

DETERMINACIÓN DE LA COTA DE INUNDACIÓN PERMANENTE, TEMPORAL Y FUTURA EN PLAYAS.

Rodolfo Ramírez Xicotencatl

rromirez@imt.mx

Etelberto Dionisio Serrano Flores

eserrano@imt.mx

María de Lourdes Méndez Reyes

lourdes.mendez@imt.mx

Resumen:

La determinación de la cota de inundación de una playa se obtiene de la interacción de las variables oceanográficas como: la marea astronómica, la marea meteorológica, el set-up y el run-up del oleaje. El presente trabajo contempló la determinación de la cota de inundación presente para el puerto de Lázaro Cárdenas, Mich., a partir de información de oleaje y mareas de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM); y de la cota de inundación futura debida a las afectaciones producidas por huracanes y debida al incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático. Con los resultados obtenidos se definieron mapas de inundación del puerto de Lázaro Cárdenas, destacando que para el año 2100, la cota de inundación provocaría la desaparición de la playa Eréndira, afectando algunas colonias del sur de la ciudad de Lázaro Cárdenas y las terminales marítimas de usos múltiples del puerto.

Palabras clave: Huracanes, marea, run-up, set-up, inundación

Abstract:

The flooding level determination of some beach is obtained from the interaction of oceanographic variables such as: astronomical tide, meteorological tide, wave set-up and run-up. The present work contemplated the determination of the current flood level for the port of Lázaro Cárdenas, Mich., based on wave and tide information from the National Network of Oceanographic and Meteorological Stations (RENEOM); and the level of future flooding due to the effects produced by hurricanes and due to the increase in sea level due to the effect of climate change. With the results obtained, flood maps of the port of Lázaro Cárdenas were defined, highlighting that by the year 2100, the flood level would cause the removal of the Eréndira beach, affecting some neighborhoods in the south of the Lázaro Cárdenas city, and the multiple uses maritime terminals of the port.

Key Word: Hurricanes, tidal, run-up, set-up, flood

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).

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).

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

Determinación de la cota de inundación permanente

La cota de inundación en una playa puede ser representada como la interacción en un instante determinado, de la elevación alcanzada por la acción de la dinámica oceanográfica y meteorológica, y se asume como el resultado de la suma lineal respecto a un nivel de referencia (nivel medio del mar) del nivel de la marea astronómica, de la marea meteorológica y del run-up significativo (run-up + set-up) debido a la rotura del oleaje.

Nivel Medio del Mar

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).

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).

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. Se trata de ondas que se caracterizan porque su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad media del agua $\Rightarrow d/L < 1/25$.

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:

- 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.
- Nivel de Pleamar Media (N. P. M.): Promedio de todas las pleamares.
- Nivel Medio del Mar (N. M. M.): Promedio de las alturas horarias.
- 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.
- 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.

Para definir la elevación de la marea astronómica en la zona de estudio, se consideró el Nivel de Pleamar Media Superior, que de acuerdo con las tablas que publica la Secretaría de Marina, a través de la Red Mareográfica Nacional es de 0.246 m respecto al Nivel Medio del Mar

Marea meteorológica

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.

Para determinar la marea meteorológica con base en los registros históricos del nivel del mar, simplemente se resta o se obtienen las residuales entre la marea astronómica pronosticada y la marea observada.

A partir de la información de los niveles del mar de la RENEOM y con el análisis armónico de la marea realizado con el modelo numérico Tidal Analysis and Prediction Module del software MIKE 21 desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI), se separaron las oscilaciones no periódicas, aislando así, la marea meteorológica de la marea astronómica, de lo cual, la máxima elevación del nivel del mar debido a la marea meteorológica fue de 0.33 m, con un valor promedio de 0.07 m.

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.

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 playa sobre el nivel del mar en reposo, corresponde al 17% de la altura de ola significativa en aguas profundas.

Por otra parte, el run up del oleaje es la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre una estructura respecto el nivel del mar en reposo. 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. La existencia de formulaciones o métodos de estimación del run-up en playas están limitadas principalmente a aproximaciones semi-empíricas basadas en resultados obtenidos en ensayos de laboratorio. Algunos resultados 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) dio como resultado una dependencia de la altura de ola incidente en aguas profundas y del run up expresado como un run up significativo, R_s (media del tercio mayor de los niveles de run up).

Debido a la gran variabilidad de alturas y períodos de ola que se pueden encontrar en la naturaleza, el cálculo del set-up y run-up en la zona de estudio, se realizó utilizando las características medias del oleaje determinadas a partir de la información 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° de latitud Norte y 102.219° de longitud Oeste, dando como resultado 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.

Cota de inundación

Con base en lo anterior, la cota de inundación permanente en la zona de estudio, es de 0.926 m respecto al N. M. M., de acuerdo con lo que se indica 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



Figura 1 Mapa de zonas de inundación permanente en el puerto de Lázaro Cárdenas.

Determinación de la cota de inundación temporal

La determinación de la cota de inundación temporal es análoga a la determinación de la cota de inundación permanente con la salvedad de que se refiere a eventos extremos de inundación, de forma que se determina por medio de un análisis de extremos, el nivel de la marea meteorológica y el run-up del oleaje, producidos por los huracanes que se han presentado en la zona.

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 su determinación se puede realizar mediante mediciones del nivel del mar, formulaciones (ejemplo: Keulegan-Per Brunn) y/o por medio de modelos numéricos.

Para el presente trabajo, el cálculo de la marea meteorológica generada 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.

La información de los eventos de huracanes, 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, de la cual 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, 12 huracanes de categoría 2, 11 huracanes de categoría 3, 25 huracanes de categoría 4 y 6 huracanes de categoría 5.

A partir de la información de la velocidad máxima de viento y la presión en el ojo de los huracanes antes señalados, se realizaron las modelaciones numéricas generando previamente los campos de viento y presión por medio de la aplicación del modelo de vórtice de Rankine (1947), obteniendo para cada evento extremo el máximo valor de la marea meteorológica frente al puerto de Lázaro Cárdenas, y mediante un análisis de extremos, se determinó la marea meteorológica para diferentes períodos de retorno comprendidos entre el año 2020 y el año 2100

Los resultados obtenidos de la marea meteorológica para diferentes períodos de retorno y con intervalos de confianza del 5 y 95% indican 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

Run-up del oleaje

Para determinar el oleaje producido por los huracanes que se han presentado en la zona, 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.

De forma análoga, para cada huracán modelado, se obtuvo la máxima altura de ola frente al puerto de Lázaro Cárdenas y se mediante la fórmula propuesta por Mase, se calculó el run-up significativo (set-up + run-up). Con dicha información se determinó mediante un análisis de extremos, el run-up para diferentes períodos de retorno comprendidos entre el año 2020 y el año 2100

Los resultados obtenidos del cálculo del run-up del oleaje para diferentes períodos de retorno y con intervalos de confianza del 5 y 95% indican que para el año 2050, se estima un run-up entre 1.128 y 1.641 m y para el año 2100, el run-up estaría entre 1.191 y 1.725 m.

Cota de inundación

Con base en lo anterior, la cota de inundación temporal en la zona de estudio estimada para el año 2050, estaría entre 1.604 y 2.450 m respecto al N. M. M. (5% y 95% de intervalo de confianza), de acuerdo con lo que se indica a continuación:

- Nivel medio del mar = 0.000 m
- Marea astronómica (N. P. M. S) = 0.246 m
- Marea meteorológica = 0.230 m – 0.563 m
- Run-up significativo = 1.128 m – 1.641 m



Figura 2 Mapa de zonas de inundación temporal para el año 2050.

Determinación de la cota de inundación futura

De las variables que determinan la cota de inundación, la marea meteorológica y el run-up son las que pueden verse afectadas 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, se asume que la cota de inundación futura es igual a la actual, más el incremento del nivel medio del mar por cambio climático, la marea meteorológica y el run-up futuros, descritos anteriormente.

Aumento del nivel de 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.

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 1993 y 2010 fue de 2.8 a 3.6 mm/año. Para la elaboración de dicho informe, definieron un conjunto de cuatro escenarios, denominados Rutas de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés): 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 probablemente estará en los rangos de 0.45 a 0.82 m para el escenario más crítico.

Cota de inundación

Con base en lo anterior, la cota de inundación futura en la zona de estudio estimada para el año 2050, considerando el escenario más crítico de incremento del nivel del mar por cambio climático, estaría entre 1.798 y 2.785 m respecto al N. M. M. (5% y 95% de intervalo de confianza), de acuerdo con lo que se indica a continuación:

- Nivel medio del mar = 0.190 m – 0.34 m
- Marea astronómica (N. P. M. S) = 0.246 m
- Marea meteorológica = 0.230 m – 0.563 m
- Run-up significativo = 1.128 m – 1.641 m



Figura 3 Mapa de zonas de inundación futura para el año 2050.

Conclusiones

Las afectaciones debidas al aumento en la cota de inundación en la zona costera del puerto de Lázaro Cárdenas se pueden resumir en los siguientes puntos:

- El nivel del mar, incrementaría para el año 2100 hasta en un 300% la cota de inundación actual del puerto.
- El 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.
- El aumento del nivel medio del mar, generará un incremento del área de la sección crítica del río en el puerto.

Bibliografía

- ✓ Goda, Y., (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol 15. World Scientific.
- ✓ Instituto Mexicano del Transporte (2020). Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENOM). México.
- ✓ Instituto Mexicano del Transporte (2021). MI-01/20 Estudio de los efectos del cambio climático en la cota de inundación del puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.. México.
- ✓ Intergovernmental Panel on Climate Change (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.
- ✓ Losada Rodríguez, Iñigo (2011). 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.
- ✓ National Oceanic and Atmospheric Administration (2020). Northeast and North Central Pacific hurricane database (HURDAT2) 1949-2019, USA