



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
(CAMPO CONOCIMIENTO) – (CAMPO DISCIPLINARIO)

**CARACTERIZACIÓN DE MAREA DE TORMENTA E
INUNDACIÓN BAJO HURACANES Y CAMBIO CLIMÁTICO
(ESCENARIO RCP 8.5) EN MANZANILLO, COLIMA.**

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

PRESENTA:
PABLO RUIZ SALCINES

TUTORES PRINCIPALES
Dr. CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN, INSTITUTO DE INGENIERIA
Dr. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA, INSTITUTO DE INGENIERIA

COMITÉ TUTOR
Dr. ADRIAN PEDROZO ACUÑA, INSTITUTO DE INGENIERIA
Dr. ALEC TORRES FREYERMUTH, INSTITUTO DE INGENIERIA
Dr. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERIA

Sisal, Yucatán.

Diciembre 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

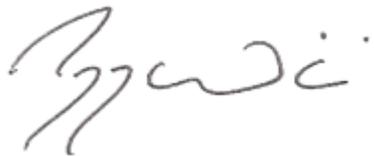
JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles
Secretario: Dr. Adrián Pedrozo Acuña
1^{er} Vocal: Dr. Paulo Salles Afonso De Almeida
2^{do} Vocal: Dr. Alec Torres Freyermuth
3^{er} Vocal: Dr. Christian Mario Appendini Albrechtsen

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: SISAL, YUCATÁN, MÉXICO

COTUTOR DE TESIS:

Dr. CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN



COTUTOR DE TESIS:

Dr. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA



“Es peligroso cruzar tu puerta. Pones un pie en el camino, y si no cuidas tus pasos, nunca sabes hasta dónde te pueden llevar.”

Resumen

Este estudio presenta un nuevo enfoque para evaluar el riesgo a inundación asociada a marea de tormenta de ciclones tropicales bajo escenarios de cambio climático. Se realiza el cálculo directo de los niveles de inundación local utilizando un número limitado de eventos con una probabilidad de ocurrencia asociada. El enfoque se basa en la generación del cuasi-peor escenario de inundación asociado con una probabilidad de ocurrencia conocida de la intensidad de viento de los ciclones tropicales. El método es aplicado en la localidad de Manzanillo, Colima, México utilizando ciclones tropicales sintéticos derivados de seis diferentes Modelos de Circulación Global, tanto para el clima presente como futuro bajo el escenario de emisiones de efecto invernadero (Representative Concentration Pathway 8.5, RCP 8.5, 2100). Los eventos sintéticos permitieron caracterizar la intensidad del viento para los climas presentes y futuros, y para períodos de retorno específicos, así como para determinar los parámetros clave de los ciclones tropicales relacionados con la marea de tormenta. Con base en las mediciones del huracán Patricia (2015), el ciclón tropical más intenso que ha impactado la región, se determinó que la intensidad máxima del viento que presentó fue de 95 m/s que corresponde a un período de retorno superior a 4000 años para el clima actual y de 198 años en el escenario climático futuro (RCP 8.5, 2100). Se crearon 211 eventos hipotéticos utilizando la intensidad máxima del viento del huracán Patricia, los cuales representan las posibles características (trayectoria, presión mínima, radio máximo y velocidad de translación) con las que un ciclón tropical puede arribar a Manzanillo. Posteriormente, se forzó un modelo hidrodinámico con los eventos hipotéticos sobre una malla computacional con topografía LiDAR para obtener la marea de tormenta y generar el cuasi-peor escenario de inundación basado en las envolventes de máximos de niveles agua (*Maximum Envelope of Water* MEOW) para cada evento y el máximo de cada MEOW. Utilizando esos resultados, se crearon mapas de riesgo de inundación a nivel de manzana urbana basados en la combinación de mapas de peligro de inundación y vulnerabilidad socioeconómica. El método presentado proporciona una herramienta para la evaluación de riesgos de la zona costera ante amenazas de marea de tormenta tropicales al generar mapas de inundación en el cuasi-peor de los casos bajo climas proyectados utilizando un conjunto limitado de eventos hipotéticos.

Palabras clave: Ciclones tropicales; marea de tormenta; cambio climático; eventos sintéticos; tormentas hipotéticas; peligros naturales; política pública; gestión de riesgos; atlas de riesgos; Manzanillo.

Abstract

This study presents a new approach to assess storm surge risk from tropical cyclones under climate change by direct calculation of the local flood levels using a limited number of events with an associated probability. The approach is based on the near-worst-case flood scenario, associated with a known tropical cyclone wind intensity probability. We applied the method for the locality of Manzanillo, Colima, Mexico, using synthetic tropical cyclones derived from six different General Circulation Models for the present and future climate (Representative Concentration Pathway 8.5, RCP 8.5, 2100). The synthetic events allowed the characterization of the wind intensity for the present and future climates for a given return period, as well as determining the key tropical cyclones parameters related to storm surge. For Hurricane Patricia (2015), the strongest tropical cyclone to impact the region, we determined that its 95 m/s maximum winds have a return period above 4000 years for the present climate and 198 years in a future climate scenario (RCP 8.5, 2100). Using hurricane Patricia's peak wind intensity, we created 211 hypothetical events representing the possible tropical cyclone characteristics (trajectory, minimum pressure, maximum radius of winds and speed of translation) with which a tropical cyclone can arrive at Manzanillo. We then forced a hydrodynamic model with the hypothetical events over a mesh created with LiDAR-derived topography and calculated the storm surge to create the near-worst-case flood scenario based on the Maximum Envelope of Water (MEOW) and the maximum of MEOWs. Using those results, we created flood risk maps at city block level based on the combination of flood hazard and socioeconomic vulnerability maps. The presented method provides a tool for tropical cyclones storm surge hazard and risk assessment by generating near-worst-case flood maps under projected climates using a limited set of hypothetical events.

Keywords: Tropical cyclones; storm surge; climate change; synthetic events; hypothetical storms; natural hazards; public policy; risk management; risk atlas.

Dedicatoria

Para Ara y mi pequeño Zirán...

Agradecimientos

Quisiera agradecer el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), al proyecto del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera 299063 y CEMIE-Océano OLE-1.

Quiero agradecer al profesor Kerry Emanuel por proporcionar los eventos sintéticos utilizados en este estudio. Al Departamento de Oceanografía de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) quien amablemente proporcionó los datos de batimetría empleados. Agradezco el apoyo de NVIDIA Corporation para la donación de la GPU Tesla K40 utilizada para esta investigación. Así mismo quiero agradecer el apoyo de cómputo de Gonzalo Uriel Martin Ruiz.

Quisiera dar una mención especial a Christian Appendini por el apoyo y confianza puesta en mí en este y los varios estudios realizados en paralelo a este trabajo, esperando que dicha colaboración siga creciendo y a Wilmer Rey Sánchez, por su amistad dentro y fuera del mundo de la investigación.

Finalmente el agradecimiento más importante va a mi familia, por siempre estar ahí, y animarme a terminar. Sin ellos nada tiene sentido.

Artículos relacionados con este trabajo

- **Ruiz-Salcines, P.**, Ruiz-Salcines P, Appendini CM, Salles P, Rey, W, Vigh, JL, 2020. **On the use of synthetic tropical cyclones and hypothetical events for storm surge assessment under climate change.** Nat Hazards (2020). doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04318-9>
- Rey, W., Martínez-Amador, M., Salles, P., Mendoza, E.T., Trejo-Rangel, M.A., Franklin, G.L., **Ruiz-Salcines, P.**, Appendini, C.M., Quintero-Ibáñez, J., 2020. **Assessing Different Flood Risk and Damage Approaches: A Case of Study in Progreso, Yucatan, Mexico.** J. Mar. Sci. Eng. 8, 137. <https://doi.org/10.3390/jmse8020137>
- Rey W., Julio Monroy J., Quintero-Ibáñez J., Escobar Olaya G. A., Salles P., **Ruiz-Salcines, P.**, Appendini, C.M. 2019. **Evaluación de áreas susceptibles a la inundación por marea de tormenta generada por ciclones tropicales en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia.** Boletín Científico CIOH, 38(2). 36-43 <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.465>.
- **Ruiz-Salcines, P.**, Salles, P., Robles-Díaz, L., Díaz-Hernandez, G., Torres-Freyermuth, A., Appendini, C.M., 2019. **On the use of parametric wind models for wind wave modeling under tropical cyclones.** Water 11, 2044. <https://doi.org/10.3390/w11102044>
- Rey, W., Salles, P., Torres-Freyermuth, A., **Ruiz-Salcines, P.**, Teng, Y., Appendini, C.M., Quintero-Ibáñez, J., 2019. **Spatiotemporal Storm Impact on the Northern Yucatan Coast during Hurricanes and Central American Cold Surge Events.** J. Mar. Sci. Eng. 8, 2. <https://doi.org/10.3390/jmse8010002>
- Appendini, C.M., Pedrozo-Acuña, A., Meza-Padilla, R., Torres-Freyermuth, A., Cerezo-Mota, R., López-González, J., **Ruiz-Salcines, P.**, 2017. **On the Role of Climate Change on Wind Waves Generated by Tropical Cyclones in the Gulf of Mexico.** Coast. Eng. J. 59, 32. <https://doi.org/10.1142/S0578563417400010>

Índice

Resumen	iv
Abstract.....	vi
Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos	viii
Artículos relacionados con este trabajo	ix
Índice de Tablas	xii
Índice de Figuras.....	xiii
Lista de acrónimos	xv
Capítulo 1.....	1
1.1. Motivación	6
1.1.1. Científica.....	6
1.1.2. Ingenieril	7
1.1.3. Social.....	8
1.2. Revisión de investigaciones existentes	8
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo general.....	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Estructura del documento	11
Capítulo 2.....	12
Capítulo 3.....	15
3.1. Caracterización del peligro	16
3.1.1. Caracterización de ciclones tropicales para climas presentes y futuros. 16	
3.1.2. Ciclones tropicales hipotéticos.....	21

3.1.3. Modelado matemático.....	23
3.1.3.1. Campos de vientos y presión	25
3.1.3.2. Malla computacional.....	26
3.1.3.3. Configuración del modelo.....	27
3.1.4. Evaluación de peligro de inundación	30
3.1.5. Evaluación de vulnerabilidad.....	31
3.1.6. Evaluación de riesgo de inundación.....	32
Capítulo 4.....	34
4.1. Validación de eventos sintéticos.....	34
4.2. Evaluación de ciclones tropicales bajo el calentamiento global	37
4.3. Peligro de inundación por marea de tormenta en la ciudad de Manzanillo	41
4.3.1. Otros factores de peligro de inundación por marea de tormenta	46
4.3.2. Comparación con otras metodologías en México	50
4.3.3. Influencia de los parámetros principales de los CT sobre la inundación en Manzanillo.	52
4.3.4. Análisis de escenarios (Casos) necesarios en la generación del quasi- peor escenario de inundación.	54
4.4. Vulnerabilidad y riesgo de marea de tormenta tropical en la ciudad de Manzanillo	57
Capítulo 5.....	60
Anexo I	64
Bibliografía.....	65

Índice de Tablas

Tabla 1. Número de eventos y frecuencia anual de ciclones tropicales históricos (1970-2018) en la cuenca del Pacífico Nororiental (PNO) y que ocurren en un área circular con un radio 222 km desde Manzanillo (Manz), y que tocan tierra a menos de 100 km de Manzanillo. CT: ciclones tropicales, TS: tormentas tropicales, H: número total de huracanes, H1-2:= CT menores, H3-5: CT mayores, H5: CT de categoría 5..... 13

Tabla 2. Resolución horizontal promedio de los modelos de reanálisis y MCGs utilizados para el metodología de reducción dinámica de escala y número de eventos sintéticos empleados en este estudio. 19

Tabla 3. Coeficiente de Manning inverso ($1/n$) asignado a cada uso del suelo y grupos de zonas de usos del suelo para el análisis de la inundación y área cubierta (ha) limitada a la curva de nivel de 13 m y longitudes de 104.44 y -104.2393. 29

Tabla 4. Indicadores de vulnerabilidad socioeconómica. 32

Tabla 5. Clasificación de categorías de peligro de inundación, vulnerabilidad y riesgo. 33

Tabla 6. Características de las CT para los cinco escenarios (Casos) que componen el quasi-peor escenario de inundación analizado 43

Tabla 7. Clasificación de categorías de peligro por velocidad de la corriente, duración de la inundación y tasa de incremento de la inundación. 47

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Área de estudio.</i>	14
<i>Figura 2. Diagrama de flujo para la evaluación del clima de CT y análisis de peligro de inundación para clima presente y futuro mediante modelación de eventos sintéticos e hipotéticos con periodo de retorno conocido.</i>	16
<i>Figura 3. Trayectoria y entradas a tierra del huracán Marty (EP132003). Los puntos de color verde/rojo muestran aquellas entradas a tierra consideradas/no consideradas.</i> ..	21
<i>Figura 4. Ejemplo de eventos hipotéticos generados sobre la ciudad Manzanillo, Colima, México.</i>	22
<i>Figura 5. (A) Malla computacional de todo el dominio y (B) zoom sobre el área de Manzanillo.</i>	27
<i>Figura 6. Distribución especial de usos del suelo y curva de nivel 13 m (línea en color blanco).</i>	30
<i>Figura 7. Frecuencia relativa del viento máximo de los (A) ciclones tropicales en el noreste del Pacífico y (B) aquellos dentro de un área de radio 222km alrededor de Manzanillo.</i>	35
<i>Figura 8. (A) Periodo de retorno en función de la velocidad del viento para los eventos históricos, y eventos derivados de reanálisis y climas presentes y futuros. (B) Radio máximo, R_{max} y (C) velocidad de translación de los CT, en función de V_{max}. Las regiones sombreadas representan la desviación estándar ± 1 (A) y los intervalos de confianza del 95% y 5% (B-C).</i>	37
<i>Figura 9. (A-B) tasa de cambio en la frecuencia relativa de la velocidad máxima del viento durante la vida del evento para los ciclones tropicales (A) ciclones tropicales en el noreste del Pacífico y (B) aquellos dentro de un área de radio 222km alrededor de Manzanillo bajo el escenario RCP 8.5 para 2075-2100. Cambio del Índice de disipación de potencia (PDI; m^3s^{-2}) promediado entre los 6 modelos calculado sobre una malla de celdas de 0.5°.</i>	39
<i>Figura 10. (A-B) Tasa de cambio en la frecuencia relativa de entradas a tierra de CT entre el clima presente y futuro de los (A) ciclones tropicales en el noreste del Pacífico y (B) aquellos dentro de un área de radio 222 km alrededor de Manzanillo. (C) Cambio del Índice</i>	

<i>de disipación de potencia (PDI; m^3s^{-2}) en el momento de entrada a tierra, agrupado por estados mexicanos y normalizado por la longitud de la línea de costa de cada estado.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 11. Distribución espacial de (A) profundidad de inundación de CT (m) y (B) categorización de peligro de inundación asociado.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Porcentaje de áreas inundadas por categoría de peligro y uso de la tierra con respecto al área total de cada uso de la tierra por debajo de 13 m de altura.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13. Distribución espacial de (A) Tiempo de permanencia de la inundación (horas) (B) Velocidad de la corriente (C) Tasa de aumento del agua (m/h) y (D-E-F) categorización de peligro de inundación asociado respectivamente.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 14. Porcentaje de áreas inundadas por categoría de peligro y uso de la tierra con respecto al área total de cada uso de la tierra por debajo de 13 m de altura.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 15. Distribución espacial de inundaciones por marea de tormenta derivada según APREC (2015) (metodología CENAPRED, 2006) para CT con Categoría 3 (polígono color verde con transparencia) y para el escenario basado en el huracán Patricia (2015) (Categoría 5, color cian) y curvas de nivel de 5.4 m (verde), 7 m (azul) y 15.7 m (rojo). Nota: APREC (2015) solo muestra las áreas propensas a inundarse de zonas urbanas.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 16. Áreas inundadas por uso del suelo de los eventos de cada escenario cuyo centro de la tormenta (ABC) y cuyo R_{max} (DEF) pasa por Manzanillo según la dirección de aproximación al punto de interés.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 17. Diferencia entre la distribución espacial de la inundación del quasi peor escenario y: (A) Caso 1 ($V_{tr} = 7$ m/s y $R_{max} = 9.26$ km); (B) Caso 2 ($V_{tr} = 4$ m/s y $R_{max} = 9.26$ km); (C) Caso 3 ($V_{tr} = 7$ m/s y $R_{max} = 20$ km); (D) Caso 4 ($V_{tr} = 4$ m/s y $R_{max} = 20$ km); (E) Caso 5 ($V_{tr} = 4$ m/s y $R_{max} = 40.45$ km). En color blanco se muestran las áreas de la inundación aportadas a la distribución final de la inundación por cada Caso y en color magenta las áreas no inundadas por el Caso y si presentes en la distribución final de la inundación del quasi-peor escenario analizado.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 18. Distribución espacial para manzanas urbanas de (A) peligro de inundación de CTs, (B) vulnerabilidad socioeconómica (C) riesgo de inundación de CTs y (D) porcentaje del número de manzanas urbanas y área cubierta inundada por categoría de peligro (arriba), vulnerabilidad (medio) y riesgo (abajo). Las áreas de color blanco corresponden a bloques de ciudades inundadas sin vulnerabilidad socioeconómica.</i>	<i>58</i>

Lista de acrónimos

AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC
CCSM-4	The National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model Version 4
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CFL	Courant-Friedrich-Lewy condition (Número de Courant)
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CMIP5	CMIP Phase 5
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CT	Ciclones tropicales
ERINT	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) atmospheric reanalysis ERA-Interim
EST	Técnica de Simulación Empírica
GFDL-3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model 5
GIS	Sistemas de Información Geográfica
HADGEM-2	The UK Met Office Hadley Global Environmental Model 2 – Earth System
HURDAT2	HURricane DATa 2nd generation
INEGI	Instituto Nacional de Geografía, Geografía e Informática
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático
IPSL-5	The Institut Pierre Simon Laplace CM5A-LR
JPM	Método de probabilidad conjunta
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
NHC	Centro Nacional de Huracanes
NWS	Servicio Meteorológico Nacional
MCG	Modelos de circulación global
MEOW	Maximum Envelope of Water (Envolvente de máximos de nivel de agua)
MERRA-2	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
MIROC-5	The Center for Climate System Research / National Institute for Environmental Studies/Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Model for Interdisciplinary Research on Climate
MoM	Máximo de los MEOW
MPI	The Max Plank Institute MPI-ESM-MR
PDI	“Power dissipation index” (Índice de disipación de potencia)

PEMEX	Petróleos Mexicanos
P_n	Presión ambiental
P_o	Presión central (Presión mínima)
PNO	Cuenca del Pacífico Oriental
PR	Periodo de retorno
RCP	Escenarios de emisiones de efecto invernadero
R_{max}	Radio de vientos máximos
V_f	Velocidad del flujo
V_{max}	Velocidad máxima del viento
V_{tr}	Velocidad de translación

Capítulo 1

Introducción

México, en sus cuatro vertientes, Golfo de México y Caribe, Pacífico Tropical, Golfo de California y Costa occidental, cuenta con más de 11,000 km de línea de costa, incluidos más de 500 rasgos morfológicos interconectados o aislados (lagunas, bahías, esteros, estuarios y marismas), aproximadamente 231,810 km² de mar territorial y 3,149,920 km² de zona económica exclusiva (INEGI 1991).

En las zonas costeras viven más de 17 millones de personas y han tenido un desarrollo significativo durante los últimos años tanto desde el punto de vista social, con infraestructura turística y habitacional, como económico, con desarrollos industriales y portuarios, aprovechamiento de recursos pesqueros, explotación de zonas petrolíferas, etc. Además, las zonas costeras tienen un alto ambiental, ya que sirven de hábitat y zona de anidamiento para múltiples especies, son un filtro de las descargas de las cuencas continentales, y proveen de diversos servicios ecosistémicos.

Estas zonas costeras están sujetas a diferentes amenazas naturales y antropogénicas tales como contaminación hídrica, erosión costera, derrames de hidrocarburos, inundaciones fluviales y costeras, tsunamis; siendo que algunas de estas pueden intensificarse debido al cambio climático.

Los ciclones tropicales (CT) son uno de los principales fenómenos naturales que afectan a México, ya que el país se encuentra entre dos áreas de ciclogénesis, las cuencas del Atlántico y el Pacífico Norte Oriental (PNO). El número de eventos extremos de este tipo durante el período de 1970 a 2018 en ambas vertientes costeras mexicanas ha sido elevado: en el Atlántico se presentaron 799 tormentas y depresiones tropicales, 234 huracanes menores (categoría 1 a 2) y 121 huracanes mayores (categoría 3 a 5), y en el PNO se presentaron 1177 tormentas y depresiones tropicales, 292 huracanes menores y 315 huracanes mayores. Mientras que los CT en la cuenca del Atlántico afectan a un gran número de países, los CT de PNO afectan principalmente a México, representando una amenaza considerable, ya que la PNO es la segunda cuenca más activa del mundo y la que cuenta con mayor número de eventos por unidad de área.

Aunque muchos CT del PNO viajan hacia el oeste de México una vez que se forman, varios tocan tierra en el territorio nacional. Las entradas a tierra tienden a ocurrir en la costa del Pacífico mexicano cada uno o dos años, a veces con consecuencias devastadoras. Por ejemplo, en 1959 un huracán (sin nombre) causó más de 1500 muertes (Jáuregui 2003) y en 1982 el huracán Paul causó 1,625 muertes (Gunther et al. 1983). Más recientemente, en 2013, el huracán Manuel causó 123 muertes y causó daños por 4200 millones de dólares, estableciendo un nuevo récord de pérdidas económicas en el PNO (Pasch and Zelinsky 2013). Dos años más tarde, la intensificación rápida extrema del huracán Patricia (2015) y su alta intensidad adquirida rompieron varios récords, tales como el mayor cambio de intensidad en 24 h jamás registrado (105 kt) y la presión mínima, también la más baja registrada en el hemisferio occidental (872 hPa), empató con Super Typhoon Nancy (1961) como el CT más intenso del mundo (185 kt, según la base de datos llamada “Best Track”). Incluso después de debilitarse rápidamente, Patricia también se convirtió en el CT más intenso en tocar tierra en la costa del Pacífico mexicano (Kimberlain et al. 2016; Rogers et al. 2017). Así, los altos impactos de los CT a lo largo de la costa del Pacífico de México justifican estudios adicionales para comprender mejor sus diversos peligros y los riesgos asociados.

Los CT desempeñan un papel destacado en la generación de precipitaciones extremas en diferentes partes del mundo (Khouakhi et al. 2017, 2020) siendo la amenaza natural más importante y costosa en México, ya sea debido a inundaciones tierra adentro o deslizamientos de tierra relacionados (Pedrozo-Acuña et al. 2014). Sin embargo, la marea de tormenta se ha convertido en un peligro cada vez más relevante en las zonas costeras como resultado de la considerable exposición de la infraestructura, resultante del aumento de los desarrollos costeros en México. Además del crecimiento esperado de la exposición debido a la presión demográfica en las zonas costeras, el calentamiento global antropogénico plantea amenazas adicionales, ya que existe consenso con relación a que habrá huracanes más frecuentes de categorías altas debido al calentamiento global (Bender et al., 2010; Christensen et al., 2013; Elsner et al., 2008; Emanuel, 2013; Holland y Bruyère, 2014; Kang y Elsner, 2015; Knutson et al., 2010; Kossin et al., 2020).

Las proyecciones del aumento del nivel del mar también afectan a los peligros de huracanes en las comunidades costeras (Atkinson et al. 2013; Díaz-García et al. 2020). Dado que el solo aumento en la frecuencia de huracanes mayores aumenta la probabilidad de

desastres, es relevante el estudio de los peligros futuros y el riesgo de marea de tormenta debido al calentamiento global, incluso si el crecimiento de la población y la infraestructura se estanca.

La marea de tormenta asociada a CT es entendida como el aumento del nivel del mar en aguas costeras poco profundas ante la presencia de una frontera terrestre, provocado por la fricción del viento en la superficie y la disminución de la presión atmosférica, crea una compleja relación entre las características de los eventos y las características geográficas del lugar (geometría de la costa, batimetría y topografía cercana a la costa, etc.).

Se han desarrollado varios métodos para evaluar la distribución de probabilidad de mareas de tormenta. Estos incluyen el uso de eventos de tormenta de diseño, análisis paramétrico de tormentas históricas y técnicas estadísticas avanzadas como la Técnica de Simulación Empírica (EST) (Scheffner et al. 1996) y el Método de Probabilidad Conjunta (JPM) (Ho and Myers 1975; Myers 1975).

El objetivo de JPM es eliminar el problema relacionado con datos históricos insuficientes, ya que este método genera eventos sintéticos considerando una gran cantidad de combinaciones de parámetros clave de tormenta en tierra o regiones vecinas (Toro et al. 2010). El JPM posee la ventaja de considerar todas las tormentas posibles que sean consistentes con la climatología local. Entre sus desventajas se incluye un gran gasto computacional requerido para la generación y la modelación hidrodinámica de la gran cantidad de eventos necesarios, así como el problema de que la frecuencia estimada de eventos de alta intensidad es sensible a cómo se modela la cola de la distribución de probabilidad (Lin et al. 2013).

Para superar las limitaciones del JPM, algunos enfoques optimizan la selección de combinaciones de parámetros para elegir un número mínimo de tormentas (Legg et al. 2010; Toro et al. 2010; Apivatanagul et al. 2011). Aun así, tales técnicas de optimización dependen en gran medida de las observaciones históricas de tormentas y mareas de tormenta, que a menudo son insuficientes en un lugar en particular y no pueden tomar en cuenta los efectos del cambio climático en los futuros CT.

Para considerar el cambio climático, Lin et al. (2010) desarrollaron un método para la obtención del peligro por marea de tormenta que utiliza modelos hidrodinámicos forzados por CT sintéticos derivados con un modelo estadístico/determinista (Emanuel et al. 2006,

2008). Este método permite la generación de grandes cantidades de eventos sintéticos en lugares específicos que incluyen los efectos del cambio climático en la intensidad futura de los CT. Lin et al. (2012) emplearon CT sintéticos generados bajo cuatro Modelos de Circulación Global (MCG) para forzar modelos hidrodinámicos y crear una base de datos de alturas de marea de tormenta para la costa de la ciudad de Nueva York, que luego fue utilizada por Aerts et al. (2013) para crear mapas de riesgo mediante modelos de riesgo de inundación. Si bien este método permite caracterizar la marea de tormenta en los escenarios de cambio climático presentes y futuros, requiere el modelado de marea de tormenta de una gran cantidad de eventos. Debido a la alta resolución necesaria para describir con precisión las áreas inundadas, en particular áreas urbanizadas, los costos computacionales pueden restringir los eventos a un número que sea menor a lo óptimo para una evaluación precisa del peligro o bien resolver las áreas propensas a la inundación mediante el empleo de métodos basados en Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Los GIS se basan en la identificación del terreno con una cota menor que el nivel de marea de tormenta obtenida sobre la costa y son habitualmente empleados en la literatura (e.g. Aerts et al., 2013). Sin embargo esta aproximación implica obviar factores que afectan la hidrodinámica como la fricción del fondo, la dirección del flujo del fluido o las barreras estructurales, además ignora la conectividad hidráulica haciendo que las depresiones del terreno que no están conectadas al área de inundación puedan considerarse inundadas, lo que finalmente puede conducir a una sobreestimación en la extensión de la inundación (Seenath et al. 2016).

Otro método para evaluar la amenaza de marea de tormenta es forzar un modelo hidrodinámico utilizando CT hipotéticos basados en diferentes intensidades, velocidades de translación y direcciones de movimiento. El Centro Nacional de Huracanes (NHC) del Servicio Meteorológico Nacional (NWS) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) utiliza este método para proporcionar mapas de inundación (Zachry et al. 2015), que luego son utilizados como herramientas de gestión para la planificación, rutas de evacuación y toma de decisiones. Para hacerlo, se modelan las mareas de tormenta de CT potenciales y sus profundidades de inundación asociadas para el conjunto de CT hipotéticos, los cuales cubren todas las direcciones posibles de translación y parámetros clave de los CT. La envolvente de nivel máximo de agua, o MEOW (Maximum Envelope Of Water) se

compone de la marea de tormenta en cada celda de la malla, basada en un gran conjunto de tormentas de una intensidad de viento dada con diferentes tamaños y velocidades de translación, pero con una sola dirección de movimiento (con varias trayectorias de tormenta paralelas) y un nivel de marea inicial (NHC 2014a).

Los MoMs (Maximum of Maxima) o máximo de máximos, son el conjunto de MOEWs para todas las tormentas de una categoría dada, considerando todas las direcciones de movimiento, tamaños de tormenta y velocidades de avance, para un nivel de marea dado (NHC 2014b) y representan el cuasi-peor escenario (o escenario más desfavorable) en este estudio. Los MoMs son utilizados para crear mapas de peligro de inundación, proporcionando una información más directa sobre la distribución del peligro que otras formas de presentación (Merz et al. 2007). Los mapas de peligro de inundación resultantes son un elemento esencial de las estrategias de gestión del riesgo, tales como comunicación del riesgo (De Bruijn y Klijn, 2009; Merz et al., 2010; Morrow et al., 2015) y la planificación del uso del suelo y desarrollo urbano o de inversión (Merz et al. 2007).

Rey et al. (2019) utilizaron el método del NHC para determinar los mapas de inundación de CT basados en productos MoM para los estados de Yucatán y Campeche, México, y los combinó con un mapa de vulnerabilidad para obtener mapas de riesgo. Aunque el método NHC es útil para procesos de planificación, estudios de evaluación de riesgos, toma de decisiones y planificación de evacuación, no proporciona información sobre los períodos de retorno asociados con los MEOWs o los MoMs. En este estudio se elimina esta limitante mediante el uso de eventos sintéticos para estimar las probabilidades asociadas con los eventos hipotéticos.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar mapas de distribución espacial asociados a los cuasi-peor-escenarios de peligro de inundación por marea de tormenta de CT, al tiempo que asocia una probabilidad de ocurrencia (período de retorno) a los MEOW y MOM bajo proyecciones de cambio climático. Además, el método tiene como objetivo utilizar un número limitado de eventos hipotéticos para simular de manera eficiente la marea de tormenta y las inundaciones terrestres. Esto se logra mediante la creación de escenarios, compuestos de eventos hipotéticos basados en un ensamble de parámetros clave de CT, obtenidos a partir de eventos sintéticos generados por diferentes MCGs en el clima presente y climas futuros bajo escenarios de emisiones de efecto invernadero (Moss et al. 2010).

El método propuesto fue aplicado a la ciudad de Manzanillo con el fin de demostrar que es posible crear mapas de riesgo de inundación por marea de tormenta útiles mediante la combinación de mapas de peligro con indicadores de vulnerabilidad socioeconómica a nivel de manzana urbana. Así, este estudio proporciona un nuevo método para estimar los efectos del cambio climático en las inundaciones por marea de tormenta a nivel local bajo periodos de retorno específicos de los CT.

1.1. Motivación

1.1.1. Científica

Desde 2005 las emisiones globales totales de gases de efecto invernadero han seguido de cerca el peor escenario (RCP 8.5) dado por el IPCC en el informe AR5.

El informe de impactos y vulnerabilidad del IPCC (2014) establece “Baja confianza en los cambios a largo plazo (centenarios) en la actividad de los ciclones tropicales, después de tener en cuenta los cambios pasados en las capacidades de observación” y “Baja confianza en las proyecciones de tormentas específicas de cada región y mareas de tormenta asociadas”. Sin embargo, existe consenso de que habrá huracanes mayores más frecuentes debido al calentamiento global aunado con un aumento del nivel del mar (“la elevación del nivel medio global del mar continuará durante el siglo XXI, y es muy probable que ocurra a un ritmo más rápido que el observado entre 1971 y 2010”). Todo ello hace que sea importante evaluar la influencia del cambio climático sobre la marea de tormenta de CT y sus peligros asociados.

Este estudio presenta un nuevo método para determinar el peligro de inundación por CT bajo el clima presente y escenarios futuros con el objetivo de mejorar el entendimiento del efecto del calentamiento global sobre los CT, la marea de tormenta asociada y la inundación resultante. Esto se realiza para eventos con un periodo de retorno (PR) conocido a nivel local, mediante el modelado hidrodinámico de inundación de un número limitado de eventos. El método se basa en la generación de escenarios de inundación basados en CT sintéticos, los cuales permiten abordar la baja resolución de los campos de viento de CT y su baja presencia en modelos globales, a fin de proporcionar estimaciones más precisas de las mareas de tormenta derivadas. A su vez, el método permite diferentes análisis sobre la

influencia de los parámetros principales de los CT o la fricción del fondo sobre la marea de tormenta y la inundación.

Por lo tanto, la motivación científica de este trabajo es allanar el camino hacia una mejor comprensión de los efectos del cambio climático sobre los CT e inundaciones asociadas a nivel local.

1.1.2. Ingenieril

La determinación del peligro de inundación por marea de tormenta es uno de los pasos básicos para la estimación del riesgo por CT. A su vez, el diseño de estructuras costeras requiere estimar la cota del terreno donde se debe situar la estructura para evitar las afecciones por inundación asociada a los CT, considerando una vida útil determinada. La cota de inundación generalmente se deriva de mediciones, aproximaciones paramétricas o simulaciones hidrodinámicas basadas en las condiciones climáticas actuales. Sin embargo, los efectos del cambio climático se estiman en marcos de tiempo inferiores a 100 años (medio plazo es considerado como mediados del siglo XXI) quedando englobados dentro de la vida útil promedio de una estructura costera de carácter general (Losada 2001).

Con base en lo anterior, y dentro del contexto de cambio climático, se generan las siguientes preguntas: ¿Los actuales métodos de estimación de peligro de inundación por CT basados en datos históricos son válidos para condiciones a mediano y largo plazo?, ¿Podemos esperar que una estructura diseñada bajo el clima actual resista las condiciones climáticas futuras que se esperan para fines de siglo o incluso para mediados de siglo? Si el calentamiento global aumenta la frecuencia de los huracanes mayores, como algunos estudios han sugerido, la suposición no estacionaria en los parámetros climáticos para el diseño de estructuras de ingeniería ya no es válida, por lo que es probable que las estructuras diseñadas bajo el clima actual sufran daños por marea de tormenta antes del final de su vida útil, y que aumenten las zonas con peligro de inundación por CT.

Los métodos actuales para estimar el peligro de inundación por marea de tormenta en áreas locales bajo climas proyectados requieren la simulación hidrodinámica de gran cantidad de eventos con un coste computacional muy elevado. La motivación ingenieril para este estudio es dotar de un método que permita obtener el peligro de inundación bajo climas proyectados para mejorar de las estimaciones de parámetros de diseño de la infraestructura

costera o cercana a la costa o el diseño de estructuras de protección o mitigación de las inundaciones con un coste computacional reducido.

1.1.3.Social

México sigue las tendencias mundiales de dinámica poblacional con un desplazamiento de las poblaciones hacia zonas costeras. En el año 2010 la población de los estados costeros fue de 51,577,111 habitantes (46.20%), casi 6 millones más que en el año 2000 y se espera que para el año 2030 aumente a 58 millones. En los 155 municipios costeros (*i.e.* con acceso directo al mar) la población aumentó de 14.6 millones a 17.5 millones durante el período 2000-2010 (Muñoz Sevilla et al. 2019) y, según lo definido por la Política Nacional para los Mares y Costas de México, la población creció 33.4% de 1995 a 2005, mientras que la población de los municipios urbanos aumentó 44.9% (CIMARES-SEMARNAT 2011). A su vez, en los estados costeros, las actividades relacionadas con la costa representan 80% de la actividad económica y estos aumentaron su contribución al Producto Interior Bruto del país en 17.4% en el período 2006-2013.

Por lo tanto, se prevé que el daño económico de los CT y las afectaciones sociales se incrementarán a lo largo de este siglo como resultado del aumento de la población e infraestructura costera, junto con el peligro creciente asociado a los CT (Mendelsohn et al. 2012; Houser et al. 2014). La motivación social de este estudio es dotar de una herramienta para generar información más precisa del peligro de inundación por CT en climas futuros. Esta información puede ser empleada en mejorar los atlas de riesgos y por ende mejorar las herramientas disponibles por los tomadores de decisiones, para estimar las estrategias de gestión del riesgo de inundación, planificar el uso del suelo y desarrollo urbano o inversión, mejorar los programas de seguros contra inundaciones y la comunicación del riesgo a nivel local.

1.2. Revisión de investigaciones existentes

La marea de tormenta provocada por distintos fenómenos atmosféricos (incluidos los CT), ha sido analizada a nivel global (Woodruff et al. 2013; Fang et al. 2014; Muis et al. 2016) regional y local (Lin et al. 2010a, 2012; Hallegatte et al. 2011; Wang et al. 2012;

Bloemendaal et al. 2019; Díaz-García et al. 2020), incluyendo estudios que se enfocan en sistemas de predicción de marea de tormenta (Daniel et al., 2009; Resio y Westerink, 2008; Von Storch, 2014).

La física de la marea de tormenta y sus inundaciones han sido extensamente estudiadas, incluyendo los mecanismo forzantes tales como las características de los eventos (viento, presión, radio máximo, velocidad de translación o la localización de la entrada a tierra) (Appendini et al., 2014a; Bryant y Akbar, 2016; Irish et al., 2008; Sahoo y Bhaskaran, 2018; Weisberg y Zhen, 2006; Westerink et al., 1994), los efectos de la geo-morfología costera (Loder et al. 2009; Bilskie et al. 2016), la influencia de las precipitaciones en la inundación (Lin et al. 2010b; Zheng et al. 2013, 2014; Torres et al. 2015), el oleaje (Kim et al. 2010; Atkinson et al. 2013), el cambio del nivel del mar (Wang et al. 2012; Atkinson et al. 2013; Woodruff et al. 2013) y los mecanismos de disipación tales como la cobertura de vegetación costera (Houser et al. 2008; Wamsley et al. 2009; Yin et al. 2020) o incluso la diferencia de usar un modelo computacional u otro (Zhang et al. 2008).

Otros estudios analizan el potencial de inundación de la marea de tormenta, que pueden incluir sus peligros y riesgos asociados (Lin et al. 2010a; Aerts et al. 2013; Zachry et al. 2015; Rey et al. 2019) empleando alguna de las técnicas expuestas anteriormente.

Sin embargo, a pesar de la relevancia de la marea de tormenta en las zonas costeras, hay relativamente pocos estudios para la costa del Pacífico mexicano, y ninguno ha evaluado el peligro de las marejadas ciclónicas en la costa bajo climas futuros.

Martínez-Martínez, (2014), calcula el peligro de inundación por marea de tormenta en el litoral mexicano basado en aproximaciones paramétricas de la altura de la marea. Posada-Vanegas et al. (2011) y Meza-Padilla et al. (2015) presentan una evaluación de marea de tormenta de CT para todo el Pacífico mexicano y el Golfo de México basada en el modelado de eventos históricos y sintéticos, respectivamente. Sin embargo, sus resultados no son confiables para las inundaciones terrestres, ya que utilizaron datos de elevación poco precisos obtenidos de cartas de navegación (Posada-Vanegas et al. 2011) y datos de topobatimetría global (Meza-Padilla et al. 2015), siendo que la información batimétrica cercana a la costa es una información crítica para una buena estimación de la marea de tormenta.

Por otro lado, en México, a nivel local, la ley exige la obtención de atlas de riesgo municipales. Para ello, existe una metodología específica para la evaluación del peligro por

inundaciones de marea de tormenta dada por Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED 2006). Esta emplea un método paramétrico aproximado basado en datos históricos de CT para estimar la altura máxima de la marea de tormenta de un evento sobre la línea de costa, a partir de la cual se estima el área propensa a la inundación mediante sistemas de información geográfica. Sin embargo, estos atlas no están fácilmente disponibles y, cuando lo están, no incluyen inundaciones por marea de tormenta bajo los efectos del cambio climático.

Para el caso específico de Manzanillo, en la costa del Pacífico, existen informes sobre el cambio climático y el riesgo natural (Bolongaro Crevenna Recaséns 2016), el cual que sigue la metodología de (CENAPRED 2006), y por lo tanto no considera los efectos del cambio climático sobre los CT.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Este estudio tiene como objetivo caracterizar la marea de tormenta e inundación asociadas a CT en Manzanillo, Colima para el clima presente y futuro, utilizando una nueva metodología basada en un enfoque probabilístico que permite la estimación de mapas de distribución espacial de peligro de inundación asociados a una probabilidad de ocurrencia (período de retorno).

1.3.2. Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Seleccionar huracanes históricos y sintéticos bajo el clima actual y futuro (RCP 8.5) derivados de diferentes modelos de circulación global para el área de Manzanillo (trayectoria, velocidad máxima, radio máximo y presión mínima).
2. Caracterizar el clima de huracanes presente y futuro a nivel cuenca y nivel local (Manzanillo).
3. Generar escenarios hipotéticos de CT a partir de eventos sintéticos.
4. Generar campos de vientos y presión atmosférica a partir de los eventos sintéticos e históricos.

5. Simular la marea de tormenta mediante un modelo hidrodinámico para obtener valores del nivel del mar e inundación para cada evento.
6. Obtener MEOWs y MoMs
7. Obtener y analizar el peligro inundación para la generación de mapas.
8. Obtener y analizar la vulnerabilidad a la inundación nivel manzana urbana, para la generación de mapas.
9. Analizar el riesgo por inundación de CT para la generación de mapas.
10. Generar mapas y analizar resultados.

1.4. Estructura del documento

En el Capítulo 2 se introduce el área de estudio en donde se aplicará la metodología desarrollada. El Capítulo 3 describe la metodología empleada incluyendo la caracterización del clima de CT, el modelado matemático y la evaluación del peligro, vulnerabilidad y riesgo. El Capítulo 4 muestra los principales resultados y discusiones asociadas tanto al peligro, como a la vulnerabilidad y riesgo obtenidos con la metodología desarrollada. Finalmente, el Capítulo 5 engloba las principales conclusiones de este estudio y el Anexo I incluye los trabajos futuros necesarios.

Capítulo 2

Área de estudio

Este estudio se enfoca en la localidad Manzanillo, Colima debido a su importancia económica, así como por su alto riesgo ante CT. Manzanillo está situada en la latitud 19.1°N y longitud 104.35°W. Es un centro importante para el desarrollo económico en la región y alberga infraestructura económicamente crítica, como el puerto de contenedores líder en México, una terminal petrolera de Petróleos Mexicanos (PEMEX), una instalación de gas natural licuado (GNL), y una planta termoeléctrica con la mayor capacidad de generación instalada en México. Además de la actividad industrial, Manzanillo es también un destino importante para el turismo de sol y playa. La mayoría de estas instalaciones industriales y turísticas se encuentran en zonas bajas, lo que las hace vulnerables a la marea de tormenta.

Dada a su ubicación, una parte de la costa está expuesta a CT, por lo que Manzanillo también tiene un alto riesgo de CT. La ciudad de Manzanillo ha sufrido los dos mayores CT que han tocado tierra en el PNO: el huracán (sin nombre) de octubre de 1959 que tocó tierra directamente sobre Manzanillo como categoría 4, y el reciente huracán Patricia (2015) que tocó tierra en las bahías de Tenacatita, Cuastecomate y Navidad, aproximadamente a 80 km al noroeste de Manzanillo. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra a incidencia de CT cerca de Manzanillo para el período entre 1970 y 2018. Aproximadamente el 8% de todos los CT de PNO pasaron dentro de un círculo de 2° de radio (222 km) alrededor de Manzanillo. Sin embargo, casi 10% de todos los CT de PNO, y 14% de los huracanes mayores tocaron tierra a menos de 100 km de Manzanillo.

Tabla 1. Número de eventos y frecuencia anual de ciclones tropicales históricos (1970-2018) en la cuenca del Pacífico Nororiental (PNO) y que ocurren en un área circular con un radio 222 km desde Manzanillo (Manz), y que tocan tierra a menos de 100 km de Manzanillo. CT: ciclones tropicales, TS: tormentas tropicales, H: número total de huracanes, H1-2:= CT menores, H3-5: CT mayores, H5: CT de categoría 5.

Categoría	CUENCA				ENTRADAS A TIERRA				
	Eventos		Frecuencia anual		Eventos		Frecuencia anual		Entradas a tierra (%) en Manzanillo respecto del total
	PNO	Manz	PNO	Manz	PNO	Manz	PNO	Manz	% in Manz
CT	1023	80	20.88	1.61	128	13	2.61	0.27	10.16
TS	416	38	3.14	0.76	57	6	1.16	0.12	10.53
H	607	42	12.65	0.86	71	7	1.45	0.14	9.86
H1-2	292	31	0.96	0.63	57	5	1.16	0.10	8.77
H3-5	315	11	5.96	0.22	14	2	0.29	0.04	14.29
H5	47	1	3.35	0.02	1	1	0.02	0.02	100.00

Manzanillo posee una fisiografía compleja, como se puede observar en la *Figura 1*. Las principales características fisiográficas son las dos bahías contiguas (Manzanillo y Santiago), el puerto interior, y las lagunas de Cuyutlán, Juluapan y Valle de las Garzas. Al sureste de Manzanillo se encuentra la laguna Cuyutlán, con un área de 7,200 ha. Esta laguna está conectada al mar por dos conexiones artificiales, un canal de 20 m de ancho que conecta con la bahía de Manzanillo, y un canal con un ancho aproximado de 400 m y estabilizado por diques de escollera para garantizar la entrada a una terminal de almacenamiento y regasificación de GNL. Al norte del área de estudio se encuentra la laguna Juluapan, compuesta de aproximadamente 84 ha y conectada a la bahía de Santiago por un canal de aproximadamente 30 m de ancho. Dentro de la bahía de Manzanillo, se encuentra el puerto interior de Manzanillo y la laguna del Valle de las Garzas (293 ha), esta última está conectada con un canal artificial (~ 50 m de ancho) y un canal natural paralelo a las áreas urbanas (~ 20 m ancho).

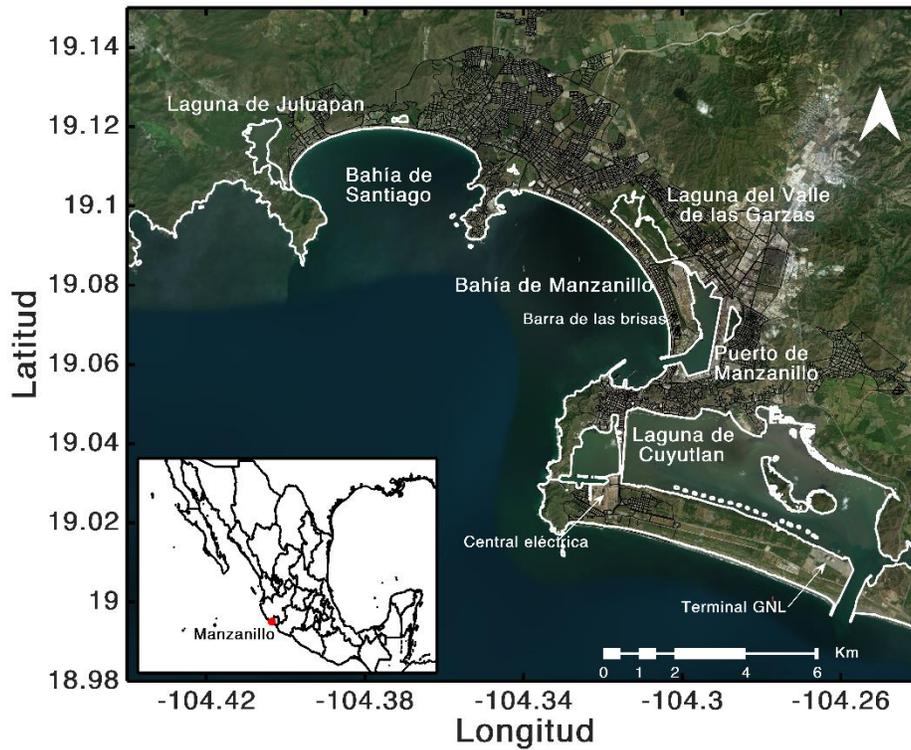


Figura 1. Área de estudio.

A pesar de que Manzanillo es un área propensa a los CT, la exposición de la población y la infraestructura ha aumentado debido al crecimiento anual de la población del 2.6% en la última década (INEGI 2015).

Las presiones del aumento de la población han llevado tanto a cambios en el uso del suelo como a un mayor desarrollo de áreas bajas, lo que ha aumentado la vulnerabilidad a los peligros de CT, especialmente el riesgo de inundación por tormentas de CT.

Capítulo 3

Metodología

La *Figura 2* proporciona una visión general esquemática del método y los datos utilizados en el estudio. Primero, se utilizan eventos históricos y sintéticos para evaluar la frecuencia de los CT y los períodos de retorno (PR) de la velocidad del viento para el clima actual.

Para calcular los PR de velocidad del viento para el clima futuro, se utilizaron solo eventos sintéticos derivados de simulaciones de MCG bajo RCP 8.5. A partir de este análisis, determinamos eventos de CT hipotéticos, los cuales, poseen una intensidad específica constante correspondiente a un PR dado.

En segundo lugar, se crean eventos hipotéticos para forzar un modelo hidrodinámico cuyos valores de inundación por marea de tormenta resultantes de cada evento se utilizan para calcular los MEOW y las MoM. Por último, se combinan las MoM con el mapa de vulnerabilidad para obtener mapas de riesgo de inundación (como se define en la sección 3.1.6) a nivel de manzana urbana. A continuación, se muestra una descripción detallada de cada paso.

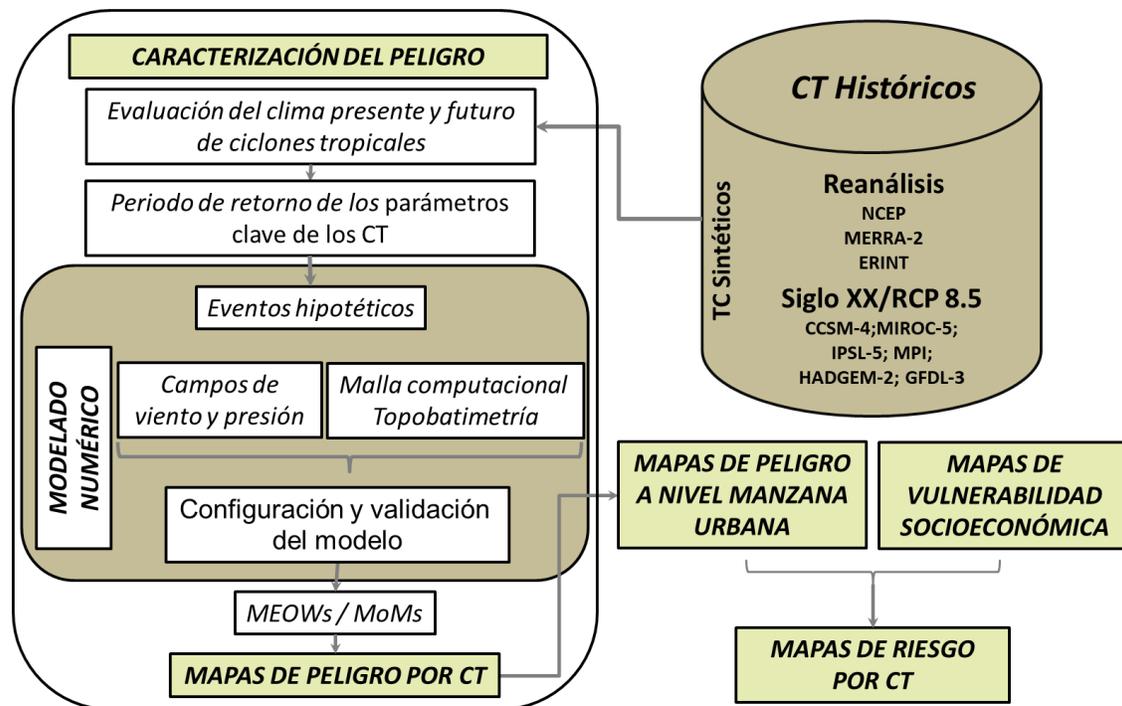


Figura 2. Diagrama de flujo para la evaluación del clima de CT y análisis de peligro de inundación para clima presente y futuro mediante modelación de eventos sintéticos e hipotéticos con periodo de retorno conocido.

3.1. Caracterización del peligro

3.1.1. Caracterización de ciclones tropicales para climas presentes y futuros.

El uso de eventos históricos para caracterizar la climatología de CT es limitado ya que los eventos en PNO son muestreados con poca frecuencia por aviones de reconocimiento y los primeros datos de satélite y los métodos de estimación de intensidad no eran de la misma calidad que el actual sistema de observación. Además, los datos de los huracanes más intensos de la cuenca PNO son particularmente inciertos antes de 1988 cuando el Centro Nacional de Huracanes de EE.UU. asumió la responsabilidad de esta cuenca a través del Centro de Huracanes del Pacífico Oriental (Kimberlain et al. 2016). Los métodos para caracterizar la exposición utilizando CT sintéticos han reemplazado en gran medida a los métodos basados en observaciones históricas (Vickery et al. 2000; Kriesche et al. 2014). Dichos métodos también se han utilizado para analizar los efectos del cambio climático en la

frecuencia e intensidad de los CT (Emanuel et al. 2008; Emanuel 2013; Appendini et al. 2017b) y se han extendido a estudios de oleaje y marea de tormenta (Lin et al. 2010a, 2012; Meza-Padilla et al. 2015; Appendini et al. 2017a).

Dado que los eventos sintéticos permiten estadísticas más sólidas, en este trabajo se utilizan los CT sintéticos derivados de la metodología de reducción dinámica de escala de Emanuel et al. (2006, 2008) y Emanuel (2013, 2015). En esta técnica, vórtices con una intensidad de 12 m/s se siembran al azar en el espacio y el tiempo sobre un estado climático creado a partir de condiciones termodinámicas medias mensuales derivadas de reanálisis o GCM. A partir de estas proto-tormentas, las trayectorias de los CT se predicen mediante un modelo de advección beta (Marks 1992) impulsado por los vientos a gran escala de los reanálisis o MCGs.

A continuación se utiliza un modelo acoplado océano-atmósfera de intensidad de CT (CHIPS, Emanuel, 1995) para determinar la intensidad de los eventos sintéticos a lo largo de la trayectoria (Emanuel 2004) empleando las entradas termodinámicas y dinámicas obtenidas del estado climático y el estado inicial del modelo oceánico obtenido directamente a partir de un reanálisis o GCM.

Las proto-tormentas se descomponen o se intensifican en CT dependiendo las condiciones oceánicas y atmosféricas de los climas actuales o futuros, por lo tanto, los eventos supervivientes pueden considerarse como los componentes de la climatología de CT de los reanálisis o MCGs a escala reducida.

La frecuencia de la tasa anual promedio de los eventos sintéticos se corresponde con la tasa observada mediante el uso de un parámetro de tasa de siembra calibrable. Esto permite que las tasas de génesis varíen año a año de manera realista en función de las condiciones ambientales (Emanuel et al. 2008; Emanuel 2013).

El uso de datos de reanálisis permite caracterizar y validar la climatología de CT en las condiciones actuales, lo que permite un análisis estadístico más sólido de las propiedades de los CTs en áreas con una tasa de ocurrencia de CT históricamente baja.

Para climas futuros, la tasa de siembra se mantiene de manera que los cambios en la frecuencia de los CT son el resultado de los cambios en las condiciones ambientales debido al cambio climático global (Emanuel et al. 2008).

En la medida en que las ejecuciones de los MCG representen correctamente las condiciones climáticas actuales, el uso de eventos sintéticos derivados de tales ejecuciones de los MCG permite que la climatología de las CT se caracterice en los climas futuros bajo diferentes escenarios.

La comparación de qué tan bien se corresponden los eventos sintéticos derivados de los MCG a los eventos sintéticos derivados de reanálisis, permite evaluar qué tan bien los eventos derivados de MCG reproducen el clima actual de CT proporcionando una medida de la incertidumbre resultante de los MCG.

Para evaluar la climatología actual de los CT en el área de estudio, se utilizó información de eventos sintéticos derivados de tres reanálisis diferentes, incluidos el “National Centers for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research NCEP/NCAR Reanalysis” (en adelante NCEP) (Kalnay et al. 1996), el “Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications” (MERRA-2) (Gelaro et al. 2017), y el “European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) atmospheric reanalysis ERA-Interim” (ERINT) (Dee et al. 2011).

Debido a las incertidumbres en las proyecciones de los modelos climáticos (Lin et al. 2012), se utilizaron eventos sintéticos derivados de seis MCG diferentes de “Coupled Model Intercomparison Project Phase 5” (CMIP5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), bajo el clima actual (1975-2005) y clima futuro (2075-2100) bajo el escenario “Representative Pathway Concentration” 8.5 (RCP8.5) (Moss et al. 2010).

Los MCG empleados son:

(1) el “National Oceanic and Atmospheric Administration/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory” (NOAA/GFDL) “Climate Model 3” (GFDL-3) (Griffies et al. 2011).

(2) el “UK Met Office Hadley Global Environmental Model 2–Earth System” (HADGEM-2) (Jones et al. 2011).

(3) el “Institut Pierre Simon Laplace CM5A-LR” (IPSL-5) (Dufresne et al. 2013).

(4) el “Center for Climate System Research / National Institute for Environmental Studies/Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Model for Interdisciplinary Research on Climate” (MIROC-5) (Watanabe et al. 2010).

(5) el “Max Plank Institute MPI-ESM-MR” (MPI) (Giorgetta et al. 2013).

(6) el “National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model Version 4” (CCSM-4) (Gent et al. 2011).

La Tabla 2 muestra la resolución horizontal promedio de los modelos de reanálisis y GCM y el número de eventos utilizados en este estudio.

Tabla 2. Resolución horizontal promedio de los modelos de reanálisis y MCGs utilizados para el metodología de reducción dinámica de escala y número de eventos sintéticos empleados en este estudio.

Reanálisis - MCG	Resolución horizontal media, (°) (longitud x latitud)	Num. eventos	
		20 th	RCP 8.5
NCEP	2.5 x 2.5	4290	-
MERRA-2	0.5 x 0.625	4290	-
ERINT	0.75 x 0.75	4290	-
GFDL-3	2.5 x 2.0	3380	3380
HADGEM-2	1.875 x 1.25	3380	3380
IPSL-5	3.75 x 1.875	3380	3380
MIROC-5	1.41 x 1.41	3380	3380
MPI	1.875 x 1.865	3380	3380
CCSM-4	1.25 x 0.94	3380	3380

Aunque los eventos sintéticos permiten la caracterización de varias métricas de los CT (por ejemplo, intensidad, frecuencia y lluvia), el estudio se centró en la intensidad del viento, ya que es el parámetro clave de la marea de tormenta (Flather 2001).

Aquí, la intensidad del viento se define como el viento máximo sostenido en superficie asociado con el CT, que es promedio del mayor viento sostenido durante un minuto a la altura de observación meteorológica estándar de 10 m con una exposición sin obstáculos (NWS 2018).

Para fines del estudio, se caracteriza la intensidad del viento en función de la probabilidad de excedencia utilizando el PR calculado siguiendo a Emanuel and Jagger (2010) y a Appendini et al. (2019) donde el PR se obtiene como el inverso de la probabilidad de excedencia, definido como $P = 1 - \exp(-fr(X > x))$, donde $fr(X > x)$ es la frecuencia (como

se obtiene cuando se generan eventos sintéticos que usan la constante de calibración) para velocidades del viento superiores a un cierto umbral de intensidad x .

Para lograr esto se calcula el histograma de frecuencias de la intensidad del viento en superficie a intervalos de 5 knots de los eventos dentro de un “área de amenaza” definida por un radio de 222 km centrado en Manzanillo y considerando únicamente los datos cuando el CT se encuentra sobre el océano.

La selección de la dimensión del área se realiza considerando que un área entre 200 km (Lin et al. 2012) y 250 km (Garner et al. 2017) representa una climatología válida de CT (distribución estadística) para una ubicación particular, a pesar de que áreas más extensas han sido empleadas actualmente (Xu et al. 2020).

A su vez, las velocidades del viento de los CT en superficie son calculadas considerando la contribución de la velocidad de avance V_{tr} según Emanuel et al. (2006). Finalmente, el PR resultante se obtiene como la media multi-modelo de la frecuencia de cada conjunto de datos sintéticos de cada MCG, con límites de confianza definidos por la frecuencia media ± 1 desviación estándar.

La caracterización de los CT se completa determinando la relación entre V_{max} y los parámetros principales de los CT (radio de los vientos máximos (R_{max}), presión mínima (P_o), presión ambiental (P_n) y velocidad de translación V_{tr}) en el mismo área de amenaza para cada reanálisis y MCG.

La relación conjunta entre la velocidad del viento y los diferentes parámetros se calcula utilizando la media multi-modelo de cada conjunto de datos sintéticos de cada reanálisis o MCG con intervalos de confianza del 95% y 5%.

Para la caracterización de las entradas a tierra de los CT se desarrolló una metodología para la selección de las entradas a tierra siguiendo los criterios dados por Shaw et al. (2016). Las entradas a tierra se calculan como la intersección entre la trayectoria del evento y la línea de costa de alta resolución obtenida de “Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database” (Wessel and Smith 1996).

Los parámetros del CT son interpolados respecto a los datos disponibles inmediatamente anterior y posterior a la entrada a tierra.

Para que una entrada a tierra sea considerada debe cumplir con las condiciones de: (a) el centro de la tormenta debe moverse de mar a tierra y (b) estar separado de la entrada a

tierra anterior por al menos 100 km y/o 6 h. La Figura 3 muestra la trayectoria y los puntos de entrada a tierra del huracán histórico Marty (EP132003) para una línea de costa de baja resolución, donde se puede ver que algunas de las entradas a tierra no se consideran con este criterio (puntos rojos) por encontrarse cerca de una entrada anterior o haber sucedido en un periodo inferior a 6 h de la entrada anterior.

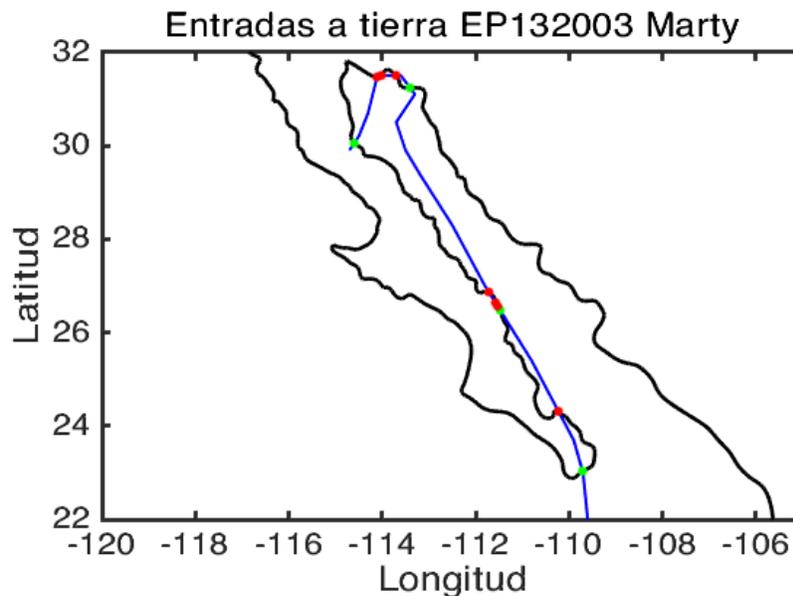


Figura 3. Trayectoria y entradas a tierra del huracán Marty (EP132003). Los puntos de color verde/rojo muestran aquellas entradas a tierra consideradas/no consideradas.

3.1.2. Ciclones tropicales hipotéticos

Los eventos hipotéticos consisten en un tipo de eventos sintéticos que tienen una velocidad del viento constante durante su vida y se acercan al área de interés desde una dirección específica con una V_{tr} constante.

Los eventos se organizan en conjuntos con propiedades similares (V_{max} , R_{max} , P_o , V_{tr} y dirección de translación), acercándose al área de interés con una trayectoria lineal con líneas paralelas entre eventos con una separación equivalente al R_{max} y con el evento central pasando exactamente por encima el área de interés. Esto se realiza para cada dirección de translación, para al final tener un conjunto de eventos que cubren la zona de estudio como se muestra en la *Figura 4*.

Las características de las tormentas para los eventos hipotéticos se definen a partir de los eventos sintéticos (parámetros clave del CT relacionados con un V_{max} seleccionado).

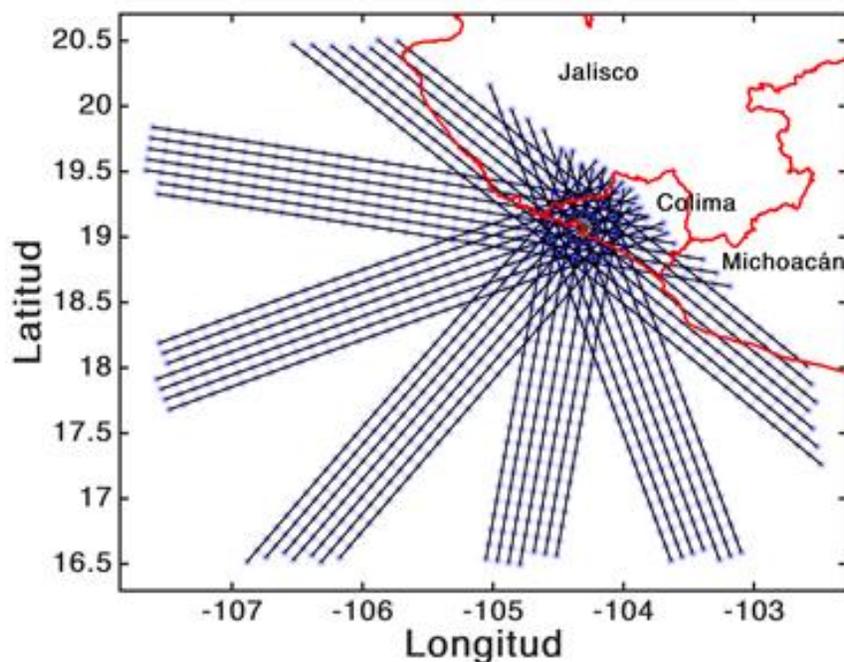


Figura 4. Ejemplo de eventos hipotéticos generados sobre la ciudad Manzanillo, Colima, México.

Como la física de los CT proporcionan la base para los eventos sintéticos, y estos los parámetros empleados para determinar los eventos hipotéticos, los últimos reflejan eventos plausibles. La excepción son las trayectorias lineales de los eventos hipotéticos y el uso de valores de parámetros constantes durante toda la vida útil de cada evento (esta técnica no toma en cuenta las variaciones causadas por los cambios rápidos de tormenta). Sin embargo, para evaluar los efectos de los niveles de inundación para un conjunto particular de características de CT, es necesario el uso de valores constantes.

La idea principal detrás del uso de eventos hipotéticos es forzar a los modelos hidrodinámicos para determinar las condiciones de inundación por marea de tormenta de CT para un conjunto de tormentas con la misma intensidad de viento para un lugar determinado, con tamaños, velocidades de avance y dirección de translación variables (Zhang et al. 2012; Zachry et al. 2015; Rey et al. 2019). Cada conjunto de eventos hipotéticos se basa en la V_{\max} media multi-modelo para un PR particular y los parámetros clave de los CT asociados a dicha V_{\max} .

3.1.3. Modelado matemático

Para modelar la marea de tormenta de CT y la inundación terrestre asociada, se utilizó el modelo hidrodinámico MIKE 21 HD, el cual ha sido utilizado con éxito en numerosos estudios científicos (e.g. Appendini et al., 2014b; Meza-Padilla et al., 2015; Rey et al., 2018; Strauss et al., 2007).

El modelo resuelve las ecuaciones de momento, continuidad, temperatura, salinidad y densidad con ecuaciones de esquema de cierre turbulento basadas en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) incompresibles sujeto a los supuestos de Boussinesq y presión hidrostática. Las ecuaciones que describen los flujos y la variación del nivel del mar son las siguientes:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] \quad \text{Ec. 2}$$

$$- \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] \quad \text{Ec. 3}$$

$$- \Omega_q - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0$$

donde $h(x, y, t)$ es la profundidad ($\zeta - d, m$), $d(x, y, t)$ es la profundidad (m) variando en el tiempo, $\zeta(x, y, t)$ es la superficie libre (m), $p, q(x, y, t)$ son los flujos de densidad en las direcciones x- e y- ($m^3/s/m$) iguales a uh, vh ; (u, v) son las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x- e y-, $C(x, y)$ es la resistencia de Chezy ($m^{1/2}/s$), g es la aceleración gravitacional (m/s^2), $f(V)$ es el factor de fricción por viento, $V, V_x, V_y(x, y, t)$ son las componentes de velocidad del viento en las direcciones x e y (m/s), $\Omega(x, y)$ es el parámetro de Coriolis dependiente de la latitud (s^{-1}), $p_a(x, y, t)$ es la presión atmosférica ($kg/m/s^2$), ρ_w es la densidad del agua (kg/m^3), x, y son las coordenadas espaciales (m), t es el tiempo (s) y $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ son las componentes de los esfuerzos cortantes efectivos.

Dentro de los principales parámetros que controlan la hidrodinámica en el modelo están la fricción en el fondo y en la superficie libre.

La fricción del viento ($f(v)$) se determina según la parametrización dada por Smith and Banke, (1975) y es el principal parámetro de calibración del modelo:

$$f(v) = \left\{ \begin{array}{l} f_0 \text{ para } V < V_0 \\ f_0 + \frac{V - V_0}{V_1 - V_0} \cdot (Cd_1 - Cd_0) \text{ para } V_0 \leq V \leq V_1 \\ f_1 \text{ para } V \geq V_1 \end{array} \right\} \quad \text{Ec. 4}$$

para este estudio se empleó: $f_0=1.2 \cdot 10^3$, $f_1=2.5 \cdot 10^3$ $V_0 = 7$ m/s y $V_1 = 25$ m/s (ver sección 3.1.3.3).

El esfuerzo en el fondo τ_b , se determina por medio de:

$$\frac{\overline{\tau_b}}{\rho_w} = C_f \overline{U_b} |\overline{U_b}| \quad \text{Ec. 5}$$

donde ρ_w es la densidad del agua, $\overline{U_b}$ es la velocidad del flujo por encima del fondo y C_f es el coeficiente de arrastre que, en términos del número de Manning, viene dado por:

$$C_f = \frac{g}{\left(Mh^{\frac{1}{6}}\right)^2} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde g es la aceleración gravitacional, h es la profundidad y M es el número de Manning, el cual se estima a partir de la longitud en la rugosidad del fondo (k_s) y se define como:

$$M = \frac{24.5}{k_s^{\frac{1}{6}}} \quad \text{Ec. 7}$$

En este estudio los valores del número de Manning son calculados en función de la rugosidad del fondo k_s según diferentes usos de suelo (ver sección 3.1.3.3).

El periodo de simulación varía en función del evento y el paso de tiempo necesario en el cómputo varía entre 0.01 y un máximo de 1800 segundos según un esquema de integración de secuencia múltiple y su valor queda definido acorde al valor del número de Courant-Friedrich-Levy (CFL). Para la integración en el tiempo y la discretización en el

espacio se empleó un orden bajo, con un algoritmo rápido considerando un valor crítico de 0.80 para el CFL. Para obtener información detallada sobre el modelo el lector es referido a DHI (2017).

3.1.3.1. Campos de vientos y presión

Los campos de viento requeridos para forzar el modelo hidrodinámico se derivaron del modelo paramétrico de perfil de viento de CT de Emanuel y Rotunno (2011). El modelo proporciona un perfil analítico de viento gradiente para V ($V \geq 0$), como se muestra en la ecuación Ec. 8.

$$V_{(r)} = \frac{2r \left(R_{max} V_{max} + \frac{1}{2} f R_{max}^2 \right)}{R_{max}^2 + r^2} - \frac{f r}{2} \quad \text{Ec. 8}$$

donde V_{max} es la velocidad máxima del viento, R_{max} es el radio de los vientos máximos, r es la distancia radial de cada punto, f es el parámetro de Coriolis ($f = 2 \Omega \sin \varphi$; donde Ω es la velocidad de rotación de la Tierra $7.292 \cdot 10^{-5}$ rad/s, y φ es la latitud), y $V_{(r)}$ es la velocidad del viento del CT en el radio r .

La selección del modelo paramétrico se basa en Lin y Chavas (2012) y Ruiz-Salcines et al. (2019). También el modelo de Emanuel y Rotunno (2011) se ha utilizado para modelar mareas de tormenta bajo escenarios de cambio climático (Garner et al. 2017).

El campo de viento asimétrico se determina agregando un campo de viento ambiental uniforme relacionado con la advección del CT. Para calcular los campos de viento a una altura de referencia estándar de 10 m, se ajustan los vientos considerando un perfil de capa límite y una rugosidad de la superficie. Para ello, se utilizó el enfoque paramétrico propuesto por Lin y Chavas (2012) y que ya ha sido ampliamente empleado en la literatura (e.g. Appendini et al., 2017; Meza-Padilla et al., 2015; Ruiz-Salcines et al., 2019), donde ambos componentes del campo de viento superficial se ajustan individualmente al nivel de la superficie de 10 m.

Para el componente axisimétrico del campo de viento, se emplea un factor empírico de reducción del viento a la superficie de 0.85 y un ángulo de giro según las formulaciones de Bretschneider, (1972) (ecuación Ec. 9). A su vez se aplica factor de reducción de 0.55

sobre la magnitud del viento y un ángulo de rotación en sentido anti-horario de 22° en la dirección sobre el campo de viento de fondo.

$$\beta = \begin{cases} 10 \left(1 + \frac{r}{R_{\max}} \right), & 0 \leq r < R_{\max} \\ 20 + 25 \left(\frac{r}{R_{\max}} - 1 \right), & R_{\max} \leq r < 1.2 R_{\max} \\ 25, & r \geq 1.2 R_{\max} \end{cases} \quad \text{Ec. 9}$$

Los campos de presiones se basaron en Holland (1980), el cual fue utilizado por Garner et al., (2017) para el cálculo de la marea de tormenta:

$$P_{(r)} = P_c + (P_n - P_c) \exp\left(-\frac{R_{\max}}{r}\right)^B \quad \text{Ec. 10}$$

donde P_c es la presión central, en la presión ambiental, y B es el parámetro de forma de Holland obtenido de la ecuación Ec. 11.

$$B = \frac{V_{\max}^2 e^{\rho} + f V_{\max} R_{\max} e^{\rho}}{(P_n - P_c)} \quad \text{Ec. 11}$$

donde ρ es la densidad del aire y e es la base del logaritmo natural.

3.1.3.2. Malla computacional

El dominio computacional está compuesto por una malla no estructurada de volumen finito compuesta de elementos triangulares que varían desde un mallado grueso en aguas profundas (elementos con área máxima de $5.4 \times 10^6 \text{ m}^2$) hasta una resolución más fina (elementos con área máxima de 15 m^2) en los canales de entrada a las lagunas costeras para permitir una representación precisa de las corrientes de inundación y refluo.

Las áreas propensas a la inundación cuentan con área máxima de 450 m^2 con lados de aproximadamente 30 m (Figura 5).

La batimetría es una composición de datos medidos de mayor resolución en la bahía de Manzanillo y la Laguna Cuyutlán, complementada con datos batimétricos ETOPO1

(Amante y Eakins, 2009) en las áreas externas. Para todas las áreas terrestres, se emplearon datos topográficos LiDAR de 5 m de resolución (INEGI 2011).

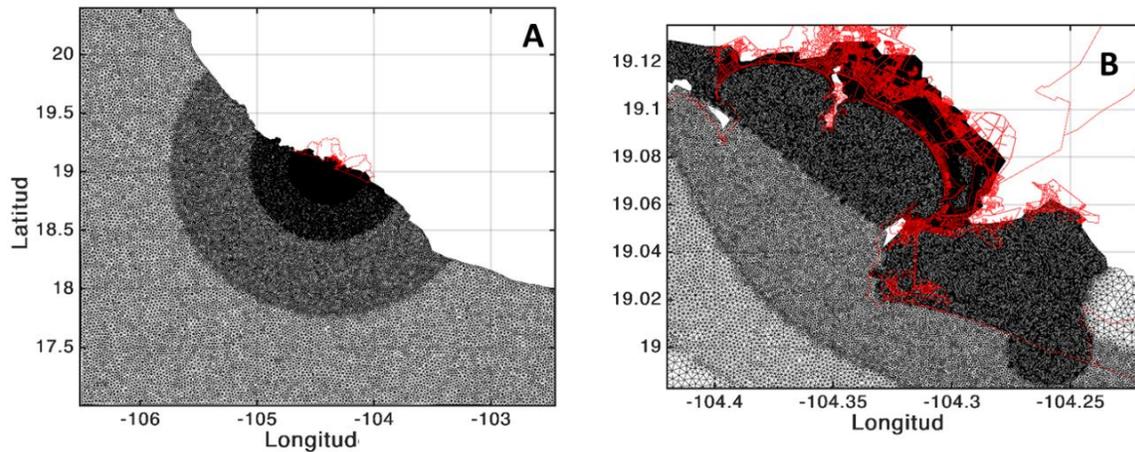


Figura 5. (A) Malla computacional de todo el dominio y (B) zoom sobre el área de Manzanillo.

3.1.3.3. Configuración del modelo

Una de las principales limitaciones para los estudios de marea de tormenta en México es la validación de los modelos, ya que los datos sobre el nivel del mar durante las CT son escasos.

Cerca del área de estudio, las únicas mediciones disponibles son del huracán Patricia (2015), obtenidas por el mareógrafo ubicado dentro del puerto de Manzanillo. Como tal, basamos la validación del modelo hidrodinámico en el huracán Patricia, empleando campos paramétricos de viento y presión para forzar el modelo, junto con la marea astronómica y con la configuración del modelo basada inicialmente en Meza-Padilla et al. (2015).

Las simulaciones iniciales subestimaron los niveles del mar resultantes del huracán Patricia, lo que condujo a valores poco realistas para el coeficiente de fricción del viento en las fórmulas de esfuerzo del viento.

La subestimación del nivel del mar en las primeras pruebas podría ser el resultado de una importante contribución de la lluvia a los niveles de agua, no simulados por el modelo, y/o una subestimación del viento por el modelo de viento paramétrico.

Con respecto a la lluvia, durante el huracán Patricia, se midió una precipitación total de 77.9 mm en Manzanillo (19.067° N 104.33° W) y 241 mm en Colima (19.23° N 103.73° W) (Kimberlain et al. 2016). Dicha lluvia podría haber contribuido a aumentar los niveles de

agua en el puerto como resultado de la escorrentía que drena hacia la laguna "Las Garzas" (conectada al puerto, donde se encuentra el mareógrafo). Con respecto a los campos de viento del CT, Manzanillo está situado a 80 km del ojo del huracán Patricia, que tocó tierra con un R_{\max} de ~10 km. Debido a que los campos de viento obtenidos con modelos de perfil de viento paramétricos decaen rápidamente en huracanes mayores después de 2 a 3 R_{\max} (Ruiz-Salcines et al. 2019), las velocidades del viento en las cercanías de Manzanillo probablemente se subestiman.

Además, es posible que el huracán Patricia haya tenido una pared del ojo secundaria con un R_{\max} de ~40-50 km justo antes de tocar tierra (Rogers et al.2017). Como las paredes secundarias de los ojos no pueden reproducirse mediante modelos de viento paramétricos simples (e.g, Thompson y Cardone 1996), esta es otra razón por la que las velocidades del viento de Patricia pueden no representarse con precisión.

Después de realizar diferentes pruebas, se decidió utilizar el coeficiente de arrastre en función de las parametrizaciones existentes en la literatura, las cuales muestran una gran variabilidad (Bryant y Akbar, 2016). Dado que el modelo hidrodinámico MIKE 21 HD solo permite una variación lineal del coeficiente de arrastre, utilizamos una aproximación que resulta en un coeficiente constante de 1.2×10^3 de la velocidad del viento de 0 a 7 m/s, con una variación lineal de 2.5×10^3 a 25 m/s, donde permanece para velocidades de viento mayores.

Varios autores han relacionado la fricción del fondo con la vegetación y la cobertura del uso del suelo (Atkinson et al., 2013; Dietrich et al., 2011, 2010; Mattocks y Forbes, 2008), por lo que en este trabajo se determina la fricción del fondo en base al uso del suelo y los mapas de vegetación de la zona costera asociada con los manglares en la Región del Pacífico Central (2015) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Para ello, se asigna un valor del coeficiente de Manning siguiendo a Mattocks y Forbes (2008) y Dietrich et al. (2010) para cada una de las siete categorías de uso del suelo en los mapas, como se muestra en la Tabla 3.

El desarrollo antrópico de alta y baja densidad se determinó manualmente siguiendo la definición de uso del suelo de "The Enhanced National Land Cover Data 1992" (Vogelmann et al. 2001). La Figura 6 muestra la distribución espacial de las áreas de uso del suelo resultantes. Cabe destacar que no se ha tenido en cuenta la resistencia al viento inducida

por la variación espacial de la fricción de la tierra (longitud de rugosidad de la superficie inducida principalmente por la vegetación) (e.g. Westerink et al., 2008). Esto se traduce en una reducción del viento debido a la mayor rugosidad superficial que existe sobre la tierra provocando previsiblemente una disminución de las áreas inundadas.

Tabla 3. Coeficiente de Manning inverso (1/n) asignado a cada uso del suelo y grupos de zonas de usos del suelo para el análisis de la inundación y área cubierta (ha) limitada a la curva de nivel de 13 m y longitudes de 104.44 y -104.2393.

Uso del suelo	Manning (m ^{1/3} /s)	Zonas de uso de suelo	Área (ha)
Desarrollo antrópico Baja densidad / Alta densidad	20 / 6.67	Urbano	2494.6
Áreas Cultivados - ganado	27.03	Agricultura	1299.0
Otra vegetación (principalmente selva baja)	10	Otra vegetación	629.6
Manglar y manglar perturbado	10		
Sin vegetación (principalmente playas)	33.33	Otros	851.1
Otros humedales (fondo estuarino)	60		
Cuerpos de agua	50	-	

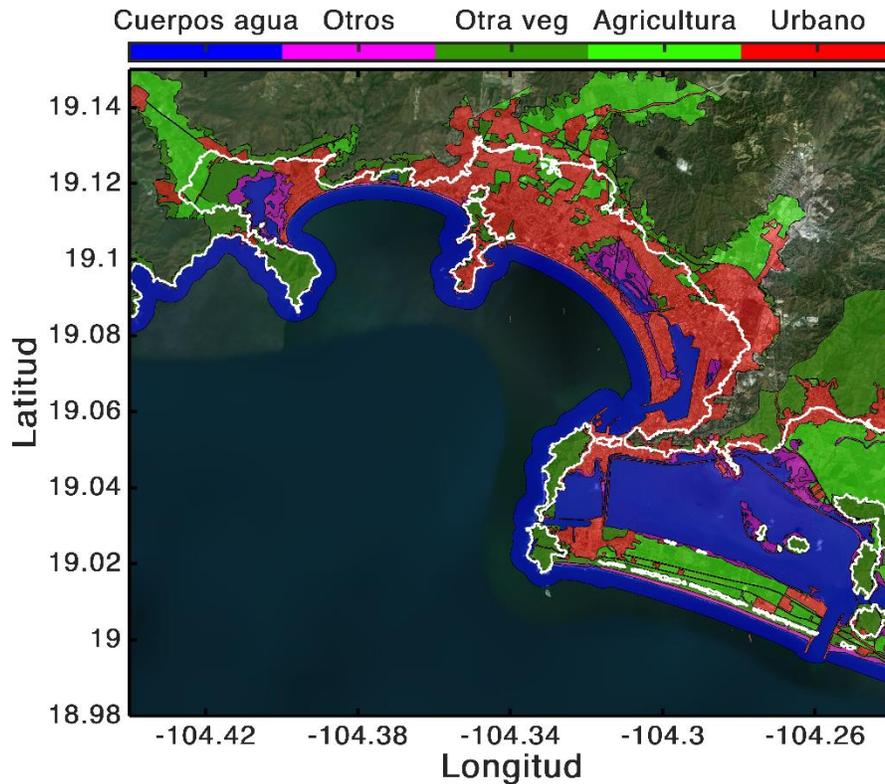


Figura 6. Distribución espacial de usos del suelo y curva de nivel 13 m (línea en color blanco).

3.1.4. Evaluación de peligro de inundación

Para la evaluación del peligro de inundación, se utilizó la definición de Merz et al. (2007), donde el peligro de inundación es la probabilidad de excedencia de una inundación potencialmente dañina en un área en particular dentro de un período específico de tiempo. Varios factores de peligro de inundación, como la profundidad de la inundación, la velocidad del flujo, la duración de la inundación, la tasa de aumento del agua y los sedimentos, son utilizados comúnmente para caracterizar las inundaciones continentales (Merz et al. 2010). Aquí, la categorización del peligro de inundación se basa únicamente en la profundidad de la inundación (elevación del agua sobre el nivel del terreno) ya que se ha encontrado que es el parámetro con la influencia más significativa en el daño por inundación (Wind et al. 1999), y que representa un nivel de dificultad de regreso a la vida diaria así como de daños a las propiedades (Tingsanchali y Karim, 2005).

Para categorizar el peligro, se emplean las cinco categorías de peligro de inundación propuestas por Dinh et al. (2012) y utilizadas por Rey et al. (2019, 2020). Se eligió esta

clasificación considerando que Manzanillo tiene elevaciones altas cerca de la costa, y se espera que pocas áreas se inunden por encima de los 2 m. La Tabla 5 en la sección 3.1.6 muestra las categorías de clasificación de peligros junto con los rangos de vulnerabilidad y riesgo.

3.1.5. Evaluación de vulnerabilidad

La vulnerabilidad a las inundaciones es definida como el alcance del daño esperado bajo ciertas condiciones de exposición, susceptibilidad y resistencia, tal como lo resumen Balica et al. (2012) basándose en diferentes estudios.

Para caracterizar la vulnerabilidad, se utilizan indicadores socioeconómicos de la base de datos del censo demográfico para México de 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2010) con una resolución de manzana urbana. La base de datos contiene 190 indicadores, pero siguiendo estudios previos que identificaron grupos vulnerables a las inundaciones desde una perspectiva socioeconómica (Cutter et al. 2003, 2013; Chen et al. 2013; Fernandez et al. 2016; Rey et al. 2019), se emplean 17 indicadores (Tabla 4).

Para estandarizar los indicadores de vulnerabilidad, éstos se normalizaron dos veces, primero por el área de la manzana urbana y luego por el valor máximo del indicador considerando todas las manzanas urbanas (2809 manzanas, inundadas o no).

Siguiendo a Rey et al. (2019), se ponderan los indicadores en dos grupos diferentes, cada uno representando el 50% de la vulnerabilidad. El primer grupo incluye habitantes totales, población menor de 14 años, población mayor de 60 años, población discapacitada y población analfabeta. Teniendo en cuenta que los cinco indicadores representan el 50%, a cada uno se le asigna un valor ponderado de 0.1. El segundo grupo está compuesto por los otros 12 indicadores (Tabla 4) con un peso de 0.04167 para representar un total del 50%. Dado que no todos los indicadores están disponibles para cada manzana de la ciudad, se considera el total de indicadores disponibles para obtener el peso de cada uno. Así, cuando no existe información para un indicador en particular, el peso de ese indicador se transfiere a los otros indicadores de su grupo. Finalmente, se obtiene un solo indicador igual a la suma de los 17 indicadores normalizados y ponderados.

Tabla 4. Indicadores de vulnerabilidad socioeconómica.

código INEGI	Descripción	Peso
POBTOT	Habitantes totales	0.1
P0A14A	Personas menores de 14 años.	0.1
P_65YMAS	Personas mayores de 65 años.	0.1
PCON_LIM	Población discapacitada	0.1
P15YM_AN	Población analfabeta	0.1
POBFEM	Habitantes femeninos	0.04167
PDESOCUP	Población sin trabajo	0.04167
P12YM_SEPA	Personas separadas, divorciadas o viudas	0.04167
PSINDER	Población sin servicios de salud	0.04167
P3HLINHE	No hispanohablante (población indígena)	0.04167
PNACOE	Personas nacidas en una entidad diferente.	0.04167
VIVTOT	Total viviendas particulares	0.04167
VIVPAR_DES	Total de viviendas habitadas	0.04167
VPH_S_ELEC	Casas sin electricidad	0.04167
VPH_SNBIEN	Casas sin electrodomésticos	0.04167
VPH_RADIO; VPH_TV; VPH_TELEF; VPH_CEL	Hogares sin tecnologías de comunicación (radio, TV, teléfono, teléfono móvil) *	0.04167
VPH_AUTOM	Viviendas privadas habitadas sin medios de transporte propios (automóvil o camioneta) **	0.04167

* Para el cálculo de la vulnerabilidad se emplea hogares sin tecnologías de comunicación, obtenidos como: VIVTOT-max [VPH_RADIO; VPH_TV; VPH_TELEF; VPH_CEL]

** Para el cálculo de la vulnerabilidad se emplea viviendas habitadas sin medios de transporte propios, obtenidas como: VIVTOT-VPH_AUTOM

3.1.6. Evaluación de riesgo de inundación

En este estudio se define el riesgo de inundación como el daño de la inundación (producto del peligro de inundación y la vulnerabilidad a la inundación según lo definido por CENAPRED 2006 y Rey et al. (2020)) con una cierta probabilidad de ocurrencia (o PR) (Tingsanchali and Karim 2005; Dinh et al. 2012).

El riesgo de inundación se estima como el producto de la profundidad de inundación normalizada (Tabla 5, segunda columna) y la vulnerabilidad normalizada (Tabla 5, tercera columna) con un PR estimado a partir de las bases de datos sintéticos de CT. En este sentido, los mayores riesgos de inundación se ubican en áreas con la mayor profundidad de inundación y con la mayor vulnerabilidad.

La Tabla 5 muestra las categorías de clasificación de peligro de inundación, vulnerabilidad y riesgo. Se utilizaron cinco categorías para la vulnerabilidad obtenidas por el “natural breaks method” (Jenks 1963) y utilizadas por (Rey et al. 2019).

Tabla 5. Clasificación de categorías de peligro de inundación, vulnerabilidad y riesgo.

Profundidad del agua (m)	Peligro	Vulnerabilidad (natural breaks and Jenks)	Riesgo	Categorías Peligro / Vulnerabilidad/ Riesgo
0.0 - 0.2	0.0 - 0.047	0.0 to 0.013	0 - 0.000611	Muy Bajo
0.2 - 0.5	0.047 - 0.119	0.013-0.038	0.000611-0.004522	Bajo
0.5 - 1.0	0.119 - 0.238	0.038-0.085	0.004522-0.02023	Medio
1.0 - 2.0	0.238 - 0.476	0.085-0.208	0.02023-0.099008	Alto
> 2.0	> 0.476	> 0.208	> 0.099008	Muy Alto

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Validación de eventos sintéticos

Para evaluar la precisión de los eventos sintéticos derivados del reanálisis para reproducir los datos históricos, así como la precisión de los eventos derivados de MCG para replicar el clima actual, se analiza la distribución de frecuencia relativa (es decir, el número de eventos en cada intervalo dividido por el número total de eventos) de las intensidades del viento de los CT (Figura 7), y su probabilidad de ocurrencia por medio del PR (Figura 8).

A través de la cuenca PNO, se encontró un buen acuerdo entre los eventos sintéticos derivados del reanálisis (NCEP, ERINT, MERRA-2) y los derivados de datos históricos (Figura 7A). Sin embargo, los eventos sintéticos sobreestiman la frecuencia de los eventos de Categoría 5 en comparación con HURDAT2 (Landsea y Franklin, 2013).

Para el área de Manzanillo (Figura 7B), existe una mayor variabilidad entre los eventos derivados de los MCG debido a que el área de muestreo es pequeña (Lin et al. 2012). Sin embargo, los eventos derivados de los MCG muestran resultados para Manzanillo similares a los de toda la cuenca.

Los eventos derivados de IPSL-5 y CCSM-4 tienden a subestimar la intensidad del viento, mientras que MIROC-5 sobreestima los huracanes mayores (categorías 3-5).

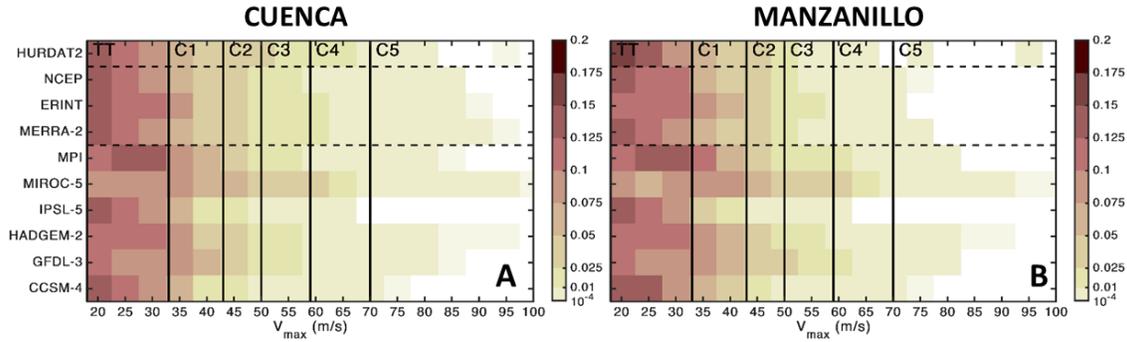


Figura 7. Frecuencia relativa del viento máximo de los (A) ciclones tropicales en el noreste del Pacífico y (B) aquellos dentro de un área de radio 222km alrededor de Manzanillo.

La Figura 8A muestra el PR para la media multi-modelo de la velocidad máxima del viento derivada de todos los MCG que ocurren dentro de un radio de 222 km desde Manzanillo, junto con los límites de confianza definidos por la frecuencia media ± 1 desviación estándar.

El PR permite validar los eventos sintéticos de la siguiente manera. Dado que los PR calculados con datos históricos (1970-2018) están dentro de la incertidumbre impuesta por los eventos sintéticos derivados del reanálisis, se considera que los PR basados en esta metodología son válidos, habilitando su empleo en sustitución de los eventos históricos. Mientras que los PR derivados de eventos sintéticos bajo los MCG para el clima actual muestran una mayor incertidumbre, los eventos derivados de reanálisis y los datos históricos todavía se encuentran dentro del conjunto de los eventos derivados de los MCG para el clima actual cuando se consideran los eventos con categoría de huracanes. Sin embargo, los eventos de tormenta tropical derivados de los MCG están fuera del límite de la incertidumbre de los eventos derivados del reanálisis. Esta deficiencia no es importante para este estudio, ya que se está tratando solo los casos más extremos.

Es importante tener en cuenta que, si bien la media del conjunto muestra un aumento de velocidades de viento para climas futuros, la gran incertidumbre no nos permite decir con gran confianza que habrá eventos más extremos en el futuro. Sin embargo, la media de los ensambles sí sugiere que el futuro aumentará la probabilidad de ocurrencia de eventos con mayor intensidad.

En la Figura 8B-C se puede observar las diferencias entre R_{max} y V_{tr} relacionados con V_{max} . No existe una variación evidente en el tamaño o la velocidad de la CT entre el clima

presente y futuro a medida que se superponen los límites de incertidumbre. Sin embargo, las categorías de CT más bajas muestran un aumento del tamaño de la tormenta cuando se consideran los valores medios del conjunto.

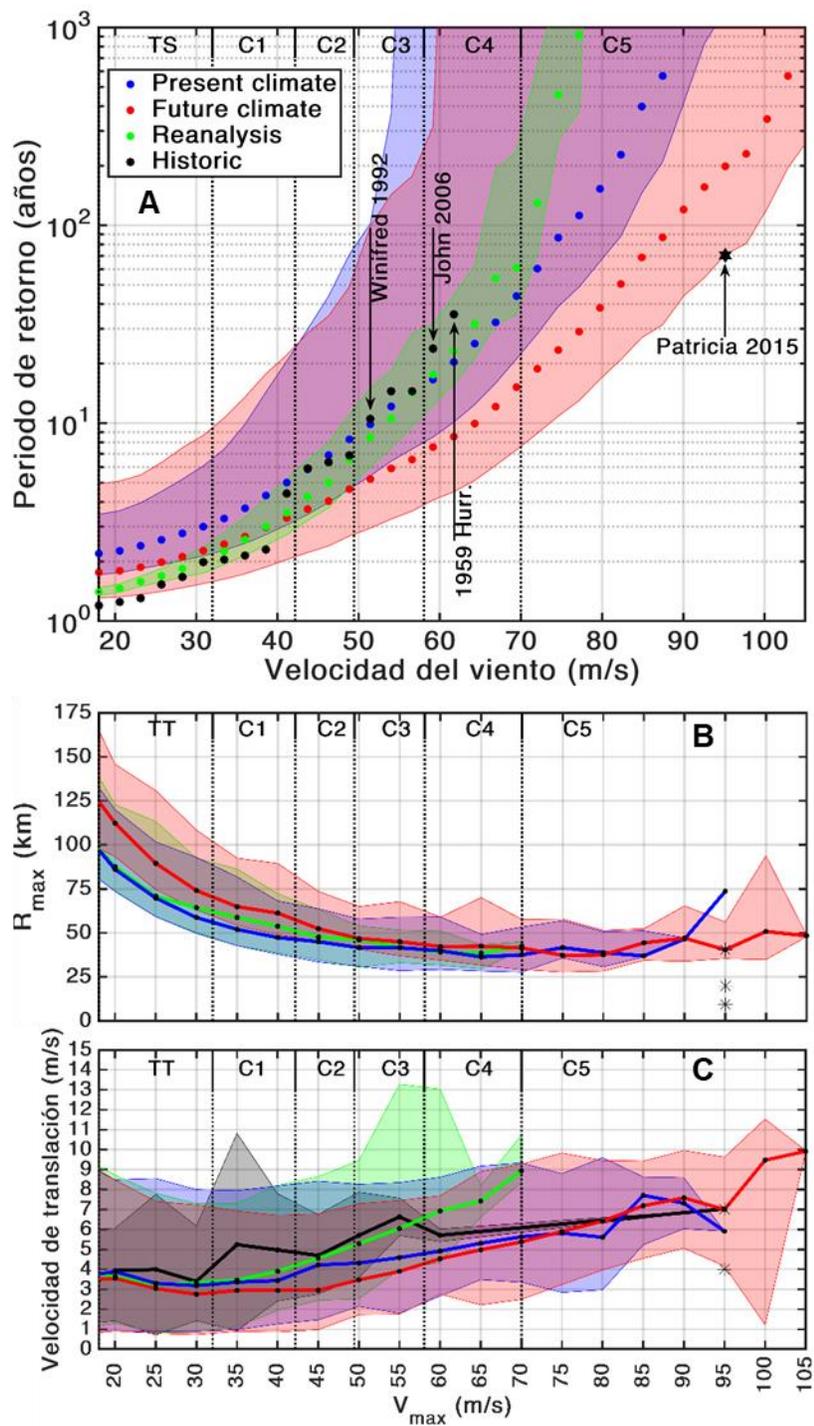


Figura 8. (A) Periodo de retorno en función de la velocidad del viento para los eventos históricos, y eventos derivados de reanálisis y climas presentes y futuros. (B) Radio máximo, R_{max} y (C) velocidad de translación de los CT, en función de V_{max} . Las regiones sombreadas representan la desviación estándar +/- 1 (A) y los intervalos de confianza del 95% y 5% (B-C).

4.2. Evaluación de ciclones tropicales bajo el calentamiento global

La evaluación del impacto del calentamiento global en la climatología CT se realiza a través de la tasa de cambio de frecuencia de V_{max} (Figura 9AB), su distribución espacial mediante el índice de disipación de potencia (PDI) (Figura 9C), así como analizando los principales parámetros asociados a V_{max} que afectan a la marea de tormenta (R_{max} y V_{tr} , Figura 8B-C) y utilizados para definir los parámetros clave para los eventos hipotéticos en el área de estudio (R_{max} y V_{tr}). De similar forma, se evaluó el impacto del calentamiento global sobre la frecuencia y distribución espacial de las entradas a tierra (Figura 10).

La Figura 9AB muestra la tasa de cambio en la frecuencia relativa de los CT, con una intensidad determinada, calculada como la diferencia entre la frecuencia relativa de CT derivada de los MGCs en el clima futuro y en el clima actual para la cuenca PNO (Figura 9A) y para el área de Manzanillo (Figura 9B). Tanto para PNO como para Manzanillo, los resultados de los eventos derivados de los MCG sugieren que los huracanes mayores serán más frecuentes bajo el cambio climático, mientras que los huracanes más débiles y las tormentas tropicales serán menos frecuentes (MPI-, IPSL-5-, y los eventos derivados de CCSM-4 son excepciones a esto).

Para estimar los cambios en la distribución de los ciclones tropicales se utilizó el índice de disipación de potencia (PDI). El PDI es una estimación de la cantidad total de energía cinética disipada por los CT durante su tiempo de vida en función del cubo de la velocidad máxima del viento (Emanuel 2005).

$$PDI = \int_0^{\tau} V_{max}^3 dt \quad \text{Ec. 12}$$

donde V_{\max} es la velocidad máxima sostenida del viento a la altitud de medición convencional de 10 m y τ es la vida útil de la tormenta.

El PDI se usa ampliamente en el análisis de tendencias de los CT y se ha utilizado en estudios de cambio climático con eventos sintéticos (Knutson et al. 2010; Kang and Elsner 2015).

Para los propósitos de este trabajo, para cada base de datos de CT derivada de cada MCG, el PDI se calcula dentro de cuadrículas de 0.5° en el área del PNO cercana a la costa mexicana y se acumula durante todo el período. La Figura 9C muestra la distribución espacial del cambio en PDI (m^3s^{-2}) promediado sobre los seis modelos en cada cuadrícula de 0.5° . Dicho cambio se define como la media multi-modelo de las diferencias entre el PDI promediado durante el período 2075–2100, y el promedio durante 1980–2005 de cada MCG. Las áreas blancas muestran regiones en las que menos de cuatro de los seis modelos están de acuerdo con el signo del cambio.

Los resultados muestran un aumento generalizado de PDI sobre mar abierto, mientras que cerca de la costa el PDI aumenta hacia el norte (por encima de los 18° de latitud), y disminuye hacia el sur. Las áreas con el mayor aumento en PDI están cerca de los estados de Nayarit, Jalisco y Colima (latitudes $18^\circ - 22^\circ$ N), donde se encuentra Manzanillo, así como en el Mar de Cortés (latitudes $26.5^\circ - 28^\circ$ N y $29.5^\circ - 30.5^\circ$ N respectivamente).

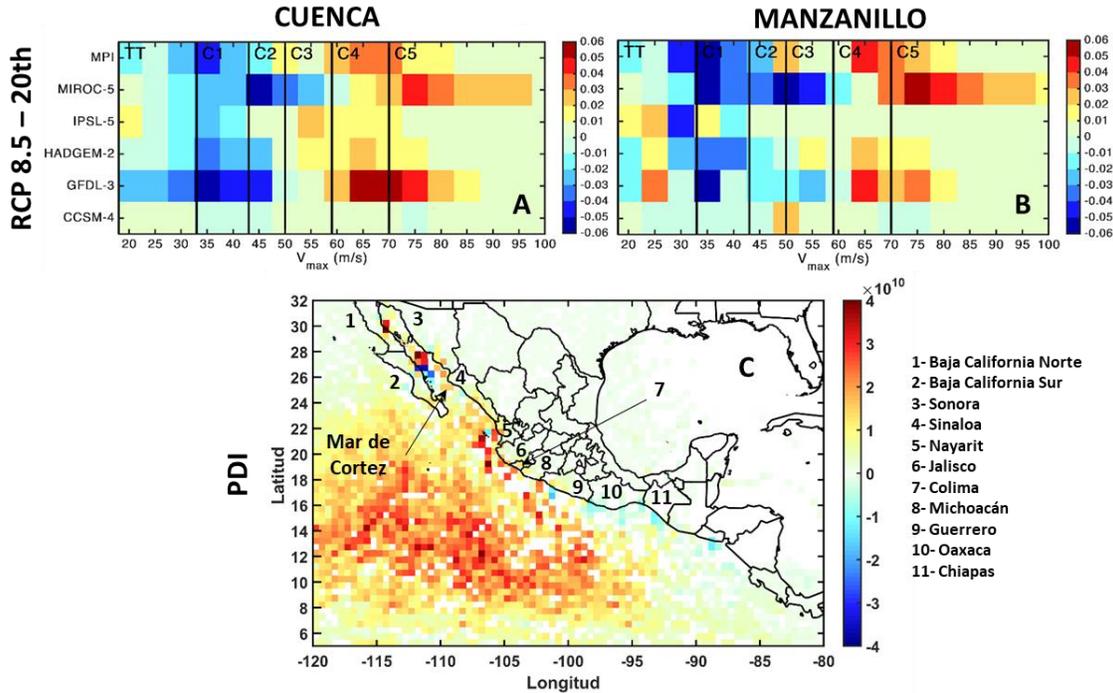


Figura 9. (A-B) tasa de cambio en la frecuencia relativa de la velocidad máxima del viento durante la vida del evento para los ciclones tropicales (A) ciclones tropicales en el noreste del Pacífico y (B) aquellos dentro de un área de radio 222km alrededor de Manzanillo bajo el escenario RCP 8.5 para 2075-2100. Cambio del Índice de disipación de potencia (PDI; m^3s^{-2}) promediado entre los 6 modelos calculado sobre una malla de celdas de 0.5° .

El impacto del calentamiento global sobre las entradas a tierras de los CT se evalúa a través de los cambios en frecuencia relativa y su distribución espacial. La Figura 10A-B muestra la tasa de cambio en la frecuencia de las entradas a tierra para tormentas tropicales, huracanes menores (categorías 1-2) y huracanes mayores tanto a nivel cuenca (Figura 10A) como para el área de Manzanillo (Figura 10B). Tanto para PNO como para Manzanillo, el promedio de los resultados de los eventos derivados de los MCG sugieren que las entradas a tierra de huracanes mayores serán más frecuentes bajo el cambio climático, mientras que los huracanes más débiles serán menos frecuentes (los eventos derivados de CCSM-4, MPI- y IPSL-5-, son excepciones a esto).

Los cambios en la distribución espacial de las entradas a tierra de los ciclones tropicales se muestran a través de la tasa de cambio del PDI entre el clima futuro y el presente a nivel estado mexicano (Figura 10C).

Se define el cambio como la media multi-modelo de las diferencias entre el PDI en el momento de la entrada a tierra promediado durante el período 2075–2100, y el promedio durante 1980–2005 de cada modelo a nivel estatal.

Las entradas a tierra son calculadas siguiendo la metodología expuesta en el apartado 3.1.1. Los resultados muestran un incremento del PDI de las entradas a tierra en los estados del norte de México (1 al 5) con excepción de Sonora (número 3).

En los estados del centro y del sur, se encuentra un descenso moderado en el PDI para los estados de Michoacán (8) y Oaxaca (10) y sin cambios importantes en el resto. Tanto los estados de Sonora (3), Jalisco (6) y Colima (7) se encuentran en áreas propensas al aumento del PDI (Figura 10C), sin embargo muestran pocos cambios en el PDI de las entradas a tierra (6 y 7) e incluso disminución (3). Este hecho se debe a que, a pesar de que existen huracanes mayores más frecuentes en la zona, estos o bien no tocan tierra o tienden a reducir su intensidad antes de tocar tierra.

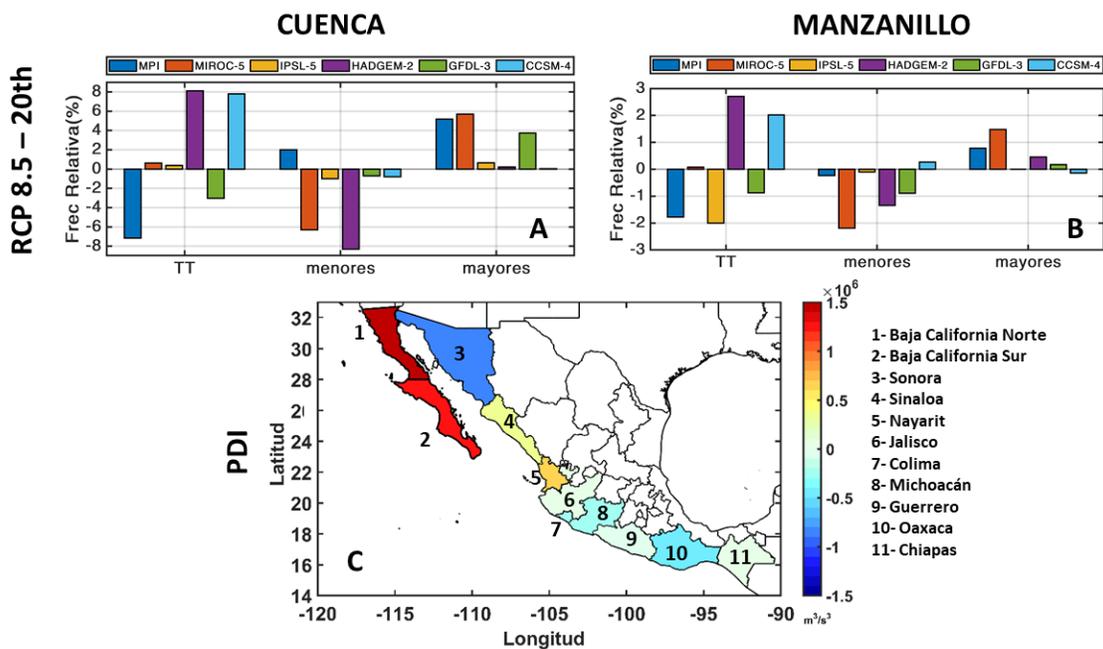


Figura 10. (A-B) Tasa de cambio en la frecuencia relativa de entradas a tierra de CT entre el clima presente y futuro de los (A) ciclones tropicales en el noreste del Pacífico y (B) aquellos dentro de un área de radio 222 km alrededor de Manzanillo. (C) Cambio del Índice de disipación de potencia (PDI; m^3s^{-2}) en

el momento de entrada a tierra, agrupado por estados mexicanos y normalizado por la longitud de la línea de costa de cada estado.

4.3. Peligro de inundación por marea de tormenta en la ciudad de Manzanillo

El mapeo de inundaciones generalmente se caracterizan en base a escenarios de inundación para obtener áreas de inundación espacial con una probabilidad particular de ocurrencia (Merz et al. 2007).

La inundación considerando el PR de 100 años es el escenario más común utilizado en la planificación, mitigación y diseño estructural de protección contra inundaciones, aunque también son utilizados eventos con probabilidades más altas (e.g. el PR de 10 años) o eventos extremos específicos que representan un PR determinado (Watt 2000; Büchele et al. 2006; De Moel et al. 2009).

Para Manzanillo se creó el cuasi-peor escenario de inundación basado en los parámetros de un evento extremo, el huracán Patricia (2015) que batió récords y que tocó tierra el 23 de octubre de 2015 aproximadamente a 80 km al norte de Manzanillo.

El huracán Patricia alcanzó una intensidad máxima de 185 kt (~95 m/s) y una presión mínima de 872 hPa en una ubicación en el océano a aproximadamente 230 km de nuestra área de estudio (según la base de datos HURDAT). Debido a las características extraordinarias del huracán Patricia, se considera como un caso atípico en nuestro análisis, lo que explica por qué el PR de los eventos históricos y derivados de reanálisis no captura ese evento en particular.

Un evento como el huracán Patricia representa un PR de ~ 4000 años para la media multi-modelo del clima actual y un PR de 198 años para el clima futuro (Figura 8A). Aunque se pueden esperar CT más intensos en el futuro (e.g., el PR medio multi-modelo para un CT con vientos de 100 m/s es de 330 años), el huracán Patricia (2015) puede considerarse uno de los CT más intensos que cabría esperar en el área.

Para proporcionar el resultado de marea de tormenta posible para el cuasi-peor de los casos para la intensidad del huracán Patricia, se utilizaron escenarios hipotéticos que consideran diferentes tamaños de tormenta, velocidades de translación y direcciones de

aproximación (dada su velocidad del viento, presión central y los parámetros relacionados como se muestra en Figura 8B-C).

La Tabla 6 muestra los parámetros del CT que componen los cinco conjuntos de eventos hipotéticos, obtenidos con el V_{max} y el P_o del huracán Patricia y diferentes valores para R_{max} y V_{tr} . Para R_{max} utilizamos tres valores diferentes, uno correspondiente al R_{max} máximo del huracán Patricia en un área dentro de los 222 km de Manzanillo (20 km), otro correspondiente al R_{max} del huracán Patricia al tocar tierra (9,26 km), y el último correspondiente a la media multi-modelo del huracán Patricia para el clima futuro. Los tres valores se indican con un asterisco en la Figura 8B. Se seleccionó la V_{tr} media y mínima (7 m/s y 4 m/s) obtenida dentro de los límites de confianza para eventos bajo cambio climático, como se muestra con asteriscos en la Figura 8C (la V_{tr} para Patricia fue de 5.6 m/s en el momento de intensidad máxima del viento y 7 m/s en tierra).

Tenga en cuenta que se utilizó el huracán Patricia (2015) para mostrar el uso de la metodología propuesta para estimar un cuasi-peor escenario de inundación. Si bien Patricia representa un evento muy extremo, con características más cercanas a eventos climáticos futuros (según la evaluación de intensidad en este estudio), el método se puede aplicar de acuerdo con los objetivos de un proyecto específico; por ejemplo, una intensidad de viento correspondiente a un PR de interés, una categoría de CT particular o un evento dado que haya afectado el área, como podrían ser los eventos ocurridos cerca de Manzanillo e incluidos en la Figura 8.

La marea de tormenta se calculó para cada evento hipotético, considerando un total de siete direcciones de aproximación diferentes a Manzanillo, con siete trayectorias paralelas por dirección (Figura 4). Como tal, se podrían realizar un total de 245 simulaciones, pero dado que 34 tienen trayectorias sobre tierra, solo se utilizó un total de 211 simulaciones para caracterizar la posible marea de tormenta y la inundación asociada, lo que permite la determinación del MEOW y las MoM. Estos mapas permitieron evaluar el cuasi-peor escenario para inundaciones inducidas por mareas de tormenta de CT, y así generar los mapas de peligro correspondientes.

Tabla 6. Características de las CT para los cinco escenarios (Casos) que componen el quasi-peor escenario de inundación analizado

	V_{\max} (m/s)	P_0 (HPa)	R_{mw} (km)	V_{tr} (m/s)	Nº eventos	PR (años)	
						20th	RCP8.5
Caso 1	95	872	9.26	7	47		
Caso 2	95	872	9.26	4	47		
Caso 3	95	872	20	7	41	~4000	198
Caso 4	95	872	20	4	41		
Caso 5	95	872	40.45	4	35		

La Figura 11A-B muestra la distribución espacial de la profundidad de la inundación y la categoría de peligro asociada. Las zonas inundadas por tormentas ocurren principalmente alrededor de los cuerpos costeros semicerrados y están casi ausentes a lo largo de la costa (Carniello et al. 2005; Olbert and Hartnett 2010; Rey et al. 2018).

Teniendo en cuenta que la marea de tormenta más grande jamás registrada en el mundo hasta el año 2014 fue de 13 m (Nott et al. 2014), se contemplan que las áreas propensas a inundaciones estén por debajo de una altura de 13 m. En la Tabla 3 se enlistan las áreas totales (en ha) bajo el contorno de 13 m con base a la topografía LiDAR) y dentro de la longitud -104.44 y -104.2393.

En el mapa de inundación del quasi-peor escenario (Figura 11A), se encontró valores de marea de tormenta por encima de 6 m sobre el nivel medio del mar, creando un área de peligro de inundación aproximada de 1602.5 ha (30.38% de las áreas con menos de 13 m de altura), donde la mayoría tiene una categoría de peligro Medio a Muy Alto.

Se identifican cinco áreas propensas a inundaciones en Manzanillo (zonas A-E en la Figura 11A). Las zonas A y B son principalmente áreas urbanas, la zona C tiene áreas agrícolas y estuarinas, la zona D es una combinación de sectores industriales, urbanos y agrícolas, y la zona E incluye áreas estuarinas pertenecientes a la laguna Juluapan rodeadas de áreas urbanas.

La convención de nomenclatura se refiere a diferentes áreas geográficas y no está relacionada con la convención estándar utilizada en los EEUU para mapas de inundación con

finas de evacuación. La marea de tormenta puede adentrarse en la laguna del Valle de las Garzas a través de los canales desde el puerto, y así inundar las áreas circundantes.

Las áreas afectadas en la zona A se componen de viviendas residenciales, servicios e instalaciones turísticas, especialmente al norte de la bahía de Manzanillo. Las áreas urbanas en la parte norte de la laguna de Cuyutlán (zona B) y sobre la barra de la laguna (zona D), están inundadas por la marea de tormenta que entra por la laguna de Cuyutlán. Esta inundación afecta a las principales infraestructuras industriales fuera del puerto, incluida la terminal para la recepción, almacenamiento y gasificación de gas natural, y la central termoeléctrica, así como algunas áreas urbanas y agrícolas con potencial de desarrollo urbano. La Zona C tiene áreas extensas con categorías de riesgo de inundación de Alto a Muy Alto, compuestas principalmente por áreas agrícolas y otras áreas de uso de la tierra. En la zona C, se debe considerar el potencial de inundaciones altas para desarrollos futuros. Las áreas alrededor de la Bahía de Santiago y la zona E solo son propensas a inundarse alrededor del canal de la laguna de Juluapan, donde se encuentran las instalaciones de servicio de playa. Las áreas urbanas más grandes de Manzanillo bajo Muy Alto y Alto peligro están situadas alrededor del Valle de las Garzas y las lagunas de Cuyutlán, así como el puerto de Manzanillo (Figura 11B).

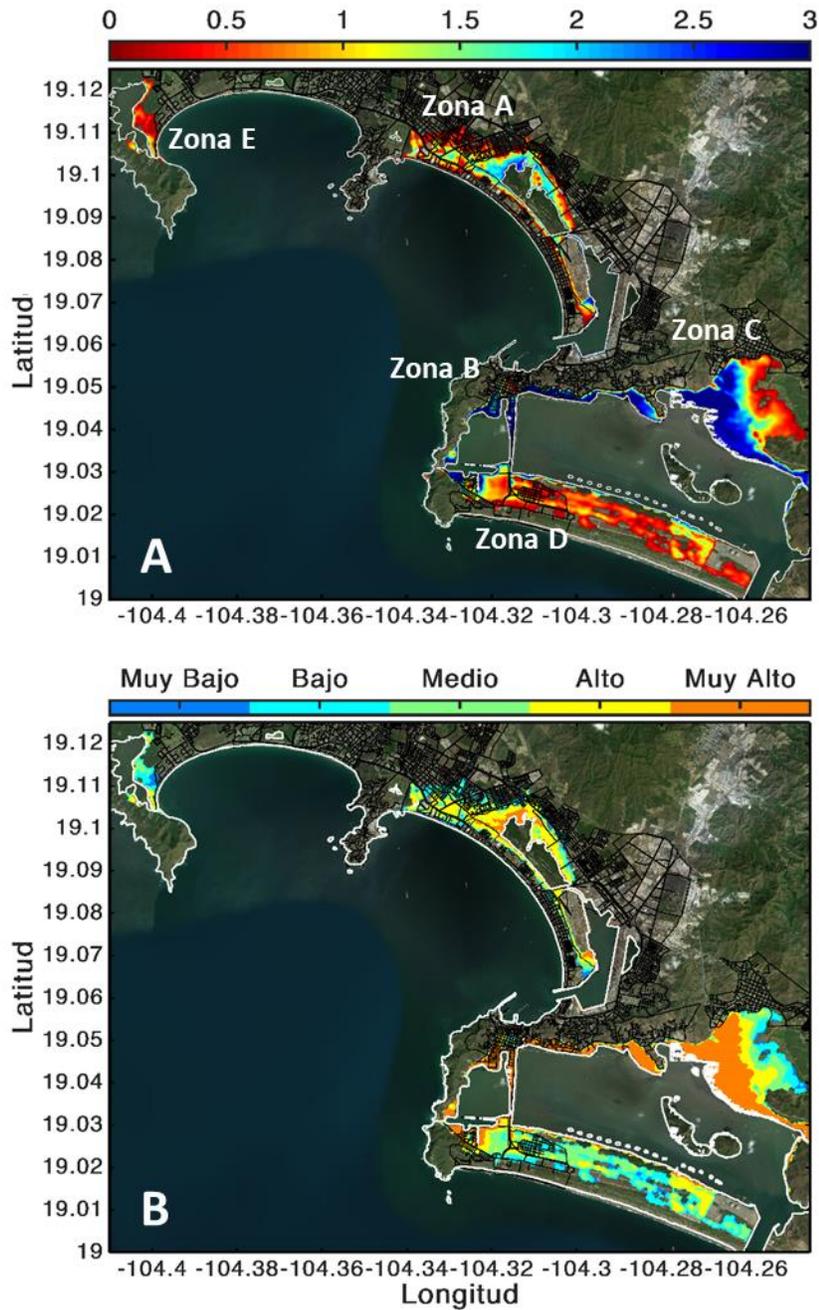


Figura 11. Distribución espacial de (A) profundidad de inundación de CT (m) y (B) categorización de peligro de inundación asociado.

La Figura 12 muestra el porcentaje de las regiones inundadas por categoría de peligro y uso de suelo, donde el porcentaje se obtiene con respecto al área total de cada región de uso de suelo por debajo de 13 m (ver Figura 6). Más del 21% de las áreas urbanas (534 ha) son propensas a inundaciones, de las cuales ~207.8 ha (8.3%) tienen un riesgo Muy Alto y

Alto, y 160.4 ha (6.4%) tienen una categoría de peligro Medio. Con respecto a las áreas con potencial desarrollo urbano (agricultura y otra vegetación), ~188.9 ha (10.7% y 7.85% respectivamente) tienen un riesgo Muy Alto o Alto, mientras que ~182.3 ha (12.5% y 3.2% respectivamente) se clasifican como de riesgo Medio y son ubicado principalmente en las zonas C y D.

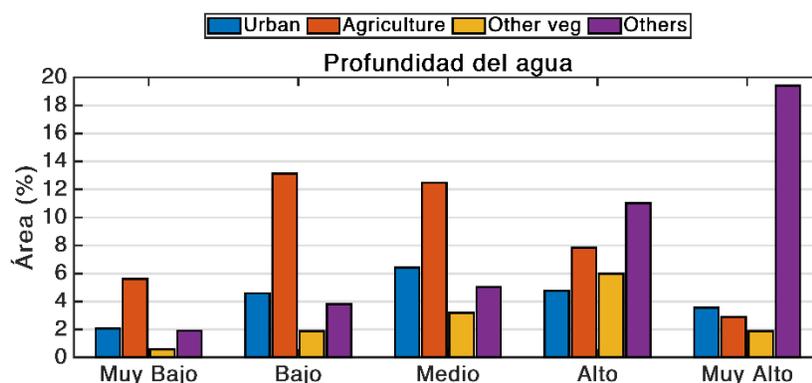


Figura 12. Porcentaje de áreas inundadas por categoría de peligro y uso de la tierra con respecto al área total de cada uso de la tierra por debajo de 13 m de altura.

4.3.1. Otros factores de peligro de inundación por marea de tormenta

En este estudio la categorización del peligro de inundación se basó únicamente en la profundidad de la inundación (elevación del agua sobre el nivel del terreno) dado que generalmente este es el factor que más influencia tiene en el daño y el que es más comúnmente empleado en el cálculo del peligro de inundación costera (e.g. Aerts et al., 2013; Rey et al., 2019). Sin embargo, la significancia de otros parámetros de peligro en la inundación por marea de tormenta de ciclones tropicales no es comúnmente analizado.

Una de las ventajas de la simulación hidrodinámica de la marea de tormenta e inundación terrestre asociada es que permite la obtención de varios de los diferentes parámetros de peligro de inundación frecuentemente utilizados para caracterizar las inundaciones continentales, tales como la velocidad del flujo, la duración de la inundación, la tasa de aumento del agua, etc.

La Figura 13 muestra la distribución espacial y de la categoría de peligro asociado de la velocidad de la corriente, el tiempo de permanencia de la inundación y el ratio de

crecimiento de la inundación y la *Figura 14* muestra el porcentaje de las regiones inundadas por categoría de peligro y uso de suelo, donde el porcentaje se obtiene con respecto al área total de cada región de uso de suelo por debajo de 13 m (ver *Figura 6*). La categorización del peligro puede ser realizada combinando diferentes parámetros de peligro siguiendo diferentes criterios en función de las características del área de estudio y el tipo de evento de inundación (e.g. Ahmadisharaf et al., 2015; De Bruijn et al., 2009; Islam y Sado, 2000). Aquí se analizó la distribución espacial de los parámetros de peligro de forma individual para estimar la importancia de estos parámetros en el caso de estudio. La clasificación de categorías de peligro empleadas es mostrada en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Clasificación de categorías de peligro por velocidad de la corriente, duración de la inundación y tasa de incremento de la inundación.

Velocidad de la corriente (m/s)	Duración de la inundación (h)	Tasa de incremento de la inundación (m/h)	Categorías Peligro
0.0 - 0.5	0 – 6	0.0 - 0.2	Muy Bajo
0.5 – 1.0	6 – 12	0.2– 0.5	Bajo
1.0 - 1.5	12 - 18	0.5- 1.0	Medio
1.5 - 2.0	18 - 24	1.0 - 2.0	Alto
> 2.0	> 24	> 2.0	Muy Alto

En Manzanillo se puede encontrar velocidades máximas del flujo (V_f) durante la inundación por marea de tormenta que superan los 2.5 m/s. Todas las V_f por encima de 1.5 m/s se sitúan sobre humedales (fondo estuario) en los alrededores de las lagunas interiores. Un 7.1% de las áreas urbanas bajo una altura de 13 m tienen velocidades entre 0.5 y 1 m/s. El producto de velocidad del flujo y la profundidad de la inundación (impulso) se considera un indicador importante de la severidad de las inundaciones, especialmente relativo a la inestabilidad humana en situaciones de inundaciones (Merz et al. 2007).

Las personas pierden estabilidad en flujos con relativamente bajos (impulso entre 0.6 y 2m²/s) (Jonkman and Penning-Rowse 2008). En las áreas urbanas de Manzanillo se dan las condiciones para encontrar áreas con impulso que pueden ser considerado peligroso (zonas con profundidad a partir de 1.2 m para V_f 0.5 m/s y 0.6 m para V_f 1 m/s). Cabe

destacar que el impulso debe ser calculado individualmente para cada TC con el fin de asegurar que ambas, profundidad y V_f se den al mismo tiempo. Sin embargo, la inundación por marea de TC de puede generar V_f lo suficientemente intensas para ser consideradas dentro del peligro.

El tiempo de permanencia de la inundación o duración de la inundación es un factor de daño importante para los ecosistemas y las tierras agrícolas (Merz et al. 2007) así como para la gestión del riesgo y los daños resultantes (De Moel et al. 2009).

El tiempo de permanencia de la marea de tormenta de TC varía entre varias horas y medio día para CT y entre 2 y 5 días para ciclones extratropicales (Von Storch 2014). En el escenario analizado, se encuentran tiempos de permanencia de la inundación por encima de 24 horas (Figura 13A), aunque la mayor parte de las cuales corresponden a zonas de humedal (Figura 14 A). Por otro lado, el 13 % de las áreas urbanas y el 24 % de las áreas agrícolas pueden estar inundadas durante más de 12 horas. Esta duración podría ser considerada un factor importante para la gestión del riesgo y puede provocar daños permanentes en la vegetación y salinización del suelo (Fritz et al. 2007). Asimismo, un tiempo de permanencia largo suele asociarse con enfermedades transmitidas por vectores.

La información sobre la extensión de la inundación y la velocidad a la que sube el agua es fundamental para los planificadores de emergencias a cargo de la evacuación y para estimar la posible pérdida de vidas (De Moel et al. 2009; Vorogushyn et al. 2010). De Bruijn y Klijn (2009) sugieren que las muertes son más probables con tasas de aumento de agua superiores a 0.5 m/h durante los primeros 1.5 m de profundidad. En Manzanillo se encontró que en el 14.9 % de las zonas agrícolas y el 5.5 % de las urbanas existen tasas de aumento superiores a 0.5 m/h.

Con base en los resultados, en el análisis del peligro de inundación por marea de tormenta, además de la profundidad de la inundación, otros parámetros de peligro de inundación como la velocidad del flujo, la duración de la inundación, la tasa de aumento del agua pueden llegar a ser relevantes. Sin embargo, estos parámetros de peligro de inundación están ligados a la fisiografía del lugar y la intensidad del evento o escenario analizado. El cuasi-peor escenario aquí analizado si denota la importancia de estos factores de peligro, pero debe ser considerado que el escenario corresponde a una intensidad de viento de CT record en los datos históricos y se ha realizado en un área con una fisiografía compleja. Es por ello,

que el análisis de la importancia de estos parámetros debe ser estudiado para cada caso en particular y en función de los objetivos de cada proyecto.

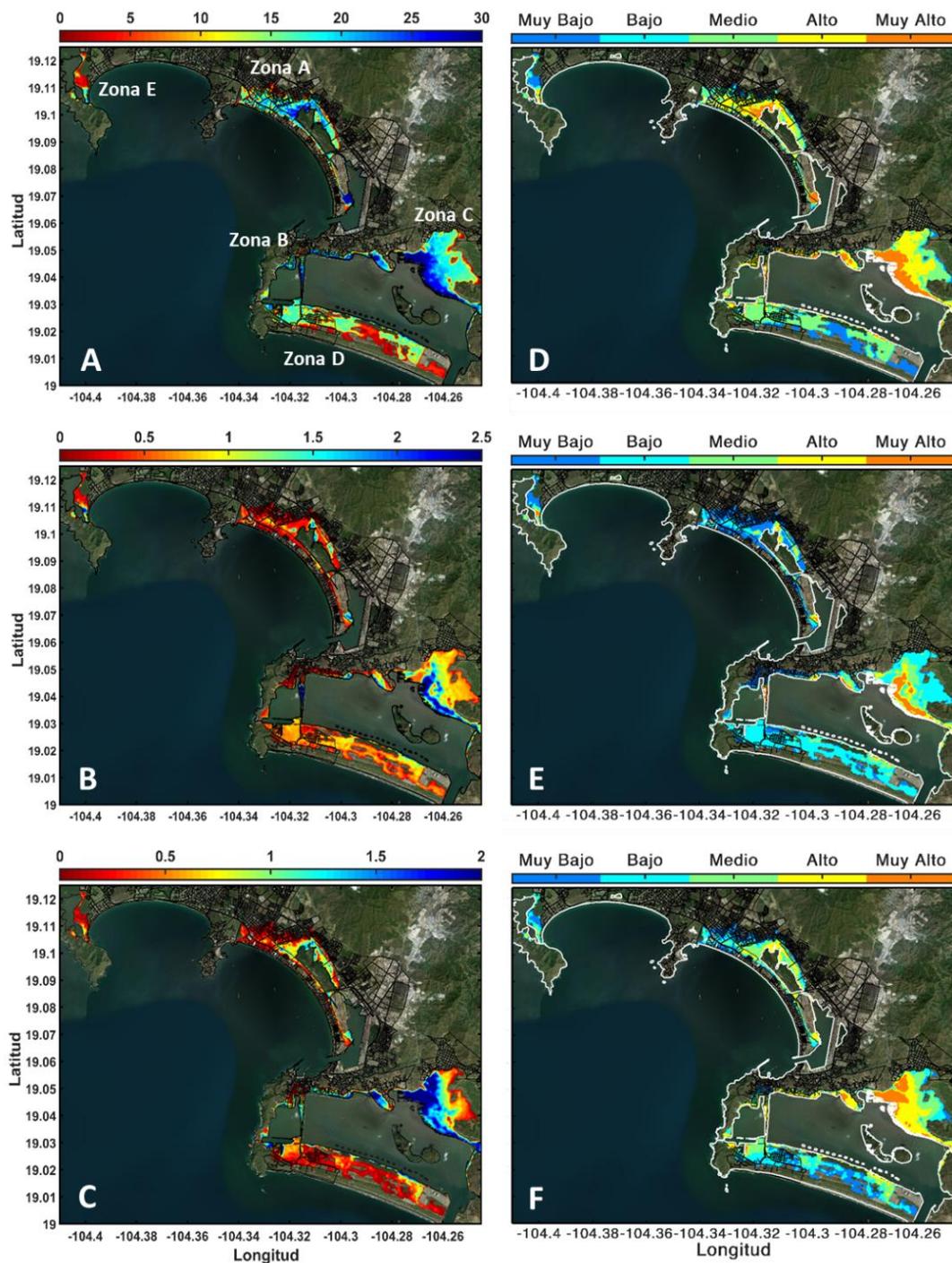


Figura 13. Distribución espacial de (A) Tiempo de permanencia de la inundación (horas) (B) Velocidad de la corriente (C) Tasa de aumento del agua (m/h) y (D-E-F) categorización de peligro de inundación asociado respectivamente.

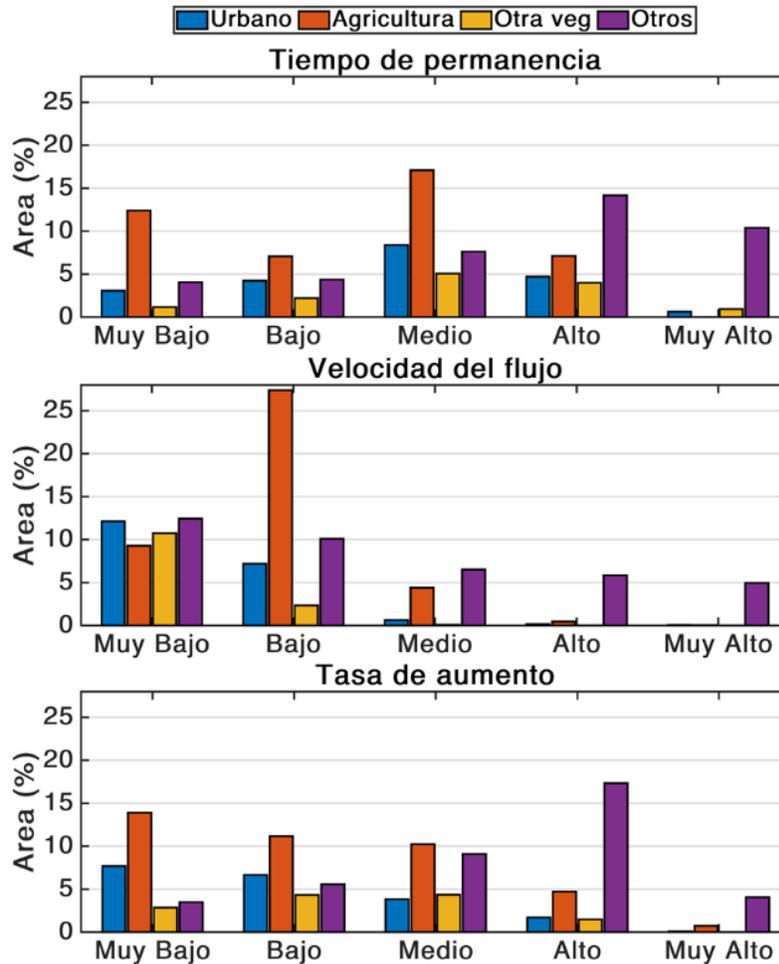


Figura 14. Porcentaje de áreas inundadas por categoría de peligro y uso de la tierra con respecto al área total de cada uso de la tierra por debajo de 13 m de altura.

4.3.2. Comparación con otras metodologías en México

El Atlas de Peligros y Riesgos en el estado de Colima (APREC, 2015) sigue la metodología de CENAPRED (2006) para estimar el peligro de los CT. Este método calcula la altura máxima de la marea de tormenta en base a ecuaciones paramétricas (Ec. 13 y Ec. 14) y los mapas de inundación relacionados se obtienen como las áreas topográficas debajo de la línea de contorno bajo la altura de inundación calculada con una probabilidad de ocurrencia basada en los datos históricos de CT.

$$h = (0.03 R_{max} + 0.000119 V_{max} - 1.4421) F \quad \text{Ec. 13}$$

donde h es la altura máxima de la marea de tormenta (m), V_{max} (km/h), R_{max} (km) y F es un factor correctivo por dirección del viento:

$$F = \begin{cases} 0.6 (1 + \sin \alpha) & 0^\circ < \alpha < 180^\circ \\ 0.6 & \text{otros} \end{cases} \quad \text{Ec. 14}$$

donde α ($^\circ$) es el ángulo que forma la dirección de traslación del CT con respecto a la costa cerca del sitio de interés.

Siguiendo el método CENAPRED, el APREC (2015) estima una altura máxima de la marea de tormenta de 5.4 m para un huracán de Categoría 3. Considerando las Ec. 13 y Ec. 14, el huracán Patricia (2015) generaría una altura máxima de marea de tormenta de 7.0 m si se consideran sus características en tierra ($V_{\max} = 242.6$ km/h y $R_{\max} = 9.26$ km) y una dirección de aproximación perpendicular a la costa ($\alpha = 90^\circ$), y una altura de marea de tormenta de 15.7 m si se consideran sus valores máximos ($V_{\max} = 342$ km/h y $R_{\max} = 20$ km).

La Figura 15 muestra la comparación entre las áreas urbanas inundadas por un huracán de categoría 3 según lo determinado por APREC (2015), y el escenario de inundación para el cuasi-peor escenario obtenido en este estudio (basado en eventos hipotéticos con variaciones del huracán Patricia). Note que APREC (2015) consideró en base a datos históricos que la máxima categoría posible en Manzanillo es tres.

La Figura 15 también muestra las curvas de nivel de 5.4, 7 y 15.7 m, correspondientes a los valores mencionados anteriormente. Se observa una sobreestimación significativa de las áreas propensas a la inundación empleando el método propuesto por CENAPRED (2006), como se ve en la Figura 15 con la línea de contorno de 5.4 m (análoga al estudio APREC), 7 m y 15.7 m, las cuales son demasiado elevados en comparación con los valores obtenidos al hacer las simulaciones numéricas. Por lo tanto, el método CENAPRED (2006) sobreestima las áreas de peligro de inundación, lo que puede conllevar una gestión del riesgo inadecuada. Los resultados destacan las limitaciones del enfoque paramétrico del método CENAPRED (2006), que al no incluir el modelado de marea de tormenta, lleva a resultados poco realistas en regiones de morfología compleja. Por lo tanto, dado que los modelos basados en Sistemas de Información de Geografía no consideran la dinámica del flujo, pueden proveer un panorama general de la inundación en áreas de gran extensión. Sin embargo, para obtener información detallada es necesario el uso de modelos hidrodinámicos (Seenath et al. 2016).

Por otro lado, en el Programa de Desarrollo Urbano (PDU 2015) del Instituto de Planificación del Desarrollo Sostenible de Manzanillo (INPLAN, www.inplanmanzanillo.com), muchas de las áreas de reserva urbana, incluyendo áreas de reserva a corto plazo, están situadas cerca de la costa. Según el análisis, dichas áreas se ubican

en las zonas C y D, encontrándose bajo un peligro de inundación por marea de tormenta de CT Muy Alto y Alto, por lo que los desarrollos futuros estarán altamente expuestos a la inundación por marea de tormenta.

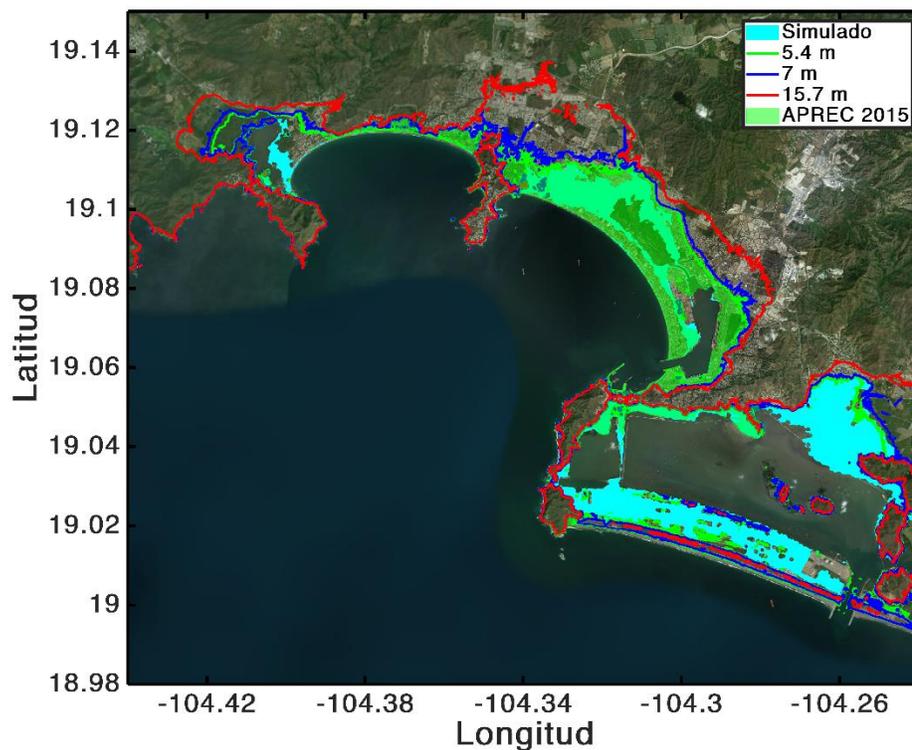


Figura 15. Distribución espacial de inundaciones por marea de tormenta derivada según APREC (2015) (metodología CENAPRED, 2006) para CT con Categoría 3 (polígono color verde con transparencia) y para el escenario basado en el huracán Patricia (2015) (Categoría 5, color cian) y curvas de nivel de 5.4 m (verde), 7 m (azul) y 15.7 m (rojo). Nota: APREC (2015) solo muestra las áreas propensas a inundarse de zonas urbanas.

4.3.3. Influencia de los parámetros principales de los CT sobre la inundación en Manzanillo.

La comparación entre las áreas inundadas por los eventos de los cinco escenarios analizados (Tabla 6) permite conocer la sensibilidad de la inundación de Manzanillo a los parámetros del CT (R_{max} y V_{tr}) así como el ángulo de aproximación del CT. La Figura 16 muestra las áreas inundadas por los eventos de cada uno de los cinco escenarios cuyo centro

de la tormenta (Figura 16ABC) y los eventos cuyo R_{max} (Figura 16DEF) se sitúa sobre la ciudad de Manzanillo, ordenados según la dirección de aproximación y el uso del suelo. Dada la compleja fisiografía y la distribución de los usos del suelo en Manzanillo, se encuentran grandes diferencias en la inundación resultante en función del ángulo de aproximación del evento a la ciudad. La superficie inundada está ligada a la dirección de aproximación del CT pero también a la distancia a la que pase el evento y su velocidad de translación. Así, si el evento toca tierra con el centro del huracán sobre Manzanillo (Figura 16A), éste inundará más áreas urbanas entre las direcciones de aproximación 190° y 280° , siendo máxima para 220° . Sin embargo, si el evento toca manzanillo sobre su R_{max} (Figura 16D) se producirá mayor inundación de las áreas urbanas si el evento proviene de direcciones más hacia el sur (130° a 220°), con su máximo bajo la dirección de aproximación de 160° . De igual forma se encuentran diferencias en las áreas inundadas para las zonas agrícolas (Figura 16BE) y de otra vegetación (Figura 16BCF).

La influencia del tamaño de la tormenta (R_{max}) se muestra mediante la comparación entre los casos 5, 4 y 1 (V_{tr} 4 m/s y R_{max} 40.45, 20 y 9.26 km) y la influencia de la velocidad de translación entre los casos 4 y 3 (V_{tr} 4 y 7 m/s y R_{max} 20 km) o los casos 2 y 1 (V_{tr} 4 y 7 m/s y R_{max} 9.26 km) (Tabla 6) en la Figura 16.

En Manzanillo, la extensión y la profundidad de la inundación derivada de la marea de tormenta sigue generalmente el criterio de a mayor tamaño de la tormenta y a menor V_{tr} , mayor marea de tormenta e inundación asociada. Sin embargo, se presenta alguna excepción, como por ejemplo, en el caso de que el evento se aproxime desde 220° y 250° y toque tierra con su centro sobre Manzanillo (Figura 16B), donde las áreas agrícolas inundadas son más extensas a medida que el tamaño de la tormenta es menor R_{max} en el caso de una velocidad de translación lenta (Caso 2, Caso4 y Caso 5), pero no observado cuando la velocidad de translación es más rápida (Caso 3 y Caso 1).

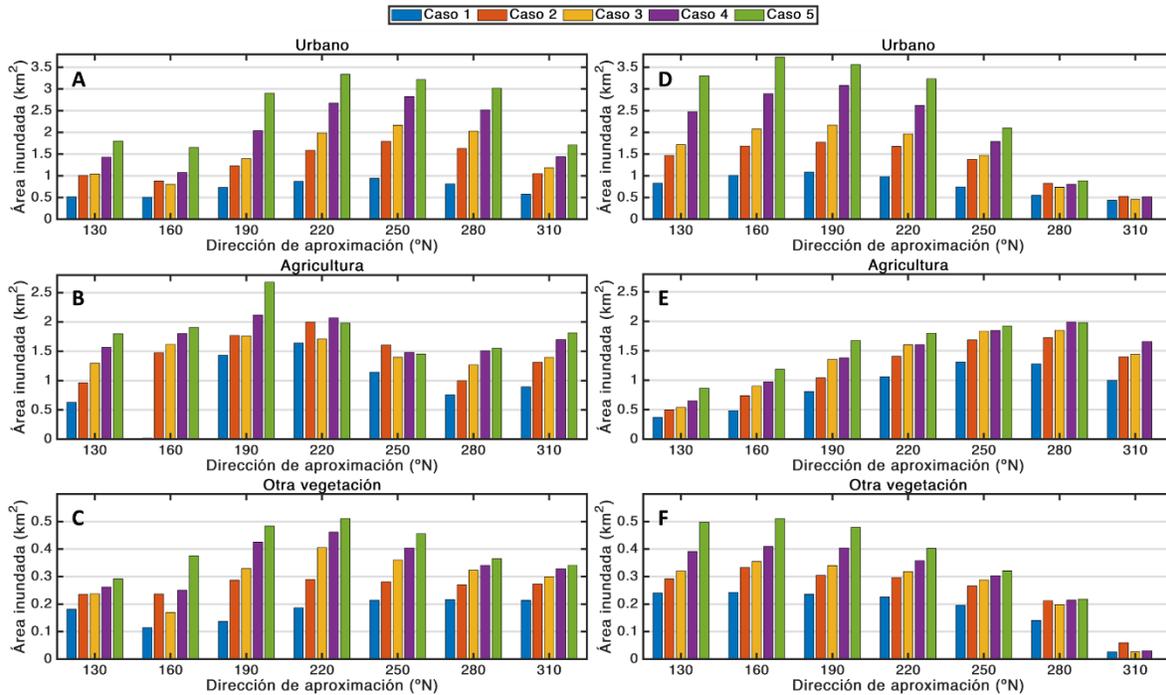


Figura 16. Áreas inundadas por uso del suelo de los eventos de cada escenario cuyo centro de la tormenta (ABC) y cuyo R_{max} (DEF) pasa por Manzanillo según la dirección de aproximación al punto de interés.

4.3.4. Análisis de escenarios (Casos) necesarios en la generación del quasi-peor escenario de inundación.

En el estudio se emplearon cinco conjuntos de eventos hipotéticos (Casos) obtenidos mediante la combinación de los parámetros principales de los CT mostrados por eventos sintéticos bajo clima futuro. A continuación se analiza las áreas de inundación aportadas por cada Caso a la distribución espacial de la inundación resultante del quasi-peor escenario (envolvente de máximos de los MoM). Aunque para cada trayectoria de un CT la inundación es, generalmente, más extensa contra mayor sea el tamaño de la tormenta y menor V_{tr} , la compleja fisiografía de Manzanillo implica que diferentes áreas de la ciudad alcancen mayor o menor profundidad y extensión de la inundación en cada Caso.

La Figura 16 muestra la diferencia entre las distribuciones de la inundación final del quasi-peor escenario y las de cada Caso. Las áreas en color blanco se corresponde con las áreas aportadas por cada Caso a la distribución de la inundación final y en color magenta aquellas áreas que no son inundadas por el Caso respecto al quasi-peor escenario. Casi la

totalidad de las zonas inundadas son aportadas por aquellos Casos con una V_{tr} menor (4 m/s) combinada con diferentes tamaños de la tormenta (Casos 2, 4 y 5).

El Caso 1 ($R_{max} = 9.26$ km y $V_{tr} = 4$ m/s; Figura 16 A) provoca la menor extensión de la inundación no aportando ningún área a la distribución de la inundación final.

El Caso 2 ($R_{max} = 9.26$ km y $V_{tr} = 4$ m/s; Figura 16 B) provoca la mayor profundidad de inundación en las áreas con uso del suelo Agrícola y Otros situados en la Zona C y áreas junto a la terminal GNL en barra de la laguna de Cuyutlan (Zona D).

El Caso 4 ($R_{max} = 20$ km y $V_{tr} = 4$ m/s; Figura 16 D) engloba casi toda las áreas Agrícolas y Urbanas en barra de la laguna de Cuyutlan (Zona D).

El Caso 5 ($R_{max} = 40.45$ km y $V_{tr} = 4$ m/s; Figura 16 E) casi la totalidad del resto de las áreas. A su vez, tanto los Casos 4 y 5 abarcan individualmente casi la totalidad de la extensión de la distribución de la inundación del quasi-peor escenario.

Por último, el Caso 3, que combina la V_{tr} más rápida con $R_{max} = 20$ km (Figura 16 C), provoca la mayor profundidad de inundación en reducidas áreas en la Barra de las brisas. Sin embargo las diferencias de profundidad es esas zonas respecto a los respecto a los Casos 4 y 5 son generalmente inferiores a 0.2 m con limitadas zonas que alcanzan los 0.3 m. De igual forma, en las áreas aportadas por el Caso 2, las diferencias respecto al Caso son inferiores a 0.20 m.

En base a los resultados, se justifica la posibilidad de reducir la cantidad de Casos de eventos hipotéticos necesarios para estimar el quasi-peor escenario de inundación. Así, en zonas con fisiografías complejas, el empleo de un escenario basado en la menor V_{tr} combinada con diferentes tamaños de la tormenta relacionados con la V_{max} seleccionada, puede ser lo suficientemente aproximado para representar el quasi-peor escenario. Esto se traduce en una considerable reducción de la cantidad de eventos a simular en la metodología (por ejemplo, 76 eventos de los Casos 4 y 5 en lugar de 222 eventos de todos los Casos) y por ende, la posibilidad de mejorar en la resolución de la malla computacional, el empleo de modelos numéricos acoplados oleaje-corriente, etc.

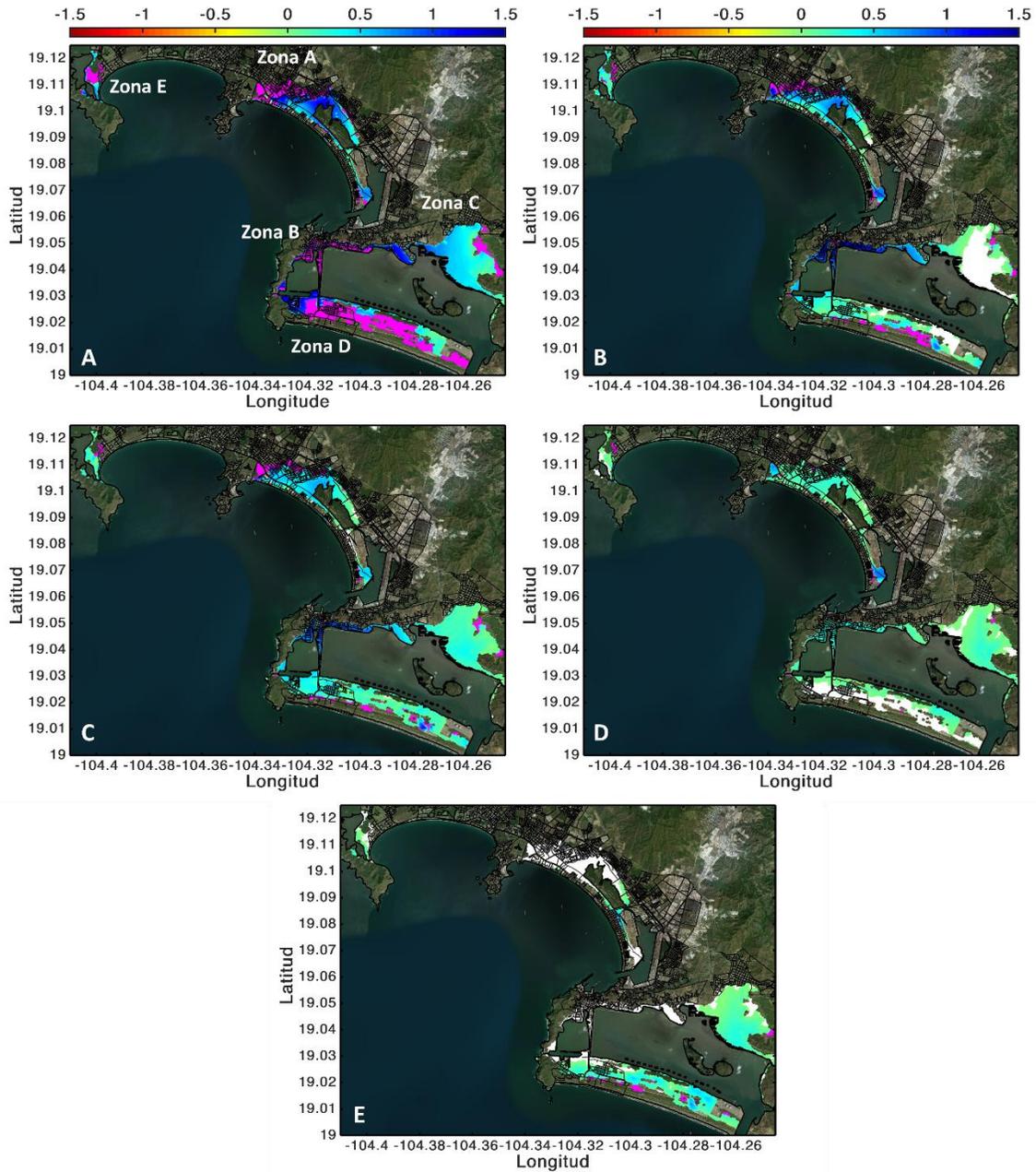


Figura 17. Diferencia entre la distribución espacial de la inundación del quasi peor escenario y: (A) Caso 1 ($V_{tr} = 7 \text{ m/s}$ y $R_{max} = 9.26 \text{ km}$); (B) Caso 2 ($V_{tr} = 4 \text{ m/s}$ y $R_{max} = 9.26 \text{ km}$); (C) Caso 3 ($V_{tr} = 7 \text{ m/s}$ y $R_{max} = 20 \text{ km}$); (D) Caso 4 ($V_{tr} = 4 \text{ m/s}$ y $R_{max} = 20 \text{ km}$); (E) Caso 5 ($V_{tr} = 4 \text{ m/s}$ y $R_{max} = 40.45 \text{ km}$). En color blanco se muestran las áreas de la inundación aportadas a la distribución final de la inundación por cada Caso y en color magenta las áreas no inundadas por el Caso y si presentes en la distribución final de la inundación del quasi-peor escenario analizado.

4.4. Vulnerabilidad y riesgo de marea de tormenta tropical en la ciudad de Manzanillo

La Figura 18 muestra la distribución espacial del peligro (Figura 18A), la vulnerabilidad socioeconómica de las áreas inundadas (Figura 18B), el riesgo a escala de manzana urbana (Figura 18C) y el porcentaje de manzanas urbanas y el porcentaje de área inundada con respecto al total de manzanas urbanas por categoría (Figura 18D).

Las manzanas urbanas inundadas sin información de vulnerabilidad (sin viviendas privadas o habitantes, como áreas industriales o áreas sin desarrollo) se muestran en color blanco (Figura 18A). Dada la topografía montañosa de la región, solo 500 manzanas urbanas son propensas a inundaciones de marea de tormenta (17.8% sobre el total de las manzanas de la ciudad, cubriendo el 34.3% del área total de las manzanas). De ellas, 437 manzanas (15.5% del total de manzanas y 87.4% de las manzanas inundadas) tienen vulnerabilidad y riesgo socioeconómico cubriendo 1015.9 ha (23.87% del área total).

Las áreas propensas a inundaciones con peligro Muy Alto se distribuyen principalmente alrededor del Valle de las Garzas y las lagunas de Cuyutlán, mientras que la zona C solo cuenta con una manzana en esta categoría y la zona E no tiene ninguna. Aunque el número de manzanas es similar para cada categoría de peligro, aquellos con peligro Muy Alto y Alto (164 manzanas) cubren áreas más extensas (1044.8 ha; 16.3%) en comparación con aquellos con peligro Medio o Bajo (189 manzanas; 245 ha; 5.8%). Las otras sesenta y tres manzanas (2.2%) sin vulnerabilidad socioeconómica y propensas a las inundaciones (Figura 18A, en color blanco), incluyen grandes manzanas de carácter industrial tales como como el puerto de Manzanillo y la planta de energía (zona D). Estas cubren el 9.75% del área total y la mitad de ellos tienen un peligro Muy Alto y Alto (389 ha; 9.15%).

La mayor parte de las manzanas urbanas inundadas tienen vulnerabilidad Muy Baja y Baja (365 manzanas; 13.99% del total, cubriendo 985.6 ha; 23.16% del área total) no encontrándose ninguna con vulnerabilidad Muy Alta. Trece manzanas (0.46%) tienen vulnerabilidad Alta, cubriendo 5.42 ha (0.13%), estando ubicadas en la zona B con la excepción de dos de ellas en la Barra de las brisas. Los resultados muestran solo 29 (1.03%) manzanas con riesgo Muy Alto (1) y Alto (28), cubriendo 15.27 ha (0.36%), todas ubicadas en la zona B. Las manzanas con riesgo Medio (86 bloques que representan 3.06 %) cubren

41.4 ha (0.97%), y se ubican principalmente en la zona B, con algunas de ellas presentes en las zonas A y D.

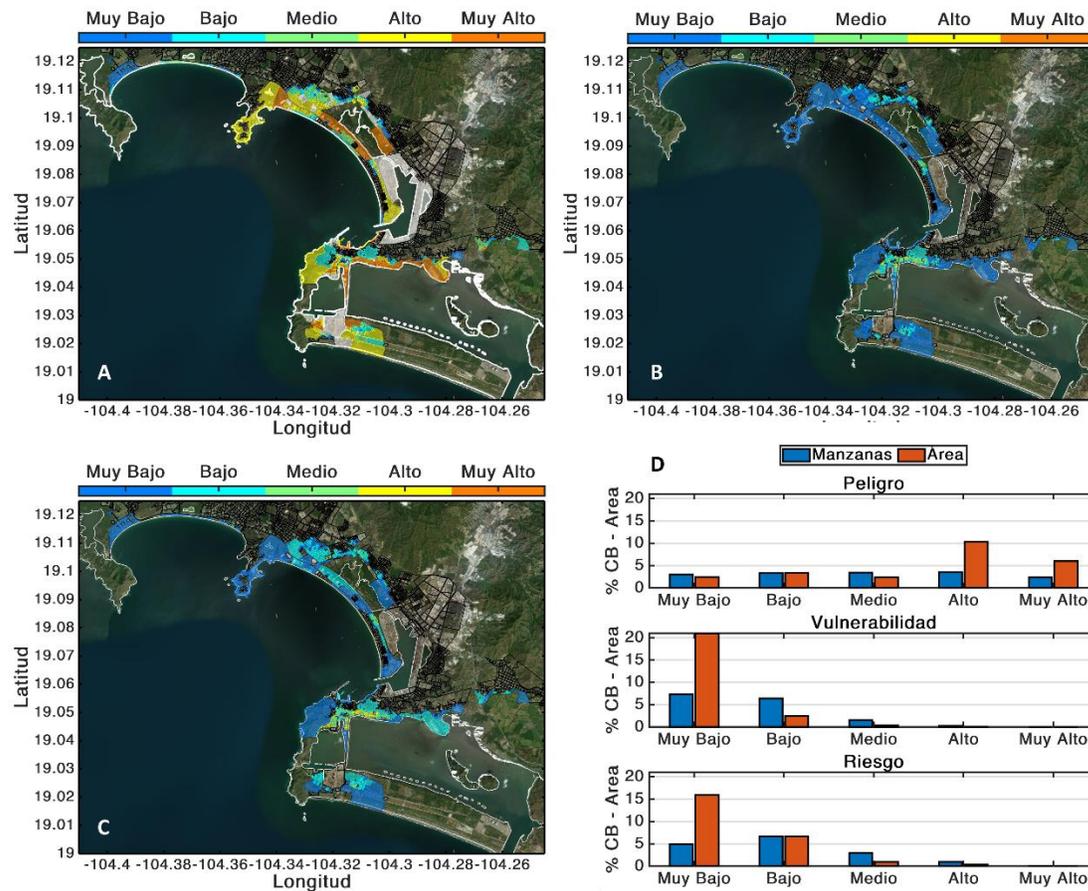


Figura 18. Distribución espacial para manzanas urbanas de (A) peligro de inundación de CTs, (B) vulnerabilidad socioeconómica (C) riesgo de inundación de CTs y (D) porcentaje del número de manzanas urbanas y área cubierta inundada por categoría de peligro (arriba), vulnerabilidad (medio) y riesgo (abajo). Las áreas de color blanco corresponden a bloques de ciudades inundadas sin vulnerabilidad socioeconómica.

Los efectos del cambio climático sobre los CT aumentan la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, donde la frecuencia de los eventos más intensos, así como las entradas a tierra aumenta tanto a nivel cuenca como en Manzanillo. Así, en condiciones de cambio climático RCP 8.5, la frecuencia de las inundaciones más intensas asociadas a los TC se verá incrementada. A pesar de que Manzanillo cuenta con una topografía escarpada, su compleja fisiografía, incluyendo la presencia de lagunas interiores y la distribución de los

usos del suelo, hace que extensas áreas urbanas (e industriales) sean propensas a la inundación por marea de tormenta.

Desde el enfoque del quasi-peor escenario empleado en este estudio, se encontraron áreas urbanas y de reserva urbana cerca de la costa de Manzanillo (actualmente áreas agrícolas y de otra vegetación) sujetas a peligro de inundación Muy Alto y Alto. Sin embargo, la vulnerabilidad socioeconómica de las áreas inundadas es, en general, Muy Bajo y Bajo, y por lo tanto, a pesar de las altas categorías de peligro que se encuentran en algunas de las manzanas de la ciudad, el riesgo es principalmente Muy Bajo y Bajo. Las manzanas urbanas con riesgo Muy Alto y Alto se encuentran ubicadas principalmente en la parte norte de la laguna de Cuyutlán.

Capítulo 5

Conclusiones

Este estudio presenta un nuevo enfoque para obtener los mapas de los cuasi-peores escenarios para la gestión de riesgo de daño por inundación por marea de tormenta de ciclones tropicales para diferentes probabilidades de ocurrencia en condiciones climáticas actuales y futuras.

Para caracterizar la climatología presente y futura de los ciclones tropicales, se utilizaron eventos sintéticos obtenidos mediante técnicas de reducción de escala de reanálisis climáticos y Modelos Climáticos Globales de Atmósfera/Océano.

La climatología se empleó para determinar el período de retorno de la intensidad máxima de vientos de los ciclones tropicales en climas presentes y futuros para crear un conjunto de ciclones tropicales hipotéticos que representan el cuasi-peor escenario para un período de retorno correspondiente al huracán Patricia (2015).

Se utilizaron eventos hipotéticos, derivados en base al huracán Patricia, para caracterizar los niveles de inundación de marea de tormenta usando un modelo hidrodinámico.

Los mapas de peligro de inundación obtenidos con la modelación matemática, se emplearon junto con la vulnerabilidad socioeconómica a nivel de manzana urbana para evaluar el riesgo de daño por inundaciones causadas por ciclones tropicales.

Los resultados de la evaluación de la climatología de ciclones tropicales muestran que la frecuencia de las categorías mayores en la cuenca del Pacífico oriental y cerca de Manzanillo aumentará bajo el escenario de calentamiento global RCP 8.5. Lo anterior implica que el período de retorno para una tormenta específica, caracterizada por una velocidad de viento, disminuirá en comparación con el presente.

El trabajo permite generar estadísticas climáticas futuras más precisas de los efectos del cambio climático sobre los ciclones tropicales, permitiendo generar un conocimiento más profundo de las áreas con peligro de inundación por marea de tormenta. Sin embargo, la incertidumbre en la intensidad de las tormentas para los períodos de retorno de los grandes huracanes bajo el calentamiento global, destaca la necesidad de estudios futuros sobre el

impacto del cambio climático en los ciclones tropicales de esta región. Una vez que estas estadísticas climáticas estén disponibles, las áreas con peligro de marejada ciclónica se pueden identificar con mayor confianza.

En Manzanillo, las inundaciones de marea de tormenta originada por ciclones tropicales se intensifican principalmente en los cuerpos costeros semicerrados mientras que son de baja intensidad a lo largo de la costa debido a la fuerte pendiente que domina en la topografía. Existen extensas áreas urbanas y de desarrollo urbano a corto y medio plazo (actualmente áreas agrícolas y otras áreas de vegetación) bajo peligro Alto o Muy Alto de inundación por marea de tormenta aunque el riesgo es generalmente Bajo o Muy Bajo debido a que la vulnerabilidad socioeconómica analizada es Baja o Muy Baja.

Las manzanas urbanas con Riesgo Muy Alto y Alto solo se ubican en las áreas urbanas de la parte norte de la laguna de Cuyutlán. A su vez, los resultados han mostrado que las actuales métodos y parametrizaciones empleadas para estimar la inundación por marea de tormenta en los atlas municipales de riesgo mexicanos sobreestiman en gran medida las áreas propensas a la inundación.

A pesar de que el mayor factor de peligro asociado a la inundación por marea de tormenta de CT es la profundidad de la inundación, la simulación de la hidrodinámica de la inundación permite obtener otros factores de peligro por marea de tormenta como el tiempo de permanencia (duración), la velocidad del flujo o la tasa de aumento de la inundación. Aunque la importancia de estos factores está en relación a la fisiografía del lugar de estudio, los resultados muestran que pueden llegar a tomar valores reseñables por lo que un análisis de riesgo debe comprobar la importancia de estos factores en el cálculo de los índices de peligro de inundación por CT.

El nuevo método presentado en este trabajo proporciona una herramienta para determinar el peligro y el riesgo de inundación de los ciclones tropicales en los escenarios climáticos actuales y proyectados utilizando un conjunto limitado de eventos.

Como tal, este método reduce el alto costo computacional requerido por las actuales metodologías para la obtención del peligro de inundación por marea de tormenta que tienen en cuenta la influencia del cambio climático sobre los CT. Así se superan las limitaciones impuestas por la escasez de recursos computacionales permitiendo la simulación directa de la hidrodinámica de la inundación evitando las sobreestimaciones de otros métodos

aproximados que interpolan la inundación a partir de los niveles de marea de tormenta la costa.

Los mapas de peligro de inundación por tormentas bajo períodos de retorno conocidos en climas presentes y proyectados obtenidos con la metodología presentada proporcionan información más detallada a los tomadores de decisiones sobre estrategias de gestión de riesgos de inundación, comunicación de riesgos, planificación del uso del suelo, desarrollo urbano, etc. cuando no se cuenta con una alta capacidad computacional para simular grandes conjuntos de eventos.

A su vez, la metodología para la obtención del peligro de inundación expuesta en este trabajo puede ser empleada en cualquier lugar del mundo.

El cálculo de la vulnerabilidad y el riesgo a nivel manzana urbana ha sido estimado bajo la perspectiva de su aplicación en México empleando datos oficiales del Gobierno del país. De esta manera, la metodología puede ser empleada para el cálculo del peligro y riesgo de inundación en cualquier entidad, reduciendo las necesidades computacionales y el tiempo de ejecución. Como resultado, esta metodología puede ser utilizada para la elaboración de atlas de riesgos municipales y estatales mexicanos. Cabe mencionarse que, con esta finalidad, todos los procesos inmersos en la metodología (preproceso de datos, generación de eventos y archivos para la simulación hidrodinámica, postproceso de resultados computacionales, estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo, mapeo de resultados, etc.) ha sido automatizada en lenguaje Matlab®, incluyendo el cálculo y mapeo de la vulnerabilidad y riesgo a nivel manzana urbana, que comúnmente se realizan de forma manual mediante programas con base SIG.

Se debe tener en cuenta que este estudio se centró en el desarrollo de un método para generar los cuasi-peores escenarios de marea de tormenta de ciclones tropicales para periodos de retorno específicos. Por ende, para los mapas de inundaciones resultantes solo se ha considerado la marea de tormenta generada por los vientos y la presión de los ciclones tropicales sin incluir otros factores como el set-up del oleaje, mareas astronómicas, inundaciones terrestres (precipitación y desbordamiento de los ríos), aumento local proyectado del nivel del mar, subsidencia local, posibles cambios en los accidentes geográficos costeros o posibles cambios futuros en la exposición y la vulnerabilidad. Todos esos factores pueden afectar el peligro y riesgo de inundación por marea de tormenta en los

climas presentes o futuros. Por lo tanto, la interpretación y el uso de los resultados de la investigación actual con fines de gestión de riesgos deben tomarse con precaución

Anexo I

Futuros trabajos

Para validar la metodología empleada es necesaria una validación de los resultados obtenidos en este estudio con una metodología de simulación directa de CT sintéticos (método de Lin et al., 2012, 2010a). En esa dirección, en el momento de la presentación de este estudio, se está realizando este análisis sobre un caso de estudio sobre dos islas Colombianas de baja incidencia de CT.

Para la obtención de mapas de peligro de inundación más precisos, en el futuro, uno o varios de los factores que afectan a la inundación deben ser incorporados a simulación hidrodinámica de la inundación (ej. el set-up del oleaje, mareas astronómicas, inundaciones terrestres, aumento local proyectado del nivel del mar, subsidencia local, posibles cambios en los accidentes geográficos costeros, etc.) así como posibles cambios futuros en la exposición y la vulnerabilidad en el cálculo del riesgo.

Todos los procesos de esta metodología se han implementado en lenguaje Matlab[®] par su cálculo de forma automatizada. En el futuro se pretende desarrollar una Toolbox en lenguaje Matlab[®] enfocada en la obtención del peligro por inundación a nivel local (manzana urbana) en cualquier lugar del mundo y la obtención de vulnerabilidad y riesgo para ubicaciones en México (en base a la información basada en los censos demográfico para México realizados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Esta puede incluir la automatización de obtención y generación de datos y pre-proceso de para la simulación hidrodinámica, post-proceso de resultados y obtención de mapas de forma automática.

Bibliografía

- Aerts JCJH, Lin N, Botzen W, et al (2013) Low-Probability Flood Risk Modeling for New York City. *Risk Anal* 33:772–788. doi: <https://doi.org/10.1111/risa.12008>
- Ahmadisharaf E, Kalyanapu AJ, Chung ES (2015) Evaluating the Effects of Inundation Duration and Velocity on Selection of Flood Management Alternatives Using Multi-Criteria Decision Making. *Water Resour Manag* 29:2543–2561. doi: [10.1007/s11269-015-0956-4](https://doi.org/10.1007/s11269-015-0956-4)
- Amante C, Eakins BW (2009) ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Tech Memo NESDIS NGDC-24 19. doi: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.769615>
- Apivatanagul P, Davidson R, Blanton B, Nozick L (2011) Long-term regional hurricane hazard analysis for wind and storm surge. *Coast Eng* 58:499–509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.015>
- Appendini CM, Meza-Padilla R, Abud-Russell S, et al (2019) Effect of climate change over landfalling hurricanes at the Yucatan Peninsula. *Clim Change* 157:469–482. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02569-5>
- Appendini CM, Pedrozo-Acuña A, Meza-Padilla R, et al (2017a) On the Role of Climate Change on Wind Waves Generated by Tropical Cyclones in the Gulf of Mexico. *Coast Eng J* 59:32. doi: <https://doi.org/10.1142/S0578563417400010>
- Appendini CM, Pedrozo-Acuña A, Valle-Levinson A (2014a) Storm surge at a western Gulf of Mexico site: variations on Tropical Storm Arlene. *Int J River Basin Manag* 12:403–410. doi: <https://dx.doi.org/10.1080/15715124.2014.880709>
- Appendini CM, Rosengaus M, Meza-Padilla R, Camacho-Magaña V (2017b) Operational hazard assessment of waves and storm surges from tropical cyclones in Mexico. *Bull Am Meteorol Soc* 98:503–515. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00170.1>
- Appendini CM, Torres-Freyermuth A, Salles P, et al (2014b) Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30-yr wave hindcast. *J Clim* 27:1619–1632. doi: [10.1175/JCLI-D-13-00206.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1)
- APREC (2015). Secretaría de Gobernación-CENAPRED (2015) Atlas de Peligros y Riesgos en el estado de Colima (APREC)
- Atkinson J, McKee Smith J, Bender C (2013) Sea-Level Rise Effects on Storm Surge and Nearshore Waves on the Texas Coast: Influence of Landscape and Storm Characteristics. *J Waterw Port, Coastal, Ocean Eng* 139:98–117. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000187](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000187)
- Balica SF, Wright NG, van der Meulen F (2012) A flood vulnerability index for coastal cities and its

- use in assessing climate change impacts. *Nat Hazards* 64:73–105. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0234-1>
- Bender MA, Knutson TR, Tuleya RE, et al (2010) Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science* (80-) 327:454–458. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1180568>
- Bilskie M V., Hagen SC, Alizad K, et al (2016) Dynamic simulation and numerical analysis of hurricane storm surge under sea level rise with geomorphologic changes along the northern Gulf of Mexico. *Earth's Futur* 4:177–193. doi: 10.1002/2015EF000347
- Bloemendaal N, Muis S, Haarsma RJ, et al (2019) Global modeling of tropical cyclone storm surges using high-resolution forecasts. *Clim Dyn* 52:5031–5044. doi: 10.1007/s00382-018-4430-x
- Bolongaro Crevenna Recaséns A (2016) Diagnóstico de la vulnerabilidad ante el cambio climático del destino turístico de Manzanillo, Colima
- Bretschneider CL (1972) A non-dimensional stationary hurricane wave model. In: Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, pp 51–68
- Bryant K, Akbar M (2016) An Exploration of Wind Stress Calculation Techniques in Hurricane Storm Surge Modeling. *J Mar Sci Eng* 4:58. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse4030058>
- Büchele B, Kreibich H, Kron A, et al (2006) Flood-risk mapping: Contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6:483–503. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-6-485-2006>
- Carniello L, Defina A, Fagherazzi S, D'Alpaos L (2005) A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy. *J Geophys Res Earth Surf* 110:1–15. doi: <https://doi.org/10.1029/2004JF000232>
- CENAPRED (2006) Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgo: Fenómenos hidrometeorológicos. In: Secr. Gob. México, D.F. www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/63.pdf. Accessed 28 Apr 2020
- Chen W, Cutter SL, Emrich CT, Shi P (2013) Measuring social vulnerability to natural hazards in the Yangtze River Delta region, China. *Int J Disaster Risk Sci* 4:169–181. doi: <https://doi.org/10.1007/s13753-013-0018-6>
- Christensen JH, Krishna Kumar K, Aldrian E, et al (2013) Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., pp 1217–1308
- CIMARES-SEMARNAT (2011) Política nacional de mares y costas de México: gestión integral de

- las regiones más dinámicas del territorio nacional. Comisión Intersectorial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas de México (CIMARES) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Ciudad de México.
- Cutter SL, Boruff BJ, Shirley WL (2003) Social vulnerability to environmental hazards. *Soc Sci Q* 84:242–261. doi: <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Cutter SL, Emrich CT, Morath DP, Dunning CM (2013) Integrating social vulnerability into federal flood risk management planning. *Ann As Am Geogr* 6:332–344. doi: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12018>
- Daniel P, Haie B, Aubail X (2009) Operational forecasting of tropical cyclones storm surges at Météo-France. *Mar Geod* 32:233–242. doi: 10.1080/01490410902869649
- De Bruijn KM, Klijn F (2009) Risky places in the Netherlands: A first approximation for floods. *J Flood Risk Manag* 2:58–67. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01022.x>
- De Moel H, Van Alphen J, Aerts JCJH (2009) Flood maps in Europe - Methods, availability and use. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9:289–301. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-9-289-2009>
- Dee DP, Uppala SM, Simmons a. J, et al (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc* 137:553–597. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- DHI (2017) Mike 21 flow model FM: hydrodynamic module, user guide. DHI Water & Environment, Hoersholm
- Díaz-García O, Zavala-Hidalgo J, Douillet P, et al (2020) Changes in the flooding area due to storm surge under climate change in an extensive wetland area in the southern Gulf of Mexico. *Atmósfera* 33:105–121. doi: <https://doi.org/10.20937/atm.52702>
- Dietrich JC, Bunya S, Westerink JJ, et al (2010) A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part II: Synoptic Description and Analysis of Hurricanes Katrina and Rita. *Mon Weather Rev* 138:378–404. doi: <https://doi.org/10.1175/2009MWR2907.1>
- Dietrich JC, Zijlema M, Westerink JJ, et al (2011) Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coast Eng* 58:45–65. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>
- Dinh Q, Balica S, Popescu I, Jonoski A (2012) Climate change impact on flood hazard, vulnerability and risk of the Long Xuyen Quadrangle in the Mekong Delta. *Int J River Basin Manag* 10:103–120. doi: <https://doi.org/10.1080/15715124.2012.663383>
- Dufresne JL, Foujols MA, Denvil S, et al (2013) Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. *Clim Dyn* 40:2123–2165. doi:

<https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>

- Elsner JB, Kossin JP, Jagger TH (2008) The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature* 455:92–95. doi: <https://doi.org/10.1038/nature07234>
- Emanuel K (2013) Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proc Natl Acad Sci* 110:12219–12224. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1301293110>
- Emanuel K (2015) Effect of upper-ocean evolution on projected trends in tropical cyclone activity. *J Chem Inf Model* 28:8165–8170. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0401.1>
- Emanuel K (1995) The Behavior of a Simple Hurricane Model Using a Convective Scheme Based on Subcloud-Layer Entropy Equilibrium. *J Atmos Ocean Technol* 52:3960–3968. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<3960:TBOASH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<3960:TBOASH>2.0.CO;2).
- Emanuel K (2004) Tropical cyclone energetics and structure. *Atmos Turbul Mesoscale Meteorol* 165–191. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511735035.010>.
- Emanuel K (2005) Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436:686–8. doi: <https://doi.org/10.1038/nature03906>
- Emanuel K, Jagger T (2010) On estimating hurricane return periods. *J Appl Meteorol Climatol* 49:837–844. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2236.1>
- Emanuel K, Ravela S, Vivant E, Risi C (2006) A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment. *Bull Am Meteorol Soc* 87:299–314. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-299>
- Emanuel K, Rotunno R (2011) Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow. Part I: Implications for Storm Structure. *J Atmos Sci* 68:2236–2249. doi: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-10-05024.1>
- Emanuel K, Sundararajan R, Williams J (2008) Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull Am Meteorol Soc* 89:347–367. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-347>
- Fang J, Sun S, Shi P, Wang J (2014) Assessment and Mapping of Potential Storm Surge Impacts on Global Population and Economy. *Int J Disaster Risk Sci* 5:323–331. doi: <https://doi.org/10.1007/s13753-014-0035-0>
- Fernandez P, Mourato S, Moreira M (2016) Social vulnerability assessment of flood risk using GIS-based multicriteria decision analysis. A case study of Vila Nova de Gaia. *Geomatics, Nat Hazards Risk* 7:1367–1389. doi: <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1052021>
- Flather RA (2001) Storm Surges. *Encycl Ocean Sci Second Ed* 530–540. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00124-7>
- Fritz HM, Blount C, Sokoloski R, et al (2007) Hurricane Katrina storm surge distribution and field

- observations on the Mississippi Barrier Islands. *Estuar Coast Shelf Sci* 74:12–20. doi: 10.1016/j.ecss.2007.03.015
- Garner AJ, Mann ME, Emanuel KA, et al (2017) Impact of climate change on New York City’s coastal flood hazard: Increasing flood heights from the preindustrial to 2300 CE. *Proc Natl Acad Sci U S A* 114:11861–11866. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1703568114>
- Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, et al (2017) The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J Clim* 30:5419–5454. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Gent PR, Danabasoglu G, Donner LJ, et al (2011) The community climate system model version 4. *J Clim* 24:4973–4991. doi: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1>
- Giorgetta MA, Jungclaus J, Reick CH, et al (2013) Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J Adv Model Earth Syst* 5:572–597. doi: <https://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Griffies SM, Winton M, Donner LJ, et al (2011) The GFDL CM3 coupled climate model: Characteristics of the ocean and sea ice simulations. *J Clim* 24:3520–3544. doi: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3964.1>
- Gunther EB, Cross RL, Wagoner RA (1983) Eastern North Pacific tropical cyclones of 1982. *Mon Weather Rev* 111:1080–1101. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1983\)111<1080:enptco>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1983)111<1080:enptco>2.0.co;2)
- Hallegatte S, Ranger N, Mestre O, et al (2011) Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: A case study on Copenhagen. *Clim Change* 104:113–137. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9978-3>
- Ho FP, Myers VA (1975) Joint probability method of tide frequency analysis applied to Apalachicola Bay and St. George Sound, Florida. NOAA Tech. Rep. NWS 18 43
- Holland G, Bruyère CL (2014) Recent intense hurricane response to global climate change. *Clim Dyn* 42:617–627. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1713-0>
- Holland GJ (1980) An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon Weather Rev* 108:1212–1218. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2)
- Houser C, Hapke C, Hamilton S (2008) Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms. *Geomorphology* 100:223–240. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.007>
- Houser T, Hsiang S, Kopp R, et al (2014) Economic risks of climate change: an American prospectus. Rhodium Group Rep. [Available online at <http://rhg.com/reports/climate-prospectus.>]

- INEGI (1991) Datos básicos de la geografía de México
- INEGI (2015) Encuesta Intercensal 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Mexico.
- INEGI (2011) Modelos digitales de elevación de alta resolución LiDAR. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Mexico.
- IPCC (2014) Climate Change 2014 Part A: Global and Sectoral Aspects
- Irish JL, Resio DT, Ratcliff JJ (2008) The Influence of Storm Size on Hurricane Surge. *J Phys Oceanogr* 38:2003–2013. doi: <https://doi.org/10.1175/2008JPO3727.1>
- Islam MM, Sado K (2000) Flood hazard assessment in Bangladesh using NOAA AVHRR data with geographical information system. *Hydrol Process* 14:605–620. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(20000228)14:3<605::AID-HYP957>3.0.CO;2-L
- Jáuregui E (2003) Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmosfera* 16:193–204
- Jenks GF (1963) Generalization in Statistical Mapping. *Ann Assoc Am Geogr* 53:15–26. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8306.1963.tb00429.x>
- Jones CD, Hughes JK, Bellouin N, et al (2011) The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci Model Dev* 4:543–570. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>
- Jonkman SN, Penning-Rowsell E (2008) Human instability in flood flows. *J Am Water Resour Assoc* 44:1208–1218. doi: 10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc* 77:437–471. doi: [https://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kang NY, Elsner JB (2015) Trade-off between intensity and frequency of global tropical cyclones. *Nat Clim Chang* 5:661–664. doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate2646>
- Khouakhi A, Pattison I, López-de la Cruz J, et al (2020) Tropical cyclone—Induced heavy rainfall and flow in Colima, Western Mexico. *Int J Climatol* 40:3222–3231. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.6393>
- Khouakhi A, Villarini G, Vecchi GA (2017) Contribution of tropical cyclones to rainfall at the global scale. *J Clim* 30:359–372. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0298.1>
- Kim SY, Yasuda T, Mase H (2010) Wave set-up in the storm surge along open coasts during Typhoon Anita. *Coast Eng* 57:631–642. doi: 10.1016/j.coastaleng.2010.02.004
- Kimberlain TB, Blake ES, Cangialosi JP (2016) National Hurricane Center Tropical Cyclone Report. Hurricane Patricia
- Knutson TR, McBride JL, Chan J, et al (2010) Tropical cyclones and climate change. *Nat Geosci*

- 3:157–163. doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo779>
- Kossin JP, Knapp KR, Olander TL, Velden CS (2020) Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades. *Proc Natl Acad Sci U S A* 117:. doi: 10.1073/pnas.1920849117
- Kriesche B, Weindl H, Smolka A, Schmidt V (2014) Stochastic simulation model for tropical cyclone tracks, with special emphasis on landfall behavior. *Nat Hazards* 73:335–353. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1075-x>
- Kron W (2005) Flood risk = hazard • values • vulnerability. *Water Int* 30:58–68. doi: 10.1080/02508060508691837
- Landsea CW, Franklin JL (2013) Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *Mon Weather Rev* 141:3576–3592. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00254.1>
- Legg MR, Nozick LK, Davidson RA (2010) Optimizing the selection of hazard-consistent probabilistic scenarios for long-term regional hurricane loss estimation. *Struct Saf* 32:90–100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2009.08.002>
- Lin N, Chavas D (2012) On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling. *J Geophys Res Atmos* 117:D09120. doi: <https://doi.org/10.1029/2011JD017126>
- Lin N, Emanuel K, Oppenheimer M, Vanmarcke E (2012) Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. *Nat Clim Chang* 2:462–467. doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate1389>
- Lin N, Emanuel KA, Smith JA, Vanmarcke E (2010a) Risk assessment of hurricane storm surge for New York City. *J Geophys Res Atmos* 115:1–11. doi: <https://doi.org/10.1029/2009JD013630>
- Lin N, Emanuel KA, Vanmarcke E (2013) Hurricane Risk Analysis: A Review on the Physically-based Approach. *Safety, Reliab Risk Life-Cycle Perform Struct Infrastructures- -Proceedings 11th Int Conf Struct Saf Reliab ICOSSAR 2013 (January 9, 2014)* 1291–1297
- Lin N, Smith JA, Villarini G, et al (2010b) Modeling Extreme Rainfall, Winds, and Surge from Hurricane Isabel (2003). *Weather Forecast* 25:1342–1361. doi: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222349.1>
- Loder NM, Irish JL, Cialone MA, Wamsley T V. (2009) Sensitivity of hurricane surge to morphological parameters of coastal wetlands. *Estuar Coast Shelf Sci* 84:625–636. doi: 10.1016/j.ecss.2009.07.036
- Losada MA (2001) ROM 0.0 Procedimiento General y Bases de Cálculo en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. Puertos del Estado, España
- Marks DG (1992) The Beta and advection model for hurricane track forecasting. In: NOAA technical

memorandum NWS NMC. p 89

- Martínez-Martínez R (2014) Evaluación de cotas de inundación en el litoral mexicano por ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis. Tesis de maestría en Ingeniería Civil (Hidráulica). Instituto de Ingeniería UNAM. México
- Mattocks C, Forbes C (2008) A real-time, event-triggered storm surge forecasting system for the state of North Carolina. *Ocean Model* 25:95–119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.06.008>
- Mendelsohn R, Emanuel K, Chonabayashi S, Bakkensen L (2012) The impact of climate change on global tropical cyclone damage. *Nat Clim Chang* 2:205–209. doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate1357>
- Merz B, Kreibich H, Schwarze R, Thielen A (2010) Review article “assessment of economic flood damage.” *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:1697–1724. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- Merz B, Thielen AH, Gocht M (2007) Flood risk mapping at the local scale: Concepts and challenges. In: *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. pp 231–251
- Meza-Padilla R, Appendini CM, Pedrozo-Acuña A (2015) Hurricane-induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. *Ocean Dyn* 65:1199–1211. doi: <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0861-7>
- Morrow BH, Lazo JK, Rhome J, Feyen J (2015) Improving storm surge risk communication: Stakeholder perspectives. *Bull Am Meteorol Soc* 96:35–48. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00197.1>
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756. doi: <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Muis S, Verlaan M, Winsemius HC, et al (2016) A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nat Commun* 7:. doi: 10.1038/ncomms11969
- Muñoz Sevilla NP, Azuz Adeath I, Le Bail M, Cortés Ruiz A (2019) Chapter 3 - Coastal Development: Construction of a Public Policy for the Shores and Seas of Mexico. In: Krishnamurthy RR, M.P.Jonathan, Seshachalam S, Glaeser B (eds) *Coastal Management*. Academic Press, pp 21–38
- Myers VA (1975) Storm tide frequencies on the South Carolina coast
- NHC (2014a) Storm Surge Maximum of the Maximum (MOM). <http://www.nhc.noaa.gov/surge/momOverview.php>. Accessed 28 Apr 2020
- NHC (2014b) Storm surge maximum envelope of water (MEOW). <https://www.nhc.noaa.gov/surge/meowOverview.php>. Accessed 28 Apr 2020
- Nott J, Green C, Townsend I, Callaghan J (2014) The world record storm surge and the most intense

- southern hemisphere tropical cyclone: New evidence and modeling. *Bull Am Meteorol Soc* 95:757–765. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00233.1>
- NWS (2018) National Weather service instruction 10-604. Tropical Cyclones Names and Definitions
- Olbert AI, Hartnett M (2010) Storms and surges in Irish coastal waters. *Ocean Model* 34:50–62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.04.004>
- Pasch RJ, Zelinsky DA (2013) Hurricane Manuel
- Pedrozo-Acuña A, Breña-Naranjo JA, Domínguez-Mora R (2014) The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico. *Weather* 69:295–302. doi: <https://doi.org/10.1002/wea.2355>
- Posada-Vanegas G, Durán-Valdez G, Silva-Casarín R, et al (2011) Vulnerability to coastal flooding induced by tropical cyclones. *Proc Coast Eng Conf* 1:14. doi: <http://doi.org/10.9753/icce.v32.management.19>
- Resio DT, Westerink JJ (2008) Modeling the physics of storm surges. *Phys Today* 61:33–38. doi: 10.1063/1.2982120
- Rey W, Martínez-Amador M, Salles P, et al (2020) Assessing Different Flood Risk and Damage Approaches: A Case of Study in Progreso, Yucatan, Mexico. *J Mar Sci Eng* 8:137. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8020137>
- Rey W, Mendoza TE, Salles P, et al (2019) Hurricane Flood Risk Assessment for the Yucatan and Campeche State Coastal Area. *Nat Hazards* 96:1041–1065. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03587-3>
- Rey W, Salles P, Mendoza ET, et al (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: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1681-2018>
- Rogers RF, Aberson S, Bell MM, et al (2017) Rewriting the tropical record books: The extraordinary intensification of Hurricane Patricia (2015). *Bull Am Meteorol Soc* 98:2091–2112. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0039.1>
- Ruiz-Salcines P, Salles P, Robles-Díaz L, et al (2019) On the use of parametric wind models for wind wave modeling under tropical cyclones. *Water (Switzerland)* 11:2044. doi: <https://doi.org/10.3390/w11102044>
- Sahoo B, Bhaskaran PK (2018) A comprehensive data set for tropical cyclone storm surge-induced inundation for the east coast of India. *Int J Climatol* 38:403–419. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5184>
- Scheffner NW, Borgman LE, Mark DJ (1996) Empirical simulation technique based storm surge frequency analyses. *J Waterw Port, Coast Ocean Eng* 122:93–101. doi:

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1996\)122:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1996)122:2(93))
- Seenath A, Wilson M, Miller K (2016) Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment: Which is better for guiding coastal management? *Ocean Coast Manag* 120:99–109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.019>
- Shaw Z, Lee CY, Sobel AH, et al (2016) Global Tropical Cyclone Landfall Statistics. In: 32nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology
- Smith SD, Banke EG (1975) Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Q J R Meteorol Soc* 101:665–673. doi: [10.1002/qj.49710142920](https://doi.org/10.1002/qj.49710142920)
- Strauss D, Mirferendesk H, Tomlinson R (2007) Comparison of two wave models for Gold Coast, Australia. *J Coast Res* 2007:312–316
- Thompson EF, Cardone VJ (1996) Practical Modeling of Hurricane Surface Wind Fields. *J Waterw Port, Coastal, Ocean Eng* 122:195–205. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1996\)122:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1996)122:4(195))
- Tingsanchali T, Karim MF (2005) Flood hazard and risk analysis in the southwest region of Bangladesh. *Hydrol Process* 19:2055–2069. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.5666>
- Toro GR, Resio DT, Divoky D, et al (2010) Efficient joint-probability methods for hurricane surge frequency analysis. *Ocean Eng* 37:125–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.09.004>
- Torres JM, Bass B, Irza N, et al (2015) Characterizing the hydraulic interactions of hurricane storm surge and rainfall-runoff for the Houston-Galveston region. *Coast Eng* 106:7–19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.004>
- Vickery P, Skerlj P, Twisdale L (2000) Simulation of hurricane risk in the US using empirical track model. *J Struct Eng* 126:1222–1237. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:10\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1222))
- Vogelmann JE, Howard SM, Yang L, et al (2001) Completion of the 1990s National Land Cover Data Set for the conterminous United States from Landsat Thematic Mapper data and ancillary data sources. *Photogramm Eng Remote Sensing* 67:650–662
- Von Storch H (2014) Storm surges: Phenomena, forecasting and scenarios of change. *Procedia IUTAM* 10:356–362. doi: [10.1016/j.piutam.2014.01.030](https://doi.org/10.1016/j.piutam.2014.01.030)
- Vorogushyn S, Merz B, Lindenschmidt KE, Apel H (2010) A new methodology for flood hazard assessment considering dike breaches. *Water Resour Res* 46:1–17. doi: [10.1029/2009WR008475](https://doi.org/10.1029/2009WR008475)
- Wamsley T V., Cialone MA, Smith JM, et al (2009) Influence of landscape restoration and degradation on storm surge and waves in southern Louisiana. *Nat Hazards* 51:207–224. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9445-2>

10.1007/s11069-009-9378-z

- Wang J, Gao W, Xu S, Yu L (2012) Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China. *Clim Change* 115:537–558. doi: 10.1007/s10584-012-0468-7
- Watanabe M, Suzuki T, O’Ishi R, et al (2010) Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J Clim* 23:6312–6335. doi: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>
- Watt W. (2000) Flood Issues in Contemporary Water Management. NATO Science Series (Series 2. Environment Security). In: Marsalek J, Watt W., Zeman E, Sieker F (eds) *Twenty Years of Flood Risk Mapping Under the Canadian National Flood Damage Reduction Program*. Springer Science & Business Media
- Weisberg RH, Zhen L (2006) Hurricane Storm Surge Simulations for Tampa Bay. *Estuaries and Coasts* 29:899–913
- Wessel P, Smith WHF (1996) A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *J Geophys Res Solid Earth* 101:8741–8743. doi: 10.1029/96jb00104
- Westerink JJ, Luettich RA, Feyen JC, et al (2008) A Basin- to Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied to Southern Louisiana. *Mon Weather Rev* 136:833–864. doi: <https://doi.org/10.1175/2007MWR1946.1>
- Westerink JJ, Sciences G, Dame N, et al (1994) The influence of domain size on the response characteristics of a hurricane storm surge model. *J Geophys Res* 99:18.467-18.479
- Wind HG, Nierop TM, De Blois CJ, De Kok JL (1999) Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse floods. *Water Resour Res* 35:3459–3465. doi: <https://doi.org/10.1029/1999WR900192>
- Woodruff JD, Irish JL, Camargo SJ (2013) Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature* 504:44–52. doi: <https://doi.org/10.1038/nature12855>
- Xu H, Lin N, Huang M, Lou W (2020) Design Tropical Cyclone Wind Speed when Considering Climate Change. *J Struct Eng (United States)* 146:1–13. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002585](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002585)
- Yin K, Xu S, Zhao Q, et al (2020) Effects of land cover change on atmospheric and storm surge modeling during typhoon event. *Ocean Eng* 199:106971. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106971>
- Zachry BC, Booth WJ, Rhome JR, Sharon TM (2015) A national view of storm surge risk and inundation. *Weather Clim Soc* 7:109–117. doi: <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-14-00049.1>
- Zhang K, Liu H, Li Y, et al (2012) The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuar Coast*

Shelf Sci 102–103:11–23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.02.021>

Zhang K, Xiao C, Shen J (2008) Comparison of the CEST and SLOSH Models for Storm Surge Flooding. *J Coast Res* 242:489–499. doi: <https://doi.org/10.2112/06-0709.1>

Zheng F, Westra S, Leonard M, Sisson S a. (2014) Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk. *Water Resour Res* 2050–2071. doi: [10.1002/2013WR014616](https://doi.org/10.1002/2013WR014616)

Zheng F, Westra S, Sisson SA (2013) Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone. *J Hydrol* 505:172–187. doi: [10.1016/j.jhydrol.2013.09.054](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.054)