



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

ESTUDIO DE LA INUNDACIÓN POR MAREA DE TORMENTA EN EL SUR DEL GOLFO DE MÉXICO MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA
PRESENTA**

OVEL DÍAZ GARCÍA

Tutores:

Dr. Jorge Zavala Hidalgo
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Dr. Pascal Douillet
Institute de Recherchepour le Développement (IRD-MIO)

Comité Tutor:

Dr. Roberto Padilla Hernández
IMSG at NOAA/EMC

Dr. Arturo Quintanar
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO DE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*a mi mamá,
por lo que es...*

*a Marvys y a Leovel,
por lo que son...*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de doctorado otorgada para realizar esta investigación. Al CCA-UNAM y DGTIC-UNAM por los recursos computacionales. Los apoyos obtenidos del proyecto SENER-CONACYT 201441 para concluir esta Tesis. A los programas binacionales entre Francia y México JEST (JointEnvironmentalStudyof Términos Lagoon) y ECOS-NORD (Evaluation-orientation de la COopérationScientifique).

RESUMEN

Se estudia la inundación por marea de tormenta en dos sitios del sur del Golfo de México, uno urbano, la región de la Ciudad de Veracruz-Boca del Río, y el otro en la Laguna de Términos, un área natural protegida. Se analizó la inundación ante eventos extremos en las condiciones actuales y los cambios esperados por Cambio Climático. El estudio se realizó mediante modelación numérica y el análisis de mediciones que permitieron validar y calibrar las simulaciones.

La marea de tormenta asociada a ciclones tropicales puede ocasionar importantes daños a largo plazo a los ecosistemas y paisajes costeros, así como daños a la propiedad y pérdida de vidas humanas. La modelación numérica de la marea de tormenta se emplea con tres propósitos principales: el pronóstico de la marea de tormenta a medida que se aproxima a tierra para la planificación de la atención a emergencias y de la evacuación de poblaciones costeras, y en el estudio retrospectivo de las tormentas para determinar el riesgo, desarrollo de estrategias de mitigación, restauración costera y sustentabilidad.

En el presente trabajo se realiza un estudio de inundación costera en dos sitios de interés en el sur del Golfo de México. Se utilizó la última generación de modelos numéricos con mallas no estructuradas, las cuales permiten reducir la incertidumbre y simular las zonas de inundación. Para validar los modelos numéricos y los métodos para la generación de mallas no estructuradas, se presenta un caso de estudio de inundación por marea de tormenta asociada al paso de un frente frío (conocidos localmente como "Nortes") por la Laguna de Términos. El modelo seleccionado para este caso fue el Finite-VolumeCommunityOceanModel (FVCOM), y para la generación del forzamiento meteorológico se empleó el modelo atmosférico WeatherResearch and Forecasting (WRF). En este caso se estudió el impacto de un Norte intenso en la región y cómo cambian las áreas de inundación para distintos escenarios de aumento del nivel del mar por cambio climático. Los resultados muestran un aumento no lineal de las áreas de inundación y de la altura media de la columna de agua sobre tierra, ante el incremento del nivel medio del mar.

El segundo sitio de estudio está centrado en las ciudades de Veracruz y Boca del Río, donde se analiza la inundación producida por huracanes sintéticos que, por su trayectoria, intensidad, velocidad de desplazamiento y punto de arribo, pudieran generar un evento extremo de marea de tormenta e inundaciones. El modelo numérico seleccionado para este caso fue el ADvancedCIRCulationstorm surge model (ADCIRC) por el menor tiempo de cómputo requerido comparado con el FVCOM y por la cantidad de simulaciones a realizar. Se analizaron eventos históricos en la región y se simularon numéricamente un gran número de eventos hipotéticos para condiciones actuales y futuras, considerando un aumento de 0.50 m del nivel del mar, el cual es similar al estimado para finales del presente siglo.

Este estudio contribuye con la creación de nuevas capacidades para el pronóstico de la marea de tormenta producida por huracanes y frentes fríos que se aproximan a las costas mexicanas. Los resultados aportan, además, valiosa información para la planeación del uso de suelo, el diseño, construcción, protección y operatividad de obras industriales, marítimas y urbanas sobre la franja litoral de las ciudades de Veracruz y Boca del Río.

ABSTRACT

Storm surge flooding is studied at two sites in the southern Gulf of Mexico, one urban, the Veracruz-Boca del Río region, and the Laguna de Terminos, a natural protected area. Flooding was analyzed in the face of extreme events in current conditions and the changes expected by Climate Change. It was carried out by means of numerical modeling and the analysis of measurements that allowed to validate and calibrate the simulations.

Storm surges associated with tropical cyclones can cause significant long-term damage to coastal ecosystems and landscapes, as well as property damage and loss of human life. Storm surge numerical modeling is used for three main purposes: forecasting the storm surge as the storm approaches land, for emergency care planning and evacuation of coastal populations, and retrospectively studying storms to determine risk, develop mitigation strategies, coastal restoration, and sustainability.

In this work, a coastal flood study is being conducted at two sites of interest in the southern Gulf of Mexico. The latest generation of numerical models with unstructured meshes was used to reduce uncertainty and simulate flood zones. In order to validate the numerical models and the methods for the generation of unstructured meshes, a case study of flooding by storm surge associated with a cold front (known as *North* in that region) in the Terminos Lagoon is presented. The model selected for this case was Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM), and for the meteorological forcing the atmospheric model WRF was used. In this case, the impact of an intense *North* in the region and how flood areas change for different scenarios of sea level rise due to climate change is studied. The results show a non-linear increase in flood areas and the mean height of the water column above ground, when a linear increases in mean sea level is considered.

The second study site is in the region of the cities of Veracruz and Boca del Río, where the flood produced by synthetic hurricanes that, due to their trajectory, intensity, forward speed, and landing location, could generate an extreme event of storm surge and floods. The numerical model selected for this case was the ADvancedCIRCulation storm surge model (ADCIRC) because of the shorter computation time required, compared to

the FVCOM, and because of the number of simulations to be performed. Historical events in the region were analyzed and a large number of hypothetical events for current and future conditions were numerically simulated. For this study a 0.50 m sea level rise by the end of this century was considered.

This study contributes to the creation of new capabilities for forecasting the storm surge produced by hurricanes and extreme events approaching the Mexican coasts. The results also provide valuable information for land use planning, design, construction, protection and operation of industrial, maritime and urban works on the coastal strip of the cities of Veracruz and Boca del Rio.

ÍNDICE	1
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Antecedentes	5
1.2. Problema científico y justificación de la investigación	7
1.3. Hipótesis	7
1.4. Objetivo general	8
1.5. Objetivos específicos	8
1.6. Organización de la Tesis	8
Capítulo 2. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA MAREA DE TORMENTA	10
2.1. Modelos numéricos	10
2.1.1. Dimensiones del modelo	12
2.1.2. Tipos de Mallas	13
2.1.3. Coordenadas verticales	15
2.1.4. Esquemas numéricos	17
2.2. Marea de tormenta	18
2.2.1. Factores que intervienen en la marea de tormenta	19
2.2.2. Modelos para el estudio de la marea de tormenta	21
2.3. Modelos numéricos de mallas no estructuradas	23
2.3.1. Modelo ADCIRC	23
2.3.2. Modelo FVCOM	25
2.3.2. Breve comparación entre los modelos ADCIRC y FVCOM	28
2.4. Modelo atmosférico de alta resolución WRF	29
2.4.1. Descripción general	29
2.5. Generación de mallas no estructuradas	30
2.6. Aumento del nivel del mar por el cambio climático	39
Capítulo 3. SITIOS DE ESTUDIO	41
3.1. Laguna de Términos	41
3.1.1. Mediciones	44
3.1.2. Información batimétrica y topográfica	45
3.1.3. Malla no estructurada	45
3.1.4. Configuración del modelo	46
3.2. Ciudades de Veracruz y Boca del Río	48
3.2.1. Huracanes sintéticos	50
3.2.2. Información batimétrica y topográfica	53
3.2.3. Malla no estructurada	53
3.2.3. Configuración del modelo	55

Capítulo 4. RESULTADOS PARA LA LAGUNA DE TÉRMINOS	58
4.1. Forzamiento meteorológico	58
4.2. Modelo de marea de tormenta	61
4.3. Área de inundación por frente frío en la Laguna de Términos	63
4.3. Área de inundación durante el Norte	66
4.4. Cambio del área de inundación por aumento del nivel del mar	67
Capítulo 5. RESULTADOS PARA LAS CIUDADES DE VERACRUZ Y BOCA DEL RÍO	73
5.1. Forzamiento meteorológico	73
5.2. Modelo de marea de tormenta	74
5.3. Áreas susceptibles a inundación por huracanes en Veracruz y Boca del Río	75
5.4. Nivel máximo de inundación	76
5.5. Mapas de extensión y frecuencia de inundación	78
Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
Bibliografía	86

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la marea de tormenta ha causado más víctimas y pérdidas materiales y económicas que cualquier otro desastre natural. Los desastres naturales por marea de tormenta son bien conocidos, como los ocasionados por los huracanes Gilbert (1988), Katrina (2005), Ike (2008) y Sandy (2012), incluidos los eventos extremos catastróficos que causaron más de 100,000 muertes en Bangladesh ([Khalil, 1992](#)) y en la Bahía de Bengala ([Murty et al., 1986](#)). El huracán Katrina (2005) es un buen ejemplo de los daños y la devastación que puede causar el oleaje. Al menos 1,500 personas perdieron la vida durante el huracán Katrina y muchas de esas muertes se produjeron directa o indirectamente como resultado de la marea de tormenta.

La marea de tormenta está estrechamente relacionada a la interacción entre el esfuerzo del viento sobre la superficie del océano y la resistencia por fricción. A medida que los huracanes se aproximan a la costa, el agua es empujada hacia tierra resultando frecuentemente en inundaciones significativas, causando pérdida de vidas humanas y daños a la propiedad y a los ecosistemas costeros. Entender y predecir la extensión de la marea de tormenta es crítico para los encargados de atención a las emergencias en el caso de una tormenta inminente, y para los esfuerzos a largo plazo para proteger y sostener los ecosistemas costeros. Los modelos computacionales de marea de tormenta están enfocados hacia estos objetivos ([Dawson et al., 2011](#)).

Los recientes incrementos en capacidad de cómputo y el desarrollo de modelos con mallas no estructuradas han abierto un área de investigación nueva para modelar numéricamente la elevación de marea de tormenta con mucho mejores resultados ([Dietrich, et al. 2011a,b](#); [Dukhovskoy y Morey, 2011](#), [Chen, et al. 2004](#)).

En los últimos años, algunos investigadores han estudiado los impactos del oleaje y la marea de tormenta asociados con huracanes y frentes fríos en las costas de México. Basándose en un reanálisis del oleaje de 30 años, [Appendini et al. \(2014\)](#) encontraron que en el Golfo de México (GoM) la climatología del oleaje está modulada por los frentes fríos de otoño-invierno, donde los valores extremos están modulados tanto por huracanes como por Nortes. Los Nortes son eventos meteorológicos provocados por masas de aire frío que chocan con masas de aire caliente, y al ser aquel más denso, se mete como una cuña debajo del aire caliente, lo que provoca inestabilidad en la atmósfera de esa zona, caracterizada por descensos de temperatura, heladas, vientos intensos, fuerte oleaje, abundante nubosidad y lluvias. En el caso del GoM estos entran desde Norteamérica, generando vientos intensos del norte y por tanto, presentando condiciones ideales para la generación de oleaje ([Ojeda et al., 2017](#)).

Durante los Nortes en el GoM, los vientos predominantes sostenidos soplan hacia el sur y hacia el sureste dependiendo del origen y orientación de los frentes ([Henry, 1979](#)); y por tanto, se espera que generen un desplazamiento de las aguas del mar hacia el sur, donde la ancha plataforma continental en el sur del GoM favorece la amplificación de los procesos de marea de tormenta. Además, por transporte de Ekman tienen una componente hacia el oeste, también favoreciendo el apilamiento hacia la costa.

Los frentes fríos pueden ser muy intensos, con vientos máximos por encima de los 60 km/h, lo que los hace comparables a una tormenta tropical. Se asocian comúnmente con vientos intensos, lluvias, disminución de la temperatura y peligros para la navegación, pero no con la marea de tormenta que pueden generar, excepto en algunos casos en el hemisferio sur ([McInnes y Hubbert, 2003](#)). Además de la diferencia en la intensidad del viento, y el hecho de que los ciclones tropicales ocurren en verano y a principios de otoño, mientras que los nortes ocurren a finales de otoño e invierno, una de las principales diferencias entre ellos es su frecuencia de ocurrencia. Por ejemplo, en los últimos 150 años se han registrado 24 ciclones tropicales en la Península de Yucatán ([Rey et al., 2018](#)), pero ha habido de 16 a 24.5 nortes por año en

esta área, dependiendo de cómo se definan ([Reding, 1992](#); [Appendini et al., 2018](#)). Debido a la alta ocurrencia de Nortes, [Rey et al. \(2018\)](#) realizaron un reanálisis de 30 años del nivel del mar para evaluar su influencia en los procesos hidrodinámicos de la Laguna de Chelem y el peligro de inundación asociado a ellos en el norte de la Península de Yucatán.

Considerando que los Nortes en cualquier año son más frecuentes que los huracanes, y que el nivel del mar está aumentando, investigar la marea de tormenta y las inundaciones causadas por nortes en el sur del GoM es un tema clave para las estrategias de adaptación al cambio climático. Para ello, un enfoque posible es reproducir numéricamente un evento de un Norte intenso, que fue medido con precisión con varios instrumentos, y luego cuantificar los cambios en las áreas de inundación bajo diferentes escenarios de aumento del nivel del mar debido al cambio climático. En este estudio, presentamos dicha cuantificación para la Laguna de Términos (LT) en el sur del GoM.

Además, nos interesa estudiar en las ciudades de Veracruz y Boca del Río, las inundaciones por marea de tormenta debido a huracanes que, por su trayectoria, intensidad y velocidad de desplazamiento pudiera generar un evento de marea de tormenta e inundación costera en la zona. Para ello se analizaron eventos históricos en la región y se simuló numéricamente algunos casos históricos y otros hipotéticos.

1.1. Antecedentes

La gran mayoría de las inundaciones en Veracruz desde 1950 a la fecha –se tienen registradas alrededor de 500– han sido causadas por combinación de fenómenos como frentes fríos con ondas o perturbaciones tropicales (categorías menores de huracanes). Ese fue el caso en las últimas tres grandes inundaciones en el estado de Veracruz: la de 1999 en Poza Rica, la de 2001 en Las Choapas y de 2010 en la ciudad de Veracruz y La Antigua ([Luna-Lagunes y Zapata-Ronzón, 2011](#)).

En el reciente libro del historiador investigador Antonio García de León se mencionan inundaciones ocurridas en la ciudad en la época colonial española al paso de huracanes. En el mismo describe un evento que provocó “un avance del mar varios kilómetros tierra adentro” ([García de León, 2011](#)).

Cómo parte del proyecto conjunto entre el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se ha diseñado y desarrollado un Sistema de Pronóstico Numérico de Mareas de Tormentas, Marejadas y Oleaje para los mares mexicanos y zona costera. Sin embargo, este sistema de pronóstico trabaja con modelos a grandes escalas, en particular el modelo atmosférico cuya resolución horizontal promedio es de 21 km.

Por otra parte se han desarrollado estudios de marea de tormenta en las costas mexicanas para sitios específicos. En el trabajo de [Appendini et al. \(2014\)](#) se estudian 23 escenarios diferentes basados en variaciones de la tormenta tropical Arlene en cuanto a trayectoria, intensidad y velocidad de traslación tocando tierra en un radio de 100 km de la desembocadura del Río Pánuco, en Tampico, México. [Meza-Padilla et al. \(2015a\)](#) extiende el trabajo e incrementa la cantidad de eventos históricos analizados a 25 y los sintéticos a 120. En el artículo de [Meza-Padilla et al. \(2015b\)](#), se realiza un estudio del oleaje y la marea de tormenta producidos por huracanes basados en simulaciones con 3100 eventos sintéticos generados a partir de un modelo estadístico/determinístico.

Sin embargo, ninguno de los trabajos anteriores estudió las inundaciones por marea de tormenta. Todos tenían dominios en el mar que estaban limitados por la línea de costa. En ese sentido el trabajo de [Rey et al. \(2019\)](#) representa un salto en este tipo de estudio para México al realizar una evaluación del riesgo de inundación por huracanes en la zona costera de Yucatán y Campeche, utilizando una malla computacional con una parte sobre tierra. El estudio utilizó una climatología de más de 39,900 huracanes hipotéticos que cubren todas las posibles direcciones de movimiento.

1.2. Problema científico y justificación de la investigación

No se conocen las zonas del sur del GoM con peligro de inundación por marea de tormenta ante eventos extremos para las condiciones actuales del nivel del mar. Conocer además estas zonas para diferentes escenarios de aumento del nivel del mar, puede ayudar a tomar decisiones de ordenamiento territorial a los tomadores de decisiones. Desde el punto de vista científico ayudaría a identificar las zonas de mayor peligro y las que pueden implicar cambios para la biodiversidad costera, como zonas de humedales y manglares.

1.3. Hipótesis

Utilizando modelos de circulación oceánica de mallas no estructuradas se puede mejorar la estimación de las zonas de inundación por marea de tormenta y reducir su incertidumbre en zonas de interés en el sur del GoM.

1.4. Objetivo general

El objetivo principal es:

Estudiar la inundación por marea de tormenta en sitios del sur del Golfo de México mediante modelos numéricos basados en mallas no estructuradas que permitan resoluciones muy altas en la zona de interés y cuantificar los cambios en las áreas de inundación ante posibles escenarios de aumento del nivel medio del mar.

1.5. Objetivos específicos

- Conocer, implementar y utilizar modelos numéricos de mallas no estructuradas para estudiar la marea de tormenta en el sur del Golfo de México.
- Estudiar la marea de tormenta producida por frentes fríos en la Laguna de Términos y cuantificar los cambios en las áreas de inundación ante posibles escenarios de aumento del nivel del mar.
- Estudiar la marea de tormenta producida por huracanes hipotéticos en las ciudades de Veracruz y Boca del Río, y el efecto que tendría un aumento del nivel del mar para finales de siglo.
- Identificar zonas con distinto nivel de peligro mediante mapas construidos a partir de los resultados de los experimentos numéricos.

1.6. Organización de la Tesis

En el Capítulo 2 se hace una revisión de los modelos numéricos en general, la marea de tormenta, los modelos numéricos de mallas no estructuradas, y las diferentes herramientas y programas para generarlas. También se presenta una breve descripción del modelo atmosférico utilizado y de las consideraciones respecto al aumento del nivel del mar por cambio climático pertinentes para este trabajo. El Capítulo 3 lo dedicamos a

describir los dos sitios de estudio, el de la Laguna de Términos y el de las ciudades de Veracruz y Boca del Río. En ellos se describen las mallas no estructuradas creadas para cada estudio, y las configuraciones de los modelos que se usaron. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos durante el estudio, abordando los forzamientos meteorológicos utilizados, las calibraciones de los modelos numéricos y los resultados para el sitio de estudio de la Laguna de Términos. El Capítulo 5 es similar al Capítulo 4, pero con los resultados del sitio de estudio en las ciudades de Veracruz y Boca del Río. Finalmente en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

Capítulo 2.

MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA MAREA DE TORMENTA

El presente capítulo está destinado a describir, de manera general, los modelos numéricos (sección 2.1), la marea de tormenta (sección 2.2) y los modelos de mallas no estructuradas (sección 2.3). Se añade a esta descripción una sección dedicada al modelo atmosférico (sección 2.4) utilizado para generar los forzamientos meteorológicos de alta resolución y otra a la generación de las mallas no estructuradas (sección 2.5). Finalmente, y por sus implicaciones en este estudio, se hace un breve revisión acerca de las predicciones de aumento del nivel del mar por cambio climático (sección 2.6).

2.1. Modelos numéricos

Un modelo científico es una representación teórica de un fenómeno natural, típicamente expresado en forma matemática, que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento.

En el caso de la atmósfera y el océano, el comportamiento está regido por las ecuaciones asociadas a la dinámica de fluidos y otros procesos físicos como la interacción entre la materia y radiación, la microfísica de nubes, etc. En general, estas ecuaciones se expresan como sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales describen la evolución futura de las diferentes variables relevantes en función de sus en el presente. El modelo matemático consiste en estas ecuaciones junto con los valores de parámetros y condiciones de frontera (por ejemplo, las características topográficas de la Tierra, la cantidad de energía emitida por el Sol, etc.).

Si conociéramos el estado de la atmósfera y/o océano en un momento dado, podríamos en principio resolver las ecuaciones del modelo matemático para determinar los estados futuros de estos (salvo por limitaciones en predictibilidad). Las ecuaciones matemáticas que describen estos procesos son las bien conocidas ecuaciones de Navier-Stokes aplicadas a la dinámica de los fluidos geofísicos. Sin embargo, la complejidad de estas ecuaciones diferenciales parciales no-lineales hace que sean muy difíciles de resolver por medios analíticos (Temam, 1984).

En la búsqueda de una solución los matemáticos han recurrido a la simplificación de las ecuaciones a través de aproximaciones y consideraciones. Algunas de las más usadas en el campo de la oceanografía son las ecuaciones de Boussinesq y la aproximación hidrostática (Pond y Pickard, 1983). Para resolver el sistema de ecuaciones resultante, derivado de la teoría de la mecánica clásica, es necesaria una aproximación para la turbulencia (Mellor y Yamada, 1982; Deleersnijder, 1992) y una ecuación de estado para el agua de mar (Gill, 1982).

En la práctica, sin embargo, las ecuaciones y la geomorfología de las áreas estudiadas son tan complejas que la matemática actual no proporciona las soluciones analíticas al sistema de ecuaciones resultante, por lo cual es necesario resolver las ecuaciones en forma aproximada usando métodos numéricos con la ayuda de computadoras. Los programas computacionales que resuelven estas ecuaciones aproximadas son comúnmente conocidos como "modelos numéricos".

Existen en la actualidad varias formas de abordar la solución o implementación de estos modelos numéricos aplicados a la hidrodinámica que luego los caracterizan y las cuales podríamos resumir como:

- Dimensiones del modelo (uni, bi o tri-dimensional).
- Tipos de rejillas utilizadas para discretización espacial.
- La manera de distribuir los puntos en la componente vertical en los modelos tridimensionales (z-coordenadas, σ -coordenadas, híbridas).

- Esquema numérico utilizado (diferencias finitas, elementos finitos, volumen finito).

2.1.1. Dimensiones del modelo

Los modelos unidimensionales (1D) son generalmente utilizados para describir el comportamiento de fluidos que se mueven en una sola dirección ó que el movimiento en las otras direcciones es despreciable con respecto a una dirección predominantemente. Tal es el caso de los ríos y sistemas de canales y drenaje, o modelos que permitan describir el comportamiento de la capa de mezcla del océano a partir de la variación de la radiación solar de entrada. Los modelos bidimensionales (2D) son aplicados a aquellos escenarios en los que las variaciones de la profundidad son pocas, con ningún cambio abrupto de la batimetría y valores medianamente constantes. En estos modelos, la variable que describe el movimiento del fluido, el vector velocidad, está dado por sus componentes horizontal y vertical en el plano de propagación. También se utilizan cuando la solución buscada es homogénea en la vertical, como en el modelo de aguas someras, a los que suelen clasificarse como modelos barotrópicos. Los modelos 2D pueden tomarse sobre la vertical, es decir, sus dos dimensiones son longitud y profundidad o altura, lo cual puede ser idóneo para estudiar procesos de convección o en modelos conceptuales de flujo de agua subterránea basado en el potencial hidráulico.

Los modelos baroclínicos o tridimensionales (3D) nos proveen de una interpretación más realista del ecosistema en estudio. Son imprescindibles en aquellos lugares donde existen variaciones de la topografía por la presencia de colinas y cañones subacuáticos ó el fluido expresa procesos de estratificación temporal ó permanente invocando la evaluación de estos en la dirección vertical.

Los modelos 3D se utilizan para áreas que presentan una estructura vertical significativa de velocidades o densidad en relación con la temperatura y la salinidad. Esto se debe a los forzamientos que actúan sobre el sistema, como el viento, los flujos de calor en la superficie y las entradas de agua dulce, provocando una circulación de

carácter baroclínico. La marea genera una corriente de barotrópica y relativamente constante en la vertical, solo un decaimiento logarítmico cerca del fondo debido a la fricción creada debido a la rugosidad. Como primera aproximación, los efectos de la marea se pueden explicar mediante un modelo 2D horizontal. Tan pronto como a la marea se le agrega algún otro forzamiento, es necesario cambiar a una resolución 3D.

Es acertado señalar que estos modelos 3D son más costosos, desde el punto de vista computacional, al compararlos con los modelos 2D, debido al número de operaciones y cálculos, que se incrementan para describir los procesos en la vertical.

2.1.2. Tipos de Mallas

Las ecuaciones hidrodinámicas resueltas por los modelos numéricos son discretizadas horizontal y verticalmente en un número finito de elementos con formas diferentes. La resolución espacial de la rejilla horizontal tiene que ser suficientemente fina para poder resolver todos los procesos importantes. Sin embargo, usar una rejilla de muy alta resolución sobre grandes áreas no es posible debido a la limitación de los recursos computacionales.

Los modelos numéricos varían mucho en el tipo de rejilla que utilizan para realizar la discretización horizontal del dominio de cálculo. Los modelos basados en elementos finitos suelen utilizar rejillas no estructuradas, donde los elementos de cálculo o celdas resultan ser triángulos o cuadriláteros, como se muestra en la Figura 1ab. Estos suelen ser muy flexibles lo cual les permite adaptarse fácilmente a las irregularidades de la línea de costa, siendo muy fácil agregar mayor densidad de puntos en aquellas zonas de especial interés. En el caso particular de los modelo 3D se utilizan elementos en forma de tetraedros o que representan volúmenes. Este tipo de mallas suelen llamarse **no-estructuradas**. Otro grupo de rejillas son aquellas basadas en elementos ortogonales, las cuales son muy utilizadas por los modelos de diferencias finitas. Las mismas pueden ser curvilíneas o rectangulares (Figura 1cd).

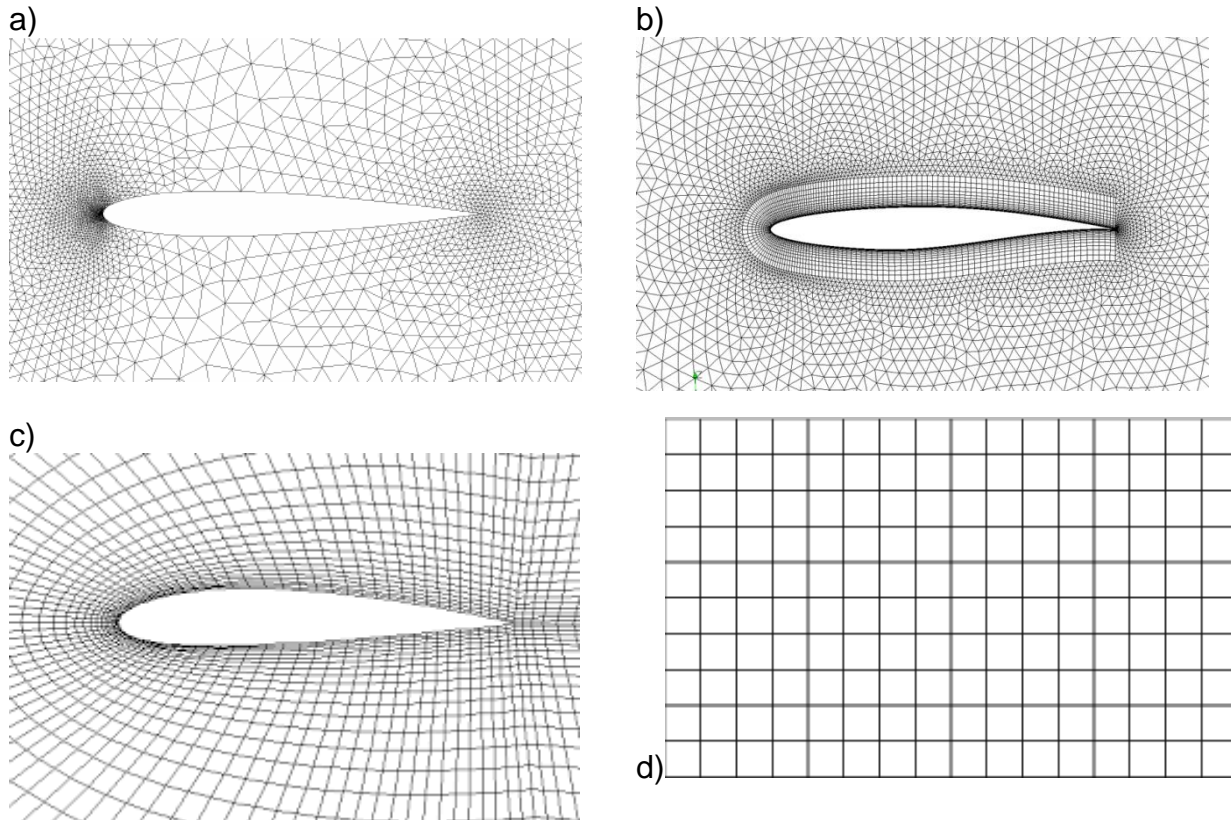


Figura 1. Rejillas o mallas comúnmente utilizadas en los modelos numéricos. a) Malla triangular. b) Malla triangular-cuadrilátera. c) Malla curvilínea. d) malla rectangular.

Una vez que se ha elegido la manera de discretizar las ecuaciones hidrodinámicas debemos precisar la manera en que en esos elementos serán calculados. Se trata, por tanto, de definir dónde se calculará cada una de las variables incógnitas que aparecen en ellas, ya sea en los nodos, en el centro o en las aristas de estos elementos.

Es de señalar que estos no son los únicos tipos de rejillas. Los modelos numéricos más recientes, en su afán de reproducir cada vez con mayor precisión los procesos físicos que describen, han recurrido a variaciones de las rejillas antes mencionadas e incluso a combinaciones de ellas cuando se realizan acoplamientos entre modelos, como pueden ser, los modelos atmosférico-oceánicos.

La decisión del tipo de rejilla a utilizar está regida por los procesos que se estén describiendo y el grado de precisión que se necesite en los mismos. Tal es el caso, por ejemplo, de los modelos numéricos globales para describir los procesos en la atmósfera y las corrientes oceánicas, cuyas rejillas poseen discretizaciones espaciales de varios kilómetros y donde los procesos de pequeña escala son minimizados. En las secciones 2.3 y 2.4 se describe los modelos numéricos que utilizaremos en este estudio y en el capítulo 3 aparecen con mayor detalle los datos de las mallas creadas para cada uno de ellos.

2.1.3. Coordenadas verticales

La discretización vertical de la ecuación es muy importante en el caso de los modelos hidrodinámicos. Entonces es indispensable, según las diferentes zonas oceánicas o fenómenos estudiados (por ejemplo, superficial, costero u océano profundo) usar diferentes tipos de coordenada vertical. La Figura 2 representa cuatro ejemplos diferentes de coordenada vertical.

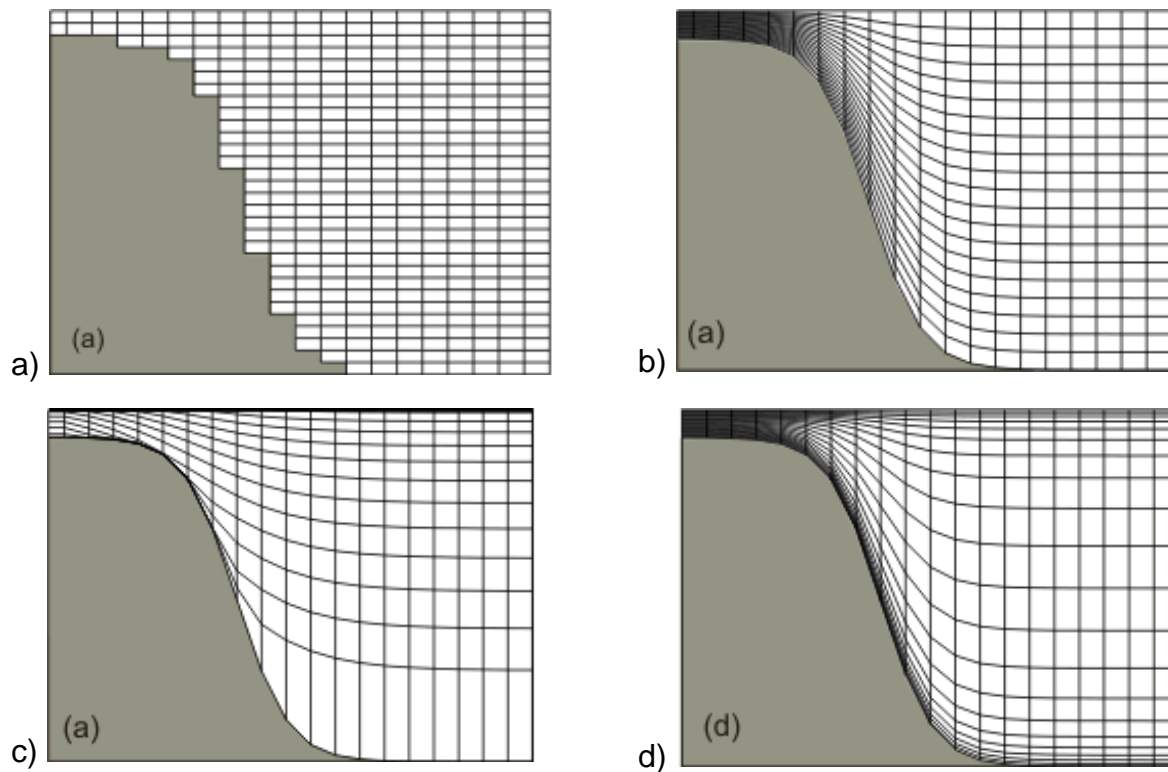


Figura 2. Ejemplos de resolución vertical en los modelos numéricos oceánicos. a) coordenadas z , b) coordenadas σ , c) coordenadas isopícnas, d) coordenadas σ -generalizadas.

Estas coordenadas verticales se pueden describir brevemente:

- a) La resolución vertical más simple se da si las superficies horizontales siguen líneas geopotenciales, que son aproximadamente horizontales.
- b) En los modelos σ -coordenada (los modelos que siguen las irregularidades del terreno) hay siempre un número igual de capas entre la superficie del océano y fondo. Así, la resolución vertical es buena en las plataformas poco profundas y en la zona costera.
- c) Las coordenadas isopícnas establecen capas de densidad constante y pueden verse cómo el sistema de coordenadas verticales más natural para la modelación del océano, pues es sabido que masas de aguas de diferentes densidades prácticamente no se mezclan si no existe un forzamiento externo. Sin embargo, al seguir las capas las mismas líneas de densidad, puede que no en todos los puntos ni en todo momento se tenga la misma cantidad de capas.
- d) las coordenadas sigma generalizadas permiten tener mayor resolución en superficie y fondo. Esto permite, por ejemplo, tener en cuenta los efectos del viento en la superficie y la fricción del fondo o favorecer un refinamiento de la superficie muy grande para modelar la introducción de flujos de calor en la superficie.

Ha habido mucho debate sobre las ventajas y desventajas de usar un modelo z -coordenada o uno σ -coordenada para los estudios de circulación del océano y la zona costera. La preocupación primaria sobre modelos de z -coordenada es que la representación de la topografía irregular a través de una serie de pasos puede introducir grandes errores de truncamiento en las regiones de topografías empinadas y en fondos con una pendiente débil ([Gnanadesikan y Pacanowski, 1997](#)). Para los modelos σ -coordenada, la preocupación es que los errores de truncamiento asociados con el cálculo de la componente horizontal de los gradientes de presión baroclínica en un modelo con coordenadas inclinadas con respecto a la horizontal pueden ser

significativos (Deleersnijder y Beckers, 1992; Deleersnijder y Ruddick, 1992; Deleersnijder, 1993).

Para evaluar las habilidades predictivas de los modelos más usados en la zona costera, Haidvogel y Beckmann (1998) propusieron un ejercicio de prueba en un cañón costero idealizado y compararon los resultados de varios modelos. Mientras los modelos σ -coordenada en este ejercicio fueron acertados en cuanto a la representación estructural del proceso, la mayoría de los modelos z-coordenada presentaron gran dificultad para reproducir los patrones de circulación. Estas diferencias enfatizaron la pregunta de si los modelos z-coordenada representan con precisión o no el flujo cerca de una topografía abrupta con la resolución vertical típicamente usada en los modelos oceánicos. De manera similar, el consenso entre los patrones de circulación residual obtenidos en el ejercicio baroclínico con las dos clases diferentes de modelos, indicó que los errores del gradiente de presión asociados a los modelos σ -coordenada no deben ser una causa de gran preocupación. Desgraciadamente, la falta de soluciones analíticas para estos ejercicios de prueba no permite dar ninguna declaración definitiva con respecto a las deficiencias específicas de cualquiera de las clases de modelos, (Stanev, 2005).

2.1.4. Esquemas numéricos

Las ecuaciones diferenciales parciales de los modelos matemáticos pueden derivarse numéricamente usando diferentes aproximaciones o métodos básicos. Los más generalizados y conocidos son Diferencias Finitas, Elementos Finitos y Volumen Finito. Sirva la Tabla 1 como breve comparación entre los mismos.

Tabla 1. Comparación entre los métodos de diferencias finitas, elementos finitos y volumen finito.

Método	Ventajas	Desventajas
Diferencias Finitas	<ul style="list-style-type: none"> • Conservan la masa • Intuitivo, simple, conocido y comprobado. Fácil de 	<ul style="list-style-type: none"> • Red rectangular necesaria para la discretización. • En dependencia del paso de

	<p>programar.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fácil de paralelizar. • Más programas disponibles en el mercado. 	<p>mallado algunos accidentes batimétricos pueden quedar representados por una sola celda, pero esto puede ser compensado por métodos de anidamiento</p>
Elementos Finitos	<ul style="list-style-type: none"> • Discretización más versátil/eficiente en zonas de interés. • Mayor concentración de puntos en accidentes batimétricos pequeños. 	<ul style="list-style-type: none"> • No intuitivo, teoría más compleja. • Matemáticamente requiere muchos más cálculos. • Conserva masa sólo globalmente. Pueden ocurrir errores locales en el balance de las aguas.
Volumen Finito	<ul style="list-style-type: none"> • Discretización más versátil/eficiente en zonas de interés. • Mayor concentración de puntos en accidentes batimétricos pequeños. • Conservan la masa 	<ul style="list-style-type: none"> • No intuitivo, teoría más compleja. • Los elementos más pequeños condicionan el paso de tiempo a utilizar.

2.2. Marea de tormenta

La marejada ciclónica es un aumento anormal del nivel de la mar generado por una tormenta, por encima de la marea astronómica pronosticada. La marejada ciclónica no debe confundirse con la marea de tormenta, que es definida como el aumento del nivel del agua debido a la combinación de la marejada ciclónica y la marea astronómica. Este aumento del nivel agua puede causar inundaciones extremas, particularmente cuando la marea de tormenta coincide con la marea alta astronómica, resultando en marejadas ciclónicas de 6 metros o más en algunos casos.

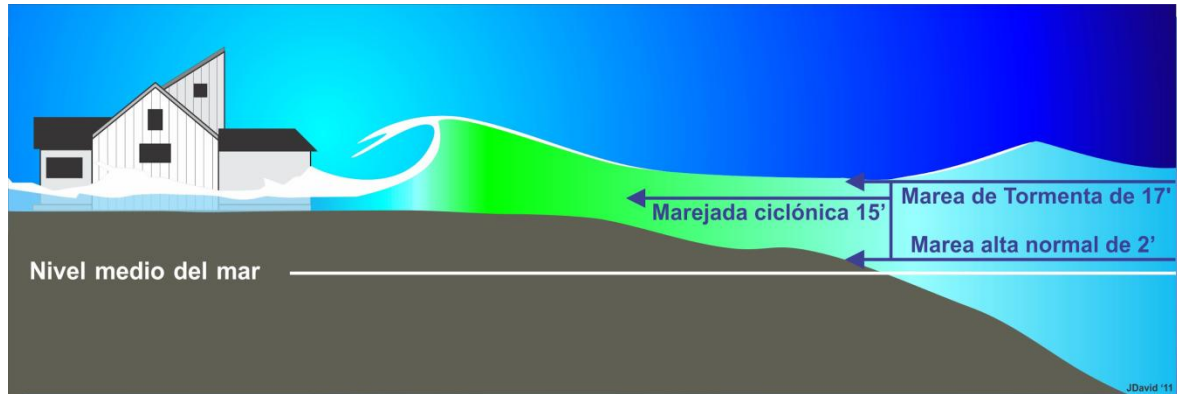


Figura 3. Relación entre marejada ciclónica y marea de tormenta

2.2.1. Factores que intervienen en la marea de tormenta

La marea de tormenta es producida por el agua que es empujada hacia la orilla por la fuerza de los vientos que se mueven ciclónicamente alrededor de la tormenta. El efecto de la baja presión asociada a las tormentas intensas es mínimo en comparación con el agua que es forzada hacia la orilla por el viento.

La marea de tormenta potencial máxima para un lugar en particular depende de una serie de factores diferentes. La marea de tormenta es un fenómeno muy complejo porque es sensible a los más pequeños cambios en la intensidad de la tormenta, la velocidad de desplazamiento, el tamaño o radio de vientos máximos, el ángulo de aproximación a la costa, la presión central (aunque la contribución sea mínima comparada con el viento), y la forma y características de los accidentes costeros como bahías y estuarios.

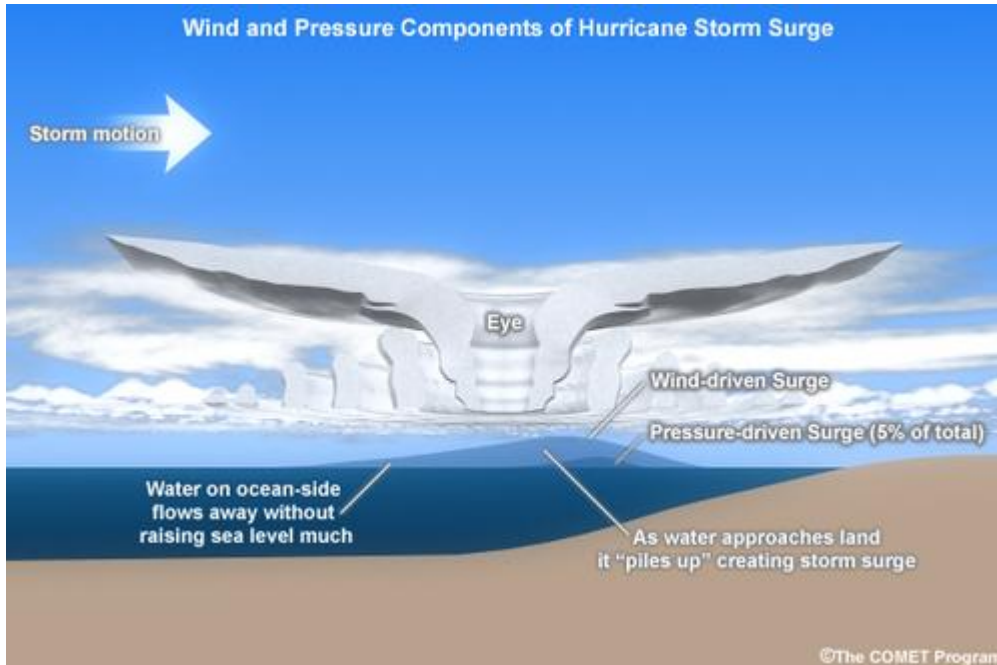


Figura 4. Las componentes del viento y la presión central del huracán sobre la marea de tormenta.

Otros factores que pueden afectar la marea de tormenta son la anchura y la pendiente de la plataforma continental. Una pendiente suave puede producir una marea de tormenta mayor que una pendiente abrupta. Por ejemplo, un huracán de categoría 4 que impacta las costas de Luisiana, al norte del GoM, que tiene una plataforma continental muy ancha y poco profunda, puede producir una marea de tormenta de casi 7 metros, mientras que el mismo huracán en un lugar como Miami Beach, Florida, donde la plataforma continental es estrecha, puede causar una surgencia de hasta 3 metros.

Además del poder destructivo de la surgencia, las olas pueden aumentar el daño a los edificios directamente a lo largo de la costa. El agua de mar pesa aproximadamente 1017 kg/m^3 , los golpes extendidos por olas frecuentes pueden demoler cualquier estructura que no esté diseñada específicamente para resistir tales fuerzas. Los dos elementos trabajan juntos para aumentar el impacto en la tierra porque la surgencia hace posible que las olas penetren más hacia el interior.

Adicionalmente, las corrientes creadas por la marea de tormenta, en combinación con el oleaje, pueden erosionar severamente las playas y las carreteras costeras. Los edificios que sobreviven a los vientos huracanados pueden resultar dañados si sus cimientos se ven socavados y debilitados por la erosión.

2.2.2. Modelos para el estudio de la marea de tormenta

Existen varios modelos numéricos que pueden ser utilizados para estudiar los eventos de marea de tormenta. Básicamente, cualquier modelo numérico del océano que cuente con formulaciones para incorporar adecuadamente el esfuerzo del viento y además, que incluya algoritmos de secado/mojado de celda (*wet&dry* en inglés) puede ser utilizado para estudiar este fenómeno. Sin embargo, hay algunos que se han diseñado y creado especialmente para cumplir este propósito. Entre los modelos más conocidos y utilizados internacionalmente se encuentran el SLOSH, Delft3D, ADCIRC y FVCOM.

El *Sea Lake Overland Surges from Hurricanes* (SLOSH) ([Jelesnianski et al., 1992](#)), es un modelo hidrodinámico bidimensional con promedio en la vertical desarrollado por Techniques Development Laboratory of the National Weather Service-NOAA para fines operacionales, predicción de marea de tormenta en cuencas, cuerpos de agua dentro del continente y a lo largo de la costa. El modelo está diseñado para cubrir tanto cuerpos de agua como terreno inundable. Es decir, reproduce tanto marea de tormenta como inundación en zonas costeras. Las ecuaciones de movimiento se resuelven numéricamente por medio de diferencias finitas, se desprecian términos advectivos pero se incorporan efectos finitos de la amplitud. El modelo reproduce numéricamente sólo ondas gravitatorias de largo periodo (marea de tormenta) por lo que otros fenómenos como el oleaje (periodos cortos) y la sobre-elevación asociada son ignorados. El modelo toma en cuenta el rebase de barreras, tales como rellenos, diques, dunas, islas de barrera, etc. Además, se permite el flujo a través de toda la celda o de un porcentaje de la misma, permitiendo el cambio de amplitud de los canales o riachuelos a lo largo del mallado. El mallado SLOSH puede ser polar, elíptico o hiperbólico, lo cual permite dar una mayor resolución en el área de interés y menor en el océano abierto.

El SLOSH es el único modelo utilizado por el *National Hurricane Center* (NHC) de la *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA) de EEUU para predecir marea de tormenta (Massey et al., 2007), y la precisión oscila entre +/- el 20% cuando el huracán es descrito adecuadamente (Jelesnianski et al., 1992). Este modelo fue diseñado para ejecutar simulaciones a gran velocidad dado que, su uso principal es para fines operacionales donde se necesitan respuestas casi inmediatas. El propósito de este modelo no es únicamente dar resultados de gran exactitud sino además, dar respuestas en corto tiempo.

El código fuente de este modelo no ha sido liberado al público y es una de las causas que explican su uso restringido a las costas de Estados Unidos. Recientemente un estudiante de doctorado mexicano a través de una estancia de investigación en el NHC y en *Florida International University* (FIU) pudo utilizarlo para estimar el riesgo a la inundación por ciclones tropicales en los Estados de Yucatán y de Campeche, siendo la primera vez que se implementa el modelo SLOSH en México (Rey 2017, Rey et al., 2019)

Delft3D (<https://oss.deltares.nl/web/delft3d/home>) es una suite de modelado 3D líder en el mundo para investigar la hidrodinámica, el transporte y la morfología de sedimentos y la calidad del agua en entornos fluviales, estuarinos y costeros. A partir del 1 de enero de 2011, los módulos Delft3D flujo (FLOW), morfología (MOR) y oleaje (WAVE) están disponibles en código abierto. El software es desarrollado por Deltares, un instituto de investigación líder, independiente y con sede en los Países Bajos para asuntos relacionados con el agua, el suelo y el subsuelo.

Delft3D solo utiliza mallas estructuradas y curvilíneas, sin embargo, Deltares ya ha desarrollado el sucesor de este modelo y lo han llamado Delft3D Flexible Mesh Suite (Delft3D FM) (<https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/>). Al igual que Delft3D, la suite FM de Delft3D puede simular mareas de tormenta, huracanes, tsunamis, flujos detallados y niveles de agua, olas, transporte y morfología de

sedimentos, calidad del agua y ecología, y es capaz de manejar las interacciones entre estos procesos. La suite está diseñada para ser utilizada tanto por expertos en la materia como por no expertos, que pueden ser desde consultores e ingenieros o contratistas, hasta reguladores y funcionarios gubernamentales, todos ellos activos en una o más de las etapas del ciclo de diseño, implementación y gestión. Pero a diferencia del Delft3D estructurado, la versión FM todavía no ha sido liberada al público.

El ADCIRC y el FVCOM son los que utilizamos en este trabajo y los describiremos con más detalle en la siguiente sección.

2.3. Modelos numéricos de mallas no estructuradas

Como parte de este trabajo de Tesis estudiamos e implementamos dos de los modelos de mallas no estructuradas más utilizados para el estudio de la marea de tormenta (ADCIRC y FVCOM). Ambos modelos permiten usar mallas de muy alta resolución, del orden de decenas de metros, en las zonas de interés, y de baja resolución mientras más alejados estemos de estas zonas. Veamos en detalles algunas de sus principales características.

2.3.1. Modelo ADCIRC

Los desarrolladores del modelo suelen llamarlo: A (parallel) ADvancedCIRCulationModelforOceanic, Coastal and Estuarine Waters, o simplemente ADCIRC. ([Luettich y Westerink, 1991](#)).

De manera general, ADCIRC es un sistema de programas para resolver los problemas de circulación y transporte de superficie libre dependientes del tiempo en 2D y 3D. Estos programas utilizan el método de elementos finitos para la discretización espacial permitiendo el uso de rejillas no estructuradas altamente flexibles. Las aplicaciones típicas de ADCIRC incluyen:

- Modelación de la circulación producida por el viento y la marea.
- Análisis de la inundación y marea de tormenta.
- Estudios de factibilidad de dragado y disposición de material.

- Estudios de transporte larval.
- Operaciones marinas cerca de la costa.

El modelo ADCIRC es un programa de computadoras altamente desarrollado para resolver las ecuaciones de movimiento para un fluido que se mueve en una tierra en rotación. Estas ecuaciones han sido formuladas usando las aproximaciones tradicionales de presión hidrostática y de Boussinesq y han sido discretizadas en espacio usando el método de elementos finitos, y en el tiempo, usando el método de diferencias finitas.

El modelo ADCIRC puede correr tanto en dos dimensiones, integrada la vertical (2DDI), o como un modelo tridimensional (3D). En ambos casos, la elevación es obtenida a partir de la solución de la ecuación de continuidad integrada en la vertical en la forma de Generalized Wave-ContinuityEquation (GWCE). La velocidad es obtenida de la solución de las ecuaciones de momento tanto de 2DDI o 3D. Todos los términos no lineales han sido retenidos en estas ecuaciones. ADCIRC puede correr usando sistemas de coordenadas esféricas o cartesianas.

Las condiciones de frontera del ADCIRC incluyen:

- Especificación de la elevación (constituyentes de marea armónicos o series de tiempo).
- Especificación de flujo normal (constituyentes de marea armónicos o series de tiempo).
- Flujo normal cero.
- Condiciones de deslizamiento o no deslizamiento para la velocidad.
- Desbordamiento de barreras externas fuera del dominio.
- Desbordamiento de barreras internas entre secciones del dominio.
- Esfuerzo superficial (Esfuerzo de radiación de oleaje y/o viento).
- Presión atmosférica.
- Radiación de olas hacia el exterior (condición de Sommerfield).

ADCIRC puede ser forzado con:

- Condiciones de frontera de elevación.
- Condiciones de frontera de flujo normal.
- Condiciones de frontera de esfuerzo superficial.
- Potencial de marea.

ADCIRC ha sido optimizado en sus ciclos para mejorar el rendimiento en múltiples arquitecturas de computadora. ADCIRC incluye llamadas a las librerías MPI para permitir operar con alta eficiencia (típicamente mejor en un 90%) en arquitecturas de computadoras en paralelo.

Para más información, así como acceso a la documentación online del modelo puede consultarse la página: <http://adcirc.org/>.

2.3.2. Modelo FVCOM

El *unstructured-gridFiniteVolumeCoastalOceanModel* (FVCOM) es un modelo de circulación del océano costero de pronóstico, con mallas no estructuradas, volumen finito, superficie libre y ecuaciones primitivas en 3D, desarrollado originalmente por [Chen et al. \(2003\)](#), en un esfuerzo conjunto entre la Universidad de Massachusetts Dartmouth (UMASSD) y el Instituto Oceanográfico de Woods Hole (WHOI). El modelo consta de ecuaciones de momento, continuidad, temperatura, salinidad y densidad y es cerrado física y matemáticamente, usando submodelos de cierre de turbulencia. La malla horizontal está compuesta de celdas triangulares no estructuradas y el fondo irregular es representado usando coordenadas sigma generalizada. El General OceanTurbulentModel (GOTM) desarrollado por el grupo de investigación de Burchard en Alemania ([Burchard y Bolding, 2001](#)) ha sido añadido al FVCOM para proveer esquemas de cierre turbulento vertical opcionales. FVCOM es solucionado numéricamente a través del cálculo de flujo discreto preciso de segundo orden en la forma integral de las ecuaciones de gobierno sobre una malla triangular no estructurada. Este enfoque combina las mejores características de los métodos de elementos finitos (flexibilidad de la malla) y los métodos de diferencias finitas (eficiencia

numérica y simplicidad del código) y provee una mejor representación numérica tanto del momento global como local, masa, salinidad, calor y conservación de trazadores. La habilidad del FVCOM de resolver adecuadamente las ecuaciones de conservación escalares sumado a la flexibilidad topológica provista por las mallas no estructuradas y la simplicidad de la estructura del código han hecho a FVCOM idealmente adecuado para muchas aplicaciones costeras y científicas interdisciplinarias.

FVCOM fue desarrollado originalmente para los procesos de inundación/secado en estuarios y la circulación producida por viento y marea en la región costera, caracterizada por una geometría irregular compleja y una batimetría escarpada. Este modelo ha sido actualizado a sistemas de coordenadas esféricas para aplicaciones globales y de cuencas. La versión no-hidrostática del FVCOM ha sido programada y sigue probándose.

La versión actual de FVCOM incluye un número de opciones y componentes como se muestra en la Figura 5. Estos incluyen:

- Opciones de sistemas de coordenadas esféricas o cartesianas.
- Un tratamiento en punto de wet/dry conservativo en masa para la simulación de los procesos de inundación/secado.
- Los módulos del *General Ocean Turbulent Model* (GOTM) (Burchard et al., 1998; Burchard, 2001) para esquemas de mezcla turbulenta vertical opcionales.
- Un módulo de calidad de agua para simular oxígeno disuelto y otros indicadores ambientales.
- Asimilación de datos con 4D nudging y Filtros Kalman.
- Modelos de hielo completamente no lineales.
- Módulo de transporte de sedimentos en 3D para aplicaciones en estuarios y cerca de la costa.
- Un modelo biológico flexible (FBM) para estudios dinámicos de cadena alimenticia. FBM incluye siete grupos: nutrientes, autotrofia, detritus, materia orgánica disuelta, bacteria y otro. Con varias funciones pre-construidas y parámetros para estos grupos, FBM permite a los usuarios cualquiera de las dos

opciones, ya sea, seleccionar un modelo biológico pre-construido (como es NPZ, NPZD, etc.) o construir su propio modelo biológico usando un grupo de predefinido de variables biológicas y funciones de parametrización.

FVCOM fue programado originalmente para utilizar coordenadas sigma en la vertical y ahora ha sido actualizado a un sistema de coordenadas que siguen el terreno generalizado con opciones de varias coordenadas que siguen el terreno. FVCOM está escrito en Fortran 90 con paralelización MPI, y corre eficientemente en computadoras con uno o múltiples procesadores.

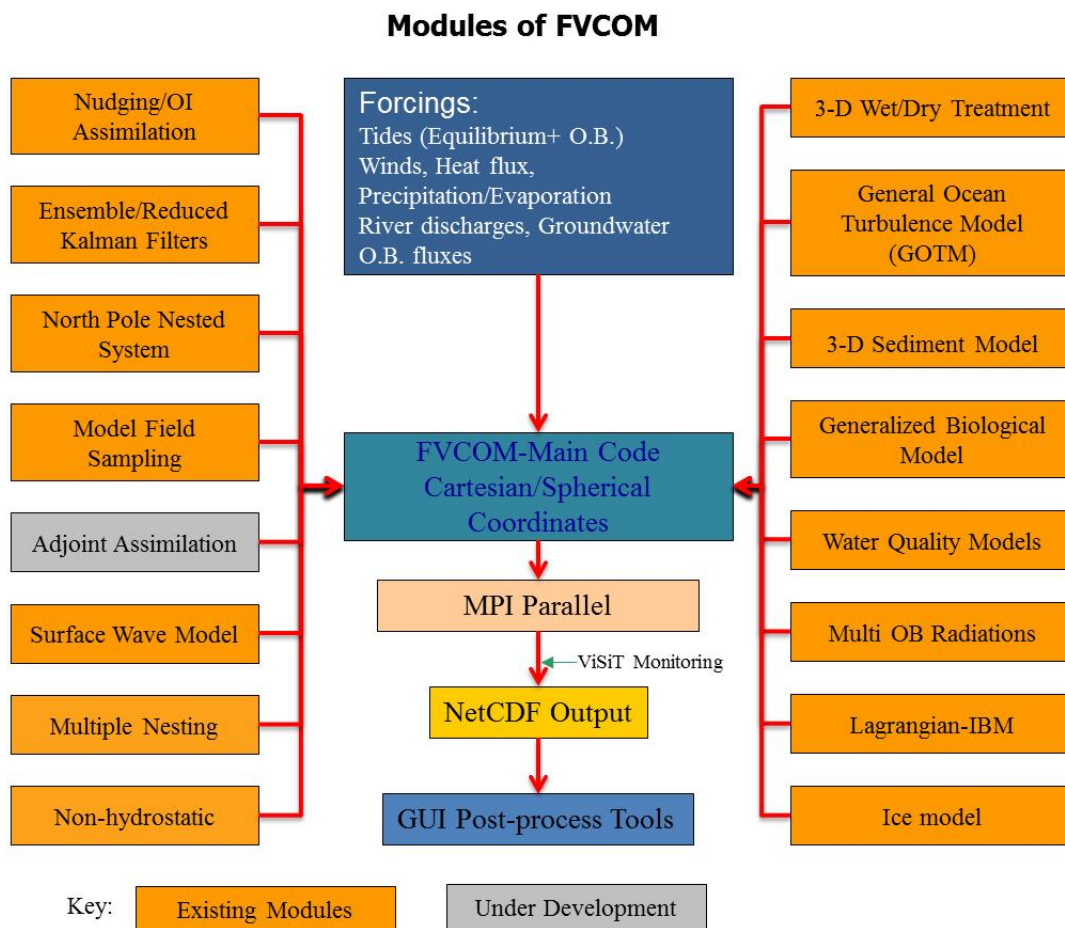


Figura 5. Esquema general de los módulos del modelo FVCOM. (Tomada de <http://fvcom.smast.umassd.edu/fvcom/>)

FVCOM es un modelo comunitario del océano de código abierto que siempre le da la bienvenida a nuevos usuarios. Este programa está solo permitido para usarse en

investigaciones académicas no comerciales y en educación. Los usuarios requieren registrarse con el objetivo de recibir los códigos fuentes, los ejemplos demostrativos y los manuales de usuario así como algunas herramientas de post-procesamiento recomendadas.

Una descripción detallada del FVCOM está en el manual de usuario y en artículos publicados. Para más información, visitar: <http://fvcom.smast.umassd.edu/FVCOM/>.

2.3.2. Breve comparación entre los modelos ADCIRC y FVCOM

La siguiente tabla resume algunas de las principales diferencias entre estos modelos, como son los esquemas numéricos, los forzamientos y las condiciones iniciales.

Tabla 2. Comparación entre los modelos ADCIRC y FVCOM.

Característica	Modelo FVCOM (el modelo corre en 3D)	Modelo ADCIRC (corre en 2D Integrado en la Vertical)
Esquema numérico para la integración espacial de las ecuaciones	Volumen Finito	Elementos Finitos
Forzamientos meteorológicos	- Malla regular (ej. salida del WRF) - Datos interpolados a la malla no regular del modelo.	- Diferentes formatos (más de 10 diferentes, incluido ficheros best-track del NHC)
Condiciones de frontera en la superficie libre (del modelo WRF)	- Presión atmosférica superficial - Componentes del viento superficial (10 m) - Temperatura del aire a 2m - Humedad Relativa - Flujo de radiación solar (Short wave heat flux) - Flujo de radiación infrarroja (Long wave heat flux)	- Presión atmosférica superficial - Componentes del viento superficial (10 m)
Condiciones en la frontera abierta (de TPX07.2)	- 8 componentes de marea (M2, K2, S2, N2, O1, K1, P1 y Q1)	- 8 componentes de marea (M2, K2, S2, N2, O1, K1, P1 y Q1)
Condiciones en la frontera abierta	- Campo de Temperatura (en 3D) - Campo de Salinidad (en 3D)	----- Nada -----

(de HYCOM)	- Componentes de la velocidad UZ y VZ (en 3D)	
Condiciones iniciales (de HYCOM)	- Campo de Temperatura (en 3D) - Campo de Salinidad (en 3D)	----- Nada -----

Es evidente, que el modelo FVCOM, por su formulación, desarrollo y módulos, es capaz de utilizar más información para lograr simulaciones más diversas, de acuerdo a las necesidades, que el modelo ADCIRC.

2.4. Modelo atmosférico de alta resolución WRF

Dado que estamos trabajando con modelos de mallas no estructuradas de alta resolución para estudiar los procesos de inundación en la zona cercana a la costa, es importante contar también con información de forzamiento meteorológico de la más alta resolución posible de acuerdo con el problema de estudio. Los vientos en superficie se ven menos afectados sobre el mar que sobre tierra, donde aparecen procesos de turbulencia generados por la rugosidad del terreno, la cobertura y uso de suelo. En el caso de estudios de inundación costera, es importante que el modelo meteorológico pueda diferenciar los límites entre el mar y la tierra, así como la cobertura vegetal sobre tierra y cómo cambian los vientos durante el ciclo diurno.

Es por ello que para este estudio hemos escogido el modelo atmosférico *Weather, Research and Forecasting* (WRF) para realizar simulaciones de media y alta resolución y generar los forzamientos meteorológicos necesarios en función del caso de estudio.

2.4.1. Descripción general

El modelo WRF, es un sistema de predicción numérica del tiempo diseñado para la investigación y para aplicaciones operativas. Es administrado por las comunidades universitaria, científica y operacional, con el fin de dirigir su desarrollo en beneficio de estas comunidades. Diversas instituciones apoyan el proyecto con el objetivo de construir un modelo de pronóstico numérico de mesoescala de última generación, para

lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y la predicción del tiempo (Skamarock et al., 2008). Las principales instituciones encargadas de su desarrollo son: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Earth System Research Laboratory (ESRL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), Center for Analysis and Prediction Storms (CAPS) y Federal Aviation Administration (FAA).

El código del modelo es abierto y ha sido optimizado de manera que puede ser adaptado, tanto en supercomputadoras que trabajan en paralelo, como en computadoras portátiles de reciente generación. Debido a la diversidad de la comunidad que lo desarrolló y que lo utiliza, el modelo tiene una gran diversidad de aplicaciones. Por ejemplo, simulaciones ideales, simulaciones reales (predicción numérica en tiempo real), modelación de la calidad del aire y estudios de interacción océano-atmósfera mediante el acoplamiento con modelos oceánicos.

En México ha sido ampliamente utilizado el modelo WRF para diferentes estudios desde hace más de una década. Ejemplo de ello son los estudios realizados para reproducir eventos extremos históricos (referencias), climatologías (referencias), estudios de cambios en la precipitación por cambios en la cobertura vegetal (referencias), etc.

En este trabajo se utiliza la versión 3.9.1, la cual fue liberada el 17 de agosto del 2017.

2.5. Generación de mallas no estructuradas

La creación de las mallas no estructuradas es una tarea compleja. Se comenta entre la comunidad de usuarios de estos modelos, que aproximadamente el 75% de los esfuerzos y el tiempo que se dedican a los estudios en los que intervienen estos modelos están adjudicados al proceso de creación de una malla estable.

A continuación presentamos un pequeño resumen de las herramientas y programas utilizados para la generación de mallas, así como alguna de sus características.

- **Navy Unstructured Mesh Configuration and Analysis Toolkit (NUMCAT)**

Esta herramienta es desarrollada por el NavyResearchLaboratory (NRL), StennisSpace Center, MS, en los Estados Unidos. No es pública, pero tuvimos acceso a ella a través de un acuerdo de no divulgación firmado entre ellos y el CCA.

El sistema NUMCAT es una set de herramientas preparadas para el modelo hidrodinámico ADCIRC. La herramienta provee capacidades para la creación y edición de los ficheros de entrada y salida del ADCIRC, y para el análisis y visualización de dichos ficheros. Los ficheros de entrada del modelo incluyen: mallas de elementos finitos, forzamientos meteorológicos, parámetros del modelo, y ficheros de elevación y flujos en la frontera. La herramienta también incluye programas para el procesamiento y visualización de la mayoría de los ficheros de salida del ADCIRC.

NUMCAT incluye programas en Fortran y Perl, awk, y scripts en C y Bourne. También incluye un set de herramientas en MATLAB para la generación y edición de las mallas de elementos finitos de ADCIRC, y para el procesamiento, visualización y análisis de los ficheros de entrada y salida de ADCIRC.

- **GMSH**

GMSH (<http://gmsh.info/>) es un software para generar mallados bidimensionales y tridimensionales automáticamente. GMSH fue concebido como un software académico para resolver problemas académicos, sin embargo a lo largo de los años se ha mejorado lo suficiente para ser utilizado fuera de entornos universitarios. GMSH es software libre, está escrito en C++ y es multiplataforma (Unix/Linux, Mac OSX, Windows).

GMSH presenta cuatro módulos: geométrico, mallador, solver y postprocesado. El módulo geométrico (de diseño), permite dibujar visualmente una figura aunque con capacidades limitadas, a pesar de poder definir las paramétricamente. El módulo de mallado se apoya en las definiciones geométricas (incluidas las longitudes características) para crear mallados en una, dos y tres dimensiones, con elementos de formas varias (líneas, triángulos, tetraedros, prismas, hexaedros y pirámides) y eligiendo el tipo de algoritmo de mallado. El módulo *solver* (de resolución) implica la llamada a ciertos sistemas externos con los que interactúa el usuario. El módulo de postprocesado (ligado a la visualización) incluye gran número de operaciones diferenciales, vectoriales, herramientas para trabajar con números complejos y funcionalidades para extraer datos de las distribuciones de datos de entrada.

- **QGIS Meshing plugin**

Quantum GIS (QGIS, <http://www.qgis.org>) es un Sistema de Información Geográfica (GIS) de código abierto y entorno amigable bajo licencia pública GNU. QGIS es un proyecto oficial de la Fundación Geospacial de Código Abierto (OSGeo). Corre en Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos de bases de datos, vectores, rasters y funcionalidades. QGIS permite la utilización de plugins, la mayoría escritos en Python, para añadirle funcionalidades y crear nuevas funcionalidades.

QGIS-Meshing (<https://gismeshing.org/>) es un plugin desarrollado por Adam Candy, investigador del *Applied Modelling and Computation Group* (AMCG) (<http://amcg.ese.ic.ac.uk>) del *Department of Earth Science and Engineering, South Kensington Campus, Imperial College London*, en el Reino Unido. El propósito del plugin es facilitar la creación de mallas no estructuradas formadas por elementos triangulares y que pueden ser usadas por modelos como el ADCIRC.

Después de contactar personalmente al desarrollador, este explicó que el plugin solo lo han probado para la versión de QGIS que viene en el Ubuntu 12.04 (Precise). Además,

los repositorios de diferentes versiones de Linux, no solo de Ubuntu, poseen versiones diferentes de QGIS, unas con más o menos funcionalidades, pero casi todas con diferente capacidad de asimilación de plugins desarrollados por terceros.

El plugin crea una interfase entre la capacidad de manejar capas vectoriales y rasters de QGIS con el programa GMSH, descrito anteriormente.

- **Surface-water Modeling System (SMS)**

SMS es un producto de Aquaveo (<http://www.aquaveo.com/>). Es un software comercial, que ofrece una solución completa para manejo eficiente de los procesos de modelación de aguas superficiales incluyendo aplicaciones costeras y de ríos.

Aquaveo fue pionero en el enfoque de modelo conceptual. Construir un modelo conceptual de SMS mediante la construcción de una representación de alto nivel del modelo SIG usando objetos familiares: puntos, arcos y polígonos. Trabajar con modelos grandes y complejos de una manera sencilla y eficiente mediante el uso de la modelización conceptual y actualizar fácilmente o cambiar el modelo según sea necesario. SMS también cuenta con poderosas herramientas para construir mallas.

SMS tiene interfaces para diferentes modelos entre ellos ADCIRC. Los algoritmos de generación de mallas, normalmente crean funciones ponderadas a partir de los datos de batimetría, que permiten un aumento en la densidad de elementos creados en las zonas bajas o de pendiente abrupta y elementos de mayor tamaño en las zonas alejadas de la costa.

- **Open TELEMAC-MASCARET**

Open TELEMAC-MASCARET (<http://www.opentelemac.org/>) es una suite integrada de solucionadores para su uso en el campo de los flujos de superficie libre. Después de haber sido utilizado en el contexto de muchos estudios en todo el mundo, se ha convertido en uno de los principales estándares en el campo.

Los diversos módulos de simulación utilizan algoritmos de alta capacidad basados en el método de elementos finitos. El espacio se discretiza en forma de una rejilla no estructurada de elementos triangulares, lo que significa que puede ser refinado en particular en zonas de especial interés. Esto evita la necesidad del uso sistemático de modelos anidados, como es el caso con el método de diferencias finitas.

Las herramientas de pre- y post-procesamiento son particularmente poderosas y fáciles de usar. La rejilla puede ser generada con el generador integrado en el sistema TELEMAC-MASCARET (módulo MATISSE ahora en desuso) o por otros (Blue Kenue). TELEMAC-MASCARET tiene numerosas aplicaciones tanto en la hidrodinámica marítima como de ríos.

El sistema fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Hidráulica, un departamento de la División de Investigación y Desarrollo de Electricidad de Francia. Ahora está disponible como código abierto, y es desarrollado por el Consorcio Open Telemac-Mascaret.

Los diversos módulos del sistema TELEMAC-MASCARET se ejecutan en:

- Windows (NT, XP, Vista, Win7)
- Linux (Ubuntu, Fedora, RedHat, OpenSUSE, Debian)
- UNIX
- Supercomputadoras (Cray, Fujitsu, IBM, ...)

- **Blue Kenue**

Blue Kenue¹ es un programa desarrollado por el National Research Council de Canadá. Es una herramienta avanzada para los modeladores hidráulicos para la preparación, análisis y visualización de datos. Proporciona una interfaz *state-of-the-art*, integración de datos geospaciales con los datos de entrada del modelo y los resultados. Blue Kenue provee importación directa de los resultados de los modelos HydroSim, TELEMAC y ADCIRC.

Blue Kenue provee de un generador de mallas rectangulares y triangulares. Los datos de entrada a los generadores de la malla pueden incluir puntos, líneas u otras rejillas triangulares y regulares. El generador de malla triangular permite al usuario especificar "puntos duros" y "*break-lines*" que se conservan durante la creación de los nodos/elementos. La densidad de nodos se calcula interpolando a partir de los mapas de densidad suministrados por el usuario los cuales pueden ser rejillas rectangulares, mallas triangulares o datos poligonales.

- **Triangle**

Triangle (<https://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>) es un generador de mallas de calidad en dos dimensiones y triangulador Delaunay desarrollado por Jonathan Richard Shewchuckm de la Universidad de California en Berkeley.

El programa está escrito en C y genera triangulaciones Delaunay exactas, y mallas triangulares de alta calidad, evitando la generación de ángulos muy pequeños o muy grandes y por lo tanto son adecuadas para el análisis de elementos finitos.

- **MESH2D – Delaunay-based unstructured mesh generation**

¹<https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/blue-kenuetm-software-tool-hydraulic-modellers>

MESH2D (<https://github.com/dengwirda/mesh2d>) es un generador de mallas Delaunay para geometrías en dos dimensiones, desarrollado por Darren Engwirda (Engwirda, 2014) como un toolbox de MATLAB. Está diseñado para generar triangulaciones con restricciones Delaunay de alta calidad para regiones poligonales generales en el plano. Permite funciones de espaciado definidas por el usuario, permitiendo niveles variables de resolución de mallas en dominios complejos.

Estos ocho programas son los más usados por los diferentes grupos de investigación en el mundo para la generación de mallas no estructuradas. Sin embargo, el manejo de los mismos, el formato de los datos de entrada, la documentación disponible y la existencia o no de tutoriales, provocaron que no pudiéramos utilizar y evaluar con mayor profundidad todos los programas. En la siguiente tabla resumo los logros y obstáculos que tuvimos para el uso de cada uno.

Tabla 3. Resumen de ventajas y desventajas encontradas con cada uno de los programas de generación de mallas no estructuradas estudiado.

Programa	Ventajas	Desventajas
1. NUMCAT	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de documentación. - Buenas herramientas para la preparación de los ficheros de entrada, especialmente el fort.15 - Buenas herramientas en MATLAB para la visualización de los resultados. - El proceso de refinamiento de los elementos, es por niveles, permitiendo más control en el tamaño final de los elementos cercanos a la costa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Las mallas que genera suelen tener elementos en las fronteras con ángulos muy agudos, los cuáles hay que editar y corregir manualmente. - Para dominios grandes, la cantidad de puntos de batimetría puede ser muy elevada, por lo que la herramienta demanda muchos recursos del sistema, por el uso propio de MATLAB, llegando al punto de cerrarse por falta de memoria RAM.
2. GMSH	<ul style="list-style-type: none"> - Se instala sobre Linux sin dificultades. - Se pudieron generar pequeños ejemplos en dominios sencillos. 	<ul style="list-style-type: none"> - El formato de los datos de entrada y su estructura, es muy diferente a los de los otros programas, lo cual hace muy complicado la preparación de datos para ser usados en simulaciones complejas. - En foros encontramos que las mallas generadas no resultaban ser tan estables al usarlas para ADCIRC.

3. QGIS Meshing plugin	<ul style="list-style-type: none"> - Ayuda mucho tener un conocimiento previo en el uso del software y de los GIS en general. - El plugin instala 4 herramientas cuyo uso es relativamente sencillo, aunque no da muchas opciones de edición o post-procesamiento de la malla obtenida. - Se pudieron generar pequeños ejemplos en dominios sencillos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los desarrolladores solo lo han probado para una plataforma, sistema operativo y versión de QGIS. - En background el programa que se utiliza para generar las mallas es el GMSH. - No continúa en desarrollo
4. SMS	<ul style="list-style-type: none"> - Según las referencias consultadas, es la herramienta más usadas por los usuarios de ADCIRC y FVCOM. - Nos generó las mejores mallas, algunas de ellas fueron estables. - Facilita la creación del fichero de control (fort.15) y la extracción de las componentes de marea en los nodos de la frontera abierta. - La generación de la malla es en tres dimensiones, pues tiene en cuenta los datos de la batimetría, permitiendo resolver adecuadamente las plataformas continentales y otros cambios significativos en el relieve. 	<ul style="list-style-type: none"> - No es libre, sino que es un software comercial. - Solo funciona en Windows. - Necesita muchos recursos, principalmente memoria RAM. Para dominios grandes, 16 GB de RAM pueden no ser suficientes.
5. Open Telemac	<ul style="list-style-type: none"> - En la página web del producto, se puede descargar un instalador automático para Windows. Para Linux hay que compilar todas las herramientas usando el código fuente. 	<ul style="list-style-type: none"> - El instalador automático para Windows no soporta Windows 8. Fue probado en Windows XP y Windows 7 y tampoco se instaló bien. - No pudimos usar la herramienta.
6. Blue Kenue	<ul style="list-style-type: none"> - Se obtiene gratis desde el sitio web del producto, en sus versiones de 32 y 64 bits. - Se instala sin problemas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se obtiene gratis desde el sitio web del producto, en sus versiones de 32 y 64 bits. - Se instala sin problemas. - No existen tutoriales de uso del mismo, y la documentación es la que incluye el programa y a primera vista es muy extensa y poco práctica.
7. Triangle	<ul style="list-style-type: none"> - Sencillo en cuanto a su utilización y el formato de los datos de entrada. - La ejecución del programa es rápida. 	<ul style="list-style-type: none"> - La generación de la malla es en dos dimensiones, no tiene en cuenta los datos de la batimetría. - Su sencillez implica mucho más trabajo para poder crear mallas de niveles de resolución variables en dominios complejos.
8. MESH2D	<ul style="list-style-type: none"> - Es un algoritmo muy rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> - La generación de la malla es en dos

	<ul style="list-style-type: none"> - Incluye visualización en MATLAB de la malla generada. - Las mallas tienen buena calidad, las cuales necesitan relativamente pocos trabajos de edición manual. - Es el mejor programa de todos los que hemos probado. 	<p>dimensiones, no tiene en cuenta los datos de la batimetría.</p> <ul style="list-style-type: none"> - En la calidad de la malla influyen mucho los datos de entrada, en este caso, los datos de la línea de costa. Se deben preparar anteriormente, con el espaciado deseado.
--	--	--

En resumen:

- **GMSH** y **QGIS Meshing plugin**, compartían los mismos algoritmos de generación de mallas, y según criterio de algunos, no resultaban adecuadas para ADCIRC. Además, tenían cierto nivel de complejidad en el tema de la preparación de los datos de entrada.
- **Open Telemac** y **Blue Kenue**, aunque parece haber una buena comunidad de personas que lo usan, no pudimos utilizarlos, por problemas técnicos de instalación y por falta de ejemplos, tutoriales y documentación.
- **NUMCAT** resultó ser útil, pero agresivo en cuanto al consumo de recursos computacionales a la hora de trabajar con dominios muy grandes. Si bien las mallas no resultaron tan estables, posee herramientas y scripts que facilitan la preparación de los ficheros de entrada y la visualización de las salidas del modelo.
- **SMS**, aunque funciona solo en Windows, y también necesita mucha memoria RAM para sus cálculos, resultó tener un buen algoritmo para generar mallas que tuvieran una sola frontera abierta.
- **Triangle** y **MESH2D**, generan mallas en dos dimensiones, teniendo como datos de entrada la línea de costa. La batimetría se interpola luego a la malla generada. Ambos programas corren muy rápido, por lo que la creación y prueba de diferentes mallas se hace en corto tiempo. Sin embargo, el que **MESH2D** esté programado en MATLAB ofrece una ventaja significativa en el proceso de preparación de los datos de entrada, la interpolación de la batimetría y la generación del formato final de la malla, para ser usada en el modelo ADCIRC.

Es significativo destacar que el trabajo de investigación relacionado con esta Tesis y demás proyectos relacionados en los que hemos colaborado durante estos años, se ha visto favorecido significativamente por el uso del toolbox **MESH2D**. Esta es nuestra herramienta actual para la generación de las mallas no estructuradas. Los tiempos invertidos para la generación de una nueva malla se han reducido drásticamente y prácticamente no se necesitan correcciones después de ser generada.

2.6. Aumento del nivel del mar por el cambio climático

Nos interesa saber qué pasaría en los sitios de estudio a finales del siglo XXI con el aumento previsto del nivel medio del mar, según los reportes del IPCC. [Church et al. \(2013\)](#) sugieren que, si se toman las medidas adecuadas para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, el escenario más probable para el final del siglo es el RCP6.0 (RCP significa *Representative Concentration Pathway*), y en el caso de continuar con los niveles actuales de emisiones, el peor escenario sería el RCP8.5, también conocido como “business as usual” ([Fuss et al., 2014](#)).

El escenario RCP6.0 predice un aumento del nivel medio del mar global de 0.50 m, mientras que el escenario RCP8.5 estima un incremento medio de 0.75 m (véase la Fig. 13.11a, de [Church et al., 2013](#)). Basado en los escenarios de aumento del nivel medio del mar, en las simulaciones realizadas se incrementó el nivel medio del mar en la frontera abierta del dominio. En función de la cantidad de simulaciones planificadas en cada sitio de estudio se usa sólo un valor de incremento del nivel del mar de 0.5 m, o tres valores de 0.25 m, 0.50 m y 0.75 m.

Las estimaciones de la elevación del nivel del mar (SLR) a escala mundial se han realizado utilizando mareógrafos durante más de 100 años y, más recientemente, desde 1993, se complementan con información satelital. A nivel mundial, el nivel del mar ha aumentado alrededor de 3.2 ± 0.4 mm/año ([Church et al., 2013](#)). Para el Golfo de México, el Servicio Mareográfico Nacional ha reportado un incremento a lo largo de las costas que varía de 1.9 a 3.4 mm/año desde Tuxpan, Veracruz hasta Progreso,

Yucatán, mostrando que el nivel del mar regional también está aumentando ([Zavala-Hidalgo et al., 2011](#)).

Capítulo 3.

SITIOS DE ESTUDIO

El objetivo de la Tesis es estudiar las inundaciones por marea de tormenta en las ciudad de Veracruz y Boca del Río, pero dado a la dificultad para encontrar observaciones y registros históricos de eventos de marea de tormenta en la zona, nos vimos en la necesidad de comenzar a estudiar este fenómeno, con estos modelos en otra zona de estudio. El primer lugar que escogimos para esto fue la Laguna de Términos en el sur del Golfo de México. En este lugar contábamos con mediciones realizadas en el marco del proyecto JEST y una Tesis de doctorado realizada por otro estudiante del grupo IOA-CCA, en la que utilizó simulaciones numéricas y las comparó con estas observaciones. La descripción de este sitio de estudio aparece en la sección 3.1.

Después de obtener resultados satisfactorios en el primer sitio de estudio, decidimos enfocarnos a estudiar el área comprendida por las ciudades de Veracruz y Boca del Río. La descripción de este sitio aparece en la sección 3.2.

3.1. Laguna de Términos

La Laguna de Términos (LT) se encuentra localizada en el sur del Golfo de México (GoM) y forma parte del ecosistema lagunar más grande del país ([Kjerfve and Magill, 1989](#)) (ver. Figura 6). La LT tiene unos 75 km de largo y unos 35 km de ancho, ocupando un área aproximada de 2,000 km². Si se incluyen los pantanos y sistemas lagunares adyacentes, la superficie se extiende hasta aproximadamente 2,500 km², lo que, junto con los humedales circundantes, representa una superficie total de 7,050 km²

para formar el sitio RAMSAR (Tratado Internacional para la Conservación y el Uso Sostenible de los Humedales) más grande de México (Mitsch y Hernández, 2013). Al menos cuatro ríos importantes desembocan en su interior facilitando los procesos de renovación de las aguas. La profundidad promedio de la laguna es de 3.5 m, y está separada del GoM por dos islas: Isla del Carmen, que tiene 38 km de largo y 2.5 km de ancho, e Isla Aguada con 38 km de largo y 900 m de ancho. La laguna está conectada con el GoM a través de 3 canales (Figura 6). El primero es el canal de Ciudad del Carmen (CdC), localizado al oeste de la LT, con 3.7 km de ancho, una profundidad máxima de 19 m y una profundidad promedio de 4.5 m. El segundo es el canal de Puerto Real (PtR), localizado al norte de la LT, con 3.2 km de ancho, una profundidad máxima de 12 m, y una profundidad promedio de 3.5m. El tercer canal es el de Sabancuy, localizado 22.6 km al este del canal de PtR, y está conectado a la LT a través de un estrecho y bajo canal, con un flujo significativamente más pequeño que el observado en los otros dos canales (Contreras et al., 2014). Por lo tanto, este tercer canal no se considera en este estudio.

La mayor población en las inmediaciones de LT es la de Ciudad del Carmen, con unos 180.000 habitantes, situada en la parte occidental de la Isla del Carmen. La ciudad se destaca como un importante centro de operaciones de Petróleos Mexicanos (PEMEX), que mantiene su área de operaciones de hidrocarburos más importante en la Sonda de Campeche (García-Cuellar et al., 2004). Desde el punto de vista económico, es la ciudad más importante del estado de Campeche y el tercer municipio con mayor ingreso económico a nivel nacional (INEGI, 2016).

Como parte del proyecto JointEnvironmentalStudyofTerminosLagoon (JEST), iniciado en el 2009 con el financiamiento de México y Francia para realizar estudios multidisciplinarios de los procesos ambientales en la región, se realizaron muchas mediciones para apoyar los esfuerzos en modelación numérica enfocados a entender la hidrodinámica de la LT y su interacción con el GoM. En este trabajo se utilizaron observaciones obtenidas dentro del proyecto JEST, en particular las relacionadas con

campañas de medición de parámetros físicos, las mediciones del nivel del mar y la batimetría descrita por [Contreras et al. \(2014\)](#).

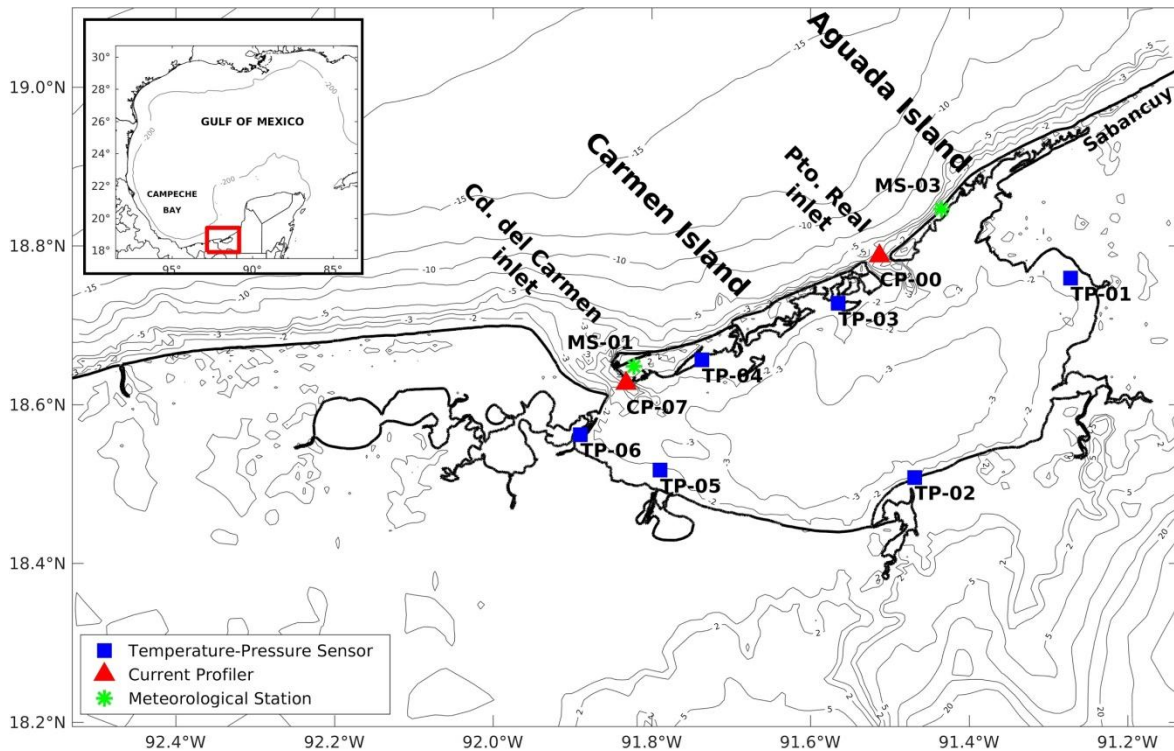


Figura 6. Laguna de Términos en el sur del Golfo de México. Se muestra la posición de diferentes instrumentos de medición y se indican los contornos de batimetría-topografía (en metros). (Figura adaptada de [Díaz-García et al., 2019](#))

En trabajos previos se ha descrito la hidrodinámica de la LT y su interacción con el GoM. [Contreras et al. \(2014\)](#) incluye una revisión extensa de esos estudios, que pueden dividirse en aquellos que están basados en observaciones y los que están basados en modelación numérica. La mayoría de los estudios de modelación numérica fueron realizados para caracterizar las mareas y los patrones de circulación general en el interior de la LT ([David and Kjerfve, 1998](#); [Robadue et al., 2004](#); [Contreras et al., 2014](#)). En [Contreras et al. \(2014\)](#), las simulaciones solo incluyen forzamiento por marea astronómica en la frontera abierta, sin considerar el forzamiento del viento en la superficie e ignorando por tanto su contribución a la elevación del mar y a los patrones de circulación en la laguna.

Un estudio más reciente ([Kuc et al., 2015](#)), presenta simulaciones numéricas de la hidrodinámica de la LT usando una malla no estructurada que cubre la tierra, el mar y la laguna. Ellos se enfocan principalmente en los patrones de circulación dentro de la laguna, para diferentes eventos meteorológicos y condiciones de marea, y describen regiones basadas en la intensidad de las corrientes, pero ellos no hacen ninguna revisión o señalamiento acerca de las inundaciones en las áreas alrededor de la LT.

Dado que ninguno de los estudios previos analizan la inundación por marea de tormenta, aún cuando la región está afectada por tormentas tropicales y nortes intensos, en este estudio se analiza el impacto del Norte #33 de febrero de 2010. Este Norte fue muy intenso, con vientos máximos de 110 km/h que, debido a su dirección y persistencia, causaron un aumento significativo del nivel del mar en la costa sur del GoM ([Chim et al., 2010](#)).

3.1.1. Mediciones

Durante el Norte #33 existían varios instrumentos instalados en la LT para medir variables físicas como parte del proyecto JEST. La ubicación de los correntómetros ADCPs (Acoustic Doppler Current Profilers) y de los sensores de temperatura-presión (TP) se muestran en la Figura 6. De los sensores de TP instalados, el TP-01 se perdió a finales de enero de 2010, por lo que la serie de datos en esa ubicación empiezan el 5 de julio, de 2010. Además, durante el Norte, una de las cuerdas de seguridad del sensor TP-06 se rompió, probablemente debido a la fuerza del oleaje, y los datos capturados durante y después del Norte son muy ruidosos. Por lo tanto, esas mediciones fueron desechadas. Los datos de los otros cuatro sensores de TP (TP-02, TP-03, TP-04 y TP-05) fueron usados en el análisis. Además, los datos de dos perfiladores de corrientes (CP-00 y CP-07) fueron usados. Todos estos sensores registraron datos cada 10 minutos.

Los datos meteorológicos, incluyendo la velocidad y dirección del viento, velocidad y dirección de las ráfagas de viento, presión, temperatura, humedad del aire, precipitación y radiación solar, fueron obtenidos de dos estaciones del Servicio Meteorológico

Nacional. La primera estación, MS-01, está situada en Isla del Carmen, y la segunda, MS-03, en Isla Aguada. Estas estaciones tienen una frecuencia de muestreo de 10 minutos. Usamos la velocidad del viento, la dirección y la presión para comparar con las salidas del modelo WRF en cada estación (el modelo WRF está descrito en la sección 2.4 y la comparación de las salidas del mismo con estas mediciones en la sección 4.1.1).

3.1.2. Información batimétrica y topográfica

Se utilizó la misma batimetría descrita en el trabajo de [Contreras et al. \(2014\)](#). Esta batimetría se obtuvo a partir de la digitalización de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico de la Secretaría de Marina de México, y campañas de medición con ecosonda durante el período de monitoreo.

Para los datos de elevación del terreno se utilizaron los datos LIDAR de 5 m de resolución espacial del [INEGI \(2012\)](#). El procesamiento de los datos fue muy complicado, debido a la manipulación de los ficheros, que eran muchos y ocupaban varios GB de espacio en disco. El fichero final con la información de los datos procesados para el área de estudio, tenía más de 1,000 millones de puntos y ocupaba acerca de 25 GB de espacio en disco. Entonces, decidimos realizar un submuestreo de los datos a 25 m de resolución. El fichero resultante terminó teniendo unos 36 millones de puntos ocupando 856 MB de espacio, lo cual es mucho más manejable desde el punto de vista de los recursos computacionales.

3.1.3. Malla no estructurada

Utilizando MESH2D creamos una malla no estructurada de alta resolución de 178,716 nodos y 357,218 elementos o triángulos (Figura 7). La resolución mínima es de unos 30 a 50 m sobre la línea de costa y hasta 10 km en la zona más alejada de la costa. Esta malla posee nodos en mar y tierra para estudiar las inundaciones producidas por eventos extremos y para hacer más fácil la identificación y cuantificación de las áreas inundadas. Una vez generada la malla, se interpolaron los datos de batimetría y

topografía en cada uno de los nodos de la malla, usando una función de distancias inversas ponderadas (gidW) programada en MATLAB (Langella, 2010).

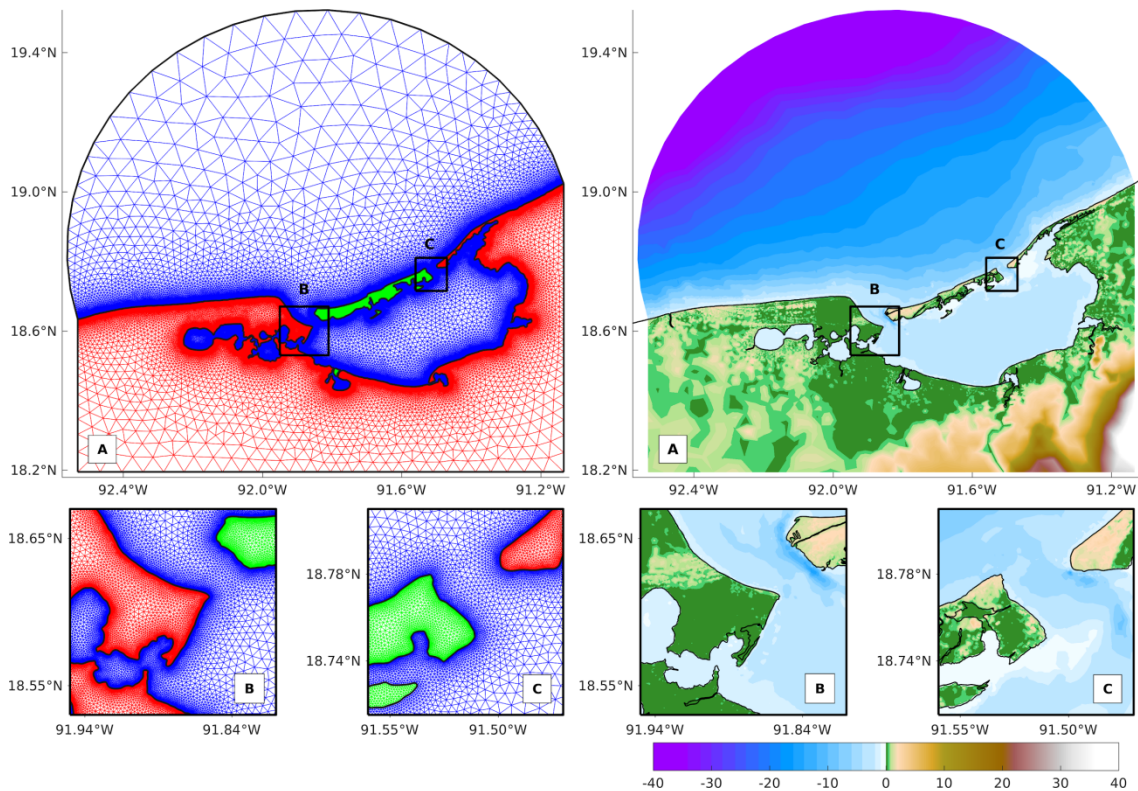


Figura 7. Malla no estructurada generada con MESH2D para el dominio de la Laguna de Términos. (Izquierda) Malla para el dominio completo (A) y dos acercamientos para mostrar los canales de entrada a la laguna (B y C), donde el color rojo representa los triángulos en tierra, el color azul los triángulos en la laguna y el océano y el color verde para los triángulos en islas. (Derecha) Batimetría y topografía de la malla (en metros) de acuerdo a la barra de color.

3.1.4. Configuración del modelo

El modelo FVCOM fue configurado para correr en modo barotrópico (2D) en lugar del modo baroclínico (3D) (Zheng et al., 2013; Weisberg and Zheng, 2008). Esto fue decidido después de algunas simulaciones para evaluar el desempeño del modelo para reproducir las mediciones de los sensores y comparando las áreas inundadas obtenidas entre ambos modos. Las pruebas mostraron diferencias no significativas, pero el tiempo de cálculo usando el modo barotrópico 2D fue 40-45 % menor comparado con el tiempo de cálculo del modo baroclínico 3D. Además, los procesos de inundación involucran el

transporte de pequeñas columnas de agua, para lo cual el modo barotrópico 2D es considerado apropiado.

Para las simulaciones de marea de tormenta, el modelo fue forzado en la superficie con la velocidad del viento y la presión superficial, además de la elevación de la marea astronómica en la frontera abierta. Las variables de las componentes zonal y meridional del viento a 10 m (U_{10} y V_{10}) y la presión superficial (PSFC) fueron extraídas de la simulación con el modelo WRF. Para la elevación de la marea se utilizaron las ocho principales componentes de la marea para la región (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, and Q1) obtenidas de la base de datos TPXO7.2 ([Egbert and Erofeeva, 2002](#)) e interpoladas a los nodos de la malla de la frontera abierta. Para evitar la generación de modos numéricos artificiales que pueden provocarse por una imposición de las condiciones iniciales y de frontera ([Chen et al., 2006](#)), El forzamiento de la marea fue incrementado desde cero hasta su valor total en un intervalo de dos ciclos de la mayor componente (M2). El paso de tiempo usado en el modo externo fue de 2 s, y la salida del modelo es horaria. Varias simulaciones de prueba fueron realizadas con diferentes coeficientes de rugosidad del fondo variables en espacio para reproducir lo mejor posible la señal de la marea dentro de la LT. Hicimos variaciones en los coeficientes de rugosidad del fondo considerando la profundidad y el tipo de sedimentos, en un rango entre 0.001 m y 0.014 m.

La descarga de los cuatro principales ríos de la región no fue considerada en este estudio debido a la relativa baja contribución de agua a la LT en las fechas de la simulación. Basado en los datos obtenidos durante el proyecto JEST (ejem. [Contreras, 2017](#)), se estimó que durante el primer trimestre del año, el flujo promedio de los cuatro ríos fue de $140 \text{ m}^3/\text{s}$, con $99 \text{ m}^3/\text{s}$ ocurriendo en Marzo. Este promedio representa el 0.7 % del volumen total de agua que se intercambia a través del canal de CdC durante la pleamar. Durante la época de lluvias este promedio se incrementa hasta $900 \text{ m}^3/\text{s}$ (4.56 %), con picos de $1040 \text{ m}^3/\text{s}$ en el año 2010.

Se realizaron dos simulaciones del evento del Norte: (a) la simulación base con el modelo forzado solo con mareas (llamado solo-marea); (b) una simulación histórica con el modelo forzado por marea, vientos y presión superficial (llamada marea-viento). Se realizaron además otras tres simulaciones para estudiar el efecto del aumento del nivel del mar (Sea Level Rise o SLR en inglés) en el área inundada: (c) el modelo forzado con marea, vientos y presión superficial además de un incremento de 0.25 m en el nivel medio del mar en la condición de frontera (llamado +SLR25); (d) igual que la simulación (c) pero con un incremento de 0.50 m (llamado +SLR50); y (e) igual que (c) pero con un incremento de 0.75 m (llamado +SLR75).

3.2. Ciudades de Veracruz y Boca del Río

Veracruz es la ciudad más grande e importante del estado de Veracruz, así como la ciudad central que da nombre al área urbana denominada como Zona Metropolitana de Veracruz. Tiene el puerto marítimo comercial más importante de México. Con una población de 552,156 habitantes en el 2010 (Figura 8).

Los casos históricos de inundación en esta área están documentados, pero se debieron principalmente a las lluvias, la escorrentía de los ríos y el aumento del nivel de las aguas subterráneas (Neri-Flores et al, 2012, 2014). Hay relativamente pocos registros históricos de tormentas inducidas por huracanes porque solo un pequeño número de huracanes ha pasado cerca de la ciudad en los últimos 165 años. Esto se puede comprobar la base de datos HURDAT2 del NHC, donde aparece la trayectoria e intensidad de las tormentas tropicales y huracanes en la cuenca del Atlántico, incluido el Golfo de México en el período 1851-2018 (Landsea et al., 2015).

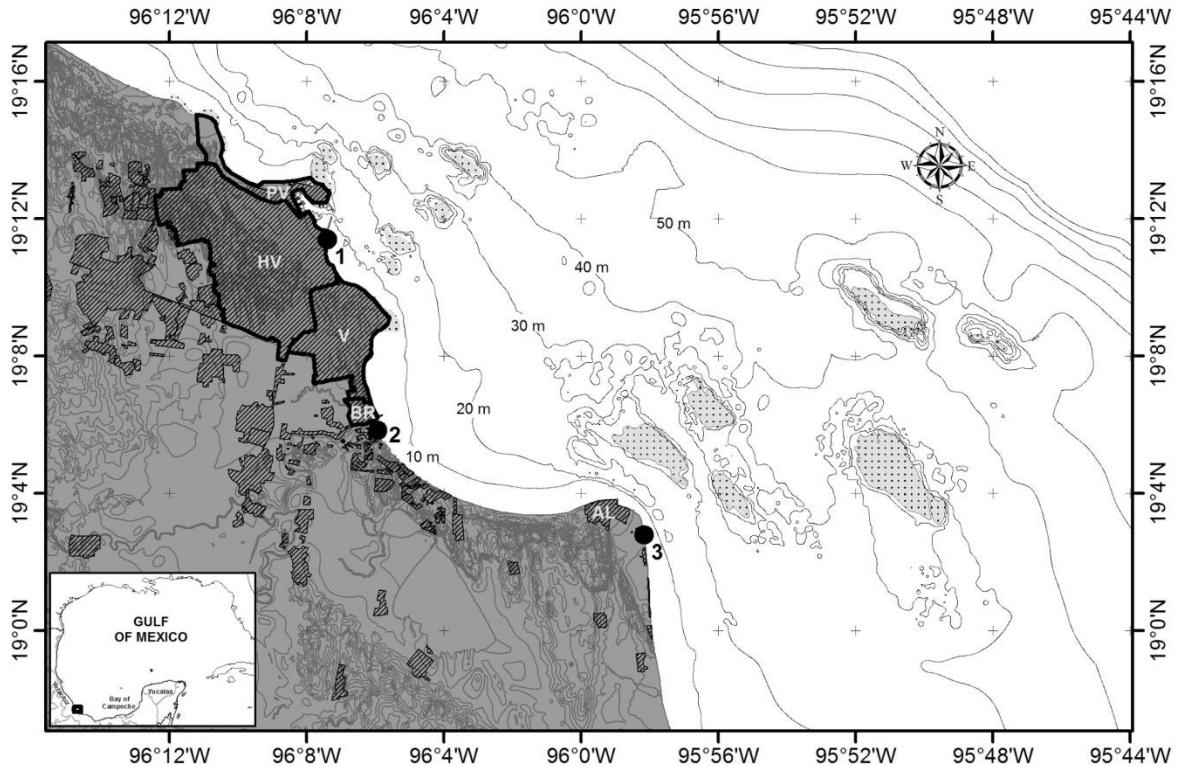


Figure 8. Mapa de la ciudad de Veracruz. Se delimitan las áreas de las cuatro regiones urbanas consideradas en este estudio: Puerto de Veracruz (PV), Heróica Veracruz (HV), nuevo Veracruz (V) y Boca del Río (BR). Además se indica el pueblo de Antón Lizardo (AL). Las líneas de contorno en el océano están cada 10 m, y en tierra cada 1 m. Se indican los tres puntos de arribo a tierra usados en este estudio.

La figura 9 muestra los huracanes que han pasado a una distancia menor de 100 km de la desembocadura del río Jamapa. De las 14 trayectorias representadas, las líneas grises representan tormentas tropicales. Las líneas negras delgadas representan la trayectoria de 4 huracanes categoría 3, y la línea negra gruesa la del único huracán categoría 5 que pasó cerca de esta región. La categoría máxima del huracán no necesariamente se alcanzó cerca de su arribo a tierra, sino en algún momento de su trayectoria. Uno de los huracanes categoría 3 es el huracán Karl (2010), que se convirtió en el huracán más intenso en pasar por el sur del Golfo de México en la Bahía de Campeche. Este huracán impactó justo al norte de la ciudad de Veracruz y la sobre elevación del mar por marea de tormenta que provocó en las inmediaciones de la ciudad de Veracruz fueron casi despreciables. Si hubiera tocado tierra más al sur, los daños hubieran sido superiores.

Al no contar en este sitio con suficientes registros históricos de mareas de tormenta producida por huracanes, se decidió hacer un estudio de escenarios de inundación debido a huracanes sintéticos en los que se varía su intensidad, trayectoria, velocidad de movimiento y punto de arribo a tierra. Este grupo de simulaciones se repitieron teniendo en cuenta un probable aumento del nivel medio del mar para finales del presente siglo.

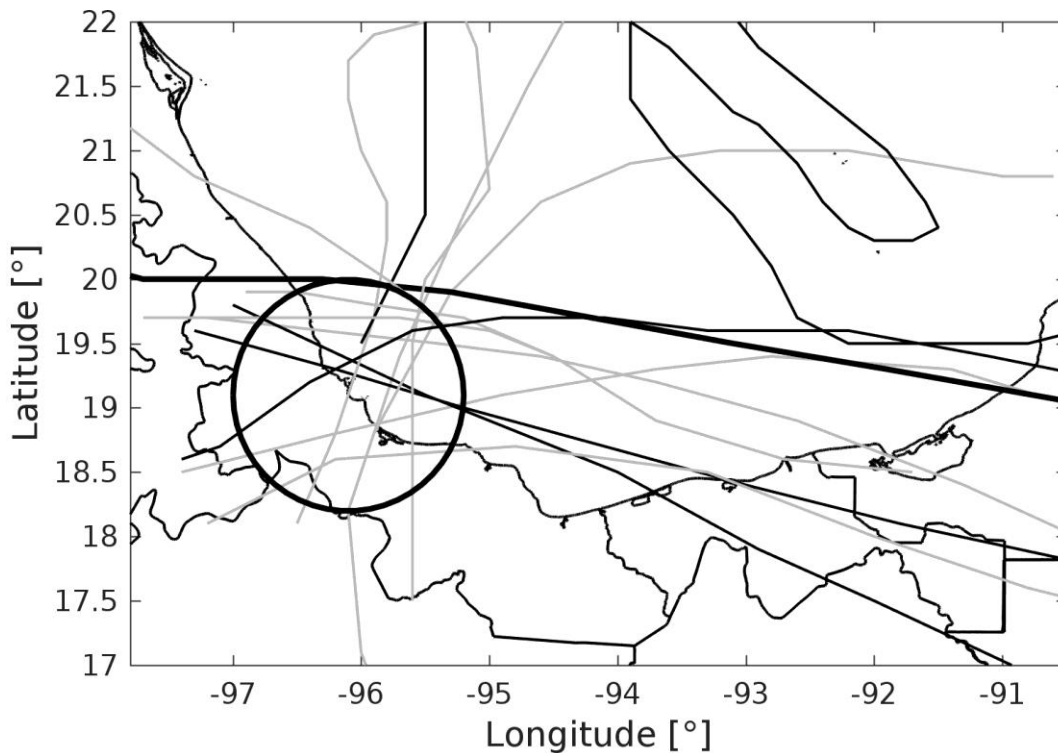


Figura 9. Huracanes y tormentas tropicales que han pasado a menos de 100 km de la desembocadura del río Jamapa.

3.2.1. Huracanes sintéticos

Existen algunas técnicas para generar trayectorias de ciclones tropicales sintéticos, como la técnica de reducción de escala dinámica-estadística descrita por Emanuel (2006) y Emanuel et al, (2006). Sin embargo, en áreas con pocas trayectorias históricas de huracanes, los reanálisis o los modelos climáticos pueden no ser adecuados para esta técnica porque solo generan un pequeño número de combinaciones de huracanes que atraviesan esta región. Por lo tanto, en este estudio se propone el uso de

huracanes sintéticos con diferentes intensidades, trayectorias, velocidades de desplazamiento y puntos de arribo.

El formato seleccionado para introducir la información de estos huracanes en el modelo numérico fue el fichero tipo *best-track* generado por el *Automated Tropical Cyclone Forecasting System* (ATCF), el cuál es un fichero ASCII delimitado por comas, usado por el NHC (Miller et al, 1990). Estos datos incluyen los datos puntuales de la tormenta cada seis horas. La información incluye la fecha, hora, posición, vientos máximos, presión mínima, radio de vientos máximos, entre otros.

Se estudiaron sólo los huracanes mayores, es decir, los de categoría 3, 4 y 5 en la escala Saffir-Simpson. Para cada uno de ellos se determinaron sus parámetros característicos (velocidad máxima de los vientos, presión central mínima y radio de vientos máximos) a partir de la base de datos HURDAT2 del NHC, desde el año 1851-2015. Además, se realizó una estadística acerca de la velocidad de desplazamiento de los huracanes en el Sur del GoM, a partir de la cual se establecieron tres velocidades para este estudio.

De la base de datos HURDAT2, se determinó que 238 huracanes atravesaron la zona sur del GoM (Figura 11), pero sólo 45 de ellos fueron huracanes mayores (19 Cat. 3, 15 Cat. 4, y 11 Cat. 5). La velocidad de desplazamiento de esos casos tiene una media de 14.55 km/h y una desviación estándar de 7.10 km/h. Basados en esta información los valores de la velocidad de desplazamiento de los huracanes fueron: 7.45, 14.55 y 21.65 km/h, para velocidades lenta, media y alta (Figura 10).

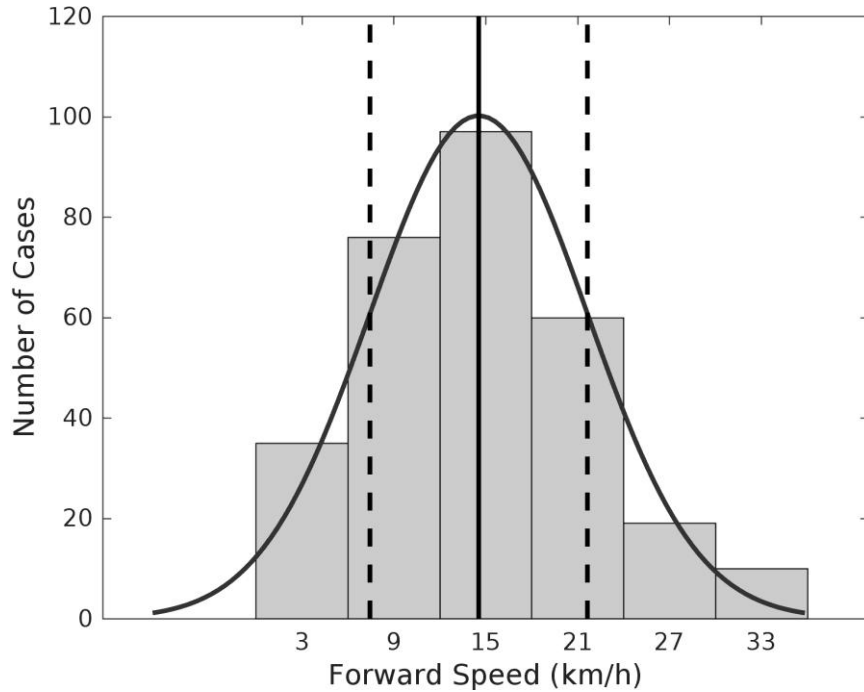


Figura 10. Histograma con los datos de velocidad de desplazamiento de los huracanes en la selección que cubre el sur del Golfo de México. La línea vertical sólida representa la media, y las líneas discontinuas la desviación estándar.

Con el objetivo de crear los ficheros de forzamiento meteorológico, los siguientes parámetros son necesarios: la velocidad máxima de los vientos (VMAX) en nudos, la presión mínima al nivel del mar (MSLP) en milibares, y el radio de de los vientos máximos (MRD) en millas náuticas. Los primeros dos parámetros están incluidos en la información de todos los huracanes en la base de datos HURDAT2, pero los valores de MRD solo aparecen en la base de datos a partir del 2004, y por tanto, en esta base de datos, los huracanes posteriores al 2004 que pasan por el sur del GoM son muy pocos. Buscando tener un mayor número de datos, seleccionamos un área mayor que incluye todo el GoM (Figura 11). De los 623 huracanes obtenidos que pasan por el interior del área establecida, solo 144 fueron huracanes mayores (68 Cat. 3, 52 Cat. 4, and 24 Cat. 5). Se obtuvo la media de los valores de VMAX y MSLP para cada categoría de huracán mayor y entonces, los casos equivalentes entre los años 2004-2015 de la base de datos HURDAT2 fueron seleccionados para extraer el valor de MRD para cada categoría.

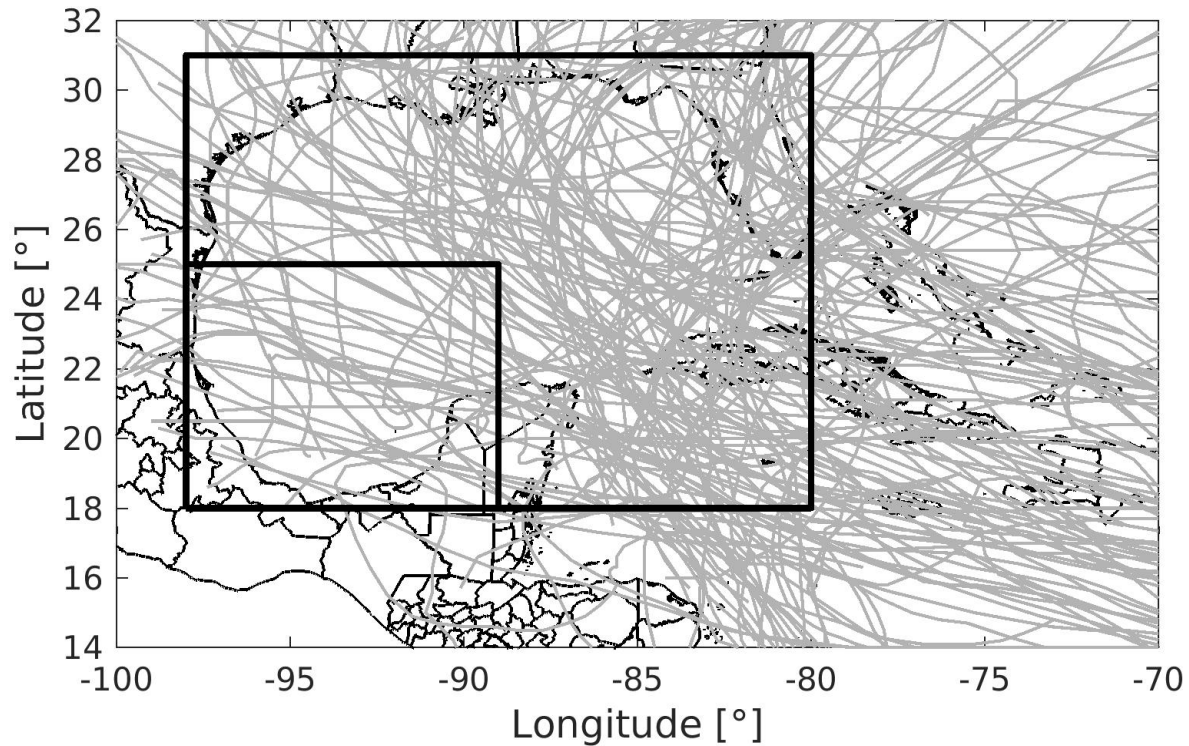


Figura 11. Áreas en las que se hizo la selección de los huracanes mayores para determinar los valores de VMAX y MSLP (recuadro chico del sur del GoM) y MRD (recuadro grande del GoM).

3.2.2. Información batimétrica y topográfica

Los datos de batimetría fueron tomados de la base de datos GEBCO 30", de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico de la Secretaría de Marina de México y de mediciones de sondeos realizados en el área. Los datos de topografía fueron tomados de LIDAR del INEGI con una resolución espacial de 5 m.

3.2.3. Malla no estructurada

Utilizando MESH2D se creó una malla del Sur del Golfo de México con alta resolución en la zona de la Ciudad de Veracruz y el Sistema Arrecifal Veracruzano. La malla tiene 34656 nodos y 68401 elementos (Figura 12). Esta malla también posee nodos en mar y tierra. La resolución mínima es de 35 a 50 m sobre la línea de costa. Una vez generada la malla, se interpolaron los datos de batimetría y topografía en cada uno de los nodos

de la malla, usando una función de distancias inversas ponderadas (GIDW) programada en MATLAB (Langella, 2010).

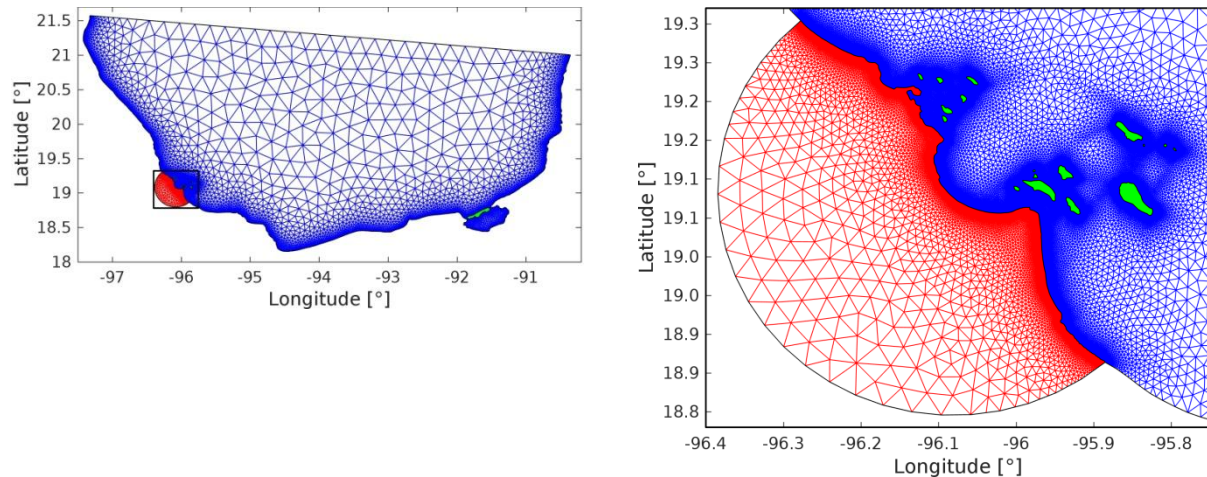


Figura 12. Malla no estructurada generada con MESH2D para el dominio de Veracruz. (Izquierda) Malla para el dominio completo, (derecha) acercamiento a la zona con el dominio en tierra. El color rojo representa los triángulos en tierra, el color azul los triángulos en el océano y el color verde para los triángulos en islas.

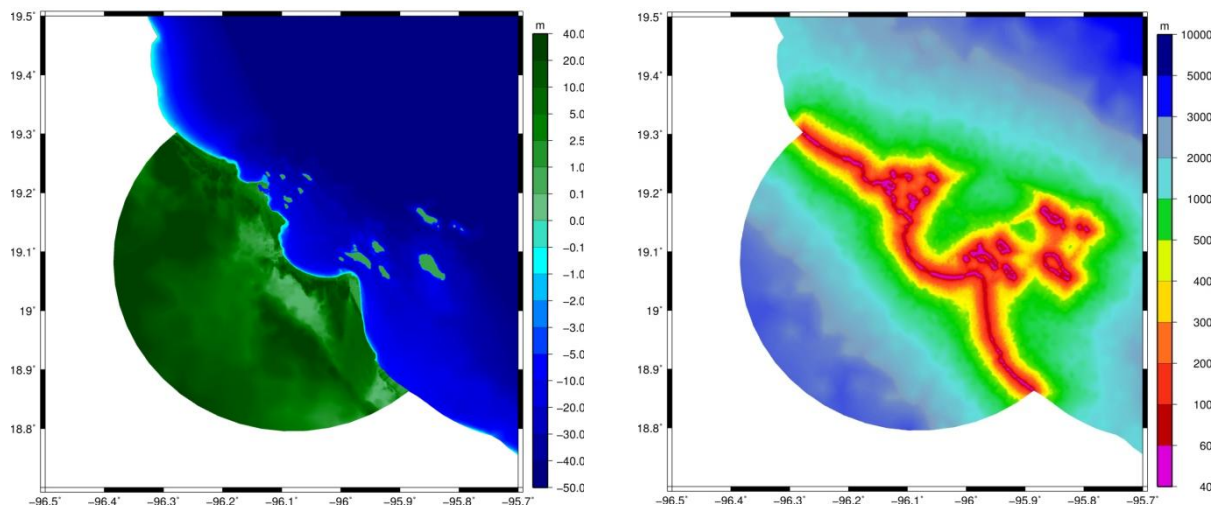


Figura 13. Acercamiento a la zona con el dominio en tierra. (Izquierda) batimetría y topografía interpoladas en los nodos de la malla. (Derecha) espaciado de la malla, se observa la alta resolución cercana a la costa.

3.2.3. Configuración del modelo

Para el caso de estudio de los escenarios de inundación por huracanes en Veracruz, se configuró un grupo de simulaciones variando la intensidad del huracán, la velocidad de movimiento del mismo, el punto de llegada a tierra, y el ángulo de arribo. Al ser tan grande el número de simulaciones decidimos utilizar el modelo ADCIRC por dos motivos fundamentales, la capacidad de usar forzamiento meteorológico basado en ficheros de trayectorias de huracanes y la relativa mayor sencillez del mismo, que se traduce en menor tiempo de cómputo.

Para la ejecución del modelo existe un fichero de control (fort.15) que posee todos los parámetros necesarios. En él se establece el sistema de coordenadas de la malla (esféricas o cartesianas), el paso de tiempo del modelo, la duración de la simulación, el formato de los datos meteorológicos, las componentes de marea que se utilizan y sus valores de amplitud y fase en cada nodo de la frontera abierta, el formato de los ficheros de salida (ASCII o NetCDF) y la frecuencia con la que se guardan las variables de salida.

Sobre los puntos de llegada a tierra, se tomaron tres puntos a lo largo de la costa. El más al norte está directamente en la costa del municipio de Veracruz, donde está la mayor población de la ciudad. El punto central está en la desembocadura del río Jamapa, al sur de Boca del Río. El tercer punto y el más al sur, se encuentra en la punta donde está el asentamiento de Antón Lizardo. No se tomó ningún punto más al norte, pues, por los ángulos de arribo, no se esperan inundaciones por marea de tormenta en el sector que queda al lado izquierdo de la trayectoria del huracán, donde los vientos, al momento del arribo del huracán, fluyen desde tierra hacia el mar.

Para este estudio se variaron los ángulos de arribo de los huracanes. Desde -30° hasta 120° cada 30° , donde 0° corresponde a la dirección Este-Oeste. Las trayectorias son totalmente rectas, lo cual es poco probable que ocurra en la realidad, pero nos interesa evaluar los efectos al variar el ángulo de arribo. Lo que sucede varios días antes del arribo tiene, cómo la trayectoria que pudiera haber tenido el huracán, no es objetivo de

este estudio. Cada trayectoria comienza con la posición del huracán 5 días antes de tocar tierra y continúa 2 días después del arribo del huracán. La Figura 14 muestra estas trayectorias así como los tres puntos de arribo.

En todas las simulaciones se utilizó un paso de tiempo de 1 segundo. La duración de cada una de las simulaciones fue de 7 días, 5 días antes del arribo del huracán y 2 días después del arribo para ver la evolución de la inundación. Las salidas se guardaron con una frecuencia horaria.

Para el modelo ADCIRC, el formato de los vientos seleccionado para este estudio es el NWS=8, que corresponde al formato best-track que genera el NHC para informar de la trayectoria oficial de los huracanes. Este formato se adecuó para cada simulación, de tal manera que reflejara los datos de la trayectoria, velocidad de desplazamiento e intensidad del huracán. Se hizo una modificación adicional al código del ADCIRC para que pudiera leer las posiciones del huracán en grados decimales con dos lugares después de la coma (originalmente los datos vienen con solo un lugar), lo que permitió tener una mejor precisión acerca de la posición del huracán y por lo tanto de su trayectoria. Con el parámetro NWS=8 en el fichero de control fort.15, la velocidad del viento y la presión atmosférica son calculados en cada nodo de la malla en tiempo real internamente por ADCIRC usando el modelo dinámico de Holland (Holland, 1980) para la creación de un vórtice simétrico en la posición reportada del huracán.

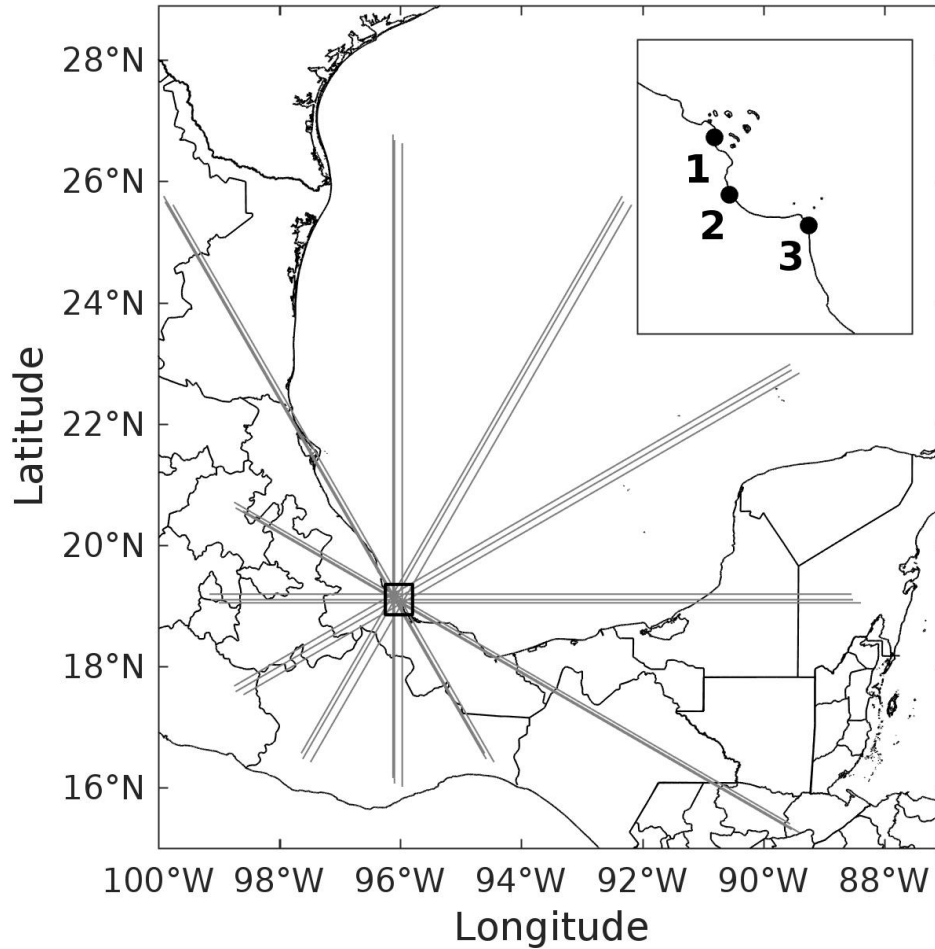


Figure 14. Trayectorias seleccionadas desde -30° hasta 120° cada 30° (0° es la trayectoria Este-Oeste). Los puntos sobre la trayectoria representan la posición del huracán 5 días antes y 2 días después de tocar tierra con un espaciado de 6 horas. Se muestra el grupo de trayectorias para los huracanes con baja velocidad de movimiento, en el gráfico insertado arriba a la derecha aparecen los tres puntos de llegada a tierra.

En estas simulaciones no se incluyó la marea, pues lo que se quería evaluar era la inundación sólo provocada por el huracán al arribar al área de estudio, sin influencia de otros factores como la marea, el aporte de los ríos o la lluvia.

Capítulo 4.

RESULTADOS PARA LA LAGUNA DE TÉRMINOS

En el presente capítulo mostramos los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para el sitio de estudio de la Laguna de Términos. En primer lugar, presentamos el forzamiento meteorológico y su validación (sección 4.1). Luego detallamos el desempeño del modelo FVCOM para reproducir la marea de tormenta, su validación para cada sitio de estudio (sección 4.2) y los resultados relevantes.

Es de señalar que para realizar las simulaciones de los modelos numéricos involucrados en este estudio se utilizaron las supercomputadoras de la UNAM (Miztli) y del CCA (Ometeotl). En general, el modelo WRF, es más complejo numéricamente que los modelos FVCOM y ADCIRC y requiere más recursos computacionales y tiempo de cálculo para realizar las simulaciones.

4.1. Forzamiento meteorológico

Se creó una configuración de alta resolución con el modelo WRF con tres dominios anidados para este sitio de estudio. El primer dominio tiene 62x46 puntos con 25 km de resolución espacial; el segundo dominio tiene 96x76 puntos con 5 km de resolución y el tercer dominio tiene 206x156 puntos con 1 km de resolución (Figura 15). La resolución más alta que proveen los datos geográficos estáticos para el sistema de preprocesamiento del WRF (WPS) es de 30" (aprox. 900 m). No obstante, después de revisar la calidad de los datos en el área de estudio, decidimos crear unos datos geográficos de entrada de 7" (aprox. 210 m) con los datos actualizados de altura topográfica y uso de suelo, obtenidos de las bases de datos de INEGI.

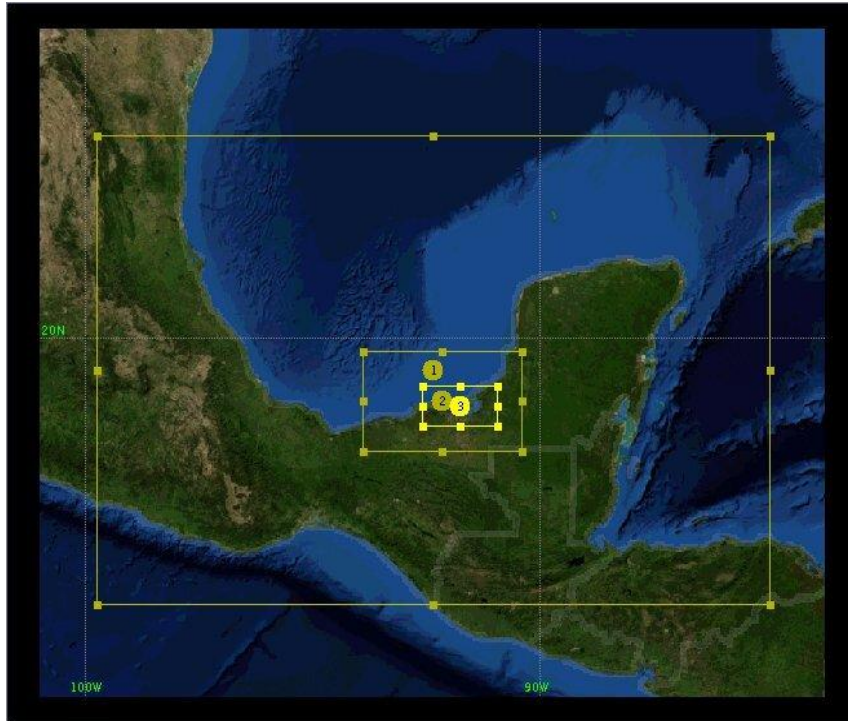


Figura 15. Configuración de dominios usados para la simulación con WRF.

Para la simulación, la configuración del modelo WRF usa la proyección Mercator, un paso de tiempo de 100 s para el primer dominio, 50 niveles verticales, anidamiento en una dirección, y salidas horarias. Los esquemas usados en la física del modelo fueron Kain-Fritsch para la parametrización de cúmulos, el modelo de superficie de tierra Noah, RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) para la radiación de onda larga, Dudhia para la radiación de onda corta, y el esquema YonseiUniversity (YSU) para la capa límite planetaria (NCAR, 2009).

Las condiciones iniciales y de frontera se obtuvieron de los datos ClimateForecastReanalysis (CFSR). CFSR es un sistema global de alta resolución acoplado atmósfera-océano-superficie de tierra-hielo marino diseñado para proveer la mejor estimación del estado de estos dominios acoplados. El CFSR es superior a reanálisis de NCEP previos con respecto a la mejora en las parametrizaciones, la mayor resolución espacial, los sistemas de asimilación avanzados, acoplamiento atmósfera-océano-tierra-hielo marino, y tener en cuenta los cambios en el CO₂ y otros gases, aerosoles y variaciones solares (Saha et al., 2010).

Las series de tiempo de la velocidad del viento y la presión superficial fueron extraídas de las salidas horarias del WRF en los más cercanos a la ubicación de las dos estaciones (MS-01 y MS-03) para compararlas con las observaciones. El modelo WRF fue capaz de capturar los eventos de norte ocurridos durante el período de simulación. Existe una buena representación de la intensificación de la velocidad del viento durante la ocurrencia del Norte, así como del ciclo de la brisa costera. En la figura 16, la velocidad del viento y la dirección son comparadas con las observaciones de la estación meteorológica de Isla Aguada (MS-03). La estación MS-01 no tiene datos durante el Norte, pero el resto de las mediciones en esta estación muestra menor variabilidad direccional comparada con la estación MS-03. No se reproduce toda la variabilidad del viento debido en parte al efecto que en la dirección del viento ejercen algunos altos edificios cercanos a la estación meteorológica. Cuando el viento cambia su magnitud o dirección, existen algunas horas de retraso entre la serie de la simulación y la observada, como puede observarse con el máximo valor de la velocidad del viento que se registra en el modelo cinco horas antes en la estación (Figura 16).

El diagrama de dispersión entre los datos de presión superficial obtenidos de las salidas del WRF y las observaciones en la estación de Isla Aguada muestran una buena correlación ($r=0.9783$), pero el modelo subestima ligeramente las amplitudes de las variaciones (Figura 17). Un corto período de las series de presión superficial se incluye en la figura 17, donde la similitud entre los datos simulados y observados es evidente, aunque el modelo no es capaz de reproducir adecuadamente las variaciones de alta frecuencia.

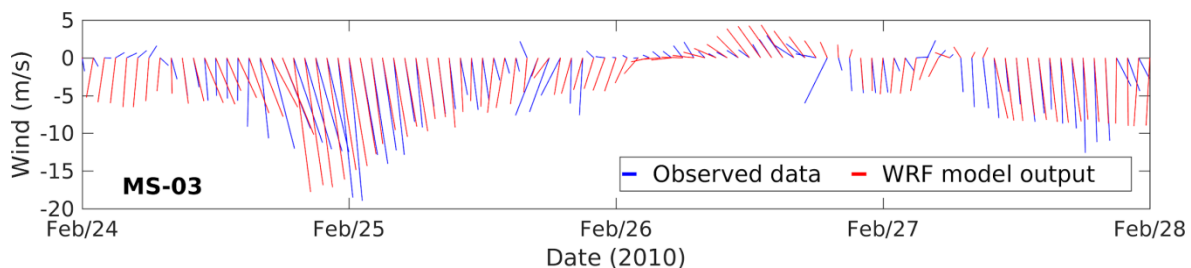


Figura 16. Comparación entre los datos de viento observados (azul) y las salidas del modelo WRF (rojo) para la estación de Isla Aguada.

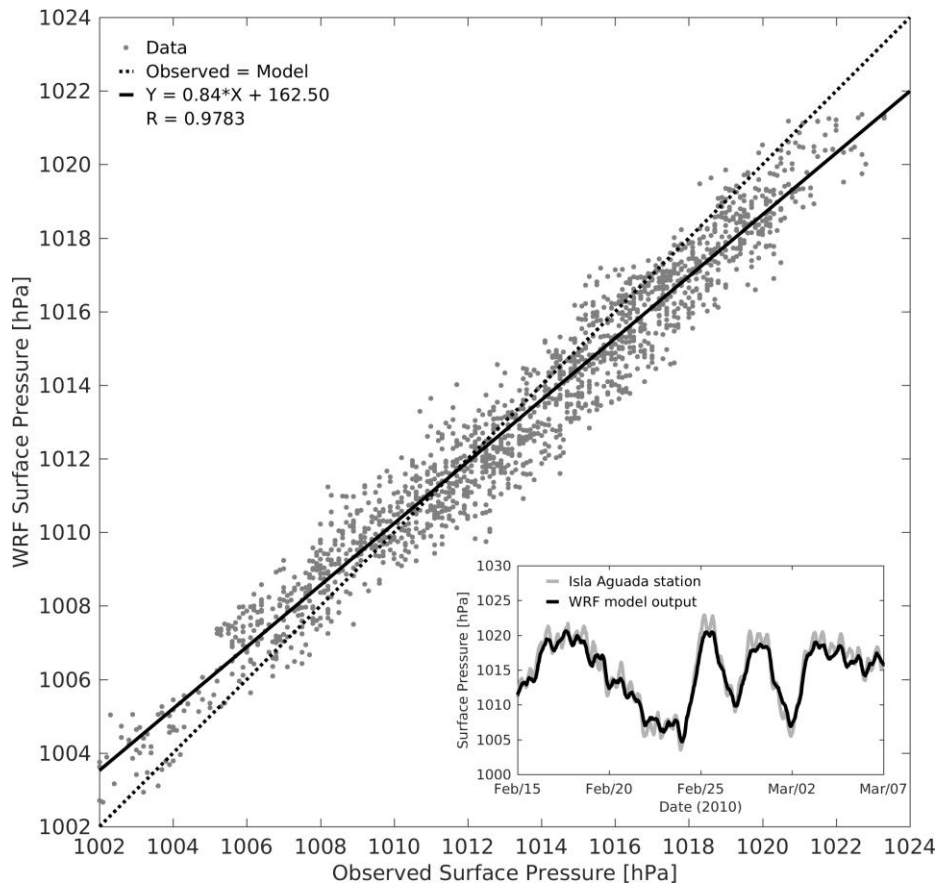


Figura 17. Diagrama de dispersión entre las series de presión superficial simuladas y observadas en la estación de Isla Agua para el período del 1ro de Febrero - 1ro de abril de 2010. El gráfico insertado muestra los datos observados (gris) y las salidas del modelo WRF (negro) para un período corto de tiempo.

4.2. Modelo de marea de tormenta

La simulación histórica (b) se realizó para validar el desempeño del modelo FVCOM, comparando las salidas con las observaciones. El período de simulación fue de tres meses, desde el 1ro de Enero a las 00:00 GMT hasta el 1ro de Abril a las 00:00 GMT del 2010. El primer mes se utilizó como *spin-up* del modelo y se descartó, y todo el análisis estadístico fue realizado usando los dos últimos meses de las simulaciones (Febrero-Marzo, 2010).

Las figuras 18 y 19 muestran las series horarias de la elevación de la superficie libre de la simulación (b) marea-viento con el modelo FVCOM y los datos observados en seis sensores. Para remover la alta frecuencia de las oscilaciones, se aplicó una media móvil de 60 min a los datos observados. El evento de Norte se ubicó cerca del centro de cada gráfico para mostrar el desempeño del modelo antes, durante y después del evento. La primera fila en las figuras 18 y 19, muestra los sensores CP localizados en cada canal de entrada de la laguna (CP-07 y CP-00); la segunda fila muestra los sensores TP-04 y TP-03, que están justo detrás de la Isla del Carmen, y la última fila muestra los sensores TP cercanos a la costa sur de la LT. El sensor TP-02 estaba ubicado a unos pocos metros de la línea de costa en una zona con pendiente muy suave, siendo el sensor que registró la mayor elevación de la superficie del mar (ver Fig. 6).

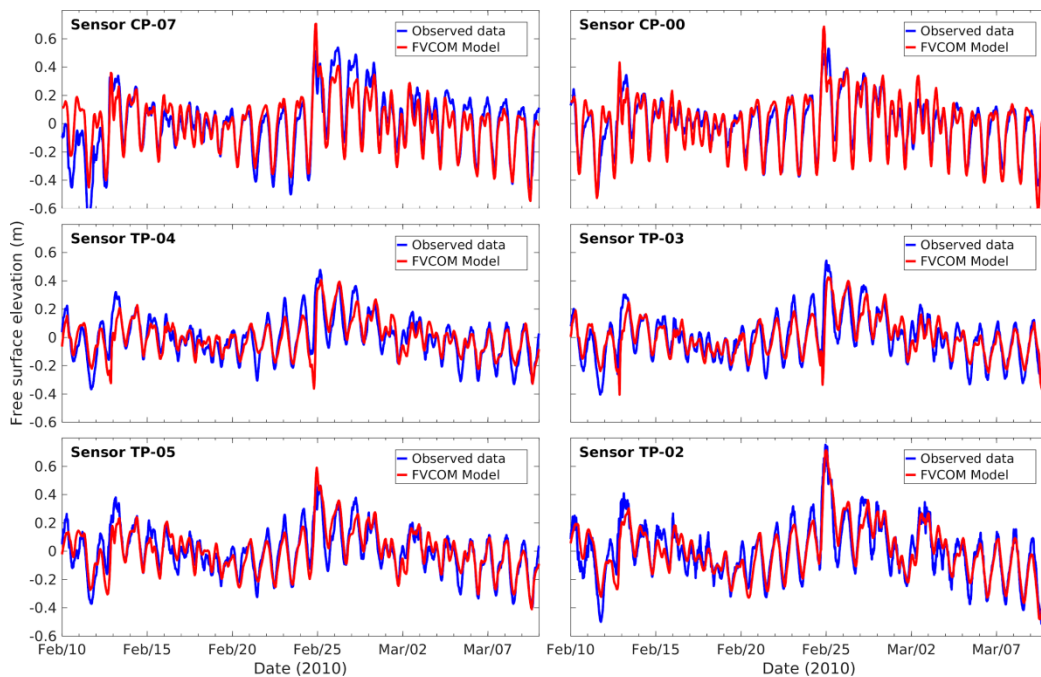


Figura 18. Serie de tiempo de la elevación de la superficie libre (m) de las observaciones (azul) y de las salidas de la simulación marea+viento con FVCOM (rojo) en diferentes estaciones, del 10 de Febrero al 10 de Marzo de 2010. Ver la ubicación de los sensores en la figura 6.

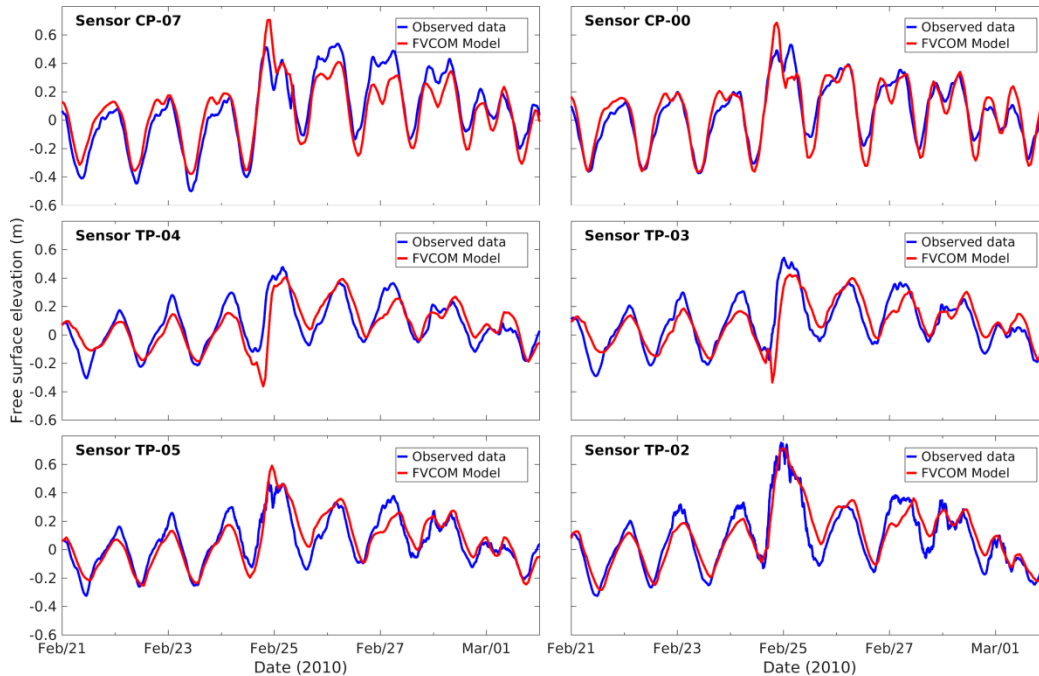


Figura 19. Igual que la figura 18 pero con un acercamiento al período del evento del Norte.

4.3. Área de inundación por frente frío en la Laguna de Términos

La simulación numérica del evento histórico reproduce la señal de la marea y responde adecuadamente a los efectos de la velocidad del viento y la dirección sobre la elevación de la superficie libre durante el Norte (Figuras 18 y 19). En las primeras etapas de la llegada del Norte al exterior de la LT, el agua se acumula en la costa noroeste de la Isla del Carmen. El nivel del agua fuera de la LT se reduce debido al flujo de agua hacia el interior de la laguna a través de los dos canales de entrada. Esto es particularmente bueno para la Ciudad del Carmen porque el nivel potencial de agua que puede inundar la isla se dirige hacia el interior de la laguna, reduciendo el riesgo de inundación.

La amplitud de la series de la elevación de la superficie libre de la simulación y las observaciones es prácticamente la misma en los canales de entrada, pero el modelo subestima ligeramente el rango de la marea en el interior de la laguna. Además de los gráficos de series de tiempo, se calculó la regresión lineal entre las series del nivel del

mar modelado y observado y se realizaron diagramas de dispersión (Figura 20). Las correlaciones varían de $r=0.85$ a $r=0.89$ y las pendientes de 0.71 a 1.09. El pico de la tormenta está bien reproducido por el modelo, pero se sobreestima ligeramente en los canales de entrada, probablemente debido al alto gradiente batimétrico en los canales, caracterizados por un canal de navegación profundo y un área plana y poco profunda en el resto de la sección transversal. Debido a la geometría de la laguna, una laguna ancha con canales de entrada relativamente estrechos, la disipación de energía resulta en una señal de mayor amplitud en los canales de entrada que en el interior. Además, la fricción del fondo de la laguna poco profunda también puede contribuir a que esto suceda.

Durante el Norte, el nivel relativamente bajo en el nivel del agua causado por la sombra de la Isla del Carmen en la ubicación de los sensores TP-04 y TP-03 está ligeramente sobreestimada en la simulación. En la ubicación del sensor TP-02, el modelo reproduce con precisión el pico de la marea de tormenta, lo cual es notable ya que es el punto más cercano a la línea de costa de todos los sitios de medición antes de que el agua comience a inundar la tierra.

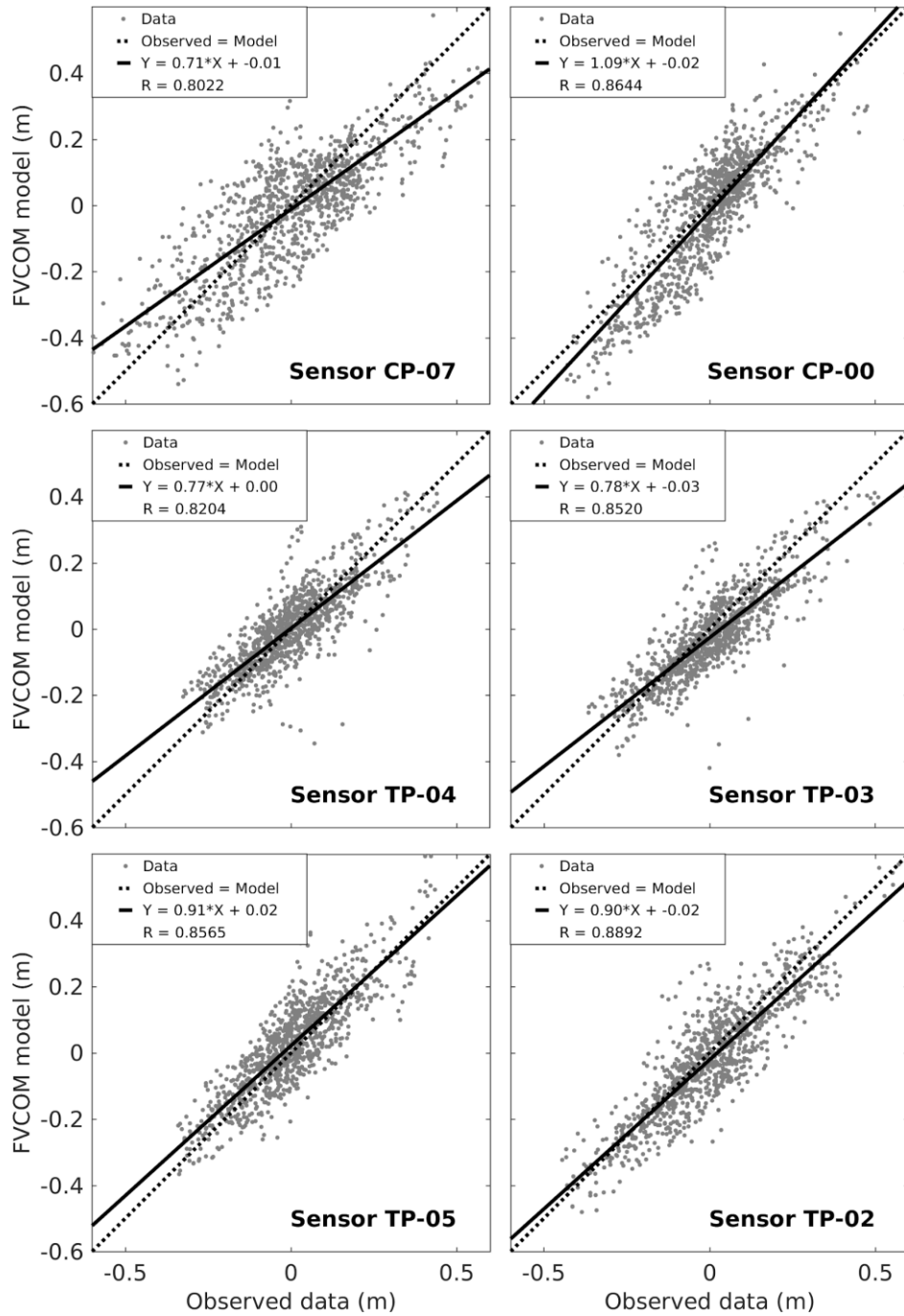


Figura 20. Diagramas de dispersión del nivel del mar del modelo FVCOM contra observaciones en diferentes estaciones. Se incluye la regresión lineal y la correlación. La línea sólida es la recta de mejor ajuste, y la línea discontinua es la recta $Y=X$.

4.3. Área de inundación durante el Norte

A partir de los resultados de la simulación marea-viento, se utilizaron mapas de contorno de la elevación de la superficie libre para identificar las áreas de inundación. La figura 21a, representa la elevación de la superficie libre 14 horas antes del pico de inundación y la figura 21b corresponde al momento de máxima área de inundación durante el Norte, nueve horas después de la ocurrencia de la velocidad máxima del viento simulada en la Isla Aguada. Mientras que la figura 21c es una instantánea en el tiempo cuando ocurrió la mayor inundación, la figura 21c muestra la elevación máxima de la superficie en cada nodo de la malla durante el período analizado. Una extensa área al suroeste de la LT ya estaba inundada con un nivel de agua relativamente pequeño antes del evento (figura 21a), que coincide con las áreas de humedales y manglares documentadas en otros estudios (Rodríguez-Zúñiga et al., 2013). Sin embargo, 14 horas más tarde, el nivel del agua era significativamente más alto y nuevas áreas inundadas aparecieron principalmente en el sur y al este de la laguna. El aumento de la superficie inundada en la figura 21c con respecto a la figura 21b indica que no todos los nodos alcanzan el nivel máximo de agua al mismo tiempo. Este último mapa representa la extensión del área inundada independiente de la hora. Es interesante observar la marea de tormenta en la costa norte de la Isla del Carmen y cómo se reduce en los canales de entrada, como se ha señalado en la sección anterior.

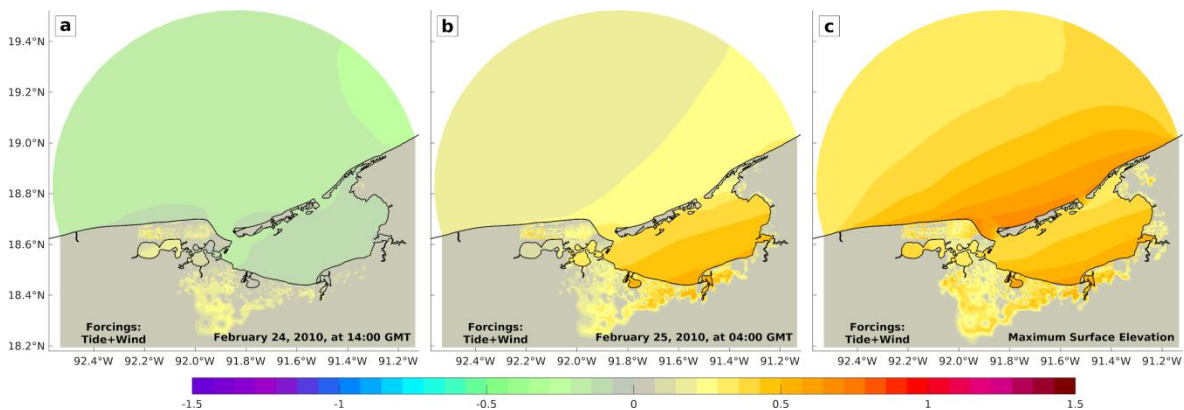


Figura 21. Mapas de la elevación de la superficie libre (m) de la salida de la simulación marea+viento: a) 14 horas antes del máximo de inundación; b) durante el máximo de inundación, y c) máxima elevación de la superficie durante todo el período de análisis.

4.4. Cambio del área de inundación por aumento del nivel del mar

Debido a la baja altitud del área que rodea a la LT, existe preocupación acerca de las inundaciones a partir de las proyecciones de elevación del nivel del mar. Entonces, basados en los escenarios de SLR, se realizaron tres simulaciones aumentando el nivel medio del mar en la frontera del dominio computacional. Las simulaciones tienen el mismo forzamiento atmosférico que la simulación marea+viento pero con incrementos en la frontera abierta de 0.25 m, 0.50 m, y 0.75 m. El propósito de este experimento es analizar lo que puede suceder en el futuro, con un Norte intenso, como el que se está estudiando, pero actuando en diferentes escenarios de SLR.

Al momento del máximo impacto del Norte, existen diferencias significativas en las áreas inundadas y en el nivel del agua entre las simulaciones que representan las condiciones actuales del nivel medio del mar (Figura 21) y las de los escenarios de SLR (Figura 22). Para cada escenario, se representa el pico de la inundación (Figura 22a,c,e) junto con la elevación máxima de la superficie (Figura 22b,d,f) durante el período de análisis, mostrando las diferencias entre ellos en relación con las áreas afectadas.

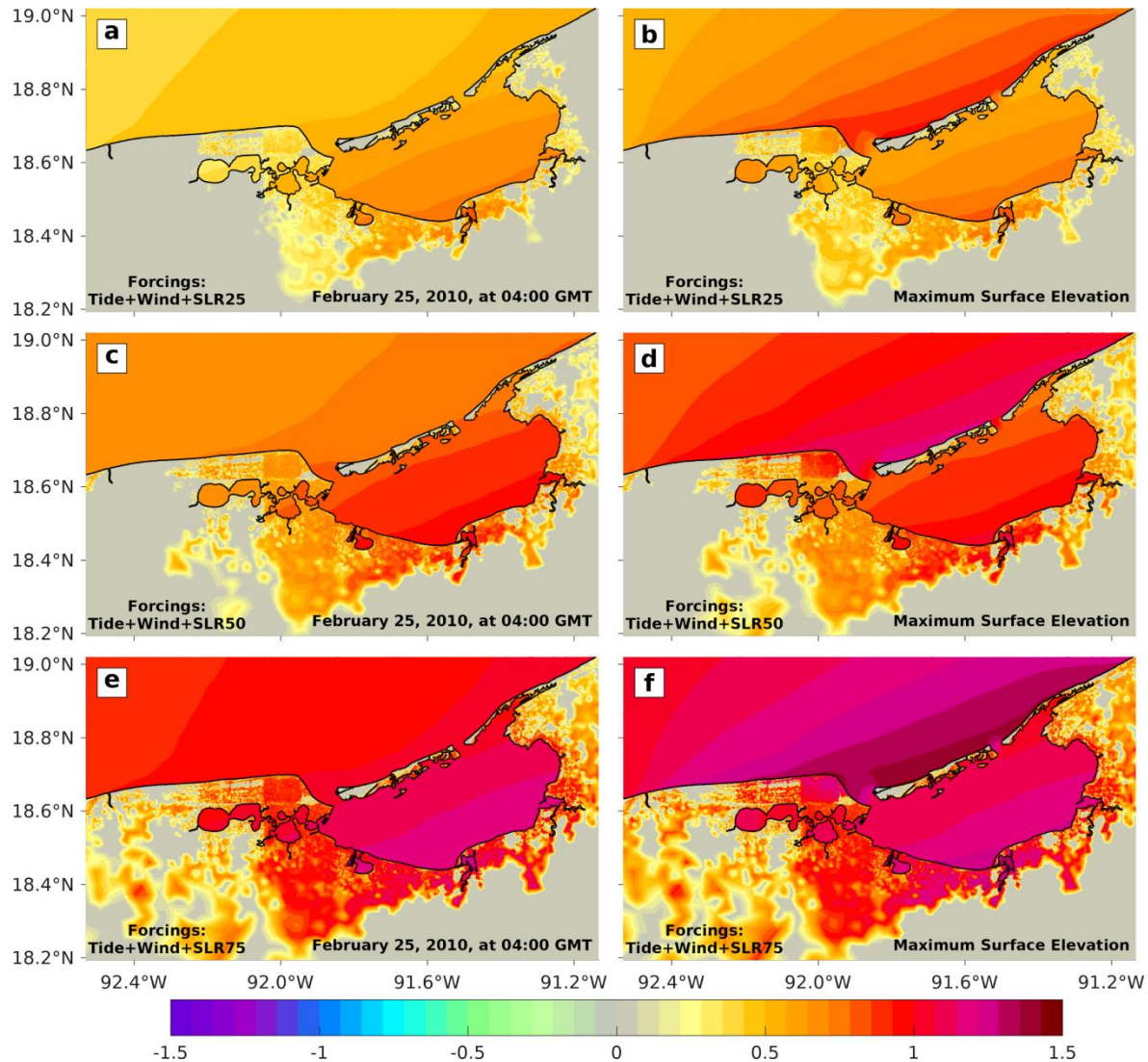


Figura 22. Mapas de la elevación de la superficie libre (m) a partir de la simulación marea+viento incrementando el nivel medio del mar en 0.25 m (a, b), 0.50 m (c, d), y 0.75 m (e, f). (Columna izquierda) Imágenes durante el máximo de inundación para cada simulación. (Columna derecha) Elevación máxima de la superficie durante el período de análisis.

Para tener una mejor cuantificación de las diferencias entre escenarios, se calculó el área inundada y la altura media del nivel del agua (MWLH) para cada hora de todas las simulaciones. Se obtuvieron resultados para los cinco casos, utilizando las condiciones meteorológicas del 1 de febrero al 1 de abril de 2010 (Figura 23). Las áreas inundadas correspondientes a +SLR25, +SLR50 y +SLR75 de las simulaciones del modelo se muestran en la figura 23a. El área de inundaciones se calculó seleccionando las celdas

húmedas y agregando el área correspondiente en cada paso de tiempo. Para el MWLH (Figura 23b), se consideró la altura del nivel del agua en cada nodo húmedo sobre tierra en cada momento y se calculó la media. El efecto del Norte aparece el 25 de febrero, y se ve claramente en la figura 23b. Es interesante señalar que al promediar las áreas inundadas y el MWLH, con un aumento lineal de la SLR a intervalos regulares de 0,25 m, la diferencia respecto al caso marea+viento no es lineal (Tabla 4). Para aclarar la no linealidad es necesario un estudio específico, pero las causas pueden ser que cuando la columna de agua es mayor, el momento asociado es mayor si la velocidad es similar. Además, las características topográficas regionales pueden influir en esta respuesta.

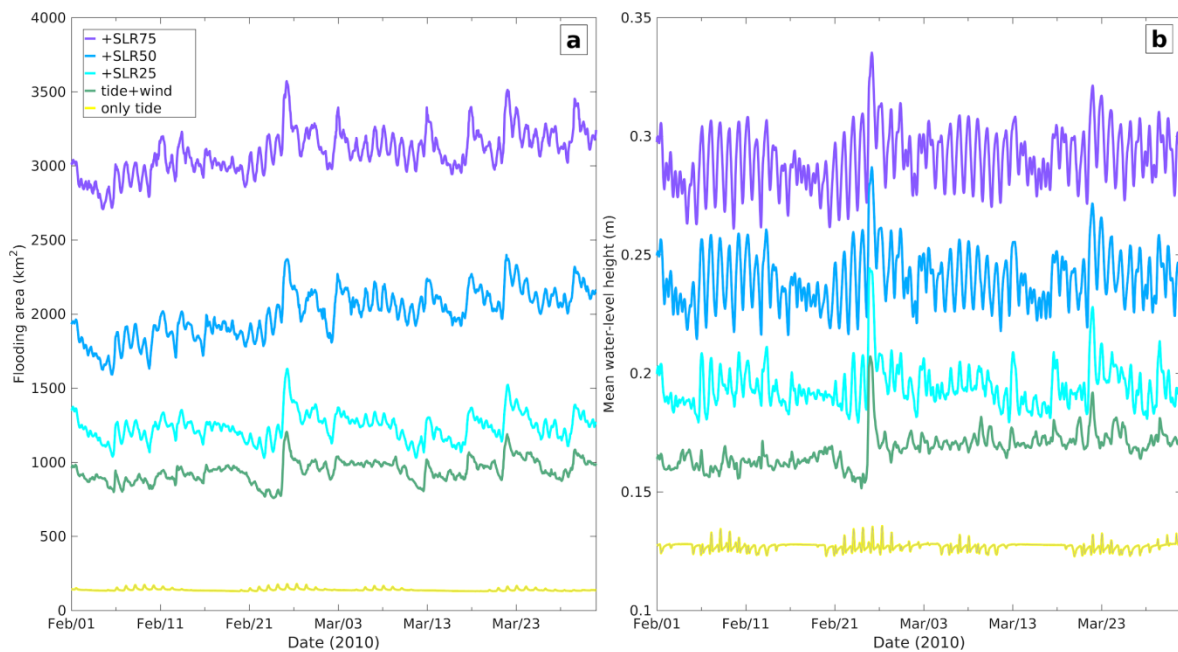


Figura 23. Series de tiempo de a) área inundada (km²) y b) la altura media de la columna de agua sobre el suelo (m) para cada una de las simulaciones.

Table 4. Área de inundación promedio y MWLH durante el período analizado relativo al experimento de control histórico (marea+viento). Todos los casos fueron forzados con las condiciones meteorológicas prevalecientes durante Febrero-Marzo de 2010.

Simulación	Área de inundación promedio			Altura promedio de la columna de agua (MWLH)		
	Valor (km ²)	Área cubierta relativa al experimento de control marea+viento	Incremento de área relativa al experimento de control	Valor (m)	Promedio de MWLH relativo al experimento de control marea+viento	Incremento de MWLH relativo al experimento de control
solo marea	139.8	-	-	0.13	-	-
marea + viento	940.6	-	-	0.17	-	-
+SLR25	1,237.6	1.32	297 km ²	0.19	1.16	0.026 m
+SLR50	2,002.4	2.13	1,062 km ²	0.24	1.43	0.072 m
+SLR75	3,092.6	3.29	2,152 km ²	0.29	1.73	0.123 m

El aumento del área inundada en las simulaciones del SLR en relación con el área inundada considerando las condiciones actuales es extremadamente grande, ya que los aumentos corresponden a 1.3, 2.1 y 3.3 veces para los tres casos de la SLR (0.25 m, 0.50 m y 0.75 m), respectivamente (Tabla 6). Estos incrementos representan áreas de 297, 1,062 y 2,152 km² respectivamente, y como referencia, el área de manglar que rodea la LT es de alrededor de 2,590 km² (Robadue et al., 2004). Se espera que la respuesta no lineal sea una característica particular de cada región, ya que depende de factores como la topografía, el relieve y la cubierta terrestre. El aumento de la altura del nivel del agua tiene una proporción menor, lo que demuestra que la inundación no es una función lineal del cambio del nivel del mar en algunos casos.

Los diferentes escenarios de SLR muestran que más áreas se inundarán durante los eventos del Norte debido a la marea de tormenta, como es evidente de la figura 23a. Pero también se inundarán nuevas áreas durante las mareas altas, ya que habrá un

aumento en el nivel medio del mar, como se observa en los escenarios de SLR previos a la llegada del Norte (Figura 23). Las mayores oscilaciones de la altura promedio del nivel del agua que ocurren bajo los escenarios de SLR sobre la tierra (Figura 23b) se deben a la mayor inercia que tiene una columna de agua más alta. Este cambio permitirá un mejor intercambio hidrológico que puede mejorar las condiciones y facilitar el establecimiento, la supervivencia y el crecimiento de los manglares. También puede ayudar a la recuperación de la estructura del bosque y la productividad de las raíces subterráneas si existen programas de recuperación que consideren las condiciones cambiantes.

El área inundada el 25 de febrero de 2010 a las 04:00 GMT fue graficada de manera incremental para los diferentes experimentos (Figura 24). El caso +SLR75 muestra la mayor área inundada, seguido por el caso +SLR50, el caso +SLR25, el caso marea+viento, y el caso de solo marea con la menor área. El caso básico es la simulación de solo marea (color amarillo en Figura 24), que muestra algunas áreas que normalmente se inundarían durante las mareas vivas. El experimento de control es el de marea+viento, que corresponde al área inundada durante el Norte de febrero de 2010. Los otros casos indican escenarios de cuánto puede aumentar el área inundada con un valor de SLR específico.

También se muestran en detalle las regiones inundadas de la isla del Carmen, donde la mayor parte de la población vive en la parte occidental (Figura 24b). Las partes este y sureste son principalmente humedales y manglares. Los escenarios futuros presentan un aumento del peligro de inundaciones en la parte central de la isla, que está casi dividida en esta parte. Es posible que en el futuro haya que considerar la creación de estructuras de protección costera para el control de las inundaciones.

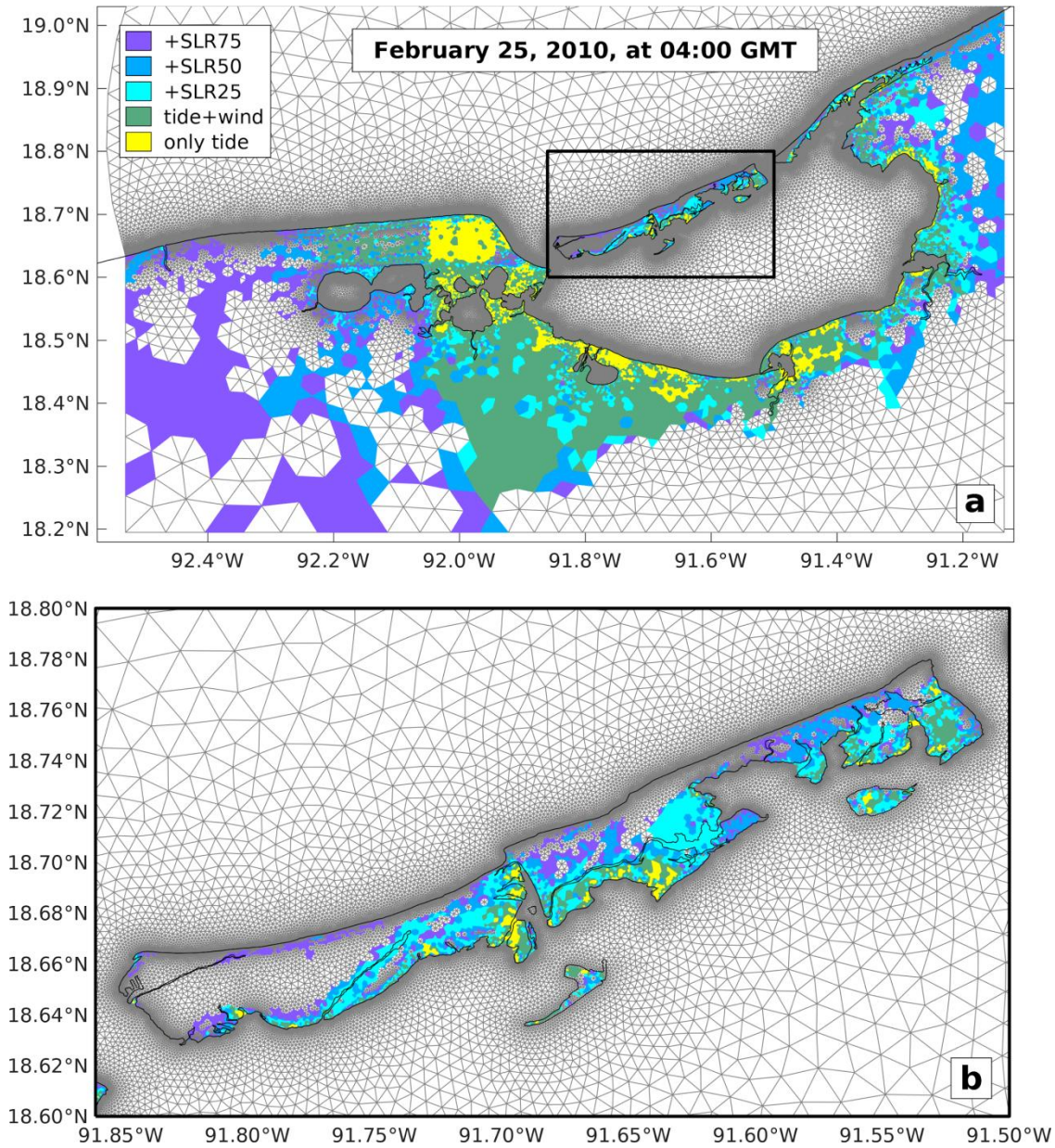


Figura 24. Áreas máximas de inundación durante el evento de Norte para diferentes escenarios de SLR, de acuerdo con la leyenda en a). En b) se muestra un acercamiento a la Isla del Carmen. Los colores representan celdas con altura de agua mayor que cero metros para cada simulación.

Capítulo 5.

RESULTADOS PARA LAS CIUDADES DE VERACRUZ Y BOCA DEL RÍO

En el presente capítulo mostramos los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para el sitio de estudio de las ciudades de Veracruz y Boca del Río. En primer lugar, presentamos la metodología para la creación de los huracanes sintéticos utilizados en el estudio (sección 5.1). Luego detallamos el desempeño del modelo ADCIRC para estimar las inundaciones por marea de tormenta para los diferentes escenarios y para las condiciones presentes y futuras considerando el probable aumento del nivel del mar.

5.1. Forzamiento meteorológico

Para el sitio de estudio de Veracruz se crearon los huracanes sintéticos a los que nos referimos en la sección 3.2.1. La Tabla 5 refleja las diferentes combinaciones que se tuvieron en cuenta y los valores obtenidos para reflejar cada categoría aparecen en la Tabla 6. La combinación lineal de los primeros cuatro factores genera un total de 162 huracanes sintéticos. Estos huracanes se utilizan dos veces cada uno, primero con las condiciones actuales del nivel del mar, y luego con un aumento de 0.50 m del nivel del mar, para un total de 324 simulaciones para este caso de estudio.

En el caso de los huracanes, en los que solo se trabajó con los categoría 3, 4 y 5, los valores del radio de vientos máximos (MRD) se obtuvieron de los huracanes tipo, en los que para cada categoría los vientos máximos (VMAX) y la presión mínima al nivel del mar (MSLP) coincidían con el promedio de los seleccionados para el estudio.

Tabla 5. Factores de combinación para la creación de las simulaciones.

Puntos de arribo	Direcciones (trayectorias)	Velocidad de desplazamiento	Categoría Huracán	Aumento del nivel del mar
1	-30°	Lenta (7.45 km/h)	3	No
2	0°	Media (14.55 km/h)	4	Sí
3	30°		5	
	60°			
	90°			
	120°	Rápida (21.65 km/h)		

Tabla 6. Valores de los parámetros necesarios para la creación de los huracanes sintéticos para cada categoría de huracán.

Categoría	Huracán Tipo	Parámetros necesarios
Cat. 3	Gustav 2008	VMAX = 105 nudos MSLP = 960 mb MRD = 15 n mi
Cat. 4	Dennis 2005 Rita 2005	VVM = 120 nudos MSLP = 941 mb MRD = 15 n mi
Cat. 5	Katrina 2005 Dean 2007	VVM = 145 nudos MSLP = 912 mb MRD = 20 n mi

5.2. Modelo de marea de tormenta

Se realizaron simulaciones de prueba usando trayectorias de huracanes históricos obtenidas de la base de datos HURDAT2 del NHC. Dado que existen pocos eventos de huracanes intensos que hayan afectado la zona sur del Golfo de México se utilizó una malla extendida que cubre todo el Golfo de México para estas simulaciones. Los resultados muestran niveles similares en la elevación de la superficie del mar al

compararla contra las observaciones obtenidas en mareógrafos y boyas oceanográficas cercanas a la costa.

A continuación se muestran algunos ejemplos de estas simulaciones de prueba.

5.3. Áreas susceptibles a inundación por huracanes en Veracruz y Boca del Río

En cada caso se registraron las áreas inundadas, tanto en todo el territorio como en el área urbana. Asimismo, se calculó el nivel máximo de inundación en relación con el nivel medio del mar (MSL, *mean sea level* en inglés) para las condiciones actuales y futuras. Los resultados horarios de las variables de interés se almacenaron para su posterior análisis. Como ejemplo, se muestra uno de los casos simulados que causó una gran inundación (Figura 25). En este caso la inundación ocurrió en la ciudad de Veracruz. También hubo una inundación significativa de agua de mar que llegó río arriba a través de la desembocadura del río Jamapa, causando inundaciones en la zona suroeste del municipio de Boca del Río.

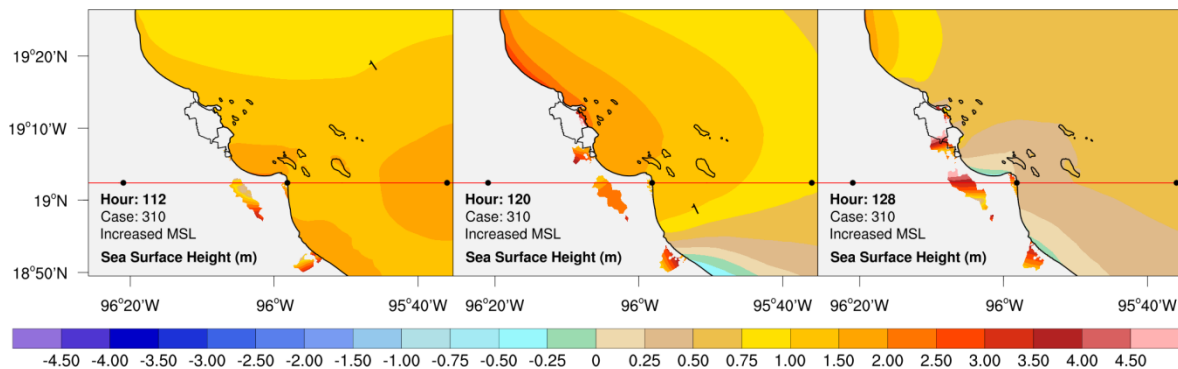


Figura 25. Secuencia de imágenes cada ocho horas de un escenario de huracán categoría 5 que tocó tierra en el punto más al sur. El huracán tocó tierra a las 120 h. Su trayectoria (línea roja) fue del Este (desde 0°). Los puntos negros sobre la trayectoria representan las posiciones del huracán cada seis horas dadas en el archivo tipo *best-track* de forzamiento meteorológico. Este caso tiene la velocidad de desplazamiento más lenta (~ 7.45 km/h), y con el aumento del nivel medio del mar esperado para el año 2100 debido al cambio climático.

5.4. Nivel máximo de inundación

Se registró la altura máxima del nivel del agua (WLH) en la región terrestre para los 294 casos simulados. En la Tabla 7 se presentan los resultados agrupados por las diferentes categorías de huracanes estudiados. Además de la categoría de los huracanes, la trayectoria de aproximación demostró importantes diferencias en el máximo WLH, siendo mayor para los huracanes que se acercan por el este (Figura 26a). Los casos con menor velocidad de aproximación causaron la mayor WLH para cada trayectoria y categoría de huracán. La diferencia en WLH relacionada con la velocidad de aproximación fue mayor para los huracanes que tocaron tierra en el punto norte. Los huracanes que tocaron tierra en el punto sur causaron mayores niveles de agua para todas las simulaciones, ya sea con y sin el aumento del nivel del mar esperado por el Cambio Climático (CC). La respuesta de la WLH al aumento del nivel del mar por CC difirió según la velocidad de aproximación. La trayectoria también hace que la WLH sea más alta para huracanes con trayectorias desde el este y este-sureste. En la Tabla 7 se resumen las estadísticas del máximo de WLH por encima del MSL en las regiones inundadas, agrupadas por categoría de huracán, y con o sin aumento del nivel del mar por CC.

Para cada conjunto de simulaciones, organizándose por trayectoria y categoría, se calculó el WLH máximo por encima del MSL (Figura 26a). Se obtuvieron los mayores valores de WLH para los huracanes más intensos y cuando se incluyó el aumento del MSL debido al CC. Es notable que en las simulaciones con CC el aumento en WLH es mucho mayor que el aumento del MSL impuesto a las simulaciones en la condición inicial; es decir, el cambio fue entre 0.70 m y 1.85 m mientras que el aumento inicial en el MSL fue de 0.5 m. En los escenarios con CC el WLH causado por huracanes de categoría 3 fue mayor que el impacto de los huracanes de categoría 4 con el MSL del año 2000.

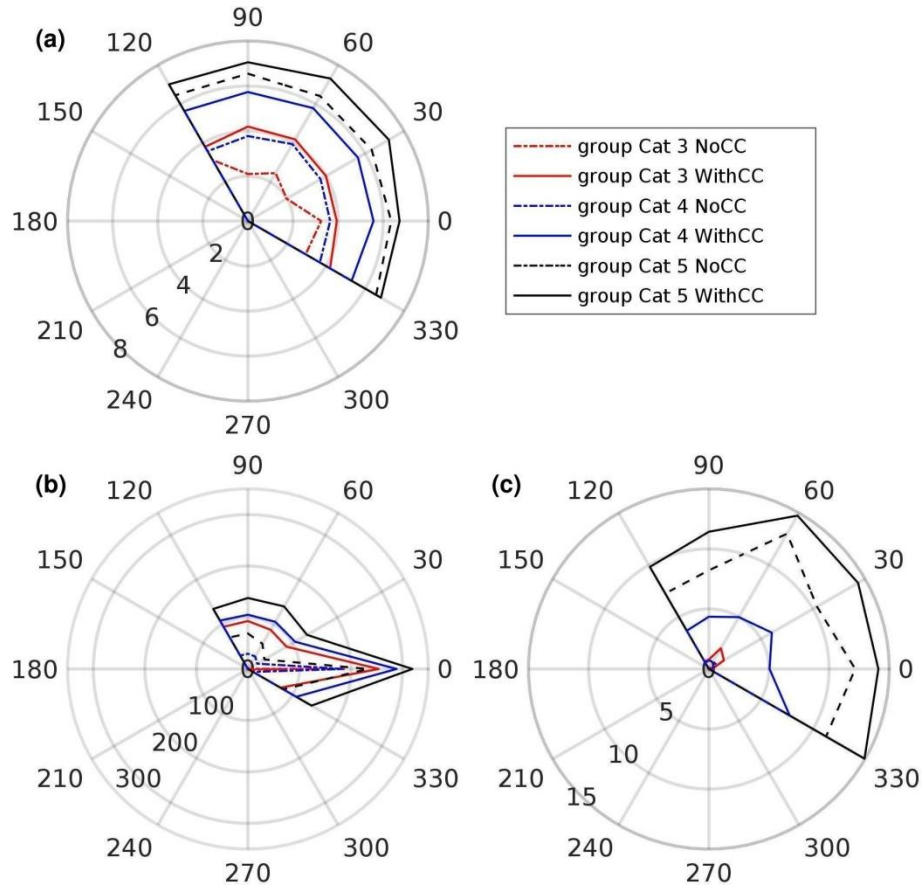


Figure 26. (a) Nivel máximo de agua sobre el MSL en las áreas inundadas (m), (b) valor máximo de las áreas inundadas (km^2) para cada categoría y trayectoria de huracán, sobre los nodos en tierra y (c) sobre el área urbana. Las líneas sólidas son casos con aumento del MSL debido al CC. Los colores de las líneas indican la categoría de los huracanes, Cat. 3 (rojo), Cat. 4 (azul), Cat. 5 (negro).

Tabla 7. Altura máxima del nivel del agua (m), en relación con el nivel medio del mar, para todos los casos agrupados en función de su categoría (3-5) y con y sin aumento del nivel medio del mar (NML) debido al cambio climático. Se presentan las alturas mínimas, medias y máximas del nivel del agua en las zonas inundadas.

	Cat. 3			Cat. 4			Cat. 5		
	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
NML año 2000	1.72	2.25	3.25	2.18	3.04	3.94	2.90	5.34	6.56
NML año 2100 (año 2000 + 0.50 m en NML)	2.49	3.30	4.21	2.84	4.46	5.79	3.78	6.04	7.31
Incremento	0.77	1.05	0.96	0.66	1.42	1.85	0.88	0.70	0.75

5.5. Mapas de extensión y frecuencia de inundación

Con el propósito de identificar las áreas que usualmente quedan inundadas bajo diferentes trayectorias de huracanes, categoría y velocidad de avance, y cómo cambia en los escenarios de CC, se calculó el número de casos de inundación para cada celda de la malla en tierra (Figura 27).

Considerando el área urbana (ver Figura 7), bajo las condiciones del año 2000, los huracanes categoría 3 y 4 no producen grandes inundaciones por marea de tormenta (las simulaciones se realizan sin precipitaciones ni desbordamientos de ríos). Para los huracanes de categoría 5 hubo grandes áreas inundadas en el sur de la ciudad de Veracruz con agua que corría río arriba a través del río Jamapa y uno de sus afluentes. También había zonas inundadas en la zona antigua de la ciudad y en el pueblo de Antón Lizardo. En los casos en que se consideró que el nivel del mar había subido debido al CC, los huracanes categoría 3 y 4 generan inundaciones en las zonas urbanas considerablemente mayores a las de hoy en día. Las tierras que rodean las lagunas actuales se inundarán con frecuencia.

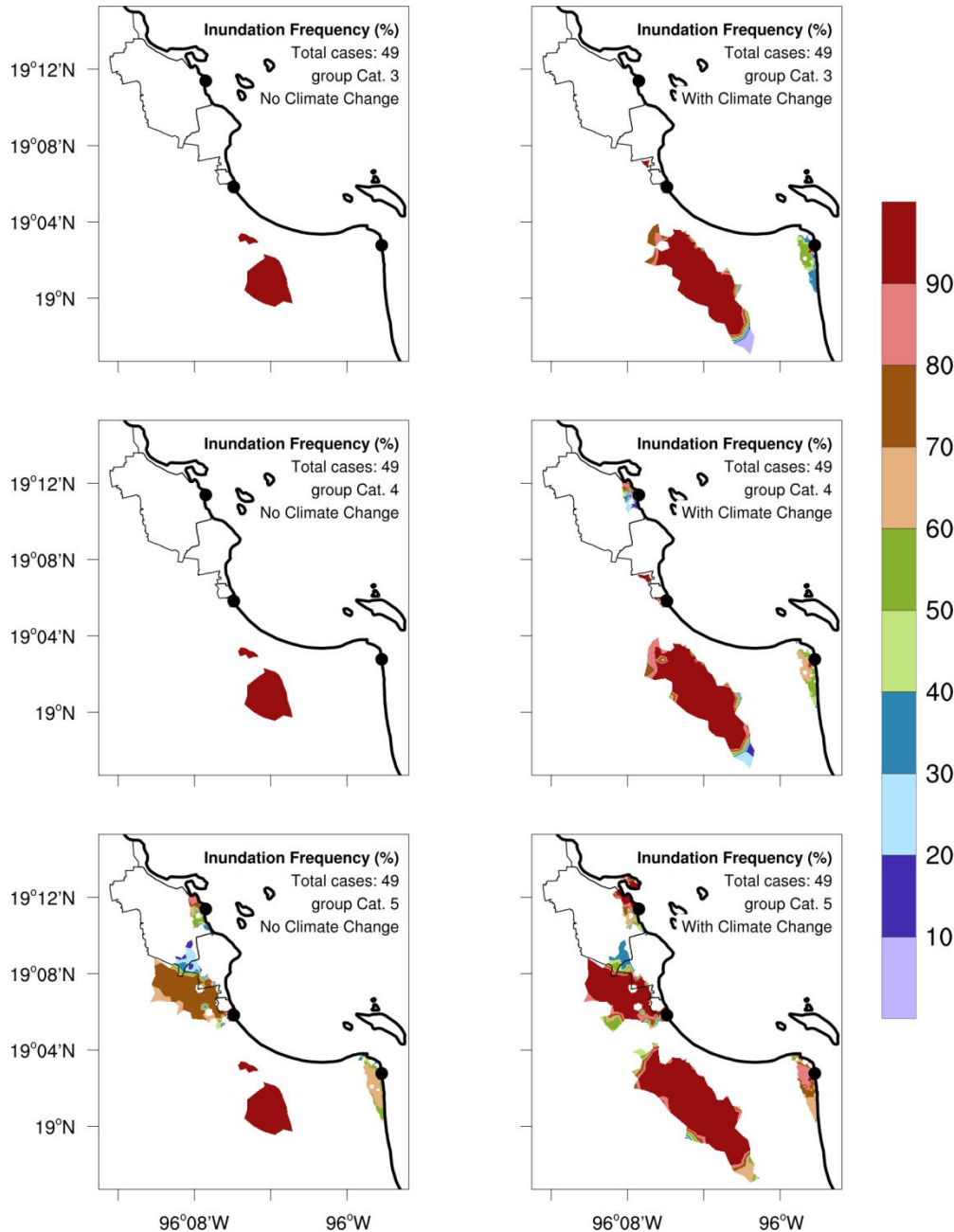


Figura 27. Mapas del número de casos en que una región se inundó para cada grupo de simulaciones de la categoría de huracán sin CC (izquierda) y con aumento del nivel medio del mar debido al CC (derecha).

Para cada simulación se calcularon las áreas inundadas en todo el dominio y en las áreas urbanas. Hubo una gran diferencia en función de la trayectoria para el dominio terrestre completo, siendo los huracanes del este los que causaron mayores inundaciones (Figura 27b). La trayectoria tiene menos influencia en las áreas urbanas

inundadas (Figura 27c). Es notable que para la mayoría de las trayectorias, los huracanes categoría 3 y 4 bajo escenarios de CC, el área de inundación aumentó varias veces, con un promedio de 15.0 y 12.4 veces respectivamente (Tabla 8). Para los huracanes de categoría 5 la diferencia es de 1,81 veces. Localmente esto tiene una variabilidad considerable. Para la región de Heróica Veracruz la zona inundada tiene un gran aumento para los huracanes de categoría 4 porque bajo las condiciones actuales sólo unas pocas áreas pueden ser inundadas. Para el municipio de Boca del Río el área inundada aumenta en 89.5, 6.1 y 1.57 veces, lo que significa que bajo las condiciones actuales casi no hay regiones inundadas por marea de tormenta con huracanes de categoría 3, pero eso cambia en el escenario de CC.

Basándose en los resultados de las simulaciones, se puede considerar que en los escenarios de cambio climático las áreas de inundación para huracanes de categoría 3 y 4 aumentan varias veces. Afortunadamente el área de la ciudad de Veracruz no es azotada por huracanes mayores con frecuencia. De la base de datos HURDAT, en 165 años, en un radio de 100 km de la desembocadura del río Jamapa, han pasado solo 4, 0 y 1 trayectorias por categoría 3, 4 y 5 respectivamente. Sin embargo, teniendo en cuenta estos resultados, en las condiciones actuales, las inundaciones importantes debidas a la marea de tormenta se producen sólo una vez en 165 años (la serie temporal no es suficiente para tener estadísticas significativas, sino que da un orden de magnitud), pero en condiciones futuras con un aumento del nivel medio del mar debido al CC, las inundaciones importantes serán causadas también por los huracanes categorías 3 y 4 y pueden producirse unas 5 veces en el mismo período de años.

En las condiciones actuales, la gran diferencia en el área de inundación causada por los huracanes categoría 3 y 4 en comparación con la categoría 5 está relacionada con los umbrales que deben ser superados para que ocurra una gran inundación, pero bajo condiciones de CC la inundación en las áreas urbanas puede aumentar en 15.04, 12.42 y 1.53 veces, respectivamente. Por lo tanto, es necesario adoptar medidas de mitigación, ya que los asentamientos en esas zonas pueden estar relacionados con la

elección histórica de las zonas apropiadas en función del tiempo de retorno de las inundaciones catastróficas, que claramente están cambiando.

Tabla 8. Promedio de áreas inundadas (km²) considerando la categoría del huracán, con y sin aumento del nivel del mar por CC. La Ciudad incluye la suma de las cuatro áreas urbanas consideradas y Tierra representa toda el dominio terrestre.

Zonas	Sin Cambio Climático			Con Cambio Climático			Incremento (veces)		
	Grupo Cat. 3	Grupo Cat. 4	Grupo Cat. 5	Grupo Cat. 3	Grupo Cat. 4	Grupo Cat. 5	Grupo Cat. 3	Grupo Cat. 4	Grupo Cat. 5
Puerto	0.024	0.134	1.445	0.239	0.882	2.614	9.99	6.60	1.81
Heróica Veracruz	0.003	0.012	3.571	0.072	1.790	4.957	22.50	146.71	1.39
Veracruz	0	0.099	0.728	0.082	0.416	1.219	-	4.21	1.67
Boca del Río	0.0002	0.008	0.098	0.018	0.049	0.154	89.50	6.08	1.57
Ciudad	0.027	0.253	5.842	0.411	3.136	8.943	15.04	12.42	1.53
Tierra	15.180	25.797	61.617	69.093	87.243	124.251	4.55	3.38	2.02

Una de las causas del gran incremento en las áreas de inundación es la no linealidad de la respuesta de la altura del nivel de agua a un aumento del MSL debido al CC. En promedio, la altura máxima del nivel del agua en las zonas de inundación aumentó en 1,05 m, 1,85 m, 0,70 m, para los huracanes de categoría 3, 4 y 5, respectivamente. Este resultado es de particular importancia porque muchos escenarios del impacto del aumento del nivel del mar no consideran que para eventos extremos el aumento del nivel del agua puede ser mayor que el aumento del MSL. Esto se debe a la aceleración, que está asociada con el hecho de que una columna de agua más profunda puede correr más rápido, tener más impulso asociado y podría llegar a regiones más alejadas de la costa.

Este estudio se centra en las inundaciones por marea de tormenta y su variabilidad debido a las diferentes características de los huracanes y al cambio climático. Su principal objetivo es comprender mejor la respuesta de la marea de tormenta al aumento del nivel del mar en una región con baja altitud sobre el nivel del mar. No se simula todos los procesos que generan inundaciones, como la precipitación, el desbordamiento de ríos y el agua subterránea. La importancia de comprender la contribución a la inundación de cada proceso y su efecto combinado puede ayudar a los responsables políticos a tomar mejores decisiones.

Capítulo 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo de Tesis se asimilaron, implementaron y usaron dos modelos numéricos para el estudio de la marea de tormenta usando mallas no estructuradas. De estos modelos, el FVCOM resultó ser más completo y modular que el ADCIRC, aunque este último mostró sus ventajas al utilizarse para gran cantidad de simulaciones con forzamientos meteorológicos que no admite el FVCOM directamente.

Se estudiaron dos sitios de interés y ante eventos meteorológicos extremos. El primero fue la Laguna de Términos donde estudiamos un Norte ocurrido en febrero de 2010, y donde variamos el nivel medio del mar en intervalos constantes para ver cómo cambian las áreas de inundación. El segundo sitio estaba centrado en las Ciudades de Veracruz y Boca del Río, con especial interés en determinar el peligro al que está expuesta la región en la actualidad ante eventos de huracanes mayores y cómo cambiará esto en un futuro con un aumento medio del nivel del mar de 0.50 m.

El nivel del agua y las condiciones ambientales durante un evento intenso de Norte ocurrido en febrero de 2010 fueron analizadas con base en datos de mediciones de marea y estaciones meteorológicas y mediante simulaciones numéricas usando un modelo hidrodinámico calibrado.

El modelo FVCOM resultó ser una herramienta adecuada para estudiar los cambios en los impactos de la marea de tormenta debido al aumento del nivel del mar por su adecuada representación de las variaciones del nivel del agua durante el evento. El

modelo simuló celdas húmedas y secas, propagación de mareas, y la respuesta al forzamiento atmosférico. El viento del modelo WRF se utilizó para el forzamiento superficial. Las simulaciones realizadas para este estudio cubrieron el período de enero a marzo de 2010, fueron calibradas realizando varias pruebas con diferentes valores de la rugosidad del fondo y validadas con varios conjuntos de datos de nivel del mar observados que tienen una amplia cobertura en espacio y tiempo en la LT.

Los resultados del estudio de caso mostraron que un Norte intenso puede generar una marea de tormenta significativa en el área de la LT inundando grandes zonas, incluyendo la Isla del Carmen, donde se encuentra Ciudad del Carmen. Los cambios en las zonas inundadas y en el nivel del agua debido a la mareas de tormenta se estudiaron en diferentes escenarios de elevación del nivel del mar previstos para finales de este siglo. Los resultados indican que el área de inundación puede crecer en gran proporción alrededor de la LT, incluso en un escenario conservador como RCP6.0. Las zonas inundadas al sur de la LT, actualmente cubiertas por manglares, aumentarán, así como el nivel de agua asociado con la marea de tormenta, dejando a algunas regiones bajo el agua durante períodos prolongados o permanentes. La Isla del Carmen sufrirá inundaciones de mayor nivel, especialmente en su zona central y en la costa sur.

Algunas regiones que actualmente están ocupadas por humedales pueden quedar permanentemente inundadas, mientras que algunas áreas que actualmente están secas se inundarán con frecuencia. Considerando el efecto de Nortes, la frecuencia de las inundaciones en la Isla del Carmen aumentará si el nivel del mar sigue subiendo como se espera, incluso si el número anual y la intensidad de Nortes siguen siendo los mismos que hoy en día. Los resultados de este estudio son importantes para la planificación del desarrollo costero y deberían ser considerados por los tomadores de decisión.

En el caso de estudio de Veracruz, un aumento relativamente pequeño del nivel del mar de 0.50 m puede aumentar considerablemente la amenaza de inundación en caso de eventos extremos. Este cambio puede ser muy diferente para las diferentes regiones

costeras y puede combinarse con otros procesos como la subsidencia para hacer que el peligro sea aún mayor. Por lo tanto, los estudios regionales, como el realizado para Veracruz, deben realizarse en zonas costeras de baja altitud.

La metodología utilizada en este trabajo para estudiar el peligro de inundación causado por la marea de tormenta debido a huracanes en el área de la ciudad de Veracruz y su probable cambio debido al aumento del nivel medio del mar también puede aplicarse a otras regiones del mundo. Es importante avanzar en este estudio incluyendo procesos adicionales que impactan las inundaciones, tales como la precipitación, el desbordamiento de los ríos, el nivel del agua subterránea y la subsidencia para generar escenarios de inundación, todo lo cual proporciona información valiosa. Además, son necesarios estudios que contribuyan a determinar la probabilidad de ocurrencia o el tiempo de retorno de estos eventos.

Bibliografía

Appendini C.M., Torres-Freyermuth A., Salles P., López-González J. and Mendoza E.T., 2014. Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast. *J. Climate*, 27, 1619–1632. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00206.1

Appendini C.M., Hernández-Lasheras J., Meza-Padilla R. and Kurczyn, J.A., 2018. Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics* 51: 3747-3763. DOI: 10.1007/s00382-018-4108-4

Burchard, H. and K. Bolding, 2001: Comparative Analysis of Four Second-Moment Turbulence Closure Models for the Oceanic Mixed Layer. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1943–1968, DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<1943:CAOFSM>2.0.CO;2

Chen C., Liu H. and Beardsley R.C., 2003. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 20, 159–186. DOI: 10.1175/1520-0426(2003)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2

Chen, C., G. Cowles and R. C. Beardsley, 2004. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM User Manual. SMAST/UMASSD Technical Report-04-0601, pp183.

Chen C., Cowles G. and Beardsley R.C., 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual, 2nd ed., SMAST/UMASSD Tech. Rep. 06-0602, 315 pp., School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts- Dartmouth, New Bedford, MA.

Chim L., Sánchez M., Morales A.T., Lastra J., Bañuelos C., Valadez A. and Gutiérrez, U., 2010. Oleaje, inundaciones y cierre de puertos en el Golfo por frente frío 33. Periódico La Jornada, Jueves 25 de febrero de 2010, p. 31. Available at: <http://www.jornada.unam.mx/2010/02/25/estados/031n1est>. (last accessed on July 20, 2019).

Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne A.J., Pfeffer W.T., Stammer D. and Unnikrishnan A.S., 2013. Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M., Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1137–1216, DOI: 10.1017/CBO9781107415324.026

Contreras Ruiz-Esparza A., Douillet P. and Zavala-Hidalgo J., 2014. Tidal dynamics of the Terminos Lagoon, Mexico: observations and 3D numerical modelling. *Ocean Dynamics* 64: 1349. DOI: 10.1007/s10236-014-0752-3

Contreras Ruiz-Esparza A., 2017. Respuesta y vulnerabilidad ante eventos atmosféricos de la Laguna de Términos. Doctoral Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/L58CC5RL51U9V9EH1636FFT4Y5B8M2GBDSG28CAY73XJ2T3B9P-11441?func=full-set-set&set_number=015482&set_entry=000001&format=999 (last accessed on July 20, 2019).

David L.T. and Kjerfve B., 1998. Tides and currents in a two-inlet coastal lagoon: Laguna de Términos, México. *Cont Shelf Res* 18(10):1057–1079. DOI: 10.1016/S0278-4343(98)00033-8

Dawson, C., Ethan J. Kubatko, Joannes J. Westerink, Corey Trahan, Christopher Mirabito, Craig Michoski, Nishant Panda, 2011. Discontinuous Galerkin methods for modeling Hurricane storm surge. *Advances in Water Resources*, Volume 34, Issue 9, Pages 1165-1176, ISSN 0309-1708, 10.1016/j.advwatres.2010.11.004.

Deleersnijder E., 1992. A note on the stability functions of the Mellor-Yamada level 2 1/2 turbulence closure, *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 61, 397-404

Deleersnijder, E., and Beckers, J.M. 1992. On the use of the σ -coordinate system in regions of large bathymetric variations. *Journal of Marine Systems*. Volume 3, Issues 4–5, pages 381-390, DOI: 10.1016/0924-7963(92)90011-V

Deleersnijder, E., and Ruddick, K.G., 1992. A generalized vertical coordinate for 3D marine models. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 61, 489-502

Deleersnijder E., 1993. Vertical modes in level models. *OceanModelling*, 96, 4-5

Díaz-García, O., Zavala-Hidalgo, J., Douillet, P., Contreras Ruiz-Esparza, P., Fichez, R., Grenz, C. y Denis L., 2019. Changes in the flooding area due to storm surge under climate change in an extensive wetland area in the southern Gulf of Mexico. Special issue *Atmósfera*, *Aceptado*.

Dietrich, JC, Zijlema, M., Westerink, JJ, Holthuijsen, LH, Dawson, C., Luettich Jr, RA, Jensen, RE, Smith, JM, Stelling, GS, Stone, GW, 2011. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*, 58(1), pp. 45-65

Dietrich, JC, Westerink, JJ, Kennedy, AB, Smith, JM, Jensen, RE, Zijlema, M., Holthuijsen, LH, Dawson, C., Luettich Jr, RA, Powell, MD and others, 2011. Hurricane

Gustav (2008) Waves and Storm Surge: Hindcast, Synoptic Analysis, and Validation in Southern Louisiana. *Monthly Weather Review*, 139, pp. 2488-2522.

Dukhovskoy, D., Morey, S., 2011. Simulation of the Hurricane Dennis storm surge and considerations for vertical resolution. *Natural Hazards*. Volume 58, Number 1 (2011), 511-540, DOI: 10.1007/s11069-010-9684-5.

García de León, A., 2011. Tierra adentro, mar en fuera. El puerto de Veracruz y su litoral a Sotavento, 1519-1821, México, Fondo de Cultura Económica, Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, 985 p

García-Cuéllar J., Arreguín-Sánchez F., Hernández-Vázquez S. and Lluch-Cota D., 2004. Impacto ecológico de la industria petrolera en la sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia*, 29 (6), 311-319.

Egbert G.D. and Erofeeva S.Y., 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 183–204. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2

Emanuel, K., Ravela, S., Vivant, E., and Risi, C., 2006. A Statistical Deterministic Approach to Hurricane Risk Assessment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 299–314, doi: 10.1175/BAMS-87-3-299.

Emanuel, K., 2006. Climate and Tropical Cyclone Activity: A New Model Downscaling Approach. *J. Climate*, 19, 4797–4802, doi: 10.1175/JCLI3908.1.

Engwirda D., 2014. Locally optimal Delaunay-refinement and optimisation-based mesh generation. Doctoral Thesis, School of Mathematics and Statistics, The University of Sydney. Available at <http://hdl.handle.net/2123/13148>. (last accessed on July 20, 2019).

Fuss S., Canadell J.G., Peters G.P., Tavoni M., Andrew R.M., Ciais P., Jackson R.B., Jones C.D., Kraxner F., Nakicenovic N., Quéré C.L., Raupach M.R., Sharifi A., Smith P. and Yamagata, Y., 2014. Betting on negative emissions. *Nat. Publ. Gr.* 4, 850–853. DOI: 10.1038/nclimate2392

Gill, A.E., 1982: *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Vol. 30. International Geophysics Series, Academic Press, 662 pp.

Gnanadesikan, A., Pacanowski, R. 1997. Improved representation of flow around topography in the GFDL Modular Ocean Model MOM2. *Int. WOCE Newsl.*, 27, pp. 23–25.

Haidvogel, D.B., Beckmann, A. 1998. Numerical models of the coastal ocean. *The Sea*, K. H. Brink and A. R. Robinson, Eds., Vol. 10, John Wiley and Sons, pp. 457–482.

Henry W.K., 1979. Some Aspects of the Fate of Cold Fronts in the Gulf of Mexico. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1078–1082, DOI: 10.1175/1520-0493(1979)107<1078:SAOTFO>2.0.CO;2

Holland, G., 1980. An analytic model of the wind and pressure profiles of hurricanes. *MonthlyWeatherReview*, 108, 1212-1218, DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108%3C1212:AAMOTW%3E2.0.CO;2.

INEGI, 2012. Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR. Available at https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/lidar_alta_resolucion.pdf (last accessed on July 20, 2019)

INEGI, 2016. Censos Económicos 2014. Campeche. Available at: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/CE_2014/702825082628.pdf (last accessed on July 20, 2019)

Jelesnianski, C., Chen, J. and Shaffer, W., 1992. SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes. NOAA Technical Report NWS 48, United States Department of Commerce, NOAA/AOML Library, Miami, Florida, p.71.

Khalil G.M., 1992. Cyclones and storm surges in Bangladesh: Some mitigative measures. *Natural Hazards* 6: 11. DOI: 10.1007/BF00162096

Kjerfve B. and Magill K.E., 1989. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Mar Geol* 88(3–4), 187–199. DOI: 10.1016/0025-3227(89)90097-2

Kuc A.G, Posada G. and Vega B.E., 2015. Evaluación Hidrodinámica en la Laguna de Términos, p 145-166. In: Aspectos socioambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche (Ramos Miranda J., and Villalobos Zapata G.J., Eds.). Universidad Autónoma de Campeche. 210 p. ISBN 978-607-8444-12-0.

Landsea, C., Franklin, J., and Beven, J., 2015. The revised Atlantic hurricane database (HURDAT2). <http://www.nhc.noaa.gov/data/hurdat/hurdat2-format-atlantic.pdf>

Langella G., 2010. Inverse Distance Weighted (IDW) or Simple Moving Average (SMA) INTERPOLATION. In: MathWorks File Exchange. Available at <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27562-inverse-distance-weighted--idw--or-simple-moving-average--sma--interpolation/content/gIDW.m>. (last accessed on July 20, 2019)

Luetlich, R.A., and Westerink, J.J., 1991. A solution for the vertical variation of stress, rather than velocity, in a three-dimensional circulation model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 12, 911-928.

Luna-Lagunes, J. and Zapata-Ronzón, R., 2011. Expertos de Conagua, Conferencia: “Fenómenos meteorológicos que afectan a Veracruz”, dictada en la Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana, México.

Massey, W.G., Gangai, J.W., Drei-Horgan, E. and Slover, K.J., 2007. History of Coastal Inundation Models. *Marine Technology Society Journal*, 41(1), pp.7–17.

Mellor, G.L., Yamada, T., 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. SpacePhys.*, 20, 851-875.

Meza-Padilla, R., Appendini, C. M., Pedrozo-Acuña, A. & González-Villarreal, F., 2015. Evaluación de la marea de tormenta en sitios con escasez de datos: río Pánuco, México. *RIBAGUA - Rev. Iberoam. del Agua* 2, 61–70. DOI: 10.1016/j.riba.2015.09.001

Meza-Padilla, R., Appendini, C. M. & Pedrozo-Acuña, A., 2015. Hurricane induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. *Ocean Dyn.* 65, 1199–1211. DOI 10.1007/s10236-015-0861-7

NCAR, 2009. Mesoscale and Microscale Meteorology Division. *Weather Research and Forecasting ARW: Modelling Systems User’s Guide (version 3)*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, 280 pp.

McInnes K.L. and Hubbert G.D., 2003. A numerical modelling study of storm surges in Bass Strait. *Australian Meteorological Magazine*, 52, pp. 143-156.

Miller, R.J., Schrader, A.J., Sampson, C.R., and Tsui, T.L., 1990. The Automated Tropical Cyclone Forecasting System (ATCF). *Weather and Forecasting*, 5, 653–660, DOI: 10.1175/1520-0434(1990)005<0653:TATCFS>2.0.CO;2.

Mitsch W.J. and Hernandez M.E., 2013. Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquatic Sciences*, 75, pp. 133-149. DOI: 10.1007/s00027-012-0262-7

Murty T.S., Flather R.A. and Henry R.F., 1986. The storm surge problem in the bay of Bengal. *Progress in Oceanography*, 16 (4), pp. 195-233. DOI: 10.1016/0079-6611(86)90039-X

Neri-Flores, I., Escolero-Fuentes, O., Pérez-Torres, S., and Riquer-Trujillo, G., 2014. Inundaciones por agua subterránea en zonas costeras. Caso de estudio: acuífero de Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 247-261.

Neri-Flores, I., Riquer-Trujillo, G., Williams-Linera, F., Leyva-Soberanis, R., Montes-Carmona, M.E., Rivera-Baizabal, R., and Lermo-Samaniego, J., 2012. Zonas de Abastecimiento de agua y albergues temporales en Inundaciones y Terremotos. In: Tejeda Martinez, A. (ed.), *Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz. Vulnerabilidad y Adaptación. La Ciencia en Veracruz*. pp. 455-493. ISBN 978-607-9090-00-5

Ojeda E., Appendini C.M. and Mendoza E.T., 2017. Storm-wave trends in Mexican waters of the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1305-1317. DOI: 10.5194/nhess-17-1305-2017

Pond S., Pickard, G. 1983. *Introductory dynamical oceanography*. 2nd Ed. Butterworth Heinemann.

Reding P.J., 1992. The Central American cold surge: An observational analysis of the deep southward penetration of North American cold fronts. MS thesis, Department of Meteorology, Texas A&M University, USA, 177 pp.

Rey Sánchez, Wilmer, 2017. Evaluación del peligro a la inundación inducida por eventos extremos de tormenta en el norte de la Península de Yucatán. Tesis de

Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: http://oreon.dgbiblio.unam.mx:80/F/JL3L2F6MCUBVQDDUG5AVVM2YU43LPI9E59KJSQ9EXF2D3KQ4N5-32126?func=service&doc_library=TES01&doc_number=000760067&line_number=0001&func_code=WEB-FULL&service_type=MEDIA. (Último acceso el 09 de diciembre de 2019)

Rey W., Salles P., Mendoza E.T., Torres-Freyermuth A. and Appendini C.M., 2018. Assessment of coastal flooding and associated hydrodynamic processes on the south-eastern coast of Mexico, during Central American cold surge events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1681-1701. DOI: 10.5194/nhess-18-1681-2018

Rey, W.; Mendoza, T.E.; Salles, P.; Zhang, K.; Teng, Y.; Miguel, A.; Franklin, G.L., 2019. Hurricane Flood Risk Assessment for the Yucatan and Campeche State Coastal Area. *Nat. Hazards* 2019, 96, 1041–1065. DOI: 10.1007/s11069-019-03587-3

Robadue D., Calderon R., Oczkowski A., Bach L. and Cepeda M.F., 2004. Characterization of the region of the Laguna de Términos Campeche. The Nature Conservancy University of Rhode Island, Corpus Christi, Texas, Mexico.

Rodríguez-Zúñiga T., Troche-Souza C., Vázquez-Lule A.D., Márquez-Mendoza J., Vázquez-Balderas B., Valderrama-Landeros L., Velázquez-Salazar S., Cruz-López M.I., Ressler R., Uribe-Martínez A., Cerdeira-Estrada S., Acosta-Velázquez J. and Díaz C., 2013. Manglares de México, Extensión, Distribución y Monitoreo. México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. ISBN: 978-607-8328-02-4

Saha S., Moorthi S., Pan H., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y., Chuang H., Juang H.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Van Delst P., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., van den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M.,

Zhou S., Higgins W., Zou C., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G. and Goldberg, M., 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015–1058. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1

Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W. and Powers J.G., 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3.0 NCAR Tech. Note. NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

Stanev, E.V. 2005. Understanding Black Sea Dynamics. *Oceanography*, Vol.18, No.2, June 2005.

Temam R., 1984 (fourth edition). *Navier-Stokes Equations: Theory and Numerical Analysis*, American Mathematical Society; UK ed. edition, Reprinted 2000, 408 pp.

Weisberg R.H. and Zheng L.Y., 2008. Hurricane storm surge simulations comparing three-dimensional with two-dimensional formulations based on an Ivan-like storm over the Tampa Bay, Florida region. *J. Geophys. Res.* 113, C12001. DOI: 10.1029/2008JC005115.

Zavala-Hidalgo J., de Buen-Kalman R., Romero-Centeno R. and Hernández-Maguey F., 2011. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 315-334. En: Botello A.V., Villanueva-Fragoso S., Gutiérrez J. and Rojas Galaviz J.L. (eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición)*. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, unam-icmyl, Universidad Autónoma de Campeche. 754 p.

Zheng L., Weisberg R.H., Huang Y., Luettich R.A., Westerink J.J., Kerr P.C., Donahue A.S., Crane G. and Akli L., 2013. Implications from the comparisons between two- and three-dimensional model simulations of the Hurricane Ike storm surge. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 350–3369. DOI: 10.1002/jgrc.20248