cuales han desarrollado un amplio complejo fluvio-lagunar estuarino que incluye a los ríos Palizada, Chumpán y Candelaria.



Figura 2. Zonas hidrológicas de Laguna de Términos

1.3 BATIMETRÍA

La Laguna de Términos presenta profundidades variables con un rango entre 0.5 m y 4.0 m. La batimetría de la Laguna de Términos se realizó a partir de la extracción de datos de la carta náutica S.M. 842.1 año 2005 de la Secretaria de Marina (Figura 3). En la zona de bocas se registran profundidades del orden de los 0.5 m hasta los 9.5 m (Figura 4).

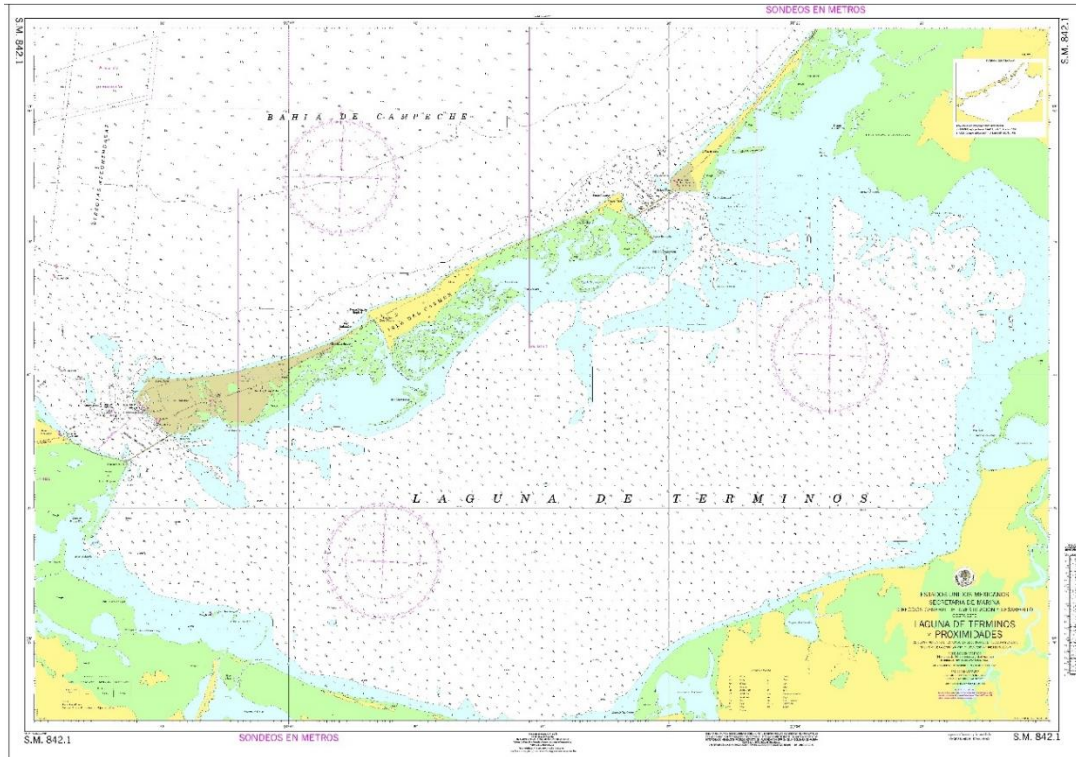


Figura 3. Carta náutica S.M. 842.1 año 2005 (Fuente: Secretaria de Marina)

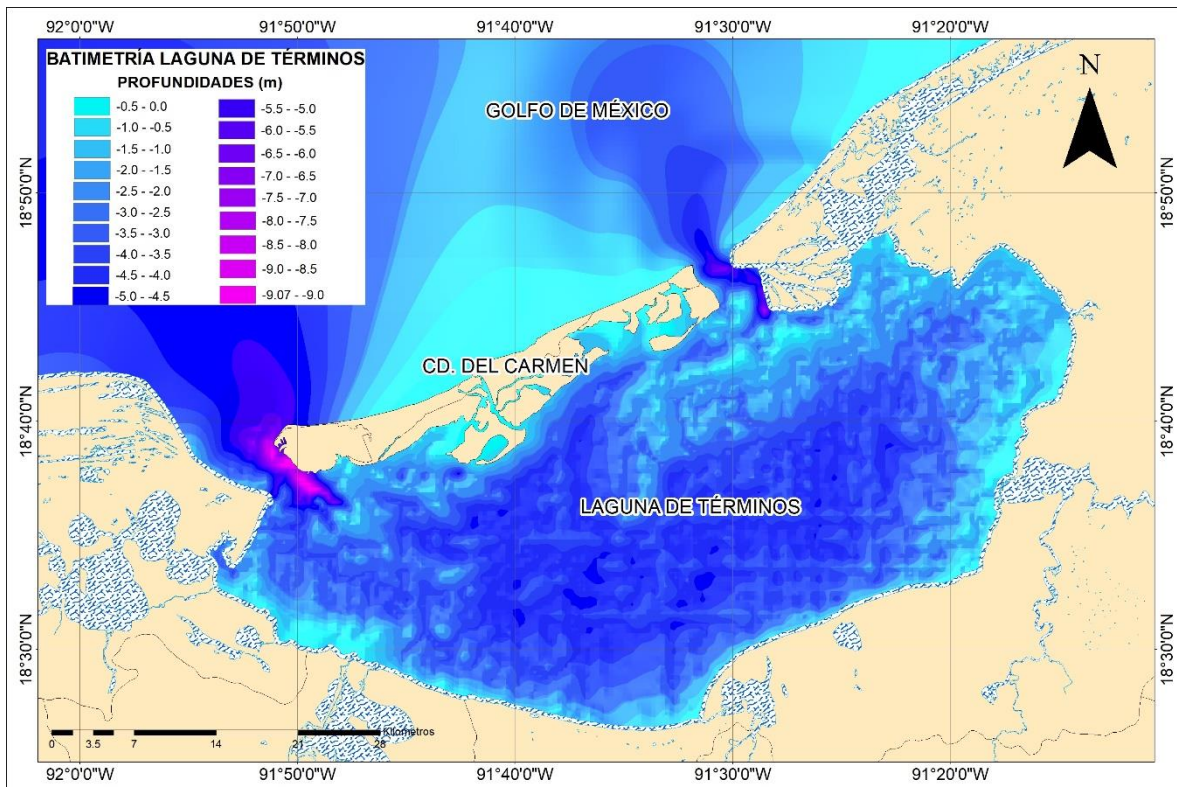


Figura 4. Batimetría de Laguna de Términos.

1.4 HIDRODINÁMICA COSTERA

1.4.1 VIENTOS

Los vientos que soplan sobre el estado de Campeche procedentes del noroeste se presentan fundamentalmente en los meses de noviembre a marzo. Para los meses de septiembre y octubre el viento que viene del norte tiende a alinearse en dirección este-oeste. Durante los meses de junio a agosto los vientos proceden del sureste; y en mayo y abril estos vientos tienden poco a poco a orientarse en dirección sur-norte (Gío-Argaez, 1996). Por lo somero de la cuenca, los vientos contribuyen a que exista una mezcla vertical de la columna de agua, provocando la resuspensión de sedimentos y nutrientes autóctonos y alóctonos, que son finalmente exportados a la plataforma continental en la Sonda de Campeche, enriqueciendo su productividad primaria (Gío-Argaez, 1996).

1.4.2 CORRIENTES

El sistema de corrientes en el Golfo de México se origina en el Mar Caribe, siendo la de mayor escala la corriente de Lazo (localizada en la parte este) que une la corriente de Yucatán con la de Florida mediante un giro anticiclónico (parte oeste del golfo) (Nowlin y McLellan, 1967). A su vez esta circulación está condicionada tanto por el viento, como por el transporte de masas que entra por el Canal de Yucatán y por la presencia de una surgencia estacional en la plataforma de Yucatán lo que provoca una circulación ciclónica de las corrientes en la bahía de Campeche (Monreal-Gómez *et al.*, 2004).

La Laguna de Términos se comunica con el Golfo de México, mediante dos bocas situadas cerca de los extremos y que se mantienen abiertas permanentemente. Existe un flujo neto de aguas marinas entrando por una de las bocas y saliendo por la otra, un hecho de fundamental importancia para el régimen hidrológico de la laguna (Mancilla y Vargas, 1980). El flujo neto en el interior de la laguna tiene un sentido predominantemente este-oeste, y es más notable en la porción norte que en la sur (INE, 1997; David y Kjerfve, 1998).

Las corrientes en el Canal de Boca del Carmen varían desde menos de 20 cm/s hasta más de 65 cm/s durante las mareas bajas, y hasta 86 cm/s durante las mareas altas, ambas acompañadas por la descarga del flujo de los ríos. Durante un periodo de mediciones en febrero-marzo de 1977, el flujo neto promedio fue de 1 370 m³/s, y el flujo máximo hacia el oeste fue de 3 840 m³/s (INE, 1997).

1.4.3 MAREAS

El tipo de mareas en la Laguna de Términos es mixto (diurnas y semidiurnas). Esto significa que ocurren dos pleamares y dos bajamares cada día (Figura 5). El rango entre la pleamar media y la bajamar media en la Isla del Carmen es de 0.43 m, y el promedio de la pleamar máxima es de 0.40 y -0.70 m. De manera histórica la pleamar máxima y la bajamar mínima han sido de 0.93 y 0.80 m, respectivamente (INE, 1997).

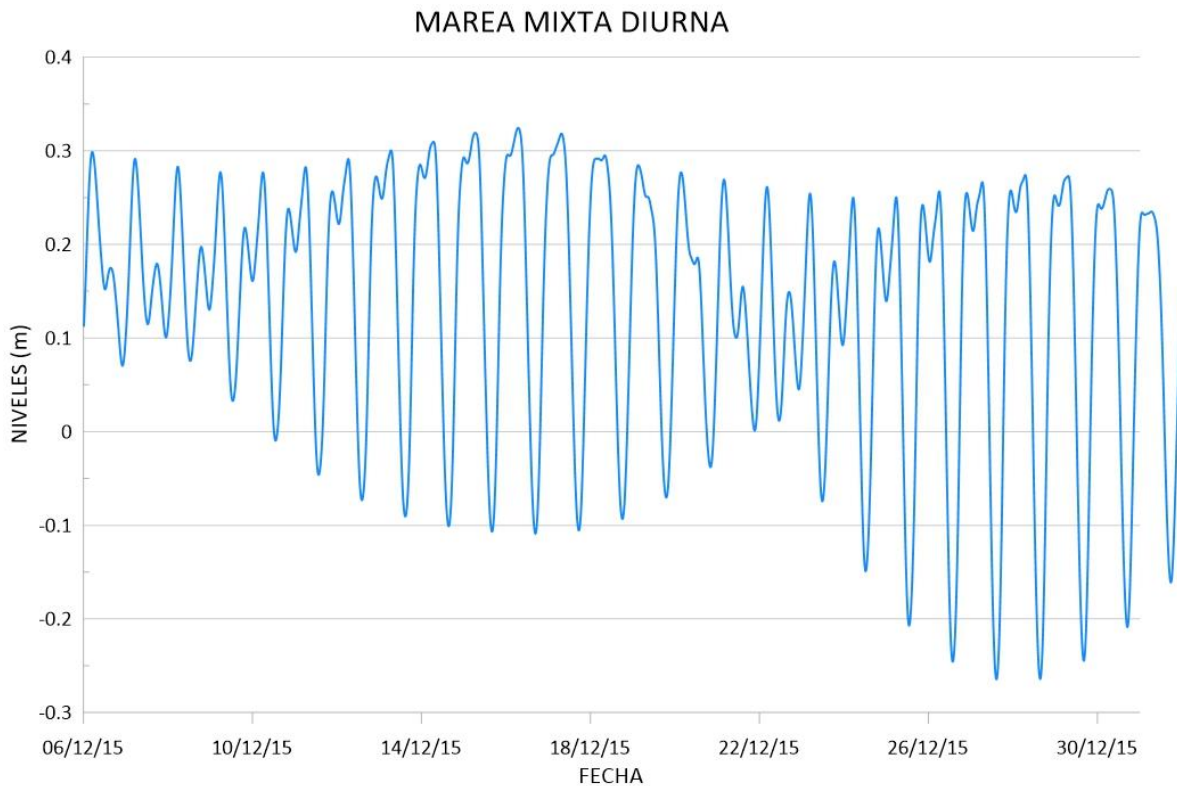


Figura 5. Comportamiento de marea mixta diurna

1.5 RELIEVE

De acuerdo con la definición de relieve, la Laguna de Términos queda incluida en la descripción de planicie baja debido a que el relieve se encuentra con alturas menores a 50 msnm con rasgos kársticos incipientes o sepultados (Bautista *et al.*, 2005). La fisonomía plana propicia procesos acumulativos asociados al drenaje, en esta parte del territorio se captan afluentes que vienen de las partes altas de Campeche (Figura 6).

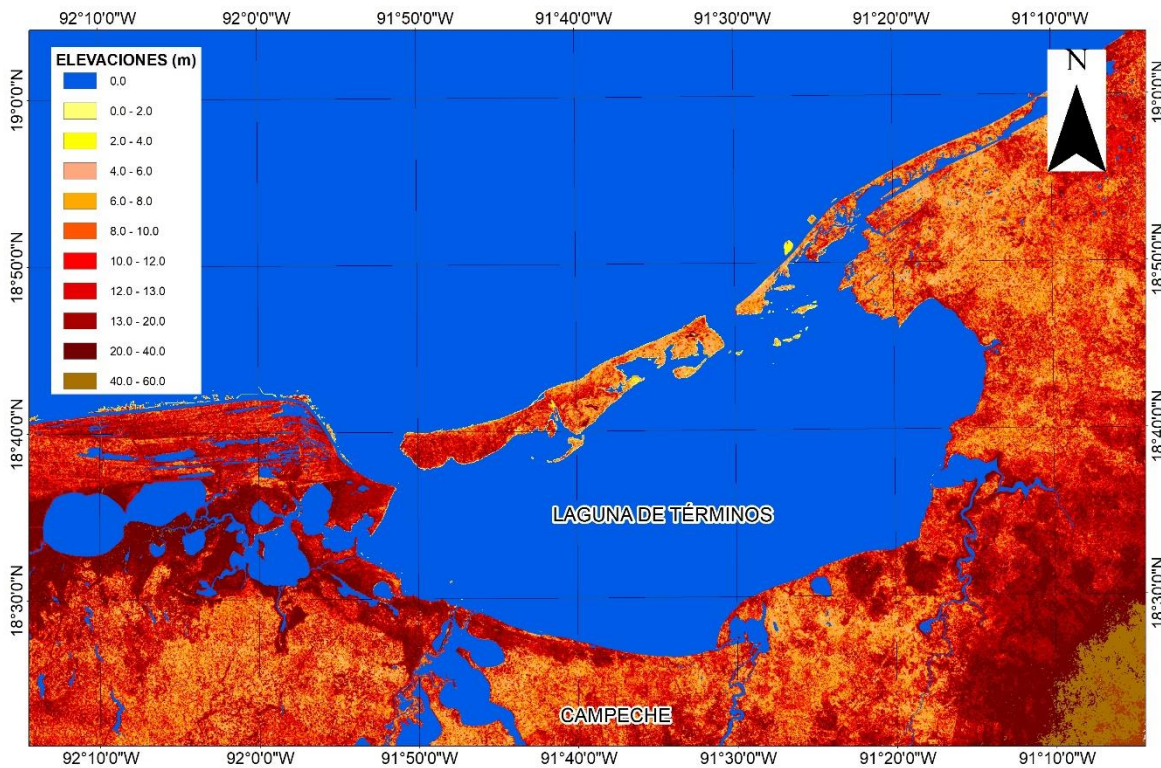


Figura 6. Modelo digital de elevaciones de Laguna de Términos.

1.6 CLIMA

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004), la región de la Laguna de Términos presenta tres diferentes tipos de clima:

- a) Clima cálido subhúmedo intermedio con lluvias en verano (Aw1(w)) en Isla Aguada, frente a la Boca de Puerto Real.
- b) Clima cálido subhúmedo con mayor humedad (Aw2(w)) en la zona que rodea a la Laguna de Términos, incluyendo la Isla del Carmen.
- c) Clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am(f)) en la zona de Palizada, Pom-Atasta hasta el Río San Pedro.

Considerando los patrones anuales de temperatura, precipitación y régimen de vientos, se determinaron tres temporadas climáticas:

- a) Temporada de secas, de febrero a mayo.
- b) Temporada de lluvias, de junio a septiembre.
- c) Temporada de nortes, de octubre a febrero.

CAPÍTULO 2

MODELOS NUMÉRICOS Y OBTENCIÓN DE DATOS

2.1 MODELOS NUMÉRICOS

En la actualidad existe una amplia gama de modelos numéricos disponibles para realizar modelaciones en los ambientes marino, costero y estuarino. Muchos de los modelos disponibles actualmente han sido desarrollados por universidades, institutos de investigación y empresas privadas. Algunos de estos modelos se encuentran a disposición del público y se utilizan en proyectos comerciales, mientras que otros se utilizan principalmente para el ámbito académico (Symonds *et al.*, 2016). A menudo, los modelos numéricos se integran bajo el mismo esquema de pasos para su ejecución y cálculo. HDUNAM y Delft3D comparten algunas semejanzas tal y como se muestra en la Figura 7.

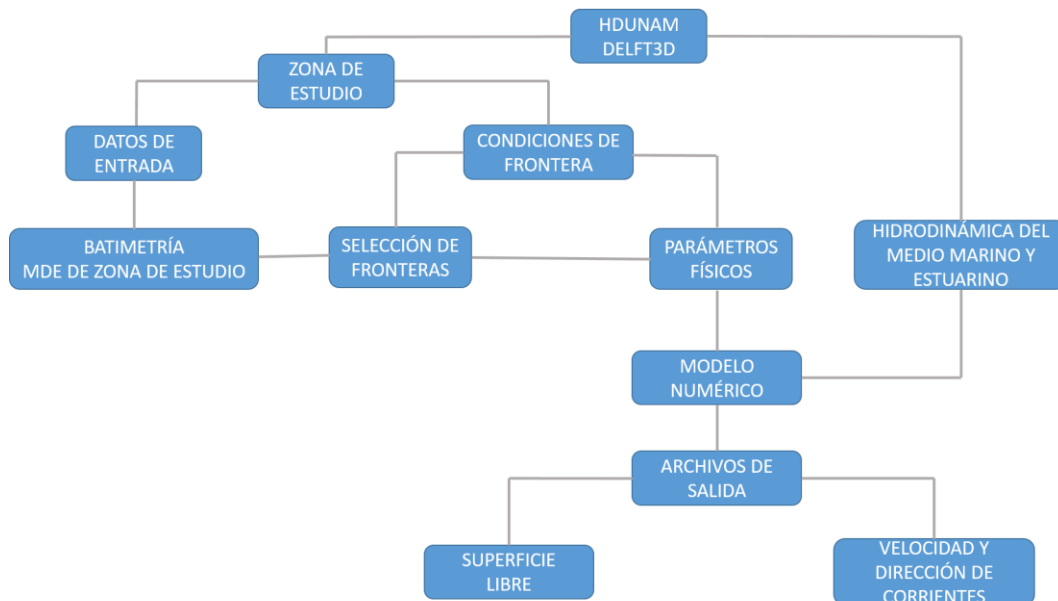


Figura 7. Organigrama general de modelos numéricos

Los dos modelos numéricos utilizados en el desarrollo de este trabajo se configuraron como modelos bidimensionales (2D), ya que ambos utilizan las ecuaciones de conservación de masa y continuidad, resolviéndolas a través de un esquema de diferencias finitas.

2.1.1 HDUNAM

HDUNAM, es una adaptación del modelo H2D, las modificaciones y adaptaciones estuvieron a cargo del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM con la finalidad de acoplarlo al comportamiento de las costas mexicanas.

El modelo numérico H2D fue diseñado por la Universidad de Cantabria y es uno de los modelos que se utilizan para el estudio de las condiciones hidrodinámicas de las zonas litorales. Su uso está especialmente indicado para el análisis de la propagación de ondas largas como mareas en ríos, estuarios y otras zonas costeras de compleja configuración y débil estratificación (AQUALAB, s.f.).

Para la preparación del modelo numérico bidimensional HDUNAM es necesario contar con la definición previa de un área de trabajo y su discretización, ya que esta información nos permitirá definir las condiciones iniciales y de contorno. Una vez asignados los valores a una serie de parámetros básicos se procede a realizar el cálculo numérico. Los pasos a seguir para el proceso son los siguientes:

- Creación de la malla de trabajo.
- Definición de las condiciones iniciales y de contorno.
- Ejecución del modelo.
- Visualización e interpretación de resultados.

2.1.1.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

El modelo numérico HDUNAM resuelve las ecuaciones de onda larga para aguas someras, dónde se debe cumplir la condición $L > h$, donde L es la longitud de la onda cuya propagación se estudia y h representa la profundidad sobre la que se propaga. Para la determinación de las ecuaciones generales de las ondas largas se consideran las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y conservación de la masa (1) correspondiente a fluidos incompresibles.

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}p + \rho\vec{F} + \frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla}\vec{u} = 0 \quad (2)$$

Donde:

u = vector de velocidad u (u, v, w)

p = presión

F = fuerzas de volumen (gravedad)

τ_{ij} = tensiones tangenciales sobre el plano j en la dirección i

$\frac{D}{Dt}$ = derivada material

∇ = divergencia

$\frac{\partial}{\partial x}$ = derivada parcial

Desarrollando la ecuación de cantidad de movimiento (1) se tiene que:

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \left[\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

2.1.2 DELFT3D

El programa Delft3D está compuesto por un conjunto de módulos (componentes) que cubren un cierto rango de aspectos en el campo de la investigación o para resolver un problema relacionado con la ingeniería. Cada módulo puede ser ejecutado de manera independiente o mediante la combinación de uno o más módulos (Figura 8). El intercambio de información entre módulos ocurre

automáticamente mediante “archivos de comunicación”, ya que cada módulo va obteniendo resultados que son empleados por otros módulos, es decir, leen y extraen la información necesaria para “correr” el módulo de interés. Los archivos que son específicos de cada módulo contienen información de la modelación y son empleados para la visualización de resultados.

El módulo Delft3D-FLOW es el empleado en este trabajo y es un modelo numérico que se puede implementar para cualquier sistema acuático y permite hacer modelaciones multidimensionales (2D o 3D). Puede realizar simulaciones de flujo, transporte de sedimentos, oleaje, calidad de agua, desarrollos morfológicos y ecológicos provocados por diferentes forzamientos (Delft3D-FLOW, Deltares, 2014).

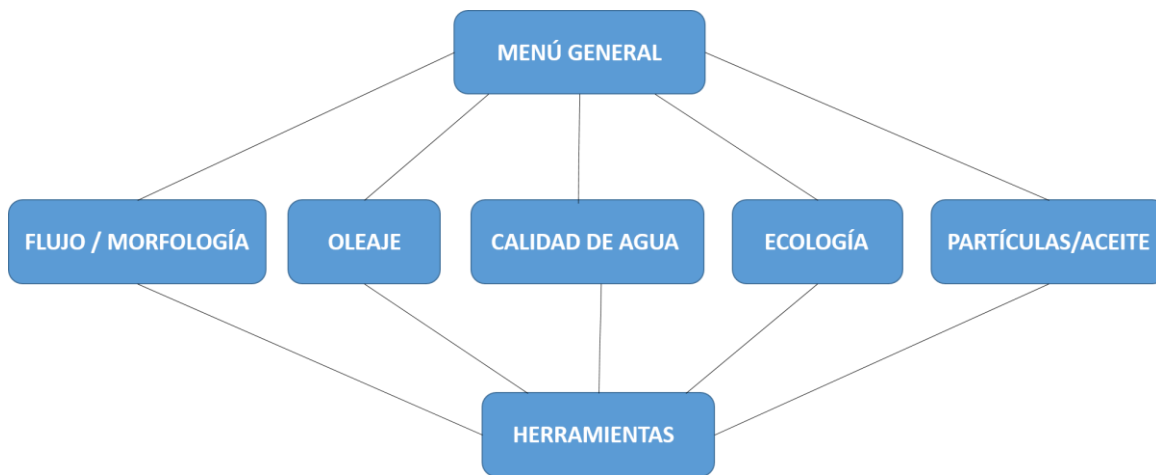


Figura 8. Arquitectura del sistema Delft3D. (Fuente: Delft3D-FLOW, Deltares 2014)

Las áreas de aplicación de este modelo van desde simulaciones de flujos de ríos, fluidos no-hidrostáticos, intrusión de sales, entre otros; y las características estándar a las que se refiere pueden ser por el forzamiento de mareas, la fuerza de Coriolis, la variación de presión atmosférica, etcétera.

Las condiciones hidrodinámicas calculadas con el módulo Delft3D-FLOW son utilizadas por otros módulos de Delft3D, los cuales son:

Tabla 1. Módulos de Delft3D (Fuente: Deltares, 2014)

MÓDULO	DESCRIPCIÓN
Delft3D-WAVE	Propagación de onda corta
D-Water Quality	Calidad del agua
D-Waq Part	Calidad del agua y seguimiento de partículas
Delft3D-ECO	Modelado ecológico
Delft3D-SED	Transporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos

2.1.2.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

La dinámica de fluidos del modelo Delft3D desarrolla ecuaciones para flujo en dos y tres dimensiones que se resuelven en el desarrollo del programa y fueron derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible de aguas poco profundas usando las suposiciones de Boussinesq. La obtención de estas se logra desarrollando las ecuaciones de conservación de masa o de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

De la ecuación de cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

u = velocidad del flujo en dirección x

v = velocidad del flujo en dirección y

w = velocidad del flujo en dirección z

p = presión

ρ = densidad del fluido

g = aceleración de gravedad

μ = viscosidad de Eddy

2.2 DATOS DE ENTRADA

Los modelos numéricos requieren la definición de un dominio discreto del problema denominado *malla computacional*. La finalidad de esta malla es representar de manera visual y matemática de la zona de estudio, es por eso que contiene la información de la localización geográfica, los valores de elevación con respecto al nivel medio del mar y los datos batimétricos del sitio en cuestión.

Para representar con mayor precisión los procesos hidrodinámicos dentro de la Laguna de Términos se elaboró una malla para cada modelo numérico de acuerdo a sus requerimientos. En la Tabla 2 se proporciona el resumen y características de cada malla utilizada.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

Tabla 2. Generalidades del dominio computacional de los modelos HDUNAM y Delft3D-FLOW.

	HDUNAM	DELFT3D-FLOW
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">D O M I N I O</p> <p data-bbox="363 337 1098 511">El dominio requerido por este modelo consiste en una malla con celdas cuadradas, cada una de las esquinas de estas celdas comprenden la información de profundidad o elevación según sea el área que se encuentre representando.</p> <div data-bbox="430 662 1018 1323"> </div> <p data-bbox="451 1339 997 1372">Figura 9. Dominio computacional para modelo HDUNAM</p>		

Este modelo numérico requiere un dominio representado en una malla que puede ser rectangular o curvilínea con la condición de que sus celdas estén bien estructuradas y sean lo más ortogonal posible. En cada celda se define el nivel del agua en su centro (puntos de presión) y las componentes de velocidad son perpendiculares a las caras de las celdas donde fueron situados y en las esquinas se encuentra definida la profundidad. Este modelo no requiere de datos topográficos, solamente batimétricos.

Figura 10. Dominio computacional para modelo Delft3D

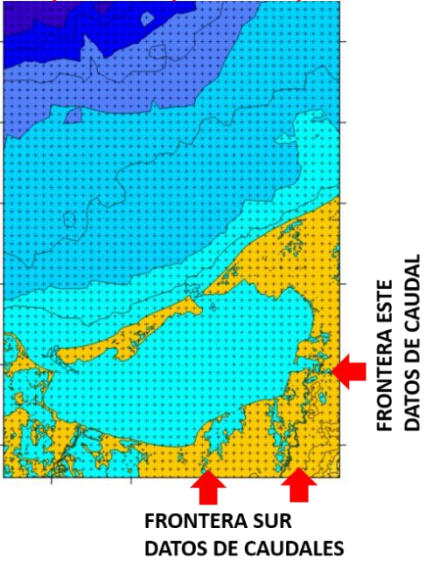
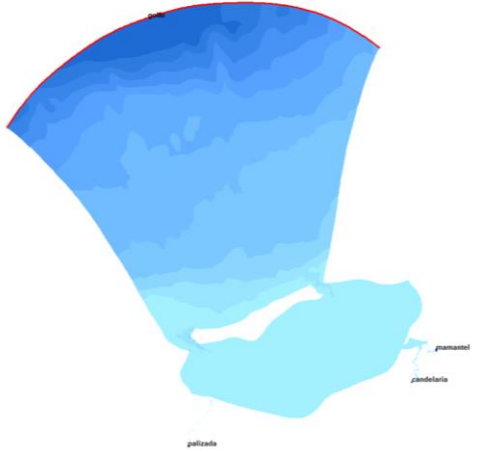
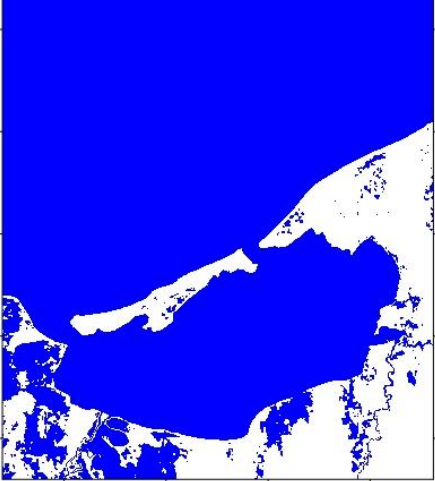
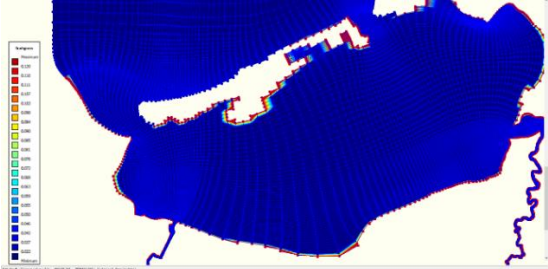
2.3 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

La *condición inicial* corresponde al valor con el que da inicio la simulación. Este valor debe asignarse al menos a una de las variables involucradas y en este trabajo se consideró el nivel de superficie del agua.

Las *fronteras* son aquellas que definen el comportamiento del modelo en sus límites. Generalmente son de dos tipos abiertas y cerradas. Sobre las fronteras abiertas se establecen las condiciones de flujo y de transporte que serán transmitidos al *dominio* (malla computacional) de la modelación, mientras que para las fronteras cerradas el modelo asumirá que no hay condiciones que afecten la simulación. En la Tabla 3 se indican las condiciones de frontera para cada modelo.

Tabla 3. Condiciones de frontera de los modelos HDUNAM y Delft3D-FLOW

	HDUNAM	DELFT3D-FLOW
FRONTERAS	<p>CONDICIONES DE FLUJO</p> <p>Este modelo ofrece la posibilidad de ingresar los datos como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveles: se elige esta opción si se cuenta con los datos de mareas y niveles de superficie. • Sinusoide: esta opción es la adecuada si se conoce la amplitud, periodo y fase de oleaje. <p>En caso de que la condición de flujo corresponda a un río o algún otro medio que aporte gasto a una frontera se deberá ingresar el dato como caudal:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caudales: se elige esta opción cuando se conozca el hidrograma de caudal. Como dato importante el gasto debe indicarse en unidades $m^3/s/m$, esto debido a que el gasto debe dividirse entre la distancia total de las celdas donde se asignaran los datos de caudal. <p>Para el caso de este modelo es necesario especificar el gasto de entrada sobre las celdas de frontera que se estén utilizando por lo tanto sus unidades de gasto serán $m^3/s/m$.</p>	<p>CONDICIONES DE FLUJO</p> <p>Pueden ser representadas por niveles de agua, corrientes, gradientes de nivel de agua, descargas y Riemann (combinación de nivel de agua con corrientes). Delft3D dispone de las siguientes condiciones de frontera:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nivel de agua: este tipo de forzamiento se puede utilizar cuando se cuenta con componentes armónicos, astronómicos de marea o se puede indicar como una serie de tiempo. Para este tipo de condición también se puede utilizar la relación QH (gasto-altura), así como la salinidad y temperatura. • Neumann: se utiliza para indicar el gradiente del nivel del agua a lo largo de la costa. • Riemann: se utiliza para estudiar el fenómeno de reflexión. • Descarga o flujo (total o por celda de malla): esta opción se elige cuando la condición de flujo corresponde a un río que pretenda simularse dentro de la malla computacional. <p>Dentro de este modelo no es necesario especificar el caudal que actúa en cada una de las celdas de las fronteras puesto que el gasto total es asignado a toda la frontera que se esté utilizando por lo que las unidades de gasto permanecen en m^3/s.</p>

A B I E R T A S	<p style="text-align: center;">FRONTERA NORTE NIVELES DE MAREA</p>  <p style="text-align: center;">FRONTERA SUR DATOS DE CAUDALES</p> <p style="text-align: right; transform: rotate(90deg);">FRONTERA ESTE DATOS DE CAUDAL</p> <p style="text-align: center;"><i>Figura 11. Fronteras abiertas para modelo HDUNAM</i></p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 12. Fronteras abiertas para modelo Delft3D</i></p>
P A R Á M E T R O S F Í S I C O S	<p>RUGOSIDAD</p> <p>Dentro de este modelo el parámetro de rugosidad se asigna de manera uniforme a toda la malla computacional (Figura 13), no hay posibilidad de asignar distintas rugosidades. El coeficiente se puede asignar con los valores de Chezy o Manning.</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figura 13. Rugosidad uniforme sobre malla computacional HDUNAM</i></p>	<p>RUGOSIDAD</p> <p>Debido a que en la realidad la rugosidad no siempre permanece constante es necesario indicar los cambios que existen dentro de la zona de estudio que se esté analizando. Delft3D ofrece la posibilidad de asignar distintas rugosidades a lo largo de la malla computacional que se esté empleando.</p>  <p style="text-align: center;"><i>Figura 14. Rugosidades variables en malla computacional Delft3D</i></p>

P A R Á M E T R O S	<p>VIENTO</p> <p>Si se desea conocer las implicaciones que tiene el viento sobre el modelo, HDUNAM permite asignar la velocidad y dirección de donde proviene. Para la simulación hidrodinámica el efecto del viento se debe asignar como un dato constante, es decir, al momento de ingresar el dato al modelo numérico se indicará que el viento se encuentra soplando en la misma dirección y con la misma magnitud durante todo el periodo de simulación.</p>	<p>VIENTO</p> <p>Se puede indicar la velocidad y dirección de viento que actúan sobre el modelo de manera constante o variable. En caso de ser variable Delft3D ofrece la posibilidad de ingresar los datos como una serie de tiempo, es decir, se pueden asignar varios valores y no solamente un valor constante. El valor del parámetro de viento irá cambiando de acuerdo a la temporada que se esté modelando.</p>
	<p>VISCOSIDAD</p> <p>En el modelo HDUNAM el número de Eddy hace referencia a la viscosidad horizontal y se toma como un parámetro de calibración para la longitud de onda.</p>	<p>VISCOSIDAD</p> <p>Generalmente la viscosidad y difusividad horizontal que actúan sobre el modelo son valores fijos puesto que es mínima la información que se requiere, debe indicarse en unidades de m^2/s.</p>
	<p>SEDIMENTOS</p> <p>No ofrece un módulo para agregar información relacionada a los sedimentos.</p>	<p>SEDIMENTOS</p> <p>El modelo maneja valores por defecto para la densidad específica y el valor del diámetro medio del sedimento (D50). Estos datos pueden cambiar de acuerdo a la información que proporcione el usuario.</p>
	<p>MORFOLOGÍA</p> <p>No ofrece un módulo para agregar información relacionada a la morfología.</p>	<p>MORFOLOGÍA</p> <p>Ofrece un módulo para indicar el factor morfológico deseado para que la simulación realice cambios a escala respecto a la simulación hidrodinámica.</p>

P A R Á M E T R O S D E T I E M P O	<p>TIEMPO DE SIMULACIÓN</p> <p>El tiempo total de ejecución se indicará en horas y dependerá del número de días que se quieran analizar en el modelo.</p>	<p>TIEMPO DE SIMULACIÓN</p> <p>Se debe especificar la fecha de referencia (debe ser anterior al tiempo de simulación), fecha de inicio y final de la simulación y la zona horaria (+GTM).</p>
	<p>INCREMENTO DE TIEMPO</p> <p>Indica el tiempo de iteración entre celda y celda de la malla de la batimetría, esto indica que entre más pequeña sea la celda menor es el incremento de tiempo que se debe considerar.</p>	<p>INCREMENTO DE TIEMPO</p> <p>Indica el tiempo en que se calculan los resultados de la simulación entre celda y celda. Este valor se indica en minutos.</p>

2.4 ARCHIVOS DE SALIDA

En esta sección se describe la manera en que los modelos arrojan los archivos de información (resultados) después de terminar la simulación hidrodinámica, en ambos modelos se debe indicar el intervalo de tiempo en que se desea que sean grabados los archivos.

Tabla 4. Archivos de salida de los modelos HDUNAM y Delft3D

	HDUNAM	DELFT3D-FLOW
ARCHIVOS DE SALIDA	<p>Este modelo genera 4 archivos de salida por cada intervalo de tiempo indicado, dos archivos con formato *.grd y dos en formato *.dat, estos archivos pueden visualizarse con ayuda de algún software graficador, por ejemplo, surfer o grapher.</p>	<p>Este modelo genera 3 archivos únicos de salida con los formatos "trim- -.mdf", "trih- -.mdf", "com- -.mdf". Las fechas de inicio y final deben coincidir en los campos que se requiere para evitar errores.</p>
	<p>ARCHIVO DE SUPERFICIE LIBRE</p> <p>Archivos de superficie libre del agua, es arrojado en un formato *.grd y en él se puede encontrar el nivel de la superficie en cada nodo de la malla en un instante dado.</p>	<p>ARCHIVO trim- -.mdf</p> <p>Este archivo contiene los resultados de la simulación presentados en el área de modelación. El archivo contiene los resultados obtenidos para superficie libre, velocidades (vectores y magnitud), arrastre de sedimentos, morfología, etc.</p>
	<p>ARCHIVO DE VELOCIDADES</p> <p>Archivo con un formato *.grd y que contiene la información de las velocidades máximas y mínimas que se hayan alcanzado durante la modelación, la información está dada para cada nodo de la malla en un determinado tiempo.</p>	<p>ARCHIVO trih- -.mdf</p> <p>Es un archivo histórico donde se encuentran almacenados los resultados puntuales de los puntos de control y secciones transversales que se hayan asignado sobre la malla computacional.</p>
	<p>ARCHIVO DE CAUDAL</p> <p>Este archivo tiene un formato *.dat y se encuentra delimitado por columnas, cada una de ellas contiene información de cada uno de los nodos que componen la malla.</p>	<p>ARCHIVO com- -.mdf</p> <p>Es un archivo de comunicación que enlaza a los módulos FLOW y WAVE, llevando los datos de un módulo a otro de acuerdo a lo que se haya especificado al momento de iniciar la modelación.</p>
	<p>ARCHIVO DE RESULTADOS PUNTUALES</p> <p>Es un archivo en formato *.dat que contiene la información de resultados puntuales en los puntos de control asignados a la modelación.</p>	

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

La metodología seguida en este trabajo consta de dos partes principales: la obtención de datos y la ejecución de simulaciones. Se hace referencia y se describe cada uno de los parámetros físicos y parámetros de tiempo a utilizar, así como los dominios y las condiciones iniciales y de frontera, de manera que las simulaciones puedan ejecutarse bajo diferentes escenarios a lo largo del año 2015.

3.1 OBTENCIÓN DE DATOS

3.1.1 CAUDALES

Dentro de la zona de la Laguna de Términos desembocan los ríos Palizada, Candelaria y Mamantel, por lo que es necesario conocer el aporte de cada uno de ellos al cuerpo lagunar y para esto se obtuvo la información del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Dentro de este banco se encuentra disponible la información de las estaciones hidrométricas del país.

3.1.2 MAREAS

Los datos se obtuvieron con ayuda del programa MAR V1.0 2011 que fue desarrollado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Secretaría de Marina y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California (CICESE). Los cálculos de predicción se realizan con los datos históricos de las estaciones mareográficas.

3.1.3 VIENTO

Los datos utilizados pertenecen a la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y se ubican en su apartado de datos atmosféricos Climate Forecast System Reanalysis v2 (CFSRv2).

3.2 ANALISIS DE CAUDALES

Se consultó información de las estaciones hidrométricas Candelaria (clave 30181), Palizada (clave 30199), Mamantel (clave 30200) para generar hidrogramas de caudal medio diario. La elaboración de los hidrogramas se hizo a partir de una selección de años que tuvieran datos completos, posteriormente, los datos se ordenaron por día del año y, por último, se obtuvo el valor medio diario para el análisis. Se consideraron años de 365 días sin excepción, es decir no se tomaron en cuenta los años bisiestos. En el caso del río Mamantel solamente se encontraron registros completos de los años 1953 a 2013, al igual que para el río Candelaria, y los registros del río Palizada corresponden al periodo de 1992 a 2013. Los hidrogramas se presentarán dentro de cada escenario de simulación puesto que cada modelo numérico empleado en este trabajo maneja de distinta manera las unidades de gasto.

3.3 SERIES DE TIEMPO DE MAREAS Y VIENTO

Los datos de marea corresponden al registro del año 2015 de la estación mareográfica Cd. Del Carmen, Campeche, con referencia al nivel medio del mar. Para ingresar los datos de marea en ambos modelos se elaboró una serie de tiempo para cada escenario de simulación, es decir los datos se procesaron en un intervalo de tiempo de 15 minutos.

Con la finalidad de conocer la dirección y magnitud del viento se emplearon datos del año 2015. Este parámetro se consideró como una serie de tiempo, es decir, los datos de viento se asociaron a la fecha que corresponde a cada escenario de simulación para el modelo Delft3D-FLOW, mientras que para HDUNAM se consideró únicamente el valor medio por escenario de simulación.

3.4 PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Los escenarios de simulación tienen como finalidad ofrecer una visión general sobre el comportamiento hidrodinámico de la Laguna de Términos durante tres temporadas climáticas del año.

Las temporadas consideradas en este trabajo son:

- a) Temporada de secas de febrero a mayo
- b) Temporada de lluvias a de junio a septiembre
- c) Temporada de nortes de octubre a enero

Es importante mencionar que el comportamiento de las mareas, el efecto del viento y las descargas de los ríos es diferente en cada una de las temporadas, esto como consecuencia de los cambios meteorológicos propios de cada una de ellas.

Cada uno de los escenarios tuvo un tiempo de simulación de 120 días (+3) para lograr la estabilización numérica en los modelos HDUNAM y Delft3D-FLOW.

3.4.1 ESCENARIO 1: TEMPORADA DE SECAS

Durante esta temporada el río Palizada aporta un gasto máximo de 166.53 m³/s. El río Candelaria contribuye con un gasto máximo de 36.249 m³/s mientras que el río Mamantel cuenta con la menor aportación de los tres con un registro máximo de 1.62 m³/s. En la Figura 15 se muestran los hidrogramas de cada uno de los ríos utilizados para cada modelo.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

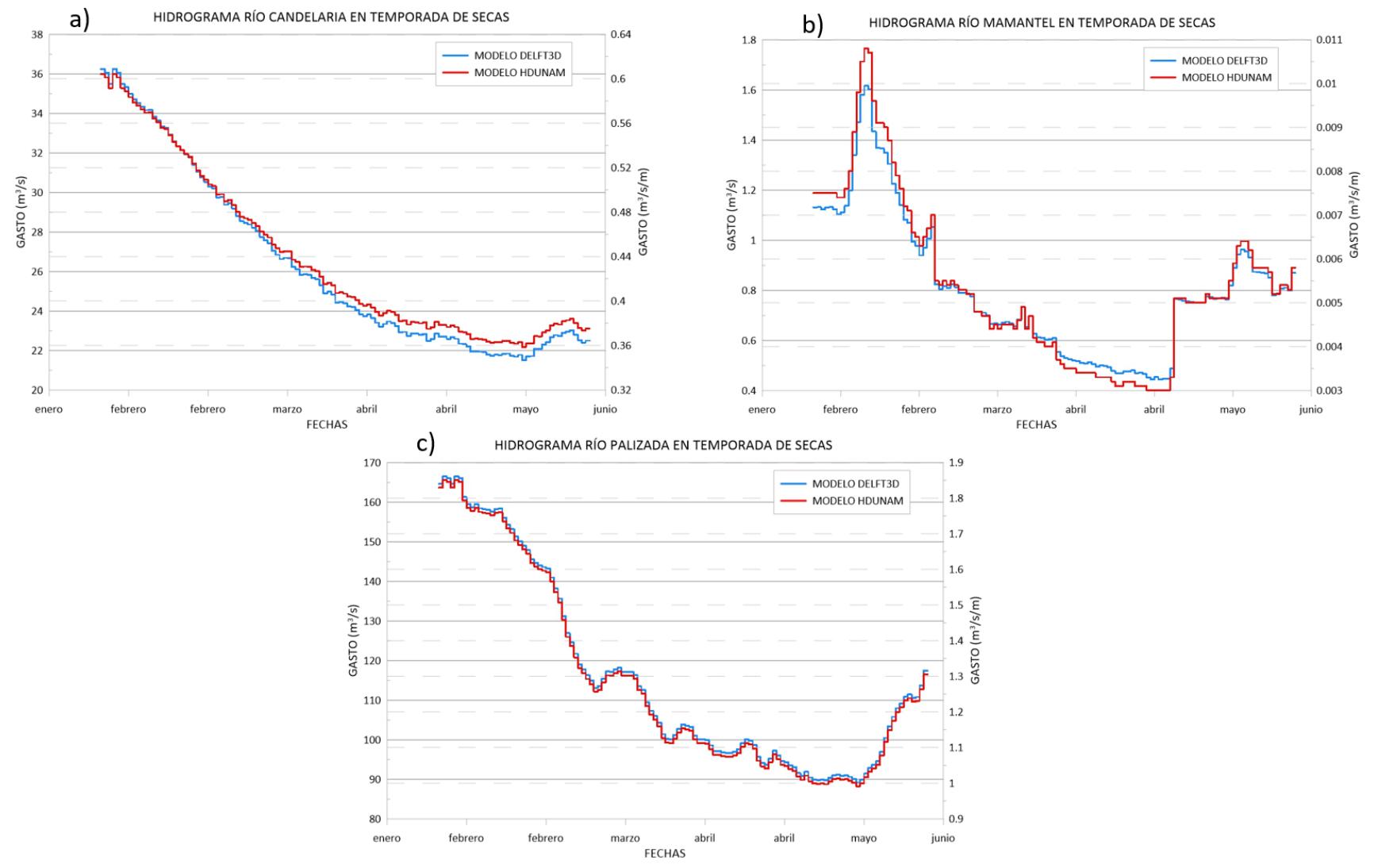


Figura 15. Hidrogramas de los Ríos a) Candelaria, b) Mamantel, c) Palizada en temporada de secas. (Fuente: CONAGUA)

Las variaciones de los niveles de marea para esta temporada se encuentran en un rango de 0.1736 a -0.3854 m (Figura 16).

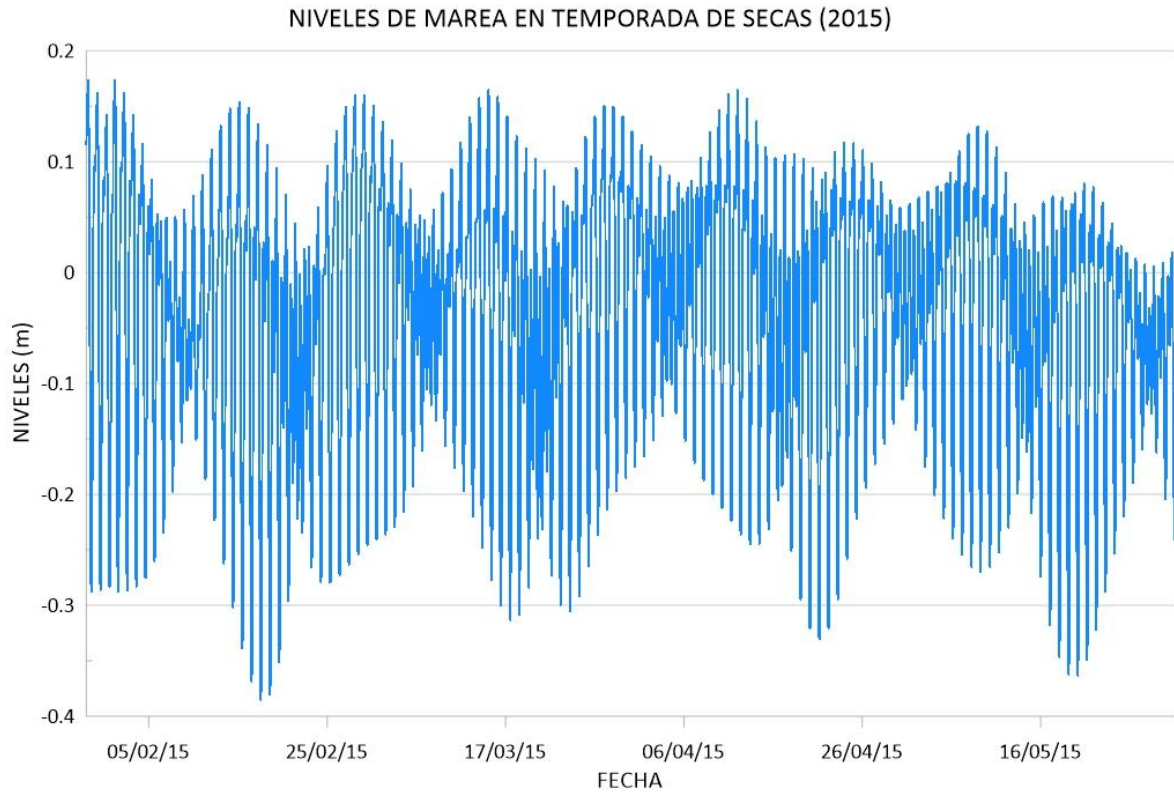


Figura 16. Niveles de marea en temporada de secas año 2015 (Fuente de datos: MAR V1.0)

En la Figura 17 se muestra el comportamiento del viento para esta temporada. La velocidad máxima alcanzada es igual 11.9 m/s con una dirección de 9.66° y el valor medio es igual a 5.47 m/s y dirección de 76° . El valor medio se utilizará para la ejecución del modelo HDUNAM.

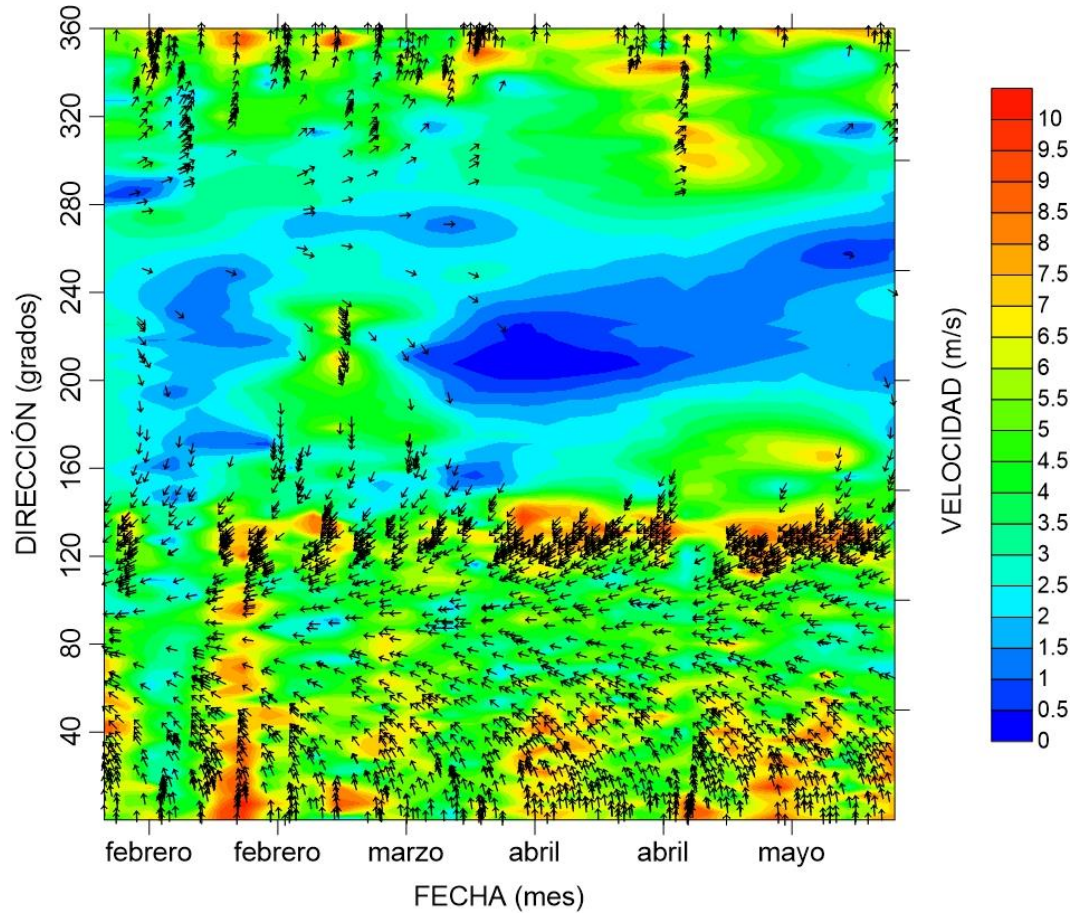


Figura 17. Dirección y velocidad de viento en temporada de secas (Fuente: NOAA, CFSRv2)

3.4.2 ESCENARIO 2: TEMPORADA DE LLUVIAS

La contribución de los ríos en esta temporada aumenta significativamente en comparación con el escenario 1 (Figura 18). El río Palizada aporta un gasto máximo de 395.17 m³/s, el río Candelaria contribuye con un gasto máximo de 100.89 m³/s y el río Mamantel cuenta con la menor aportación de los tres con un registro máximo de 13.40 m³/s.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

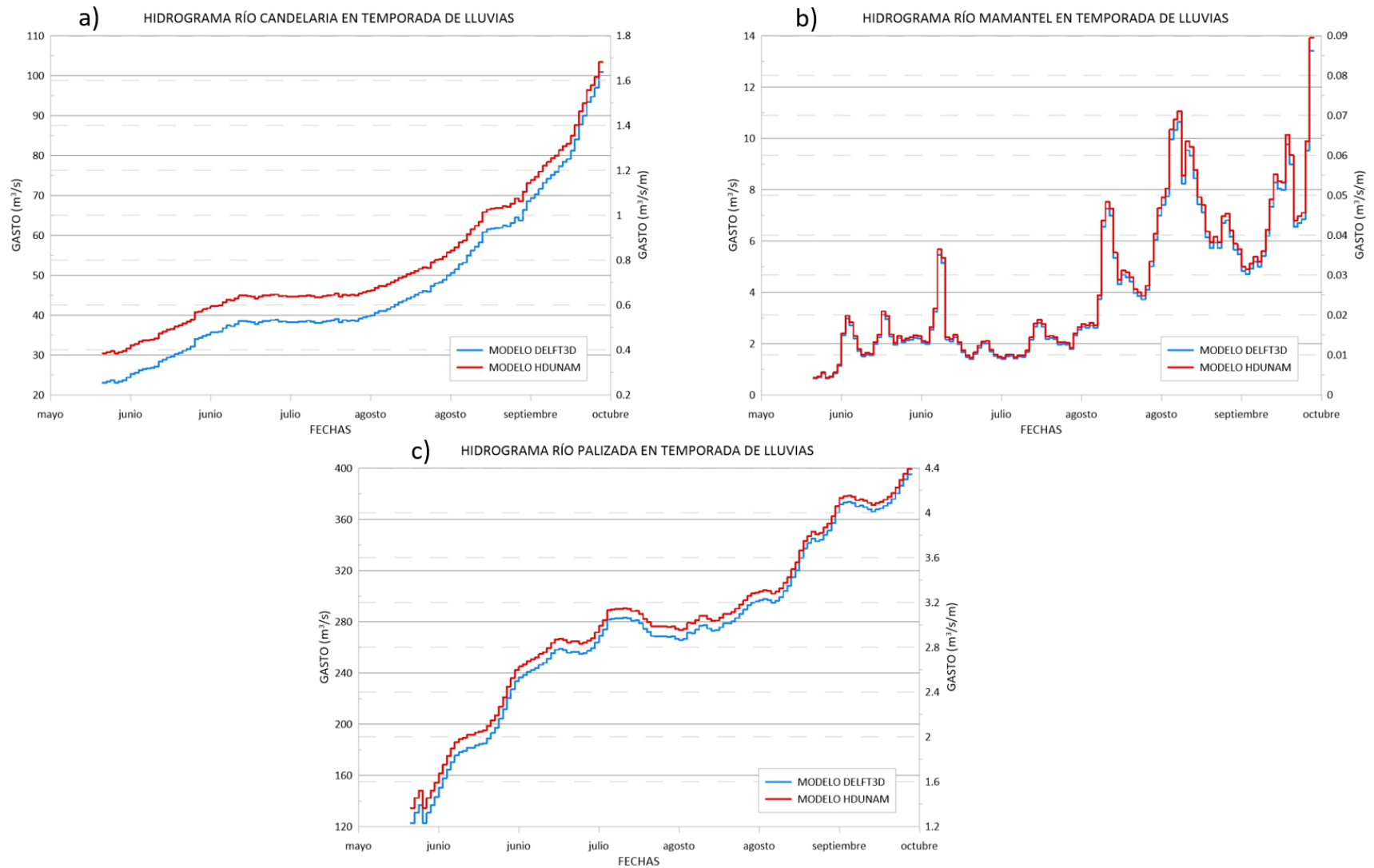


Figura 18. Hidrogramas de los Ríos a) Candelaria, b) Mamantel, c) Palizada en temporada de lluvias. (Fuente: CONAGUA)

Durante la temporada de lluvias los niveles de marea toman valores en un rango de 0.2578 a -0.4081 m con respecto al nivel medio del mar (Figura 19).

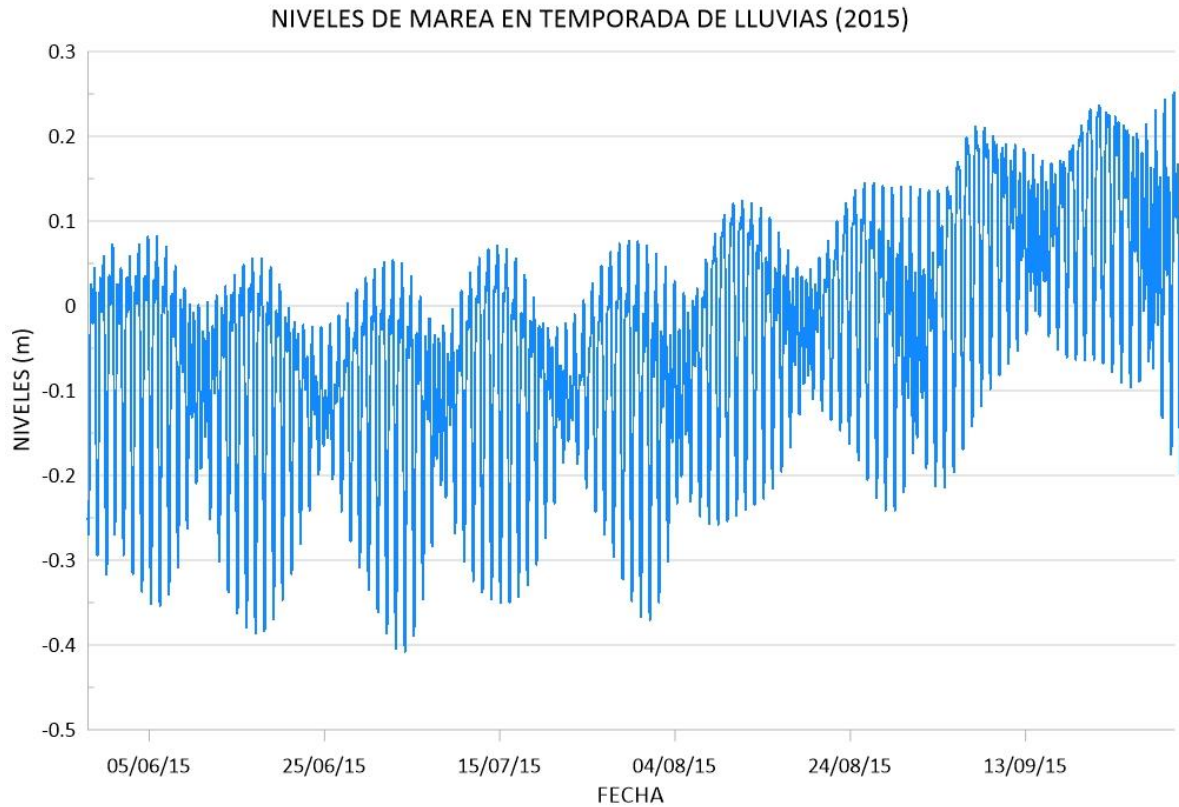


Figura 19. Niveles de marea en temporada de lluvias año 2015 (Fuente: MAR V1.0)

Durante esta temporada, el viento llega velocidades máximas de 11.1 m/s con una dirección de 54.5° y el valor medio es igual a 5.18 m/s asociado a una dirección de 105° (Figura 20).

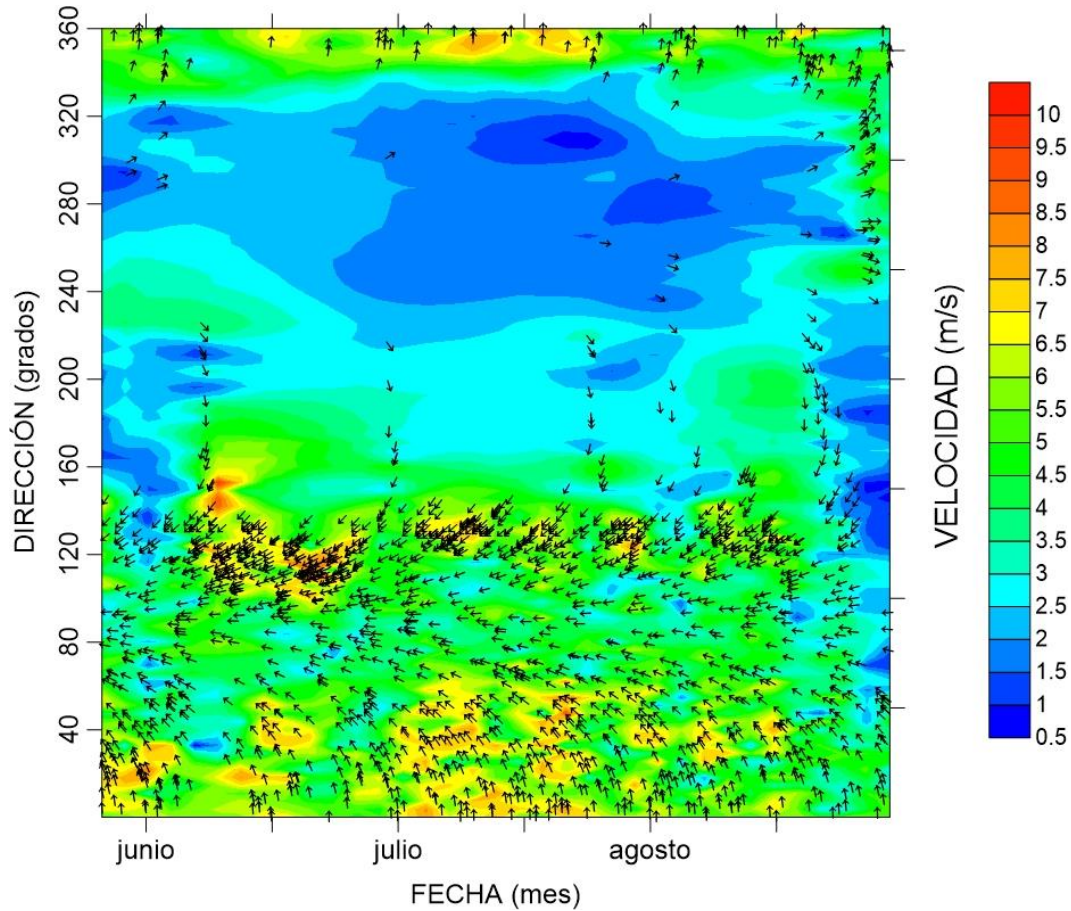


Figura 20. Dirección y velocidad de viento en temporada de lluvias (Fuente: NOAA, CFSRv2)

3.4.3 ESCENARIO 3: TEMPORADA DE NORTES

Durante esta temporada el aporte máximo de caudal al sistema lagunar lo registra el río Palizada con un gasto máximo de 459.26 m³/s, el río Candelaria contribuye con un gasto máximo de 137.37 m³/s, y el río Mamantel cuenta con la menor aportación de los tres con un registro máximo de 13.09 m³/s (Figura 21).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

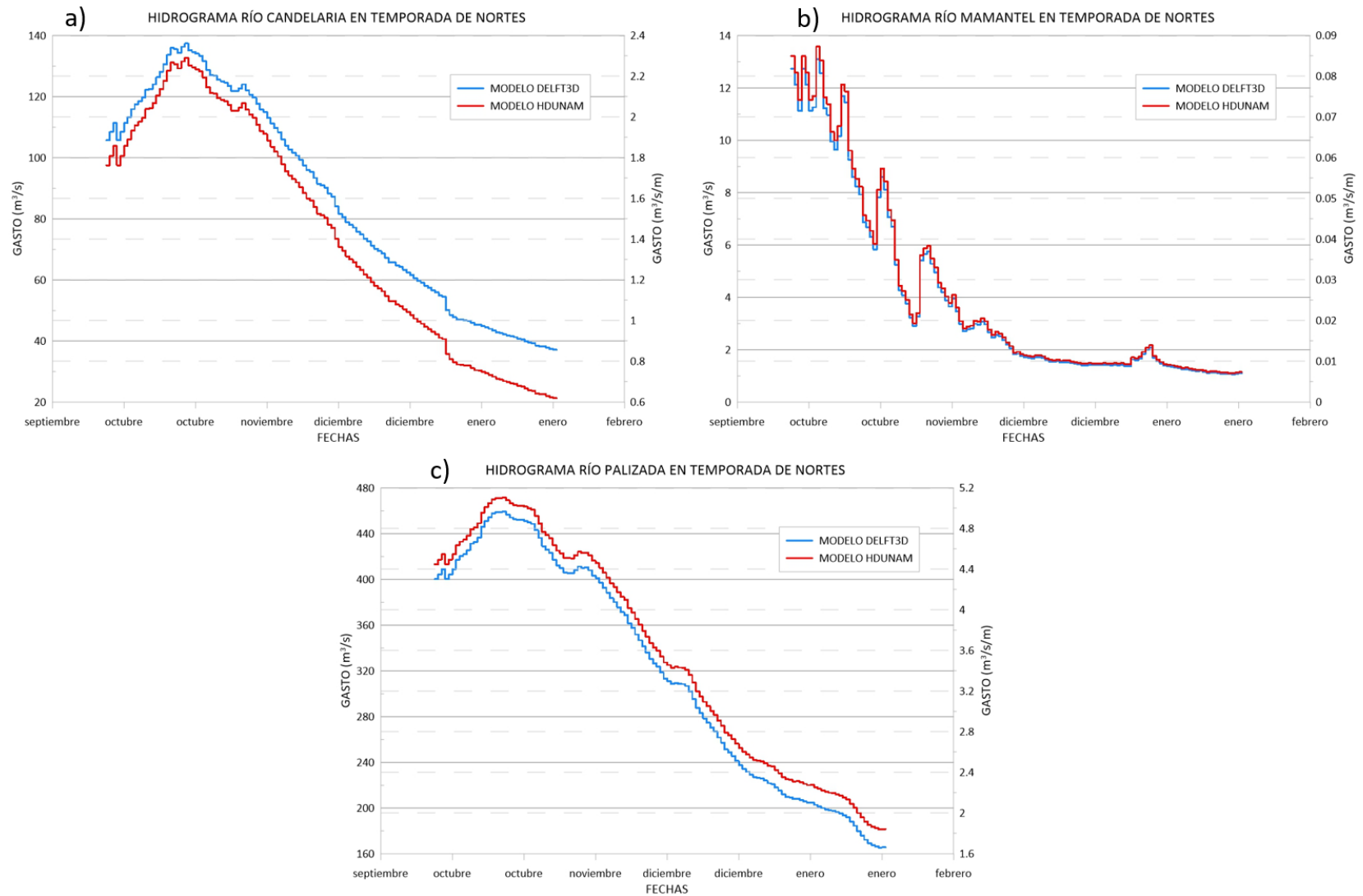


Figura 21. Hidrogramas de los Ríos a) Candelaria, b) Mamantel, c) Palizada en temporada de nortes. (Fuente: CONAGUA)

Las variaciones de los niveles de marea para esta temporada se encuentran en un rango de 0.1736 a -0.3854 m durante esta temporada (Figura 22).

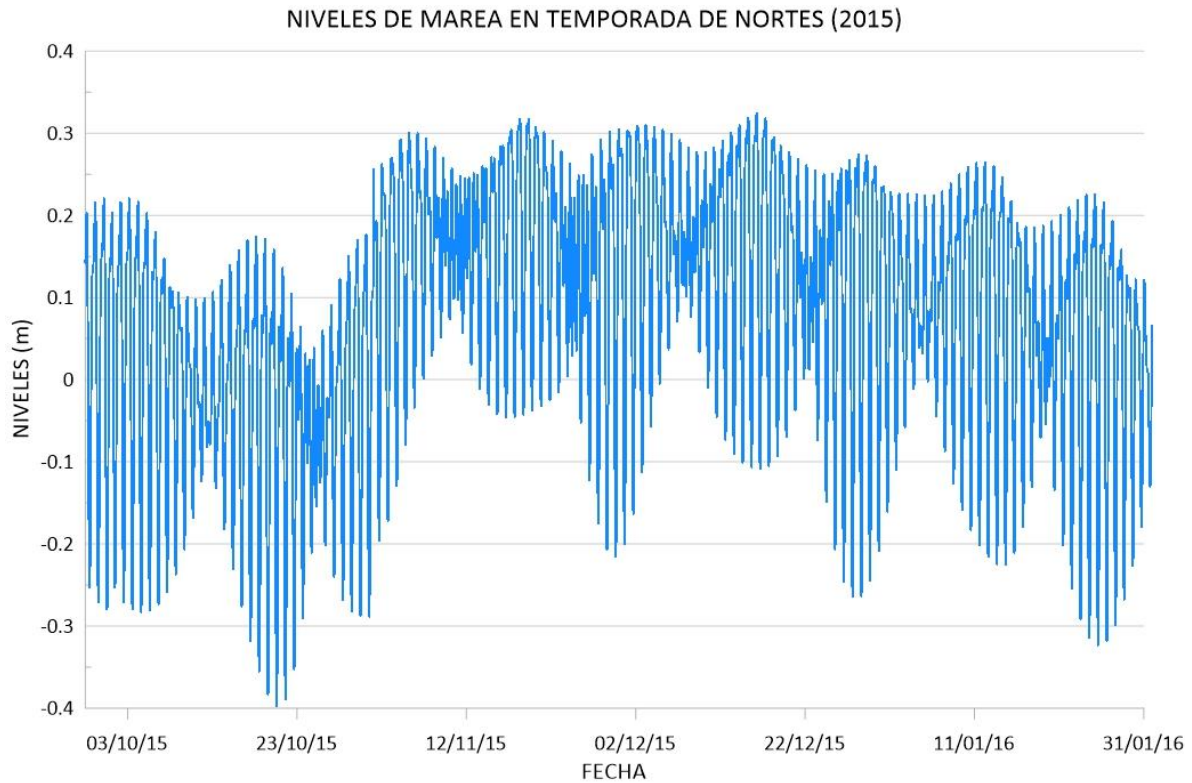


Figura 22. Niveles de marea en temporada de nortes año 2015 (Fuente: MAR V1.0)

Durante esta temporada el viento alcanzó una velocidad máxima de 13.9 m/s con una dirección de 189° y el valor medio es igual a 5.56 m/s asociado a una dirección de 113° (Figura 23).

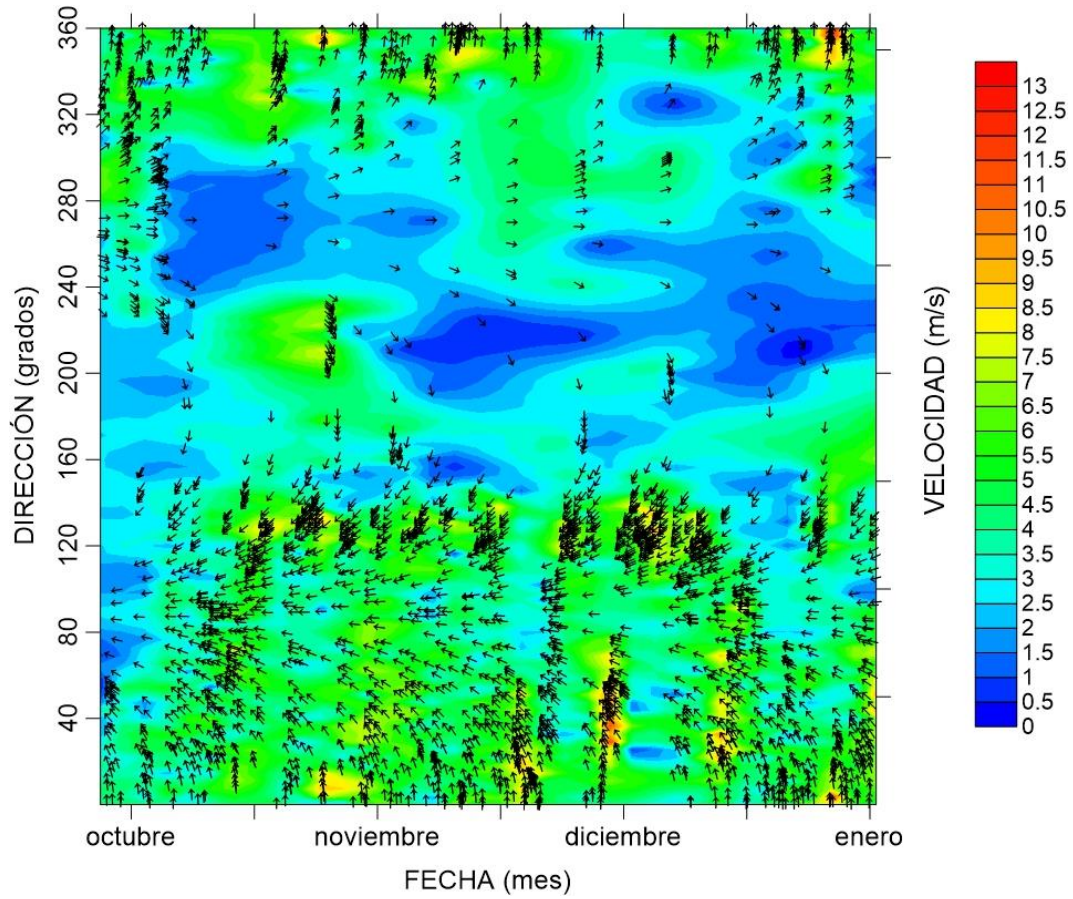


Figura 23. Dirección y velocidad de viento en temporada de nortes (Fuente: NOAA, CFSRv2)

Los parámetros de entrada utilizados para cada escenario de simulación se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de entrada para modelos numéricos HDUNAM y Delft3D-FLOW

		HDUNAM			DELFT3D-FLOW		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
DOMINIO	Malla computacional	Para este modelo se realizó una malla regular de 1276 X 846 celdas de 100 X 100 m. Los datos batimétricos se obtuvieron de la carta náutica S.M. 842.1 2005 de la Secretaría de Marina y los datos topográficos provienen de la base de datos de elevación de terreno LiDAR @5 del portal INEGI. La malla es delimitada por una frontera norte a 90 km de distancia del área de estudio.			Para este modelo se elaboró una malla de 314 X 725 celdas en las direcciones M y N respectivamente. La resolución espacial de las celdas varía de 2085 m a 1.8 m. Los datos batimétricos se obtuvieron de la carta náutica S.M. 842.1 2005 de la Secretaría de Marina. Esta malla es delimitada por una frontera abierta a 88 km del área de estudio.		
	FRONTERAS	Mareas	Niveles de marea para cada temporada climática.			Niveles de marea para cada temporada climática.	
	Caudales	Hidrograma de caudal medio diario correspondiente a cada temporada climática.			Hidrograma de caudal medio diario correspondiente a cada temporada climática.		
PARÁMETROS FÍSICOS	Viento	5.4 m/s	5.18 m/s	5.56 m/s	Registro de velocidad y dirección de viento para cada temporada climática.		
	Rugosidad	Debido a que este modelo asigna el parámetro de rugosidad de manera uniforme se asignó un coeficiente de Manning para superficies arenosas con un valor de 0.030.			En la zona de la Laguna de Términos se ubican grandes zonas de manglar por lo que es necesario indicar sobre la malla computacional los cambios de rugosidad entre arenas y mangle. De acuerdo a González (2018) el coeficiente de Manning para un suelo con cobertura moderada de mangle es igual a 0.12 y es el que se utilizará en este modelo.		
PARÁMETROS DE TIEMPO	Tiempo de simulación	2952 horas	2952 horas	2952 horas	29/01/15 00:00 31/05/15 00:00	29/05/15 00:00 30/09/15 00:00	28/09/15 00:00 31/01/16 00:00
	Incremento de tiempo	2 segundos	2 segundos	2 segundos	0.1 minutos	0.1 minutos	0.1 minutos

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

4.1 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de ejecutar ambas modelaciones. Los modelos representan la hidrodinámica de la Laguna de Términos mediante mapas de superficie libre, velocidades y dirección de corrientes. Cada uno de ellos, corresponde a un ciclo de marea completo (marea viva/marea muerta).

Las simulaciones se hicieron para el año 2015 y los resultados de ambos modelos se compararon entre sí con la finalidad de analizar las ventajas y desventajas que presenta cada uno.

Los puntos de control corresponden a las bocas Del Carmen y Puerto Real (Figura 24). Sin embargo, para cada programa los puntos se ubican en posición diferente debido al tipo de malla que requiere cada uno de los modelos. Los resultados obtenidos para las bocas se mostrarán como gráficas de superficie libre y velocidad.



Figura 24. Puntos de control para ambos modelos numéricos.

4.1.1 TEMPORADA DE SECAS

De acuerdo con el registro de mareas, el día 01/02/2015 se presentó una marea viva. Los resultados de superficie libre y velocidades corresponden a las 03:00, 09:00, 15:00 y 21:00 horas del día mencionado.

La Figura 25 es una representación de la superficie libre obtenida con el modelo Delft3D-FLOW, en donde el valor máximo corresponde a 0.11 m y el mínimo a -0.28 m. La figura muestra que el lado oeste de la Laguna de Términos siempre se mantiene con un mayor nivel de superficie en comparación con el lado este.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
 APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

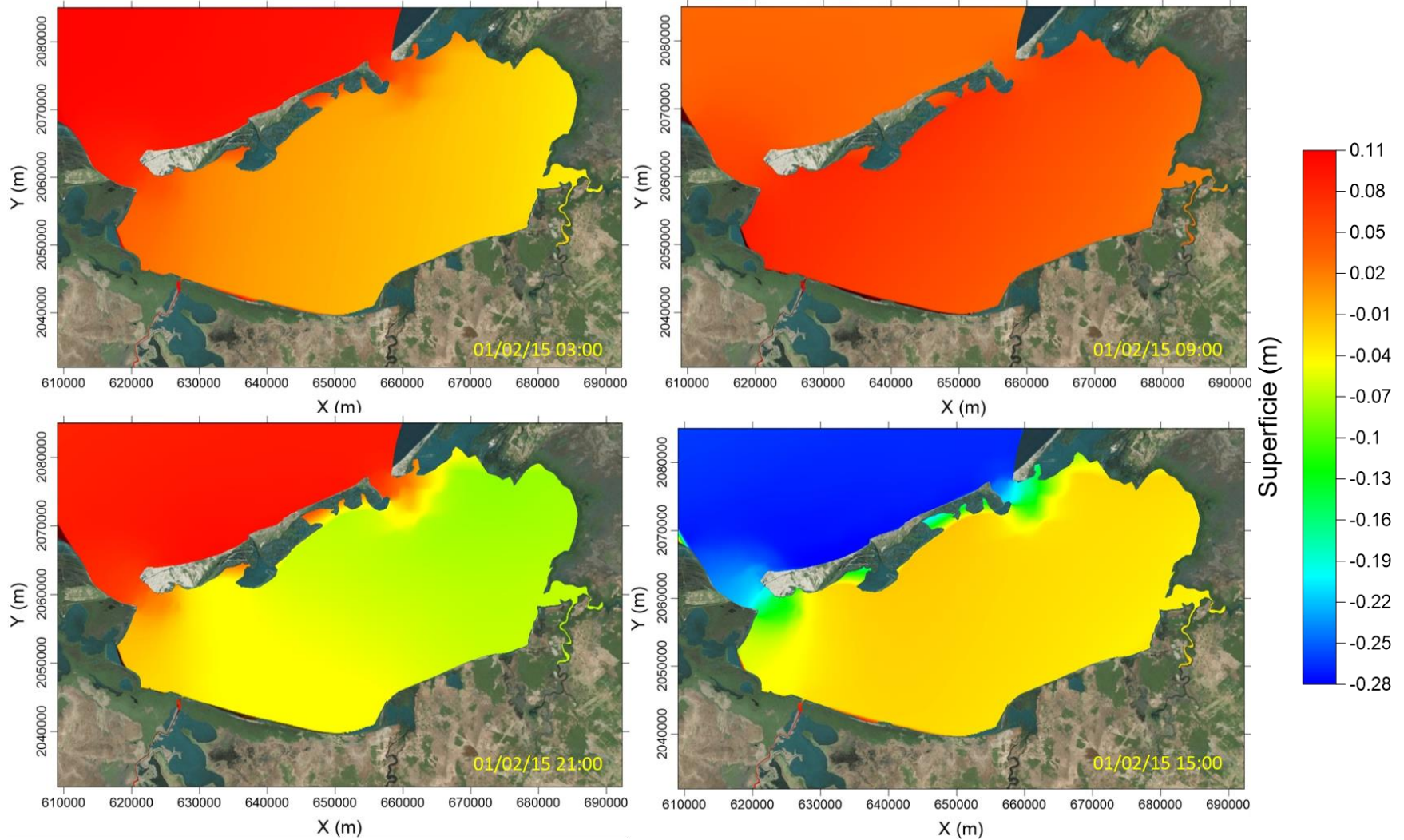


Figura 25. Resultados de superficie libre con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D

La Figura 26 representa los resultados de superficie libre obtenidos con el modelo HDUNAM. El valor máximo es igual a 0.1 m, mientras que el mínimo es igual a -0.3 m.

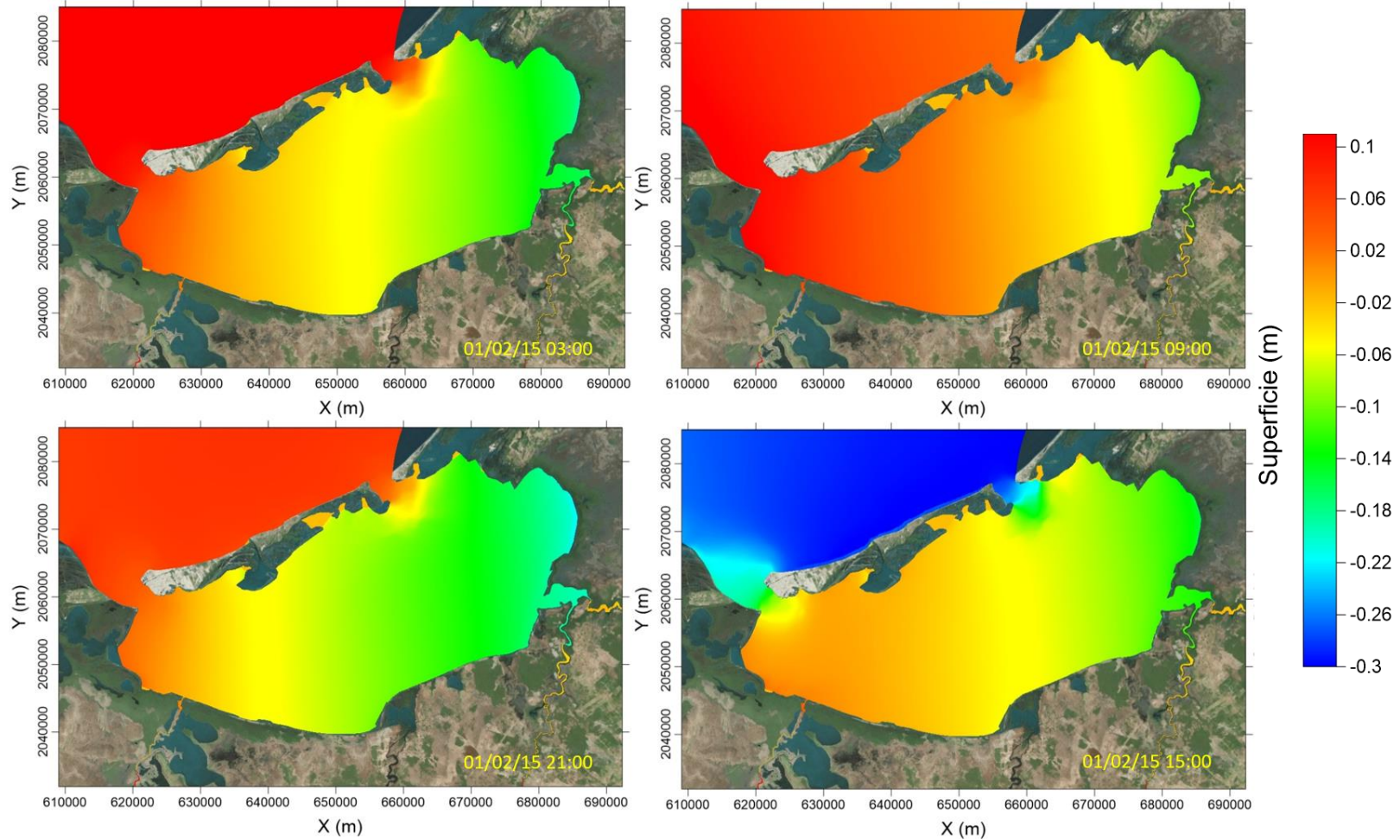


Figura 26. Resultados de superficie libre con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM



En ambos modelos existe una disminución de superficie libre en el lado este de la laguna. La representación gráfica obtenida con HDUNAM muestra de manera más clara la disminución de los niveles de superficie que se encuentran debajo de cero (nivel medio del mar) y que alcanza un valor de -0.30 m.

Los valores máximos de las velocidades se presentaron al interior de las bocas Del Carmen y Puerto Real. El modelo Delft3D-FLOW predijo velocidades más altas por una diferencia mínima que el modelo HDUNAM, ya que en el primero la velocidad máxima es igual a 0.5 m/s (Figura 27) y en el segundo el valor máximo alcanza 0.47 m/s (Figura 28). Ambos valores se presentaron a las 15:00 horas del día 01/02/2015.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

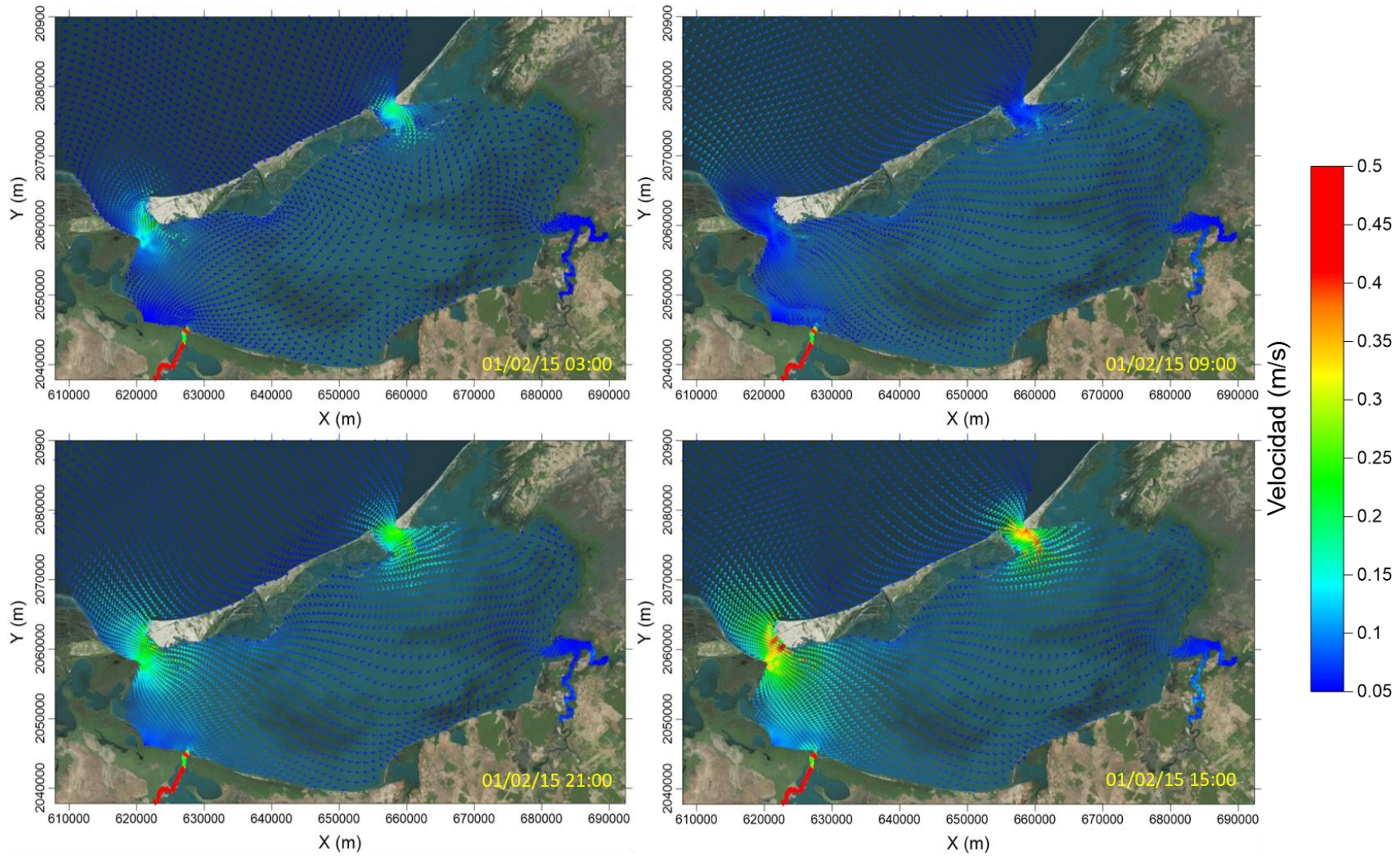


Figura 27. Resultados de velocidad con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

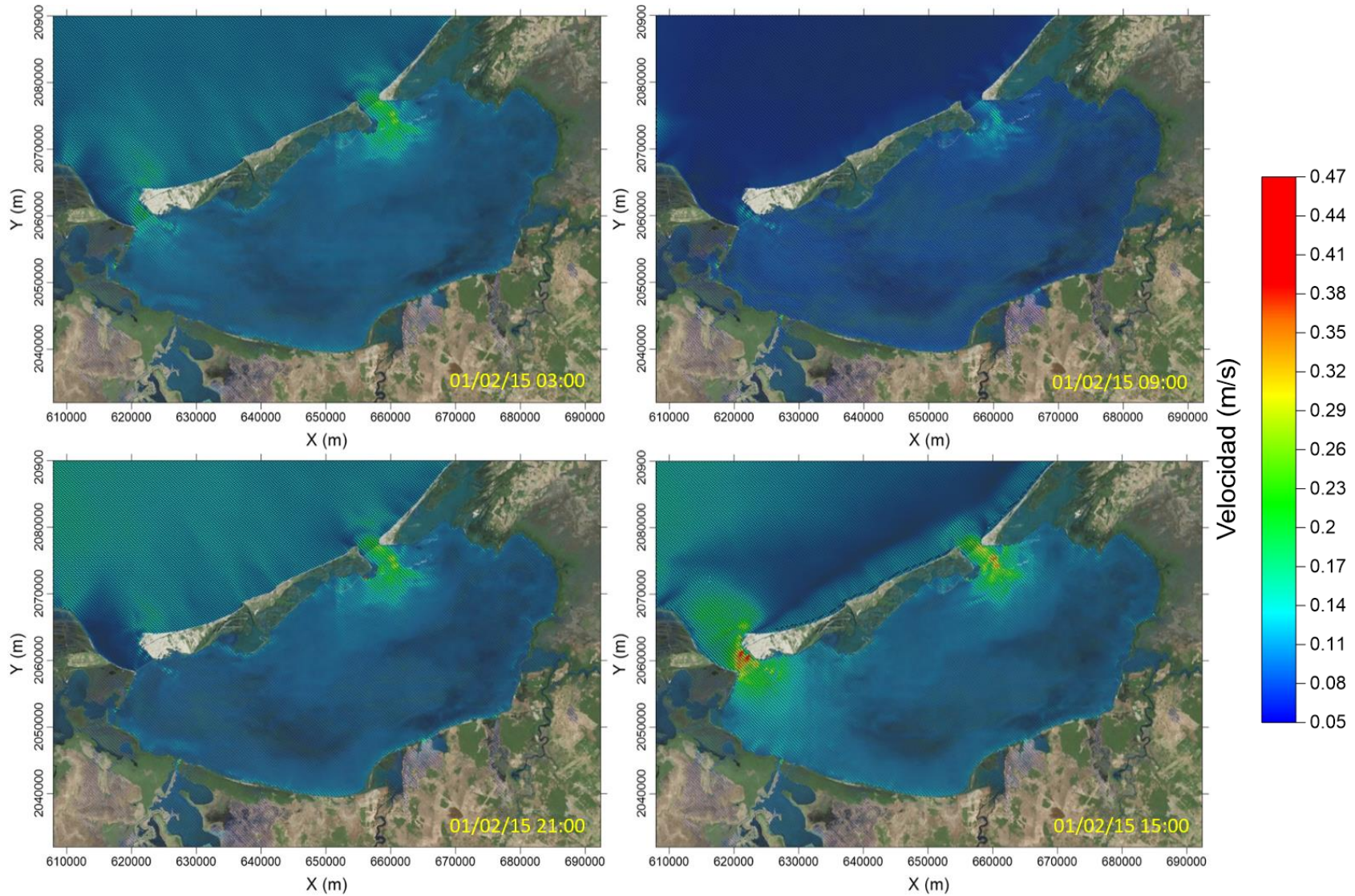


Figura 28. Resultados de velocidad con marea viva del día 01/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM

La predicción de los resultados de superficie libre se obtuvo para el día 07/02/2015 y 08/02/2015 durante una marea muerta. El rango de nivel de superficie libre de agua obtenido por Delft3D-FLOW tiene una variación de 0.09 m a -0.24 m, con el valor máximo presente a las 00:00 horas y el mínimo a las 18:00 horas (Figura 29). Por otra parte, el modelo HDUNAM presenta un rango de variación entre 0.09 m y -0.27 m y hay un incremento gradual de nivel hacia el lado oeste de la laguna (Figura 30).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

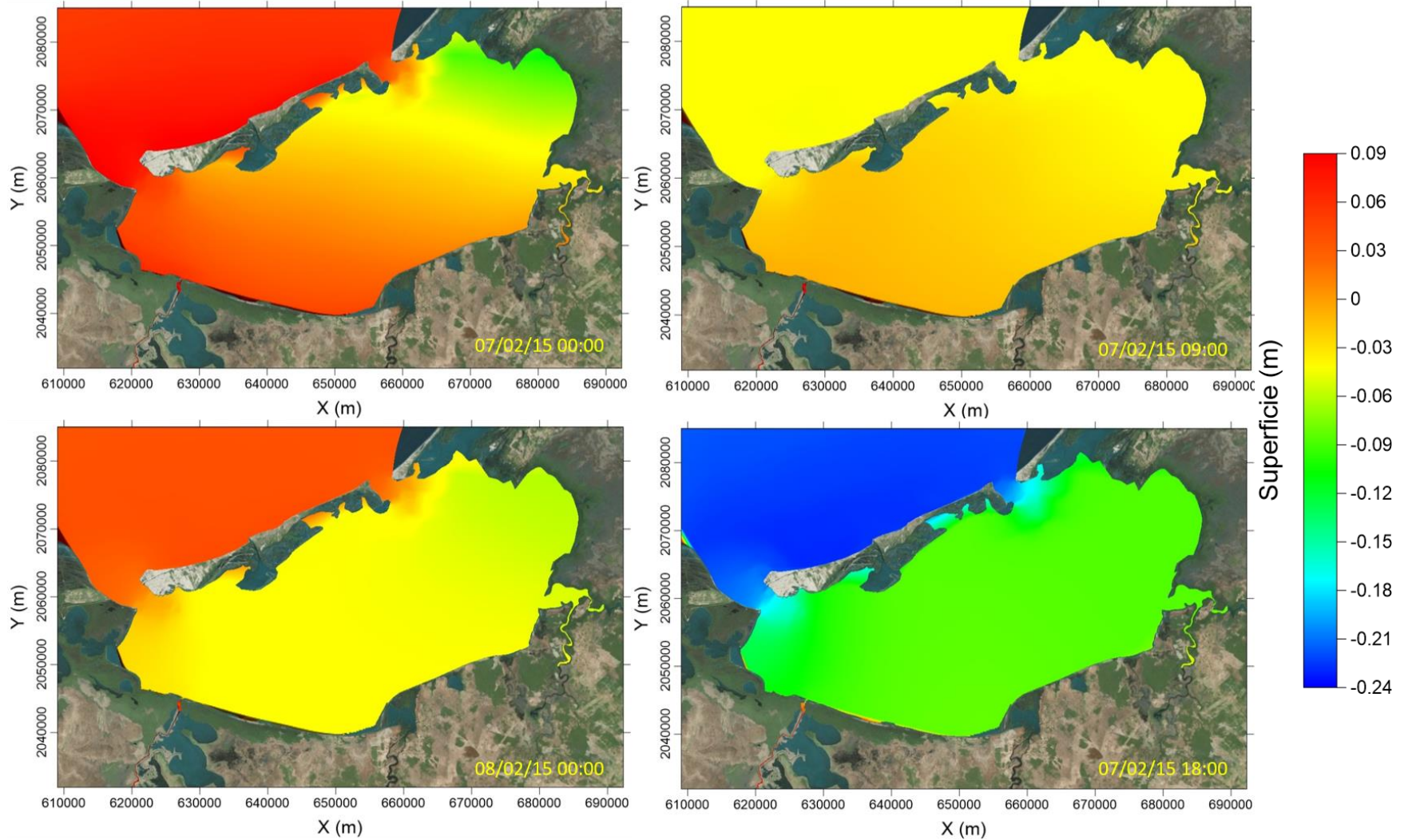


Figura 29. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

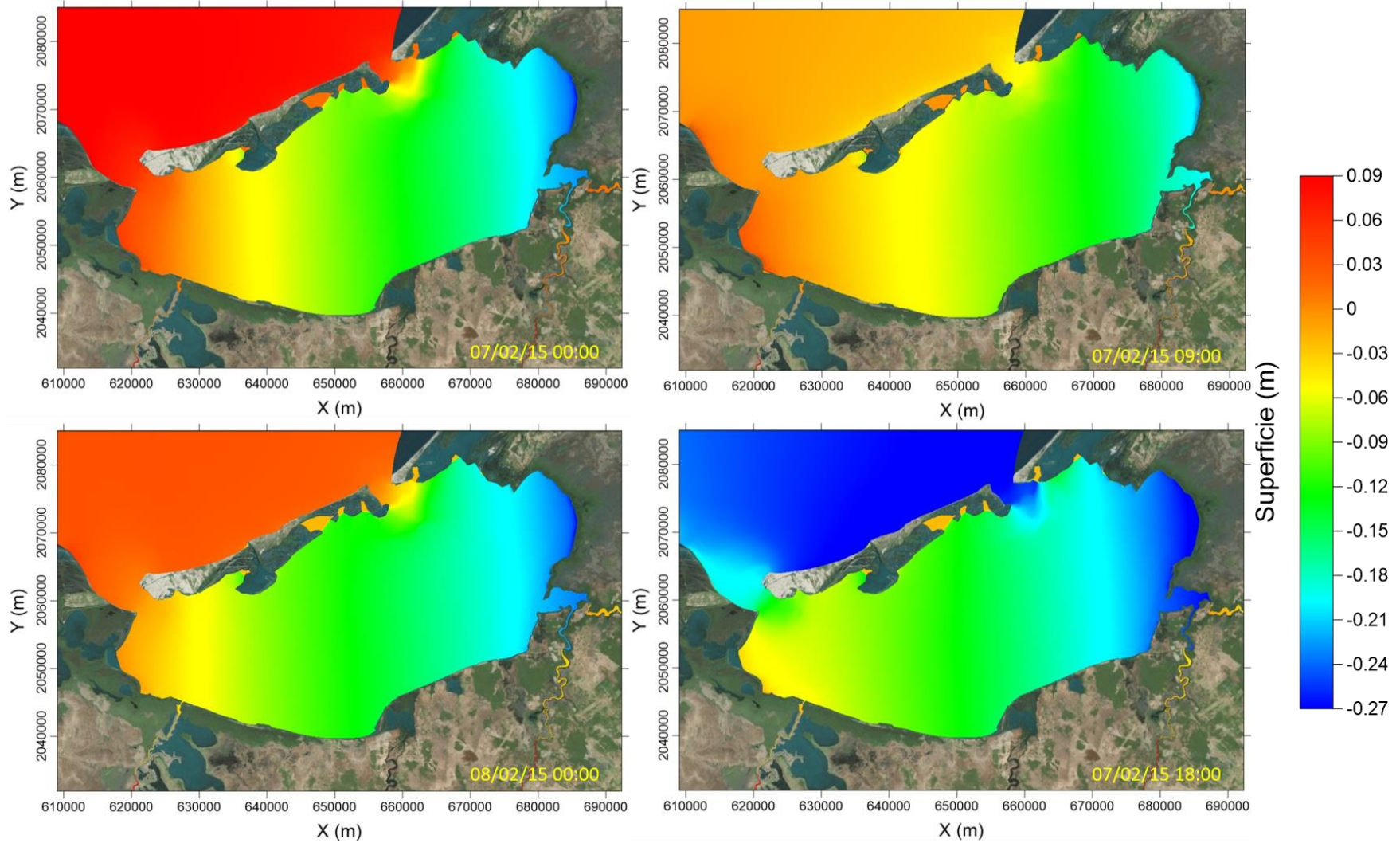


Figura 30. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM

Las velocidades máximas son persistentes al interior de las bocas Del Carmen y Puerto Real y el valor máximo en ambas modelaciones corresponde a 0.4 m/s. Delft3D-FLOW predice que las velocidades máximas se presentan a las 18:00 horas en ambas bocas (Figura 31). Aunque HDUNAM también predice un aumento máximo de velocidad a las 18:00, es importante resaltar que la velocidad máxima sólo se alcanza en boca Del Carmen, ya que en la boca Puerto Real la velocidad es poco notable (Figura 31). Las fechas de estos resultados corresponden a los días 07/02/2015 y 08/02/2015.

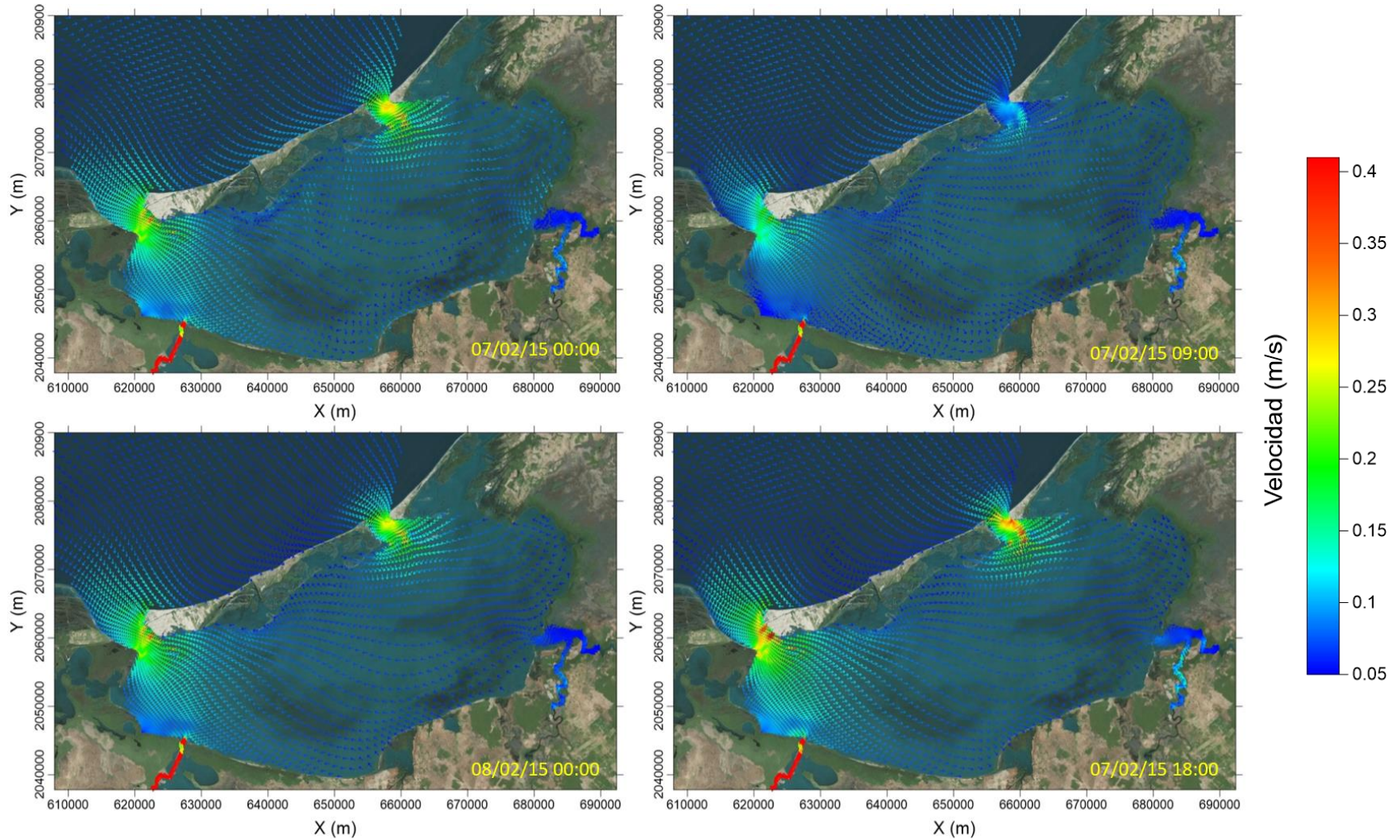


Figura 31. Resultados de velocidad con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

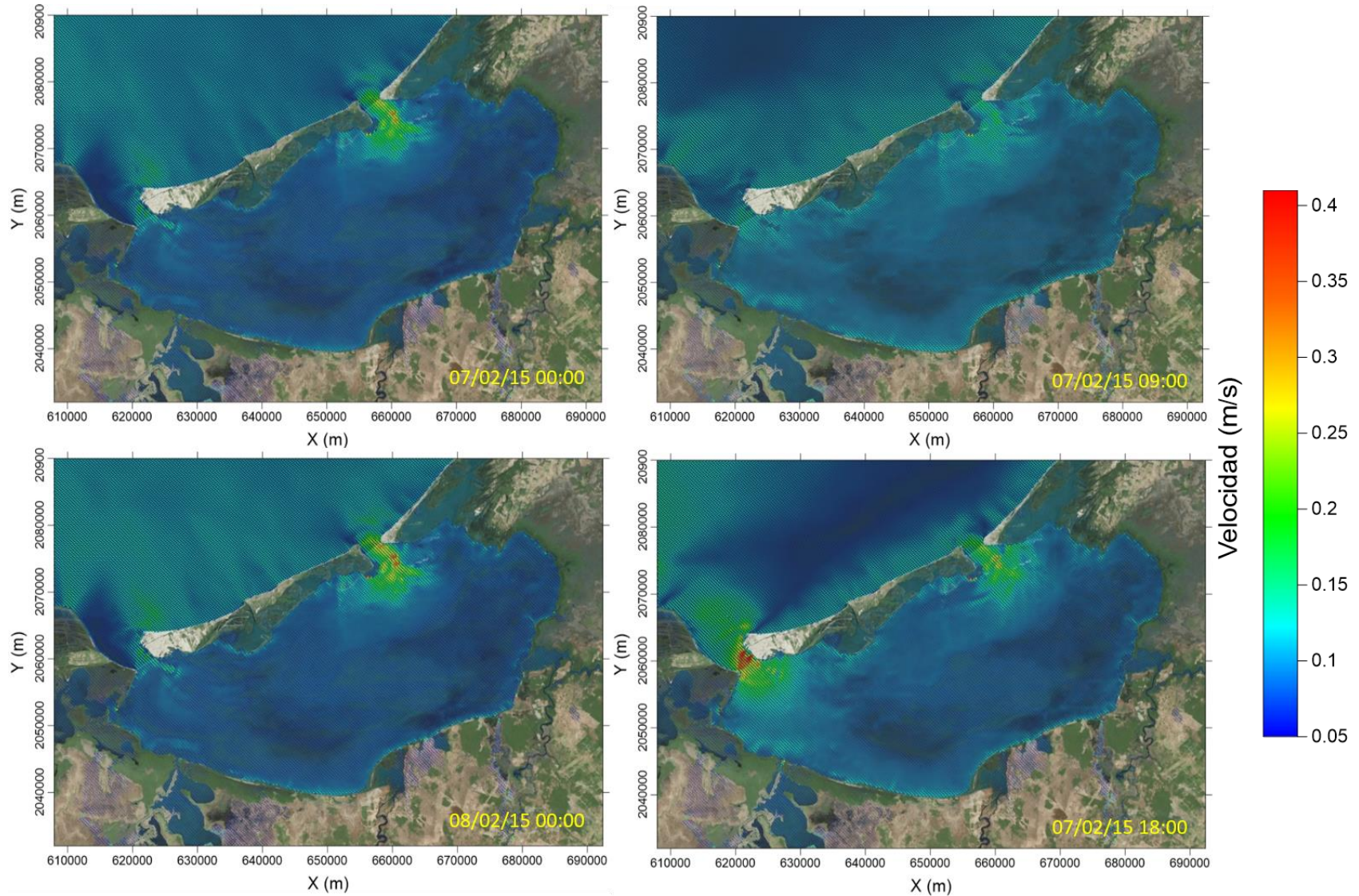


Figura 32. Resultados de velocidad con marea muerta del día 07/02/2015 en temporada de secas obtenidos con modelo HDUNAM

La siguiente tabla muestra los resultados de superficie libre obtenidos con cada uno de los modelos numéricos considerando los puntos de control ubicados en boca Del Carmen y la boca Puerto Real.

Tabla 6. Resultados de superficie libre en puntos de control en temporada de secas (los resultados están representados en m)

	Del Carmen		Puerto Real	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Delft3D-FLOW	0.21	-0.33	0.19	-0.36
HDUNAM	0.16	-0.25	0.12	-0.35

La Figura 33 y la Figura 33 representan de manera gráfica los resultados obtenidos con cada uno de los modelos.

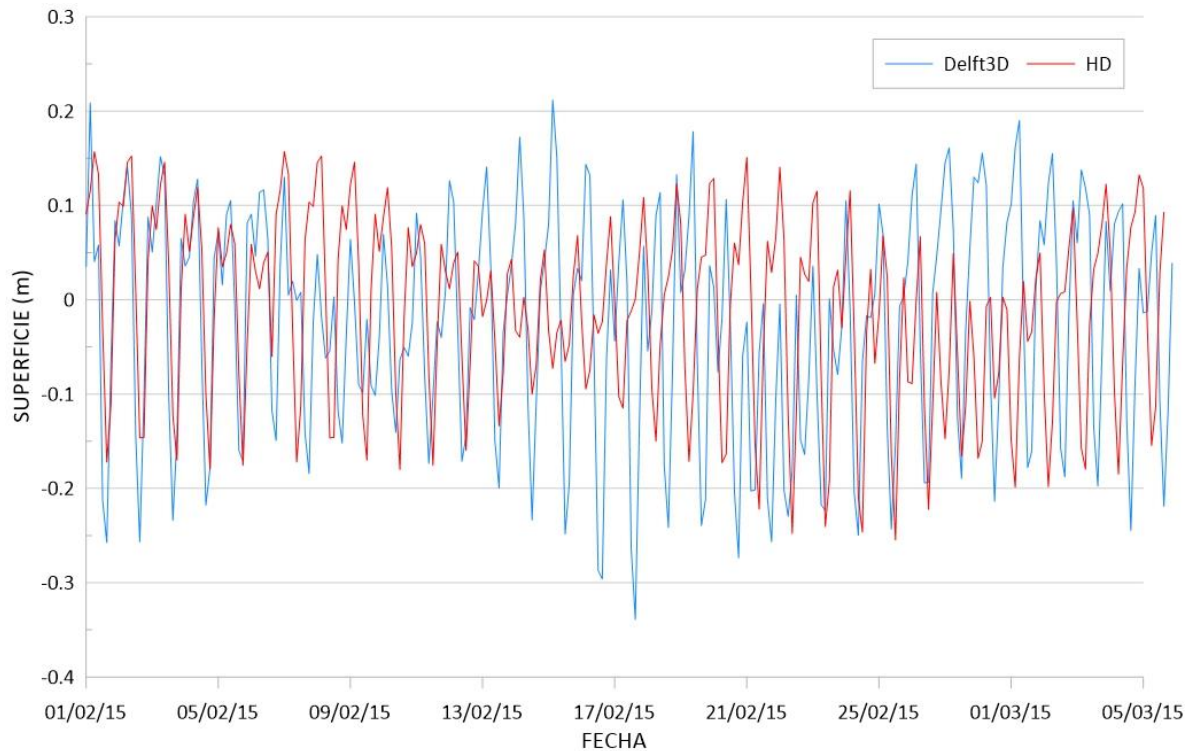


Figura 33. Superficie libre en temporada de secas en punto de control boca Del Carmen

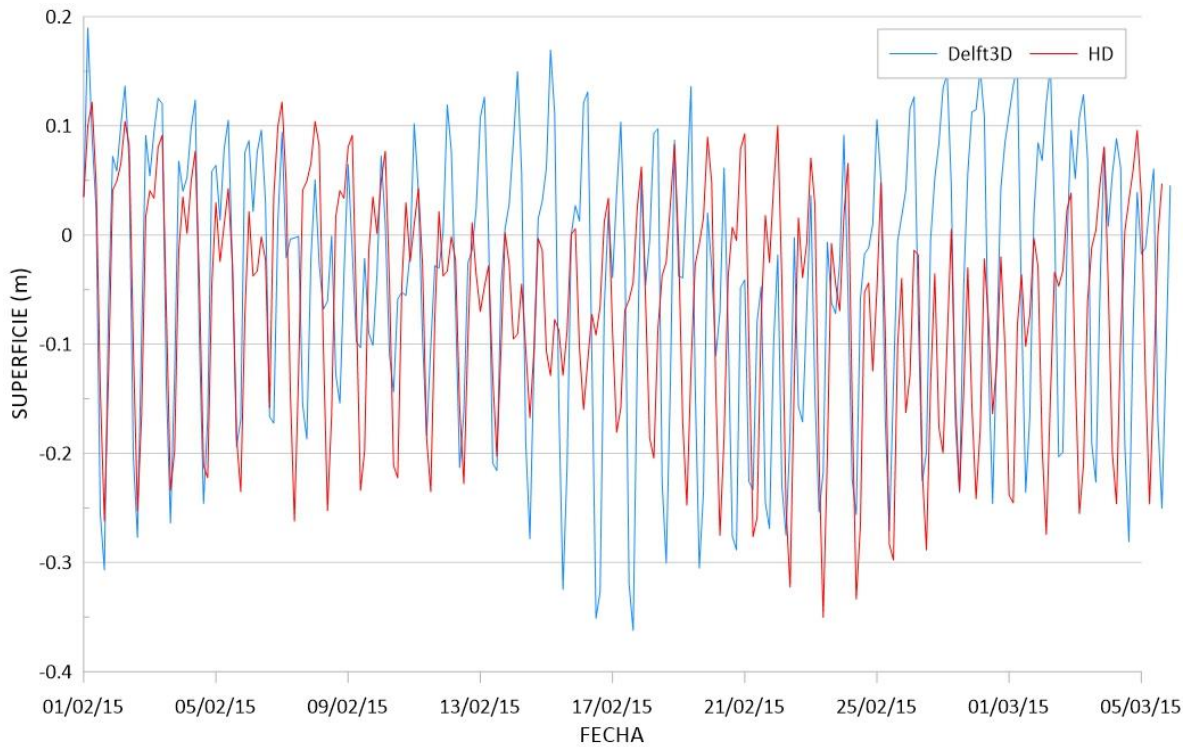


Figura 34. Superficie libre en temporada de secas en punto de control boca Puerto Real

Las velocidades obtenidas para cada uno de los puntos de control con ambos modelos numéricos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultados de velocidades en puntos de control en temporada de secas (los resultados están representados en m/s)

	Del Carmen		Puerto Real	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Delft3D-FLOW	0.32	-0.21	0.48	-0.33
HDUNAM	0.31	-0.15	0.27	-0.33

La Figura 35 y la Figura 35 representan de manera gráfica los resultados obtenidos con cada uno de los modelos.

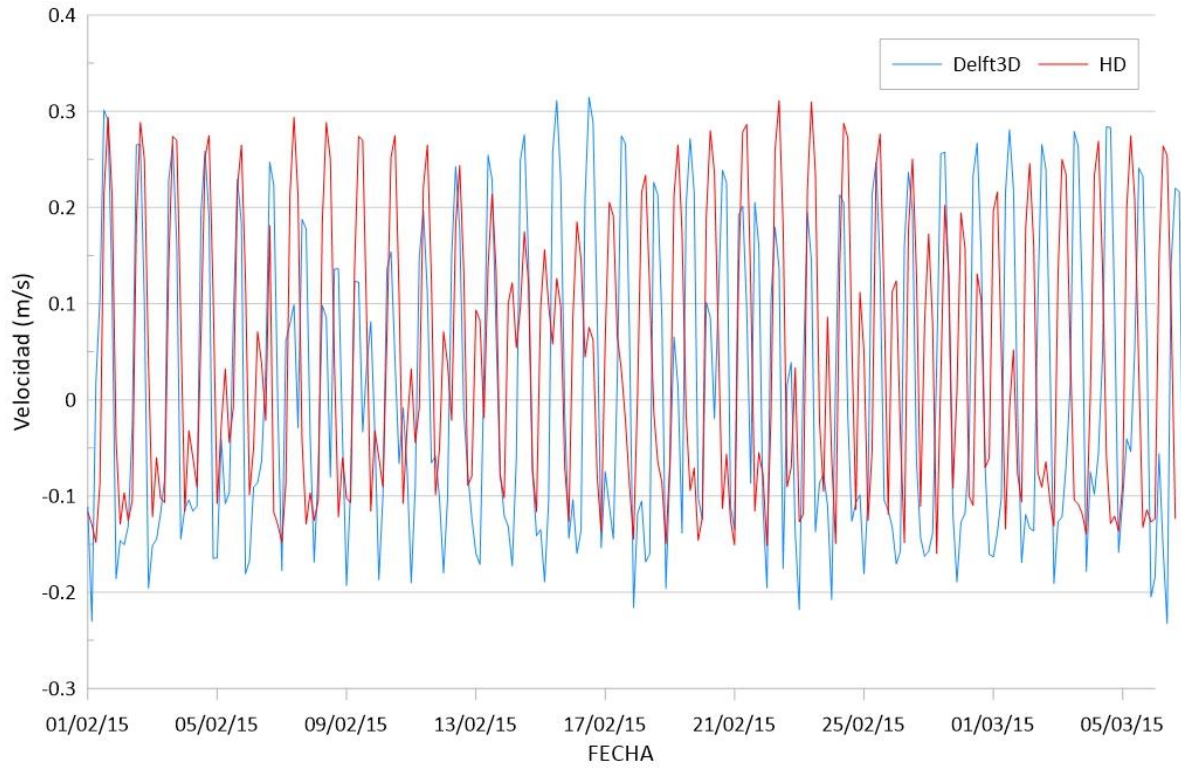


Figura 35. Velocidades en temporada de secas en punto de control boca Del Carmen

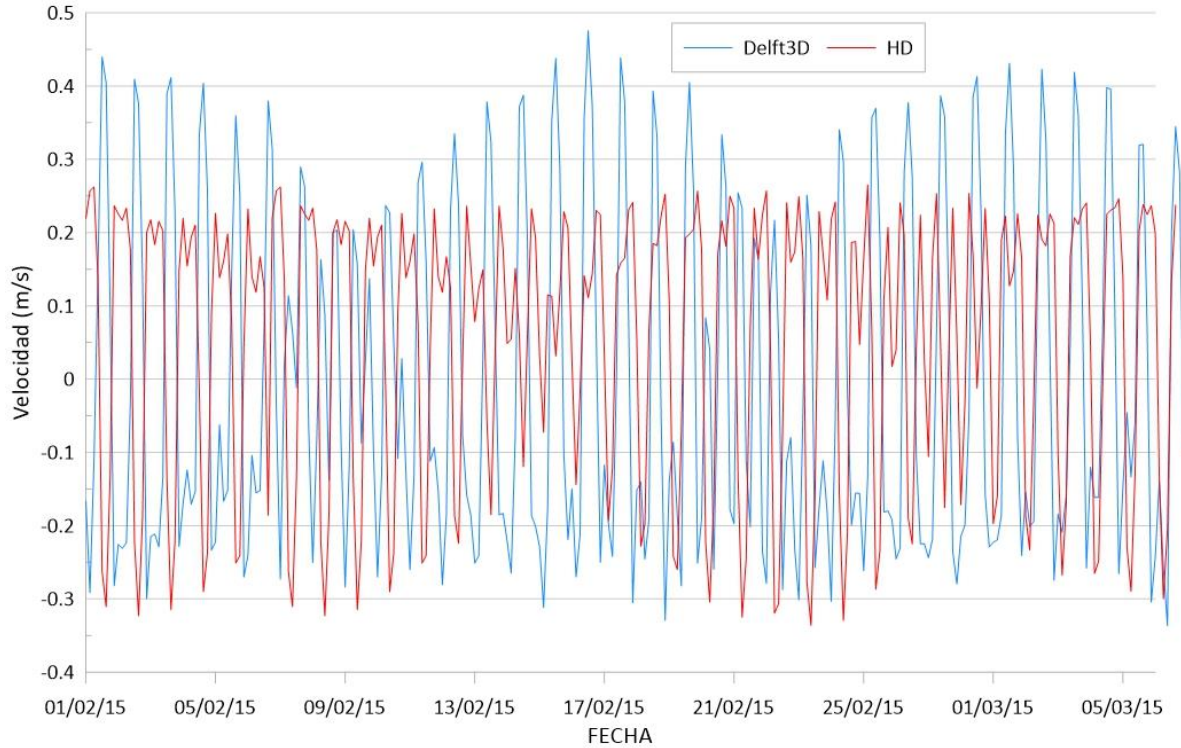


Figura 36. Velocidades en temporada de secas en punto de control Boca Puerto Real

4.1.2 TEMPORADA DE LLUVIAS

La predicción de los resultados de superficie libre se obtuvo para los días 11/08/2015 y 12/08/2015 durante una marea viva. El rango de nivel de superficie libre de agua obtenido por Delft3D-FLOW tiene una variación de 0.14 m a -0.22 m, con el valor máximo presente a las 18:00 horas del día 11/08/15 y el mínimo a las 03:00 horas del día 12/08/2015 (Figura 37). Por otra parte, el modelo HDUNAM presenta un rango de variación entre 0.13 m y -0.23 m, y las horas en que se predicen los valores máximo y mínimo coinciden con los obtenidos con Delft3D-FLOW (Figura 37).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

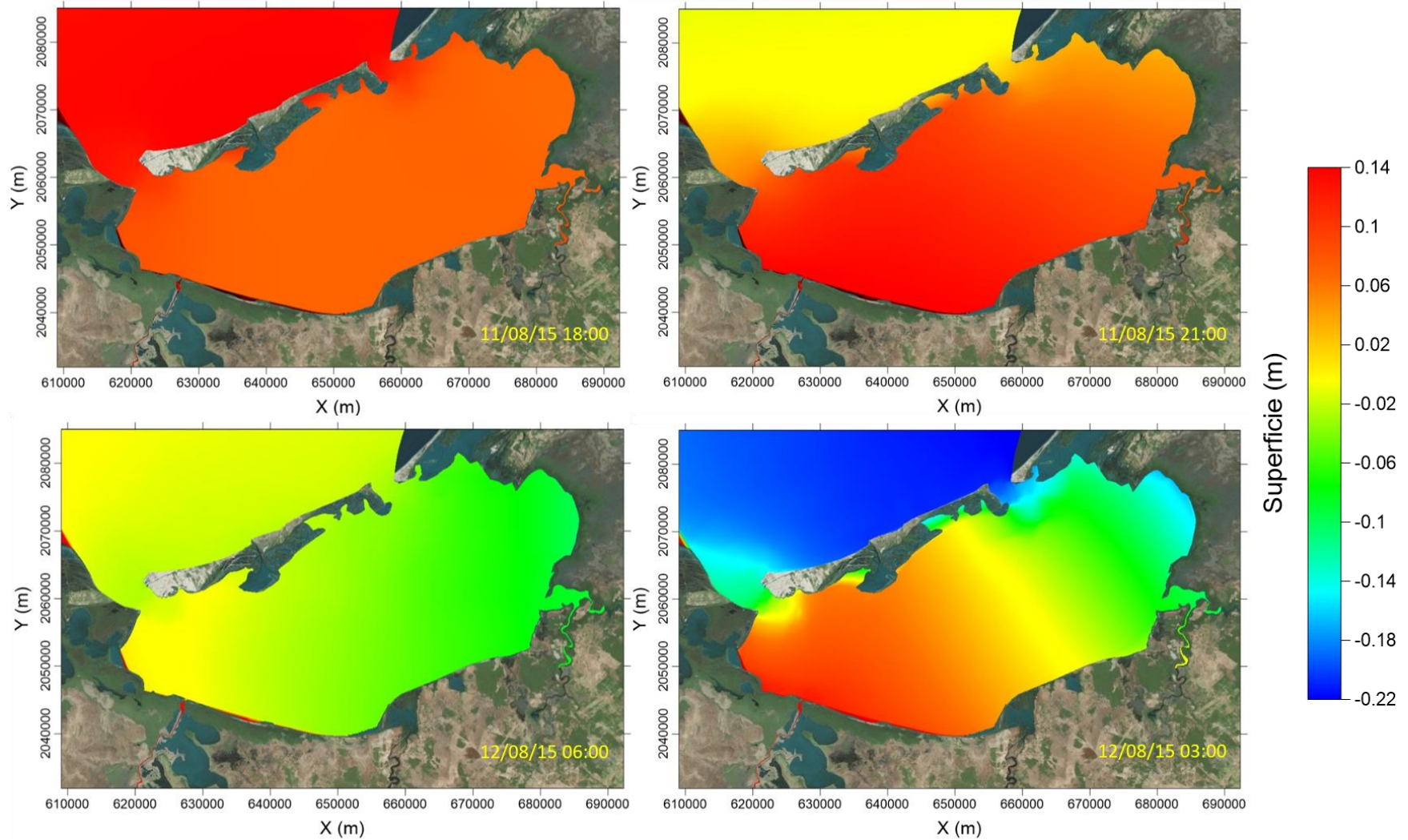


Figura 37. Resultados de superficie libre con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

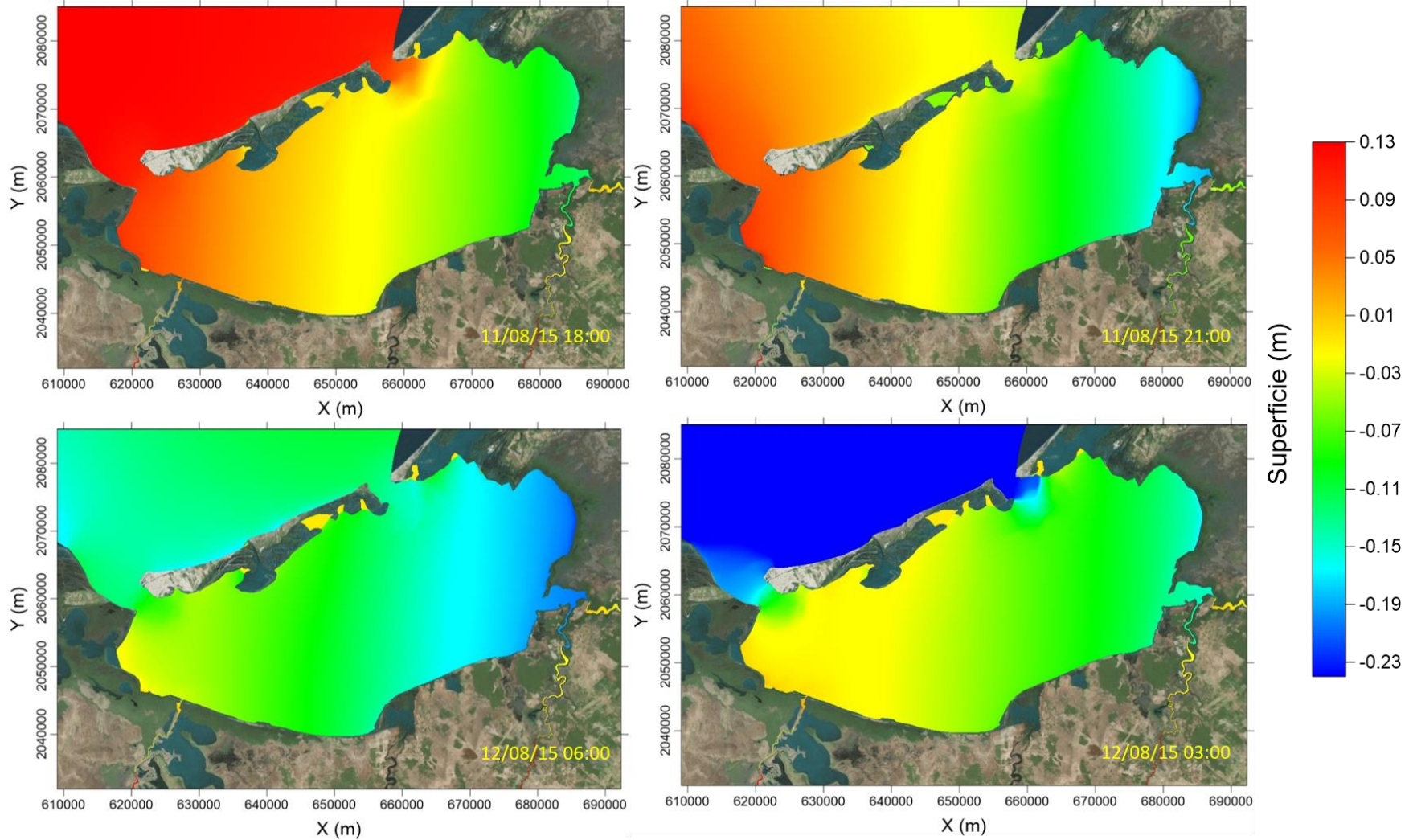


Figura 38. Resultados de superficie libre con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM

Las velocidades máximas, al igual que en el escenario de la temporada de secas se presentan al interior de las bocas Del Carmen y Puerto Real. Para la temporada de lluvias, Delft3D-FLOW predice velocidades máximas de 0.65 m/s a las 03:00 horas del día 12/08/2015 (Figura 39). En la Figura 39 se muestra que la velocidad máxima obtenida por el modelo HDUNAM corresponde a 0.6 m/s a las 03:00 horas del día 12/08/2015. En ambos modelos es notable la velocidad máxima alcanzada en boca Del Carmen en comparación con la boca Puerto Real.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

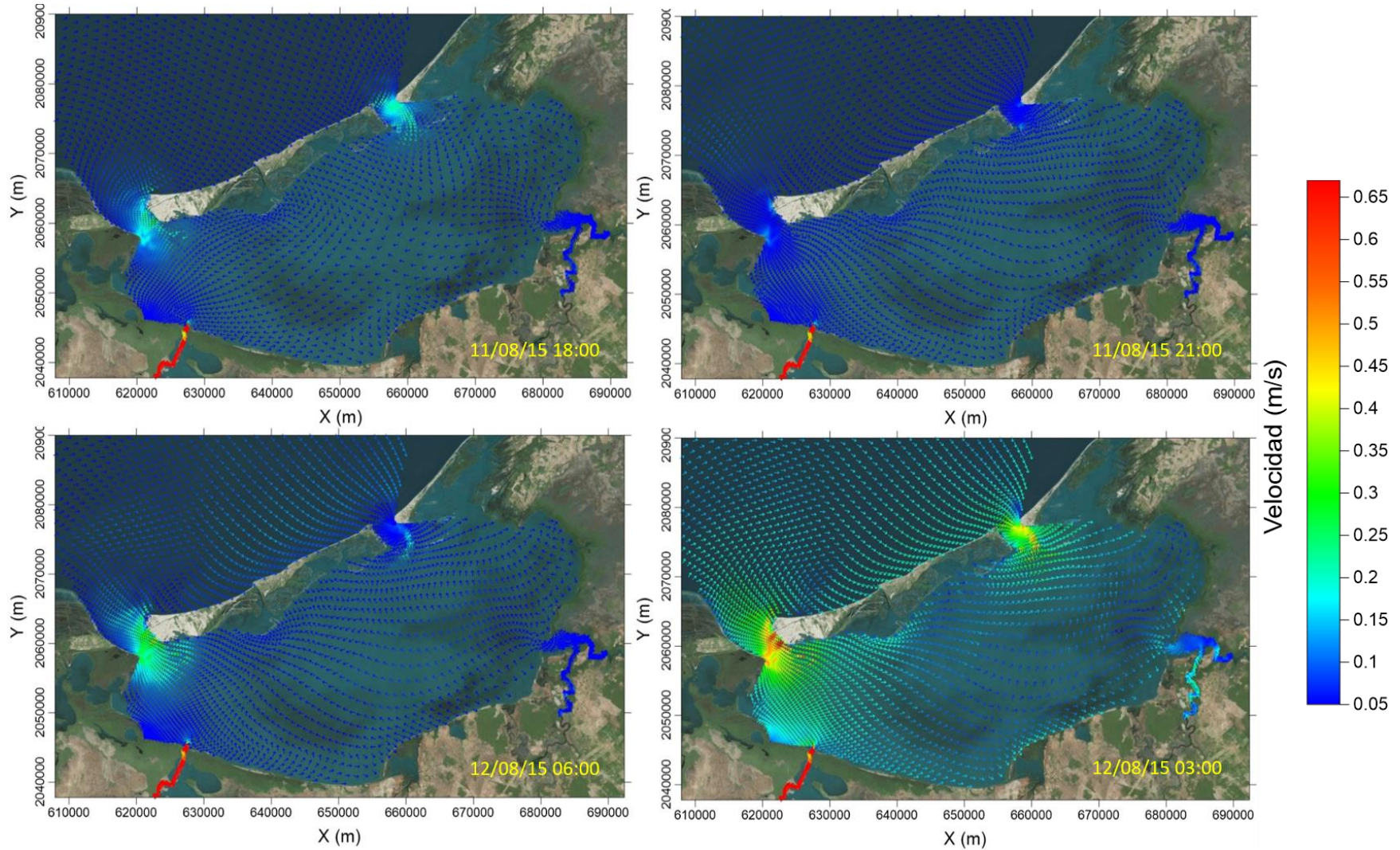


Figura 39. Resultados de velocidad con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

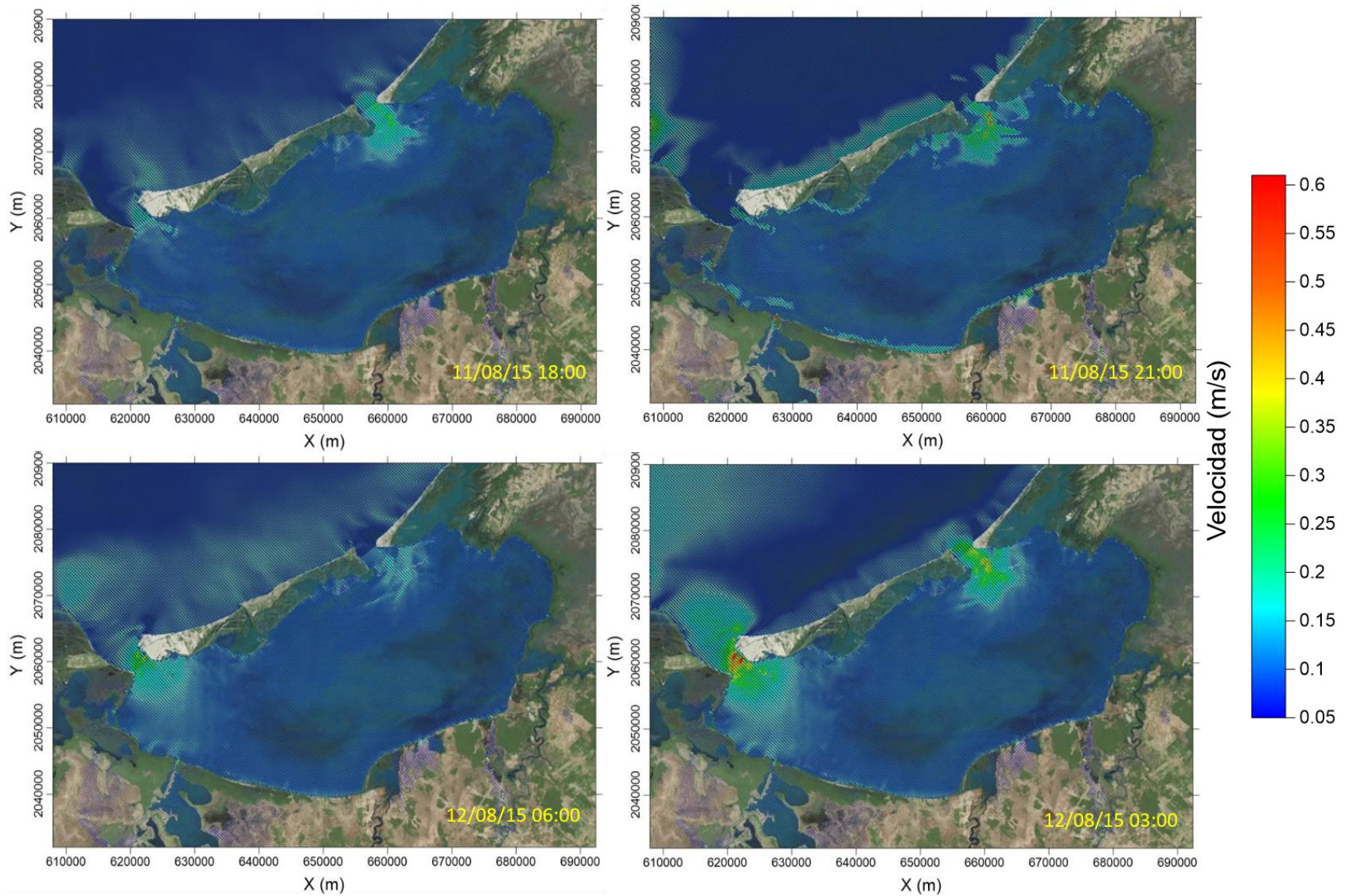


Figura 40. Resultados de velocidad con marea viva de los días 11 y 12 de agosto de 2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM

La predicción de los resultados de superficie libre se obtuvo para 18/08/2015 durante una marea muerta. Delft3D-FLOW predice un rango de nivel de superficie libre del agua con una variación de 0.09 m a -0.15 m, con el valor máximo presente a las 00:00 horas y el mínimo a las 06:00 horas (Figura 41). HDUNAM presenta un rango de variación entre 0.11 m y -0.21 m (Figura 41).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

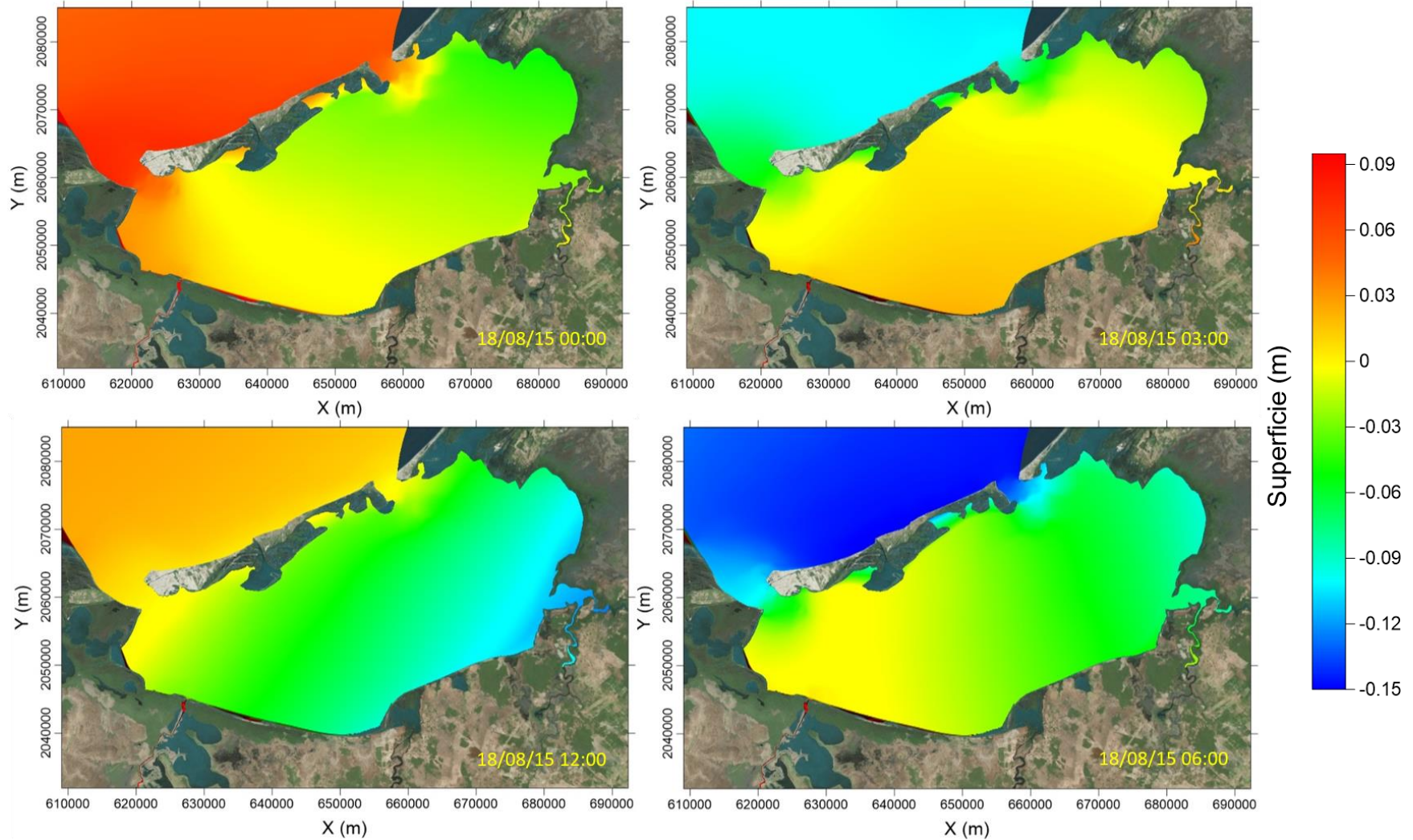


Figura 41. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

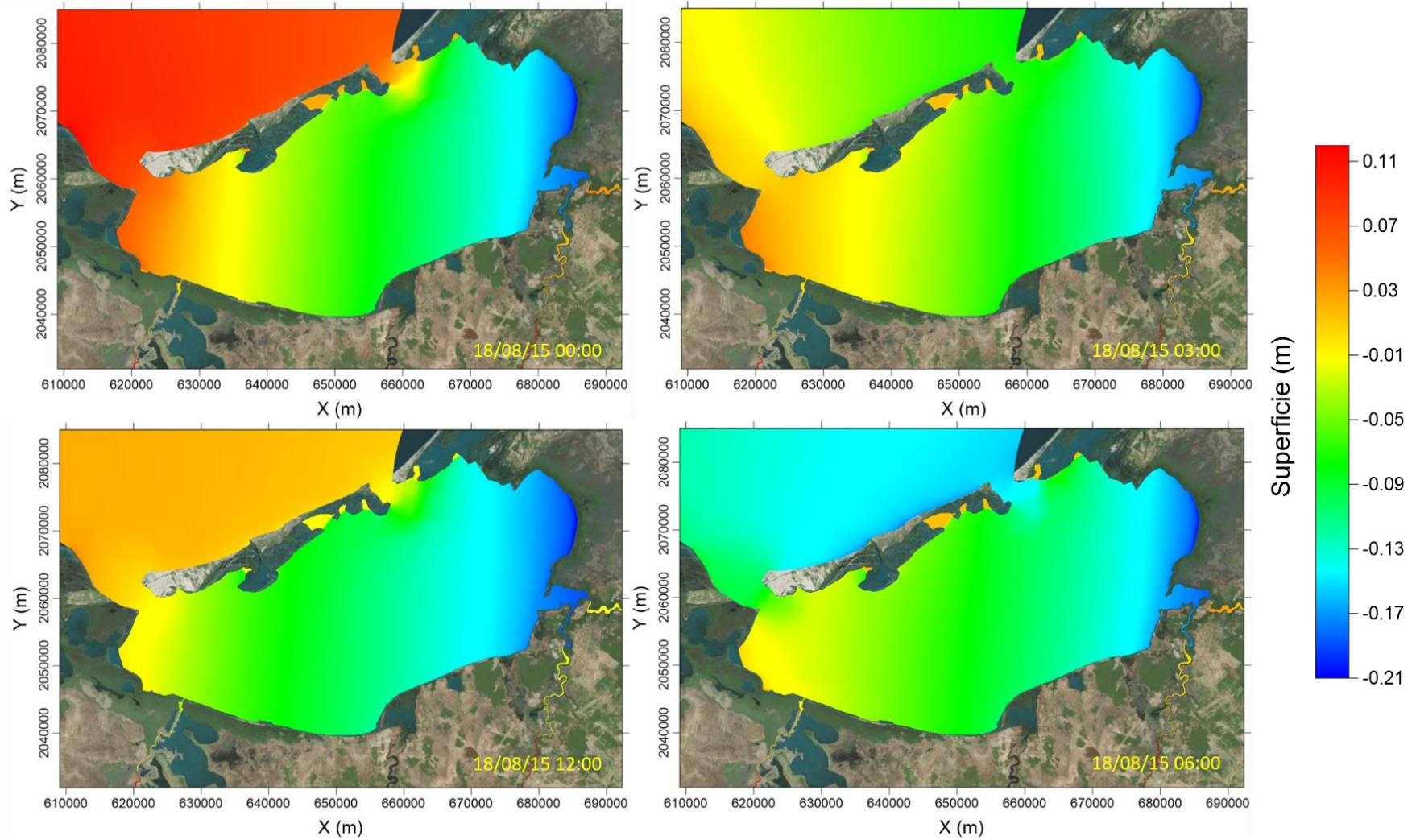


Figura 42. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM

En cuanto a las velocidades, el modelo Delft3D-FLOW predijo velocidades más altas que el modelo HDUNAM. El primero predice una velocidad máxima igual a 0.5 m/s (Figura 43Figura 44) y en el segundo modelo el valor máximo alcanza 0.41 m/s (Figura 43) ambos modelos predicen valores máximos en boca Del Carmen a 06:00 horas. En el caso HDUNAM se presenta una velocidad de 0.41 m/s en boca Puerto Real a las 00:00 horas, mientras que el modelo Delft3D-FLOW predice una velocidad de 0.35 m/s para el mismo punto.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

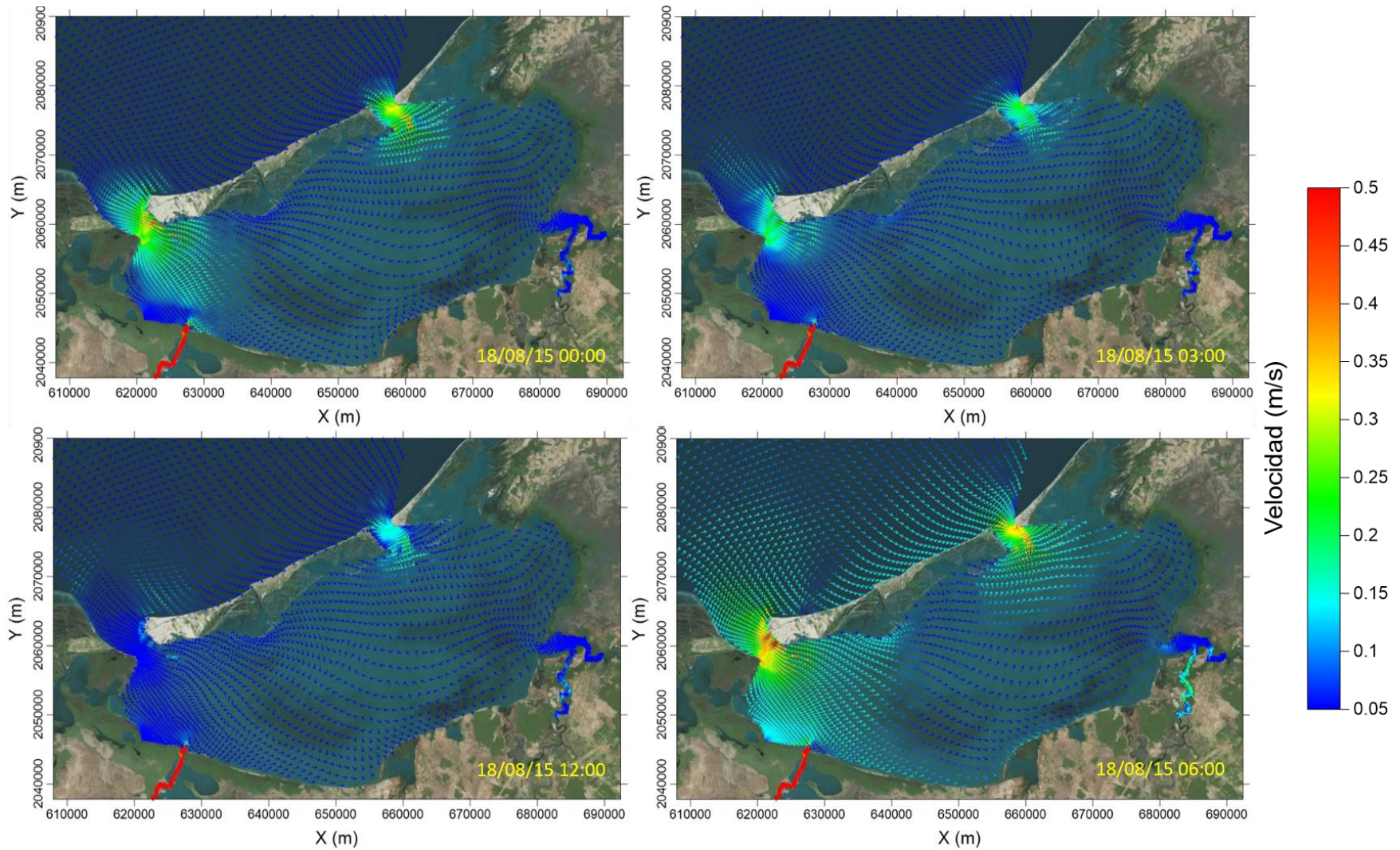


Figura 43. Resultados de velocidad con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

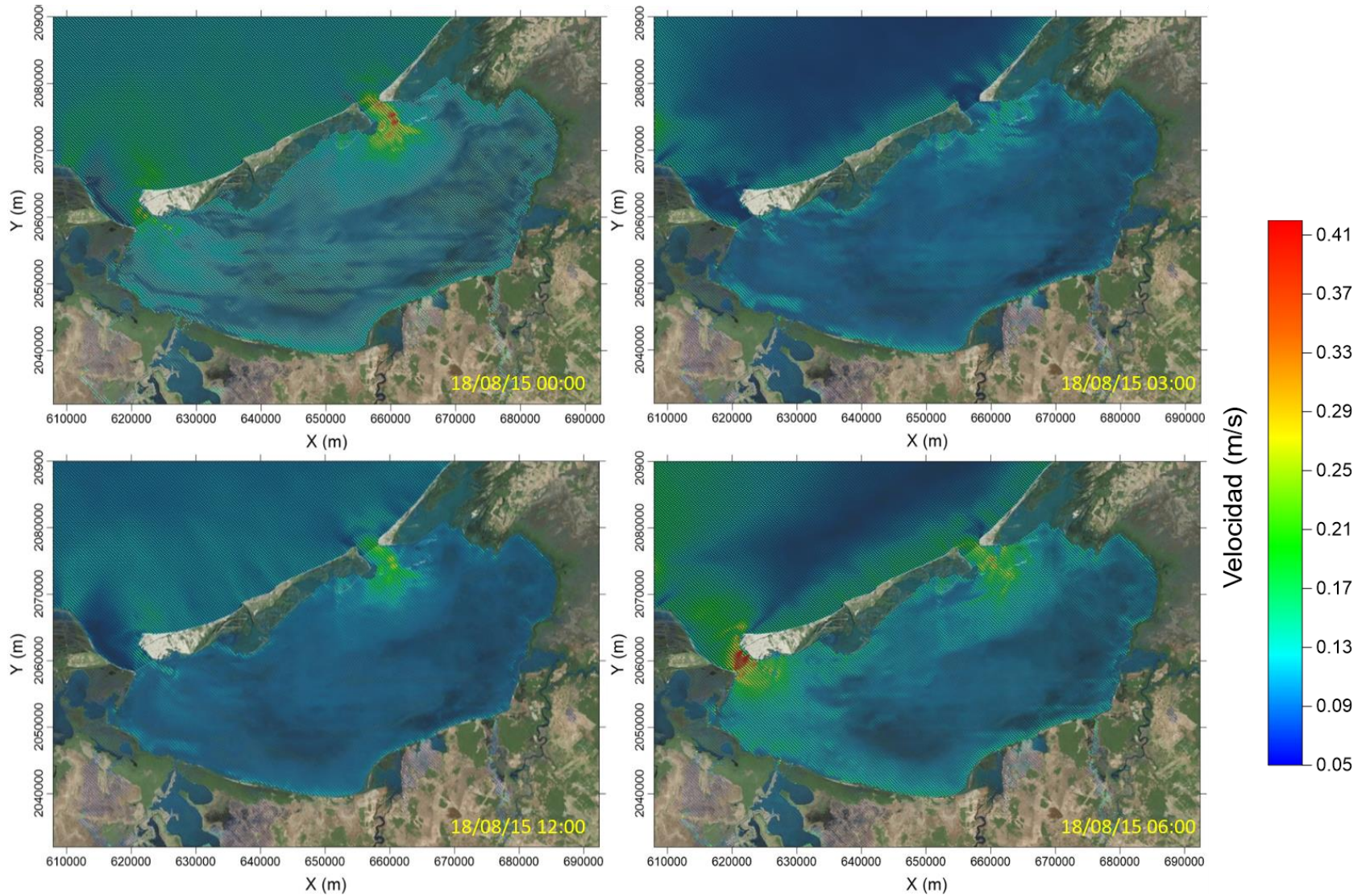


Figura 44. Resultados de velocidad con marea muerta del día 18/08/2015 en temporada de lluvias obtenidos con modelo HDUNAM

La Tabla 8 muestra los resultados de superficie libre obtenidos con cada uno de los modelos numéricos considerando los puntos de control que son boca Del Carmen y la boca Puerto Real y las Figura 45 y Figura 46 muestran los resultados de superficie libre en la temporada de lluvias en los puntos de control.

Tabla 8. Resultados de superficie libre en puntos de control en temporada de lluvias (los resultados están representados en m)

	Del Carmen		Puerto Real	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Delft3D-FLOW	0.16	-0.26	0.17	-0.32
HDUNAM	0.14	-0.28	0.10	-0.34

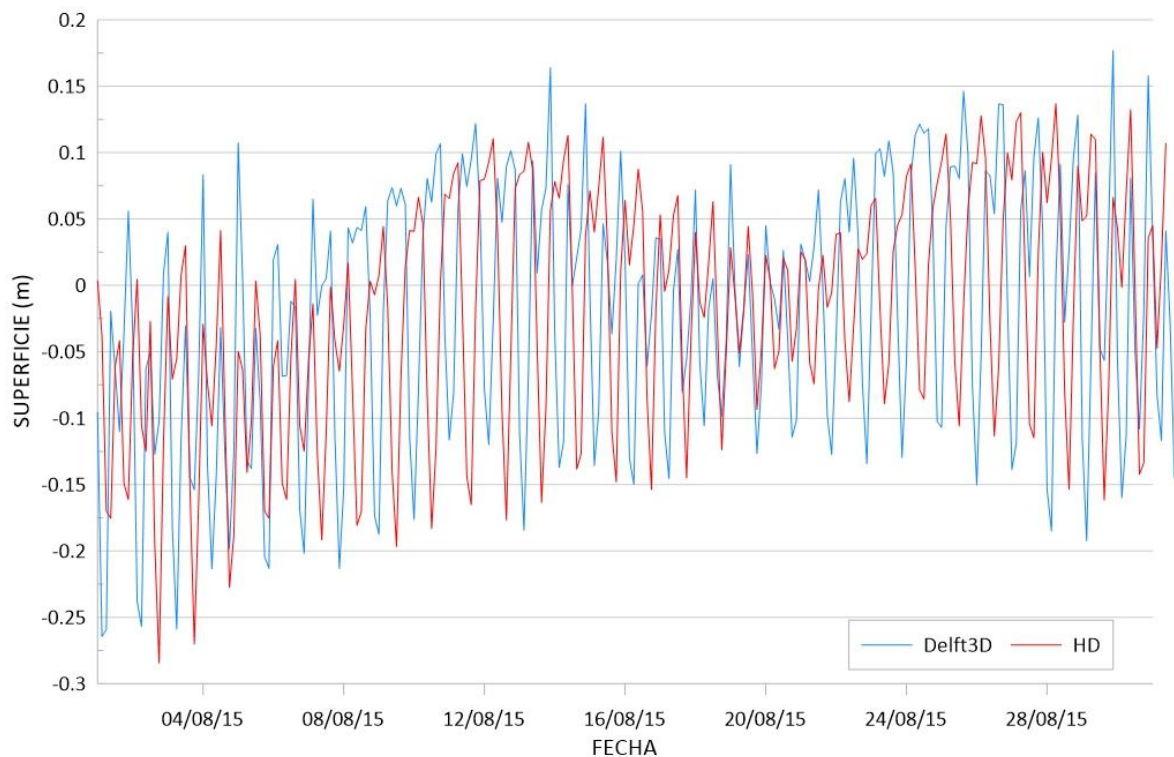


Figura 45. Superficie libre en temporada de lluvias en punto de control boca Del Carmen

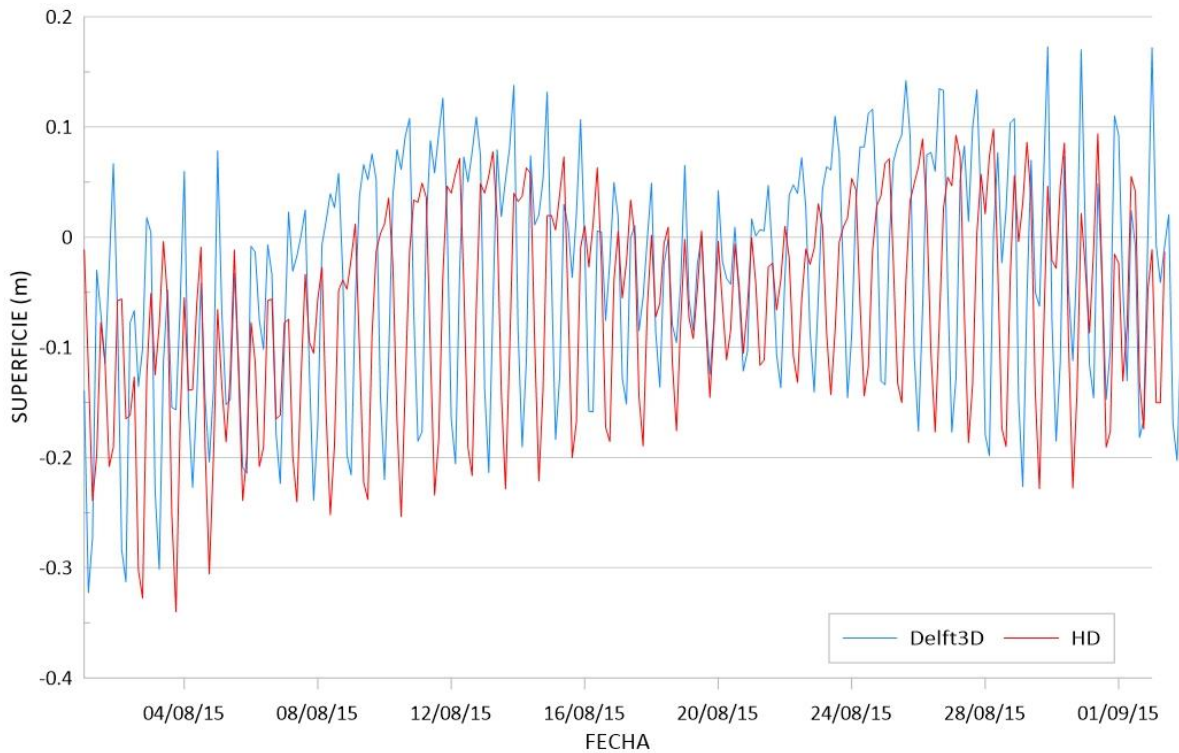


Figura 46. Superficie libre en temporada de lluvias en punto de control boca Puerto Real

Las velocidades obtenidas para cada uno de los puntos de control con ambos modelos numéricos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Resultados de velocidades en puntos de control en temporada de lluvias (los resultados están representados en m/s)

	Del Carmen		Puerto Real	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Delft3D-FLOW	0.28	-0.28	0.40	-0.39
HDUNAM	0.28	-0.17	0.27	-0.29

La Figura 47 y la Figura 47 representan de manera gráfica los resultados obtenidos con cada uno de los modelos.

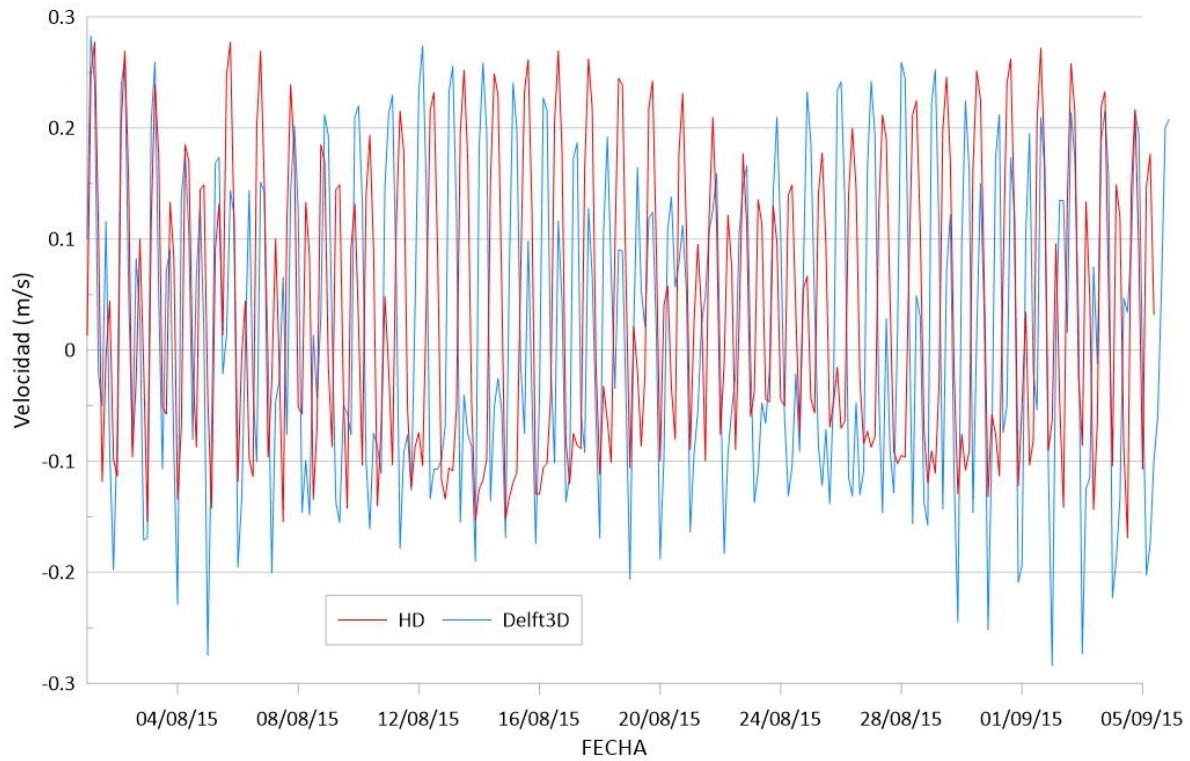


Figura 47. Velocidades en temporada de lluvias en punto de control boca Del Carmen

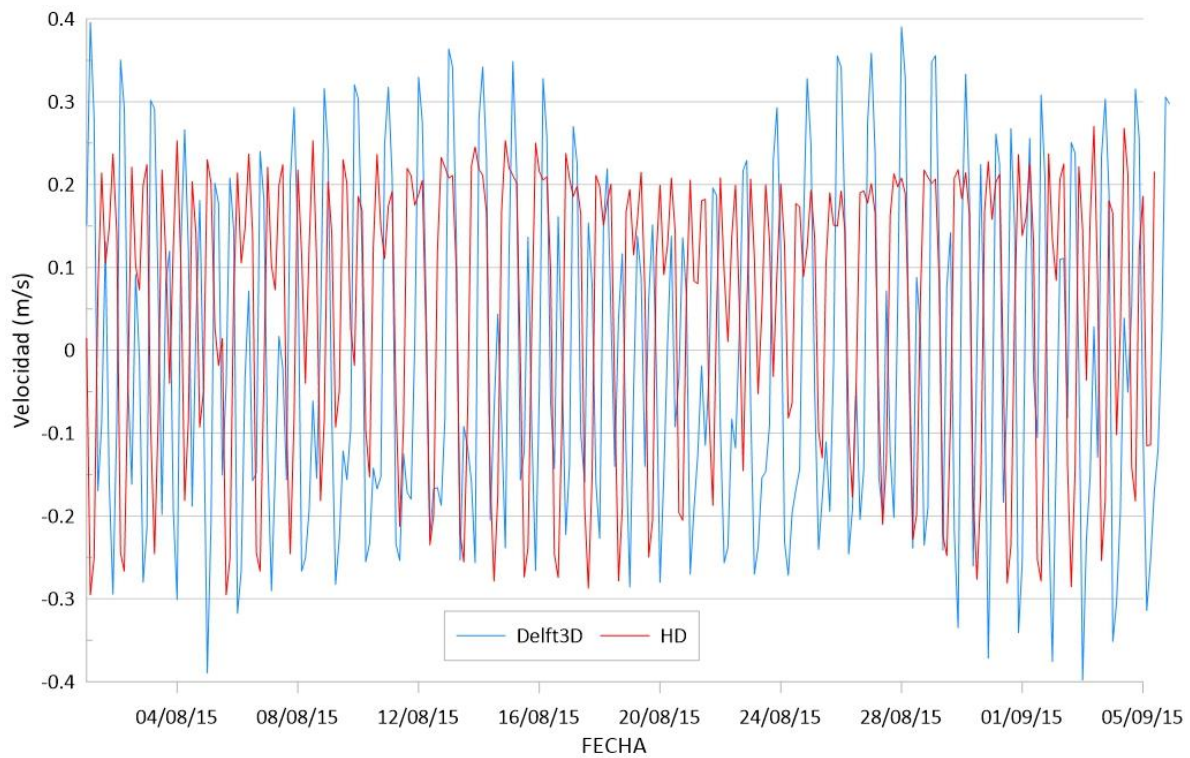


Figura 48. Velocidades en temporada de lluvias en punto de control boca Puerto Real

4.1.3 TEMPORADA DE NORTES

Para este escenario se presentaron los niveles más altos de superficie libre de agua en comparación con los escenarios anteriores. De acuerdo con el registro de mareas, el día 03/10/2015 se presentó una marea viva. La Figura 49 es una representación de la superficie libre obtenida con el modelo Delft3D-FLOW, en donde el valor máximo corresponde a 0.25 m y el mínimo a -0.30 m. La Figura 49 representa los resultados de superficie libre obtenidos con el modelo HDUNAM en donde los valores máximo y mínimo corresponden 0.20 m y -0.34 m. En las representaciones de los resultados obtenidos con HDUNAM es más notable un nivel menor de superficie libre en el lado este de la laguna.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

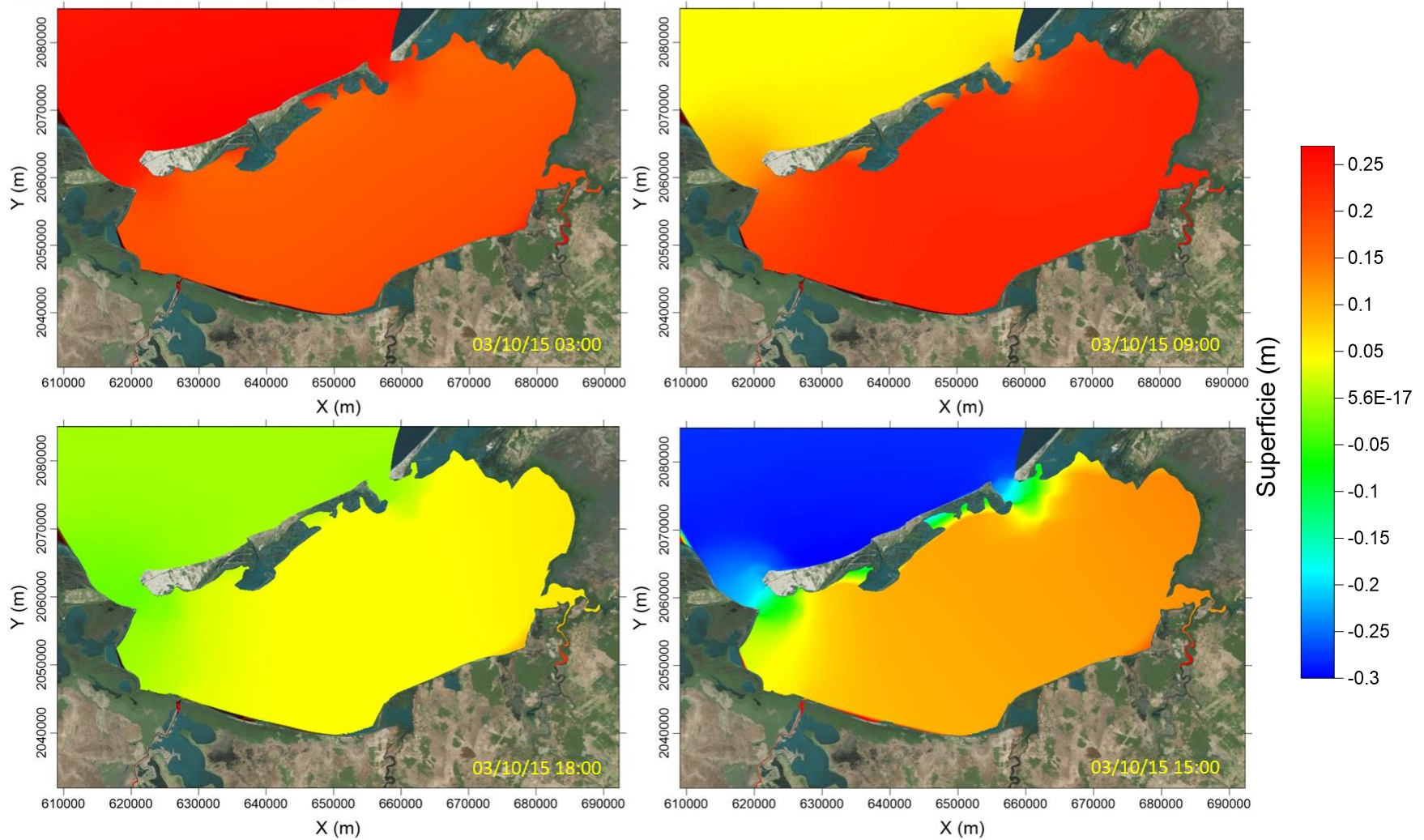


Figura 49. Resultados de superficie libre con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

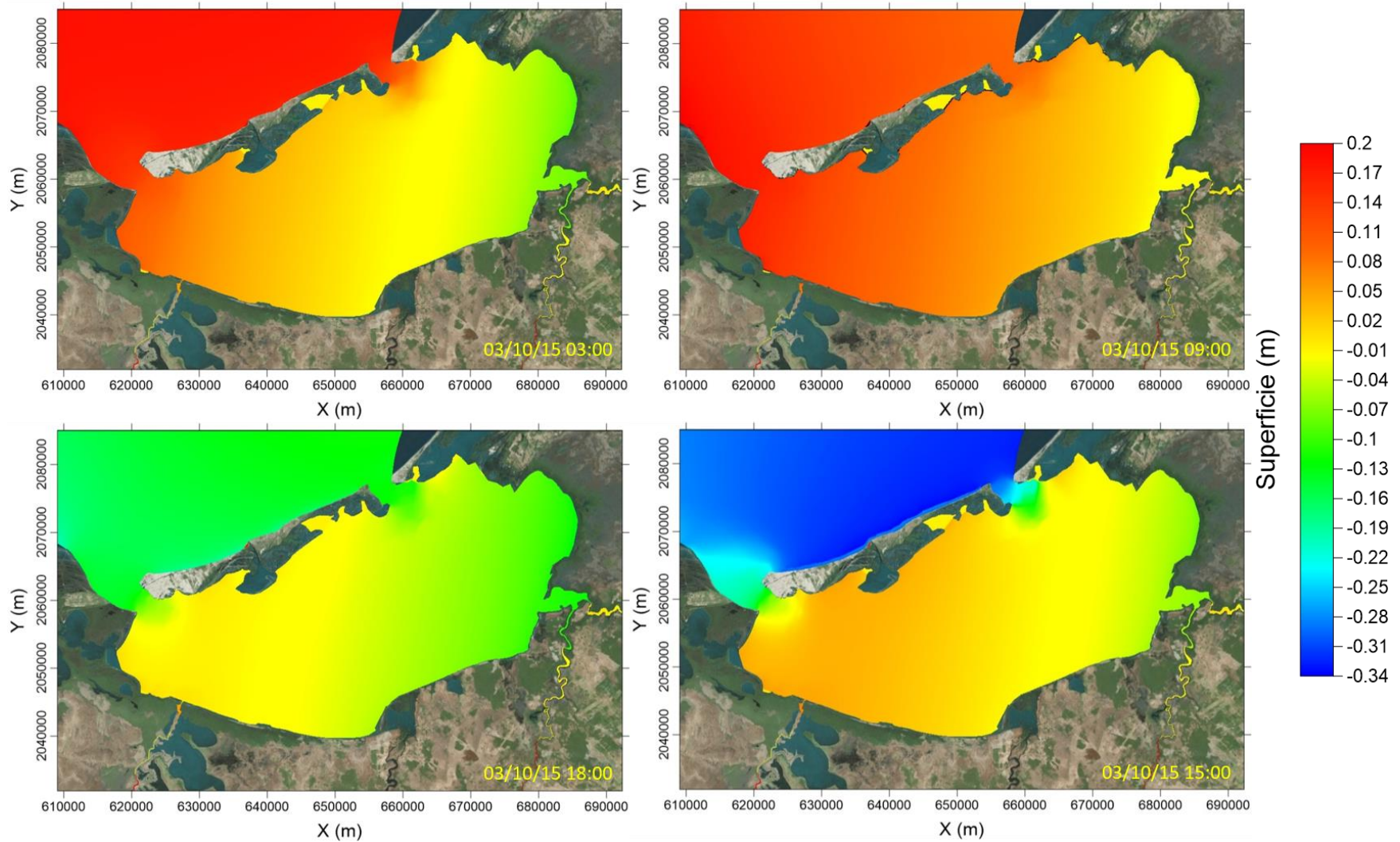


Figura 50. Resultados de superficie libre con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM

En este escenario, las velocidades presentan los valores máximos alcanzados al interior de ambas bocas. Delft3D-FLOW predice una velocidad máxima más alta que HDUNAM, ya que en el primero la velocidad máxima es de 0.8 m/s (Figura 51), mientras que en el segundo el valor máximo corresponde a 0.7 m/s (Figura 51). Los valores se presentaron a las 15:00 horas en ambos modelos.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

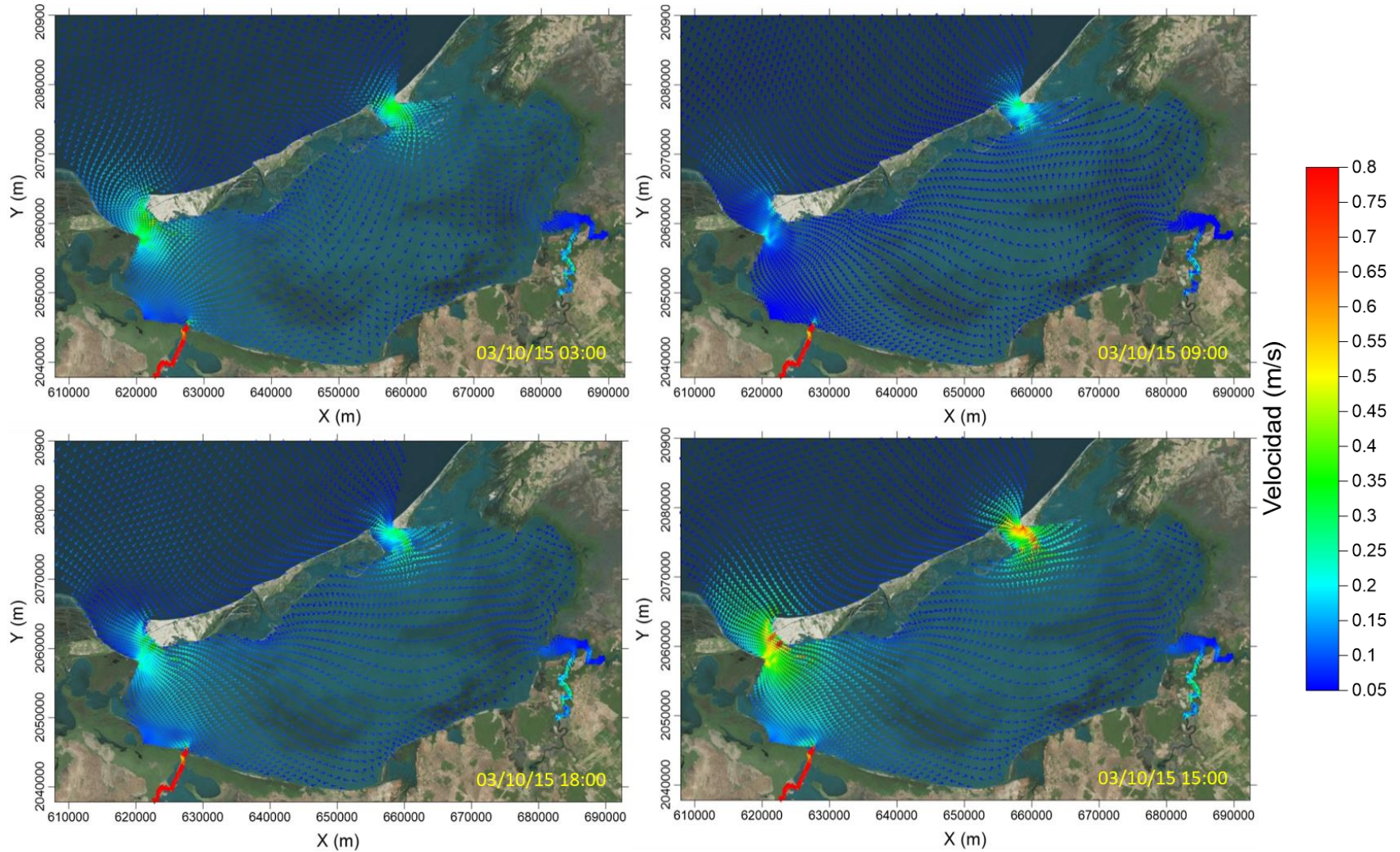


Figura 51. Resultados de velocidad con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

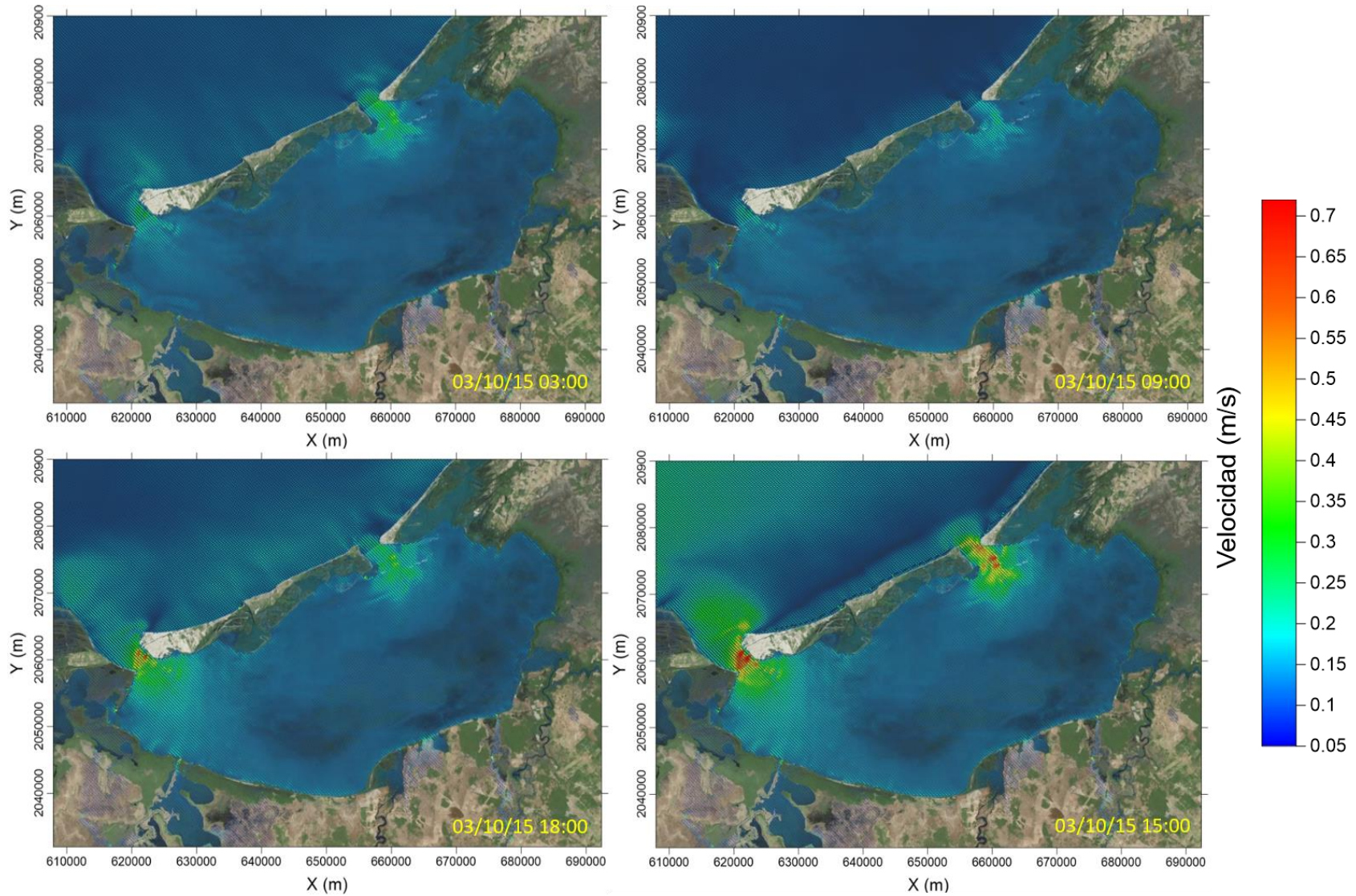


Figura 52. Resultados de velocidad con marea viva del día 03/10/15 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM

Los resultados de superficie libre se obtuvieron el día 10/10/2015 durante una marea muerta. El rango de superficie libre alcanzado por Delft3D-FLOW tiene una variación entre -0.19 y 0.11 m (Figura 53), mientras que HDUNAM alcanza un rango de entre -0.22 m y 0.14 m (Figura 53). Es importante señalar que el resultado con HDUNAM muestra un incremento gradual en el nivel del agua hacia el lado oeste de la laguna.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

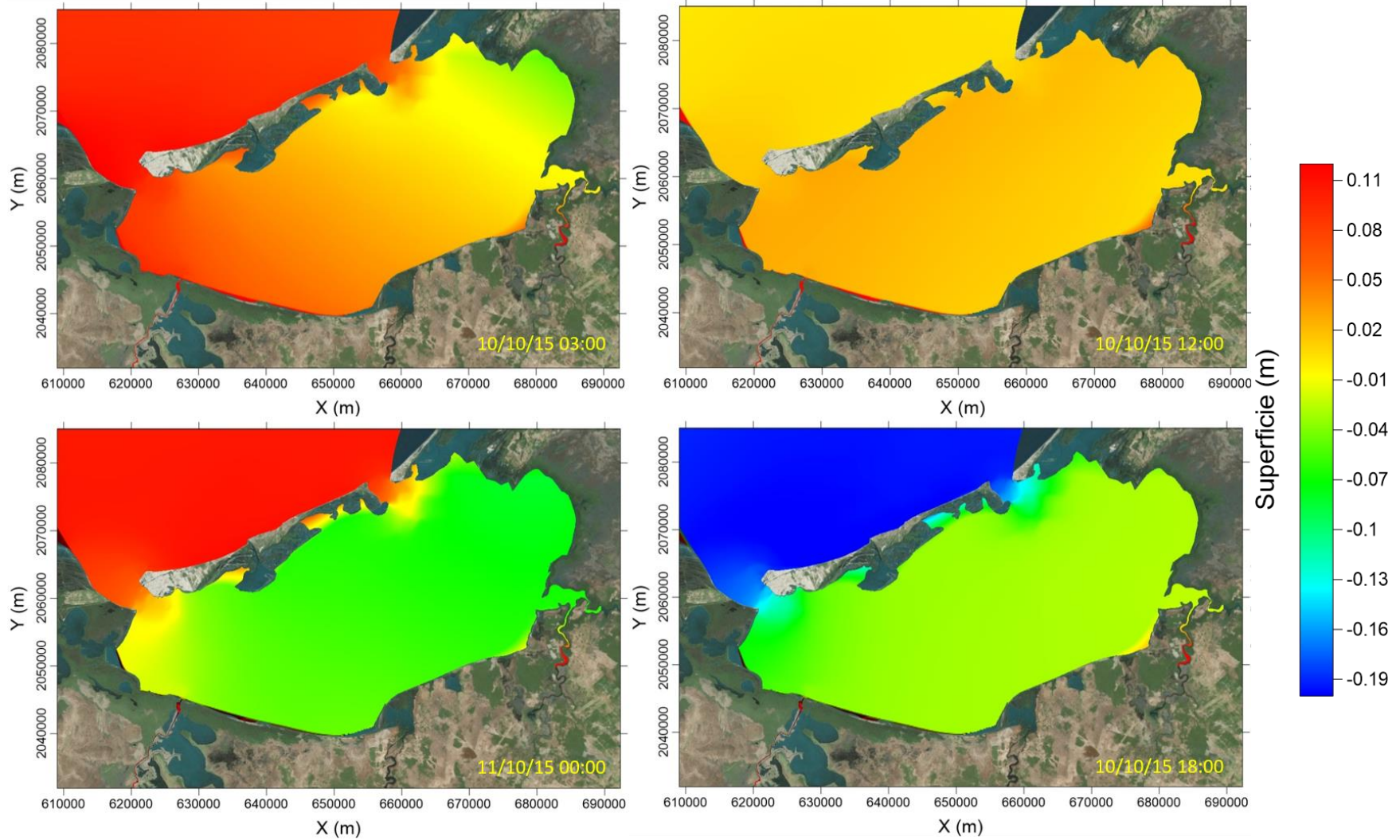


Figura 53. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

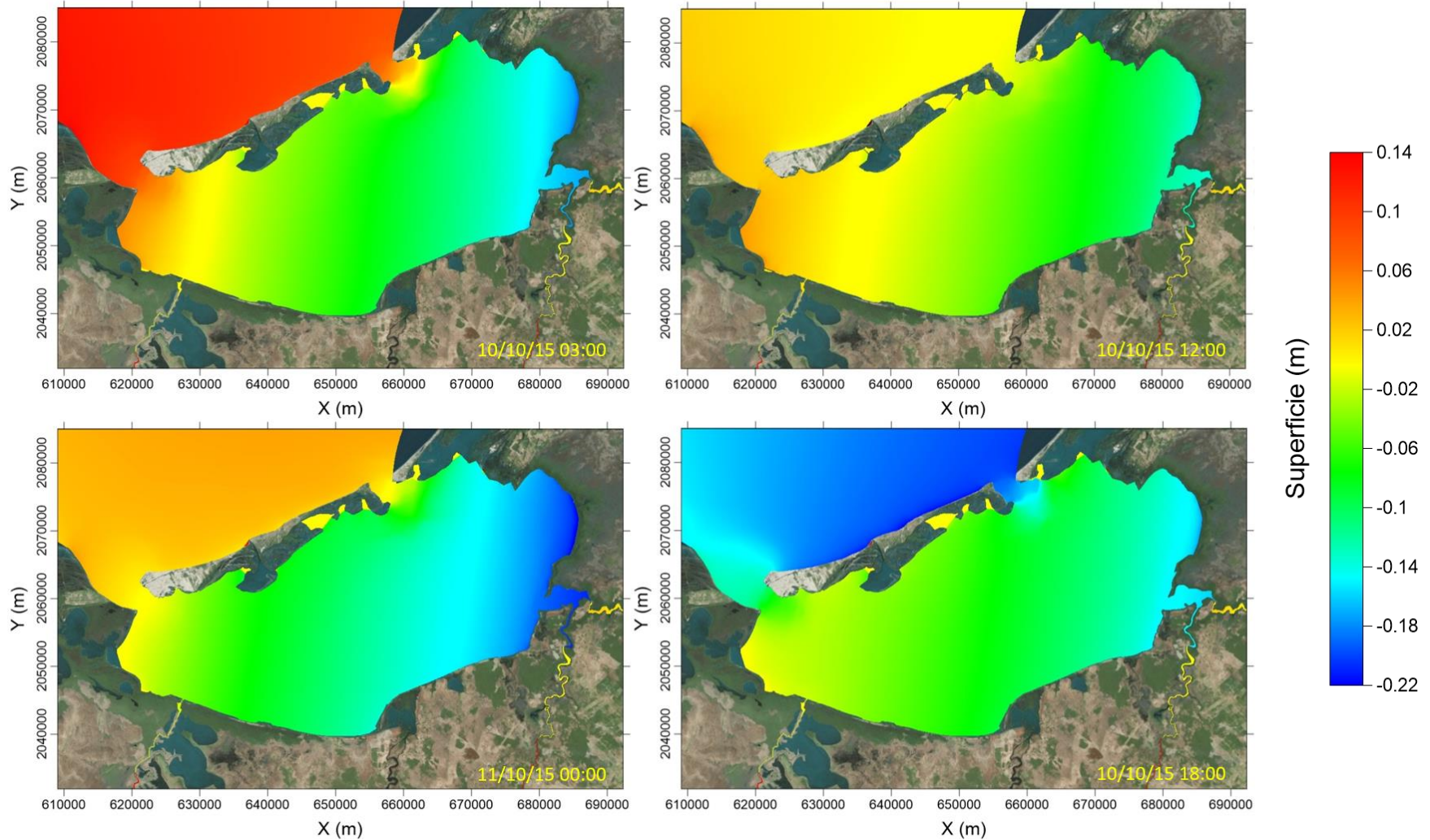


Figura 54. Resultados de superficie libre con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM

La Figura 55 representa los resultados de velocidad obtenidos con Delft3D-FLOW en donde la velocidad máxima es igual a 0.5 m/s a las 18:00 horas en ambas bocas. Por otra parte, HDUNAM predice una velocidad máxima de 0.42 m/s donde la cual es alcanzada en la boca Del Carmen en comparación con la boca Puerto Real, puesto que en esta última la velocidad es poco notable (Figura 56).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

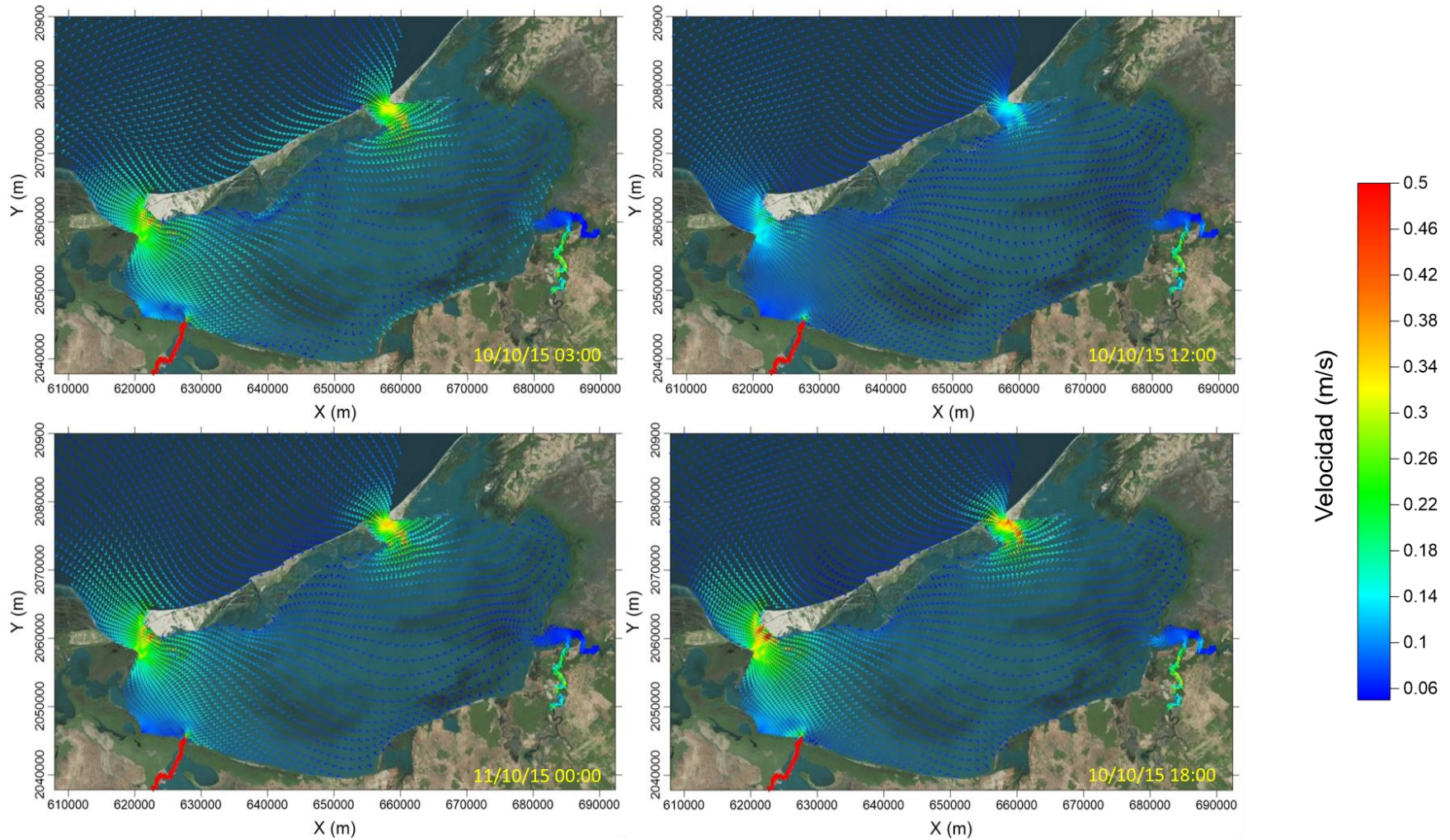


Figura 55. Resultados de velocidad con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo Delft3D

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

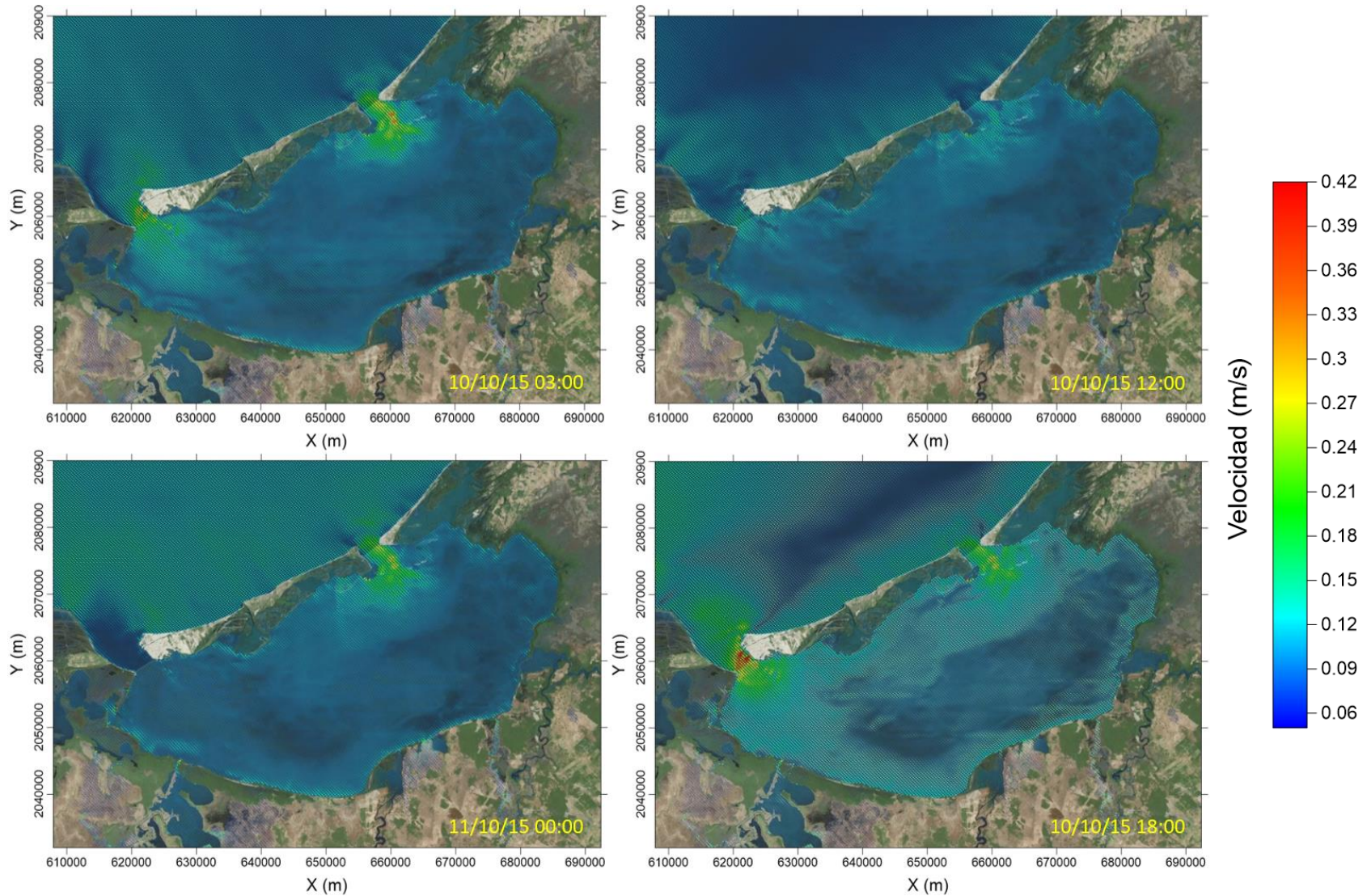


Figura 56. Resultados de velocidad con marea muerta del día 10/10/2015 en temporada de nortes obtenidos con modelo HDUNAM

La siguiente tabla muestra los resultados de superficie libre obtenidos con cada uno de los modelos numéricos considerando los puntos de control ubicados en la boca Del Carmen y la boca Puerto Real.

Tabla 10. Resultados de superficie libre en puntos de control en temporada de nortes (los resultados están representados en m)

	Del Carmen		Puerto Real	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Delft3D-FLOW	0.38	-0.30	0.29	-0.35
HDUNAM	0.19	-0.28	0.16	-0.33

La Figura 57 y la Figura 57 representan de manera gráfica los resultados de superficie libre obtenidos con cada uno de los modelos.

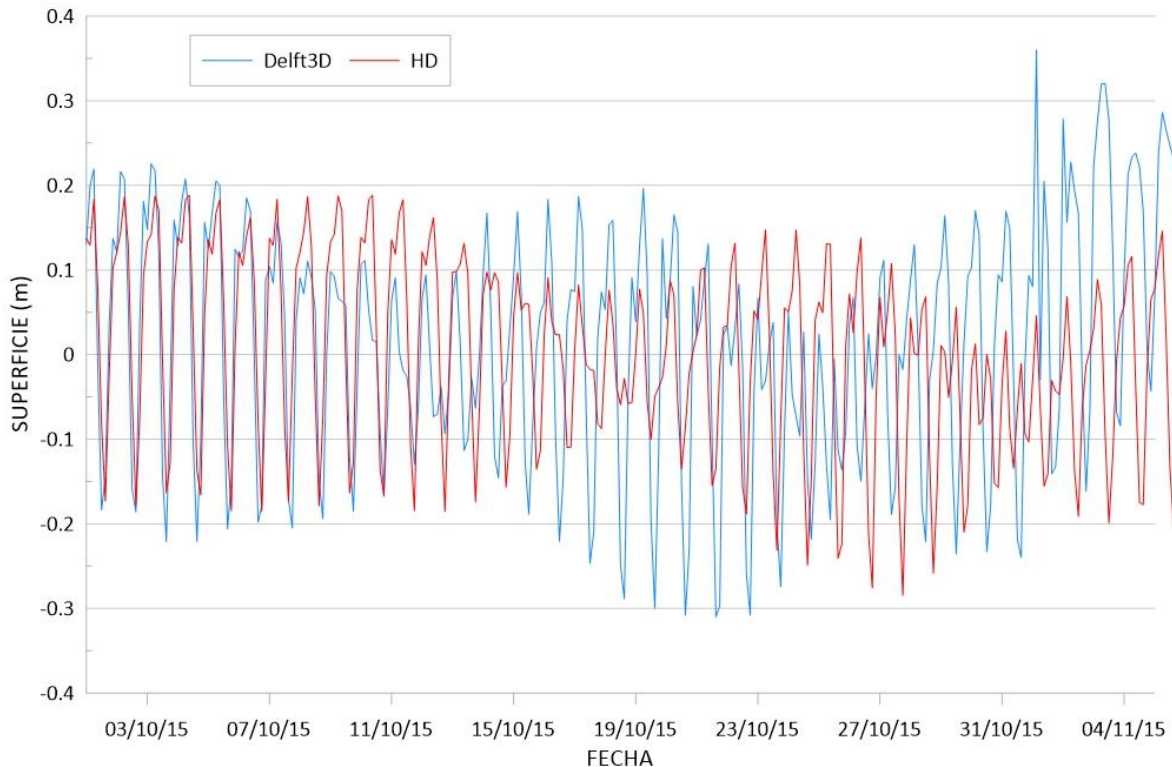


Figura 57. Superficie libre en temporada de nortes en punto de control boca Del Carmen

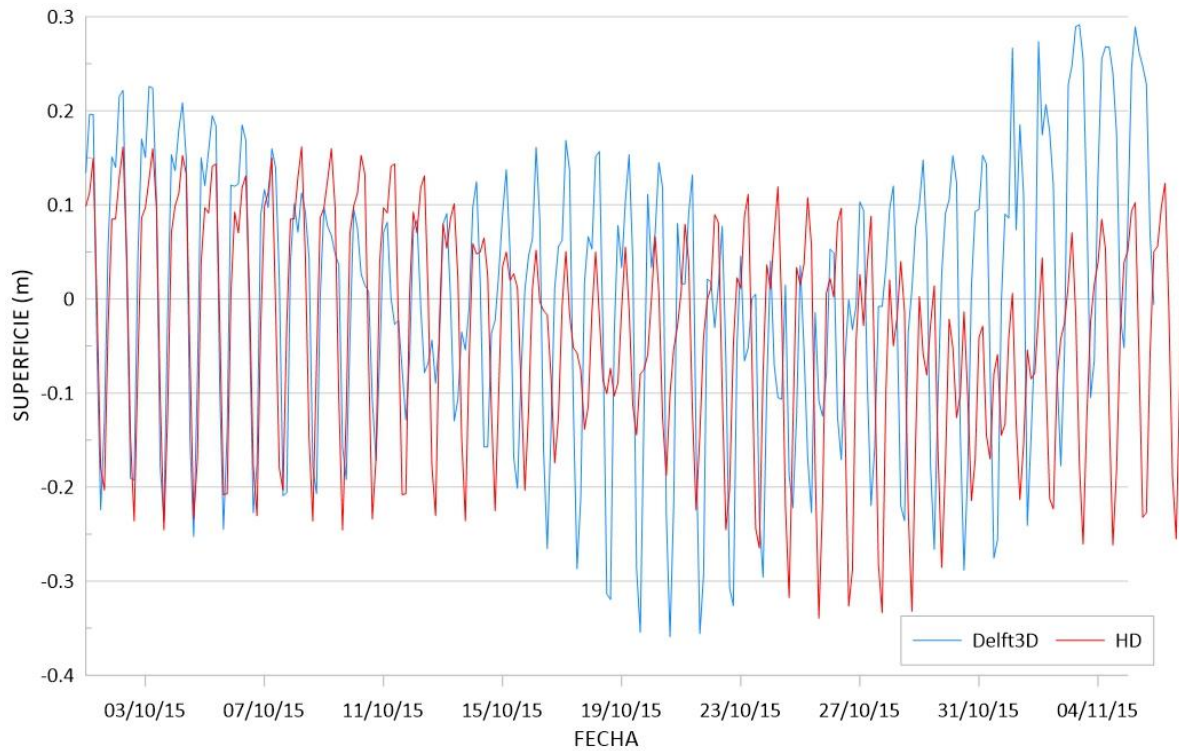


Figura 58. Superficie libre en temporada de nortes en punto de control boca Puerto Real

Las velocidades obtenidas para cada uno de los puntos de control con ambos modelos numéricos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11. Resultados de las velocidades en puntos de control en temporada de nortes (los resultados están representados en m/s)

	Del Carmen		Puerto Real	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Delft3D-FLOW	0.31	-0.30	0.50	-0.40
HDUNAM	0.31	-0.16	0.25	-0.37

La Figura 59 y la Figura 59 representan de manera gráfica los resultados de las velocidades obtenidas con cada uno de los modelos.

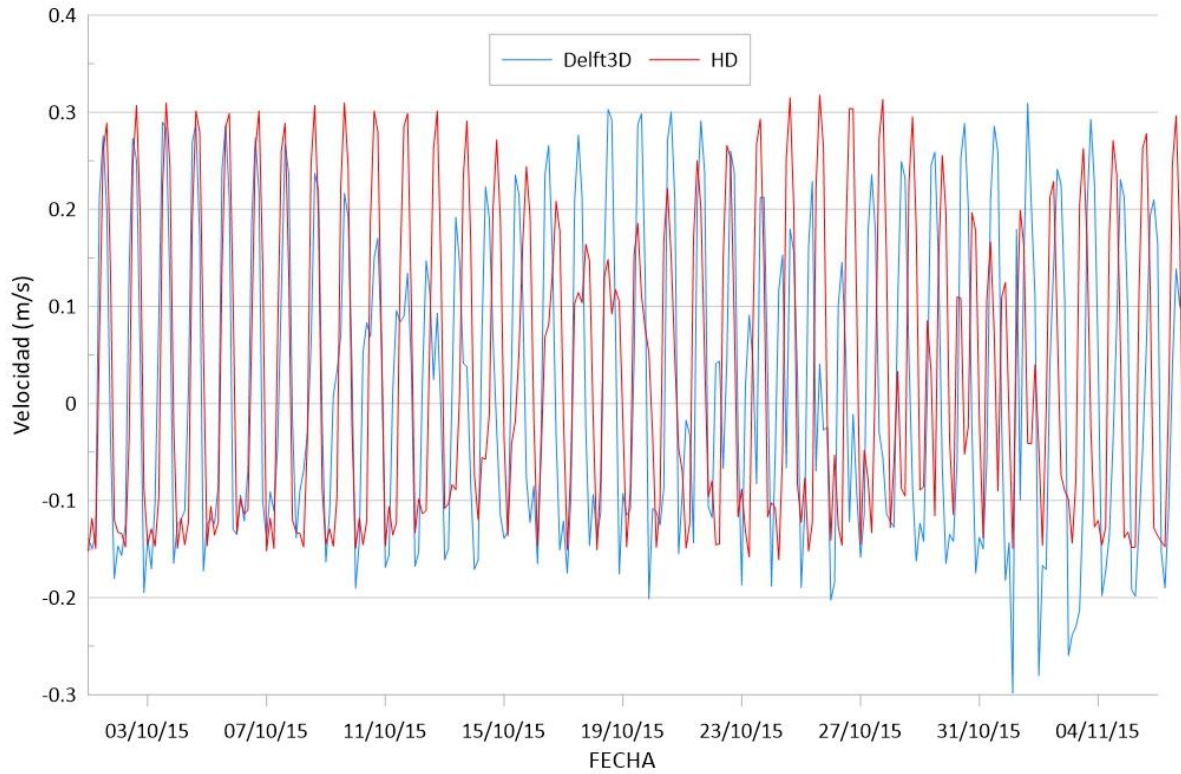


Figura 59. Velocidades en temporada de nortes en punto de control boca Del Carmen

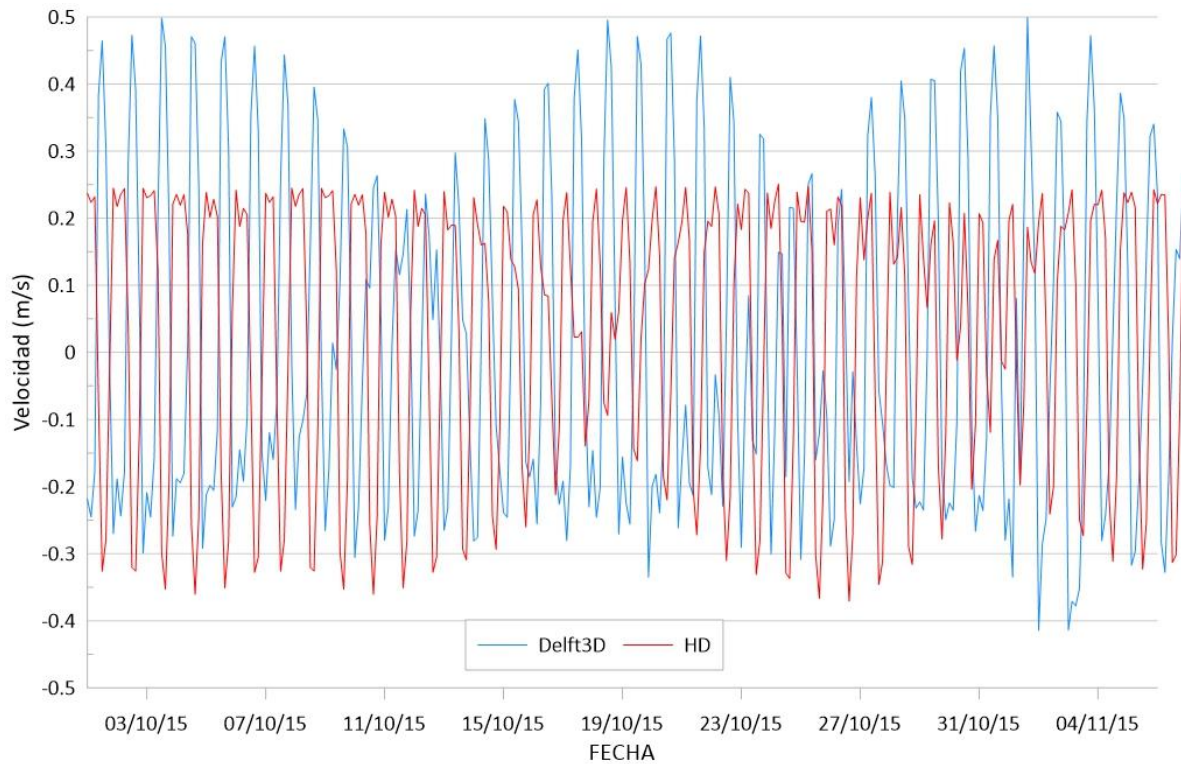


Figura 60. Velocidades en temporada de nortes en punto de control boca Puerto Real

4.2 CORRIENTES

La circulación general obtenida con ambos modelos indica que existe un flujo neto (entrada de agua) al interior de la Laguna de Términos a través de la Boca Puerto Real provocando una circulación de las corrientes hacia el suroeste del sistema lagunar provocando una salida a través de la boca Del Carmen (Figura 61). Mientras que cuando existe reflujos (salida de agua), la evacuación se genera a través de las dos bocas.

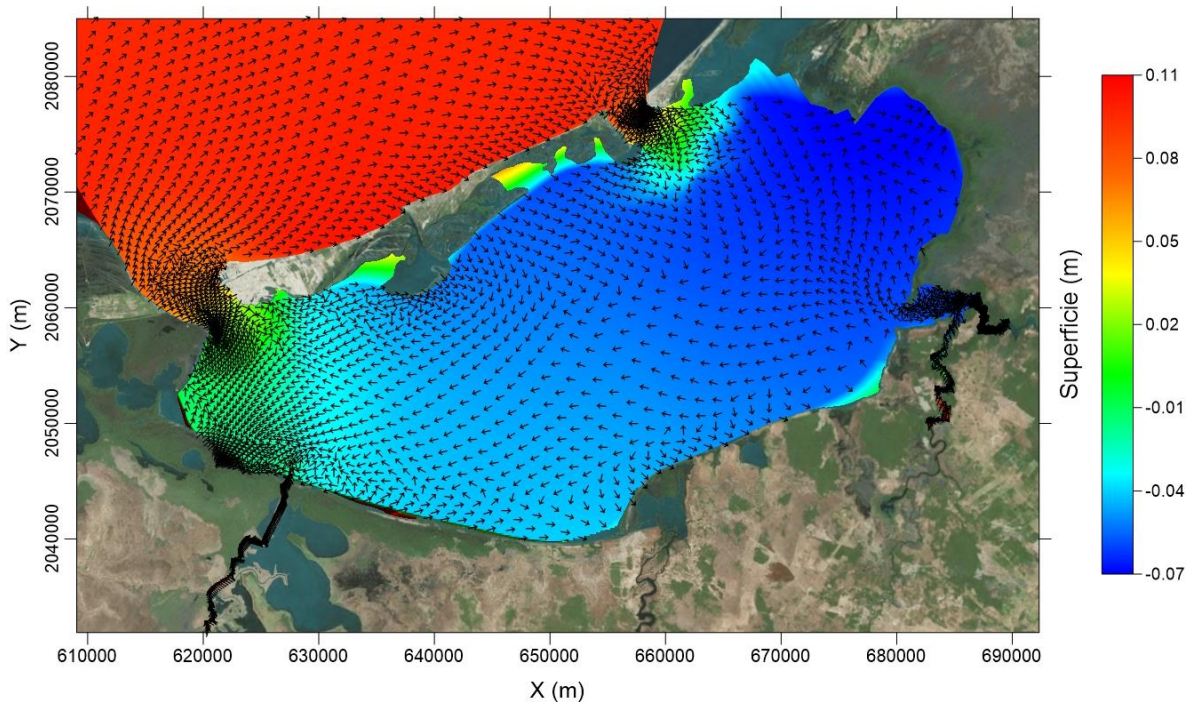


Figura 61. Dirección de corrientes en flujo

Aunque el reflujos ocurre en ambas bocas, la circulación general de las corrientes es predominante hacia el lado oeste de la laguna, ocasionando que la boca Del Carmen tenga un reflujos mayor.

También es importante señalar que el flujo de corrientes que se presenta al interior de la laguna es el que provoca la circulación del agua en dirección este hasta alcanzar la parte suroeste (Figura 61).

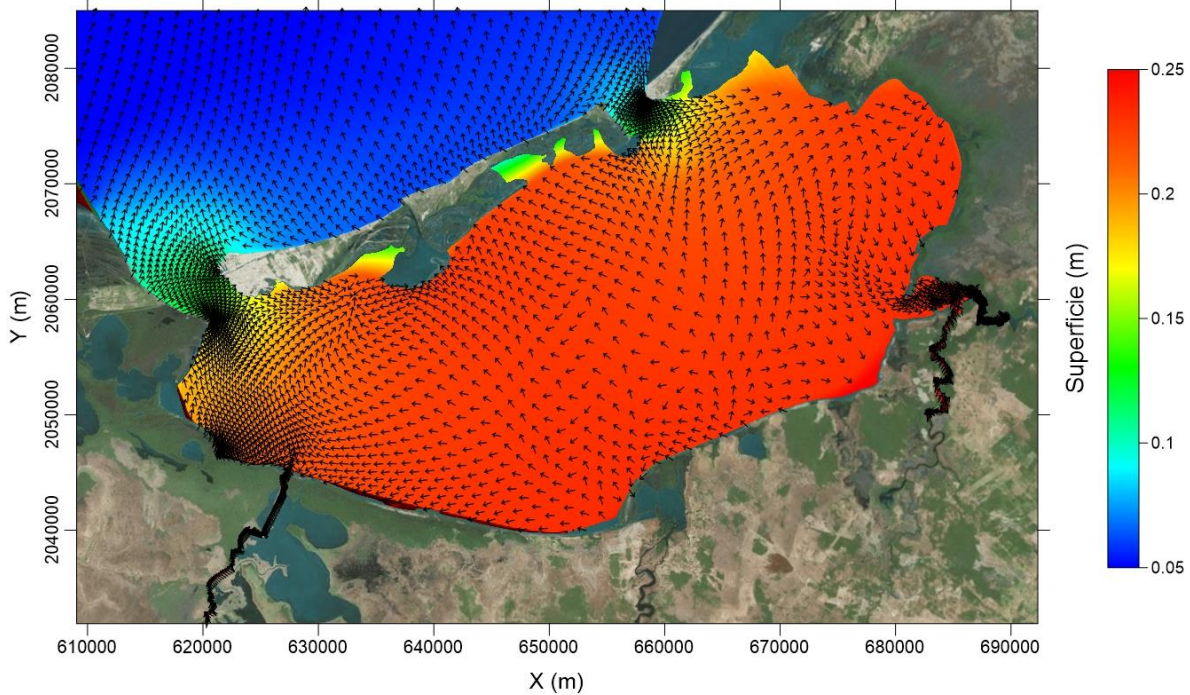


Figura 62. Dirección de corrientes en refluo

4.3 EFICIENCIA COMPUTACIONAL

Los dos modelos empleados en este trabajo se ejecutaron durante un periodo de 123 días (2952 horas) que corresponden al tiempo que dura cada una de las temporadas climáticas propuestas para cada escenario de simulación. En la Tabla 12 se indica el tiempo de ejecución de cada modelo y la eficiencia que cada uno alcanza.

Tabla 12. Comparación de los tiempos de ejecución y eficiencia del modelo HDUNAM y Delft3D-FLOW para un periodo de 123 días

	HDUNAM			Delft3D-FLOW		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Número de celdas por malla	868, 897	868, 897	868, 897	277, 650	277, 650	277, 650
Tiempo de ejecución (horas)	240	240	240	18	18	18
Eficiencia (segundos/celda)	0.99	0.99	0.99	0.23	0.23	0.23

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

En este apartado se analiza y discute la eficiencia computacional de los modelos numéricos empleados en este trabajo con base en su capacidad de funcionamiento, así como las ventajas y desventajas que se presentan al realizar una simulación hidrodinámica.

Asimismo, se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas ejecutadas para cada uno de los escenarios propuestos en donde los principales forzamientos físicos son: la marea astronómica, el viento y la descarga fluvial de los ríos Candelaria, Mamantel y Palizada.

5.1 SUPERFICIE LIBRE

Los resultados obtenidos para superficie libre en los puntos de control ubicados en las bocas Del Carmen y Puerto Real se comparan con los reportados por Morán (2005) en la siguiente tabla:

Tabla 13. Valores máximos de superficie libre reportados en bocas Del Carmen y Puerto Real de la Laguna de Términos con distintos modelos numéricos

Autor	Boca Del Carmen			Boca Puerto Real		
	Méndez (2020) (El presente trabajo)		Morán (2005)	Méndez (2020) (El presente trabajo)		Morán (2005)
Modelo numérico	HDUNAM	Delft3D- FLOW	RMA2	HDUNAM	Delft3D- FLOW	RMA2
Superficie Libre	0.10 m	0.16 m	0.18 m	0.14 m	0.17 m	0.19 m

Los valores de superficie libre presentan variación dependiendo del modelo utilizado. Si bien, las diferencias no son significativas éstas son consistentes con los parámetros empleados con cada autor. Morán (2005) ejecutó una simulación con el modelo RMA2 para un periodo de septiembre a octubre de 2002 con un dominio de elementos irregulares sin extenderla hacia el interior del Golfo de México, localizó las fronteras a poca distancia de las bocas de la laguna y para los parámetros de marea y caudales utilizó datos del año 2002. Consideró un gasto medio anual como una constante durante el tiempo de simulación. Este dato lo consideró como descargas puntuales que corresponden a los ríos Candelaria, Chumpan, Las Coloradas, Mamantel y Palizada.

Para el presente estudio, además de considerar los parámetros de marea y caudales también se consideró el parámetro de viento. El parámetro de los caudales no fue considerado como un dato constante, sino que se elaboró un hidrograma de gasto medio diario para cada temporada, es decir, el valor del caudal presenta una variación respecto al tiempo durante la ejecución de la simulación. Cabe mencionar que en este estudio no se consideraron las descargas de los ríos Chumpan y Las Coloradas.

La principal diferencia con el trabajo de Morán (2005) es el alcance temporal. Los resultados que obtiene son únicamente para el mes de septiembre. Si tomamos en cuenta el alcance temporal de las modelaciones ejecutadas con HDUNAM y Delft3D-FLOW, se consideran tres temporadas climáticas que constituyen un año de simulación. A pesar de que el objetivo de ambos estudios es describir las condiciones hidrodinámicas habituales de la zona de estudio, es posible afirmar que en este estudio se encuentran mejor representadas dichas condiciones tan sólo por el alcance temporal del trabajo. Por otra parte, para este trabajo se utilizaron dominios con elementos regulares, a diferencia de Morán (2005) en donde las fronteras abiertas se localizaron al interior del Golfo de México y no a poca distancia de las bocas de la laguna, es decir, estas fronteras se localizaron a 90 km de la zona de estudio para el modelo HDUNAM y a 88 km en el modelo Delft3D-FLOW.

El propósito de considerar la extensión de los dominios en ambos modelos es evitar o minimizar errores al momento de ejecutar la simulación hidrodinámica, ya que como el parámetro de marea corresponde a una onda larga, al extender el dominio es posible que los modelos consideren una propagación adecuada de la marea con mejor estabilidad.

Los resultados de superficie libre se presentaron para un ciclo de marea completo (marea viva/marea muerta) en donde se observa un incremento de superficie libre de agua hacia el lado oeste de la laguna, esto se debe a que el aporte de caudal del río Palizada es mayor al que aportan en conjunto los ríos Candelaria y Mamantel. En el caso del modelo HDUNAM los niveles de superficie libre en el lado este de la laguna son menores que los predichos en el modelo Delft3D-FLOW y se debe a la acción del parámetro de viento puesto que es considerado como un dato constante, es decir, durante todo el periodo de simulación el viento sopla con la misma magnitud y dirección en todo el dominio del modelo.

5.2 VELOCIDAD DE CORRIENTES

De acuerdo con los resultados obtenidos, en cada escenario se observa que las velocidades máximas se alcanzan en ambas bocas de la laguna (Del Carmen y Puerto Real). Las velocidades máximas obtenidas con cada modelo y en cada una de las temporadas climáticas se indican en la siguiente tabla, haciendo una comparación con trabajos previos. Los datos de CONACyT-ANIDE (2012) y GEOMAR (2019) se consultaron del trabajo de Santana (2019).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HDUNAM Y DELFT3D.
 APLICACIÓN A LA LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.

Tabla 14. Velocidades reportadas para bocas Del Carmen y Puerto Real de la Laguna de Términos, Campeche

Autor	BOCA DEL CARMEN					BOCA PUERTO REAL				
	Méndez (2020) (El presente trabajo)		Gómez (2019)	CONACyT- ANIDE (2012)	GEOMAR (2019)	Méndez (2020) (El presente trabajo)		Gómez (2019)	CONACyT- ANIDE (2012)	GEOMAR (2019)
Modelo utilizado	HDUNAM	Delft3D- FLOW	Delft3D- FLOW	-	-	HDUNAM	Delft3D- FLOW	Delft3D- FLOW	-	-
Temporada de secas	0.47 m/s	0.50 m/s	0.50 m/s	Sin registro	0.70-0.80 m/s	0.42 m/s	0.50 m/s	0.50 m/s	Sin registro	0.40-0.70 m/s
Temporada de lluvias	0.60 m/s	0.65 m/s	0.50 m/	0.40 m/s		0.44 m/s	0.48 m/s	0.50 m/	0.60 m/s	
Temporada de nortes	0.65 m/s	0.80 m/s	Sin registro	0.57 m/s		0.57 m/s	0.67 m/s	Sin registro	0.58 m/s	

Los valores de velocidad registrados en los estudios anteriores y en el presente trabajo, tienen una variación sin diferencia significativa, es decir, podemos considerar que los valores se encuentran dentro del mismo rango. Tomando en cuenta estas observaciones, las variaciones pueden responder al tipo de forzamiento que consideró cada autor o pueden ser ocasionadas por la metodología empleada en cada caso.

Las velocidades registradas por CONACyT-ANIDE corresponden únicamente a las temporadas de lluvias y nortes del año 2012, mientras que la velocidad reportada por GEOMAR corresponde a un valor general para el año 2019. Gómez (2019) utilizó Delft3D-FLOW y los parámetros empleados son: marea astronómica, viento y una descarga puntual del río Palizada; elaboró un dominio en tres dimensiones que posee 9 niveles en la vertical con una frontera abierta localizada a 60 km de la zona de estudio.

Para el presente trabajo además de los parámetros considerados por Gómez (2019), los ríos Candelaria y Mamantel también se incluyeron. Se elaboró un dominio en dos dimensiones para cada modelo numérico, es decir, no se consideraron niveles en la vertical. Las fronteras abiertas se localizaron a 88 km de la zona de estudio para Delft3D-FLOW y a 90 km en el caso de HDUNAM. En este trabajo los resultados de velocidad corresponden a un ciclo de marea completo (marea viva/marea muerta) e indican el cambio de velocidad al interior de la laguna.

5.3 CIRCULACIÓN GENERAL

Las corrientes del Golfo de México tienen un patrón de comportamiento anticiclónico (Nowlin y McLellan, 1967). Sin embargo, sobre la bahía de Campeche la circulación de las corrientes tiene un patrón de comportamiento ciclónico debido a la acción del viento y por la presencia de la corriente de agua a través del Canal de Yucatán (Monreal-Gómez *et al.*, 2004) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

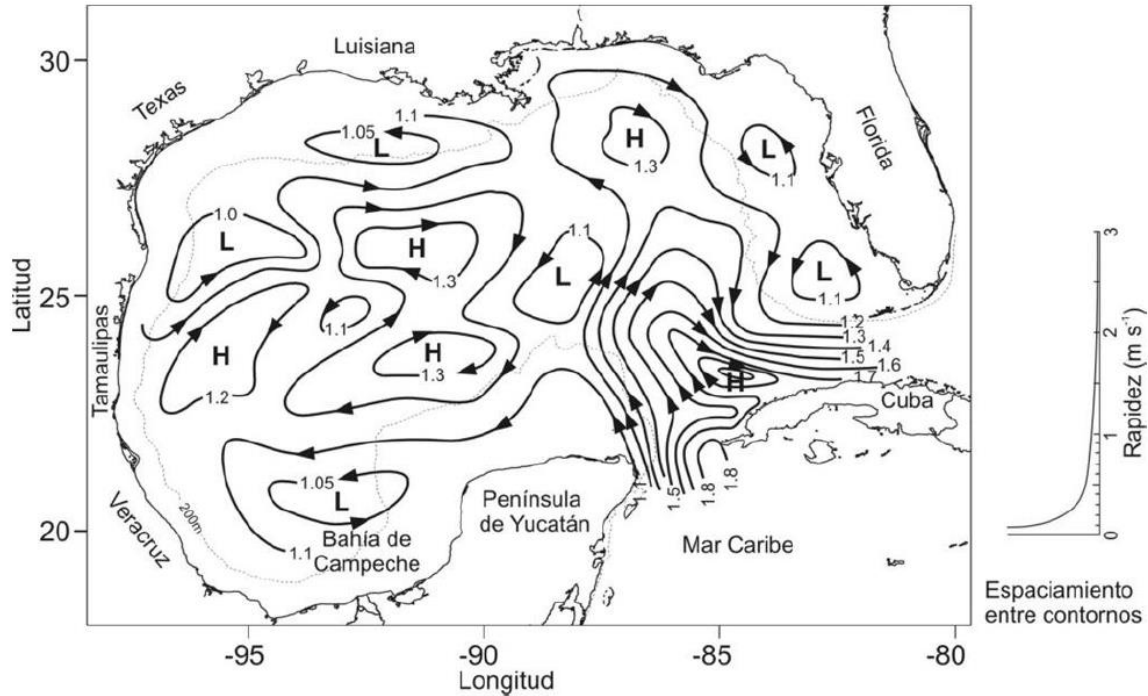


Figura 63. Circulación inferida de la topografía dinámica (Tomado de Monreal-Gómez et al., 2004)

Respecto a la circulación de las corrientes, los resultados obtenidos por ambos modelos indican una dirección este-oeste, mismo que coincide con descripciones hechas anteriormente (Mancilla y Vargas 1980; INE, 1997; David y Kjerfve, 1998) para la Laguna de Términos. Este mismo comportamiento también coincide con los resultados generados por Gómez (2019) con el modelo Delft3D-FLOW.

Analizando los resultados obtenidos para la circulación general de corrientes es notable una entrada de flujo neto a través de la boca Puerto Real debido a la corriente que proviene del canal de Yucatán. Es importante mencionar que el lado este de la Laguna de Términos es más somero que el lado oeste ya que el rango de profundidad varía entre 1 m y 2 m, mientras que el lado oeste presenta un rango de profundidad entre 2.5 m y 3.7 m. Otro factor que también influye de manera importante es que el aporte de los ríos Candelaria y Mamantel es menor al del río Palizada localizado al otro extremo de la laguna. En conjunto, los ríos Candelaria y Mamantel aportan un caudal máximo de 150.39 m³/s, mientras que el río Palizada contribuye con un caudal máximo de 459 m³/s. Con estos datos es posible afirmar que los ríos Candelaria y Mamantel aportan una tercera parte del flujo total a la Laguna de Términos. Estos factores en conjunto provocan que la circulación general de corrientes al interior de

la laguna sea con dirección este-oeste provocando que la salida de la corriente sea a través de la boca Del Carmen.

5.4 EFICIENCIA COMPUTACIONAL

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible señalar que Delft3D-FLOW tiene una mayor eficiencia computacional que el modelo HDUNAM.

Tomando en cuenta que en la actualidad existen diversos modelos numéricos disponibles para ejecutar simulaciones en ambientes costeros y que la mayoría tiende a utilizar conceptos matemáticos similares, una diferencia entre los modelos es el tipo de dominio que utilizan. El dominio puede ser con un enfoque estructurado o no estructurado, es decir, un dominio estructurado corresponde a una malla de celdas de forma regular (cuadradas, curvilíneas u ortogonales), mientras que los dominios no estructurados corresponden a mallas con celdas de forma irregular o también conocidas como mallas flexibles, es decir, las celdas varían en cuanto a tamaño y forma.

A pesar de que los modelos HDUNAM y Delft3D-FLOW requieren de un dominio con un enfoque estructurado existe una diferencia básica entre ellos. HDUNAM requiere de un dominio con celdas cuadradas en donde además de ocupar la información batimétrica también emplea la información topográfica de la zona de estudio. El principal problema con este dominio es que las celdas cuadradas no permiten representar de manera fiel el trayecto de los ríos que formen meandros (Figura 64).

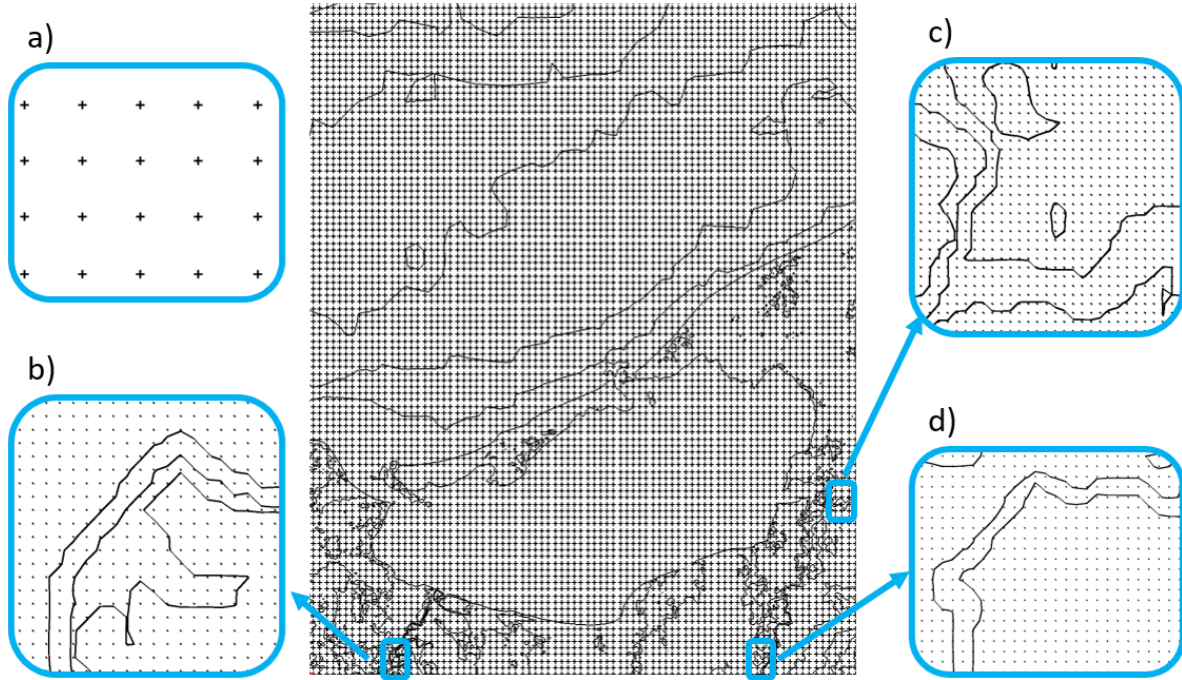


Figura 64. Dominio para modelo HDUNAM a) detalle de celdas cuadradas, b) detalle del río Palizada, c) detalle del río Mamantel, d) detalle del río Candelaria

Por otra parte, Delft3D-FLOW requiere de un dominio donde la principal condición es que las celdas sean lo más ortogonal posible. Este modelo permite la variación en las dimensiones de las celdas a utilizar, por lo que se facilita la representación de ríos que en su trayecto comprenda bastantes meandros. Y aunque este modelo no considera la topografía del área de estudio (Figura 65), la elaboración de este dominio es más complejo que el requerido por HDUNAM.

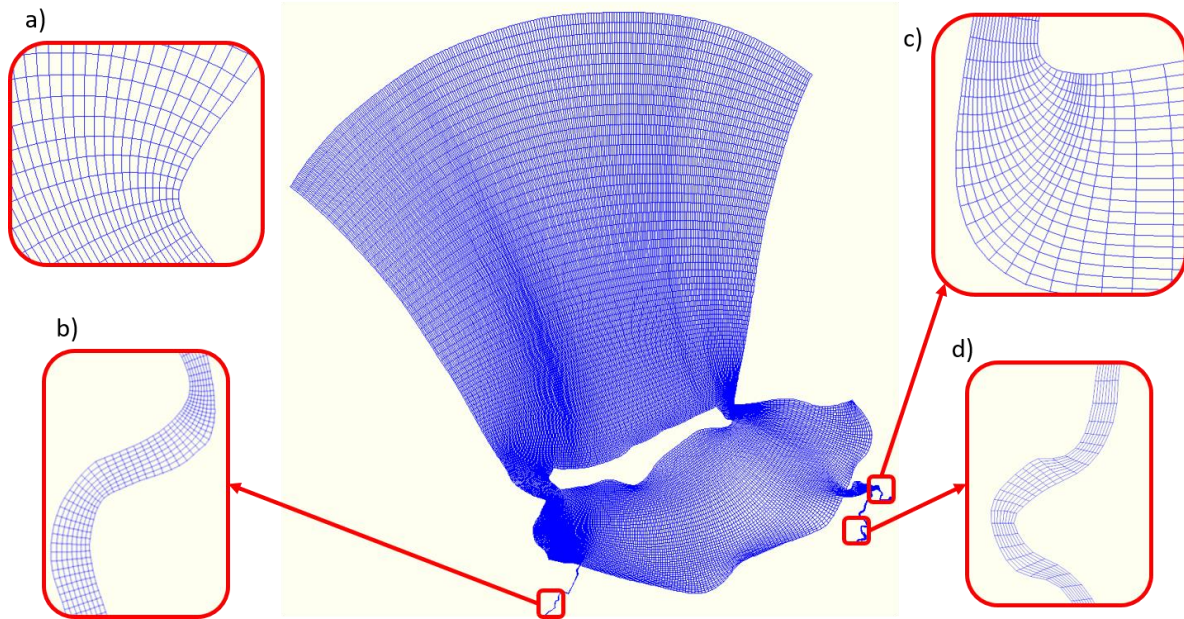


Figura 65. Dominio para modelo Delft3D-FLOW a) detalle de celdas ortogonales, b) detalle de río Palizada, c) detalle de río Mamantel, d) detalle de río Candelaria

Para representar la Laguna de Términos sobre el dominio requerido por HDUNAM se elaboraron un total de 1, 079, 496 celdas con dimensiones de 100 X 100 m, de las cuales 868, 897 celdas contienen información batimétrica y 210, 599 celdas contienen información topográfica, mientras que para el modelo Delft3D-FLOW el número total de celdas fue de 277, 650 con dimensiones variables en un rango de 2085 m a 1 m. La gran diferencia entre el número de celdas entre dominios se debe a las limitantes del programa HDUNAM, ya que este requiere celdas cuadradas y como la Laguna de Términos es un sitio de gran extensión el tamaño de las celdas fue menor para poder representar de manera más confiable las descargas de los ríos considerados en este estudio.

Los modelos se ejecutaron para periodos de 123 días (2952 horas) y el tiempo requerido por HDUNAM para llevar a cabo la simulación fue de 240 horas mientras que Delft3D-FLOW requirió de 18 horas. El cálculo de la eficiencia se realizó mediante la división del número de celdas entre el tiempo (en segundos) que requirió cada modelo para ejecutar la simulación, para el cálculo de la eficiencia del modelo HDUNAM solamente se consideraron las celdas con información batimétrica y corresponden a un total de 868, 897 celdas. Tomando en cuenta el tiempo de ejecución por ambos modelos podemos decir que la eficiencia computacional de HDUNAM es de 0.99 y el de Delft3D-FLOW es de 0.23. La variación de la eficiencia computacional de cada programa se debe al número de celdas de cada

dominio empleado, HDUNAM al tener un dominio con un número mayor de celdas requiere más tiempo para resolver las ecuaciones requeridas para llegar a una solución. Otro factor importante es el paso de tiempo utilizado para cada modelo, ya que para el modelo HDUNAM es de 2 s, mientras que para el modelo Delft3D-FLOW es igual a 0.1 m (6 s). Estos valores se obtuvieron con el criterio de estabilidad de Courant:

$$\Delta t \leq \frac{c, \Delta x}{\sqrt{g D_{med}}}$$

Donde:

Δt = intervalo de tiempo de cálculo (s)

Δx = discretización espacial de la malla (m)

D_{med} = profundidad media del dominio

C_r = número de Courant. $C_r = 1$ con términos no lineales y $C_r = 5$ con términos lineales

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

Los valores de paso de tiempo para cada modelo son muy distintos entre sí debido al valor del espaciamiento del dominio que necesita cada uno de ellos. Durante el desarrollo de las simulaciones se hicieron ensayos con los pasos de tiempo para que fueran equivalentes entre sí, pero ambos modelos arrojaron errores al momento de cambiar este parámetro.

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos observar que a pesar de que ambos modelos predicen condiciones hidrodinámicas similares para la Laguna de Términos, Delft3D-FLOW tiene una mayor eficiencia computacional por lo que se recomienda su uso, ya que también cuenta con módulos adicionales para otros análisis (morfología, transporte de sedimentos, oleaje, etc.).

Por otra parte, a pesar de HDUNAM predice resultados confiables su eficiencia computacional es desfavorable en comparación con Delft3D-FLOW. Otra desventaja es que parámetros como el viento y la rugosidad se consideran como un dato constante en todo el dominio de HDUNAM, mientras que Delft3D-FLOW permite introducir el parámetro de viento como una serie de tiempo y el parámetro de rugosidad con diferentes valores en el dominio; por lo que se recomienda el uso de HDUNAM para ejecutar simulaciones con áreas de estudio menos extensas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Del análisis realizado en el presente trabajo, se concluye que:

- El modelo numérico Delft3D-FLOW tiene mayor eficiencia computacional con respecto al modelo HDUNAM.
- La eficiencia computacional depende del número de celdas de cada dominio, independientemente del modelo a ejecutar.
- Delft3D-FLOW cuenta con una mayor capacidad para manejar distintos valores respecto a ciertos parámetros (p. ej. viento, rugosidad, etc.), puesto que es capaz de ejecutarlos en tiempo y espacio, mientras HDUNAM solamente contempla un valor para el espacio.
- Delft3D-FLOW ofrece una amplia gama de herramientas para visualizar e interpretar resultados en comparación con HDUNAM.
- HDUNAM requiere una actualización para mejorar su eficiencia computacional.

REFERENCIAS

AQUALAB (Sin fecha). Manual de usuario. Aqualab, Universidad de Cantabria. España.

Bautista, F., E. Batllori, M Ortiz, G. Palacio, y M. Castillo, 2005. *Integración de conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la península de Yucatán*. P. 33-58. En: F. Bautista y G. Palacio (eds.). *Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*. UACAM-UAY-INE. México D.F., México. 282 p.

Chaudhry, M.H. 2008. *Open-channel flow*. Second edition. New York, USA: Springer Verlag. Springer Science and Business+Media, LLC.

Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) 2014. México, D.F. Comisión Nacional del Agua. Datos de las Estaciones Hidrométricas 30181, 30199, 30200. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>

Centro de Estudios Geomáticos Ambientales Marinos (GEOMAR), 2019. Datos de las magnitudes de corrientes y batimetría en Ciudad del Carmen, Campeche. CDMX.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO (2009). *Manglares de México: Extensión y distribución*.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO (2009). *Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos*.

CONACyT-ANIDE, 2012. *Impacto de la erosión costera en el hábitat de anidación de tortugas marinas en escenarios de cambio climático: Caso Campeche*. ANIDE. CONACyT.

David, L. T. and Kjerfve, B. 1998. Tides and currents in a two-inlet coastal lagoon: Laguna de Términos, México. *Continental Shelf Research*: 18(10): 1057-1079.

Contreras, E.F. y O. Castañeda, 2003. *Las lagunas costeras y estuarios del Golfo de México: hacia el establecimiento de índices ecológicos*. p. 373-416. En: M. Caso, I. Pisanty y E. Escurra. (eds). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología; Instituto de Ecología A.C.; Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. 627 p.

Deltares, 2014. Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual, version 3.15.34158, May 2014.

Deltares, 2014. Delft3D-QUICKPLOT, Visualisation and animation program for analysis of simulation results, User Manual, version 2.15.30932, May 2014.

Deltares, 2014. RFGRID, Generation and manipulation of curvilinear grids for Delft3D-FLOW and Delft3D-WAVE, User Manual, version 4.0034074, May 2014.

García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Quinta Edición. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gío-Argaez F.R., 1996. *Campeche y sus recursos naturales*. Revista Mexicana de Historia Natural, A.C. Vol. Esp. 247 p.

Gómez De la Peña, E. E., 2019. *Estudio numérico de la circulación y aireación asociadas al Grijalva-Usumacinta en Laguna de Términos, Campeche*. Tesis de Maestría en ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

González-Garciandía, J.R. y Pérez-López, O. E. 2018. El uso de imágenes Landsat en el coeficiente de Rugosidad de Manning para la modelación de la inundación costera al suroeste de Cuba. 11th International Congress on Geomatics, "Germática 2020". La Habana, Cuba.

INE, 1997. *Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna “Laguna de Términos”*. SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología. 167 p.

Jardel, E., A. Saldaña, y M. T. Barreiro-Güemes, 1987. Contribución al conocimiento de la ecología de los manglares de la Laguna de Términos, Campeche. *Ciencias Marinas*. 13:1-22.

Liu, G. and Liu, M. 2003. *Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method*. World Scientific, Cop., New Jersey, USA, 449 pp.

Mancilla Peraza, M. y Vargas Flores, M., 1980. Los primeros estudios sobre la circulación y el flujo neto de agua a través de la Laguna de Términos, Campeche. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 7*.

Morán García, D. K., 2005. Estimación de los tiempos de residencia en la Laguna de Términos, Campeche. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil (Hidráulica). Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Monreal-Gómez, M. A., Salas de León, D. A. y Velasco Mendoza, H., 2004. La hidrodinámica del Golfo de México. En M. Caso, I Pisanty, y E. Ezcurra (Edits.), *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. (Primera ed., Vol. 1). México D.F.: Instituto de Ecología (INE-SEMANART).

NOAA, (2014). Saha, Suranjana and Coauthors, 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate* J. Climate, 27, 2185–2208. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>

Nowlin, W. D. and Mc Lellan, H. J., 1967. A characterization of the Gulf of Mexico water in winter. *Journal of Marine Research*, 25: 29-59.

Ojeda, J. A. V. and Eng, M. (2003). Modelación Numérica en Hidráulica. *Retrieved*, 12(1), 2016.

Osnaya Romero, J. 1991. Algunos modelos numéricos de flujo bidimensional no permanente. Tesis de maestría en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 56 p.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1997). *Programa de Manejo de la Zona de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos*. Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México.

Santana Carrillo, M. S., 2019. *Análisis de las variaciones litorales en las bocas de Laguna de Términos, Campeche, México*. Tesis Maestría en ciencias (geología marina). Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Symonds, A. M., Vijverberg, T., Post, S., van der Spek, B. J., Henrotte, J., and Sokolewicz, M. 2016. Comparison between Mike 21 FM, Delft3D and Delft3D FM flow models of western port bay, Australia. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(35), currents. 11. <https://doi.org/10.9753/icce.v35.currents.11>