



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

# **Estudio de los efectos del cambio climático en la cota de inundación del puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.**

---

José Miguel Montoya Rodríguez  
Rodolfo Ramírez Xicoténcatl  
Etelberto Dionisio Serrano Flores  
Jonatan Omar González Moreno  
Miguel Ángel Backhoff Pohls

Publicación Técnica No. 669  
**Sanfandila, Qro.**  
**2022**

ISSN 0188-7297



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera por el Dr. José Miguel Montoya Rodríguez, el M. en Ing. Rodolfo Ramírez Xicoténcatl y el Oc. Etelberto Dionisio Serrano Flores en conjunto con investigadores de la Coordinación de Estudios Económicos y Sociales del Transporte específicamente de la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial (USIG), el M. en Geog. Miguel Ángel Backhoff Pohls y el M. en C. Jonatan Omar González Moreno del Instituto Mexicano del Transporte.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna MI-01/20 Estudio de los efectos del cambio climático en la cota de inundación del puerto de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

Se agradece la colaboración del Dr. Guillermo Torres Vargas, jefe de la Coordinación de Estudios Económicos y Sociales del Transporte, por la revisión de este trabajo de investigación.



# Contenido

---

Índice de tablas .....	ix
Sinopsis.....	xi
Abstract.....	xiii
Resumen ejecutivo.....	xv
Introducción.....	1
1. Determinación del nivel del mar total o cota de inundación permanente ...	3
1.1 Nivel medio del mar .....	3
1.1.1 Variabilidad a largo plazo.....	4
1.2 Marea astronómica .....	6
1.2.1 Marea producida por la Luna .....	6
1.2.2 Mareas producidas por el Sol .....	8
1.2.3 Efectos combinados del Sol y la Luna .....	8
1.2.4 Componentes armónicos de la marea .....	9
1.2.5 Niveles de referencia relacionados con las mareas.....	14
1.3 Marea meteorológica .....	16
1.4 Set-up y run-up del oleaje.....	18
1.5 Cota de inundación .....	27
2. Cota de inundación (eventos de inundación temporales).....	29
2.1 Marea meteorológica .....	29
2.2 Run-up del oleaje.....	50
3. Evaluación de los posibles efectos debidos al cambio climático. ....	55
3.1 Aumento del nivel medio del mar.....	55
3.2 Cota de inundación futura .....	61
3.3 Efectos teóricos del aumento del nivel del mar por el cambio climático	63
4. Análisis e interpretación de resultados .....	65
Conclusiones .....	77

**Bibliografía** .....81

## Índice de figuras

---

Figura 1.1	Interacciones entre el océano y la atmósfera.....	3
Figura 1.2	Nivel del mar durante los últimos 500000 años.....	4
Figura 1.3	Esquema general de marea producida por la Luna. ....	6
Figura 1.4	Marea producida por la Luna. ....	7
Figura 1.5	Tipos de marea. ....	8
Figura 1.6	Mareas vivas y muertas. ....	9
Figura 1.7	Gráfica mensual de los niveles del mar en el puerto de Lázaro Cárdenas.....	12
Figura 1.8	Planos de marea en México.....	15
Figura 1.9	Marea de tormenta.....	17
Figura 1.10	Mareograma del puerto de Lázaro Cárdenas del 9 al 15 de junio de 2014.....	18
Figura 1.11	Run up del oleaje. ....	20
Figura 1.12	Variación del Run up del oleaje, para las cuatro fórmulas descritas.....	24
Figura 1.13	Direcciones del oleaje que inciden en la zona de estudio.....	25
Figura 1.14	Variaciones del nivel del mar en el corto plazo. ....	27
Figura 2.1	Coeficiente de fricción por viento (Smith & Banke, 1975). ....	33
Figura 2.2	Definición de la malla de cálculo con profundidades y elevaciones, utilizada para las modelaciones numéricas de la marea de tormenta.....	34
Figura 2.3	Malla de cálculo con profundidades y elevaciones, utilizada para las modelaciones numéricas de la marea de tormenta.....	35
Figura 2.4	Detalle de la malla de cálculo en la zona del puerto de Lázaro Cárdenas, utilizada para las modelaciones numéricas de la marea de tormenta.....	35

Figura 2.5	Trayectorias de los huracanes categoría 1 seleccionados.....	36
Figura 2.6	Trayectorias de los huracanes categoría 2 seleccionados.....	37
Figura 2.7	Trayectorias de los huracanes categoría 3 seleccionados.....	37
Figura 2.8	Trayectorias de los huracanes categoría 4 seleccionados.....	38
Figura 2.9	Trayectorias de los huracanes categoría 5 seleccionados.....	38
Figura 2.10	Campos de viento y de presión para el huracán Alma (junio de 1996).....	41
Figura 2.11	Marea meteorológica generada por el huracán Alma frente al puerto de Lázaro Cárdenas (20 al 27 de junio de 1996). ....	42
Figura 2.12	Probabilidad de no excedencia de la función de distribución con el mejor ajuste a los eventos de la marea meteorológica. ....	45
Figura 2.13	Marea meteorológica para diferentes períodos de retorno y nivel de confianza del 5% y 95%. ....	46
Figura 2.14	Alturas de ola generadas por el huracán Alma el día 23 de junio de 1996, 19:00. ....	50
Figura 2.15	Alturas de ola generada por el huracán Alma frente al puerto de Lázaro Cárdenas (20 al 27 de junio de 1996). ....	50
Figura 2.16	Probabilidad de no excedencia de la función de distribución con el mejor ajuste al run-up generado por los huracanes. ....	51
Figura 2.17	Run-up para diferentes períodos de retorno y niveles de confianza del 5% y 95%. ....	52
Figura 2.18	Cota de inundación en el puerto de Lázaro Cárdenas a largo período y niveles de confianza del 5% y 95%. ....	54
Figura 3.1	Proyecciones del aumento global del nivel medio del mar durante el siglo XXI en relación con 1986-2005.....	57
Fuente:	Quinto Informe de Evaluación emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013). ....	57
Figura 3.2	Proyecciones del aumento relativo del nivel medio del mar para el periodo 2081-2100 en relación con 1986-2005.....	58
Fuente:	Quinto Informe de Evaluación emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013). ....	58

---

Figura 3.3	Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas y niveles de confianza del 5% y 95%, en el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6). ....	61
Figura 3.4	Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas y niveles de confianza del 5% y 95%, en el escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). ....	62
Figura 4.1	Modelo digital de elevación del puerto de Lázaro Cárdenas, Mich. .	67
Figura 4.2	Mapa de zona de inundación permanente con la cota de 0.926 m referida al n. m. m. ....	670
Figura 4.3	Mapa de zona de inundación para eventos extremos para el año 2050 con la cota de 1.986 m referida al N. M. M. (áreas azules) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.450 m referido al N. M. M. (áreas rojas).....	671
Figura 4.4	Modelo a de zona de inundación para eventos extremos para el año 2100 con la cota de 2.137 m referida al N. M. M. (áreas azules) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.661 m referido al N. M. M. (áreas rojas). ....	672
Figura 4.5	Mapa de zona de inundación con cambio climático para el año 2050 con la cota de 2.206 m referida al N. M. M. actual (áreas azules), con el escenario de baja emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.736 m referido al N. M. M. actual (áreas rojas).....	73
Figura 4.6	Mapa de zona de inundación con cambio climático para el año 2100 con la cota de 2.577 m referida al N. M. M. actual (áreas azules), con el escenario de baja emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6) y con el 95% de intervalo de confianza de 3.278 m referido al N. M. M. actual (áreas rojas).....	674
Figura 4.7	Mapa de inundación con cambio climático para el año 2100 con la cota de 2.256 m referida al N. M. M. actual (áreas azules), con el escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero (RCP8.5) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.785 m referido al N. M. M. actual (áreas rojas). ....	675
Figura 4.8	Mapa de zona de inundación con cambio climático para el año 2100 con la cota de 2.887 m referida al N. M. M. actual (áreas azules), con el escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero (RCP8.5) y con el 95% de intervalo de confianza de 3.637 m referido al N. M. M. actual (áreas rojas).....	676

---



## Índice de tablas

---

Tabla 1.1	Constantes armónicas de la marea.....	13
Tabla 1.2	Niveles de referencia de la marea para el puerto de Lázaro Cárdenas, Mich. Fuente: Red Mareográfica Nacional de la Secretaría de Marina.....	16
Tabla 1.3	Características medias del oleaje en la zona exterior del puerto de Lázaro Cárdenas (Régimen anual) .....	26
Tabla 1.4	Run-up significativo por dirección de incidencia del oleaje .....	26
Tabla 2.1	Huracanes en el Océano Pacífico en un radio de 700 km del puerto de Lázaro Cárdenas.....	39
Tabla 2.2	Marea meteorológica para diferentes años.....	47
Tabla 2.3	Run-up del oleaje para diferentes años.....	53
Tabla 2.4	Cota de inundación a largo período por eventos extremos en el puerto de Lázaro Cárdenas.....	54
Tabla 3.1	Proyecciones del aumento global del nivel medio del mar para mediados y finales del siglo XXI en relación con el período de referencia de 1986 – 2005. Fuente: Quinto Informe de Evaluación emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013).....	57
Tabla 3.2	Incrementos esperados en el nivel medio del mar por el cambio climático para el escenario RCP2.6. ....	59
Tabla 3.3	Incrementos esperados en el nivel medio del mar por el .....	60
Tabla 3.4	Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas, en el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6). ....	62
Tabla 3.5	Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas, en el escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). ....	63
Tabla C.1	Cota de inundación extremal futura para diferentes años (2020 – 2100).....	81

Tabla C.2	Cota de inundación futura para diferentes años (2020 – 2100), considerando el escenario RCP2.6.....	82
Tabla C.3	Cota de inundación futura para diferentes años (2020 – 2100), considerando el escenario RCP8.5.....	83

## Sinopsis

---

La determinación de la cota de inundación en el puerto de Lázaro Cárdenas, se obtuvo de la interacción de:

- La cota de inundación permanente, se representa como la interacción de variables oceanográficas como: la marea astronómica, la marea meteorológica, el set-up y el run-up del oleaje. Para determinar dichas variables, se utilizó la información de oleaje y de los niveles del mar de la RENEOM del IMT.
- La cota de inundación debida a eventos extremos, se realizó la recopilación de las características de los huracanes que han afectado a la zona de estudio en los últimos 30 años, y mediante modelos numéricos, se calculó la marea meteorológica producida.
- La cota de inundación futura, se consideró el incremento del *nmm*. por efecto del cambio climático definidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), y asumiendo que la cota de inundación futura es igual a la cota de inundación permanente más la marea meteorológica y el run-up futuros, correspondientes al análisis de extremos.

Con la información de “*Modelos digitales de elevación*”, se realizaron mapas de la cota de inundación permanente, temporal y futura, identificando posibles afectaciones sobre las instalaciones portuarias, la playa, y la población en general.



# Abstract

---

The determination of the level of flooding in the port of Lázaro Cárdenas was obtained from the interaction of:

- The permanent flood level is represented as the interaction of oceanographic variables such as astronomical tide, meteorological tide, wave set-up and run-up. To determine these variables, information on waves and sea levels was obtained from RENEOM of the IMT.
- The level of flooding due to extreme events, the compilation of the characteristics of the hurricanes that affected the study area in the last 30 years was made, and by means of numbers, the produced tide was calculated.
- The future flood level, the increase of the mean sea level due to the effect of climate change defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013), and assuming that the future flood level is equal to the permanent flood level plus the future meteorological tide and run-up, corresponding to extreme analysis.

With the information from "*Digital Elevation Models*", maps of the permanent, temporary and future flood level were made, identifying possible effects on the port facilities, the beach, and the population in general.



## Resumen ejecutivo

---

Para definir las cotas de inundación del puerto de Lázaro Cárdenas, Mich. Debido al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático, el IMT realizó lo siguiente:

- Se obtuvo la cota de inundación permanente, con base en la información de oleaje y de los niveles del mar de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas.
- Se obtuvo la cota de inundación debida a eventos extremos, para lo cual se realizó la recopilación de las características de los huracanes que han afectado a la zona de estudio en los últimos 30 años, mediante modelos numéricos se calculó la marea meteorológica que produjeron dichos fenómenos y el ascenso del nivel del agua por efecto del run-up del oleaje, con dicha información y mediante un análisis de extremos, se calculó la cota de inundación a largo plazo (período del año 2020 al año 2100).
- Tomando como referencia los escenarios denominados Rutas de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), productos de los modelos de evaluación para las predicciones y proyecciones climáticas definidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), se obtuvo la cota de inundación futura considerando el incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático.

Como resultado del trabajo realizado, se obtuvieron las siguientes cotas de inundación:

- Cota de inundación permanente = 0.926 m referida al N. M. M.
- Cota de inundación extrema para el año 2100 = 2.137 m referida al N. M. M.
- Cota de inundación futura con cambio climático con baja emisión de gases de efecto invernadero para el año 2100 = 2.577 m referida al N. M. M. actual
- Cota de inundación futura con cambio climático con alta emisión de gases de efecto invernadero para el año 2100 = 2.887 m referida al N. M. M. actual.

Con dichas elevaciones se realizaron mapas de inundación, destacando que para el año 2100, el aumento del nivel del mar provocaría la desaparición de la playa Eréndira ubicada al poniente del puerto, afectando algunas colonias del sur de la ciudad de Lázaro Cárdenas y afectando las terminales marítimas de usos múltiples.



# Introducción

---

Con más de 600 millones de personas viviendo en zonas costeras bajas (McGranahan et al., 2007), las inundaciones costeras pueden tener impactos sociales devastadores. Se ha estimado a nivel mundial, que en promedio de 0.8 a 1.1 millones de personas por año son afectadas por las inundaciones (Hinkel et al., 2014). Esto se refleja en desastres como las inundaciones de los Países Bajos y el Reino Unido en 1953, que causaron más de 2000 víctimas (Spencer et al., 2013) y condujeron a la construcción de estructuras de protección contra inundaciones a lo largo de la costa holandesa y la barrera del río Tamesí en Londres. Otra catástrofe más reciente fue la inundación de Nueva Orleans en 2005, debido al ciclón tropical Katrina, que causó alrededor de 1100 víctimas (Rappaport, 2014).

En los últimos años, el riesgo de inundación costera ha aumentado debido al crecimiento demográfico y económico (Jongman et al., 2012b) y al hundimiento de la plataforma continental (Nicholls y Cazenave, 2010; Syvitski et al., 2009). Hasta ahora, ha sido difícil atribuir al cambio climático, el aumento del riesgo por inundaciones (Bouwer, 2011), sin embargo, el aumento del nivel del mar conducirá mayores inundaciones costeras en el futuro (Hallegatte et al., 2013; Hinkel et al., 2014).

Uno de los impactos más graves del cambio climático antropogénico es un aumento en el nivel global del mar causado por el derretimiento de los glaciares y los casquetes de hielo terrestres, así como por el aumento de la expansión debida a la temperatura más alta del agua misma. A diferencia de otros efectos previstos del cambio climático, este impacto ya se ha observado durante el tiempo. De hecho, hay evidencia de que la tasa de incremento del nivel del mar ha aumentado en los últimos años y seguirá aumentando.

El calentamiento global y el aumento del nivel del mar que lo acompañan pueden traer a la mente la destrucción catastrófica de la costa durante las tormentas y la reubicación masiva en terrenos más altos, o al menos, una buena razón para reevaluar las pólizas de seguro de inundación frente al mar. Pero antes de que podamos prepararnos para cualquier impacto que un océano más voluminoso pueda tener en la civilización, necesitamos una medida precisa de qué tan alto es el nivel del mar y qué tan rápido está aumentando.

El presente proyecto de investigación se realizó a nivel de micro escala, poniendo énfasis en el estudio de los efectos del oleaje, marea de tormenta, marea astronómica y del cambio climático en la cota de inundación de puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.

El puerto de Lázaro Cárdenas se localiza dentro del estado de Michoacán sobre la desembocadura del brazo derecho del río Balsas, en las coordenadas 17° 54' 58" de latitud Norte y 102° 10' 22" de longitud Oeste en la costa mexicana del Pacífico. Actualmente opera el 18% del total de carga comercial (excluyendo petróleo y derivados) que se opera en todo el Sistema Portuario Nacional de México, es el puerto líder en crecimiento, superando en operación al puerto de Manzanillo, destacando por su importante y consolidada actividad industrial y por su creciente actividad comercial.

# 1. Determinación del nivel del mar total o cota de inundación permanente

## 1.1 Nivel medio del mar

La comprensión de la variabilidad del nivel del mar, implica la comprensión de la variabilidad del océano, así como de los intercambios entre el océano, la tierra, la criosfera, y la atmósfera, ya que, el nivel del mar es sensible al calentamiento global y a la variabilidad climática y sus cambios abarcan un amplio rango de escalas temporales y espaciales.



Figura 1.1 Interacciones entre el océano y la atmósfera.

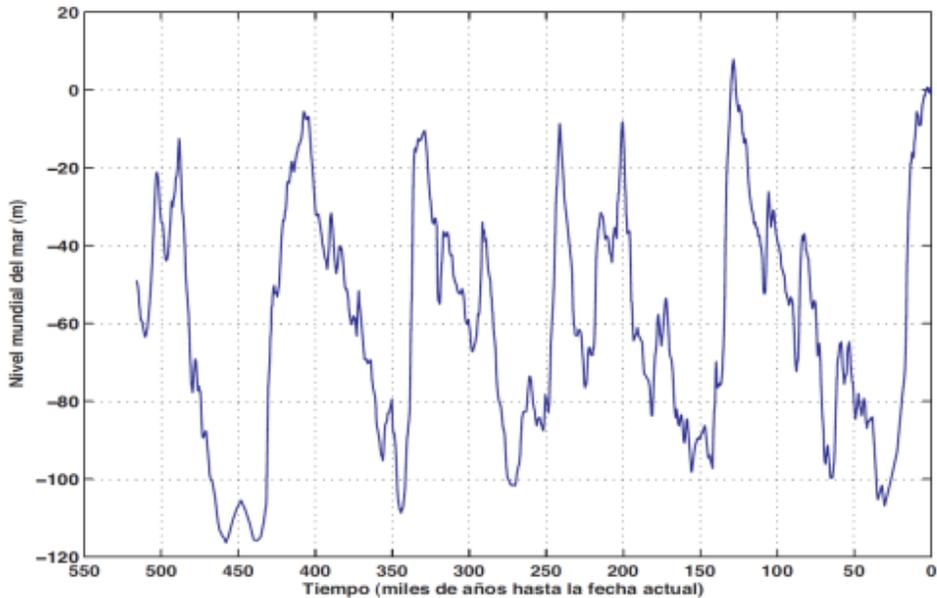
Según la organización internacional Permanent Service for Mean Sea Level el nivel medio del mar (N. M. M.), es definido como el nivel de las aguas tranquilas del mar promediado durante un periodo determinado de tiempo (meses, años) de tal forma que los efectos provocados periódicamente por mareas y por otras causas frecuentes como las olas queden compensados [Pons, 2009].

La medición del nivel del mar es aplicable en temas prácticos como la construcción de infraestructura costera, el transporte marino y la erosión costera. Las mareas y los cambios del nivel del mar influyen en muchos de los procesos biológicos y geológicos marinos y a largo plazo tienen incidencia sobre la ocupación de las costas y en los cambios del clima, por lo que, el nivel del mar es un indicador importante del cambio climático y los procesos relacionados, como el derretimiento glacial y la expansión térmica.

### 1.1.1 Variabilidad a largo plazo

Los cambios del nivel medio del mar a largo plazo tienen gran interés debido a la posibilidad de que el efecto invernadero esté provocando una aceleración en la subida del nivel medio global.

A lo largo de la historia de la Tierra el nivel del mar ha sufrido grandes cambios con oscilaciones de más de 100 metros debidas a los ciclos glaciares que producían grandes cambios en la extensión de los mantos de hielo [Rohling et al. 2009]. Estas variaciones, son resultado de las variaciones de la radiación solar en la superficie de la Tierra por efecto del balanceo de la órbita terrestre en torno al Sol y de la orientación del eje del planeta, (ciclos de Milankovitch).



**Figura 1.2 Nivel del mar durante los últimos 500000 años.**

## 1.1.2 Variabilidad estacional

El nivel del mar también tiene cambios intra-anales. Una causa importante de estos cambios en el nivel del mar es el ciclo de calentamiento/enfriamiento anual en ambos hemisferios. De este modo, los niveles del mar son mayores en verano y principios de otoño, y menores en invierno y principios de primavera.

Otros cambios están relacionados con el movimiento latitudinal de los patrones climáticos en el sistema océano-atmósfera, que producen cambios en las corrientes oceánicas y en el nivel del mar, por ejemplo, el fenómeno de El Niño causa cambios de entre 20 y 30 cm en el nivel del mar desde el Océano Pacífico oriental hasta el Océano Índico oriental.

## 1.1.3 Variabilidad a corto plazo

Existen ciertos procesos que producen cambios en el nivel del mar a corto plazo (horas o días hasta 18.6 años), los cuales son:

- **Mareas.** Las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol producen cambios en el nivel del mar, con escalas de tiempo diurnas y semidiurnas, también pueden tener una escala temporal mayor conforme al ciclo lunar (mareas vivas y mareas muertas). Cada 18.6 años coincidiendo con el ciclo lunar se producen unas mareas excepcionales como consecuencia de la perfecta alineación de la tierra, la luna y el sol.
- **Oleaje.** Las olas superficiales producidas por el viento cuando llegan a la costa se rompen y pierden energía. Parte de esta energía se transfiere aumentando ligeramente el nivel del mar cerca de la costa. Los cambios producidos en el viento y el oleaje como consecuencia del cambio climático dan lugar a cambios en la erosión de la costa y consecuentemente también cambios en el nivel del mar.
- **Las mareas de tormenta.** Las mareas de tormenta producen un aumento anormal del nivel del mar, causado por la confluencia de una marejada ciclónica y la marea astronómica.

- Otros factores Algunos terremotos pueden causar un movimiento vertical muy rápido del fondo del océano y en estos casos se puede producir un tsunami (o maremotos), un evento complejo que involucra un grupo de olas de gran energía y de tamaño variable que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua. Este tipo de olas remueven una cantidad de agua muy superior a las olas superficiales producidas por el viento provocando grandes subidas del nivel del mar.

## 1.2 Marea astronómica

Se puede definir a la marea astronómica como las variaciones periódicas del nivel del mar debidas a los efectos combinados de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, la rotación terrestre y la fuerza de Coriolis. Estas interacciones son periódicas y predecibles a partir de registros de nivel del mar en un punto determinado. Su amplitud es variable: desde casi nula en el Mediterráneo a 12 m en la bahía de Fundy, Canadá o a los 15 m en el Monte Saint Michel, Francia. Se trata de ondas que se caracterizan porque su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad media del agua  $\Rightarrow d/L < 1/25$ .

### 1.2.1 Marea producida por la Luna

Debido a la rotación de la Tierra en torno a su eje, cada punto pasa una vez por cada una de estas posiciones a lo largo de un día lunar (24.84 h) lo que se manifiesta en la existencia de dos pleamares y dos bajamares diarias, es lo que se conoce como mareas semidiurnas (2 ciclos por día  $\sim 12$  h). La órbita de la luna está inclinada unos  $5^\circ 09'$  con respecto al plano de la eclíptica, línea que aparentemente sigue el Sol en el cielo a lo largo de un año, que forma a su vez  $23^\circ 27'$  con el Ecuador.

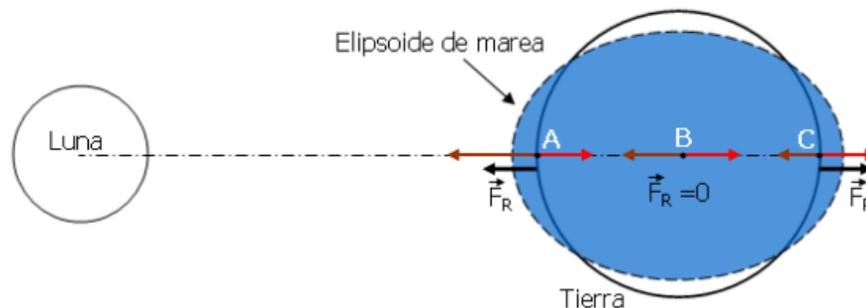
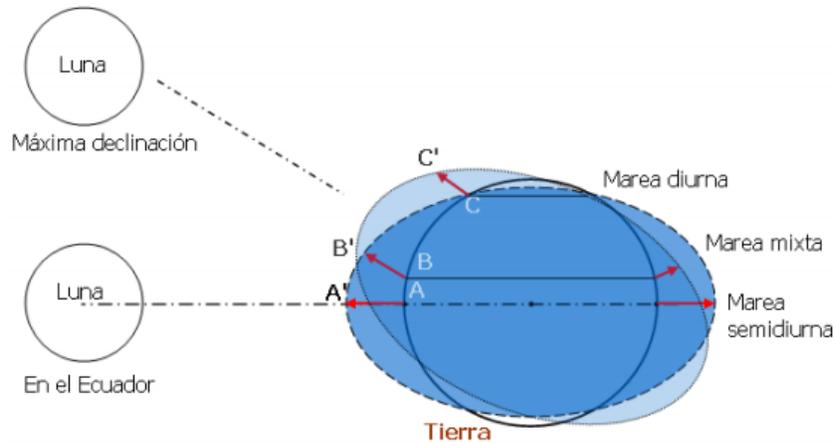


Figura 1.3 Esquema general de marea producida por la Luna.

A medida que la Luna se desplaza en su órbita alrededor de la Tierra, con un periodo de 27.32 días, varía su declinación (distancia angular desde el Ecuador); este fenómeno es el responsable de la desigualdad diurna entre dos pleamares o dos bajamares sucesivas y de la existencia de mareas de un ciclo por día, o lo que es lo mismo, mareas diurnas en algunos puntos de la Tierra. Si la Luna permaneciera siempre en el Ecuador, las mareas serían semidiurnas en todo el planeta.



**Figura 1.4 Marea producida por la Luna.**

De acuerdo con lo anterior, la marea diurna, tiene una marea alta y una marea baja cada día lunar, la marea semidiurna, tiene dos mareas altas y dos mareas bajas con altura casi igual diariamente, y la marea mixta se caracteriza por una evidente desigualdad diurna en la elevación de las pleamares y bajamares entre ciclos de marea sucesivos. (figura 1. 5).

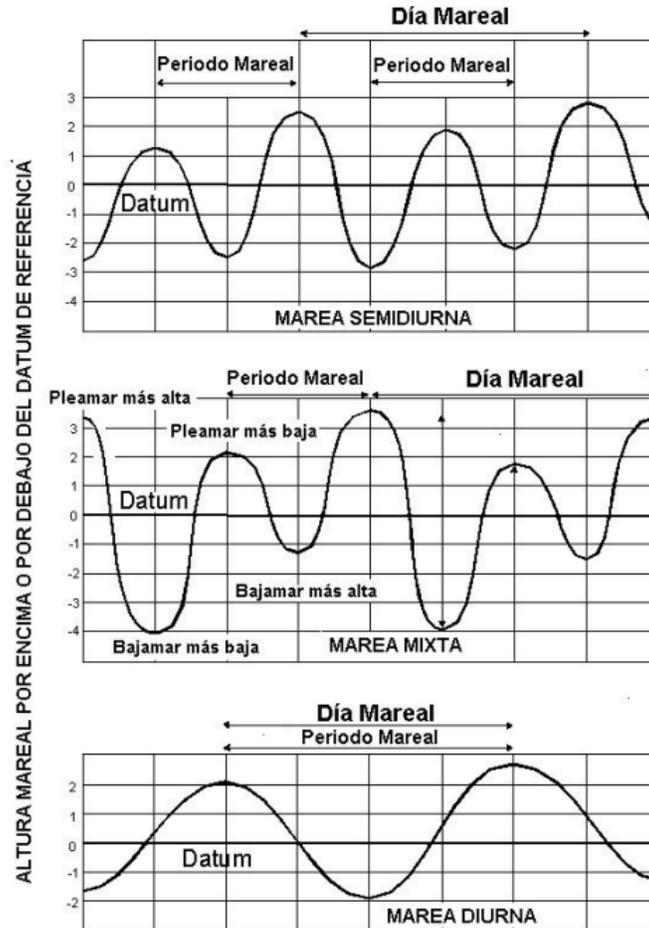


Figura 1.5 Tipos de marea.

## 1.2.2 Mareas producidas por el Sol

El Sol produce un elipsoide análogo al de la Luna, con sus correspondientes mareas diurnas y semidiurnas. Las mareas solares son menos intensas que las lunares porque se encuentra demasiado lejos, aunque tenga mayor masa que la Luna.

## 1.2.3 Efectos combinados del Sol y la Luna

En cada punto la marea se debe a los efectos combinados de mareas lunares y solares que se propagan de Este a Oeste con la rotación de la Tierra.

Cuando La Tierra, La Luna y El Sol quedan alineados, las fuerzas gravitacionales se suman produciendo mareas de mayor amplitud: pleamares más altas y bajamares más bajas de lo normal, denominadas mareas de sicigia o mareas vivas. Si, por el contrario, la Luna se encuentra a 90 grados respecto de la alineación de la Tierra y el Sol, los efectos de la Luna y del Sol no se suman y, en consecuencia, la amplitud de la marea alcanza un mínimo. Las pleamares son más bajas de lo normal y las bajamares son más altas de lo normal, a este fenómeno se le denomina mareas de cuadratura o mareas muertas.

Durante un ciclo lunar, la Tierra, la Luna y el Sol se alinean en dos ocasiones: la primera en luna nueva y la siguiente en luna llena, por consiguiente, las mareas de sicigia ocurren dos veces en cada ciclo lunar. Lo mismo ocurre con las mareas de cuadratura, esto es cuando la luna está en cuarto creciente y cuarto menguante.

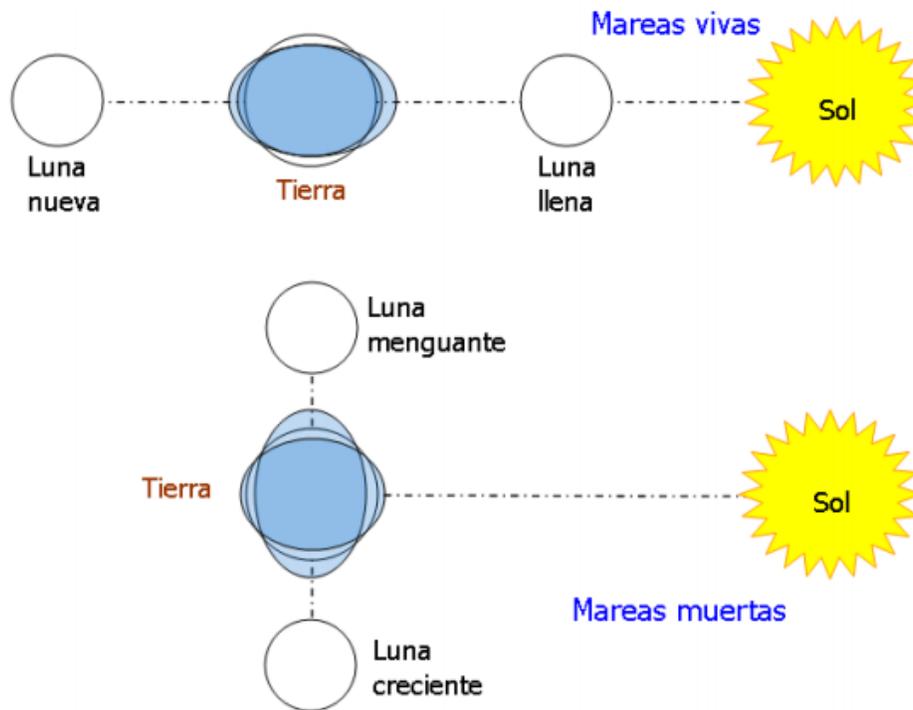


Figura 1.6 Mareas vivas y muertas.

### 1.2.4 Componentes armónicos de la marea

Las características de las mareas varían con el tiempo y el lugar, pero los mecanismos de forzamiento son regulares y predecibles. Además del forzamiento astronómico primario de las mareas, mucha de su variabilidad se debe a los efectos batimétricos y a la fuerza de Coriolis.

La combinación de los diferentes mecanismos de forzamiento astronómico descritos, crean la marea astronómica total. Mediante el análisis armónico de los

niveles del agua observados durante largos períodos, en un punto de observación, se puede diferenciar la contribución de cada mecanismo individual, estos elementos se denominan componentes de la marea, dentro de los cuales pueden mencionarse los siguientes:

$M_2$ , describe las fuerzas gravitacional y centrífuga generadas por la rotación del sistema Tierra-Luna.

$S_2$ , representa la contribución de la atracción gravitacional del Sol.

$N_2$ , describe los cambios en la distancia entre la Tierra y la Luna.

$K_1$ ,  $O_1$  y  $P_1$  describen los cambios en la declinación del plano Tierra-Luna-Sol.

De acuerdo con el análisis armónico, los cambios complejos del nivel del mar se presentan como la suma de una serie de ondas regulares, cada una de las cuales tiene carácter de oscilaciones simples armónicas. Entonces, utilizando el análisis espectral se pueden determinar todas las componentes de una serie de nivel del mar o armónicas.

La importancia relativa de los constituyentes diurnos y semidiurnos se puede expresar en términos del denominado factor de forma, que no es más que el cociente entre la suma de las amplitudes de los dos armónicos principales diurnos en el numerador y semidiurnos en el denominador.

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

Donde:

$K_1, O_1$  Representan las amplitudes de las principales constantes armónicas diurnas.

$M_2, S_2$  Representan las amplitudes de principales constantes armónicas semidiurnas.

Según el valor de  $F$ , la clasificación del tipo de marea se realiza de acuerdo con los siguientes criterios:

F = desde 0 a 0.35, marea semidiurna

F = desde 0.35 a 1.5, marea mixta con predominio semidiurno.

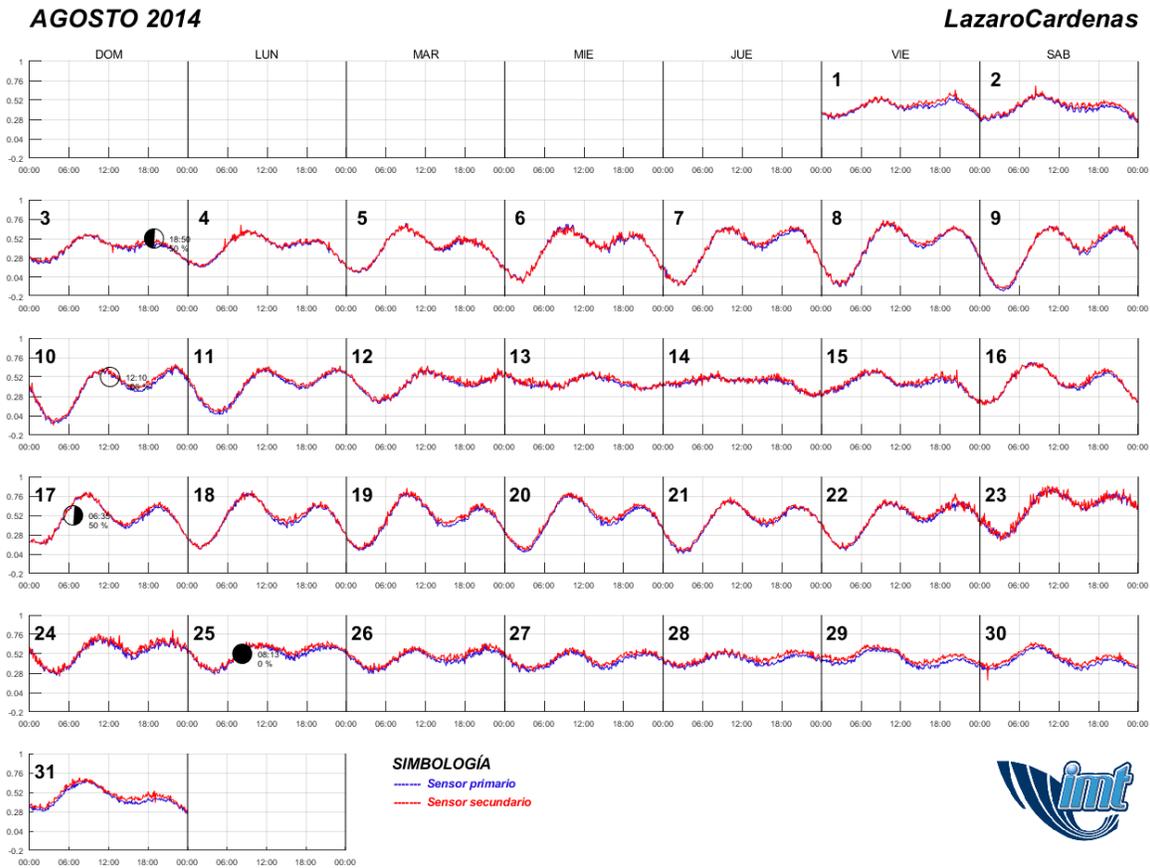
F = desde 1.5 a 3, marea mixta con predominio diurno.

F = mayor que 3, marea diurna

En el año 2018, el IMT instaló y puso en operación una estación mareo gráfica en el muelle del puerto de Lázaro Cárdenas, como parte de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM), la cual está compuesta de dos sensores para la medición del nivel del mar, un datalogger y radiotransmisores.

Los sensores para la medición del nivel del agua (un sensor tipo codificador angular y otro de tipo de presión sumergible), se encuentran instalados en un tubo de reposo. El datalogger, el radio y demás componentes eléctricos y electrónicos de la estación se encuentran en un gabinete para exteriores.

Los datos del nivel del agua medidos son transmitidos en tiempo real vía radio UHF hasta una estación receptora. La información registrada se procesa para eliminar datos malos y se realizan gráficas mensuales de dichos niveles (ver ejemplo en la figura 1. 7).



**Figura 1.7** Gráfica mensual de los niveles del mar en el puerto de Lázaro Cárdenas.

Fuente: IMT, RENEOM.

Con la información de los niveles del mar de la RENEOM, se obtuvieron mediante el modelo numérico Tidal Analysis and Prediction Module del software MIKE 21 desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI), 68 componentes armónicas de la marea, las cuales se indican en la tabla 1.1.

De acuerdo con los valores de las componentes armónicas de la marea  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$  y  $S_2$ , el valor del factor de forma de la marea es 1.2734, por lo tanto, la marea en el puerto de Lázaro Cárdenas se clasifica como **MIXTA SEMIDIURNA** con períodos de 12 horas.

**Tabla 1.1 Constantes armónicas de la marea.**

Constante	Amplitud	Fase	Constante	Amplitud	Fase
SA	0.0531	174.22	H <sub>1</sub>	0.0073	312.46
SSA	0.0306	248.94	M <sub>2</sub>	0.0823	13.08
MSM	0.01	30.71	H <sub>2</sub>	0.0052	213.71
MM	0.011	47.03	MKS <sub>2</sub>	0.0018	205.88
MSF	0.0162	142.66	LDA <sub>2</sub>	0.0026	303.7
MF	0.0017	46.97	L <sub>2</sub>	0.0062	199.72
ALP <sub>1</sub>	0.0024	125.43	T <sub>2</sub>	0.0112	239.53
2Q <sub>1</sub>	0.0027	57.86	S <sub>2</sub>	0.109	259.3
SIG <sub>1</sub>	0.0015	66.99	R <sub>2</sub>	0.0033	316.64
Q <sub>1</sub>	0.0197	66.56	K <sub>2</sub>	0.0326	263.41
RHO <sub>1</sub>	0.0064	62.42	MSN <sub>2</sub>	0.0005	242.08
O <sub>1</sub>	0.1016	63.4	ETA <sub>2</sub>	0.0023	298.82
TAU <sub>1</sub>	0.0023	268.31	MO <sub>3</sub>	0.0004	227.5
BET <sub>1</sub>	0.0024	102.16	M <sub>3</sub>	0.0019	260.49
NO <sub>1</sub>	0.0049	52.18	SO <sub>3</sub>	0.0012	219.17
CHI <sub>1</sub>	0.0026	101.64	MK <sub>3</sub>	0.0005	227.47
PI <sub>1</sub>	0.0073	49.56	SK <sub>3</sub>	0.0021	251.17
P <sub>1</sub>	0.0441	74.25	MN <sub>4</sub>	0.0007	170.92
S <sub>1</sub>	0.0283	302.86	M <sub>4</sub>	0.0012	209.66
K <sub>1</sub>	0.142	64.47	SN <sub>4</sub>	0.0007	77.88
PSI <sub>1</sub>	0.0071	159.48	MS <sub>4</sub>	0.0014	291.37
PHI <sub>1</sub>	0.0078	113.9	MK <sub>4</sub>	0.0007	229.53
THE <sub>1</sub>	0.0014	287.27	S <sub>4</sub>	0.0011	342.89
J <sub>1</sub>	0.006	28.3	SK <sub>4</sub>	0.0004	288.76
SO <sub>1</sub>	0.0058	124.1	2MK <sub>5</sub>	0.0002	170.68
OO <sub>1</sub>	0.0051	57.81	2SK <sub>5</sub>	0.0013	196.9
UPS <sub>1</sub>	0.0015	50.36	2MN <sub>6</sub>	0.0005	103.13
OQ <sub>2</sub>	0.0007	239.24	M <sub>6</sub>	0.0007	126.75
EPS <sub>2</sub>	0.0029	313.95	2MS <sub>6</sub>	0.002	197.15
2N <sub>2</sub>	0.0075	292.5	2MK <sub>6</sub>	0.0006	182.64
MU <sub>2</sub>	0.0105	324.79	2SM <sub>6</sub>	0.0007	148.16
N <sub>2</sub>	0.0401	333.88	MSK <sub>6</sub>	0.0008	231.78
NU <sub>2</sub>	0.0071	338.46	3MK <sub>7</sub>	0.0005	19.66
GAM <sub>2</sub>	0.0043	267.79	M <sub>8</sub>	0.0003	304.74

## **1.2.5 Niveles de referencia relacionados con las mareas**

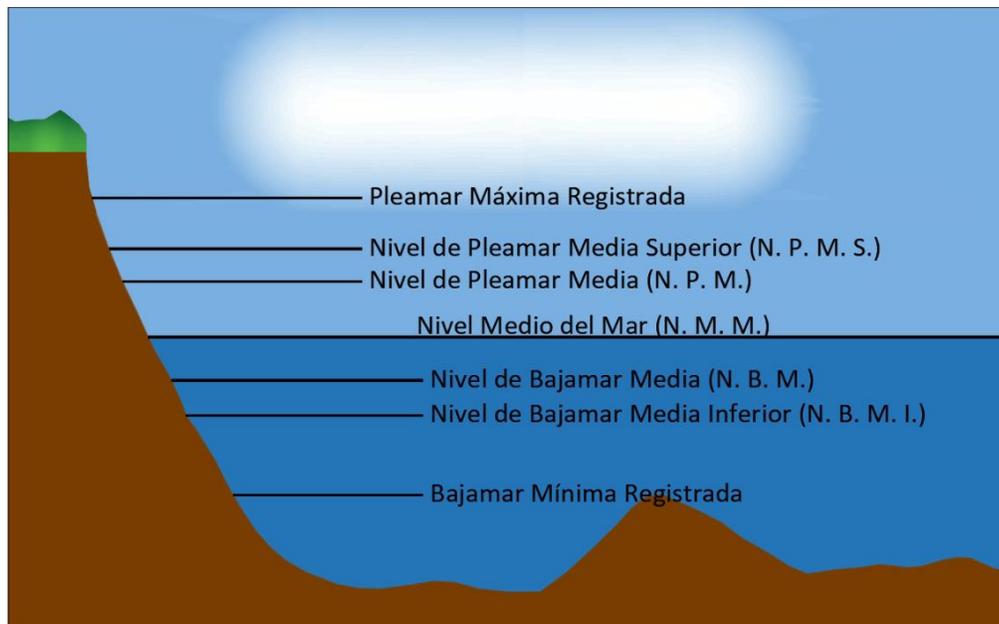
La elevación de las mareas se calcula tomando como referencia una elevación base, nivel o plano de referencia de mareas, que cada país adopta según las características de cada costa. Los planos de referencia de mareas varían según el lugar y se definen en términos de cierta fase de la marea. Los niveles de referencia se dan con respecto a puntos que se han medido y marcado sobre tierra firme mediante bancos de nivel fijos. Debido a la gran variación de las mareas, todos los planos de referencia de mareas son locales y no se deben extender a grandes distancias.

En México, se han establecido los correspondientes planos de marea que a continuación se describen:

- **Altura Máxima Registrada:** Nivel más alto registrado en la estación por efecto de algún tsunami o ciclón.
- **Pleamar Máxima Registrada:** Nivel más alto registrado debido a las fuerzas de marea periódica o a los efectos de condiciones meteorológicas.
- **Nivel de Pleamar Media Superior (N. P. M. S.):** Promedio de las más altas de las dos pleamares diarias, durante el período considerado en cada estación.
- **Nivel de Pleamar Media (N. P. M.):** Promedio de todas las pleamares durante el período considerado en cada estación.
- **Nivel Medio del Mar (N. M. M.):** Promedio de las alturas horarias durante el período considerado en cada estación.
- **Altura Mínima Registrada.** Nivel más bajo, registrado en la estación por efecto de algún tsunami.
- **Bajamar Mínima Registrada.** Nivel más bajo registrado debido a las fuerzas de marea periódica, o a los efectos de condiciones meteorológicas.
- **Nivel de Bajamar Media Inferior (N. B. M. I.):** Promedio de la más baja de las dos bajamares diarias, durante el período considerado en cada estación. Este

plano es el que se utiliza como plano de referencia para el pronóstico de mareas en la costa del Pacífico y Golfo de California.

- Nivel de Bajamar Media (N. B. M.). Promedio de todas las bajamares durante el período considerado en cada estación.
- Nivel de Media Marea. Plano equidistante entre la pleamar media y bajamar media, se obtiene promediando estos dos valores.



**Figura 1. 8 Planos de marea en México.**

La Secretaría de Marina, publica a través de la Red Mareográfica Nacional los planos de marea para el puerto de Lázaro Cárdenas, los cuales se indican en la tabla 1.2 y que fueron determinados con los registros del nivel del mar medidos de febrero de 1995 a diciembre de 2015, cabe señalar que la pleamar máxima y la bajamar mínima registradas obedecen al período de observaciones correspondientes a los años 2002 – 2015.

**Tabla 1.2 Niveles de referencia de la marea para el puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.**

Nivel de referencia	Elevación referida al N. M. M.	
	metros	pies
Pleamar Máxima Registrada	0.721 m	3.281 m
Nivel de Pleamar Media Superior	0.246 m	1.721 m
Nivel de Pleamar Media	0.171 m	1.475 m
Nivel Medio del Mar	0.000 m	0.917 m
Nivel de Bajamar Media	-0.158 m	0.398 m
Nivel de Bajamar Media Inferior	-0.279 m	0.000 m
Bajamar Mínima Registrada	-0.719 m	-1.444 m

Fuente: Red Mareográfica Nacional de la Secretaría de Marina.

### 1.3 Marea meteorológica

Además de las mareas astronómicas, la atmósfera ejerce su influencia sobre el mar de dos maneras, provocando cambios en el nivel del mar. Estos cambios están dados por:

- La presión atmosférica ejerce una fuerza vertical continua sobre la superficie del mar, de manera que sus variaciones producen cambios del nivel del agua. En general, un incremento de 1 mbar de presión atmosférica produce aproximadamente una disminución de 1 cm.
- El viento cuando sopla sobre el mar provoca un desplazamiento del agua que si se ve interrumpido por la presencia de tierra produce una convergencia y por lo tanto un ascenso del nivel del mar.

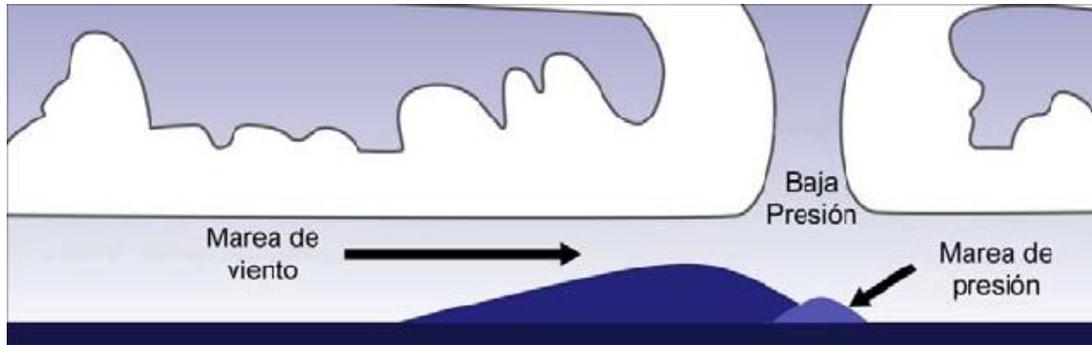


Figura 1.9 Marea de tormenta.

Para determinar la marea meteorológica con base en los registros históricos del nivel del mar, simplemente se resta o se obtienen los residuos entre la marea astronómica pronosticada y la marea observada. Aunque la amplitud típica de la marea meteorológica es menos de un metro, puede predominar en la marea total en aquellas regiones donde las mareas astronómicas no son muy fuertes.

Las desviaciones típicas de los niveles del mar observados respecto de los niveles de marea pronosticados varían entre unos pocos centímetros en islas tropicales oceánicas y varias decenas de centímetros en latitudes altas, tormentosas y con aguas poco profundas. En tierras bajas, próximas a zonas de aguas someras, se producen graves inundaciones al coincidir tormentas importantes, que causan un aumento del nivel del agua, con la marea alta en fase de mareas vivas.

A partir de la información de los niveles del mar de la RENEOM y con el análisis armónico de la marea, se separaron las oscilaciones no periódicas, aislando así, la marea meteorológica de la marea astronómica (ver figura 1.10)

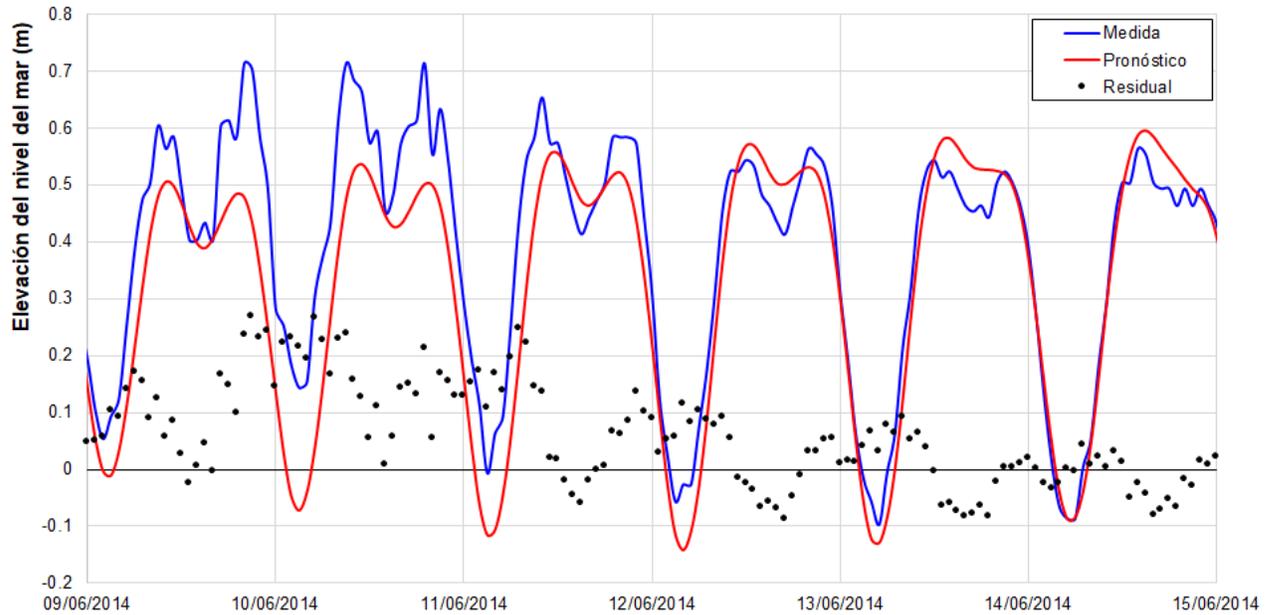


Figura 1.10 Mareograma del puerto de Lázaro Cárdenas del 9 al 15 de junio de 2014.

Tomando como referencia la marea medida y la marea pronosticada, se tiene que la máxima elevación del nivel del mar debido a la marea meteorológica en el período comprendido entre mayo de 2008 y octubre de 2014 fue de 0.33 m, y un valor promedio de 0.07 m.

## 1.4 Set-up y run-up del oleaje

Cuando las olas rompen en una playa, originan un incremento del nivel medio del mar que se produce en la zona de rompiente (set up del oleaje) y consiste en una pendiente ascendente del agua en la dirección hacia tierra. Ésta pendiente es inferior a la de la playa, con lo que el agua interseca la playa en un punto de ésta.

La línea de costa efectiva formada por la intersección de la superficie del set-up con la playa, es mayor cuanto mayores son las alturas de ola del oleaje incidente, con lo que puede llegar a alcanzar valores muy importantes durante episodios de tormenta. Por este motivo es un factor importante a considerar en el estudio, pues hace incrementar la probabilidad de que se produzca rebase en la playa.

Existen algunas ecuaciones para predecir el valor de la máxima elevación del set-up que dependen de las condiciones del oleaje y de la pendiente media de la playa. Por ejemplo, Guza y Thornton (1981) encontraron que el set-up máximo en la línea de orilla sobre el nivel del mar en reposo, a partir de medidas realizadas en playas en el sur de California, vale:

$$\eta_{max} = 0.17H_0$$

Donde:

$H_0$  Altura de ola significativa del oleaje incidente en aguas profundas.

Para playas con pendientes mayores, Holman y Sallenger (1985) obtuvieron la siguiente relación:

$$\frac{\eta_{max}}{H_0} = 0.45\xi_{\infty}$$

Donde:

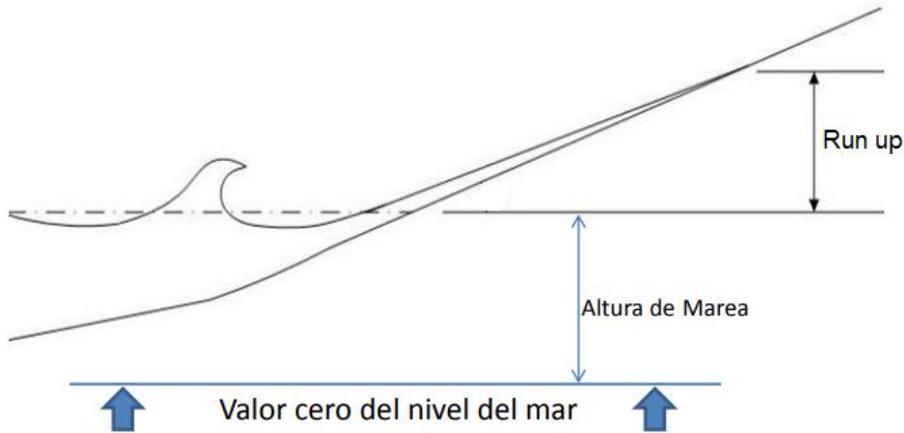
$\xi_{\infty}$  Número de Iribarren en aguas profundas, obtenido mediante

$$\xi_{\infty} = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$$

$\tan \beta$  Pendiente de la playa.

$L_0$  Longitud de la ola en aguas profundas.

El run up del oleaje es la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre una estructura respecto el nivel del mar en reposo (figura 1.11). Este fenómeno se produce después de que la ola rompe sobre la playa, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por el talud de la playa.



**Figura 1.11** Run up del oleaje.

El run up depende principalmente del talud, rugosidad y porosidad de la estructura, así como de la existencia de una berma y de su geometría, y de las características del oleaje incidente, para el caso de playas, la existencia de formulaciones o métodos de estimación están limitadas principalmente a aproximaciones semi-empíricas basadas en resultados obtenidos en ensayos de laboratorio. Algunos resultados de estos estudios son ecuaciones que permiten obtener el valor del run up a partir de la altura de ola incidente o del número de Iribarren.

El estudio realizado por Guza y Thornton (1982) en playas de California dio como resultado una dependencia de la altura de ola incidente en aguas profundas del run up expresado como un run up significativo,  $R_s$  (media del tercio mayor de los niveles de run up), que obedece a la siguiente expresión:

$$R_s = 0.70H_0$$

El estudio de Holman y Sallenger (1985) estableció que la relación  $R_s/H_0$  no es constante, sino que vuelve a depender del número de Iribarren en aguas profundas  $\xi_\infty$ , medido, no sobre el nivel medio del mar en reposo, sino sobre la línea de costa efectiva, es decir, sin contar el set-up del oleaje, que debe evaluarse a parte. Holman (1986) obtuvo la correlación siguiente:

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 0.45\xi_{\infty}$$

donde en este caso  $R_{2\%}$  es el nivel del run up excedido un 2%, a partir de la correlación anterior se puede determinar la siguiente expresión dimensional que permite observar la dependencia de la pendiente de la playa ( $\tan \beta$ ), de la altura de ola significativa en aguas profundas ( $H_0$ ) y del período de la ola ( $T$ ).

$$R_{2\%} = 0.18g^{1/2} \tan \beta H_0^{1/2} T$$

La suma de la máxima elevación del set up y del run up representa la elevación total debida al oleaje sobre el nivel del mar determinado por la marea y otros posibles factores que afectan el nivel medio del mar en un determinado momento.

$$R_{2\%}^T = \eta_{max} + R_{2\%}$$

Existen otras expresiones que permite determinar el run up del oleaje. Se tiene la aproximación propuesta por Mase (1989) para oleaje irregular y playas disipativas, la cual estima el run up de las olas incluyendo los efectos de la sobre elevación del nivel medio inducido por el oleaje (set up) y resulta válida para taludes de playa en el rango  $1/30 \leq \tan \beta \leq 1/5$  y para oleajes con un peralte  $H_0/L_0$  superior a 0.007, la cual viene dada por la expresión general:

$$\frac{R_i}{H_0} = a\xi_{\infty}^b$$

Donde:

$R_i$  Run up asociado a un determinado nivel de excedencia  $i$

$a$  y  $b$  Coeficientes de ajuste que dependen del nivel de excedencia escogido

Aplicando los coeficientes indicados en la siguiente tabla (nivel de excedencia medio) y operando convenientemente se transforma en:

$$R_s^T = 0.725g^{0.35}(\tan \beta)^{0.7} H_0^{0.65} T^{0.7}$$

**2 Valores de las constantes a y b de la ecuación propuesta por Mase (1989)**

<i>i</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
máx	2.32	0.77
2%	1.86	0.71
1/10	1.7	0.74
1/3	1.38	0.7
medio	0.88	0.65

Otras fórmulas más recientes son las propuestas por Nielsen y Hanslow (1991), derivadas de estudios realizados en seis playas de la costa Sureste de Australia, sus resultados revelan la independencia del run-up de la pendiente de la playa en el caso de playas tendidas ( $\tan\beta < 1/10$ ), mientras que, en playas más reflejantes, si hay dependencia del ángulo del talud. Dichas fórmulas son:

$$z = 0.47(H_0L_0)^{0.5}\tan\beta \quad \text{si } \tan\beta > 0.1$$

$$z = 0.04(H_0L_0)^{0.5} \quad \text{si } \tan\beta < 0.1$$

$$R_{u50\%} = 0.83z$$

$$R_{u2\%} = 1.98z$$

$$R_{u1\%} = 2.15z$$

Donde  $R_u$  indica el valor del run-up y el subíndice el porcentaje del tiempo en el que es superado.

Para analizar la variación del nivel del mar debido al oleaje, es decir set-up más run-up, en su versión  $R_s^T$  (run-up significativo), a partir de las formulaciones descritas anteriormente, se llega a las expresiones que se indican a continuación, las cuales permiten ver más claramente la dependencia del valor del run-up con dichas variables.

A partir de los estudios de Guza y Thornton (1981) y (1982) para playas disipativas, se obtiene la siguiente relación que está en función únicamente del valor de  $H_0$ , que permite calcular el valor del set-up y del run up significativo:

$$R_s^T = 0.87H_0$$

Por otro lado, de acuerdo con Holman y Sallenger (1985), al sumarse el valor del set up y el valor del run up para playas de mayores pendientes, y asumiendo que el valor del run up se ajusta bien a una distribución probabilística de tipo Rayleigh, se puede llegar a la siguiente expresión que ya no depende exclusivamente del valor de la altura de ola ( $H_0$ ), sino también de la pendiente de la playa y del periodo del oleaje.

$$R_s^T = 0.307g^{1/2} \tan \beta H_0^{1/2} T$$

Finalmente, las fórmulas de Nielsen y Hanslow (1991) para obtener el valor del run-up ( $R_{2\%}$ ) se modifican al run-up significativo y sumándole el valor del set-up (fórmulas de Guza y Thornton para playas disipativas, o la fórmula de Holman y Sallenger para playa con mayores pendientes), las expresiones resultantes son:

$$R_s^T = 0.02257g^{1/2}H_0^{1/2}T + 0.17H_0 \quad \text{si } \tan\beta < 0.1$$

$$R_s^T = 0.4447g^{1/2} \tan \beta H_0^{1/2} T \quad \text{si } \tan\beta > 0.1$$

El cálculo del set-up y run-up en la zona de estudio, se realizó con las cuatro fórmulas descritas anteriormente utilizando la información del oleaje de la boya direccional medidora de oleaje de la RENEOM, ubicada en la zona exterior del puerto de Lázaro Cárdenas, en las coordenadas  $17.8899^\circ$  de latitud Norte y

102.219° de longitud Oeste, cabe señalar que, debido a la gran variabilidad de alturas y períodos de ola, para el caso de las formulaciones de Holman y Sallenger (1985), de Mase (1989) y de Nielsen y Hanslow (1991), los resultados de los cálculos se ajustaron a una recta dejándolas en función solamente de la altura de ola, tal como se indica en la siguiente figura.

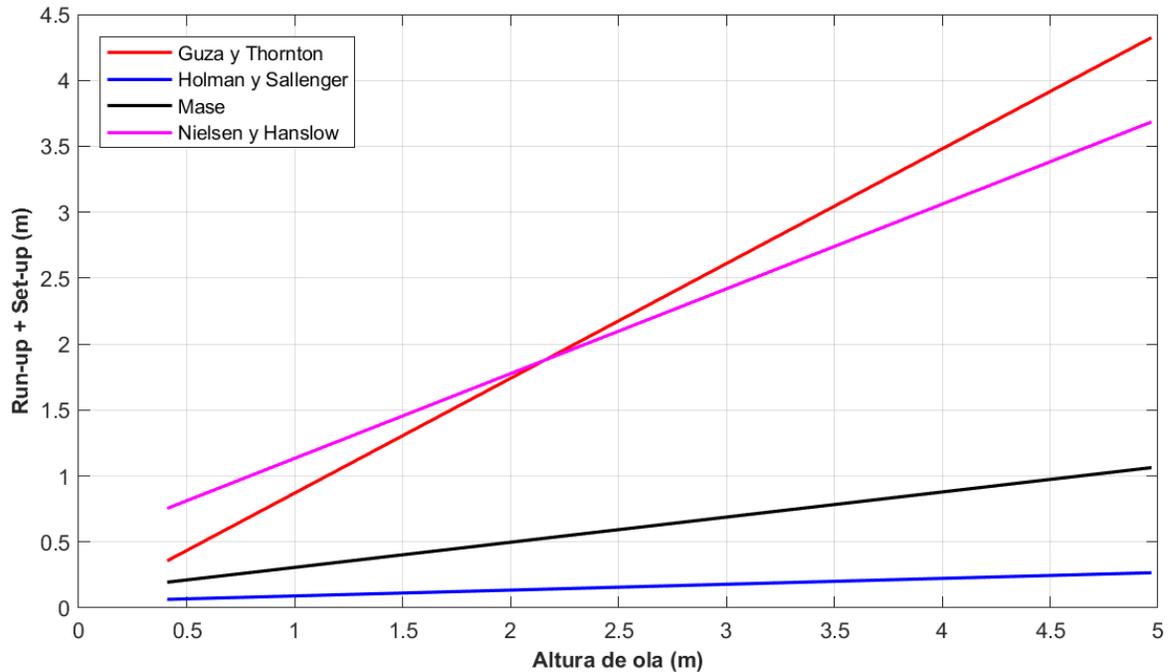


Figura 1.12 Variación del Run up del oleaje, para las cuatro fórmulas descritas.

En la figura anterior, se puede observar que las fórmulas de Guza y Thornton (1982) y Nielsen y Hanslow (1991) arroja valores muy elevados del run-up significativo ( $R_s^T$ ), mientras que la fórmula propuesta por Holman y Sallenger (1985) arroja valores muy pequeños, por lo que, para el presente trabajo se descartaron dichas formulas considerando solamente la fórmula propuesta por Mase.

A fin de obtener el run-up para los valores medios del oleaje de la zona de estudio, con la información de oleaje de la RENEOM se obtuvieron las características medias del oleaje, considerando las direcciones de incidencia a la zona de estudio, divididas en 22.5°, correspondiendo estas direcciones al sector comprendido entre la dirección S 67.5° E y la dirección S 67.5° O, tal como se muestra en la figura 1.13.

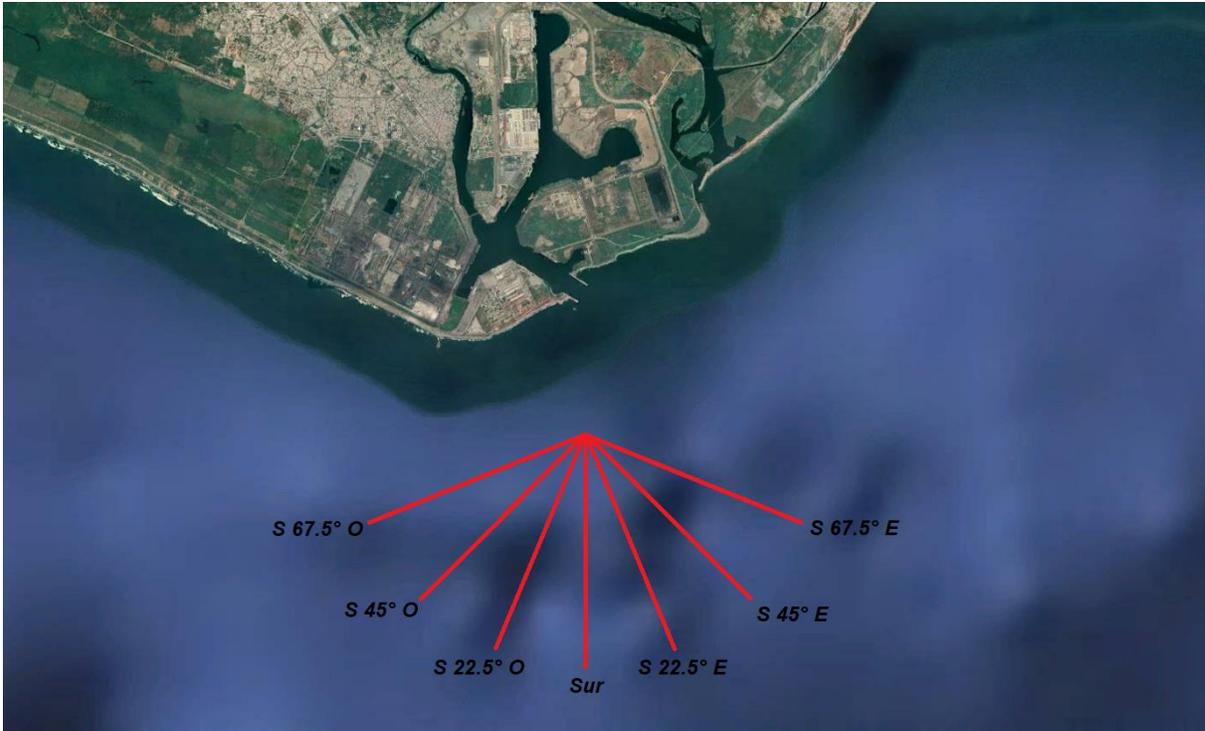


Figura 1.13 Direcciones del oleaje que inciden en la zona de estudio.

Dichas características medias en el régimen anual se calcularon de acuerdo con lo siguiente.

El período medio del oleaje  $\bar{T}$  se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{T} = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k$$

Donde:

- $T_k$  Representa una serie de datos de periodos de oleaje en el tiempo.  
 $n_k$  Es el número total de datos de períodos del oleaje, ( $k = 1, 2, \dots, n_k$ ).

La altura media del oleaje  $\bar{H}$  se estimó mediante la siguiente ecuación, la cual toma en cuenta el flujo de la energía del oleaje.

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k * H_k^2}{\bar{T}}}$$

Donde:

$H_k$  Es una serie de datos de la altura del oleaje en el tiempo.

$(T_k, H_k)$  Es un grupo de datos de período y de altura de ola.

En la tabla 1.4 se presentan los resultados de las características medias del oleaje (altura, periodo), así como su porcentaje de ocurrencia por dirección de incidencia para el régimen anual.

**Tabla 1.3 Características medias del oleaje en la zona exterior del puerto de Lázaro Cárdenas (Régimen anual).**

Dirección	$\bar{H}$ (m)	$\bar{T}$ (s)
S 67.5° E	3.55	20.85
S 45° E	1.97	8.55
S 22.5° E	1.53	9.09
Sur	1.22	13.30
S 22.5° O	1.23	14.28
S 45° O	1.17	13.69
S 67.5° O	1.11	12.77

Con base en lo anterior, se tiene que la elevación del nivel del mar debido al run-up del oleaje oscila entre 0.32 y 0.79 m, con un valor promedio de 0.35 m, como se indican en la siguiente tabla:

**Tabla 1.4 Run-up significativo por dirección de incidencia del oleaje.**

Dirección	Run-up (m)
S 67.5° E	0.79
S 45° E	0.49
S 22.5° E	0.41
Sur	0.35
S 22.5° O	0.35
S 45° O	0.34
S 67.5° O	0.32

## 1.5 Cota de inundación

La cota de inundación en una playa puede ser representada como la interacción de las variables que se muestran en la figura 1.14. En un instante determinado, la playa está caracterizada por un nivel de marea (marea astronómica y marea meteorológica), sobre dicho nivel se encuentra el run-up por la acción de oleaje.

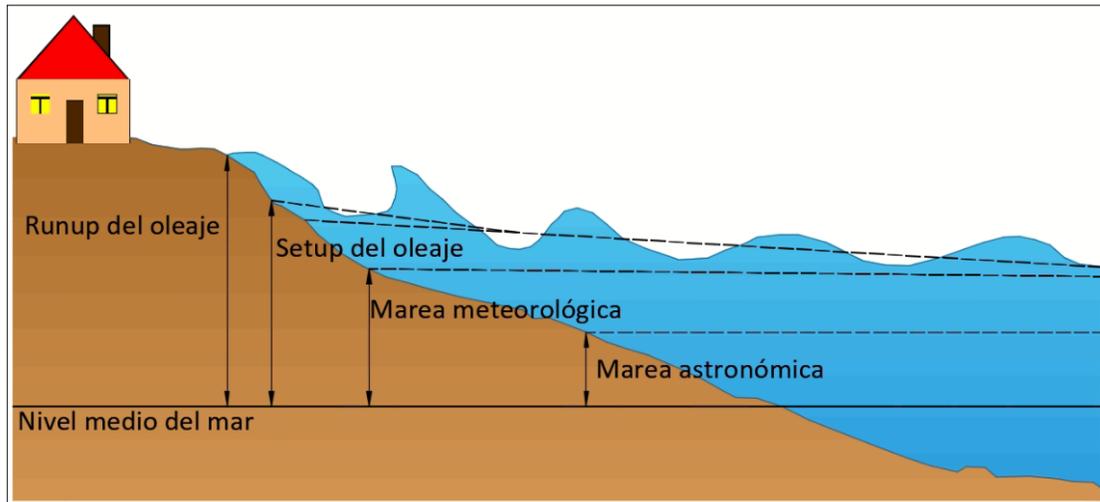


Figura 1.14 Variaciones del nivel del mar en el corto plazo.

Para el presente trabajo, la cota de inundación alcanzada en la zona de estudio por la acción de la dinámica marina y meteorológica, se asumió como el resultado de la suma lineal de los valores calculados de dichas variables, de acuerdo con lo siguiente:

$$CI = NMM + MA + MM + Ru$$

Donde:

- CI Cota de inundación (m).
- NMM Nivel medio del mar (m)
- MA Marea astronómica (m)
- MM Marea meteorológica (m)
- Ru Run-up significante (run-up + set-up) debido a la rotura del oleaje (m)

Con base en los puntos anteriores, los valores considerados para determinar la cota de inundación permanente de la zona de estudio se indican a continuación

- Nivel medio del mar = 0.000 m
- Marea astronómica (N. P. M. S) = 0.246 m
- Marea meteorológica = 0.330 m
- Run-up significativo = 0.350 m

Con dichos valores la cota de inundación permanente, es de 0.926 m respecto al N. M. M.

## 2. Cota de inundación (eventos de inundación temporales)

---

### 2.1 Marea meteorológica

La estimación de la marea meteorológica debida a huracanes tropicales, está limitada por la escasez de mediciones y de información histórica, en México, esto es particularmente relevante, para lo cual, una de las formas para obtener la marea meteorológica es mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$MM = S_p + S_v$$

Donde:

- MM Marea meteorológica
- $S_v$  Sobreelevación del nivel del mar por efecto del viento (m)
- $S_p$  Sobreelevación del nivel del mar por efecto del gradiente de presiones (m)

El cálculo de la sobreelevación por viento se puede obtener con la fórmula desarrollada por Keulegan

$$S_v = \frac{kV^2x}{g(H_1 - H - S)} \ln \frac{H_1}{H + S}$$

Donde:

- $H_1$  Profundidad en el borde de la plataforma (m)
- $H$  Profundidad en el sitio de estudio (m)
- $V$  Velocidad máxima del viento sostenido (m/s)
- $x$  Distancia desde el borde continental hasta la profundidad  $H$  (m)

- k      Coeficiente de esfuerzo del viento ( $3 \times 10^{-6}$ )  
g      Aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

El cálculo de la sobreelevación por gradiente de presión se puede obtener con la fórmula desarrollada por Per Brunn.

$$S_p = 0.13(P_n - P_0) \left(1 - e^{-\frac{R}{r}}\right)$$

Donde:

- $P_n$     Presión neutral (1013 mbar)  
 $P_0$     Presión en el centro del huracán (mbar)  
R      Radio del máximo viento(km)  
r      Distancia radial desde el centro del huracán al punto de cálculo sobre una línea transversal (km)

Otra forma alternativa para estimar la sobreelevación del nivel del mar generado por huracanes tropicales, en sitios con insuficiente información histórica es la implementación de modelos hidrodinámicos en 2 dimensiones e integrados en la vertical, forzados a partir de los campos de viento generados por el huracán, con la desventaja inherente de requerir información sobre las variables climáticas que definen al huracán y que pocas veces está disponible para todos los eventos históricos.

Para el presente trabajo, el cálculo de la marea meteorológica por huracanes se realizó utilizando el modelo hidrodinámico Flow Model FM del software MIKE 21 desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, el cual emplea el método de elementos finitos para resolver las ecuaciones promediadas de Reynolds y Navier Stokes (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes, por sus siglas en inglés) incompresibles, sujetas a las suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática. Las ecuaciones que describen los flujos y las variaciones del nivel del mar son las siguientes:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega_p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0$$

Donde:

$h(x, y, t)$	Profundidad del agua (m).
$\zeta(x, y, t)$	Superficie de elevación (m).
$p, q(x, y, t)$	Flujos de densidad en las direcciones x, y ( $m^3/s/m$ ) = (uh, vh)
$u, v$	Velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x, y
$C$	Resistencia de Chezy ( $m^{1/2}/s$ )
$g$	Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).
$f$	Factor de fricción por viento
$V, V_x, V_y$	Componentes de velocidad del viento en las direcciones x, y (m/s)
$\Omega$	Parámetro de Coriolis dependiente de la latitud
$p_a$	Presión atmosférica ( $kg/m^2$ )
$\rho_w$	Densidad del agua ( $kg/m^3$ ).
$x, y$	Coordenadas cartesianas(m).
$t$	Tiempo.
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	Componentes de los esfuerzos cortantes efectivos.

La fricción en el fondo se determina por medio de la siguiente ley cuadrática:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_w} = C_f \bar{u}_b |\bar{u}_b|$$

Donde:

$U_b$  Velocidad del flujo por encima del fondo

$C_f$  Coeficiente de arrastre, en términos del número de Manning

$$C_f = \frac{g}{\left(Mh^{1/6}\right)^2}$$

$M$  Número de Manning, definido como:

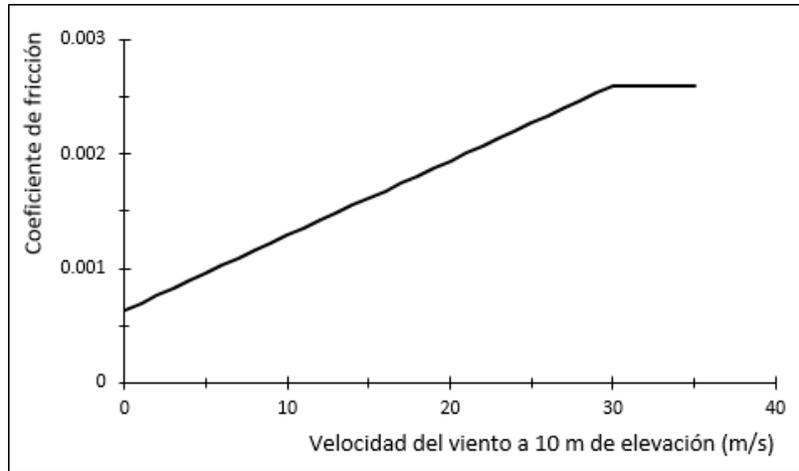
$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}}$$

$k_s$  Rugosidad del fondo

El factor de fricción por viento se determina de acuerdo con Smith & Banke (1975), considerando la siguiente parametrización.

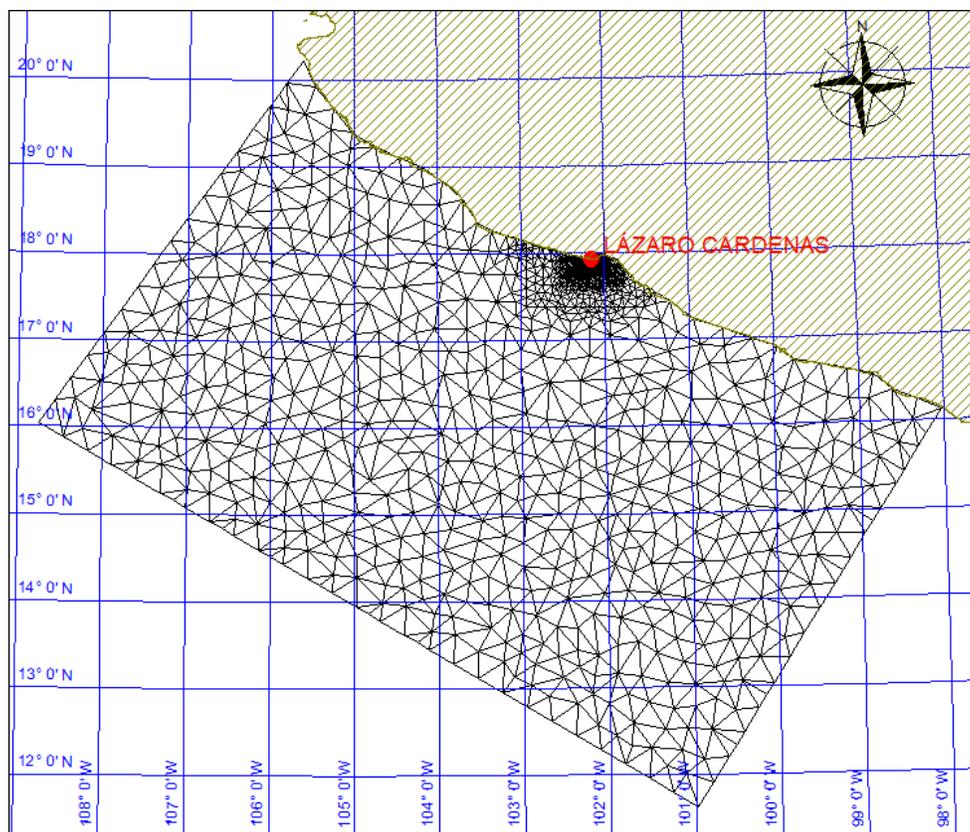
$$f(v) = \begin{cases} f_0 & \text{para } V < V_0 \\ f_0 + \frac{V - V_0}{V_1 - V_0} \cdot (f_1 - f_0) & \text{para } V_0 \leq V \leq V_1 \\ f_1 & \text{para } V > V_1 \end{cases}$$

Donde  $f_0 = 0.00063$ ,  $V_0 = 0$  m/s y  $f_1 = 0.00260$ ,  $V_1 = 30$  m/s, conforme a la gráfica mostrada en la figura 2.1.



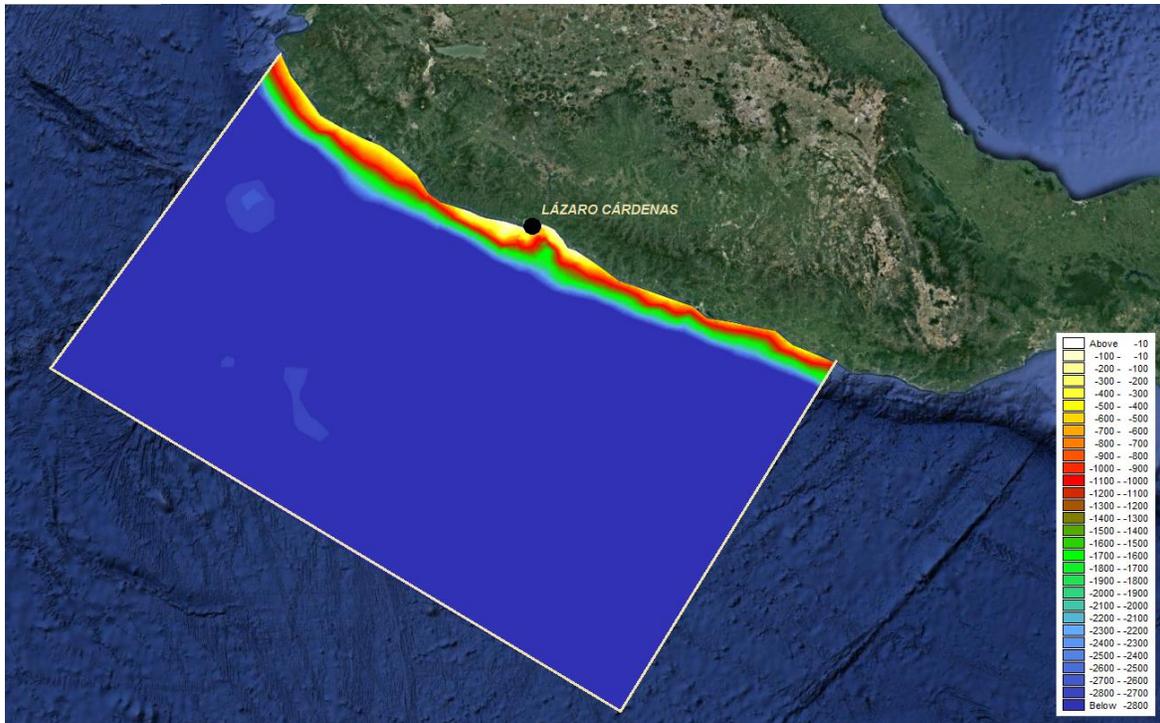
**Figura 2.1** Coeficiente de fricción por viento (Smith & Banke, 1975).

Para la implementación del modelo numérico, se definió una malla de cálculo (ver figura 2.2), mediante el método de mallas flexibles no estructuradas con elementos triangulares, el cual permite la distribución óptima de los nodos de cálculo adaptando la resolución de las celdas a las características físicas del lugar y a las zonas de interés dentro del modelo numérico, permitiendo focalizar la mayor resolución a la zona de estudio dejando el resto del dominio con un espaciamiento amplio, mejorando con ello el rendimiento computacional.



**Figura 2.2** Definición de la malla de cálculo con profundidades y elevaciones, utilizada para las modelaciones numéricas de la marea de tormenta.

Una vez definida la malla de cálculo, se realizó la incorporación de los datos de profundidades y elevaciones en cada nodo de la malla (figura 2.3), dicha información topo-batimétrica fue obtenida del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 1 de la National Geophysical Data Center de los Estados Unidos de Norteamérica en combinación con la información batimétrica obtenida de portulanos y de levantamientos batimétricos del interior del puerto, y la información topográfica obtenida del modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), esto con el objeto de obtener una mayor resolución en la zona costera e interior del puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.



**Figura 2.3** Malla de cálculo con profundidades y elevaciones, utilizada para las modelaciones numéricas de la marea de tormenta.

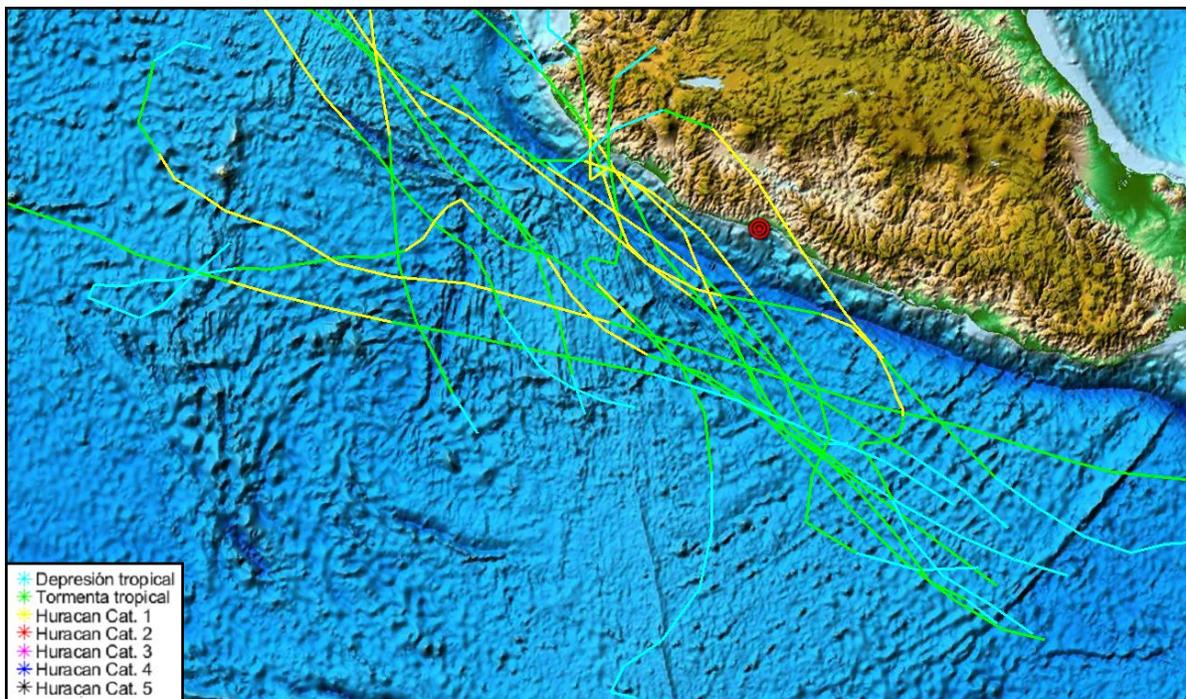


**Figura 2.4** Detalle de la malla de cálculo en la zona del puerto de Lázaro Cárdenas, utilizada para las modelaciones numéricas de la marea de tormenta.

La información de los eventos de huracanes en el Océano Pacífico, se tomaron de la base de datos disponible y de dominio público denominada HURDAT2 (Hurricane Databases), publicada por el National Hurricane Center (NHC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), para el período comprendido entre 1949 – 2019, la cual contiene información a cada 6 horas de la ubicación (latitud y longitud), velocidad máxima de los vientos sostenidos y presión en el ojo, de las depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes.

De la base de datos HURDAT2, se seleccionaron los huracanes categoría 1 – 5 que se presentaron en un radio de 700 km del puerto de Lázaro Cárdenas, en el período comprendido entre 1988 – 2019, de los cuales se identificaron:

- 15 huracanes de categoría 1 (figura 2.5)
- 12 huracanes de categoría 2 (figura 2.6)
- 11 huracanes de categoría 3 (figura 2.7)
- 25 huracanes de categoría 4 (figura 2.8)
- 6 huracanes de categoría 5 (figura 2.9)



**Figura 2.5** Trayectorias de los huracanes categoría 1 seleccionados.

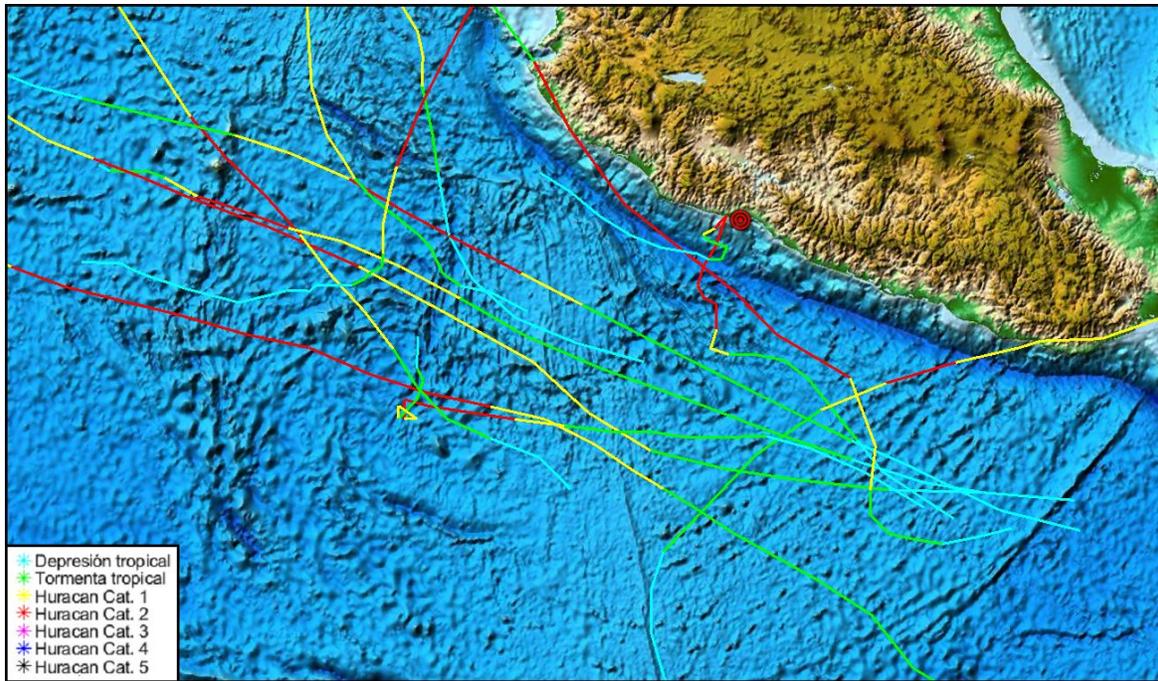


Figura 2.6 Trayectorias de los huracanes categoría 2 seleccionados.

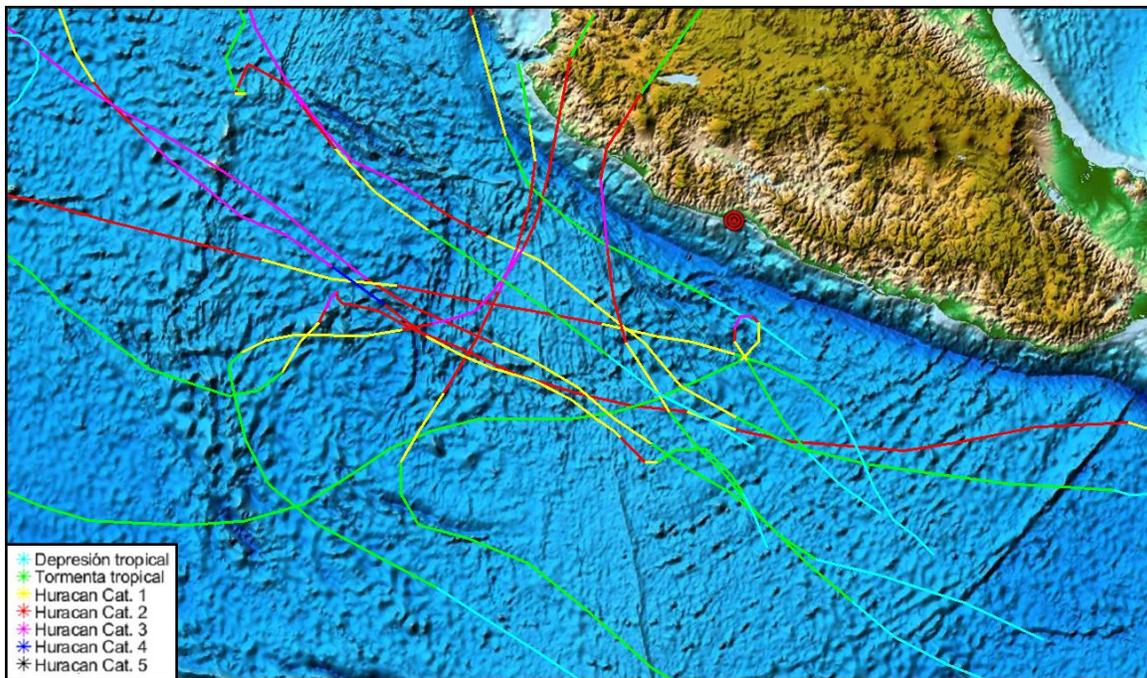


Figura 2.7 Trayectorias de los huracanes categoría 3 seleccionados.

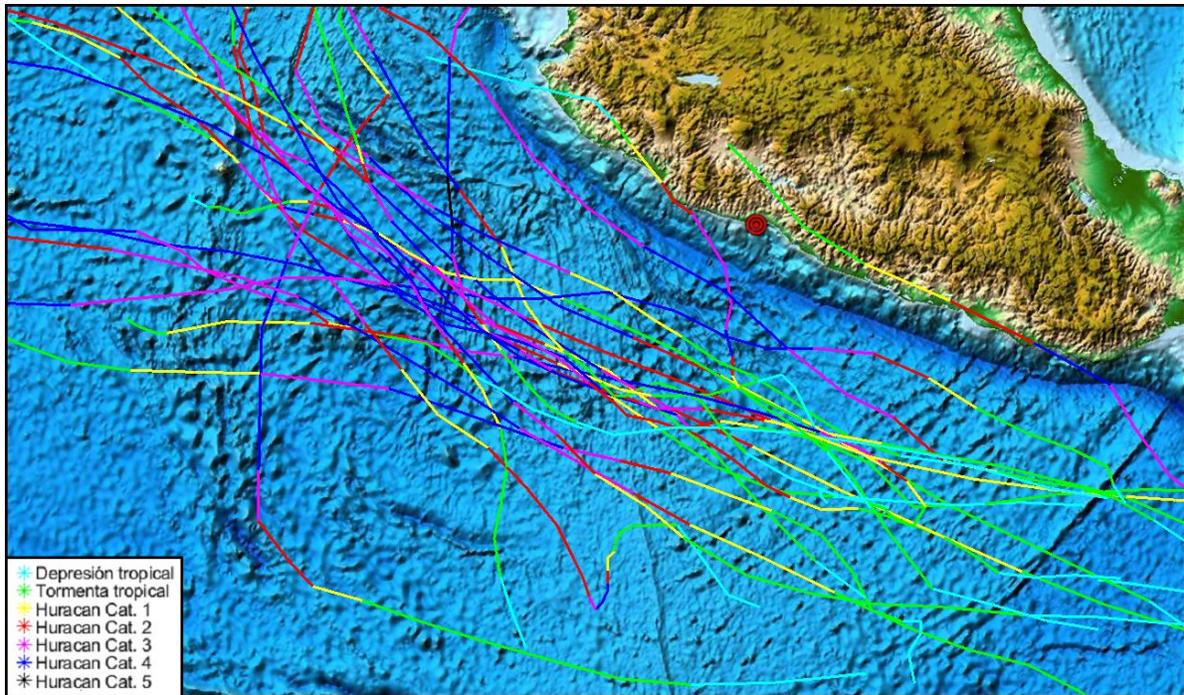


Figura 2.8 Trayectorias de los huracanes categoría 4 seleccionados.

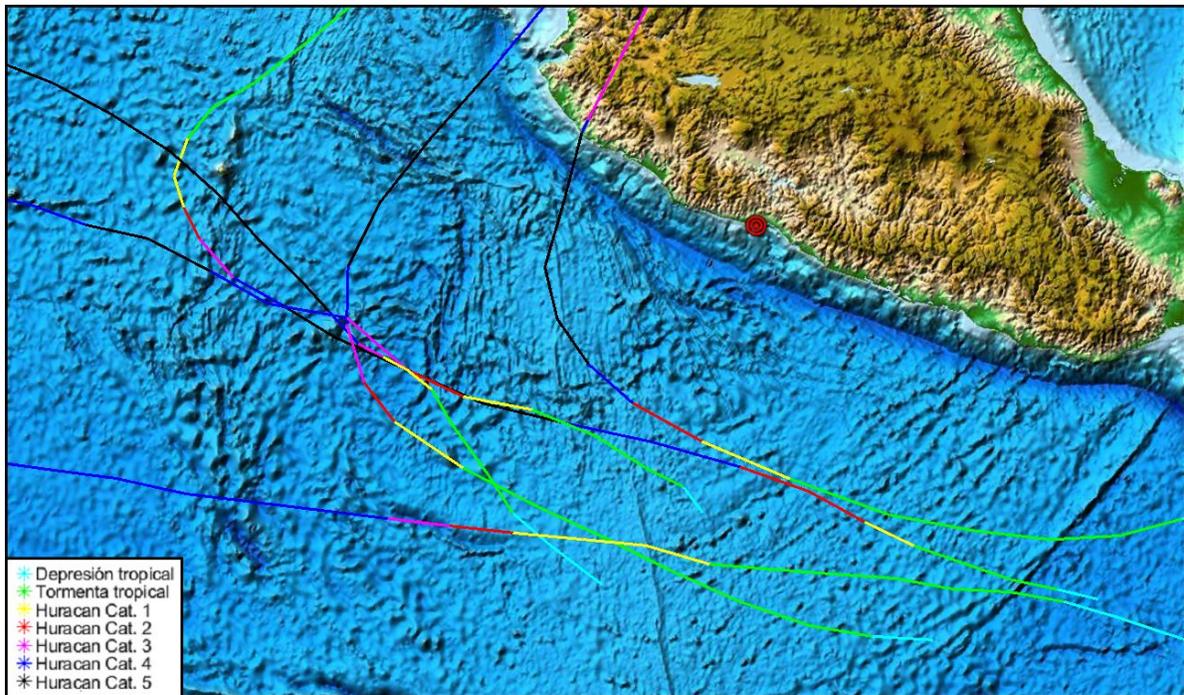


Figura 2.9 Trayectorias de los huracanes categoría 5 seleccionados.

**Tabla 2.1 Huracanes en el Océano Pacífico en un radio de 700 km del puerto de Lázaro Cárdenas.**

<i>Huracán</i>	<i>Fecha</i>	<i>Año</i>	<i>Categoría</i>	<i>Huracán</i>	<i>Fecha</i>	<i>Año</i>	<i>Categoría</i>
<i>Ismael</i>	14 - 25/ago	1989	3	<i>Olaf</i>	3 - 8/oct	2003	1
<i>Iselle</i>	20 - 30/jul	1990	3	<i>Javier</i>	10 - 20/sep	2004	4
<i>Kevin</i>	25/sep - 12/oct	1991	4	<i>Hilary</i>	19 - 28/ago	2005	2
<i>Virgil</i>	1 - 5/oct	1992	4	<i>John</i>	28/ago - 4/sep	2006	4
<i>Winifred</i>	6 - 10/oct	1992	3	<i>Lane</i>	13 - 17/sep	2006	3
<i>Calvin</i>	4 - 9/jul	1993	2	<i>Andres</i>	24 - 24/jun	2009	1
<i>Hilary</i>	17 - 27/ago	1993	3	<i>Jimena</i>	28/ago - 5/sep	2009	4
<i>Jova</i>	29/ago - 5/sep	1993	4	<i>Rick</i>	15 - 21/oct	2009	5
<i>Lidia</i>	8 - 14/sep	1993	4	<i>Frank</i>	21 - 29/ago	2010	1
<i>Rosa</i>	8 - 15/oct	1994	2	<i>Adrian</i>	7 - 14/jun	2011	4
<i>Adolph</i>	15 - 21/jun	1995	4	<i>Beatriz</i>	18 - 22/jun	2011	1
<i>Flossie</i>	7 - 14/jun	1995	1	<i>Calvin</i>	7 - 14/jul	2011	1
<i>Henriette</i>	1 - 8/sep	1995	2	<i>Dora</i>	18 - 26/jul	2011	4
<i>Ismael</i>	12 - 15/sep	1995	1	<i>Hilary</i>	21/sep - 3/oct	2011	4
<i>Juliette</i>	16 - 26/sep	1995	4	<i>Jova</i>	5 - 12/oct	2011	3
<i>Alma</i>	20 - 27/jun	1996	2	<i>Bud</i>	20 - 26/may	2012	3
<i>Boris</i>	27/jun - 1/jul	1996	1	<i>Dalila</i>	28/jun - 8/jul	2013	1
<i>Douglas</i>	29/jul - 6/ago	1996	4	<i>Erick</i>	4 - 9/jul	2013	1
<i>Fausto</i>	10 - 14/sep	1996	3	<i>Raymond</i>	19/oct - 1/nov	2013	3
<i>Hernan</i>	30/sep - 4/oct	1996	1	<i>Cristina</i>	9 - 19/jun	2014	4
<i>Guillermo</i>	30/jul - 24/ago	1997	5	<i>Odile</i>	9 - 18/sep	2014	4
<i>Linda</i>	9 - 17/sep	1997	5	<i>Polo</i>	16 - 26/sep	2014	1
<i>Nora</i>	16 - 26/sep	1997	3	<i>Blanca</i>	31/may - 9/jun	2015	4
<i>Pauline</i>	5 - 10/oct	1997	4	<i>Carlos</i>	10 - 18/jun	2015	1
<i>Rick</i>	7 - 10/nov	1997	2	<i>Dolores</i>	11 - 22/jul	2015	4
<i>Blas</i>	22 - 30/jun	1998	4	<i>Patricia</i>	20 - 24/oct	2015	5
<i>Lester</i>	15 - 26/oct	1998	3	<i>Sandra</i>	23 - 29/nov	2015	4
<i>Adrian</i>	18 - 22/jun	1999	2	<i>Newton</i>	4 - 8/sep	2016	1
<i>Aletta</i>	22 - 28/may	2000	2	<i>Dora</i>	24/jun - 1/jul	2017	2
<i>Carlota</i>	18 - 25/jun	2000	4	<i>Hilary</i>	20/jul - 1/ago	2017	2
<i>Adolph</i>	25/may - 1/jun	2001	4	<i>Bud</i>	9 - 16/jun	2018	4
<i>Juliette</i>	21/sep - 3/oct	2001	4	<i>John</i>	5 - 13/ago	2018	2
<i>Hernan</i>	30/ago - 6/sep	2002	5	<i>Willa</i>	19 - 24/oct	2018	4

<i>Kenna</i>	22 - 26/oct	2002	5	<i>Lorena</i>	17 - 22/sep	2019	1
<i>Marty</i>	18 - 26/sep	2003	2				

A partir de la información de la velocidad máxima de viento y la presión en el ojo de los huracanes antes señalados, se generaron los campos de viento y presión de manera numérica por medio de la aplicación del modelo de vórtice de Rankine (1947), el cual utiliza las siguientes distribuciones de la velocidad.

$$V_g(r) = \begin{cases} V_{max} \cdot \left(\frac{r}{R_{mw}}\right) & \text{para } 0 \leq r < R_{mw} \\ V_{max} \cdot \left(\frac{R_{mw}}{r}\right)^X & \text{para } r > R_{mw} \end{cases}$$

Donde:

$V_g$  Gradiente rotacional del viento

$V_{max}$  Velocidad máxima de viento en m/s

$X$  Parámetro de ajuste de la distribución del viento, valores típicos entre 0.4 y 0.6

$R_{mw}$  Radio de máximo viento en kilómetros, propuesto por Kalourazi como:

$$R_{mw} = 0.0008e^{0.0113pc}$$

$pc$  presión en el ojo del huracán en Hpa

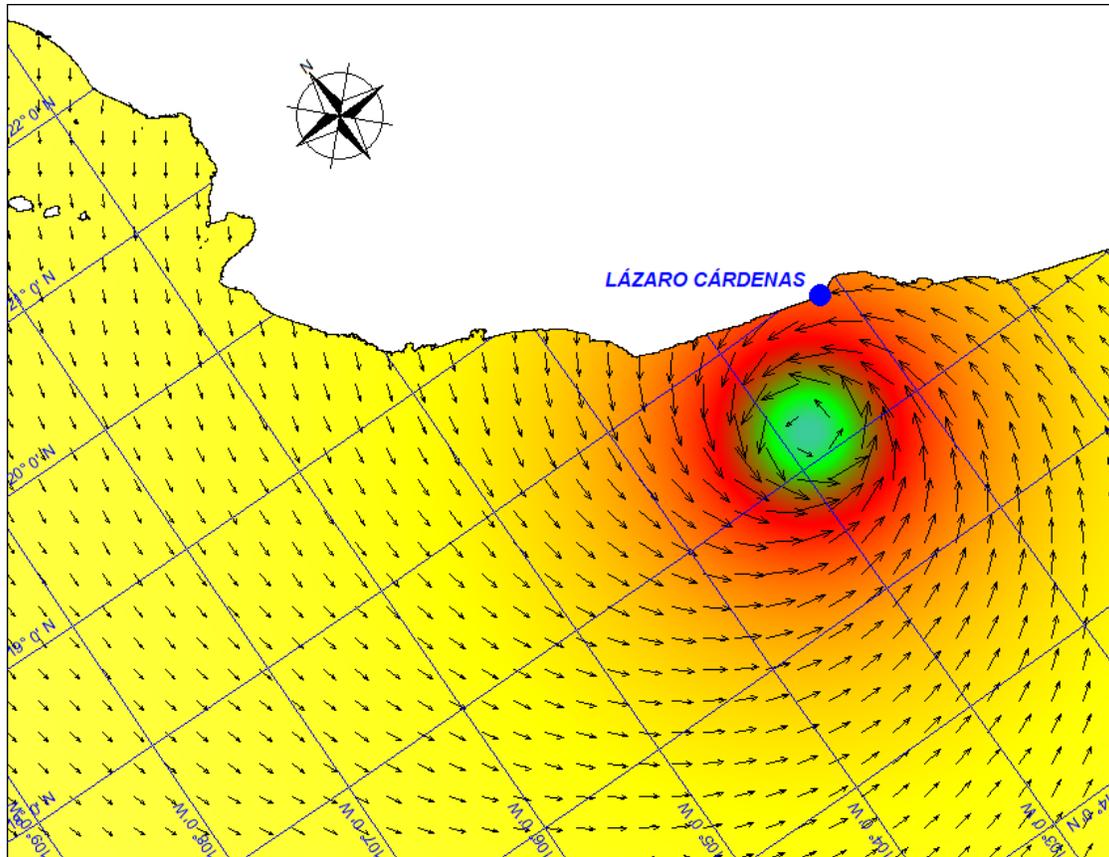
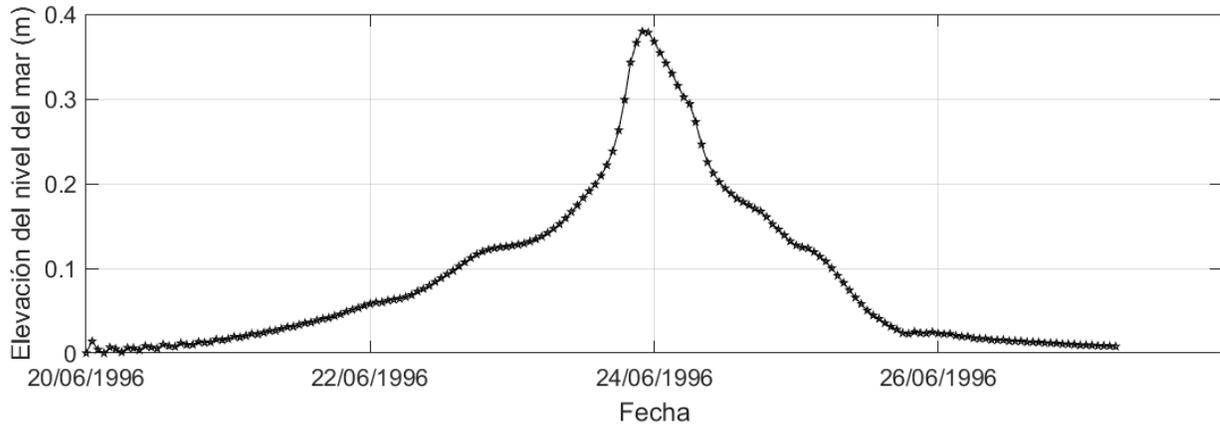


Figura 2.10 Campos de viento y de presión para el huracán Alma (junio de 1996).

Cabe señalar que, la marea astronómica no se incluyó en las simulaciones con el fin de evaluar exclusivamente la sobreelevación del nivel del mar debido a los campos de viento y presión atmosférica de cada huracán.

Para cada uno de los huracanes antes señalados, se obtuvo la serie de tiempo de la marea meteorológica frente al puerto de Lázaro Cárdenas, en la figura 2.11 se muestra a manera de ejemplo, la sobreelevación del nivel del mar generado por el huracán Alma del 20 al 27 de junio de 1996, frente al puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.



**Figura 2.11** Marea meteorológica generada por el huracán Alma frente al puerto de Lázaro Cárdenas (20 al 27 de junio de 1996).

A partir de las series de tiempo de la marea meteorológica generada por cada uno de los huracanes seleccionados, se obtuvieron las máximas elevaciones del nivel del mar y se determinó mediante un análisis de extremos, la marea meteorológica para diferentes períodos de retorno comprendidos entre el año 2020 y el año 2100.

Para dicho análisis, se consideraron 4 funciones de distribución de probabilidad (Exponencial, Weibull, Gumbel y Frechet), cuyas expresiones se indican a continuación:

Exponencial  $F = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)}$

Weibull  $F = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}$

Gumbel (FT-I)  $F = P(X \leq x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)}}$

Frechet (FT-II)  $F = P(X \leq x) = e^{-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}}$

Los valores de la marea meteorológica se ordenaron de forma descendente y se le asignó a cada elevación ( $x_i$ ) una probabilidad de no excedencia ( $F_i$ ) en función del orden ( $m$ ) de cada valor, mediante la siguiente expresión:

$$F_i = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta} \quad \text{donde } m = 1, 2, 3, \dots, N$$

Los valores de las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  para cada una de las funciones de distribución de probabilidad son los siguientes:

- Exponencial  $\alpha = \dots$   $\beta = 1$
- Weibull  $\alpha = 0.20 + 0.27/\sqrt{k}$   $\beta = 0.20 + 0.23/\sqrt{k}$
- FT-I  $\alpha = 0.44$   $\beta = 0.12$
- FT-II  $\alpha = 0.44 + 0.52/k$   $\beta = 0.12 - 0.11/k$

Las funciones de distribución se describieron en la forma  $X = AY + B$ , para aplicar el método de mínimos cuadrados y obtener los valores de los parámetros de escala y de posición (A y B) de cada una de dichas funciones, obteniendo primeramente el valor de la variable reducida Y, cuya expresión se indica a continuación:

Exponencial  $Y = -\ln(1 - F)$

Weibull  $Y = [-\ln(1 - F)]^{1/k}$

Gumbel (FT-I)  $Y = -\ln[-\ln(F)]$

Frechet (FT-II)  $Y = k\{[-\ln(F)]^{-1/k} - 1\}$

Cabe señalar que en el caso de las distribuciones FT-I y exponencial (que tienen dos parámetros) pueden ser analizadas por el método de los mínimos cuadrados directamente. Las distribuciones FT-II y Weibull tienen tres parámetros, por lo tanto, tienen que ser modificadas en una forma de funciones de dos parámetros, fijando para ello el parámetro de forma ( $k$ ). La razón principal para fijar el parámetro  $k$  es la dificultad de predecir la verdadera matriz de distribución de una muestra de tamaño pequeño. Goda (1988) demostró esta dificultad recomendando fijar el parámetro  $k$  en uno de los siguientes valores para estas distribuciones: Weibull ( $k = 0.75; 1.0; 1.4; 2.0$ ) y FT-II ( $k = 2.5; 3.3; 5.0; 10.0$ ).

Los coeficientes de la regresión A y B de las funciones de distribución se obtuvieron con las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{Cov(Y, X)}{Var(Y)} \quad B = \bar{X} - A\bar{Y}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

$$Var(Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2 \quad Cov(Y, X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})(x_i - \bar{X})$$

Para elegir la función de distribución con la mejor aproximación a los datos de oleaje, se calculó el coeficiente de correlación lineal ( $\rho$ ) utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}}$$

Con base en lo anterior, del análisis extremal se obtuvieron los coeficientes de correlación que se indican a continuación:

GUMBEL (FT-I)	EXPONENCIAL	Weibull			
		k = 0.75	k = 1.00	k = 1.40	k = 2.00
0.8422	0.8895	0.9478	0.9132	0.8463	0.7709

Frechet (FT-II)			
k = 2.50	k = 3.30	K = 5.00	k = 10.00
0.9364	0.9537	0.9376	0.8972

De acuerdo con los coeficientes de correlación, la distribución con el mejor ajuste de los datos, corresponde a la función Frechet, con un coeficiente k de 3.3, tal como se muestra en la siguiente figura:

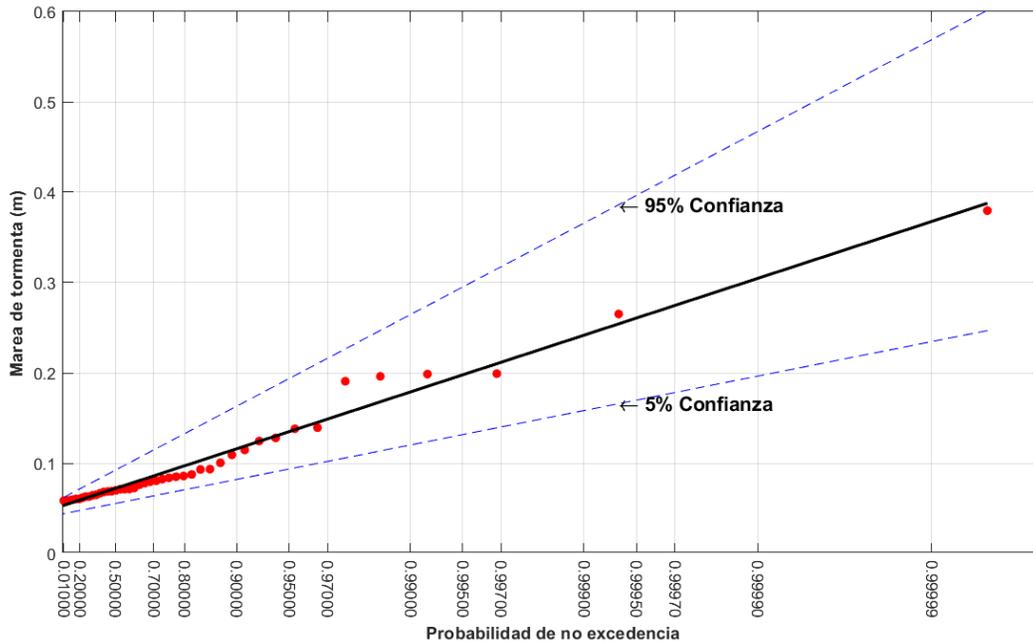


Figura 2.12 Probabilidad de no excedencia de la función de distribución con el mejor ajuste a los eventos de la marea meteorológica.

Finalmente, considerando que el periodo de retorno ( $T_r$ ) puede expresarse como:

$$T_r = \frac{1}{\lambda(1 - F(x))}$$

La ecuación de la distribución FT-II para obtener la marea meteorológica ( $x^T$ ) asociada a cierto periodo de retorno ( $T_r$ ) queda definida como sigue:

$$x^T = A \left\{ k \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right)^{-1/k} \right] \right\} + B$$

Donde  $\lambda$  es la densidad de muestreo, definida como la razón entre el número de eventos de tormenta y el número de años del periodo de información.

Los resultados obtenidos de la marea meteorológica para diferentes períodos de retorno y con intervalos de confianza del 5 y 95% se muestran en la figura 2.13 y en la tabla 2.2, en la cual se observa que para el año 2050, se estima una marea meteorológica de entre 0.230 y 0.563 m y para el año 2100, la marea meteorológica estaría entre 0.277 y 0.690 m con una confianza del 5% y 95%.

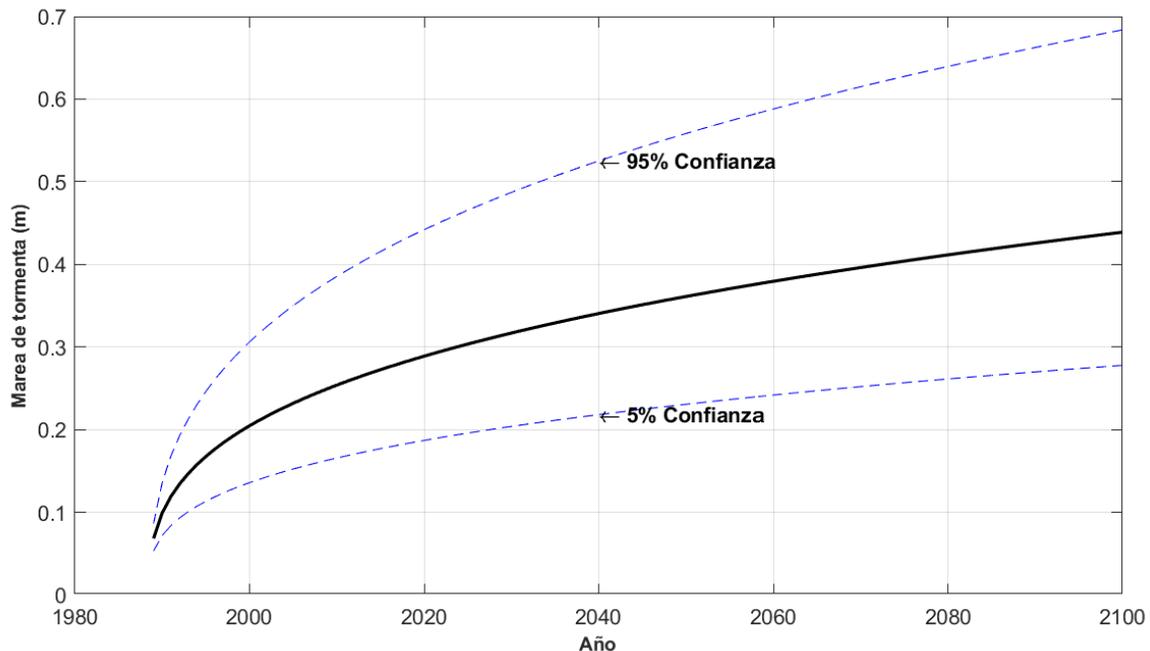


Figura 2.13 Marea meteorológica para diferentes períodos de retorno y nivel de confianza del 5% y 95%.

**Tabla 2. 2 Marea meteorológica para diferentes años.**

Año	MAREA METEOROLÓGICA (m)		
	Medio	5%	95%
2020	0.289	0.186	0.446
2025	0.304	0.195	0.469
2030	0.317	0.203	0.491
2035	0.329	0.21	0.511
2040	0.34	0.217	0.53
2045	0.351	0.224	0.547
2050	0.361	0.230	0.563
2055	0.371	0.235	0.579
2060	0.379	0.241	0.593
2065	0.388	0.246	0.607
2070	0.396	0.251	0.62
2075	0.404	0.256	0.633
2080	0.411	0.26	0.645
2085	0.419	0.264	0.657
2090	0.426	0.269	0.668
2095	0.432	0.273	0.679
2100	0.439	0.277	0.69

## 2.2 Run-up del oleaje

Para determinar el oleaje producido por los huracanes señalados en la tabla 2.1, se implementó un modelo numérico espectral del oleaje de tercera generación, forzado a partir de los campos de viento y presión generados por cada huracán.

El cálculo de la generación y propagación del oleaje se realizó utilizando el modelo Spectral Waves del software MIKE 21 desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, el cual simula el crecimiento, transformación y decaimiento del oleaje, y cuyas principales características son:

- ✓ Crecimiento del oleaje debido a la acción del viento
- ✓ Interacción no lineal entre olas
- ✓ Disipación debido al descrestamiento (whitecapping)
- ✓ Disipación debido a la fricción de fondo
- ✓ Disipación por asomeramiento induciendo la rotura del oleaje
- ✓ Refracción y difracción debido a variaciones batimétricas
- ✓ Interacción oleaje – corriente

Este modelo incluye dos tipos de formulaciones, la formulación paramétrica direccionalmente desacoplada, y una formulación totalmente espectral. El modelo se basa en la ecuación de conservación de la acción del oleaje descrita por Komen et al. (1994) y Young (1999).

El modelo MIKE 21 SW esta formulado en términos de la dirección del oleaje  $\theta$ , la frecuencia angular relativa  $\sigma$ , donde la densidad de acción  $(\sigma, \theta)$ , está relacionada a la densidad de la energía  $E(\sigma, \theta)$ , por medio de:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

En aplicaciones a gran escala, la ecuación de balance de la acción del oleaje se formula en coordenadas esféricas, donde la evolución del espectro del oleaje en una posición está dada por su latitud  $\phi$ , longitud  $\lambda$ , en un instante  $t$  de la siguiente forma:

$$\frac{\delta N}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta \phi} c_{\phi} N + \frac{\delta}{\delta \lambda} c_{\lambda} N + \frac{\delta}{\delta \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\delta}{\delta \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma}$$

donde la fuente de energía  $S$ , representa una sobre posición de distintas funciones fuente que describen los múltiples fenómenos físicos descritos por:

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

Donde:

$V_g$	Gradiente rotacional del viento
$S_{in}$	Energía del viento transferida de manera lineal y no lineal de acuerdo a Janssen (1989, 1991) y Janssen et al. (1989)
$S_{nl}$	Interacciones no lineales ola-ola definidas por Hasselmann & Hasselmann (1985) y Hasselmann et al. (1985)
$S_{ds}$	Disipación de la energía debido al descrestamiento (whitecapping) descrito en Komen et al. (1994)
$S_{bot}$	Disipación de la energía por fricción de fondo descrita por Johnson & Kofoed-Hansen (2000)
$S_{surf}$	Disipación de la energía por rotura descrita por Battjes & Janssen (1978) y Eldeberkly & Battjes (1996).

La discretización de las ecuaciones del modelo, se realiza utilizando el método de volúmenes finitos centrado en la celda, tanto para el espacio geográfico como el espectral. La integración en el tiempo se basa en una aproximación de paso fraccional aplicando un esquema de secuencia múltiple explícito para la propagación de la acción del oleaje.

Para la implementación del modelo numérico, se utilizó la malla de cálculo definida para el cálculo de la sobrelevación por marea de tormenta, así como los campos de viento y de presión generados para cada uno de los huracanes seleccionados. A manera de ejemplo, en la siguiente figura se muestra la distribución de las alturas de ola generados por el huracán Alma el día 23 de junio de 1996 a las 19:00.

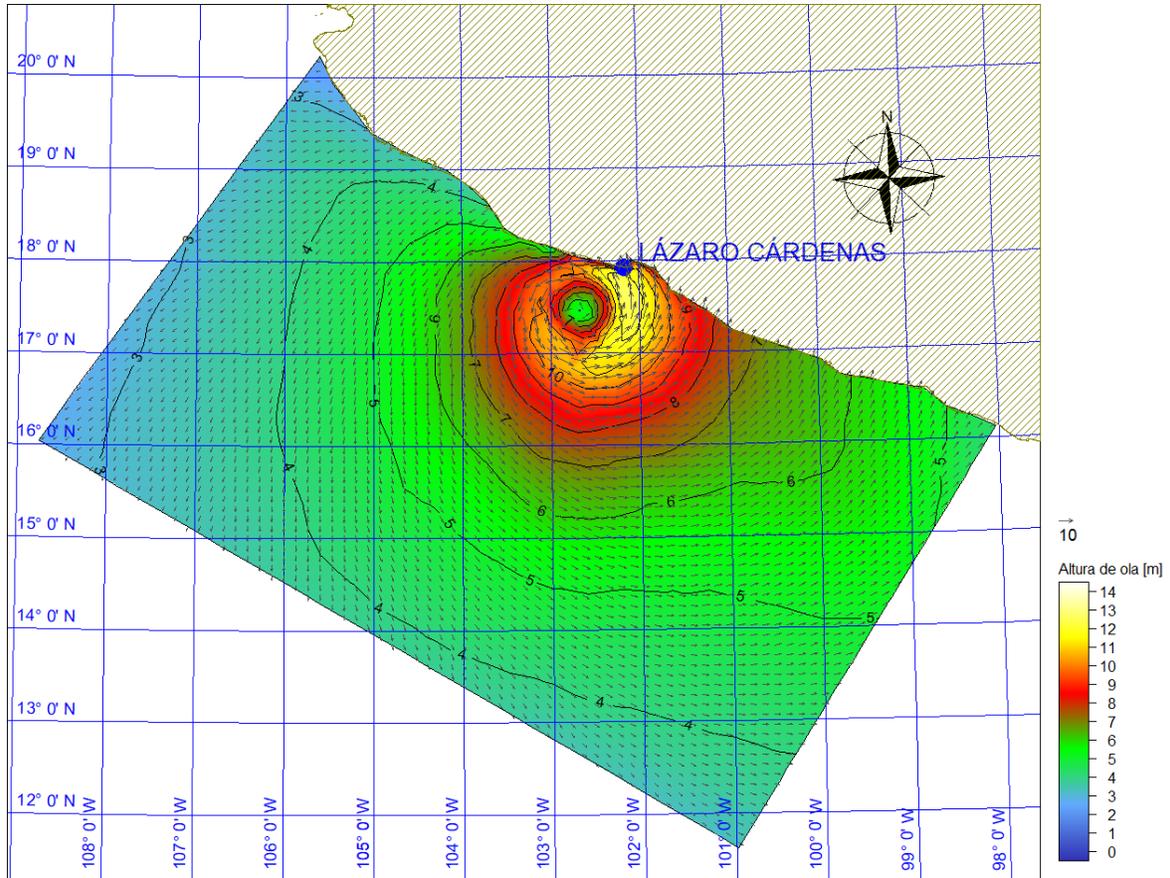


Figura 2.14 Alturas de ola generadas por el huracán Alma el día 23 de junio de 1996, 19:00.

De forma análoga, para cada uno de los huracanes modelados, se obtuvo la serie de tiempo de las alturas de ola frente al puerto de Lázaro Cárdenas, en la figura 2.15 se muestra a manera de ejemplo, la altura de ola generada por el huracán Alma del 20 al 27 de junio de 1996, frente al puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.

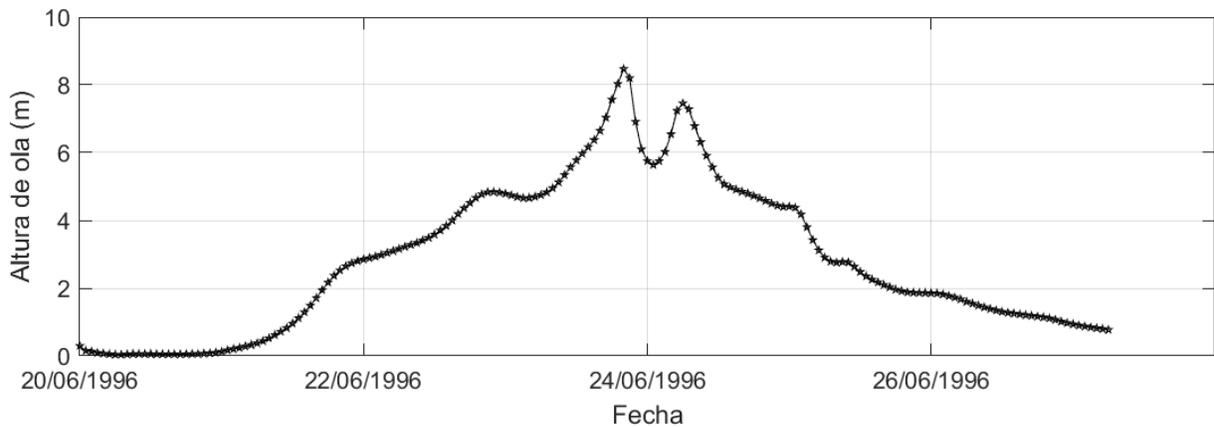


Figura 2.15 Alturas de ola generada por el huracán Alma frente al puerto de Lázaro Cárdenas (20 al 27 de junio de 1996).

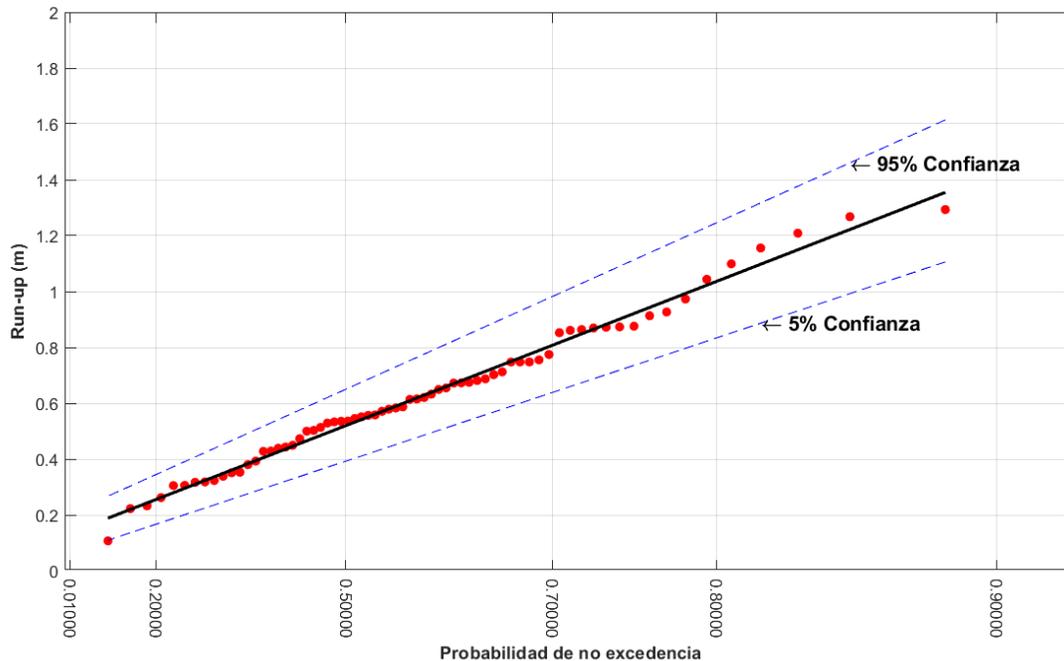
Con las máximas alturas de ola, se calculó el run-up significativo (run-up + set-up) aplicando la fórmula de Mase, conforme a lo señalado en el capítulo 1, y se determinó mediante un análisis de extremos (de forma similar a la marea meteorológica), el run-up para diferentes períodos de retorno comprendidos entre el año 2020 y el año 2100

Del análisis extremal se obtuvieron los coeficientes de correlación que se indican a continuación:

GUMBEL (FT-I)	EXPONENCIAL	Weibull			
		k = 0.75	k = 1.00	k = 1.40	k = 2.00
0.9538	0.9055	0.7922	0.8861	0.9441	0.9617

Frechet (FT-II)			
k = 2.50	k = 3.30	K = 5.00	k = 10.00
0.6794	0.7863	0.8686	0.9236

De acuerdo con los coeficientes de correlación, la distribución con el mejor ajuste de los datos, corresponde a la función Weibull, con un coeficiente k de 2.0, tal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.16** Probabilidad de no excedencia de la función de distribución con el mejor ajuste al run-up generado por los huracanes.

La ecuación de la función Weibull para obtener la marea meteorológica ( $x^T$ ) asociada a cierto periodo de retorno ( $T_r$ ) queda definida como sigue:

$$x^T = A \left\{ k \left[ - \ln \left( 1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right)^{-1/k} \right] \right\} + B$$

Donde  $\lambda$  es la densidad de muestreo, definida como la razón entre el número de eventos de tormenta y el número de años del periodo de información.

Los resultados obtenidos del cálculo del run-up para diferentes períodos de retorno y con intervalos de confianza del 5 y 95% se muestran en la figura 2.17 y en la tabla 2.3, en la cual se observa que para el año 2050, se estima un run-up entre 1.128 y 1.641 m, mientras que para el año 2100, la marea meteorológica estaría entre 1.191 y 1.725 m con una confianza del 5% y 95%.

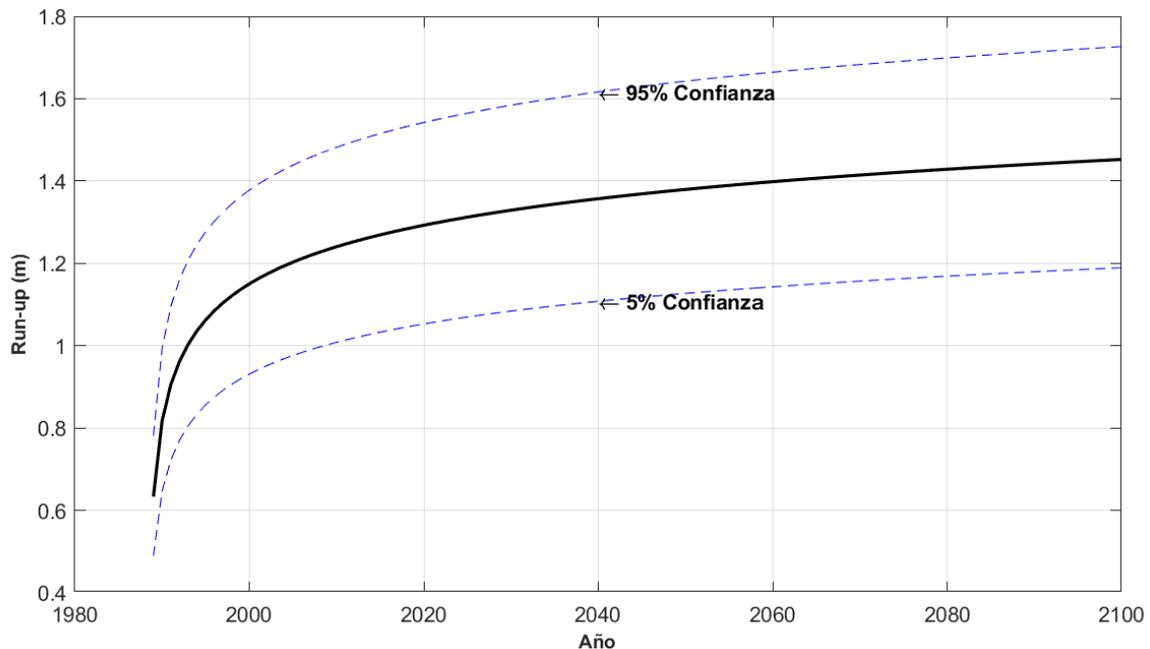
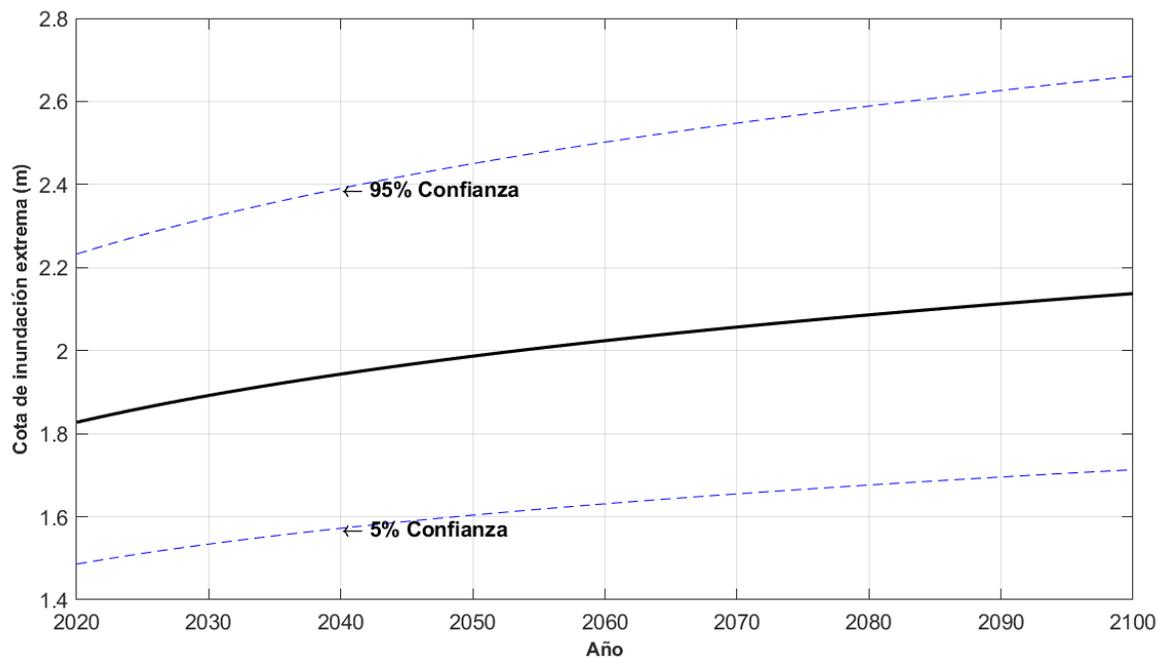


Figura 2.17 Run-up para diferentes períodos de retorno y niveles de confianza del 5% y 95%.

**Tabla 2. 3 Run-up del oleaje para diferentes años.**

Año	RUN-UP DEL OLEAJE (m)		
	Medio	5%	95%
2020	1.293	1.054	1.541
2025	1.312	1.071	1.563
2030	1.329	1.085	1.583
2035	1.344	1.098	1.6
2040	1.357	1.109	1.615
2045	1.369	1.119	1.629
2050	1.379	1.128	1.641
2055	1.389	1.137	1.652
2060	1.398	1.144	1.663
2065	1.407	1.151	1.672
2070	1.414	1.158	1.681
2075	1.422	1.164	1.69
2080	1.429	1.17	1.697
2085	1.435	1.176	1.705
2090	1.441	1.181	1.712
2095	1.447	1.186	1.719
2100	1.452	1.191	1.725

De forma análoga a la determinación de la cota de inundación permanente, se determinó la cota de inundación para los eventos extremos a largo plazo y el nivel medio del mar actual, los resultados se muestran a continuación,



**Figura 2.18** Cota de inundación en el puerto de Lázaro Cárdenas a largo período y niveles de confianza del 5% y 95%.

**Tabla 2.4** Cota de inundación a largo período por eventos extremos en el puerto de Lázaro Cárdenas.

Año	COTA DE INUNDACIÓN (m)		
	REFERIDA AL N. M. M.		
	Media	Rango probable	
5% confianza		95% confianza	
2020	1.827	1.486	2.232
2030	1.892	1.534	2.320
2040	1.943	1.572	2.391
2050	1.987	1.604	2.450
2060	2.024	1.631	2.502
2070	2.057	1.655	2.548
2080	2.086	1.676	2.589
2090	2.113	1.696	2.626
2100	2.137	1.713	2.661

## 3. Evaluación de los posibles efectos debidos al cambio climático

---

### 3.1 Aumento del nivel medio del mar

El nivel medio del mar (N. M. M.) no es constante en el transcurso de largos periodos de tiempo. Su rango de variación es del orden de 10 a 20 cm por siglo. Sin embargo, la tasa anual de aumento durante los últimos 20 años ha sido el doble de la velocidad media de los 80 años precedentes.

El aumento de los niveles del mar está vinculado a tres factores principales:

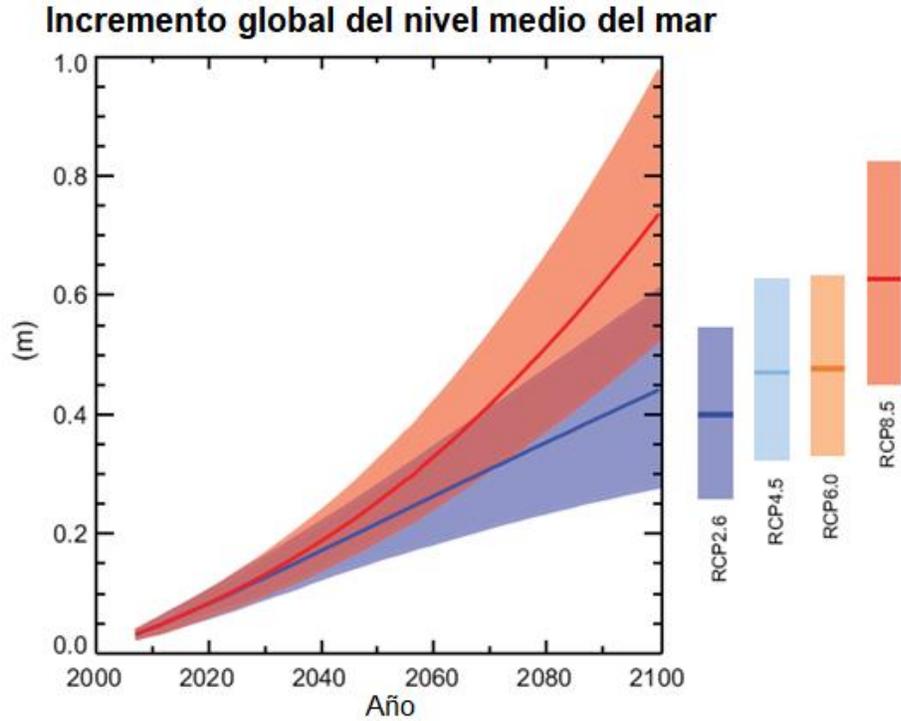
- Dilatación térmica: Cuando el agua se calienta, se dilata. Alrededor de la mitad del aumento del nivel del mar que se produjo a lo largo del siglo pasado es atribuible al hecho de que los océanos, al calentarse, ocupan más espacio.
- El deshielo de los glaciares y de los casquetes polares: Las grandes formaciones de hielo, como los glaciares y los casquetes polares, se derriten de forma natural en verano. Pero en invierno, las precipitaciones en forma nieve, compuestas en su mayor parte de agua marina evaporada, bastan normalmente para compensar el deshielo. Sin embargo, las altas y persistentes temperaturas registradas recientemente a causa del calentamiento global, son las responsables de que la cantidad de hielo que se derrite en verano haya aumentado y de que las nevadas hayan disminuido debido a que los inviernos se retrasan y las primaveras se adelantan. Este desequilibrio genera un aumento neto significativo de la escorrentía frente a la evaporación de los océanos, provocando que el nivel del mar se eleve.
- Pérdida de hielo en Groenlandia y en la Antártida Occidental: Al igual que con los glaciares y con los casquetes de hielo, el aumento del calor está provocando que las enormes placas de hielo que recubren Groenlandia y la Antártida se derritan a un ritmo acelerado. Asimismo, los científicos creen que el agua dulce generada por la fusión en la superficie y el agua de mar bajo su superficie se están filtrando por debajo de las placas de hielo de Groenlandia y de la Antártida Occidental, lubricando las corrientes de hielo y provocando que estas se deslicen con mayor rapidez hacia el mar. Además,

el aumento de las temperaturas está provocando que las enormes plataformas de hielo adheridas a la Antártida se estén derritiendo desde la base, se debiliten y se desprendan.

De acuerdo con el Quinto Informe de Evaluación emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), la tasa media de aumento del nivel del mar promedio global entre 1901 y 2010 fue de 1.5 a 1.9 mm/año, entre 1971 y 2010 fue de 1.7 a 2.3 mm/año, y entre 1993 y 2010 de 2.8 a 3.6 mm/año, para este último período, las contribuciones observadas al incremento del nivel de mar por la expansión térmica del océano debido al calentamiento es de 0.8 a 1.4 mm/año, de los cambios en los glaciares es de 0.39 a 1.13 mm/año, por la capa de hielo de Groenlandia es de 0.25 a 0.41 mm/año, por la capa de hielo antártica es de 0.16 a 0.38 mm/año y por el almacenamiento de agua terrestre es de 0.26 a 0.49 mm/año.

Para la elaboración del dicho informe, definieron un conjunto de cuatro escenarios, denominados Rutas de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) producidos a partir de modelos de evaluación para las predicciones y proyecciones climáticas, los cuales incluyen series de tiempo de emisiones y concentraciones del conjunto completo de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso/cobertura del suelo (Moss et al., 2008). Dichos escenarios son: un escenario de mitigación que conduce a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6) y un escenario con muy altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

Como resultado de las proyecciones realizadas, el aumento global del nivel medio del mar para 2081-2100 en relación con 1986-2005 probablemente estará en los rangos de 0.26 a 0.55 m para el escenario de RCP2.6, 0.32 a 0.63 m para RCP4.5, 0.33 a 0.63 m para RCP6.0 y 0.45 a 0.82 m para RCP8.5 (confianza media). Para el RCP8.5, el aumento para el año 2100 es de 0.52 a 0.98 m, con una tasa durante 2081 a 2100 de 8 a 16 mm/año (confianza media). Estos rangos se derivan de las proyecciones climáticas del Climate Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) en combinación con modelos basados en procesos y evaluación de las contribuciones de los glaciares y las capas de hielo.



**Figura 3.1** Proyecciones del aumento global del nivel medio del mar durante el siglo XXI en relación con 1986-2005.

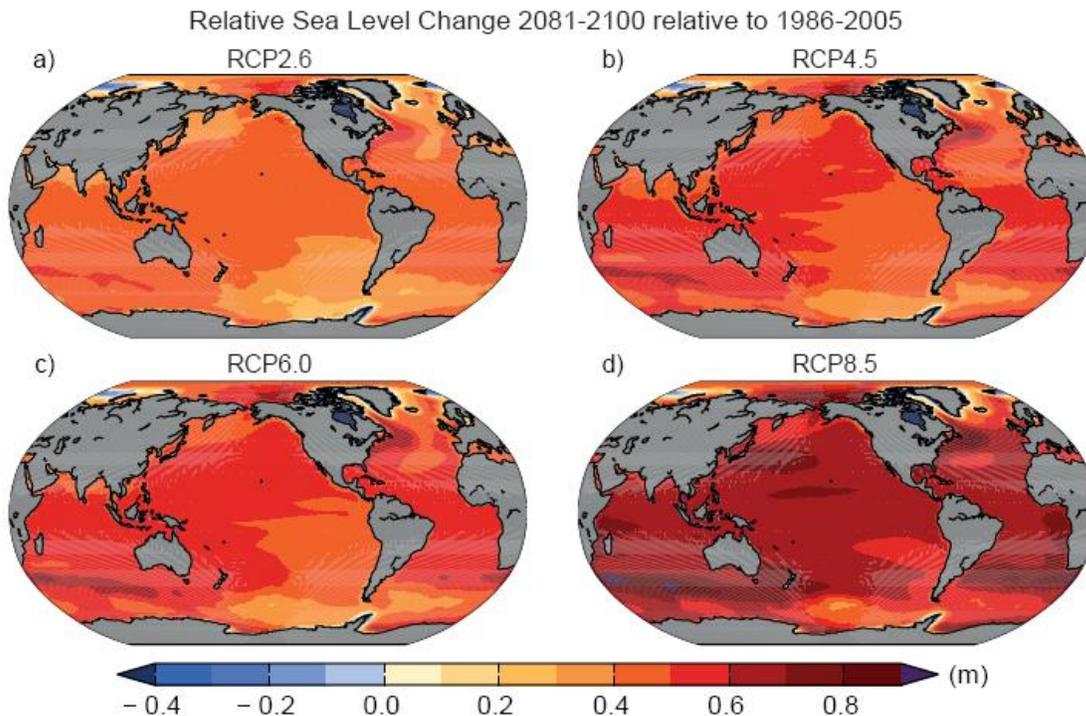
Fuente: Quinto Informe de Evaluación emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013).

**Tabla 3.1** Proyecciones del aumento global del nivel medio del mar para mediados y finales del siglo XXI en relación con el período de referencia de 1986 – 2005.

Escenario	2046 – 2065		2081 – 2100	
	Medio	Rango probable	Medio	Rango Probable
RCP2.6	0.24	0.17 – 0.32	0.40	0.26 – 0.55
RCP4.5	0.26	0.19 – 0.33	0.47	0.32 – 0.63
RCP6.0	0.25	0.18 – 0.32	0.48	0.33 – 0.63
RCP8.5	0.30	0.22 – 0.38	0.63	0.45 – 0.82

Fuente: Quinto Informe de Evaluación emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013).

Por otra parte, de manera regional, el nivel del mar cambiará conforme a los cambios dinámicos en la circulación oceánica, cambios en el contenido de calor del océano, redistribución de masa en todo el sistema terrestre y cambios en la presión atmosférica. En escalas de tiempo superiores a unos pocos días, el nivel del mar regional también se ajusta casi isostáticamente a los cambios regionales en la presión atmosférica del nivel del mar en relación con su media sobre el océano. La pérdida de masa de la capa de hielo (tanto contemporánea como pasada), la pérdida de masa de los glaciares y los cambios en la hidrología terrestre provocan la redistribución de la masa de agua entre la criosfera, la tierra y los océanos, dando lugar a cambios regionales distintivos en la Tierra sólida, la rotación de la Tierra y el campo de gravedad. En algunas localidades costeras, los cambios en el ciclo hidrológico, el hundimiento del suelo asociado con la actividad antropogénica, los procesos tectónicos y los procesos costeros pueden dominar el cambio relativo del nivel del mar, es decir, el cambio en la altura de la superficie del mar en relación con la tierra.



**Figura 3.2** Proyecciones del aumento relativo del nivel medio del mar para el periodo 2081-2100 en relación con 1986-2005.

Fuente: Quinto Informe de Evaluación emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013).

De acuerdo con lo anterior, para determinar las cotas de inundación futuras en la zona de estudio, se consideraron solamente los escenarios del incremento del nivel medio del mar debido al cambio climático RCP2.6 y RCP8.5, por considerarse como los dos escenarios representativos, ya que el primero contempla políticas de

reducción en la emisión de gases de efecto invernadero y el segundo continúa con las altas emisiones de dichos gases.

Los incrementos del nivel del mar por cambio climático para el escenario RCP2.6 se indican en la tabla 3.2, mientras que los incrementos del nivel del mar por cambio climático para el escenario RCP8.5 se indican en la tabla 3.3.

**Tabla 3.2 Incrementos esperados en el nivel medio del mar por el cambio climático para el escenario RCP2.6.**

Año	INCREMENTOS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR (m)		
	Medio	Mínimo	Máximo
2020	0.09	0.06	0.11
2025	0.10	0.07	0.14
2030	0.13	0.09	0.16
2035	0.15	0.11	0.19
2040	0.17	0.12	0.22
2045	0.20	0.14	0.25
2050	0.22	0.16	0.29
2055	0.24	0.17	0.32
2060	0.27	0.18	0.35
2065	0.29	0.20	0.38
2070	0.31	0.21	0.41
2075	0.33	0.22	0.45
2080	0.35	0.24	0.48
2085	0.38	0.25	0.51
2090	0.40	0.26	0.55
2095	0.42	0.27	0.58
2100	0.44	0.28	0.61

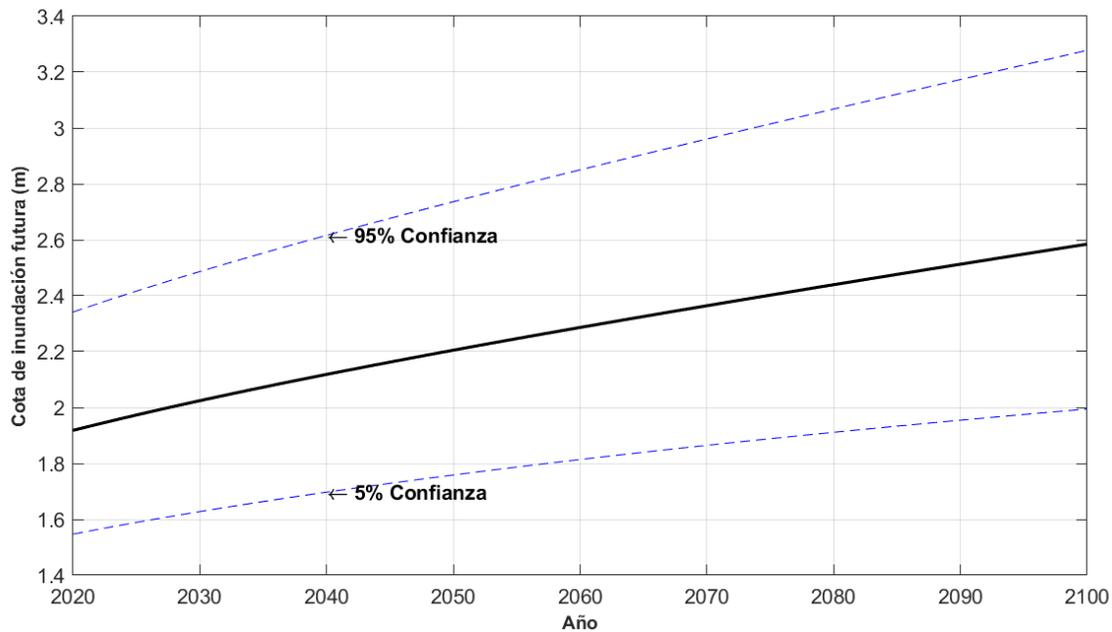
**Tabla 3.3 Incrementos esperados en el nivel medio del mar por el cambio climático para el escenario RCP8.5.**

Año	INCREMENTOS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR (m)		
	Medio	Mínimo	Máximo
2020	0.09	0.07	0.12
2025	0.12	0.09	0.15
2030	0.14	0.11	0.18
2035	0.17	0.13	0.22
2040	0.20	0.15	0.25
2045	0.23	0.17	0.29
2050	0.27	0.19	0.34
2055	0.30	0.22	0.38
2060	0.34	0.24	0.43
2065	0.39	0.27	0.48
2070	0.43	0.31	0.54
2075	0.48	0.34	0.61
2080	0.53	0.37	0.67
2085	0.58	0.41	0.75
2090	0.63	0.45	0.82
2095	0.69	0.49	0.90
2100	0.75	0.52	0.98

## 3.2 Cota de inundación futura

De las variables que determinan la cota de inundación, son la marea meteorológica y el run-up los que pueden verse afectados por el cambio climático, ya que la componente astronómica de la marea es determinista y se asume no afectada por el cambio climático.

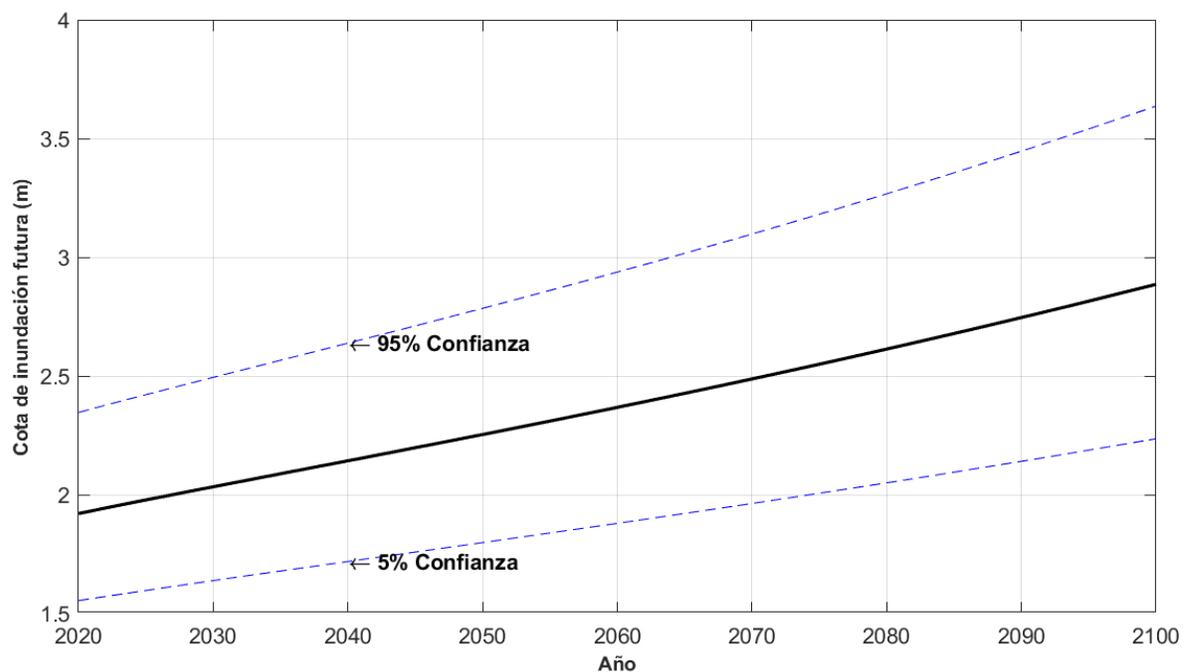
La cota de inundación futura también dependerá de si se produce un aumento del nivel medio del mar y de la magnitud de dicho aumento. Por lo tanto, asumiendo que la cota de inundación futura es igual a la actual más el incremento del nivel medio del mar por cambio climático y que la marea meteorológica y el run-up futuros son los correspondientes a los obtenidos con el análisis de extremos, la cota de inundación futura se indica en las siguientes figuras y tablas, la cuales corresponden a los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 de cambio climático.



**Figura 3.3** Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas y niveles de confianza del 5% y 95%, en el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6).

**Tabla 3.4** Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas, en el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6).

Año	COTA DE INUNDACIÓN FUTURA (m)		
	REFERIDA AL N. M. M.		
	Media	Rango probable	
5% confianza		95% confianza	
2020	1.918	1.547	2.342
2030	2.024	1.628	2.486
2040	2.119	1.697	2.616
2050	2.205	1.759	2.736
2060	2.286	1.814	2.850
2070	2.364	1.865	2.961
2080	2.439	1.911	3.068
2090	2.513	1.955	3.173
2100	2.585	1.995	3.278



**Figura 3.4** Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas y niveles de confianza del 5% y 95%, en el escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

**Tabla 3.5** Cota de inundación futura en el puerto de Lázaro Cárdenas, en el escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

Año	COTA DE INUNDACIÓN FUTURA (m)		
	REFERIDA AL N. M. M.		
	Media	Rango probable	
5% confianza		95% confianza	
2020	1.920	1.553	2.346
2030	2.033	1.638	2.494
2040	2.143	1.718	2.638
2050	2.253	1.798	2.785
2060	2.368	1.879	2.937
2070	2.487	1.963	3.098
2080	2.613	2.050	3.267
2090	2.746	2.141	3.447
2100	2.886	2.235	3.637

### 3.3 Efectos teóricos del aumento del nivel del mar por el cambio climático

Las afectaciones a las zonas costeras se pueden resumir de acuerdo con lo siguiente:

- El aumento del nivel medio del mar, junto con las variaciones en la marea meteorológica y el run-up del oleaje incrementaría en el año 2100 hasta en un 300% la cota de inundación actual.
- Un aumento del nivel medio del mar ocasionaría la erosión de la parte superior del perfil de playa, dando lugar a un retroceso de la playa.
- Un aumento del nivel medio del mar, generará un incremento del área de la sección crítica del río en el puerto.
- El aumento en el nivel medio del mar, puede generar una erosión de las dunas, la cual depende de la extensión de la playa seca, y de la altura de la berma.
- Las variaciones en las alturas de olas generarán cambios en la funcionalidad y estabilidad de las obras marítimas y de las instalaciones portuaria en general.



## 4. Análisis e interpretación de resultados

---

Con objeto de analizar e interpretar los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, se realizaron mapas de inundación de la zona de estudio, tomando como referencia la información topográfica del modelo digital de elevación, desarrollado por el INEGI (ver figura 4.1).

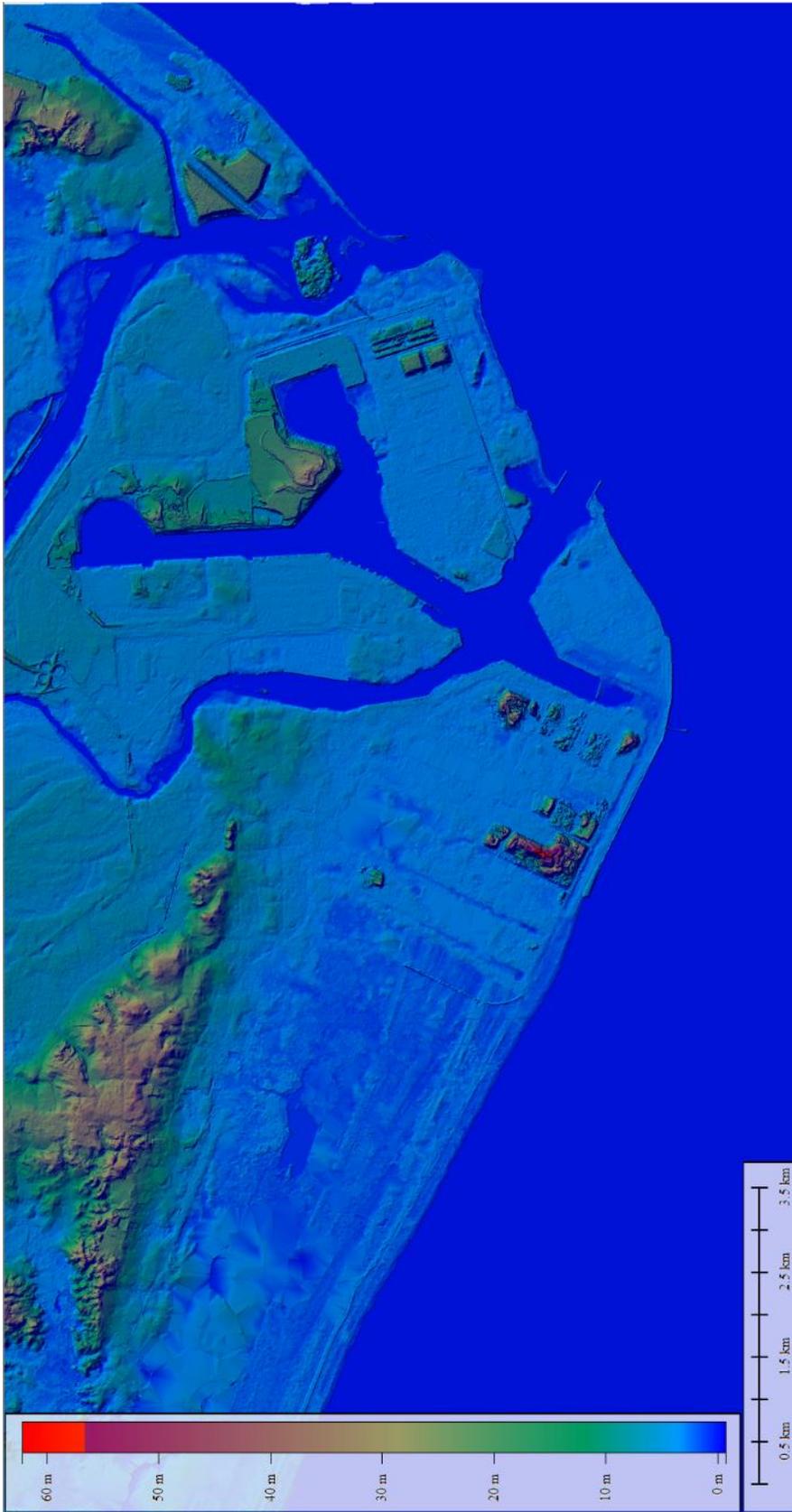
Los modelos digitales de elevación, son registro de las elevaciones derivados de procesos especializados de clasificación y filtrado a puntos de altimetría obtenidos mediante tecnología LiDAR (detección y medición a través de la luz), dichos modelos tienen una cobertura territorial a escala 1:10000 y consisten en una matriz de elevaciones de las formas del terreno sobre el N. M. M. calculadas a intervalos regulares.

Los modelos de elevación digital disponibles en la página WEB de INEGI y que se utilizaron para la elaboración de los mapas de inundación fueron los siguientes:

- Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. E13D19a2
- Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. E13D19a4
- Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. E13D19b1
- Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. E13D19b2
- Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. E13D19b3
- Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. E13D19b4

A partir de la información topográfica señalada, se delimitaron las áreas afectadas para los siguientes casos de cota de inundación:

- Inundación permanente
- Inundación extrema para el año 2050
- Inundación extrema para el año 2100
- Inundación con cambio climático (escenario RCP2.6) para el año 2050
- Inundación con cambio climático (escenario RCP2.6) para el año 2100
- Inundación con cambio climático (escenario RCP8.5) para el año 2050
- Inundación con cambio climático (escenario RCP8.5) para el año 2100



**Figura 4.1** Modelo digital de elevación del puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Los resultados obtenidos se indican en las figuras 4.2 – 4.8, de las cuales se puede establecer lo siguiente:

- Tomando como referencia el N. M. M., el área afectada con la cota de inundación permanente es de 1.36 km<sup>2</sup>, no hay afectaciones importantes en la zona costera y los márgenes del río (figura 4.2).
- Con la cota de inundación extrema, el área afectada en el año 2050 podría ascender a 9.31 km<sup>2</sup> (ver figura 4.3) y para el año 2100 esta podría ser de 10.34 km<sup>2</sup> (ver figura 4.4)

La zona afectada es la infraestructura costera y turística de la playa Eréndira (hoteles y restaurantes), así como los campos que se encuentran entre el Boulevard Playa Azul y el Libramiento Sicartsa. De igual forma estarían afectadas colonias como Los Lavaderos y Las Palmas ubicadas 5 km aguas arriba de la desembocadura del brazo derecho del río Balsas, en la ciudad de Lázaro Cárdenas, así como gran parte de sector pesquero localizado en el margen derecho de dicho río y algunas zonas de la colonia Ampliación Independencia.

Respecto a las instalaciones portuarias, las zonas afectadas serían las terminales públicas de usos múltiples I, y II, y la terminal pública de minerales a granel y productos derivados del petróleo, la escollera Oriente quedaría aislada al perderse en su totalidad la franja litoral a la que se encuentra unida.

Considerando la cota de inundación con el 95% en el intervalo de confianza (nivel máximo del cálculo), las áreas afectadas adicionales a las mencionadas anteriormente serían las vías del ferrocarril y algunas zonas del complejo siderúrgico AcelorMittal.

- Con la cota de inundación con incremento del nivel medio del mar por cambio climático considerando la baja emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6), el área afectada en el año 2050 se estima en 14.70 km<sup>2</sup> (ver figura 4.5) y para el año 2100 esta podría incrementarse a 19.64 km<sup>2</sup> (ver figura 4.6).

Con este escenario de incremento del nivel del mar, se perdería toda la franja costera de la playa Eréndira incluyendo el boulevard Playa Azul, llegando la zona inundación hasta el Libramiento a Sicartsa, afectando las vías del ferrocarril y las colonias Independencia, Ampliación Independencia al sur de la ciudad de Lázaro Cárdenas, y las colonias Los Lavaderos y Las Palmas, así como el sector pesquero ubicados en el margen derecho del río.

Respecto a las instalaciones portuarias, las zonas afectadas serían las terminales públicas de usos múltiples I, II y III, y la terminal pública de minerales a granel y productos derivados del petróleo, la escollera Oriente quedaría aislada al perderse en su totalidad la franja litoral a la que se encuentra unida, así como el parque de la pequeña y mediana industrial, localizado en el margen izquierdo del brazo derecho del río Balsas y algunas zonas del complejo siderúrgico AcelorMittal.

Considerando la cota de inundación con el 95% en el intervalo de confianza, las áreas afectadas adicionales a las mencionadas anteriormente serían algunas zonas de las instalaciones de la Secretaría de Marina ubicadas en el margen izquierdo del río.

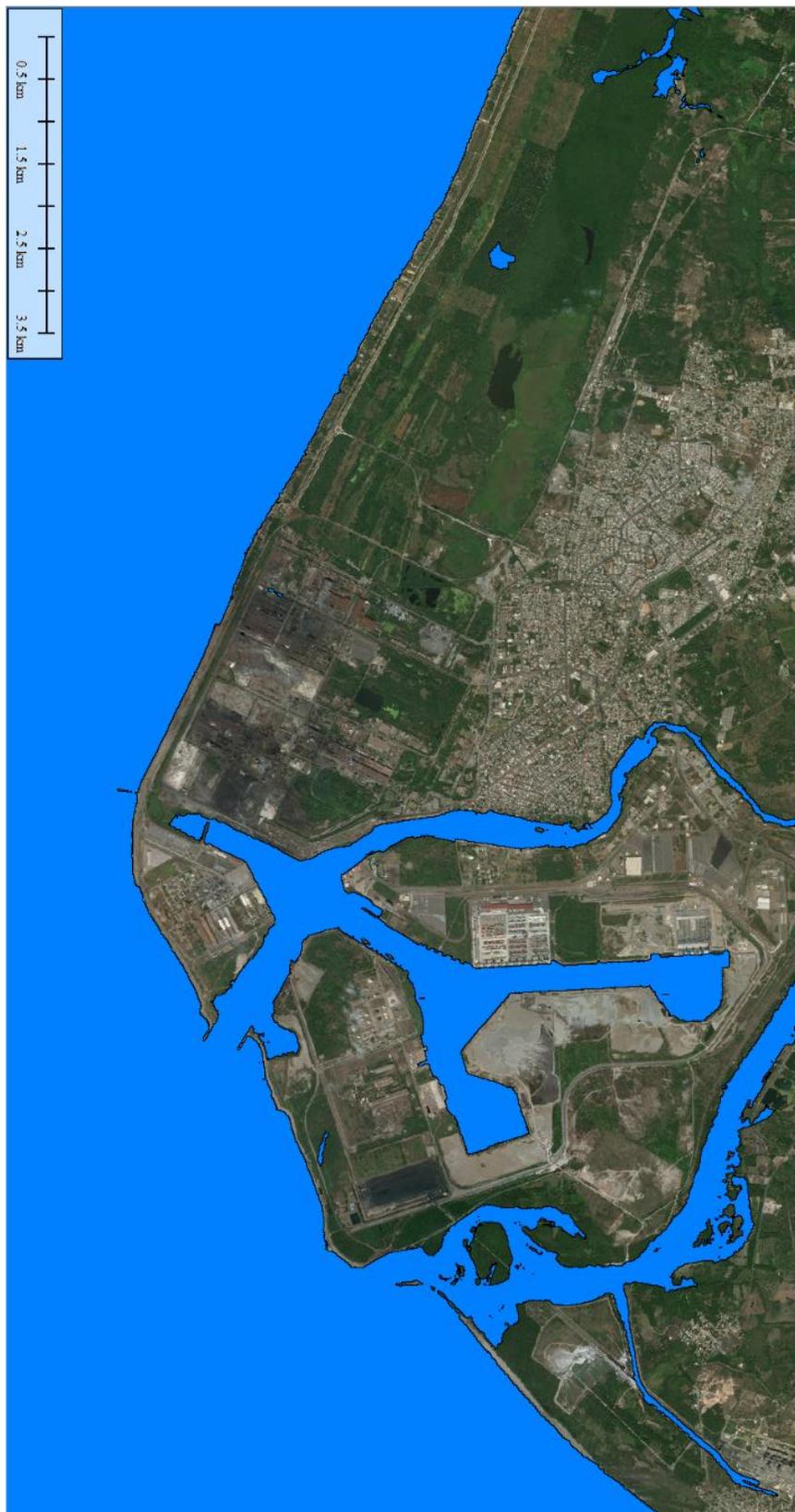
- Con la cota de inundación con incremento del nivel medio del mar por cambio climático considerando la alta emisión de gases de efecto invernadero (RCP8.5), el área afectada en el año 2050 se estima en 15.38 km<sup>2</sup> (ver figura 4.7) y para el año 2100 esta podría incrementarse hasta 23.44 km<sup>2</sup> (ver figura 4.8).

Con este escenario de incremento del nivel del mar, se perdería toda la franja costera de la playa Eréndira incluyendo el boulevard Playa Azul, llegando la zona inundación hasta el Libramiento a Sicartsa, afectando las vías del ferrocarril y las colonias Independencia, Ampliación Independencia al sur de la ciudad de Lázaro Cárdenas, y las colonias Los lavaderos y Las Palmas, así como el sector pesquero ubicados en el margen derecho del río.

Respecto a las instalaciones portuarias, las zonas afectadas serían las terminales públicas de usos múltiples I, II y III, (las cuales quedaría aisladas de las instalaciones portuarias), y la terminal pública de minerales a granel y productos derivados del petróleo, la escollera Oriente quedaría aislada al perderse en su totalidad la franja litoral a la que se encuentra unida, así como el parque de la pequeña y mediana industrial, localizado en el margen izquierdo del brazo derecho del río Balsas y algunas zonas aledañas al complejo siderúrgico AcelorMittal.

Considerando la cota de inundación con el 95% en el intervalo de confianza, las áreas afectadas adicionales a las mencionadas anteriormente serían la terminal privada de fertilizantes, el complejo siderúrgico AcelorMittal, las instalaciones de la Secretaría de Marina ubicadas en el margen izquierdo del río, la terminal pública de graneles agrícolas.

**Inundación permanente = 0.926 m**



**Figura 4.2** Mapa de zona de inundación permanente con la cota de 0.926 m referida al n. m. m.

Inundación extrema para el año 2050 = 1.986 m

Inundación extrema para el año 2050, con el 95% de intervalo de confianza = 2.450 m



**Figura 4.3** Mapa de zona de inundación para eventos extremos para el año 2050 con la cota de 1.986 m referida al N. M. M. (áreas azules) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.450 m referido al N. M. M. (áreas rojas).

Inundación extrema para el año 2100 = 2.137 m

Inundación extrema para el año 2100, con el 95% de intervalo de confianza = 2.661 m

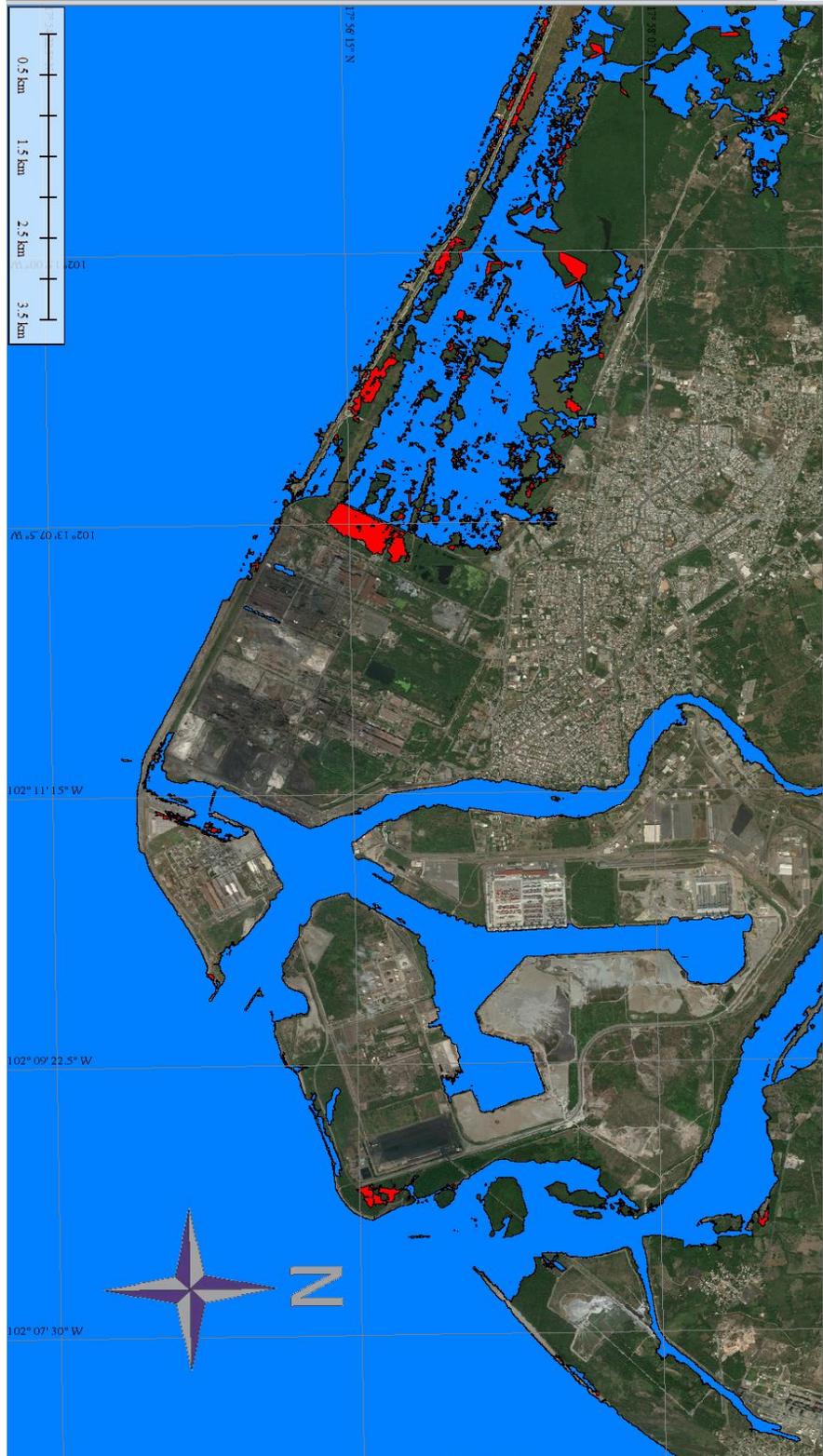
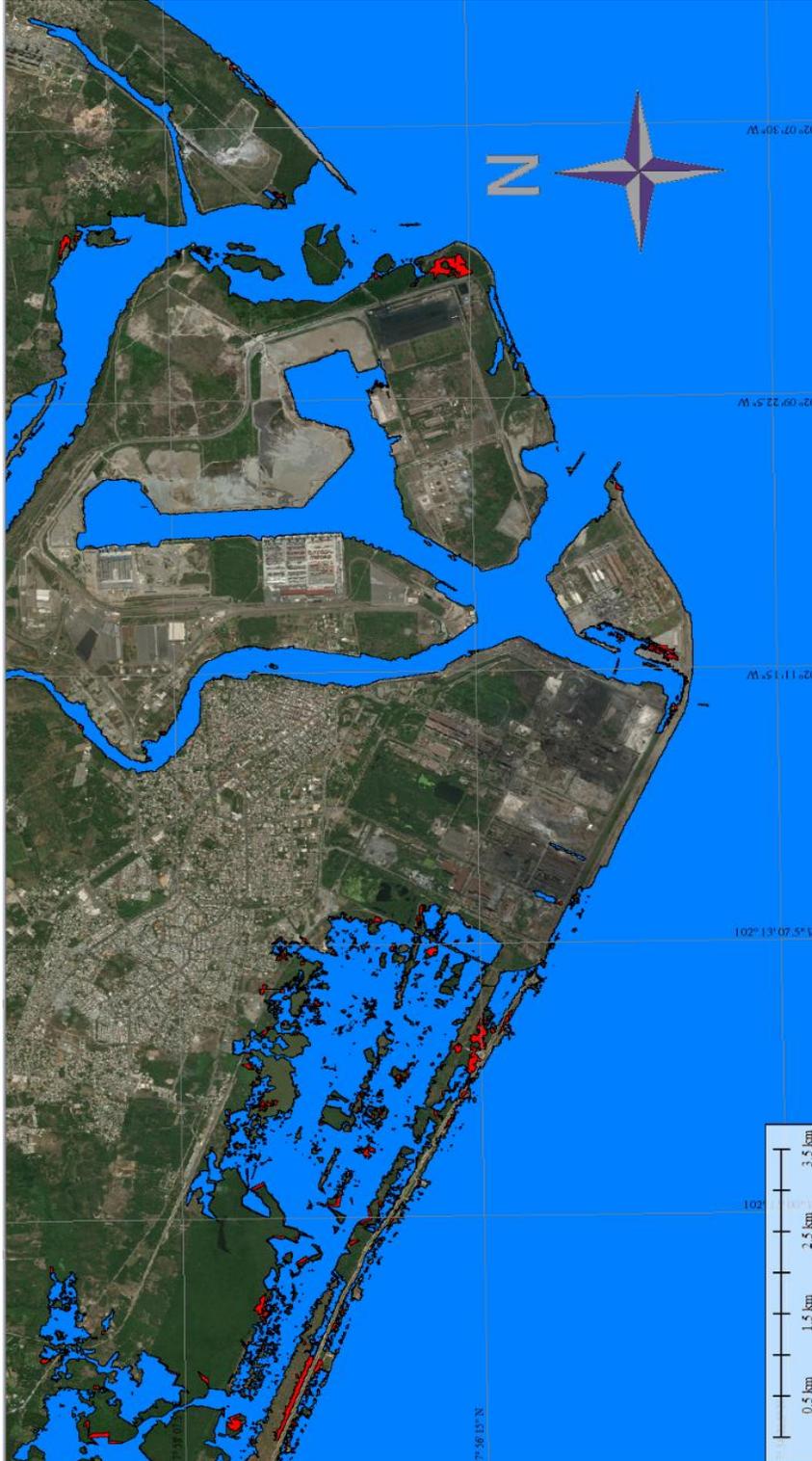


Figura 4. 4 Mapa de zona de inundación para eventos extremos para el año 2100 con la cota de 2.137 m referida al N. M. M. (áreas azules) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.661 m referido al N. M. M. (áreas rojas).

**Inundación futura con cambio climático (escenario RCP2.6) para el año 2050 = 2.206 m**

**Inundación futura con cambio climático para el año 2050, con el 95% de intervalo de confianza = 2.736 m**



**Figura 4.5** Mapa de zona de inundación con cambio climático para el año 2050 con la cota de 2.206 m referida al N. M. M. actual (áreas azules), con el escenario de baja emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.736 m referido al N. M. M. actual (áreas rojas).

**Inundación futura con cambio climático (escenario RCP2.6) para el año 2100 = 2.577 m**

**Inundación futura con cambio climático para el año 2100, con el 95% de intervalo de confianza = 3.278 m**

**Figura 4.6** Mapa de zona de inundación con cambio climático para el año 2100 con la cota de 2.577 m referida al N. M. M. actual (áreas azules), con el escenario de baja emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6) y con el 95% de intervalo de confianza de 3.278 m referido al N. M. M. actual (áreas rojas)



Inundación futura con cambio climático (escenario RCP8.5) para el año 2050 = 2.256 m

Inundación futura con cambio climático para el año 2050, con el 95% de intervalo de confianza = 2.785 m

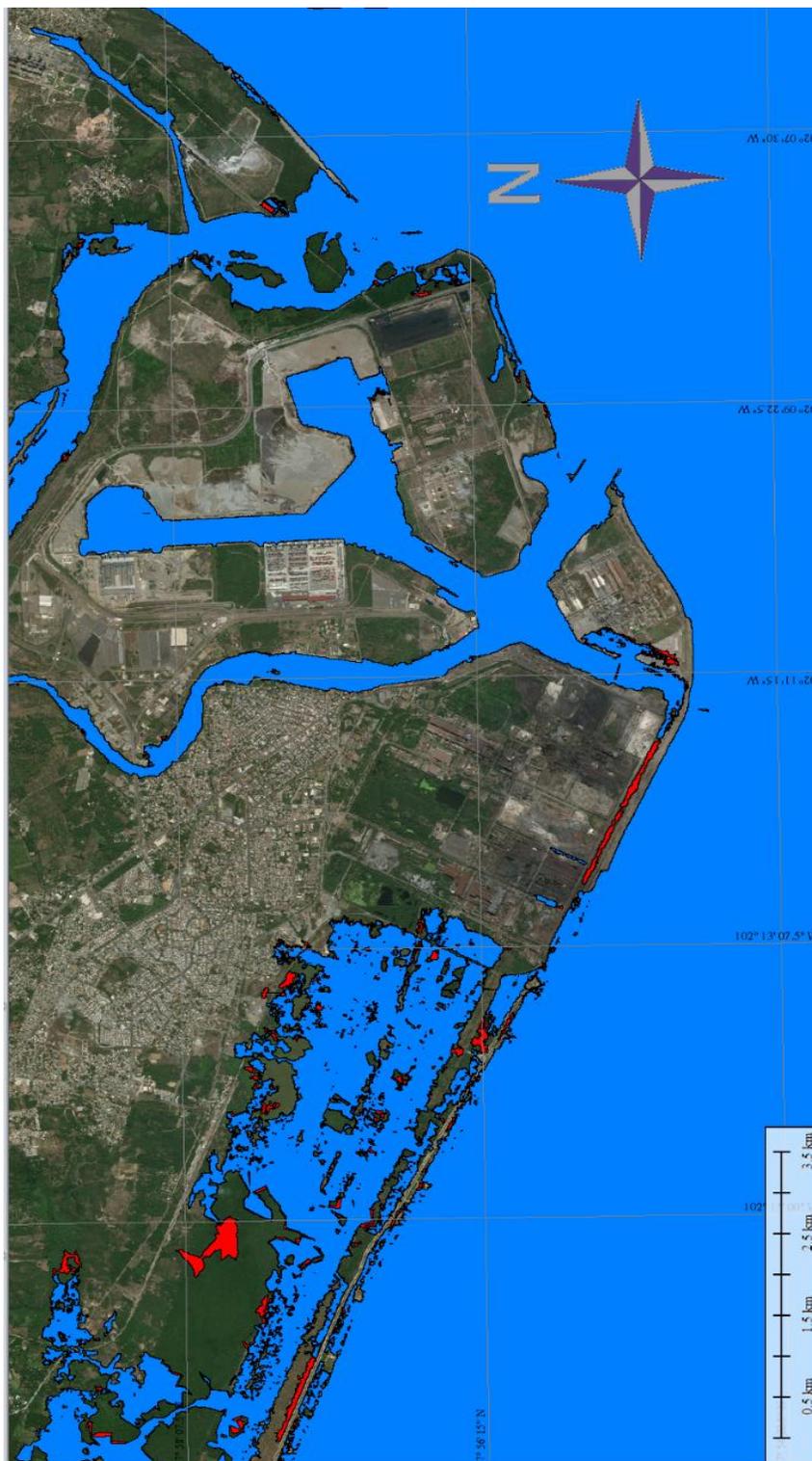
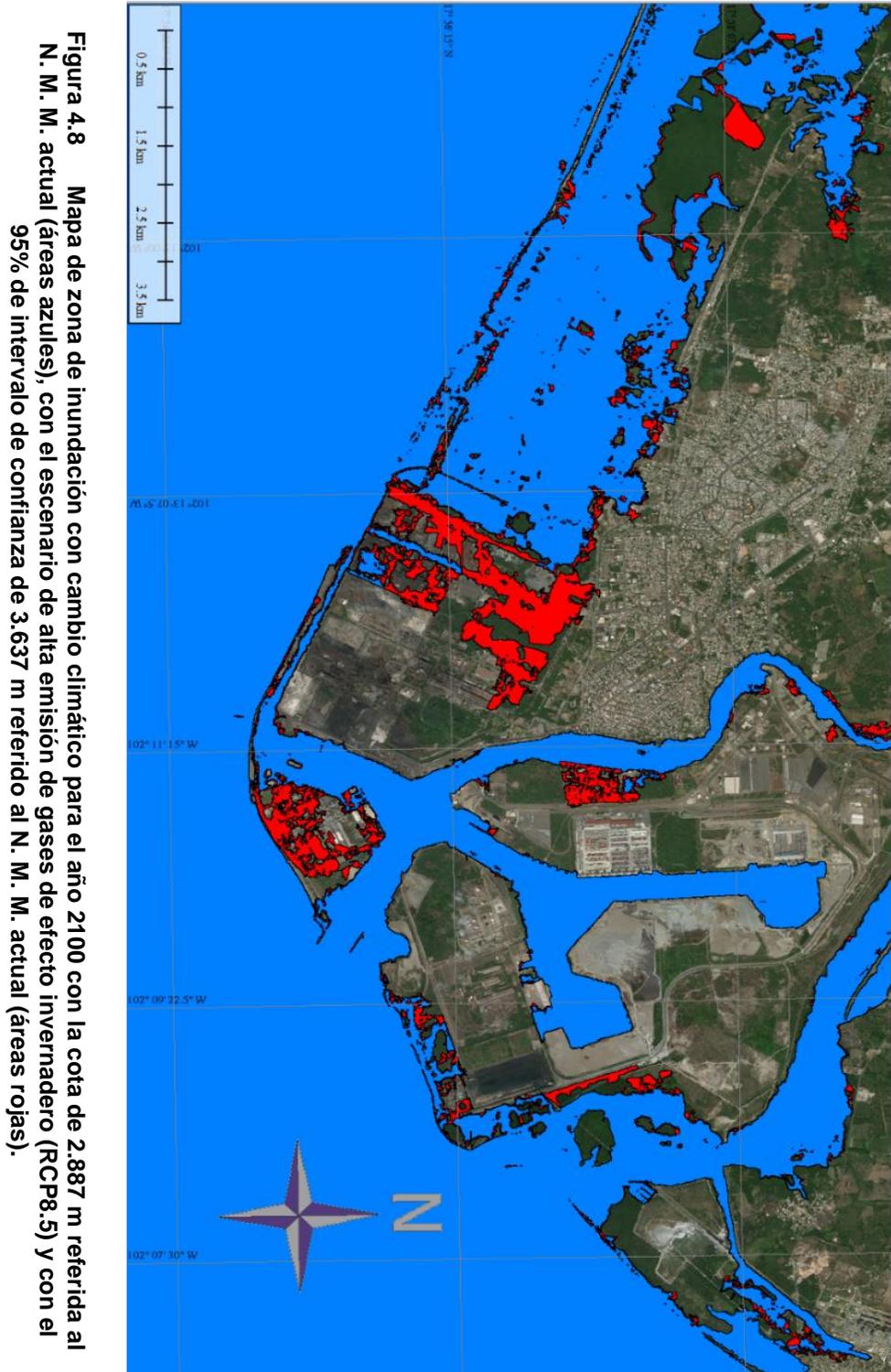


Figura 4.7 Mapa de zona de inundación con cambio climático para el año 2100 con la cota de 2.256 m referida al N. M. actual (áreas azules), con el escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero (RCP8.5) y con el 95% de intervalo de confianza de 2.785 m referido al N. M. actual (áreas rojas)

**Inundación futura con cambio climático (escenario RCP8.5) para el año 2100 = 2.887 m**

**Inundación futura con cambio climático para el año 2100, con el 95% de intervalo de confianza = 3.637 m**



## Conclusiones

---

- La cota de inundación alcanzada en la zona de estudio por la acción de la dinámica marina y meteorológica, se calculó como la suma lineal del nivel medio del mar, la marea astronómica, marea meteorológica y el run-up del oleaje.
- Con base en la información del oleaje y de los niveles del mar de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM), la cota de inundación permanente obtenida es de 0.926 m respecto al Nivel Medio del Mar (N. M. M.).
- Con base en la información de las características de 69 huracanes que han afectado la zona de estudio, obtenidas de la base de datos HURDAT2 (Hurricane Databases), publicada por el National Hurricane Center (NHC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), se calculó mediante un análisis de extremos, la marea meteorológica y el run-up del oleaje para diferentes períodos de retorno comprendidos entre el año 2020 y 2100. Tabla C1.
- La cota de inundación extremal para diferentes años (2020 – 2100), se indica en la siguiente tabla:

**Tabla C.1 Cota de inundación extremal futura para diferentes años (2020 – 2100).**

Año	COTA DE INUNDACIÓN (m)		
	REFERIDA AL N. M. M.		
	Media	Rango probable	
5% confianza		95% confianza	
2020	1.827	1.486	2.232
2030	1.892	1.534	2.320
2040	1.943	1.572	2.391
2050	1.987	1.604	2.450
2060	2.024	1.631	2.502
2070	2.057	1.655	2.548
2080	2.086	1.676	2.589
2090	2.113	1.696	2.626
2100	2.137	1.713	2.661

- Con la cota de inundación extrema, el área afectada en el año 2050 podría ascender a 9.31 km<sup>2</sup> y para el año 2100 esta podría ser de 10.34 km<sup>2</sup>, afectando la infraestructura costera y turística de la playa Eréndira, colonias como Los Lavaderos, Las Palmas y Ampliación Independencia de la ciudad de Lázaro Cárdenas, las terminales portuarias públicas de usos múltiples I, y II, y la terminal portuaria pública de minerales a granel y productos derivados del petróleo.
- Para el cálculo de la cota de inundación futura, se consideraron los escenarios del incremento del nivel medio del mar debido al cambio climático RCP2.6 y RCP8.5, definidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), de los cuales el primero contempla políticas de reducción en la emisión de gases de efecto invernadero y el segundo considera altas emisiones de dichos gases.
- La cota de inundación futura para diferentes años (2020 – 2100) considerando el escenario RCP2.6 de incremento del nivel medio del mar por cambio climático, se indica en la tabla C.2:

**Tabla C.2 Cota de inundación futura para diferentes años (2020 – 2100), considerando el escenario RCP2.6.**

Año	COTA DE INUNDACIÓN FUTURA (m)		
	REFERIDA AL N. M. M. ACTUAL		
	Media	Rango probable	
5% confianza		95% confianza	
2020	1.918	1.547	2.342
2030	2.024	1.628	2.486
2040	2.119	1.697	2.616
2050	2.205	1.759	2.736
2060	2.286	1.814	2.850
2070	2.364	1.865	2.961
2080	2.439	1.911	3.068
2090	2.513	1.955	3.173
2100	2.585	1.995	3.278

- Con la cota de inundación con incremento del nivel medio del mar por cambio climático considerando la baja emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6), el área afectada en el año 2050 se estima en 14.70 km<sup>2</sup> y para el año 2100 esta podría incrementarse a 19.64 km<sup>2</sup>, se perdería toda la franja costera de la playa Eréndira, afectando el boulevard Playa Azul, las vías del

ferrocarril y las colonias Independencia, Ampliación Independencia, Los Lavaderos y Las Palmas, así como el sector pesquero ubicados en el margen derecho del río, las terminales portuarias públicas de usos múltiples I, II y III, la terminal pública de minerales a granel y productos derivados del petróleo, algunas zonas del complejo siderúrgico AcelorMittal y del parque de la pequeña y mediana industrial, la escollera Oriente quedaría aislada al perderse en su totalidad la franja litoral a la que se encuentra unida.

- Considerando la cota de inundación con el 95% en el intervalo de confianza, las áreas afectadas adicionales a las mencionadas anteriormente serían algunas zonas de las instalaciones de la Secretaría de Marina ubicadas en el margen izquierdo del río.
- La cota de inundación futura para diferentes años (2020 – 2100) considerando el escenario RCP8.5 de incremento del nivel medio del mar por cambio climático, se indica en la tabla C.3:

**Tabla C.3 Cota de inundación futura para diferentes años (2020 – 2100), considerando el escenario RCP8.5.**

Año	COTA DE INUNDACIÓN FUTURA (m)		
	REFERIDA AL N. M. M. ACTUAL		
	Media	Rango probable	
5% confianza		95% confianza	
2020	1.920	1.553	2.346
2030	2.033	1.638	2.494
2040	2.143	1.718	2.638
2050	2.253	1.798	2.785
2060	2.368	1.879	2.937
2070	2.487	1.963	3.098
2080	2.613	2.050	3.267
2090	2.746	2.141	3.447
2100	2.886	2.235	3.637

- Con la cota de inundación con incremento del nivel medio del mar por cambio climático considerando la alta emisión de gases de efecto invernadero (CRP8.5), el área afectada en el año 2050 se estima en 15.38 km<sup>2</sup> y para el año 2100 esta podría incrementarse hasta 23.44 km<sup>2</sup>, se perdería toda la franja costera de la playa Eréndira, incluyendo el boulevard Playa Azul,

afectando las vías del ferrocarril, el libramiento a Sicartsa y las colonias Independencia, Ampliación Independencia, Los Lavaderos y Las Palmas, así como el sector pesquero ubicados en el margen derecho del río, las terminales portuarias públicas de usos múltiples I, II y III, la terminal pública de minerales a granel y productos derivados del petróleo, algunas zonas del complejo siderúrgico AcelorMittal y del parque de la pequeña y mediana industrial, la escollera Oriente quedaría aislada al perderse en su totalidad la franja litoral a la que se encuentra unida.

- Considerando la cota de inundación con el 95% en el intervalo de confianza, las áreas afectadas adicionales a las mencionadas serían la terminal portuaria privada de fertilizantes, el complejo siderúrgico AcelorMittal, las instalaciones de la Secretaría de Marina ubicadas en el margen izquierdo del río y la terminal portuaria pública de gránulos agrícolas.

## Bibliografía

---

BALLESTEROS CARRAL, Marta. Estudio de la variabilidad del nivel del mar en el Atlántico Norte a partir de medidas altimétricas del proyecto CCI Sea Level. Trabajo Fin de Grado de Ciencias Ambientales Facultad de Ciencias de Ourense. 2016.

BARNSTON, A.G. and LIVEZEY, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review* 115, 1083-1126.

BARRERA TOMÁS, Noélia. Influencia del rebase del oleaje en playas sobre lagunas costeras. El caso de la laguna de la Magarola. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 2004.

CAZENAVE, Anny. Global sea-level Budget 1993-present. *Earth System Science Data*, 2018.

DOMINGUES, C.M., CHURCH, J.A., WHITE, N.J., GLECKLER, P.J., WIJFFELS, S.E., BARKER, P.M. and DUNN, J.R. (2008) Improved estimates of upper-ocean warming and multidecadal sea-level rise. *Nature* 453, p. 1090-1093.

GODA, Y., (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. University of Tokyo. *Advanced Series on Ocean Engineering*. Vol 15. World Scientific.

IDEAM. Estudio sobre la Determinación de las Componentes Armónicas de la marea y descripción de su comportamiento en diferentes puntos de las Costas Colombianas. METEO/003. Bogotá. 2010.

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE (IMT). Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENOM). México, 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI). Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. México, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, U. K.

KOOP, R. E., HORTON, R. M., LITTLE, C. M., MITROVICA, J. X., OPPENHEIMER, M., RASMUSSEN, D. J., STRAUSS, B., TEBALDI, C. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide.-gauge sites.

LIZANO R., O. G. Las mareas y su relación con fenómenos astronómicos y meteorológicos. Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR). Universidad de Costa Rica, 2003.

LOSADA RODRÍGUEZ, I. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. Instituto de Hidráulica Ambiental de la universidad de Cantabria, 2011.

LOSADA RODRÍGUEZ, I. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Efectos teóricos. Instituto de Hidráulica Ambiental de la universidad de Cantabria, 2011.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Northeast and North Central Pacific hurricane database (HURDAT2) 1949-2019, USA, 2020.

PONS VALLS, J. M. La medición del nivel medio del mar: principios y métodos. Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

ADMINISTRACIÓN PORTUARIA INTEGRAL de Lázaro Cárdenas, S. A. de C. V.,  
Mapa del puerto de Lázaro Cárdenas, Mich. México, 2020

MEZA-PADILLA, R., APPENDINI, C. M., PEDROZO-ACUÑA, A., GONZÁLEZ-VILLAREAL F., Evaluación de la marea de tormenta en sitios con escasez de datos: río Pánuco, México. Artículo científico. Revista Iberoamericana del agua 2 (2015)

ROHLING, E.J., GRANT, K., BOLSHAW, M., ROBERTS, A.P., SIDDALL, M., HEMLEBEN, Ch. and KUCERA, M. (2009) Antarctic temperature and global sea level closely coupled over the past five glacial cycles. Nature Geoscience 2, p. 500-504.



# COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”**  
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,  
Querétaro, México. C.P. 76703  
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610  
Fax: +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>