

Inundaciones costeras provocadas por el huracán Irma en el malecón habanero los días 9 y 10 de septiembre 2017



Coastal floods provoked by hurricane Irma through Havana's seawall on september 9 and 10, 2017

<http://opn.to/a/3K2go>

Reinaldo Casals-Taylor ^{1*}, Nilo Hernández-Orozco ¹, Pedro Jorge Pérez-Osorio ¹, Frank Ernesto-Ortega ¹, Rafael Pérez-Parrado ¹, Lorena Menéndez-Fernández-Cueto ¹, Niurka Mosqueda-Borges ¹

¹Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.

RESUMEN: Durante los días 8 al 10 de septiembre de 2017, el archipiélago cubano fue afectado grandemente por el huracán Irma. En este trabajo se emprende el análisis de las inundaciones costeras ocurridas en el Malecón de La Habana, debidas al incremento del nivel el mar inducido por el oleaje incidente. El objetivo principal es actualizar el mapa de inundaciones costeras para los municipios Centro Habana y Plaza de la Revolución, y ofrecer valoraciones sobre la presión del oleaje incidente sobre las obras de protección. Fue empleado el sistema Mapinfo para actualizar la capa de alcance de las inundaciones en la zona de la capital aledaña al malecón, y se aplicó una metodología para el cálculo de la potencia de impacto de la ola sobre las estructuras, considerando la teoría lineal. Se concluyó que fue muy significativa la intensidad del oleaje que llegó al límite de aguas profundas adyacentes al Malecón habanero desde la noche del 9 hasta el 10 de septiembre, con altura significativa entre 7,0 - 9,0 metros que dieron lugar a inundaciones catalogadas de fuertes en extremo, según clasificación del Centro de Meteorología Marina del INSMET, y se obtuvo el valor de la potencia de impacto del oleaje que arrojó sobre la costa fragmentos de roca con pesos entre 1 y 3 toneladas.

Palabras clave: Inundación costera, energía, potencia de impacto, altura de la ola significativa.

ABSTRACT: From September 8 to 10, 2017, the Cuban archipelago was strongly beaten by hurricane Irma. In this paper it is performed the analysis of floods by sea invasions occurred through Havana's seawall, due to sea level increment induced by breaking waves. The main objective is to update the map of coastal floods for Centro Habana and Plaza de la Revolucion municipalities, and to offer assessments about the wave pressure on protection works. It was employed Mapinfo geographic information system for updating the flood extension layer on capital area adjacent to Havana's seawall, and it was applied a computing methodology for obtaining the wave impact force on vertical structures, taking into account lineal theory. It was concluded that was very significant the wave intensity that came on deep water boundary adjacent to Havana's seawall from September 9 at night up to September 10, with significant waves among 7,0 and 9,0 meters height that provoked extremely strong coastal floods, according to Marine Meteorology Center of the Institute of Meteorology, and it was obtained the impact forces values that resulted in the throwing of rock pieces weighting between 1 and 3 tons.

Key words: Coastal flood, energy, impact force, significant wave height.

*Autor para correspondencia: Reinaldo Casals-Taylor. E-mail: reinaldo.casals@insmet.cu

Recibido: 10/10/2018

Aceptado: 02/04/2019

INTRODUCCIÓN

La Tarea Vida, plan nacional de estado para enfrentar el cambio climático, considera la protección o reubicación de asentamientos costeros vulnerables a invasiones marinas por incrementos del nivel del mar, dado el posible aumento de la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales, y la tendencia al incremento paulatino del nivel del mar a nivel global. Algunas zonas costeras son particularmente vulnerables a los incrementos del nivel del mar por causas meteorológicas, y el litoral norte de La Habana es una de las áreas priorizadas para ejecutar obras de protección y otras acciones preventivas ante inundaciones costeras.

Entre el 8 y 10 de septiembre de 2017, el huracán Irma desarrolló una trayectoria de máximo peligro para la costa norte de Cuba, con rumbo Oestenoroeste desde los mares al norte de Guantánamo y Holguín que lo llevó a tocar tierra en Cayo Romano, al norte de la provincia Camagüey, y continuar por la costa norte de las provincias Ciego de Ávila, Sancti Spíritus y Villa Clara.

Este huracán llegó a territorio cubano con categoría 5 de la escala de Saffir - Simpson, por lo cual el oleaje resultante alcanzó alturas máximas entre 12,0 y 15,0 metros en zonas de aguas profundas¹.

En la costa norte de Cuba la altura de la ola dependió de la distancia de propagación del oleaje hasta el límite de aguas profundas, así en la costa norte de Guantánamo llegaron hasta este límite olas entre 5,0 y 6,0 metros, de Holguín a Las Tunas llegaron olas entre 6,0 - 7,0 metros, desde Camagüey hasta La Habana llegaron olas entre 7,0 y 9,0 metros y en Artemisa las olas alcanzaron entre 6,0 - 7,0 metros. Esta situación se extendió por más de 12 horas para cada territorio mencionado.

Hay que destacar que los procesos de transformación de oleaje provocan una disminución de la altura de la ola por disminución de la profundidad, y a la vez un incremento del nivel del mar que supera la línea costera habitual, haya o no obras de protección

costera. Contribuyó también al incremento del nivel del mar e intensidad de las inundaciones, la acción de la surgencia generada en las provincias desde Camagüey hasta Villa Clara.

Por la costa sur, la influencia de los vientos con intensidad de tormenta tropical generó incrementos del nivel del mar e inundaciones, con daños a estructuras civiles en las provincias Granma, Camagüey, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus y Cienfuegos.

Ya a partir del final de la tarde del 10 de septiembre, mientras estaba situado a unos 45 kilómetros al norte de Península de Hicacos, Matanzas, el huracán inclinó su rumbo hacia el Nortenoeste en dirección a los cayos del sur de La Florida, lo que contribuyó a normalizar paulatinamente las condiciones del estado del mar en ambas costas afectadas.

A causa de este evento meteorológico extremo, los daños por la penetración del mar fueron extensos y con una intensidad inédita en varias localidades costeras del país, superando las afectaciones provocadas por otros ciclones tropicales con similar trayectoria, como Kate en noviembre de 1985 y Georges en septiembre de 1998.

En el caso de La Habana, se asegura que las inundaciones provocadas por el huracán Irma, superaron en algunas zonas de la ciudad la extensión de las provocadas por el huracán Wilma en octubre de 2005, según [Informe Técnico del Centro de Meteorología Marina \(2006\)](#). Así mismo, pocas veces se ha visto fragmentos de roca caliza arrastrados o lanzados desde la zona de rompiente de oleaje hacia la calle, de modo que resultó de interés conocer cuál fue la potencia desarrollada por el oleaje rompiente para mover bloques rocosos de alrededor de una tonelada de peso.

La potencia transportada por la ola depende directamente del cuadrado de su altura y del período, y es usualmente dada en unidades de watts por metro lineal de longitud de cresta (W/m). Dada esta relación, es evidente que la disminución de la altura de la ola con la reducción de la profundidad es importante en el estudio de la distribución de la energía en la zona

¹Toda profundidad cuyo valor sea superior a la mitad de una longitud de onda.

de aguas someras. La determinación de la presión ejercida por una ola contra un obstáculo, debida a la transferencia de su energía cinética sobre el mismo, es de gran interés para el cálculo de la fuerza del impacto.

Una forma válida de conocer la energía que transporta el oleaje es a partir de aplicar la ecuación de Pearson - Moskovitz (citado por [Fernández Díez](http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=5), <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=5>) para obtener la potencia del oleaje, en la forma:

$$N_L = 0,549H_s^2T_z(\text{kW/m}), \quad (1)$$

siendo $T_z = 0,7104T_p$, donde T_z es el período en el cruce del perfil de onda por la amplitud cero, T_p es el período pico y H_s es la altura significativa de la ola.

A partir de esta ecuación se pueden obtener diagramas como el de la [figura 1](#), que permiten determinar la potencia de la ola en kW por metro de frente de onda.

También se puede calcular el flujo de energía (F) aplicando la ecuación de [Dean y Dalrymple \(1991\)](#), que considera la velocidad de grupo de las olas en profundidades intermedias y reducidas, teniendo en cuenta las transformaciones experimentadas por el oleaje en esas profundidades:

$$F = \left(\frac{1}{8}\rho gH\right) \times \left(\frac{L}{T}\right) \times \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h}{L} \operatorname{sinh}\left(\frac{4\pi h}{L}\right)\right)\right]$$

El presente trabajo persigue los objetivos de actualizar los mapas de inundaciones costeras por

eventos hidrometeorológicos en los municipios Centro Habana y Plaza de la Revolución, y ofrecer una primera aproximación a los cálculos de la potencia del oleaje que arribó a la zona de ubicación del Malecón Habanero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos empleados para la obtención de los resultados principales fueron la observación directa de las marcas visibles de la inundación durante la expedición al litoral de la ciudad, y las entrevistas con residentes afectados.

Además, fueron consultados informes del estado del tiempo, Avisos Marinos, páginas especializadas, fotos y videos de aficionados. Participaron de esta acción especialistas del Centro de Meteorología Marina, el Centro de Pronósticos del Tiempo y el Centro Meteorológico Provincial de Artemisa - Mayabeque, con la posibilidad de contar con un equipo GPS en algunas jornadas de trabajo. Los mapas fueron actualizados con el empleo de Mapinfo 10.5.

Se siguió la evolución del oleaje generado por el huracán mediante los datos de reanálisis del sitio <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>, los cuales fueron visualizados con el empleo del paquete de procesamiento de datos en rejilla GrADS.

Los resultados de las variables altura de ola y período fueron tomados como datos para la aplicación de cálculos de *wave setup* o

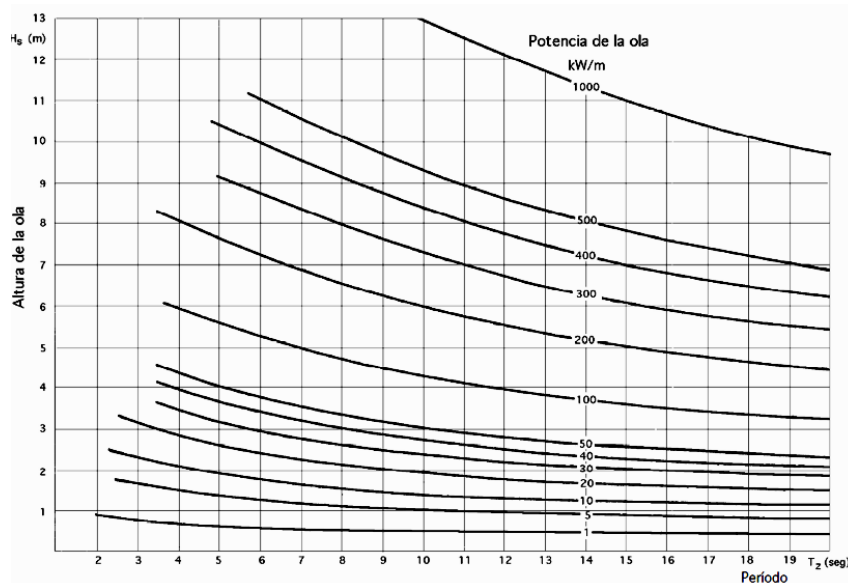


Figura 1. Valores de potencia de la ola en kW/m, en función de la altura y el período de la ola.

sobreelevación del nivel del mar por efecto del oleaje y potencia del oleaje.

El cálculo del *wave setup* se realizó mediante la ecuación:

$$\eta_s = \eta_b + \frac{h_b}{1 + \frac{8}{3\gamma_b^2}}$$

donde:

$\eta_b = -\frac{1}{16}\gamma_b^2 d_b$ (altura de la superficie del mar en el punto de ruptura)

$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b}$ (índice de profundidad de ruptura) con H_b (altura de la ola en ruptura) y d_b (profundidad de ruptura). Más detalles de esta metodología se pueden encontrar en CEM (2002),

El método de cálculo del flujo de energía o potencia de la ola parte de aplicar la ecuación a la onda reflejada, que es lo que comúnmente ocurre en el frente del muro del Malecón habanero. La ecuación empleada es:

$$E_r = \frac{\rho g \lambda b H_r^2}{16}$$

donde H_r es la altura de la ola reflejada y afectada por procesos de transformación, λ es la longitud de onda de la ola transformada, que se reduce a casi la mitad con respecto al ambiente en aguas profundas, ρ es la densidad del agua de mar (1025 kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y b se toma como 1 metro de frente de onda. El desarrollo teórico se puede encontrar en <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=5>.

El resultado se obtiene en Joule (J) y se multiplica por un factor de $0,1019716 \times 10^{-3}$ para expresarlo como potencia de impacto de la ola en kilo Joule por metro lineal de costa (kJ/m).

Las transformaciones que experimentan las alturas de las olas se obtienen a base de calcular el coeficiente de *shoaling* o asomeramiento (K_s)

y el coeficiente de refracción (K_r) en la zona donde la profundidad es aproximadamente igual a la vigésimo quinta parte de la longitud de onda.

Se tiene en cuenta que el cálculo del coeficiente de *shoaling* se realiza a partir de los resultados de las velocidades de grupo de las olas en aguas profundas y en profundidades reducidas (C_{g0} y C_g , respectivamente).

$$K_s = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}}$$

Por su parte, el coeficiente de refracción se interpreta como la diferencia de separación entre los rayos de onda en aguas profundas y en profundidades reducidas, cuando los frentes de onda llegan a aguas poco profundas con alguna inclinación con respecto a las líneas de igual profundidad. La separación entre los rayos de onda equivale a que la velocidad de propagación del frente de onda se reduce en la parte donde la ola transita sobre aguas menos profundas.

En las condiciones del litoral de La Habana, puede ser aplicada la Ley de Snell para obtener el ángulo de desviación de frente de onda en aguas de profundidad reducida, con respecto a la dirección de propagación que traen las olas desde aguas profundas, pues la disposición de las líneas de igual profundidad (isobatas) es bastante homogénea.

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta}}$$

Se muestra también la escala de intensidades de los huracanes de acuerdo con las velocidades del viento, y su relación con las surgencias ciclónicas asociadas. Esta fue creada en 1971 por Herbert Saffir (ingeniero civil) y Robert Simpson (meteorólogo, especialista en ciclones tropicales) para uso del servicio meteorológico de Estados Unidos, y rápidamente adoptada por el resto de los servicios meteorológicos en la zona tropical, por recomendación de la OMM (ver [tabla 1](#)).

Tabla 1. Relación de las intensidades de huracanes definidas por Saffir y Simpson (1971) con valores de la marea de tormenta.

Categoría del huracán	Velocidad del viento	Altura de la marea de tormenta
1	119 - 153 km/h (74 - 95 mph)	1.2 - 1.5 m (4 - 5 ft)
2	154 - 177 km/h (96 - 110 mph)	1.8 - 2.4 m (6 - 8 ft)
3	178 - 208 km/h (111 - 129 mph)	2.7 - 3.7 m (9 - 12 ft)
4	209 - 251 km/h (130 - 156 mph)	4.0 - 5.5 m (13 - 18 ft)
5	$\geq 252 \text{ km/h}$ ($\geq 157 \text{ mph}$)	$\geq 5.5 \text{ m}$ ($\geq 19 \text{ ft}$)

Con respecto a los vientos máximos, se pueden mencionar algunos de los huracanes más notables que han afectado a Cuba en los últimos 100 años:

- Huracán de 1926, con $V_{max} = 230$ km/h registrado a su paso por La Habana.
- Huracán de Santa Cruz del Sur, Camagüey en 1932, con $V_{max} = 252$ km/h registrado en la localidad.
- Huracán de 1944, con $V_{max} = 264$ km/h registrado a su paso por bahía de Cabañas, Pinar del Río.
- Huracán de 1948, con $V_{max} = 248$ km/h registrado a su paso por La Habana.
- Huracán Michelle en 2001, con $V_{max} = 230$ km/h registrado a su paso por Cayo Largo del Sur en tránsito a las provincias centrales.
- Huracán Dennis en 2005, con $V_{max} = 238$ km/h registrado a su paso por Cabo Cruz, Granma.

Características de la trayectoria del huracán Irma

La [figura 2](#) muestra la trayectoria final de Irma según http://hurricanes.ral.ucar.edu/repository/data/bdecks_open/, y el campo de temperatura superficial del mar en el océano Atlántico norte del día 9 de septiembre, que mostraba valores entre 85 y 88° F (de 29 a 31° C) en el mar Caribe y golfo de México, muy favorables al fortalecimiento del ciclón tropical.

La intensidad que mantuvo el huracán Irma y la trayectoria seguida desde el norte de Matanzas, fueron condiciones propicias para el mantenimiento de alturas de olas significativas entre 11 y 12 metros alrededor de su centro, y para la llegada de olas con alturas significativas entre 7,0 y 9,0 metros al límite de aguas profundas del litoral de La Habana con período de 12 segundos desde la noche del 9 de septiembre (ver [figura 3](#)).

Ya para la mañana del día 10 la altura de las olas disminuía entre 5 y 7 metros de altura, aunque se mantenía el valor del período. En total, esta situación tuvo una duración de 14 horas.

Por su parte, la serie de posiciones de la [tabla 2](#) muestra que el 9 de septiembre en el norte de Matanzas, el huracán tenía categoría 3, pero a partir de la medianoche del día 10 se volvió a intensificar a categoría 4 (ver [figura 4](#)). Durante ese período, la costa de La Habana recibía vientos entre 100 y 110 km/h con rachas huracanadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el litoral de La Habana se comenzaron a sentir los efectos de las marejadas desde el final de la noche del 9 de septiembre, en que coincidió con una pleamar alrededor de las 11:50 PM. A partir de ese momento comenzó a elevarse sostenidamente el nivel del mar, para dar paso a la ocurrencia de inundaciones muy violentas, con sus particularidades en cada municipio.

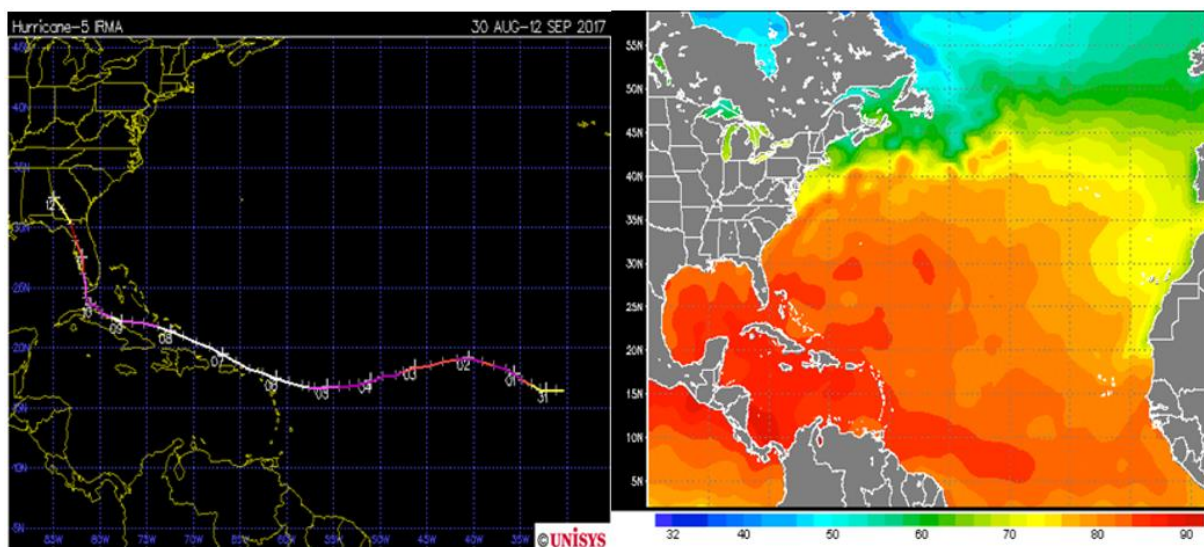


Figura 2. Trayectoria del huracán Irma (izquierda) y campo de temperatura superficial del mar (derecha) que muestra a todo el Mar Caribe y Cuba dentro de un área de temperaturas superiores a 84 °F (28,9 °C)

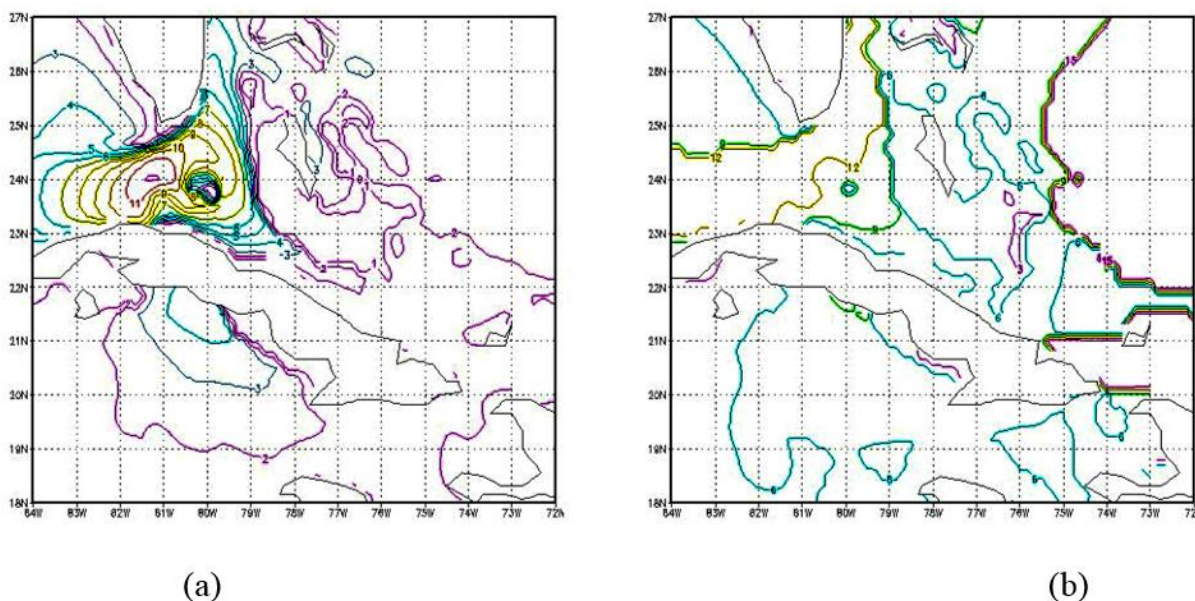


Figura 3. Estado del mar en el litoral de las provincias Matanzas, Mayabeque, La Habana y Artemisa el 9 de septiembre de 2017 a las 10:00 PM. El núcleo de altura máxima de la ola alcanzaba entre 11 y 12 metros de altura en el Estrecho de La Florida (a). El período de la ola que llegaba al Malecón habanero era de 12 segundos (b).

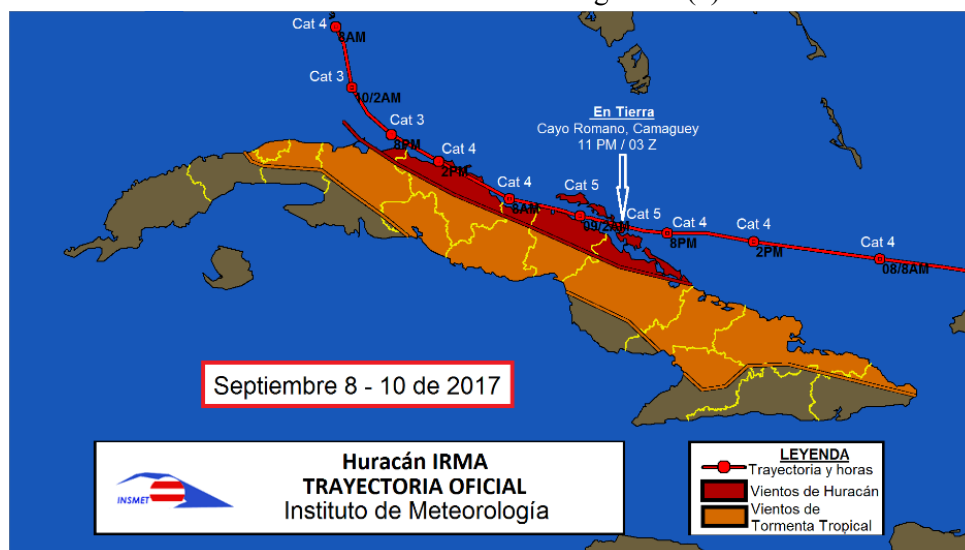


Figura 4. Trayectoria del huracán Irma durante los días 9 y 10 de septiembre. La saeta muestra el punto de entrada al territorio nacional. Fuente: <http://meteo.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=TEMPORADA&TB2=/Temporadas/temporada2017.html#home>

A continuación, será descrito el comportamiento de las inundaciones en los municipios Centro Habana y Plaza de la Revolución.

Afectaciones en el municipio Centro Habana

El alcance máximo de las inundaciones se produjo en la calle Virtudes, desde la calle Consulado hasta calle Galiano. A partir de esta, el límite estuvo marcado en la calle Ánimas hasta el hospital “Hermanos Ameijeiras” (intersección

con Belascoaín), donde por el frente que da a San Lázaro en nivel de la inundación alcanzó 2.25 m. En esta instalación médica el agua también inundó locales que están ubicados por debajo del nivel de la calle.

Varios metros más hacia el oeste, el agua se extendía casi hasta Virtudes por Marqués González, Oquendo y Soledad, desde una de las áreas más deprimidas del trazado urbano en San Lázaro y Marina, donde el nivel de la inundación marcó 1,4 m.

El límite de la inundación fue marcado por la intersección de San Lázaro y Aramburu, siguiendo por la citada Aramburu hasta sus intersecciones Jovellar y Vapor. Luego, el límite quedó marcado por la calle Hornos y la medianía de las calles 25 y Humboldt hasta conectar con Infanta, aledaña al edificio del Ministerio de Comercio Exterior (ver [figura 5](#)). En la intersección de Malecón e Infanta fue arrancado

el expendededor de combustible de la gasolinera por la fuerza del flujo de agua, así la heladería BIM BOM que fue destruida.

Además, por observaciones realizadas in situ durante la ocurrencia de las inundaciones, se estimó que el flujo de agua sobre la calle alcanzó velocidades entre 3,0 y 4,0 m/s.

Tabla 2. Serie de posiciones del huracán Irma, de acuerdo con la información de <http://weather.unisys.com/hurricanes/2017/atlantic/irma>

Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha/Hora	Vmax (km/h)	Pres (hPa)	Categoría
21.3	-72.4	Sep/08/00z	233	920	H5
21.7	-73.8	Sep/08/06z	217	925	H4
22.0	-75.3	Sep/08/12z	209	927	H5
22.1	-76.5	Sep/08/18z	217	925	H4
22.1	-77.7	Sep/09/11z	225	924	H5
22.5	-78.8	Sep/09/20z	217	930	H4
22.8	-79.8	Sep/09/12z	177	941	H3
23.4	-80.5	Sep/09/18z	177	933	H3
23.5	-81.0	Sep/10/00z	168	933	H3
24.1	-81.5	Sep/10/06z	185	928	H4
25.0	-81.5	Sep/10/12z	185	933	H4
26.2	-81.8	Sep/10/18z	152	938	H2
27.5	-81.9	Sep/11/00z	136	952	H2

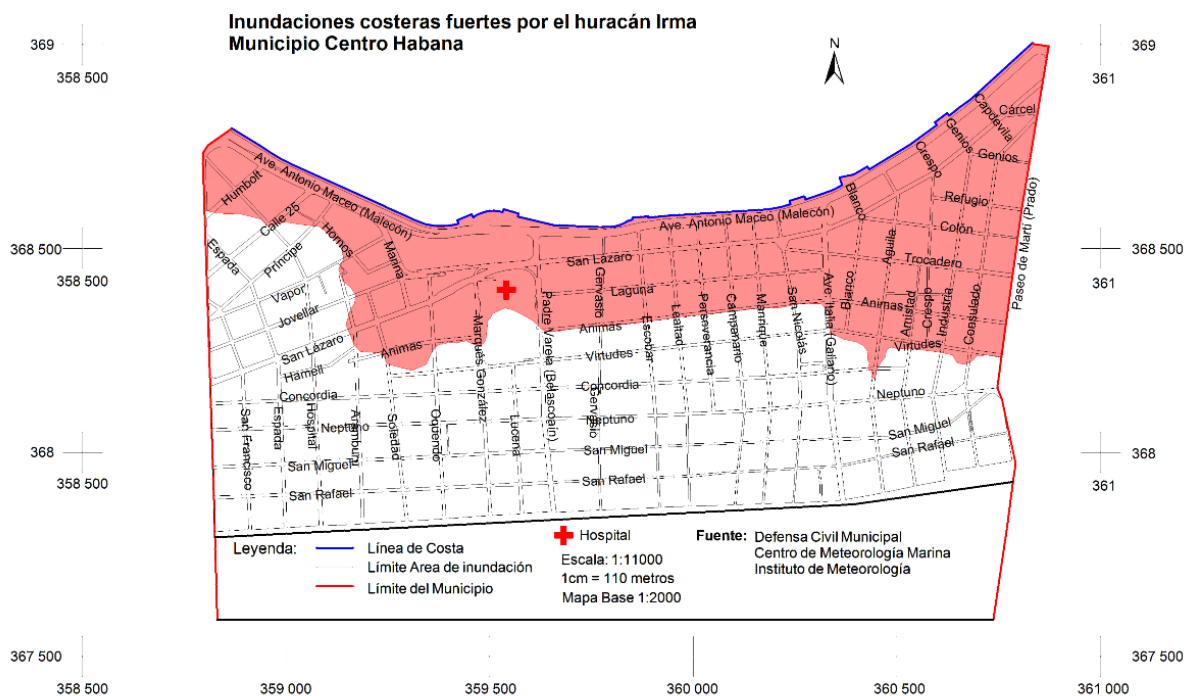


Figura 5. Área del municipio Centro Habana ocupada por la inundación costera el 10 de septiembre de 2018.

Afectaciones en el municipio Plaza de la Revolución

La inundación avanzó por la calle 23 entre Infanta y P con una altura aproximada de 0,3 m. En esta área, por estar directamente frente al mar se pudo observar dos bloques de roca caliza biogénica lanzadas desde el fondo marino cerca de la línea de costa, a los cuales se les estimó un volumen entre 0,5 y 0,6 m³.

Más adelante, en el frente hacia el mar del peñón sobre el que se asienta el Hotel Nacional, se observó que la marca de batimiento del oleaje residual tenía una altura entre 1,5 y 2,0 m. Desde esta zona la inundación se extendió hasta O por 19 y 17, así como hasta 17 y N.

El límite de la inundación, estuvo marcado por el eje central de la calle Línea hasta que en las calles H y G el agua subió hasta 13, aunque sin conectarse. La inundación alcanzó entonces a inundar una cafetería en 11 y F, ubicada a un nivel inferior al de la calle.

Luego, hasta la Avenida Paseo la inundación se mantuvo en el borde de la calle Línea, mientras que desde 2 hasta 12 el límite del agua alcanzó solo hasta la medianía entre 7^{ma} (Calzada) y Línea, coincidiendo con los límites normales de una inundación de categoría fuerte.

Finalmente, a partir de 14 hasta 20 la inundación logró cubrir la calle Línea, lo que contribuyó al paso acelerado del agua hacia el túnel que conecta a Línea con la Avenida 31 en el municipio Playa (ver [figura 6](#)).

Otros hechos notables fueron que en los muros del edificio Someillán el oleaje residual dejó su marca entre 1,5 y 2,0 metros, y que en varias instalaciones cercanas los locales con su nivel de piso bajo el nivel de la calle, así como los pozos de ascensores fueron llenados por las aguas. En muchos lugares a lo largo de la calle 3^{ra} el nivel del agua subía a casi 2,0 m, mientras que la extremadamente alta frecuencia del rebase del oleaje rompiente sobre el muro facilitó el rápido llenado del túnel que conecta la Avenida Malecón con la Avenida 5^{ta} en el municipio Playa.

Se destacó también que los pedestales que soportan los dos cañones de hierro que flanquean el monumento a Calixto García al final de la calle G fueron socavados en sus bases, en los salones de la biblioteca de Casa de Las Américas el nivel del agua subió entre 1,0 y 1,5 m, y las vidrieras de la TRD Galerías Paseo fueron quebradas por la fuerza de la masa de agua empujada por el oleaje residual.

Cálculo de la fuerza del impacto del oleaje

El evento de oleaje extremo que se analiza se caracterizó por arrojar sobre la costa un gran número de bloques rocosos de tamaño diverso, con pesos que oscilaban entre algunos kilogramos y 3 toneladas, por eso resulta de interés determinar cuál fue la fuerza desplegada por el oleaje para realizar el trabajo de sacar del fondo dichos fragmentos rocosos.

Cuando el oleaje se acerca a la costa disminuye su velocidad ya que se reduce ligeramente su longitud de onda, a la vez que

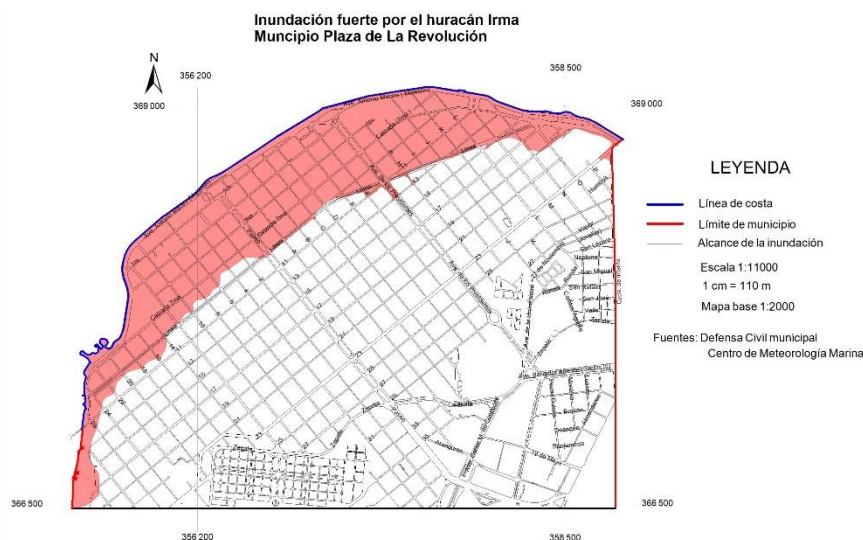


Figura 6. Área del municipio Plaza de la Revolución ocupada por la inundación costera el 10 de septiembre de 2018.

crece en altura antes de romper, acumulando energía potencial que luego se transformará en energía cinética en la ruptura y su traslado hacia la costa. Normalmente, la mayor parte de la energía se disipa en la fricción con el fondo marino, y solo una fracción de la misma alcanza la orilla.

El método de cálculo de la energía del oleaje empleado para el caso del Malecón habanero en el momento de la afectación del huracán Irma involucra la longitud de onda, en lugar de la velocidad de grupo de las olas. En este caso se estará calculando la energía de ondas reflejadas contra una estructura fija, las que en combinación con las ondas provenientes de mar profundo alcanzan una altura resultante superior a la que ambas tienen individualmente, mientras que la longitud de onda se reduce a la mitad (ver [figura 7](#)), o sea, que se está calculando el flujo de energía para olas transformadas.

Siguiendo la teoría lineal de la onda, la energía de la ola reflejada (E_r) se puede calcular como:

$$E_r = 2 \frac{\rho g \lambda b H^2}{8} = \frac{\rho g \lambda b H^2}{4} = \frac{\rho g \lambda b H_r^2}{16}$$

ya que $H = \frac{H_r}{2}$, donde H es la altura de la ola significativa y H_r es la altura de la ola reflejada. En la ecuación, ρ es la densidad del agua de mar (1025 kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$), λ es la longitud de onda dada en metros, b se toma como 1 metro de frente de onda.

El resultado de la energía de la ola se obtiene en joules (J), el cual debe ser multiplicado por un factor de $0,1019716 \times 10^{-3}$ para expresarlo como potencia de impacto de la ola en kilojoule por

metro lineal de costa (kJ/m). Con la solución de esta ecuación sobre una hoja de cálculo de Microsoft Excel, ha sido posible construir el nomograma representado en la [figura 8](#), que asocia la altura de la ola significativa y su período en aguas profundas con los valores correspondientes de potencia de impacto sobre el fondo marino y el muro.

Este nomograma considera alturas de olas desde 2 hasta 10 metros, y valores de período desde 3 hasta 14 segundos. Con él es posible representar la potencia de impacto de la ola que llega al límite de aguas profundas en las condiciones del litoral de La Habana, antes de la ocurrencia de las transformaciones de los elementos de olas y la ruptura en el límite de aguas someras.

Si se considera que al límite de aguas profundas junto al Malecón habanero llegaron olas entre 7 y 9 metros con período de 12 segundos, moviéndose a una velocidad de grupo de 9,5 metros por segundo, se puede plantear que la energía del oleaje a la profundidad de ruptura de 9,5 metros osciló entre 706 y 1168 kJ/m.

A partir de este punto, y adicionando el incremento del nivel del mar a causa de la ruptura del oleaje, calculado entre 1,4 y 1,7 metro, la altura de la ola se restableció con alturas máximas entre 4,5 y 6,5 metros de acuerdo con el criterio de la altura de la ola media cuadrática en rompiente ($H_{rms,b} = 0,42d_b$), con períodos entre 9 y 10 segundos. En estas condiciones, se aplica por segunda vez la metodología de cálculo de la potencia de impacto sobre el muro del Malecón, pues es en esta zona de “surf” o traslación de

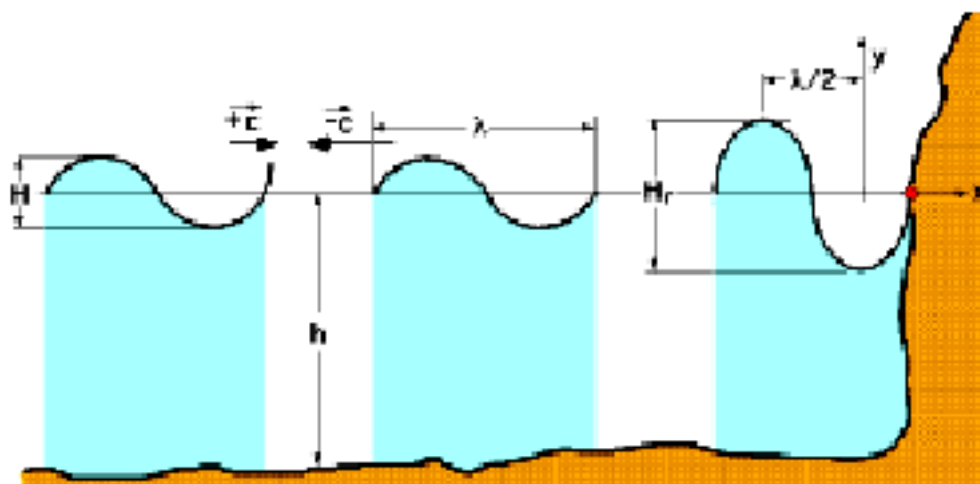


Figura 7. Reflexión de ondas

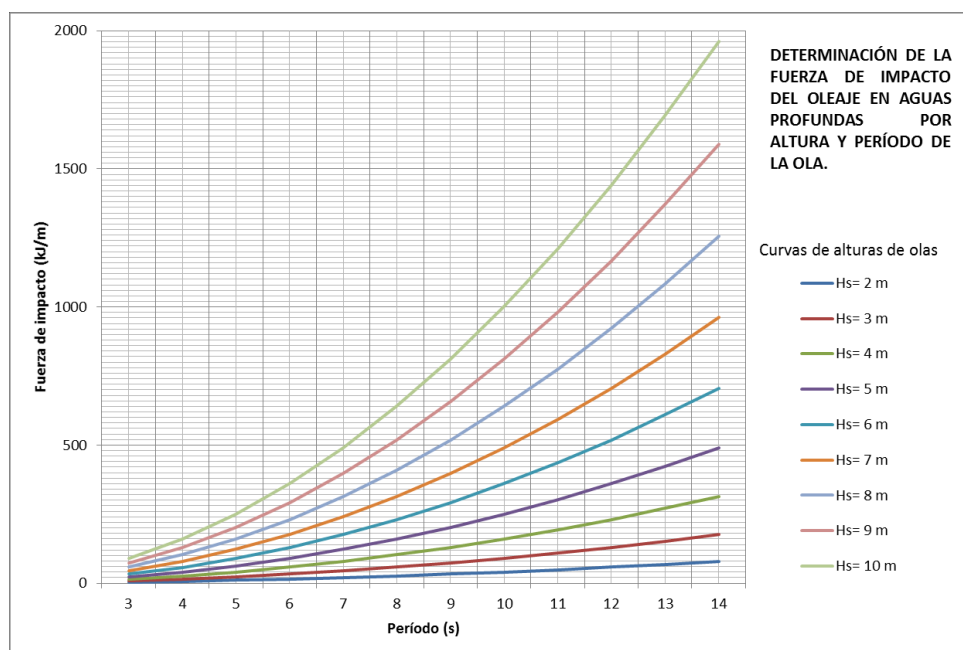


Figura 8. Curvas de fuerza de impacto del oleaje en aguas profundas frente al malecón habanero, de acuerdo con la altura significativa y el período (gráfico creado por los autores).

oleaje donde la potencia de impacto cobra importancia, debido al aporte de masa y momentum que pone en movimiento desde sedimentos sueltos (arena y grava) hasta fragmentos de roca de diferentes dimensiones.

Los cálculos finales indicaron que para alturas de olas transformadas con las características mencionadas y rumbo perpendicular hacia la costa, la fuerza de impacto sobre el fondo marino y la estructura del muro osciló entre 34 y 47 kilojoule por metro lineal de cresta.

Estas condiciones de oleaje extremo se extendieron por espacio de unas 14 horas, contribuyendo a la ocurrencia de unas inundaciones que superaron la gran mayoría de los límites máximos establecidos por otros eventos clasificados como fuertes para el litoral de La Habana.

CONCLUSIONES

Las marejadas generadas por el huracán Irma, y que llegaron al Malecón habanero entran en la clasificación establecida para La Habana como fuertes en extremo, sin que la adición de este adjetivo signifique una nueva denominación. Muchos testimonios recogidos y observaciones directas han llevado a la convicción de que las manifestaciones de este evento han sido vistas por primera vez en el litoral habanero a causa de

un ciclón tropical, así como en muchos sitios de la costa norte del país.

Debido a la actual tendencia de incremento sostenido del nivel del mar inducido por el cambio climático global, la zona de rompiente en el Malecón habanero en situaciones de oleajes extremos se notará paulatinamente más cerca de la actual línea costera, de manera que oleajes en ruptura entre 4,5 y 6,5 metros de altura podrían generar inundaciones de intensidad fuerte de mayor severidad, por encima de los límites establecidos por la clasificación establecida por el Centro de Meteorología Marina.

Se presentaron algunos resultados de la fuerza del impacto del oleaje sobre el Malecón en primera aproximación, con valores que oscilaron entre 34 y 47 kJ/m en la franja de aguas con profundidades inferiores a 9,5 metros, a partir de la acción de olas que alcanzaron alturas entre 4,5 y 6,5 metros con periodos entre 9 y 10 segundos.

Fue creado un nomograma que representa la potencia de impacto del oleaje sobre el fondo marino y estructuras de protección, calculada a partir de la aplicación de la teoría lineal de olas.

Si se pretende elaborar planes de contingencias, protección costera y planificación física a largo plazo (varias decenas de años), se debe tomar en cuenta toda la información histórica disponible acerca de las particularidades de las penetraciones del mar ocurridas en

distintas épocas y las frecuencias de ocurrencia de los fenómenos.

AGRADECIMIENTOS

Varios colegas enriquecieron este trabajo con sus aportes y opiniones. Nuestro agradecimiento a Yinelys Bermúdez y Miriam Teresita Llanes (Centro de Pronósticos del Tiempo), Alberto Villegas, Amílcar Calzada y Dailyn Reyes (Centro de Meteorología Marina), Ida Mitrani y Javier Cabrales (Centro de Física de la Atmósfera).

REFERENCIAS

- Bush, D.M.; R.M. Webb; J.G. Liboy; L. Hyman; W.J. Neal (1995). "Living with the Puerto Rico shore". Editorial de la Universidad de Puerto Rico, San Juan. 193 p.
- Centro de Meteorología Marina (2006). Inundaciones costeras por penetraciones del mar provocadas por el huracán Wilma en la zona costera de Ciudad de La Habana. Informe Técnico preparado para la Agencia de Medio Ambiente, Instituto de Meteorología, La Habana, 13 pp.
- Dean R. G.; & R. A. Dalrymple (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific Publishing. Co. Pte. Ltd., ISBN-13: 978-9810204211, ISBN-10: 9810204213.
- Fernández, P. "Energía del mar", Libros sobre Ingeniería Energética, Available: Available: <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=5> (consultado en 2016).
- García-Concepción, O; R. Pérez-Parrado; G. Rubio_Morales; J.R. Díaz-Arias; Z. Marín-Delgado (1987). "Las tres penetraciones del mar más intensas ocurridas en la ciudad de La Habana en los últimos diez años". Available: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal4/Procesosambientales/Geomorfologia/12.pdf>
- Tropical Cyclone Guidance Project. Global Repository, NCAR/UCAR. Available: Available: <http://hurricanes.ral.ucar.edu/repository/> (consultado en octubre 2018).
- Hernández, I. & E. García (2011): "Inundaciones en la Ciudad de La Habana por sistemas frontales y su relación con ENOS. Influencia sobre la costa", Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología, INSMET, La Habana, ISBN 978-959-7167-20-4
- Hernández, N.; R. Vega-González; R. Casals (2002). "Estudio de los sistemas meteorológicos que han afectado a Baracoa por penetraciones del mar e inundaciones costeras". Revista Cubana de Meteorología / Vol.9/ No.2/ 2002. Pag. 58
- Hernández, N. (2003): Estudios Hidrometeorológicos de los Mares Adyacentes a Baracoa en Guantánamo, INSMET/CITMA, Tesis de Maestría en Ciencias Meteorológicas. La Habana, Cuba, 66 pp.
- Hidalgo, A. (2010): "Características de las inundaciones costeras en el área Gibara- Playa Guardalavaca", Ciencia (Revista Trimestral), enero-marzo 2010, Año 15, Holguín, pp. 1:9
- Juantorena Y.; I. Mitrani; P. Beauballet (2000a): "Las inundaciones por oleaje en el Malecón Habanero con el escenario actual y el previsto por posible cambio climático" Boletín SOMETCUBA, Vol. 6, No. 2, consultado el 6 de junio del 2012, disponible en <http://www.met.inf.cu>
- Juantorena, Y.; P. Beauballet; R. Casals; N. Hernández (2000b) MET-OLAS, Sistema para el pronóstico de las inundaciones costeras y sus aplicaciones. Revista Cubana de Meteorología / Vol. 7/ No.1/ 2000. Pag.3
- Lugo, A. E.; A. Ramos; A. Mercado; D. La Luz; G. Cintrón; L. Márquez; R. Chaparro; J. Fernández; S. J. Peisch; J. Rivera (2004). "Cartilla de la zona marítimo - terrestre". Acta Científica, Vol. 18, Num. 1 - 3, ISSN 1940-1148, Asociación de Maestros de Ciencia de Puerto Rico. Available: https://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/act_v18_1thru3.pdf
- Mitrani, I. (2006). "Las inundaciones costeras en cuba y su repercusión social" BIOÉTICA / SEPTIEMBRE - DICIEMBRE 2006. Available: <http://www.cbioetica.org/revista/63/630410.pdf>.
- Mitrani, I.; O. Díaz; A. Vichot; I. Hernández; A. Hidalgo; E. García; J. A. Rodríguez (2012).

“Tendencias climáticas de las inundaciones costeras severas en áreas de Cuba”. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, julio-diciembre, 2012, Vol. 13, No. 2, pp.135-151, ISSN 1729-3790.

Mitrani, I. ; A. Hidalgo ; B. Martínez; N. Hernández; C. Álvarez (2015). “Afectación por eventos severos en la zona costera del municipio de Banes”. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 21, No. 2, jul - dic. pp.70-82, 2015

Mitrani I., L. Díaz, P. Pérez, J. González (1994): “Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero”, Informe de Resultado Científico, Biblioteca INSMET, 38 pp

Reinaldo Casals-Taylor. Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. E-mail: reinaldo.casals@insmet.cu

Nilo Hernández-Orozco. Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. E-mail: nilo.hernandez@insmet.cu

Pedro Jorge Pérez-Osorio. Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. E-mail: pedro.jorge@insmet.cu

Frank Ernesto-Ortega. Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. E-mail: frank.ortega@insmet.cu

Rafael Pérez-Parrado. Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. E-mail: rafael.perez@insmet.cu

Lorena Menéndez-Fernández-Cueto. Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. E-mail: lorena.menendez@insmet.cu

Niurka Mosqueda-Borges. Centro Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. E-mail: niurka.mosqueda@insmet.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)