

OLEAJE Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS MARÍTIMAS EN ZONAS TROPICALES BAJO EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

CHRISTIAN M. APPENDINI
Y PABLO RUIZ SALCINES

El último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas deja claro que el calentamiento global existe y es resultado de la actividad antropogénica (IPCC, 2021). Si bien, los científicos nos han alertado al respecto desde hace años, cada día es más difícil ignorar los efectos del cambio climático, los cuales experimentamos como catástrofes derivadas de sequías, inundaciones, olas de calor y tormentas severas con frecuencias e intensidades inusuales. Los ciclones tropicales son uno de los fenómenos influenciados por el calentamiento global, ya que al aumentar la temperatura de los océanos existe mayor energía disponible para la intensificación de estos eventos. En la actualidad, existe un consenso en los estudios de que, si bien no es claro si aumentará el número de ciclones tropicales, se espera que los eventos más intensos (categorías 4 y 5 en la escala Saffir-Simpson), aumenten su frecuencia (Knutson *et al.*, 2020). Es decir, la probabilidad de que se presenten huracanes con vientos más intensos aumenta con el calentamiento global. En el caso de México esto no debe tomarse a la ligera, ya que estamos potencialmente expuestos a ciclones tropicales en todas nuestras costas y, bajo las condiciones proyectadas de calentamiento global, podemos esperar eventos más intensos afectando al país en el futuro.

Si bien, los mayores efectos destructivos por ciclones tropicales en México son consecuencia de la precipitación extrema (inundaciones pluviales, deslizamientos de tierras, etc.), y a nivel mundial debido a la marea de tormenta (inundaciones costeras), el oleaje es un parámetro del cual pocas veces escuchamos. No obstante, las estructuras marítimas, tanto costeras como costa afuera (*offshore*), son diseñadas considerando el oleaje al cual previsiblemente estarán expuestas durante su vida útil. Así, las olas más altas que podemos esperar en una zona definen el diseño estructural de las obras marítimas y, en el caso de los mares tropicales de México, estas olas son generadas por ciclones tropicales. Si consideramos que se

espera que el calentamiento global conlleve un incremento en la proporción de ciclones tropicales de las categorías más altas, es de esperarse que la altura de ola de diseño de obras marítimas en zonas expuestas al embate de ciclones tropicales deba incrementarse. Así, en México, es esencial conocer el oleaje bajo proyecciones de cambio climático para determinar los parámetros de diseño adecuados, así, evitar daños en las estructuras costeras y *offshore*, los cuales suelen tener consecuencias catastróficas para el ambiente, incluso, cobrarse vidas humanas. Esto es particularmente relevante en estos momentos en el país debido al impulso en la exploración de hidrocarburos en aguas profundas, donde se instalarán nuevas plataformas de extracción de hidrocarburos que, durante su vida útil, estarán funcionando bajo condiciones de cambio climático. Aún si pensamos en una transición energética en México, sigue siendo relevante la correcta determinación del oleaje de diseño, ya que los dispositivos de conversión de energía oceánica, incluso, los parques eólicos *offshore*, estarán sujetos a oleajes más energéticos que en la actualidad.

Debido a todo lo anterior, en el grupo de oleaje del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros de la Unidad Académica Sisal del Instituto de Ingeniería de la UNAM, hemos realizado distintos estudios para caracterizar el oleaje derivado de ciclones tropicales en mares mexicanos y el efecto del cambio climático sobre el mismo. Considerando la importancia de la extracción de hidrocarburos para impulsar el desarrollo del país en el gobierno actual, en este trabajo presentamos una evaluación del efecto de calentamiento global sobre el clima de oleaje en el Golfo de México, con particular interés en la zona del Cinturón Plegado Perdido (CPP) y la Sonda de Campeche (SdC), donde se encuentran los mayores esfuerzos de exploración de hidrocarburos actualmente.

Para caracterizar el oleaje derivado de ciclones tropicales bajo escenarios de cambio climático, primero es necesario definir adecuadamente los campos de viento asociados a los ciclones tropicales, tanto en el clima actual como en el futuro. El grupo de trabajo internacional COWCLIP (Coordinated Wave Climate Project) se ha puesto la tarea de caracterizar el oleaje a nivel global y evaluar los efectos del cambio climático, forzando modelos de oleaje con vientos de los Modelos de Circulación General (MCG) (Morim *et al.*, 2019). Sin embargo, se sabe que estos modelos subestiman tanto el número de ciclones tropicales, como la intensidad de sus vientos (Knutson *et al.*, 2020). Una alternativa a los MCG es el uso de ciclones tropicales sintéticos, cuyas ventajas son descritas en Emanuel (2021). De esta manera, utilizamos ciclones tropicales sintéticos derivados

a partir de la técnica propuesta por Emanuel (2013, 2015) y Emanuel *et al.*, (2006, 2008). La generación de estos eventos se basa en la física de los ciclones tropicales. Para su obtención se siembran vórtices de viento de 12 m/s de manera aleatoria en el océano, que de acuerdo con las condiciones oceánicas y atmosféricas provistas por reanálisis o los MCG, estos vórtices decaen o se intensifican para convertirse en ciclones tropicales. Los vórtices que evolucionan se intensifican en base al modelo CHIPS (Emanuel, 2004) y se desplazan de acuerdo a un modelo de beca advección tipo Marks (1992). En el trabajo se utilizaron eventos sintéticos derivados a partir del reanálisis NCEP/NCAR para tener la referencia al clima actual, y a partir de seis MCG (ver Appendini *et al.* (2019) para un listado de los MCG utilizados) tanto para el clima actual (1975-2005) como para el clima futuro (2070-2100), bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero RCP 8.5. Utilizando la información de los eventos sintéticos se crearon los campos de viento para cada ciclón tropical utilizando el modelo paramétrico de Emanuel y Rotunno (2011), con los que se forzó el modelo de oleaje de tercera generación MIKE 21 SW. Para cada uno de los eventos sintéticos se obtuvo la “huella” de altura de ola significativa (Hs), definida como la mayor Hs en el área durante el paso de cada ciclón tropical (como ejemplo se muestra la “huella” de un evento sintético en la Figura 1). Utilizando estos mapas de envoltentes máximas o “huellas”, se realizó un análisis estadístico de las componentes del oleaje y de valores extremos para definir el periodo de retorno de la altura de ola en cada una de las zonas de interés. Para el análisis extremal utilizamos el método de “pico sobre umbral” empleando la distribución Generalizada de Pareto y como umbral el percentil 98 de la altura de ola.

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos para el percentil 99 de la altura de ola significativa. Los resultados se muestran para los datos derivados del reanálisis en el clima actual (Figura 2a), y del ensamble de los eventos derivados de MCG para el clima actual (Figura 2b), y para el clima futuro (Figura 2c), además del sesgo de los eventos derivados de los MCG con respecto a los derivados del reanálisis (Figura 2d) y el porcentaje de incremento en la altura de ola para el clima futuro en relación al clima presente, usando los resultados de los eventos derivados de los MCG (Figura 2e). Como se puede observar, existe una diferencia entre la caracterización del percentil 99 del oleaje utilizando los eventos derivados del reanálisis comparado con los derivados de los MCG, lo cual se refleja en el sesgo (Figura 2d). Sin embargo, el sesgo es menor que la señal de incremento de oleaje que obtenemos

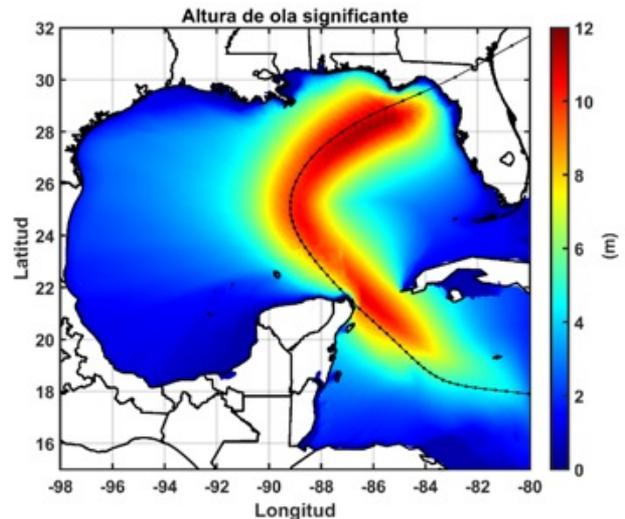


Figura 1. Mapa de envoltente de máximas alturas de ola significativa alcanzadas durante el paso de un ciclón tropical sintético en el Golfo de México, donde la línea negra muestra la trayectoria del evento

en el clima futuro al comparar con el clima actual usando los resultados derivados de los MCG (Figura 2e). El claro incremento en la altura de ola del percentil 99 con las condiciones de cambio climático, son una alarma que debemos considerar en el diseño de estructuras marítimas.

En la Figura 3 mostramos la distribución de las alturas de ola para distintos periodos de retorno y para las distintas bases de datos en las zonas de CPP y la SdC. Para los resultados obtenidos de los eventos derivados de MCG se muestra la envoltente de incertidumbre, donde la línea sólida muestra la media del ensamble y la envoltente representa una desviación estándar. Para la SdC encontramos que los eventos derivados de reanálisis se ajustan adecuadamente a los eventos históricos, sin embargo, no lo hacen en los eventos del CPP. Esto no quiere decir que los valores obtenidos por los eventos sintéticos sean incorrectos, sino que no existen suficientes datos históricos para hacer una estadística robusta. Sin embargo, si comparamos los eventos para el clima presente, en ambos casos los derivados de reanálisis se encuentran dentro de la envoltente de incertidumbre. En la Figura 3 observamos un incremento neto en la altura de ola para todos los periodos de retorno cuando consideramos la media del ensamble.

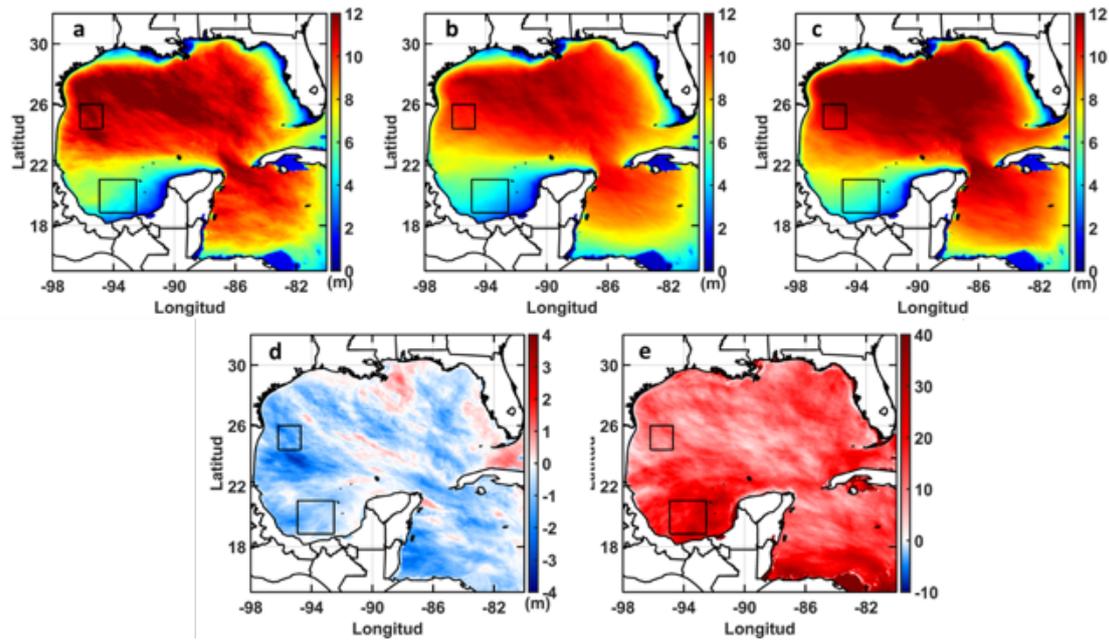


Figura 2. Percentil 99 del oleaje a partir de eventos sintéticos derivados de a) reanálisis para el clima actual, b) modelos de circulación general para el clima actual, así como de c) modelos de circulación general para el clima futuro. Se muestra el d) sesgo obtenido por los eventos derivados de modelos de circulación general al compararse con los derivados de reanálisis, y e) porcentaje de incremento en el percentil 99 de la altura de ola para el clima futuro en comparación del clima actual

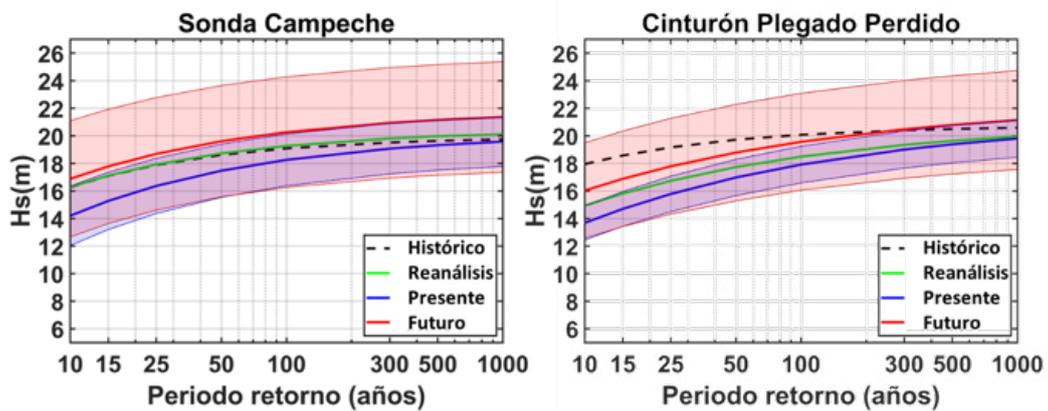


Figura 3. Altura de ola significativa para distintos periodos de retorno en a) la Sonda de Campeche y b) el Cinturón Plegado Perdido, con base a eventos históricos y eventos sintéticos derivados de reanálisis y modelos de circulación general

Los resultados obtenidos nos muestran que para el año 2070, cuando comienza el clima futuro, las condiciones de oleaje en el Golfo de México serán más intensas. Si en la actualidad diseñamos estructuras con base a información histórica de oleaje, estaremos subestimando la altura de ola de diseño, por lo que un oleaje de diseño con periodo de retorno de 100 años usando el clima actual, puede corresponder a un periodo de retorno de diseño de 30 años en el clima futuro (ver media del ensamble para clima actual y futuro en la SdC en la Figura 3). Esto puede tener consecuencias catastróficas, pues si consideramos un periodo de vida útil de 30 años para una estructura, la probabilidad de que ocurra la ola de diseño durante la vida de la estructura pasa de 64% al usar el periodo de retorno de 100 años y a 26% si usamos el periodo de retorno de 30 años. En el caso del CPP es todavía más crítico, pues un periodo de retorno de 100 años en el clima actual se convierte

en un periodo de retorno inferior a 10 años en el clima futuro. Si la probabilidad de ocurrencia del evento se traduce a probabilidad de daños, estamos bajo un panorama donde debemos considerar climas de oleaje no estacionarios, que consideren el cambio climático, para evitar tragedias debido al fallo de estructuras durante su vida útil. Esperamos que con este trabajo se genere consciencia para realizar mejores estimaciones de los parámetros de diseño, ya que esto no sólo aplica a obras marítimas, sino a todas las obras hidráulicas que de alguna u otra manera están influenciadas por parámetros que pueden cambiar debido al calentamiento global.

Este trabajo se realizó como parte de los estudios del Centro Mexicano de Innovación de Energía Océano (CEMIE-Océano). Los autores agradecen la colaboración de Ana Ramírez Manguilar, Rafael Meza Padilla y Gonzalo Uriel Martín Ruiz, que participaron en distintas fases del estudio. |

Referencias

- Appendini, C. M.; Meza-Padilla, R.; Abud-Russell, S.; Proust, S.; Barrios, R. E. R. E. y Secaira-Fajardo, F. (2019). Effect of climate change over land-falling hurricanes at the Yucatan Peninsula. *Climatic Change*, 157(3–4), 469–482.
- Emanuel, K. (2004). Tropical Cyclone Energetics and Structure. *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*, (1944), 165–192.
- Emanuel, K. (2015). Effect of upper-ocean evolution on projected trends in tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, 28(20), 8165–8170.
- Emanuel, K. (2021). Response of Global Tropical Cyclone Activity to Increasing CO₂: Results from Downscaling CMIP6 Models. *Journal of Climate*, 34(1), 57–70.
- Emanuel, K. y Rotunno, R. (2011). Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow. Part I: Implications for Storm Structure. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(10), 2236–2249.
- Emanuel, K.; Ravela, S.; Vivant, E. y Risi, C. (2006). A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3), 299–314.
- Emanuel, K.; Sundararajan, R.; Williams, J. y Emanuel, K. (2008). Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 347–367.
- Emanuel, K. A. (2013). Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30), 12219–12224.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, et al., Eds.) (In press). Cambridge University Press.

Knutson, T.; Camargo, S. J.; Chan, J. C. L.; Emanuel, K.; Ho, C.-H. y Kossin, J. *et al.* (2020). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303–E322.

Marks, D. G. (1992). *The beta and advection model for hurricane track forecasting*. NOAA technical memorandum NWS NMC.

Morim, J.; Hemer, M.; Wang, X. L.; Cartwright, N.; Trenham, C.; Semedo, A. *et al.* (2019). Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nature Climate Change*, 9(9), 711-718.