

SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS DE LOS HURACANES QUE HAN PASADO MÁS CERCA DE COSTA RICA

Ph.D. Omar G. Lizano Rodríguez
Universidad de Costa Rica
omar.lizano@ucr.ac.cr

M.Sc. Rodney E. Mora Escalante
Universidad de Costa Rica
rodney.mora@ucr.ac.cr

Recibido: 23/04/2019 • Corregido 7/05/2019 • Aceptado 25/05/2019

Resumen

Se simulan las condiciones de viento y oleaje para los huracanes con trayectoria más cercanos a Costa Rica. Destaca entre ellos el Huracán Joan (1988), siendo el sistema más intenso (categoría 4) que se ha acercado a nuestras costas del Caribe, generando viento sobre los 144 Km/h frente a las costas de Limón. Por otro lado, el Huracán Otto (2016) fue el primero que ingreso a nuestro territorio y aunque generó gran impacto tierra adentro, en las costas no produjo impacto significativo. La simulación de viento y la propagación de oleaje de los huracanes con modelos numéricos en mayas geográficas anidadas desde mar adentro hasta regiones costeras, resultaron con olas de hasta 4 m rompiendo al frente de Limón Centro durante el Huracán Joan. Dadas las características meteorológicas de los Huracanes Irene y César, fueron los que menores magnitudes de viento y alturas de olas generaron frente a Limón. Aunque se han realizado algunos artículos sobre huracanes en Costa Rica, este trabajo muestra la implementación de anidados con modelos numéricos de generación de oleaje que ha desarrollado Módulo de Información Oceanográfica (MIO) en el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica y que se puede aplicar tanto para huracanes como para pronóstico operacional de oleaje diario en nuestras costas.

Palabras claves: Huracanes, Modelos numéricos, Viento y olas, Caribe, Pacífico, Costa Rica.

¹ Profesor Ad honorem del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR).

² Pertenece a Módulo de Información Oceanográfico (MIO), Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR).

Abstract

Wind and wave conditions are simulated for hurricanes with trajectory closest to Costa Rica. Distinguish among them the Hurricane Joan (1988), the most intense system (category 4) that has approached to ours Caribbean coasts, generating wind over 144 Km/h off the coast of Limón. On the other hand, Hurricane Otto (2016) was the first to enter our territory and although it generated great impact inland, on the coast had no effect. Wind simulation and wave propagation during hurricanes with numerical models in geographic nested grids from offshore to coastal regions, resulted in waves up to 4 m breaking in front of Limon Center during Hurricane Joan. Given the meteorological characteristics of the Hurricanes Irene and César, they were the ones that smaller wind magnitudes and wave heights generated around Limón. Although some hurricane applications have been carried out in Costa Rica, these results show the nested implementation in wave generation numerical models developed by Oceanographic Information Module (MIO) at Center for Research in Marine Sciences and Limnology (CIMAR) of the University of Costa Rica that can be applied to both hurricanes and daily operational wave forecast on our coasts.

Keywords: Hurricanes, Numerical models, Wind and wave, Caribbean, Pacific, Costa Rica.



Introducción

En el Pacífico de Costa Rica no ha habido ningún huracán que haya impactado directamente nuestras costas, pues la mayoría de los ciclones tropicales generados en esta zona, nace frente a las costas centroamericanas, derivan hacia el noroeste y alcanzan su intensidad más distante de Costa Rica (Alvarado y Alfaro, 2003). En el Caribe, tal y como lo señala el artículo de Lizano y Fernández (1996), antes de Huracán Otto del 2016, ningún huracán había impactado directamente a Costa Rica, según los registros del Centro Nacional de Huracanes con estadísticas desde 1851 (Fritz, 2016). Solo una tormenta tropical impactó a 65 km al noroeste de Limón en 1887, justamente en diciembre (Lizano y Fernández, 1996), cuando son comunes frentes del norte (Lizano, 2017-a; Amador, Alfaro, Lizano y Magaña, 2006, Zárate, 2013) y detienen o empujan a estos sistemas a latitudes más al sur. Esta tormenta produjo alta precipitación en la región, pero debido a la escasa población por donde entró la tormenta, no existe registro de impacto alguno debido a la tormenta (Díaz, 2004-2005). Antes del Huracán Otto, los huracanes más intensos en el Caribe que causaron efectos indirectos en Costa Rica (Alvarado y Alfaro, 2003) fueron Gilbert (1988), Allen (1980), Camille (1969), Mitch (1988) y Janet (1955). Sin embargo, como lo señalan también Alvarado y Alfaro (2003), los huracanes con mayores costos económicos y en vidas humanas fueron: Cesar (1996), Joan (1988) y Katie (1955). Lizano (2011) demuestra que la mayor altura de ola generada por un huracán no depende necesariamente de su intensidad o categoría, sino más bien, de su velocidad de avance. Huracanes como Fifi en 1974 y Joan en 1988, produjeron las mayores alturas de olas en la cuenca del Caribe y tuvieron la capacidad de generar el mayor impacto costero. Sin embargo, el impacto que puede generar un huracán no solo depende de su intensidad y velocidad de avance, sino también, de su trayectoria hacia la costa (Lizano, 2011; Alfaro et al., 2010), de la batimetría que atraviesa en la plataforma continental y de la existencia de cayos e islas que actúan como disipadores de la energía de las olas (Lizano, 2011). Se argumenta también (Lizano, 2011), que el impacto depende de la mayor vulnerabilidad de la creciente población costera

(Alfaro et al., 2010), y posiblemente, de los avisos oportunos que las instituciones gubernamentales emiten ante estos eventos océano-meteorológicos (Lizano, 2011).

Según El Financiero (Rodríguez, Salazar y Avendaño, 2017), de los tres huracanes analizados: Joan, César y Mitch, Joan fue el más benevolente para con el territorio costarricense. Sin embargo, los daños en infraestructura y vivienda, sin contar al sector agropecuario, se estimaron en ₡7.000 millones (unos ₡129.958 millones al 2016). Werner Stolz, jefe de Pronósticos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), catalogó a César como el huracán con mayores efectos negativos sobre el territorio nacional, entre los tres fenómenos analizados. Esto pese a llevar una trayectoria similar a la que siguió Joan y que posiblemente Otto emuló. Joan fue mucho más intenso, y aunque se reportaron grandes daños en la costa, las pérdidas que causó César fueron enormes, eso sí, más bien tierra adentro (Anónimo, 2009). De los informes de impactos en la costa, es claro que el Huracán Joan fue uno de los huracanes más destructivos en Centroamérica (INITER, 2010; Silva y León, 2003). Esto también tuvo relación con su poca velocidad de avance del Huracán Joan, lo que causó gran energía del oleaje, como demuestra el estudio de Lizano (2011), y los reportes de impactos costeros encontrados en la literatura, al menos sobre San Andrés (Lizano, 2011). Sobre las costas de Costa Rica, no se encontró reporte alguno que indicara impactos de los huracanes que se estudian en este artículo. Solo se cuenta con información de la intensidad de estos fenómenos en comunicaciones personales de lugareños.

En este trabajo se simula el viento y la altura de ola generada por los huracanes que han pasado más cerca de Costa Rica: Irene (1971), Joan (1988), César (1966) y Otto (2016) en el Caribe. Se muestra por primera vez en nuestro país el acople de tres anidados del modelo Simulating Waves Nearshore (SWAN, Booij et al., 1999) para resolver, con gran resolución, las características del oleaje alrededor de los puertos de Moín y Alemán. Este acople ya estructurado del modelo de oleaje, permitirá hacer anidados en nuestras costas según disponibilidad de batimetrías, ya sea para casos de huracanes o para realizar pronósticos operacionales de oleaje en nuestros puertos, tanto en el Caribe, como en



el Pacífico. Esta actividad ya se está desarrollando en el Módulo de Información Oceanográfica (MIO) del CIMAR (comunicación personal con Rodney Mora, coordinador del MIO), Universidad de Costa Rica, y permitirá alertas tempranas, tanto para la navegación, como para turistas, visitantes ocasionales a las playas o residentes costeros, que contarán con información más precisa y focalizada ante eventos que puedan representar una amenaza o riesgo.

Metodología

La trayectoria de los huracanes fueron obtenidas desde la base de datos de UNISYS (2017) y de la base de datos de HURDAT2 (2019). La batimetría para simular la propagación de oleaje desde agua profunda, se elaboró de los datos de GEBCO-08 de la British Oceanographic Data Centre (BODC). Batimetría costera se elaboró digitalizando los contornos desde las cartas náuticas de navegación de la NOAA, obtenidas a través de BlueCharts g2 de Garmin (<https://maps.garmin.com/>), que hay para Limón y los puertos Alemán, Moín y el Golfo de Nicoya. La simulación de los vientos de huracán se elaboró con el modelo HURWIN ajustado según Lizano (1990; 2006). La generación y propagación de oleaje hacia la costa se realizó con el modelo SWAN ver 40,72 (Ris, 1997) utilizando los parámetros por defecto que tiene el modelo: frecuencias de olas desde 2,5 a 25 Hz y con 36 direcciones para definir el espectro de energía. La física del modelo incluyó GEN3 (modo de tercera generación para la entrada de viento), BREA (rompimiento de oleaje inducido por el fondo), FRIC (activa fricción por el fondo), TRIAD (interacción de triadas en la interacción onda-onda) y QUAD (interacción de ondas no lineales con cuádrupletas). La graficación se realizó con los paquetes MATLAB R2014a y SURFER ver. 11. El registro de oleaje de un correntímetro anclado en el fondo, administrado por el Centro Científico Tropical (CCT) en Moín y que realizaba mediciones de altura y período durante el Huracán Otto, fue suministrado por IMARES de la Universidad de Costa Rica. Este fue editado para obtener las mediciones cada tres horas y correlacionarlas con las respectivas simulaciones del modelo de ola.

Resultados

Como muestra la figura 1, en el Caribe, el Huracán Otto en el 2016 fue el único huracán que ha ingresado directamente a Costa Rica según los registros del Centro Nacional de Huracanes (NHC por sus siglas en inglés), que se tienen desde 1851 (NOAA, 2019 ; Landsea et al., 2004). El de máxima categoría sin duda fue para el Huracán Joan, que alcanzó categoría 4 cuando se aproximaba a las costas de Nicaragua. El Huracán Irene fue el más débil de todos estos analizados.

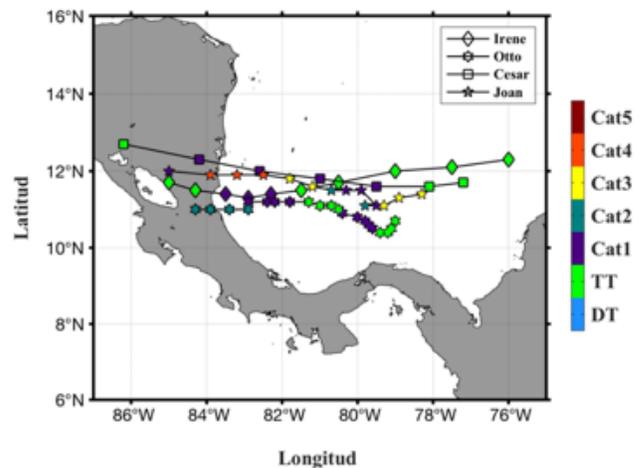


Figura 1. Trayectorias y categorías de los huracanes más cercanos a Costa Rica.

Coherentemente con lo expresado en el párrafo anterior, como lo indica la figura 2, el huracán que tuvo los vientos simulados más intensos frente a nuestras costas ($40 \text{ m/s} = 144 \text{ km/h}$), fue el Huracán Joan (figura 2B). En segundo lugar, el Huracán Otto ($30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$) (figura 2C). Como ya se ha señalado anteriormente, y se comentará más adelante, este comportamiento tiene que ver con las características de parámetros ambientales de cada huracán, como muestra el cuadro 1.

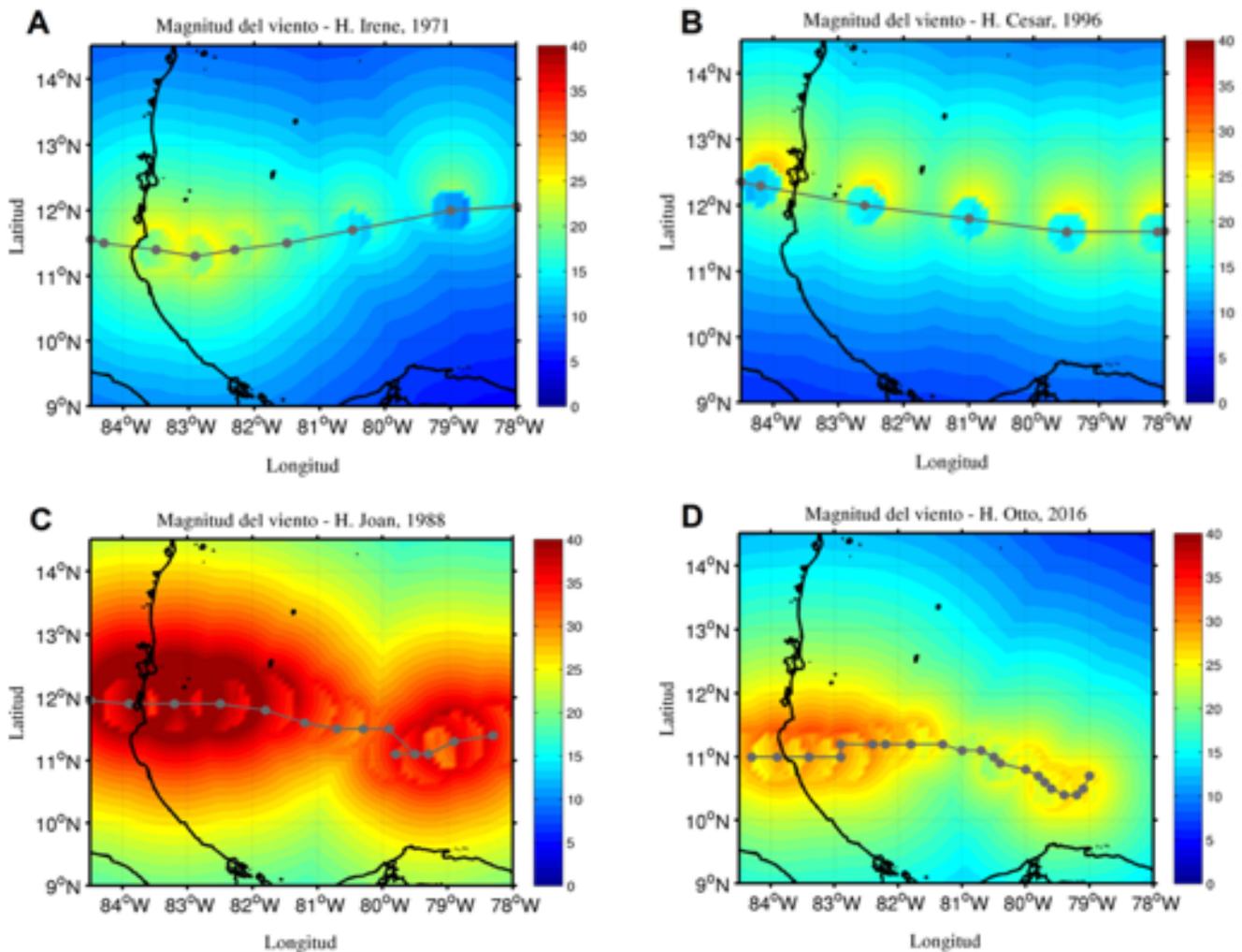


Figura 2. Sobreposición de vientos máximos (m/seg) cada 6 horas para los huracanes A: Irene, B: César, y cada 3 horas para C: Joan y D: Otto.

El Huracán Joan fue el que tuvo la presión promedio más baja, el mayor radio de viento máximo, una baja velocidad de avance, la menor diferencia de presión ambiental y en el ojo y la mayor categoría de huracán. El segundo en intensidad fue el Huracán Otto, y con la menor velocidad de avance.

Cuadro 1.

Características de variables ambientales de los huracanes estudiados

Huracán	Pres prom (mb)	Rad Prom (Km)	Vel Prom (km/hr)	Δ Pres (mb)	Categoría
Irene	998,12	34,05	18,95	17,87	1
César	993,56	34,05	29,45	22,44	1
Joan	959	44,73	11,4	57	4
Otto	985,66	36,31	11,06	30,33	2

Pres Prom: presión atmosférica promedio en el ojo.

Rad Prom: Radio promedio de viento máximo.

Vel Prom: velocidad de avance promedio.

Δ Pres: diferencia promedio entre la presión atmosférica ambiental y la presión en el ojo.

Utilizando las batimetrías de la figura 3, con una secuencia de tres mayas anidadas para el modelo de olas, se simularon las alturas de olas para cada huracán, como muestra las figura 4.



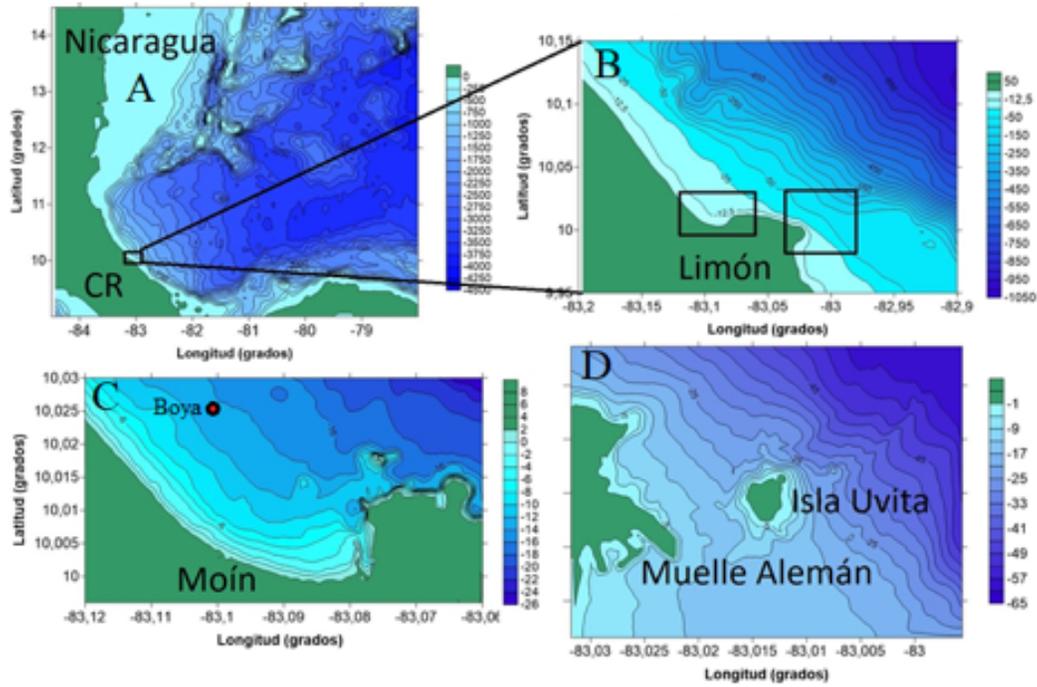


Figura 3. Batimetrías (m) de utilizadas para simular oleaje.

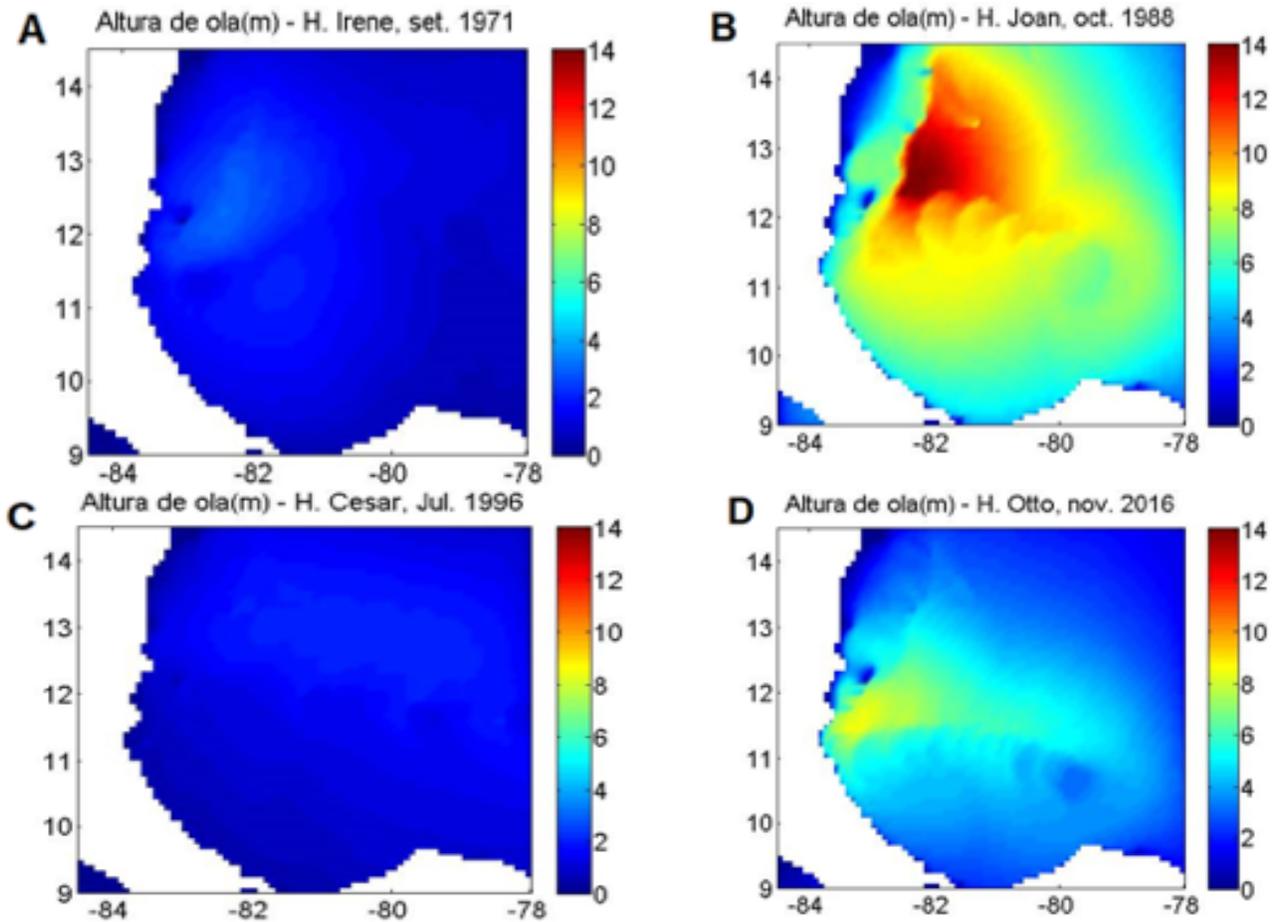


Figura 4. Distribución de altura (m) de ola sobrepuesta cada 3 horas a lo largo de la trayectoria para los huracanes A: Irene, B: Joan, C: César y D: Otto.



Es evidente que el Huracán Joan generó la máxima altura frente a Nicaragua (14 m) al aproximarse a la costa justo al frente de la serie de islas y bajos batimétricos (figura 4.), rasgos batimétricos que actúan como disipadores del oleaje (Lizano, 2011). Pero también este huracán fue el que generó mayor altura de ola mar adentro al frente de Limón, con alturas significativas de alrededor de los 6m. El Huracán Otto en segundo término, pudo generar alturas de hasta 8-9m mar adentro al aproximarse a la costa, máximo que está más al sur respecto del Huracán Joan. El siguiente con alturas perceptibles apenas en el gráfico (que fueron todos escalados iguales, para mejor comparación), es el Huracán

Irene, con el máximo también al acercarse a la costa y con aproximadamente 4 m, y por último el Huracán César con el máximo de altura de ola menor de los 3 m mar adentro, características que como se mencionó anteriormente, están relacionadas a sus parámetros ambientales a lo largo de la trayectoria.

Para conocer las características de los dos principales huracanes cerca de nuestras costas en el Caribe: Joan y Otto, se simularon las condiciones de oleaje en mayas anidadas con el modelo SWAN usando las batimetrías de la figura 3 alrededor del Muelle Alemán y del Puerto en Moín. Estas simulaciones se muestran en las figuras 5 y 6:

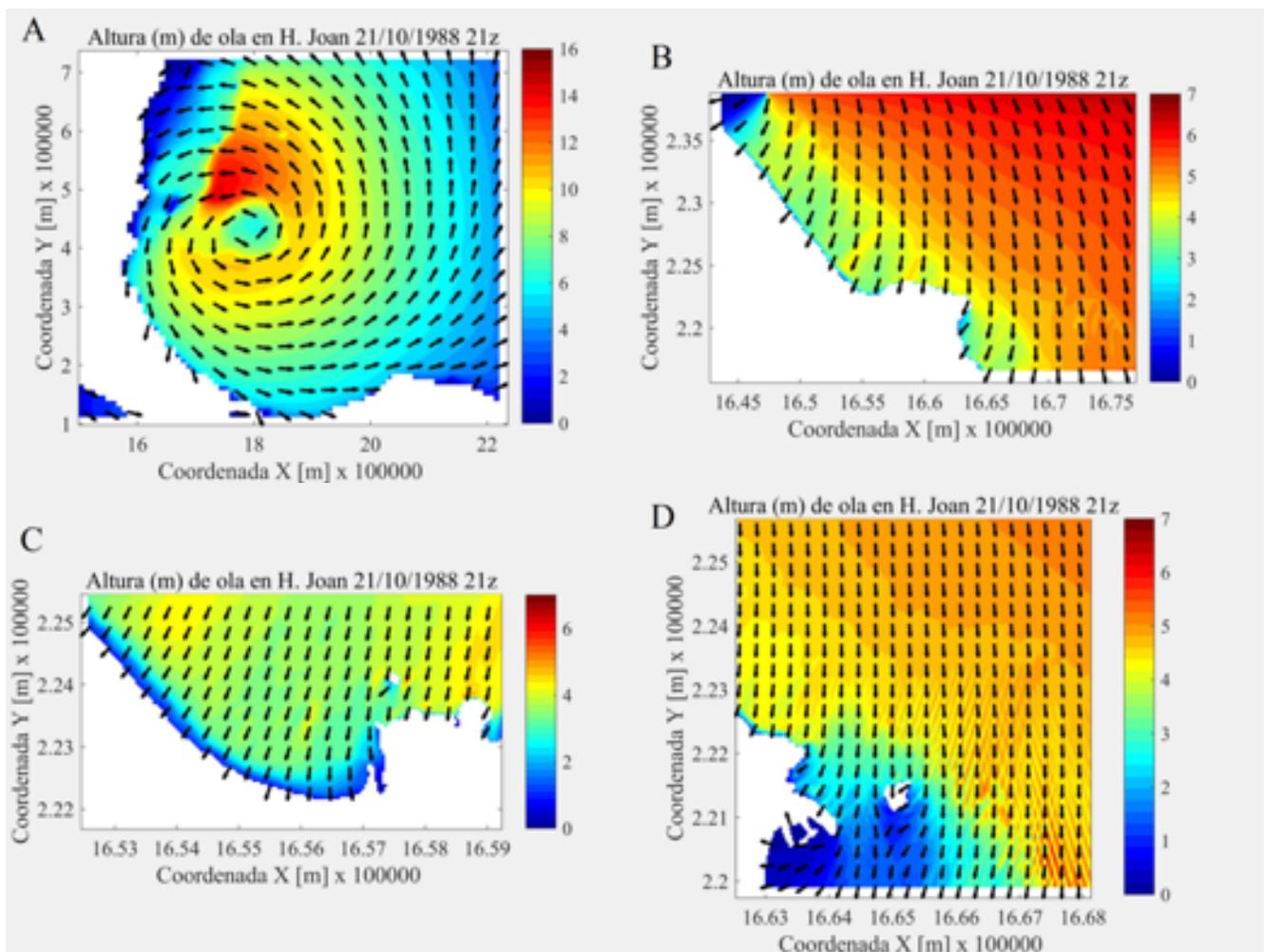


Figura 5. Distribución de la altura (m) de ola para el Huracán Joan en su posición de máxima energía de ola al frente de Puerto Limón. A: Caribe, B: Limón, C: Moín y D: Limón Centro.



Como muestran la figura 5, el Huracán Joan pudo generar olas sobre los 15 m al frente de los cayos e islas del Caribe de Nicaragua (figura 5A), con alrededor de 4 m sobre el borde norte (Hospital de Limón) en Limón Centro (figura 5D) y de unos 3 m al frente de la playa de Moín (figura 5C). Un rasgo importante de la simulación al frente de Limón Centro (figura 5D), es el efecto de “sombra” de oleaje (menores alturas) que produce la Isla Uvita sobre el Muelle Alemán y sus alrededores.

Por otro lado, el Huracán Otto generó alturas menores que el Huracán Joan (figura 6), con olas sobre los 7 m antes de entrar a tierra (figura 6A), con olas menores de los 3 m al frente de Limón Centro y con alrededor de 3 m sobre el Megapuerto de Moín. Es pertinente subrayar que para este huracán ya se tenía la estructura del megapuerto de APM TERMINALS, como lo muestra la figura 6C. Justamente sobre esta estructura se produce la mayor altura de ola como efecto combinado de refracción-reflexión del oleaje sobre la misma.

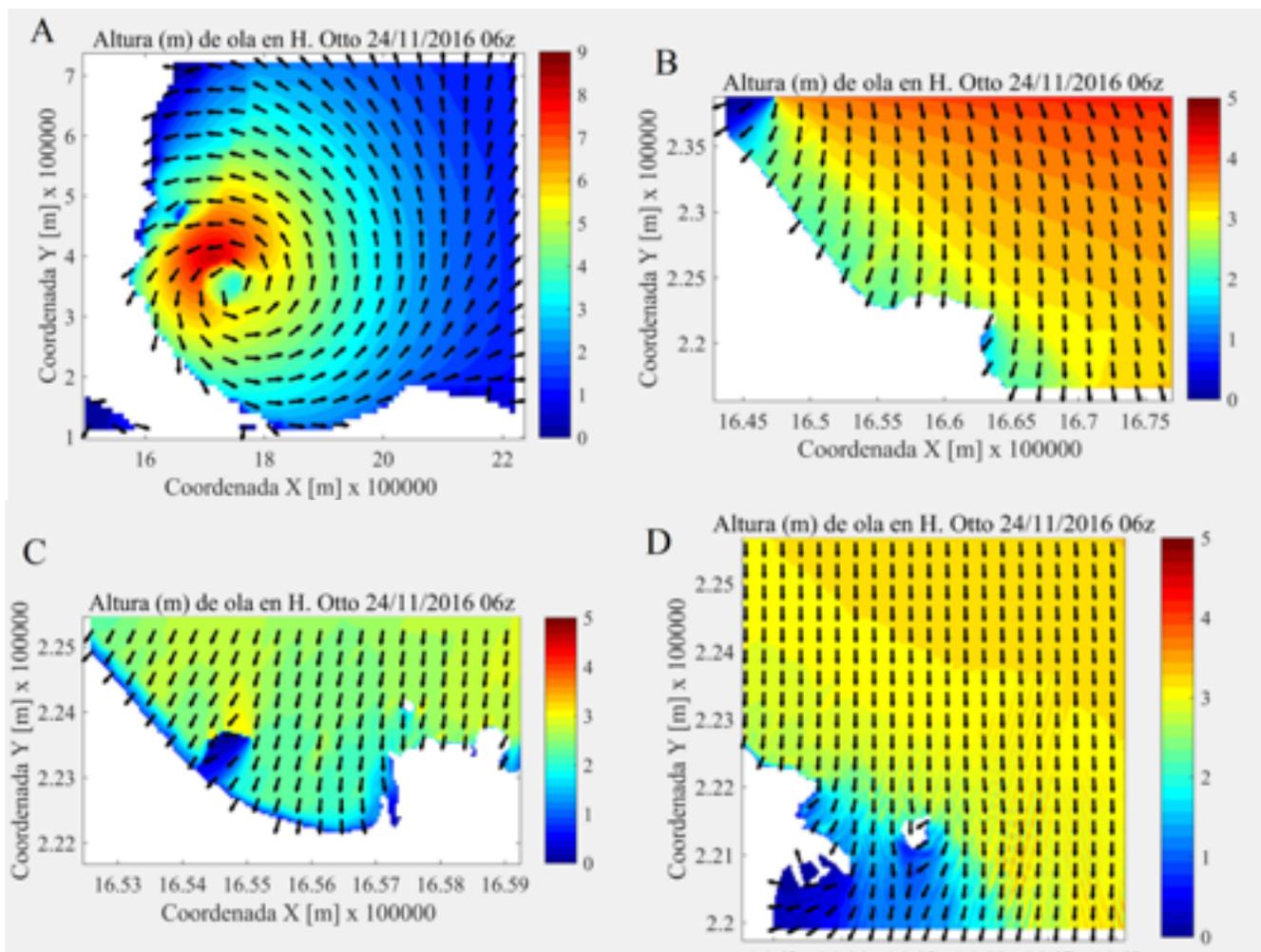


Figura 6. Distribución de la altura (m) de ola para el Huracán Otto en su posición de máxima energía al frente de Puerto Limón. A: Caribe, B: Limón, C: Moín y D: Limón Centro.



Por suerte, durante el Huracán Otto, el Centro Científico Tropical (CCT) tenía un correntímetro midiendo oleaje en una boya oceánica (figura 3C) para el Megapuerto de Moín (APM TERMINALS). La comparación de las mediciones del correntímetro y las del modelo se muestran en la siguiente figura 7:

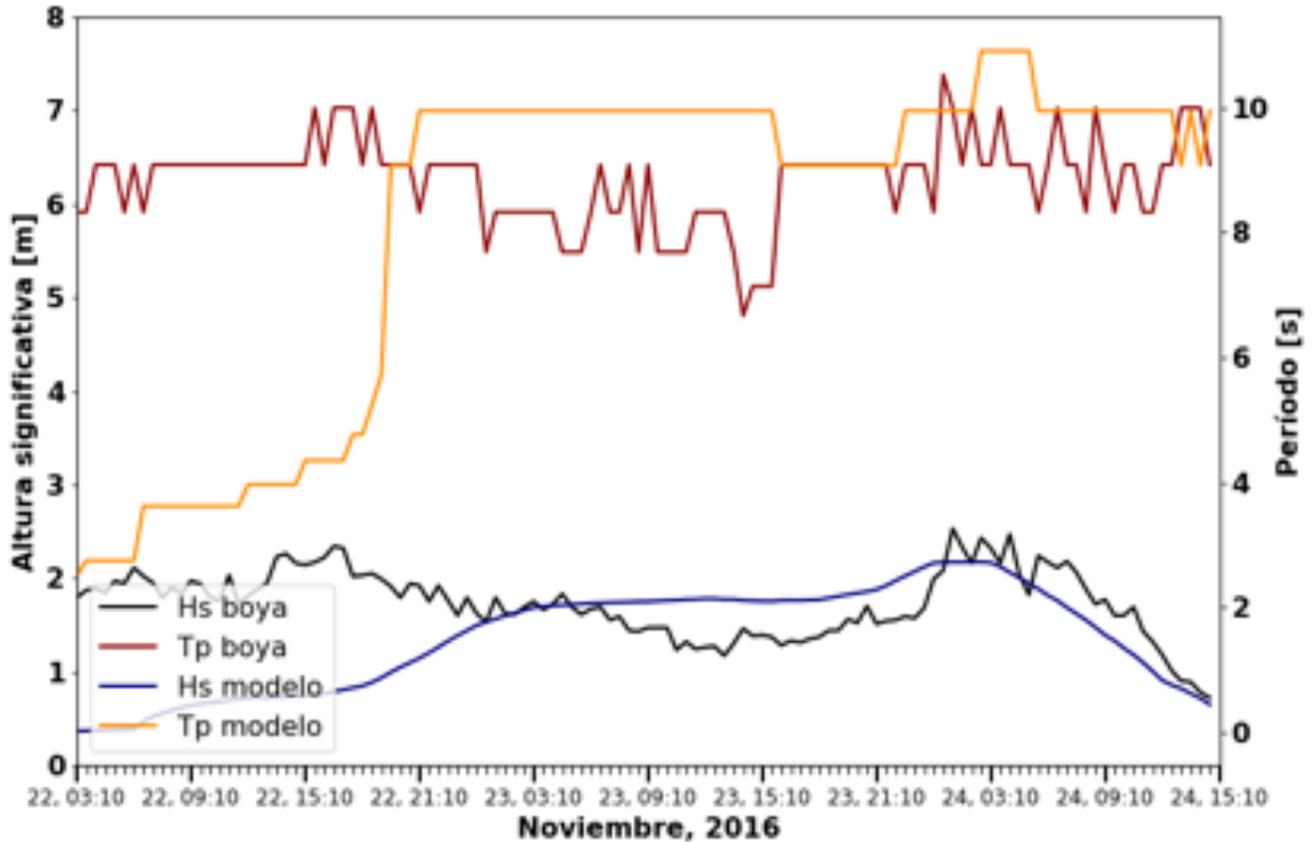


figura 7. Perfiles temporales (hora local) de altura (Hs) y período (Tp) de ola durante el paso del Huracán Otto por la boya de Moín (figura 3C).

Como el modelo de oleaje necesita un tiempo de ajuste en la distribución espacial de oleaje de al menos 24 horas (Lizano, 2006), pues inicia sin ninguna energía de oleaje en las fronteras, es claro en la figura 7, que al principio hay diferencia entre ambos datos, pero a partir del 23 de noviembre a

las 00:00 se muestra el ajuste entre los resultados del modelo y las mediciones de la boya. El modelo capturó perfectamente, el máximo de oleaje durante este huracán alrededor de las 03:00 (hora local) de 24 de noviembre, como también la disminución del oleaje luego de ese máximo.



Conclusiones y recomendaciones

Según los resultados de este estudio, es claro que el Huracán Joan ha sido el sistema meteorológico más intenso en nuestras costas. Esto se deriva de las características meteorológicas que imperaron a lo largo de su trayectoria. Alcanzó categoría 4, con la menor presión atmosférica central y baja velocidad de avance. Debió generar impactos costeros como lo recuerdan algunos lugareños de Limón, sin embargo, no se encuentra evidencia en la literatura de efectos en Costa Rica. El Huracán Otto en noviembre del 2016 se mantuvo serpenteando al frente a nuestras costas por el efecto de un empuje frío de América del Norte (Brown, 2017), y este mismo frente fue el causante de que por primera vez ingresara un huracán a nuestro territorio. El impacto en tierra fue enorme, pero en la costa no causó mayor efecto, más que el incrementar la erosión que se ha venido dando en las playas del Caribe (Lizano, 2013).

Las simulaciones de oleaje en las batimetrías de gran resolución espacial frente a Limón Centro y Moín, muestran alturas de olas de hasta 4 m al frente de Limón para el Huracán Joan, y menores en Puerto Moín. En el caso del Huracán Otto, las simulaciones en los anidados con el modelo de oleaje para tener valores en la boya de Moín, mostró una buena correlación entre los datos simulados y los medidos. Esto da confianza en el uso de estos modelos numéricos, tanto para simular huracanes (Lizano, 2006), como para realizar pronósticos diarios en esta zona.

Por otro lado, como lo advierten Alvarado y Alfaro (2003), los huracanes podrían estar entrando en un nuevo ciclo. Justo con el recién impacto de los huracanes Harvey e Irma en Estados Unidos, se ha reactivado el impacto que podría tener el calentamiento global en el desarrollo de estos sistemas (Smily, 2017) y su relación con el aumento del nivel del mar. Aunque se argumenta que es muy prematuro relacionar el efecto antropogénico en la generación de huracanes, es muy probable que el calentamiento antropogénico hará que los

ciclones tropicales sean más intensos en todo el mundo (GFDL, 2019) (de 1 a 10% de acuerdo con las proyecciones del modelo para un escenario del IPCC A1B). Este cambio implicaría un incremento porcentual aún mayor en el potencial destructivo por tormenta. Pero, además, simulaciones de cambio climático con modelos numéricos de alta resolución espacial, indican un aumento dramático de los huracanes que cambian rápidamente de categoría, y que son erróneamente pronosticados. Estos fenómenos causan enormes pérdidas económicas y de vidas humanas (Bhatia et al., 2019). El aumento del nivel del mar (Lizano, 2013), implicará un mayor impacto tierra adentro. Es probable que aumente la precipitación, intensidad y el número de huracanes intensos (GFDL, 2019). De manera que habrá que tomar acciones políticas para reducir los impactos futuros en nuestras comunidades costeras. Información oportuna ante estos eventos siempre es la mejor herramienta para reducir el riesgo en regiones propensas al embate de las condiciones severas del mar. El MIO-CIMAR mantiene información oceanográfica a través de su página web (www.miocimar.ucr.ac.cr) o de su aplicación para celulares (MIO-CIMAR), donde también se dan advertencias que puede orientar en caso de amenaza de estos fenómenos.

Glosario de términos

Agua profunda: profundidad a la cual no alcanza el movimiento del agua de una ola superficial.

Anidada: Dicho de un ave: Hacer nido o vivir en él.

Batimetría: Representación de las profundidades de los cuerpos de agua, que tiene como fin determinar el relieve del fondo.

Categoría de huracán: Según la intensidad de los vientos, se les pueden asignar: Categoría 1 (Vientos entre 118 y 153 Km/hr), Categoría 2 (Vientos entre 154 y 177 Km/hr), Categoría 3 (Vientos entre 178 y 209 Km/hr), Categoría 4 (Vientos entre 210 y 250 Km/hr) y Categoría 5 (Vientos de más de 250 Km/hr).

Empuje frío: viento proveniente del Hemisferio Norte generado por sistema de alta presión.



Huracán: fenómeno meteorológico cuya velocidad del viento es igual o superior a los 107Km/hr.

Plataforma continental: Zona del piso oceánico adyacente a los continentes que se extiende desde la línea de la baja mar hasta donde la pendiente tiene un incremento notorio y se forma el talud continental.

Presión atmosférica: Peso por unidad de área de la masa total de aire que existe encima de un punto determinado; también recibe el nombre de presión barométrica.

Radio de viento máximo: Distancia desde el centro del ojo del huracán a la cual se da la máxima velocidad de rotación de los vientos.

Refracción de oleaje: cambio de dirección de las olas generada por las variaciones de batimetría.

Talud continental: Parte del margen continental de mayor pendiente que sigue luego de la plataforma continental.

Referencias bibliográficas

Alfaro, E.; Quesada, A. y Solano, F. (2010). Análisis del impacto en Costa Rica de los ciclones tropicales ocurridos en el Mar Caribe desde 1968 al 2007. *Diálogos, Revista Electrónica de Historia*, 11(2). pp. 22-38.

Alvarado, L. y Alfaro, E. (2003). Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. *Top. Meteor. Oceanogr*, 10 (1). pp. 1-11.

Amador J.; Alfaro, E.; Lizano O. y Magaña, V. (2006). Atmospheric forcing in the eastern tropical pacific. En: Lavín, M. y Fiedler, P. eds. (2006). *A Comprehensive review of the oceanography of the eastern tropical pacific. Progress in Oceanography*. 69. pp. 101-142.

Bhatia, K.; Vecchi, G.; Knutson, T.; Murakami, H.; Kossin, J.; Dixon, K. y Whitlock, C. (2019). Recent increases in tropical cyclone intensification rates. *Nature Communications*, 635(10). pp. 1-9.

Booij, N.; Ris, R. y Holthuijsen, L. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 104. pp. 7649– 7666.

Brown, D. (2017). Hurricane Otto : National Hurricane Center Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL162016_Otto.pdf

Díaz, R. E. (2004-2005). La tormenta tropical de 1887 y su paso por las fuentes históricas costarricenses. *Revista Estudios*, 18-19. pp.39-56.

El Huracán Otto. (2017). Wikipedia. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Otto#cite_note-15

Fritz, A. (2016, 22 de noviembre). Otto could be first hurricane to make landfall in Costa Rica since at least 1851. *The Washington Post*. Recuperado de: https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2016/11/22/otto-could-be-first-hurricane-to-make-landfall-in-costa-rica-since-at-least-1851/?noredirect=on&utm_term=.856be6982c39.

Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. (2019). Global warming and hurricanes : an overview of current research results. Recuperado de: <https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/>.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. (2010). Huracán César (1996). Recuperado de: http://www.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/Desastres/Huracanes/huracan_cesar.htm.

Landsea, C.; Anderson, C.; Charles, N.; Clark, G.; Dunion, J.; Fernandez-Partagas, J.; Hungerford, P. Neumann, C. y Zimmer, M. (2004). The atlantic hurricane database re-analysis project: documentation for the 1851-1910 alterations and additions to the hurdat database. En: Murname R. y Liu, K., eds., (2004). *Hurricanes and typhoons :*



past, present and future. EEUU : Columbia University Press.

Lizano, O. (1990). Modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico durante huracanes. *Geofísica*, 33. pp. 75-103.

Lizano, O. (2006). Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de Tercera Generación. *Boletín Científico CIOH*, 24. pp. 36-47.

Lizano, O. (2011). Altura máxima de ola en huracanes con trayectorias similares en el Caribe Centroamericano y su relación con los impactos costeros. *Boletín Científico CIOH*, 29. pp. 46-59.

Lizano, O. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, XIV (17). pp. 6-27.

Lizano, O. (2017). Atmospheric and oceanographic conditions during the Hurricane Otto in November 2016 in the Caribbean of Costa Rica. Informe (no publicado) a ICICOR Costa Rica S.A.

Lizano, O. (2017a). Los accidentes acuáticos alrededor de nuestras costas y su relación con el estado del mar y de la atmósfera. *Revista En Torno a la Prevención*, (18). pp. 07-14.

Lizano, O. y Fernández, W. (1996). Algunas características de los huracanes que han atravesado el Caribe adyacente a Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 3 (1). pp. 3-10.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). Base de datos de HURDAT2. Recuperado de: <https://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>.

Ris, R. (1997). Communications on hydraulic and geotechnical engineering : spectral modeling of wind waves in coastal areas. Report no. 97-4. Faculty of Civil Engineering. Delf University of Technology.

Rodríguez, A. (2016, 27 de noviembre). Huracanes se ensañan con región más pobre del país. *El Financiero*. Recuperado de: <https://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/huracanes-se-ensanan-con-region-mas-pobre-del-pais/VSA47SNZHNB7RL6A7QPEUIBUWM/story/>.

Silva, J. y León, S. (2003, 8 de junio). Huracán Joan dejó un aire siniestro de barcos fantasmas. *La Prensa*, Nicaragua. Recuperado de: <https://www.laprensa.com.ni/2003/06/08/nacionales/890508-huracn-joan-dej-un-aire-siniestro-de-barcos-fantasmas>

Smiley, D. (2017, 8 de septiembre). Miami's mayor on Hurricane Irma : 'if this isn't climate change, i don't know what is'. *Miami Herald*. Recuperado de: <https://www.miamiherald.com/news/weather/hurricane/article172080587.html>.

UNISYS. (2019). Dase de datos. Recuperado de: http://weather.unisys.com/hurricane/e_pacific/2008H/ALMA/track.gif.

Zarate, E. (2013). Climatología de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe y su relación con algunos índices Árticos. *Tópicos Meteorológicos*, 12. pp. 35-55.

