

Períodos de retorno para las inundaciones costeras y los eventos extremos de viento y oleaje en la costa nororiental de Cuba



Return period of the coastal flooding and extreme events of wind and wave in northeast coast of Cuba

<http://opn.to/a/1RiXt>

Axel Hidalgo-Mayo ^{1*}, Nilo Hernández-Orozco ², Enrique Perigó-Román ³

¹Centro Meteorológico Provincial de Holguín, La Habana, Cuba

²Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología, Cuba

³Centro Meteorológico Provincial de Guantánamo, Guantánamo, Cuba

RESUMEN: El presente trabajo tiene como objetivo el cálculo de los períodos de retorno para los eventos de inundación costera, así como el viento máximo y el oleaje extremo en la costa norte de la región oriental de Cuba. Como fuentes de información se utilizaron los datos de las estaciones costeras de Cabo Lucrecia y Punta Maisí, la cronología y clasificación de las inundaciones costeras para las ciudades de Gibara y Baracoa; mientras que se emplearon las distribuciones de probabilidad de Gumbel y Poisson, y los test de Kolmogorov- Smirnov y X^2 para la bondad de ajuste, así como el método de los máximos anuales. Como resultados se obtuvieron los períodos de retorno de las inundaciones costeras, así como de los vientos máximos y la altura significativa para las probabilidades de 0.1, 0.05 y 0.02, así como el intervalo de confianza correspondiente. Se concluye que las distribuciones teóricas empleadas (Poisson para los eventos de inundación y Gumbel para los regímenes extremos de viento y oleaje) resultaron idóneas para los niveles de significación del 5% y 1%, arrojando que para las ciudades de Baracoa y Gibara se espera ocurran inundaciones costeras al menos una vez cada dos y cuatro años respectivamente, mientras que los períodos de retorno para los regímenes extremos de viento y oleaje para Cabo Lucrecia y Punta de Maisí son similares, excepto los intervalos de confianza que son marcadamente diferentes, debido a la mayor variabilidad existente en Cabo Lucrecia.

Palabras clave: Períodos de retorno, inundaciones costeras, eventos extremos, Kolmogorov- Smirnov, bondad de ajuste Chi- cuadrado.

ABSTRACT: The objective of this paper is to calculate the return periods for coastal flood events, as well as the maximum wind and extreme wave on the north coast of the eastern region of Cuba. The main sources of information used were records from the coastal stations of Cabo Lucrecia and Punta Maisí, the chronology and classification of coastal floods for the cities of Gibara and Baracoa; as well as the use of the distribution of probability of Gumbel and Poisson, Kolmogorov- Smirnov test and X^2 for Goodness, as well as the method of annual maximum. The main results obtained were the return periods of coastal floods, as well as the maximum winds, and the significant height for the probabilities of 0.1, 0.05 and 0.02, and the corresponding confidence interval. It is concluded that the theoretical distributions used (Poisson for flood events, and Gumbel for extreme regimes of wind and wave) were suitable for the significance level of 5% and 1%, showing that for the cities of Baracoa and Gibara coastal floods events are expected once each two and four years respectively, while the periods of return for the extreme wind and wave regimes for Cabo Lucrecia and Punta de Maisi are similar, except the confidence intervals which are remarkably different due to a greater variability observed in Cabo Lucrecia.

Keywords: Return period, coastal floods, extreme events, Kolmogorov- Smirnov, Chi-Square goodness.

*Autor para correspondencia: Axel Hidalgo-Mayo. E-mail: axel.hidalgo@hlg.insmet.cu

Recibido: 01/11/2018

Aceptado: 24/12/2018

INTRODUCCIÓN

La variabilidad y el cambio climático han incrementado la tendencia de los peligros naturales desde inicios del siglo XXI, destacándose las inundaciones costeras en los pequeños estados insulares, fundamentalmente al paso de ciclones tropicales (Stocker *et al.*, 2013). En el caso de Cuba, en los últimos diez años (2008-2017) se han producido inundaciones costeras fuertes a lo largo y ancho de nuestro archipiélago, las cuales han llegado a ser las más intensas de los registros en varias provincias: Gustav (2008), Isla de la Juventud; Ike (2008), Sandy (2012) y Matthew (2016) costa norte y sur de la región oriental; e Irma (2017) costa norte de Ciego de Ávila, Villa Clara y Matanzas (Hidalgo *et al.*, 2016, 2017; Insmet, 2017).

Aunque desde inicios de la segunda década del presente siglo se han incrementado y extendido de forma significativa las investigaciones sobre el estudio de las inundaciones costeras a varias regiones de nuestro país (Hidalgo & Mitrani, 2012 y 2015, Mitrani *et al.*, 2012 y 2016, Hidalgo *et al.*, 2016 y 2017; Povea & Mitrani, 2016; González *et al.*, 2017; Córdova *et al.*, 2018); todo lo contrario ha ocurrido en el estudio de los regímenes extremos de viento y oleaje en zonas costeras, ya que las últimas publicaciones consultadas sobre este tema datan de los años '90 (Salas *et al.*, 1992; Salas & Mitrani, 1992; Pérez, 1994; Mitrani & Salas, 1998; Mitrani *et al.*, 1999).

A nivel internacional varios son los investigadores que han estudiado esta temática, (Caires & Sterl, 2005; Vinoth & Young, 2011) realizaron estimaciones globales de los regímenes extremos de viento y oleaje empleando el método POT (*Peak Over Threshold*) a partir de del reanálisis ERA-40 y de mediciones de altímetros satelitales respectivamente; mientras que (Mazas *et al.*, 2014) aplicando este propio procedimiento realizó una selección de las mejores distribuciones de probabilidad que pueden ser empleadas en el estudio de casos de sobreelevación del nivel por surgencia, determinando que la de Poisson da muy buenos resultados para estos casos. Por otro lado, (Aarnes *et al.*, 2012) calcularon el período de retorno para 100 años de la altura significativa de

la ola en el noreste del Atlántico Norte a partir de la Teoría General de los Valores Extremos.

Como es conocido, en los últimos años la frecuencia de los huracanes y los eventos extremos asociados a los mismos se ha incrementado sobre nuestro archipiélago, tanto en frecuencia como en intensidad (Ballester *et al.*, 2010; Mitrani *et al.*, 2016). De esta manera, se impone actualizar el cálculo de los períodos de retorno de los fuertes vientos y la altura máxima de la ola de (Salas *et al.*, 1992; Salas & Mitrani, 1992; Pérez, 1994; Mitrani & Salas, 1998; Mitrani *et al.*, 1999), las cuales en su momento tuvieron un valor teórico y práctico, pero que producto al incremento de la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos no se corresponden con la realidad actual ni permiten elaborar planes de protección eficaces para obras costeras. De esta manera el objetivo de la presente investigación radica en el cálculo de los períodos de retorno para los eventos de inundación costera, así como el viento máximo y el oleaje extremo para la costa norte de la región oriental de Cuba, a partir de los datos meteorológicos existentes que reflejen la variabilidad climática actual y mediante el empleo de los métodos estadísticos actualizados y empleados por parte de la comunidad científica internacional para este fin.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

La costa norte de región oriental de Cuba presenta una plataforma estrecha abierta a los vientos del primer cuadrante, particularmente a los del NE-ENE. A través del archipiélago de las Bahamas existen pasos (Crooked, Mayaguana y Caicos) que permiten el tránsito del oleaje con suficiente energía para que la ruptura de este se produzca, libremente, sobre esta parte del país (ver figura 1). En esta zona son propicias las inundaciones costeras por rompimiento de oleaje, siendo las ciudades más expuestas Baracoa y Gibara (Hernández *et al.*, 2002; Hidalgo & Mitrani, 2012 y 2015; Hidalgo *et al.*, 2017), las cuales en los últimos años se han sido afectadas por eventos de inundación moderados y fuertes asociados al paso de los huracanes Ike (2008), Matthew (2016) e Irma (2017) (Hidalgo *et al.*, 2016, 2017).

Según (Lecha *et al.*, 1994) en las estaciones meteorológicas de Cabo Lucrecia y Punta Maisí predominan los vientos del NE-E (más del 70% de los casos). Estudios recientes, tales como (Insmet, 2012) tomando como base el período 1979-2008 determinaron que la velocidad promedio del viento anual para ambas estaciones se encuentra entre 15-16 km/h, mientras que en la dirección predominante (NE-E, representa entre el 50%-70% de los casos anuales) estos valores ascienden hasta 20 km/h; en tanto (Roque *et al.*, 2018) concluyeron que las mencionadas estaciones son las que mejor experimentan la influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, al no verse perturbado el flujo sinóptico por la fricción superficial.

En el caso particular de Cabo Lucrecia (Hidalgo & Mitrani, 2015) determinaron que el régimen normal del viento conlleva a que habitualmente el estado de la superficie marina

según la escala Douglas sea de fuerza 3-4 (0.5-2.5 m) en más de la mitad de las observaciones anuales. Los valores de esta variable solo son superiores al paso de los ciclones tropicales, así como en la combinación de anticiclones migratorios con las bajas extratropicales, lo que provoca en ocasiones eventos de inundación significativos, principalmente, en las ciudades de Baracoa y Gibara (Hernández *et al.*, 2002; Hidalgo *et al.*, 2016).

Datos

Como fuentes de información se emplearon los datos de las estaciones meteorológicas costeras de Cabo Lucrecia y Punta de Maisí (ver figura 1), así como la cronología y clasificación de las inundaciones costeras para las ciudades de Baracoa y Gibara (Hernández *et al.*, 2002; Hidalgo & Mitrani, 2012 y 2015, Hidalgo *et al.*, 2016 y 2017). Además del reanálisis atmosférico

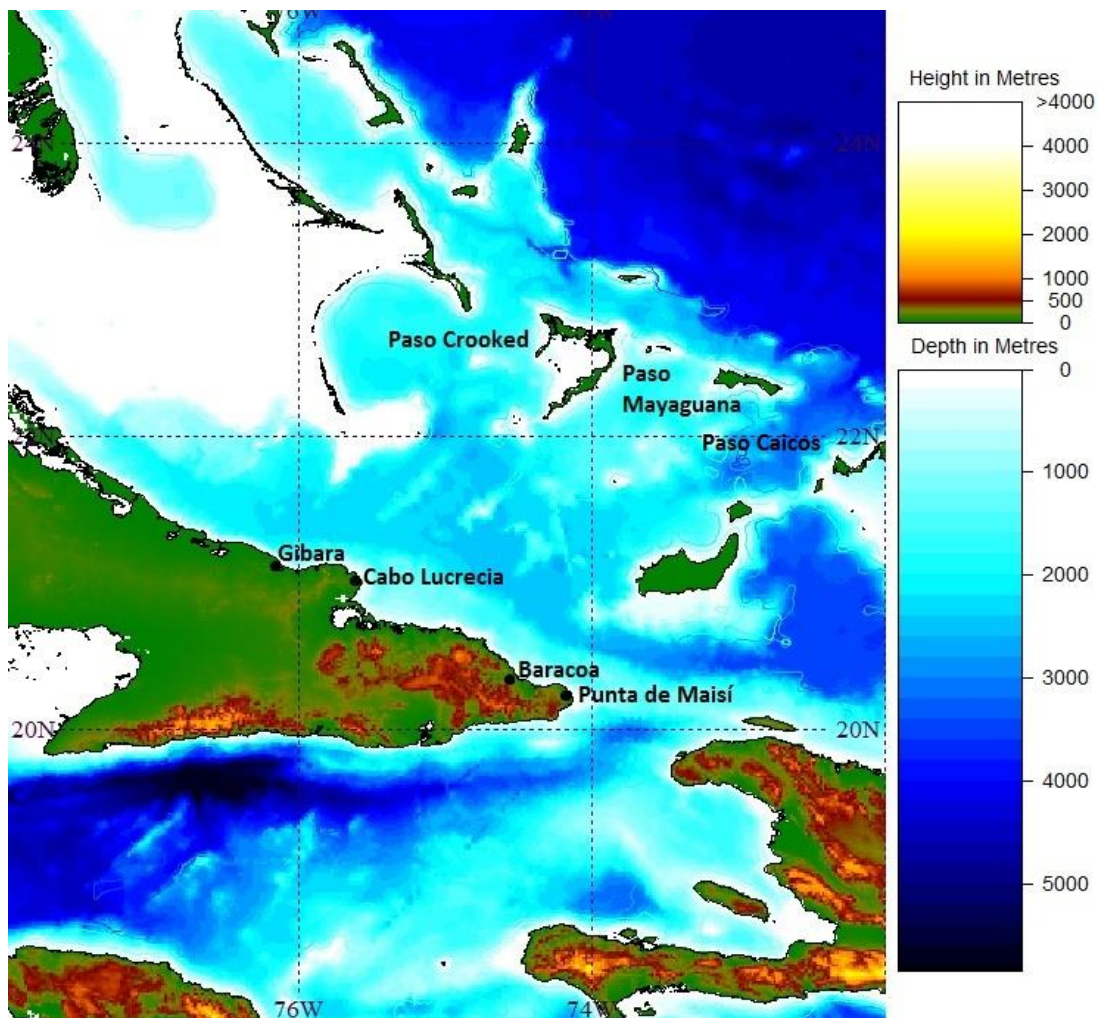


Figura 1. Región de estudio. Elaborado a partir de información del Atlas GEBCO (British Oceanographic Data Center, 2009).

NCEP/NCAR de la NOAA y la base de datos de huracanes del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos radicado en Miami, Hurdad 2.

De acuerdo a (Hidalgo *et al.*, 2017) para la ciudad de Gibara las inundaciones costeras moderas y fuertes ocurren cuando el alcance horizontal del agua de mar tierra adentro se encuentra entre 250-500 m o son superiores a 500 m respectivamente. En el caso de Baracoa estas intensidades están dadas cuando la penetración del mar alcanza la Calle Maceo o avanza más allá de la misma (Hidalgo *et al.*, 2016).

Métodos estadísticos para el estudio de los regímenes extremos

El análisis extremo de los regímenes de viento, oleaje y los eventos de inundación costera se centra en la caracterización estadística para largas series temporales de estas tres variables para una región determinada. Es decir, son un subconjunto de datos dentro del total de los registros (boyas meteorológicas, estaciones meteorológicas costeras, datos de reanálisis, cronologías, etc.). El fin de estos estudios es determinar las acciones de diseño a soportar por una obra marítima determinada en función de su vida útil.

Desde el punto de vista probabilístico los eventos extremos deben ser independientes, o sea que no estén asociados a una misma situación meteorológica. Los mismos, generalmente, están referidos a valores máximos anuales, los cuales están estrechamente relacionados con los períodos de retorno (probabilidad esperada de que un evento iguale o exceda un valor

determinado, por ejemplo una vez en 10 años o 0.1) (Goda, 2000; USACE, 2006; Wilks, 2011).

Según (Wilks, 2011), la Teoría General de los Valores Extremos (GEV por su siglas en inglés), está basada en las distribuciones de probabilidad de Gumbel (Fisher- Tippet I o FT I), Weibull o Fréchet (Fisher- Tippet II o FT II). En el caso de zonas marinas (WMO, 1994; Goda, 2000; USACE, 2006; Caires, 2011) concuerdan en emplear para el viento máximo y la altura de la ola significativa la distribución de Gumbel, la que será empleada en esta investigación.

Los dos métodos más utilizados para determinar el régimen extremo según (Goda, 2000; USACE, 2006; Caires, 2011), son el de los máximos anuales a partir de la GEV y el POT (*Peak Over Threshohold* por su siglas en inglés). En el primero de ellos a partir de una serie de observaciones se selecciona el valor máximo anual; mientras que en el segundo se determinan el(los) valor(es) umbral(es) que hayan afectado de forma significativa a una región determinada. En ambos casos los análisis deben realizarse para series de observación mayores a 20 años (USACE, 2006). En esta investigación se empleará solamente el método de los máximos anuales, ya que para el POT se necesitan series de medición de altura de la ola, variable que no está disponible en el Servicio Meteorológico Nacional cubano.

Para el método de los máximos anuales la distribución de Gumbel según (USACE, 2006) y los coeficientes tienen las siguientes expresiones:

Tabla 1. Fuentes de información meteorológicas y oceánicas empleadas.

Tipo de Información	Período	Fuente	Observaciones
Velocidad máxima del viento a 10 m de altura	1992-2012	Estación meteorológica de Cabo Lucrecia	Datos faltantes (160, 2.13% del total)
Velocidad máxima del viento a 10 m de altura	1983-2017	Estación meteorológica de Punta de Maisí	Datos faltantes (559, 4.57% del total)
Cronología y clasificación de inundaciones costeras Gibara.	1960-2017	(Hidalgo y Mitrani, 2012 y 2015; Hidalgo <i>et al.</i> , 2016; Hidalgo, Mitrani y Pérez, 2017)	17 eventos de inundación: 9 ligeras, 6 moderadas y 2 fuertes.
Cronología y clasificación de inundaciones costeras Baracoa.	1960-2017	(Hernández, Vega y Casals, 2002; Hidalgo <i>et al.</i> , 2016; Hidalgo, Mitrani y Pérez, 2017)	47 eventos de inundación: 27 ligeras, 15 moderadas y 5 fuertes.
Reanálisis Hurdad 2	1960-2017	http://www.nhc.noaa.gov	Variables: latitud, longitud, viento máximo y presión central.
Reanálisis NCEP/NCAR	1960-2017	http://www.esrl.noaa.gov	Variables: SLP, u, v.

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left[\frac{x-B}{A}\right]\right] \quad (1)$$

$$A = 0.779s; \quad B = \bar{x} - 0.45s \quad (2)$$

Donde:

\bar{x}, s : Media y desviación estándar muestral respectivamente.

e : Base de los logaritmos neperianos (2.71828).

Al no contar con datos de altura de la ola significativa, el valor de esta variable se calculó a partir de las formulaciones para aguas profundas que aparecen en (USACE, 2006):

$$H_{m0} = 0.0115 \cdot V^{1.23} \cdot F^{0.5} \quad (3)$$

Donde

H_{m0} : Altura espectral de la ola (m). Según (USACE, 2006) la altura de la ola significativa (Hs) es el 95% del valor de H_{m0} .

V : Velocidad del viento en m/s.

F : Longitud del *fetch* en kilómetros. Fue estimado a partir de la circulación del sistema meteorológico que estuviera generando inundaciones costeras en ese momento, a partir de las variables presión a nivel del mar y velocidad y dirección del viento obtenidos de los reanálisis atmosféricos NCEP/NCAR.

Mientras que en el caso particular de ciclones tropicales se determinó a partir del valor estimado por los observadores de las estaciones meteorológicas de Cabo Lucrecia y Punta de Maisí, o las reportadas en los eventos de inundación ocurridos en las ciudades de Gibara y Baracoa, de acuerdo a (Hidalgo et al., 2016).

Para el caso particular de las inundaciones costeras, (USACE, 2006; Wilks, 2011) recomiendan el uso de la distribución de Poisson, cuando la frecuencia observada sea inferior a 0.1 y el tamaño de la muestra superior a 50. La expresión matemática de esta función es:

$$P(x) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^x}{x!} \quad (4)$$

Donde:

$P(x)$: Probabilidad de ocurrencia del evento n -ésimo.

λ : Promedio del número de eventos por años.

x : Número de eventos en el período de observación.

Bondad de ajuste y períodos de retorno

Para determinar si la distribución de probabilidad escogida es idónea se emplearon las pruebas no paramétricas de Kolmogorov-Smirnov (K-S) y Pearson χ^2 para variables continuas (distribución de Gumbel para viento máximo y altura significativa de la ola) y discretas (distribución de Poisson para los eventos de inundación costera) respectivamente de acuerdo a (Wilks, 2011). La prueba Pearson χ^2 según (Dowdy et al., 2004) tiene la siguiente expresión:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_{oi} - F_{ei})^2}{F_{ei}} = \sum_{i=1}^k \frac{(F_{oi} - n \cdot P_i)^2}{n \cdot P_i} \quad (5)$$

Donde:

i : Clase ($i=1,2,\dots,k$).

k : Cantidad de clases.

m : Cantidad de parámetros que se necesitan estimar, como es solamente (λ , media de la distribución) $m=1$.

F_{oi} : Frecuencia observada de la clase i .

F_{ei}, P_i : Frecuencia estimada y probabilidad estimada de la clase i respectivamente.

n : Tamaño de la muestra.

Si $\chi^2 > \chi_{m-k-1}^2; \alpha$ (distribución χ^2 con $m-k-1$ grados de libertad y un nivel de significación α se rechaza la hipótesis nula, o sea que la distribución escogida no es adecuada.

Aunque la prueba Pearson χ^2 tiene limitaciones para cuando la frecuencia observada es menor que cinco y hay pocas clases, autores como (Cochran, 1954; Dickinson & Chakraborti, 2003; Dowdy et al., 2004) recomiendan su uso siempre y cuando la frecuencia esperada sea mayor a 1. Si la distribución tiene un solo grado de libertad (Dowdy et al., 2004) recomiendan realizar la corrección de Yates a la ecuación (5) de la siguiente forma:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(|F_{oi} - F_{ei}| - 0.5)^2}{F_{ei}} \quad (6)$$

En el caso de la prueba no paramétrica K-S para una sola muestra se calcula según (Wilks, 2011) como:

$$D_n = \max|F_n(x) - F(x)| \quad (7)$$

Donde:

$F_n(x)$: Es la frecuencia o probabilidad empírica acumulada.

$F(x)$: Es la probabilidad teórica acumulada.

Si $D_n > C_\alpha$, se rechaza la hipótesis nula, o sea que la distribución escogida no es la mejor, la cual según (Wilks, 2011) se determina a partir de la siguiente expresión:

$$C_\alpha = \frac{K_\alpha}{\sqrt{n + 0.12 + 0.11/\sqrt{n}}} \quad (8)$$

Donde:

K_α : Es un coeficiente numérico que toma los valores de 1.358 y 1.628 para los niveles de significación del 5% y 1% respectivamente (Wilks, 2011).

n : Tamaño de la muestra.

Aunque matemáticamente es posible calcular períodos de retorno relativamente largos (por ejemplo una vez en 50 años o en 100 años), de acuerdo a (USACE, 2006) el nivel de confianza de estos cálculos disminuye a medida que el período supera, aproximadamente, entre dos y tres veces el tamaño de la muestra. En la elaboración de planes de contingencia este es un término de mucha utilidad a la hora de adoptar coeficientes de seguridad altos, así como para prevenir daños mayores en estructuras como consecuencia de los fenómenos extremos que probablemente ocurran durante la vida útil de las mismas (Goda, 2000). Matemáticamente el período de retorno según (USACE, 2006) se calcula de la siguiente manera:

$$T_r = \frac{1}{1 - P_a} \quad (9)$$

Donde:

T_r : Período de retorno en años.

P_a : Probabilidad acumulada.

Según (WMO, 1994), el intervalo de confianza para la estimación del período de retorno se determina de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$X_T \pm t(\alpha) \cdot \sqrt{1 + 1.14K_T + 1.1K_T^2 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (10)$$

$$K_T = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}\right) \left(0.5774 + \ln \ln \left[\frac{T_r}{T_r - 1}\right]\right) \quad (11)$$

Donde:

X_T : Valor de la variable que excede al período de retorno.

$t(\alpha)$: Probabilidad en función del intervalo de confianza, 1.960 y 1.645 para el 95% y el 90% respectivamente.

K_T : Factor de corrección que depende del período de retorno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eventos extremos de viento, oleaje e inundaciones costeras

Los regímenes extremos de viento, oleaje e inundaciones costeras para la región de estudio ocurren al paso de los ciclones tropicales (figura 2) y la combinación de las bajas extratropicales y los anticiclones migratorios (figura 3) (Hernández et al., 2002; Hidalgo & Mitrani, 2012; Hidalgo et al., 2016), fundamentalmente estos últimos en presencia del evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), debido al descenso en latitud del chorro subtropical. Para la ciudad de Gibara las inundaciones costeras moderadas y fuertes ocurren con altura significativa de la ola de 4.5 m independientemente de la fase de la marea astronómica (Mitrani et al., 2012; Hidalgo et al., 2016), mientras que para Baracoa este valor es de 3.5 m (Hernández et al., 2002; Hidalgo et al., 2016).

Aunque en el patrón sinóptico de la figura 3 (combinación de bajas extratropicales con anticiclones migratorios), (Lapinel, 1989) considera la afectación por frentes fríos y el anticiclón migratorio como Tipos de Situaciones Sinópticas independientes, en la presente investigación se consideran como un todo, ya que ambos forman parte de la evolución temporal de los sistemas sinópticos extratropicales que afectan a Cuba (trayectoria de las bajas extratropicales en el flujo del oeste a través del chorro subtropical desde el centro de los Estados Unidos hasta el Océano Atlántico). La combinación de ambos sistemas es lo que trae consigo un fuerte gradiente de presión y por ende un incremento de la velocidad del viento, generando trenes de olas que pueden durar varias horas (ejemplo de ello fue la inundación costera ocurrida en la ciudades de Baracoa y Gibara los días 12 y 13 de octubre de 1982, con una duración de más de 24 h (Hidalgo et al., 2016)).

Períodos de retorno para los eventos de inundación costera y los regímenes extremos de viento y oleaje

El período de retorno para las inundaciones costeras se calculó para las tres categorías,

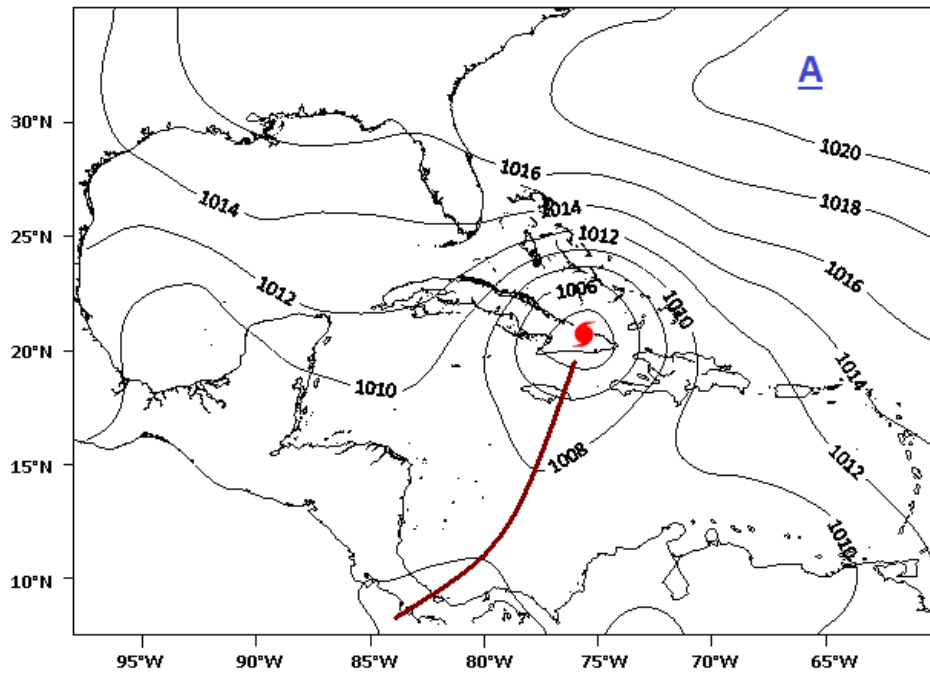


Figura 2. Patrón sinóptico típico en el nivel de superficie (ciclón tropical, vaguada asociada al mismo y anticiclón de las Azores- Bermudas) que generan inundaciones costeras en la costa nororiental de Cuba.

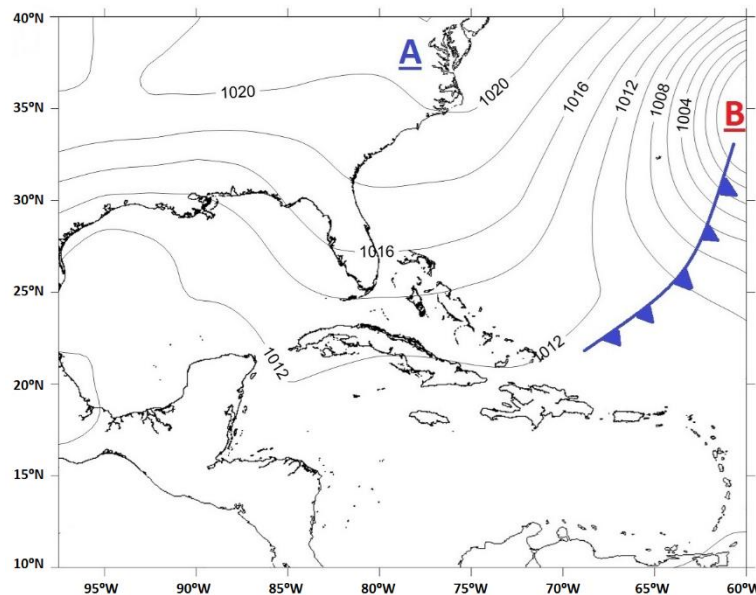


Figura 3. Patrón sinóptico típico en el nivel de superficie (combinación de una baja extratropical y un anticiclón migratorio) que generan inundaciones costeras en la costa nororiental de Cuba.

aunque es conocido que son los eventos moderados y fuertes los que ocasionan las mayores afectaciones en el archipiélago cubano (Mitrani *et al.*, 2012 y 2016, Hidalgo *et al.*, 2016 y 2017). Sin embargo, (Hidalgo & Mitrani, 2015) concluyeron que de acuerdo a las proyecciones del IPCC relacionadas con el ascenso del nivel medio del mar, los episodios de inundación de

carácter ligero pudieran llegar a ser moderados, y estos a su vez ser fuertes, así como que podrían ocurrir inundaciones costeras en los próximos años con alturas de las olas inferiores a los registros actuales.

En el período 1960-2017 ocurrieron 17 eventos de inundación para Gibara y 47 para Baracoa con valores medios de 0.293 y 0.810 eventos por años

respectivamente. La aplicación de la distribución de Poisson para ambos casos fue significativa mediante la prueba de bondad de ajuste X^2 con un nivel de significación del 5% y un grado de libertad ($X^2_{1,0.05}=3.84$), arrojando que es de esperarse un evento de inundación en un mismo año ocurra en Baracoa cada dos años y en Gibara cada cuatro. Aunque la muestra cuenta para su análisis con pocas clases y frecuencias esperadas inferiores a cinco, se aplicaron los criterios y correcciones expuestos en la sección de Materiales y Métodos de (Cochran, 1954; Dickinson & Chakraborti, 2003; Dowdy et al., 2004), los cuales se cumplen ya que las frecuencias esperadas siempre son superiores a 1.

La diferencia en el período de retorno para ambas ciudades está dada porque el valor umbral de la altura significativa de la ola para la ocurrencia de los eventos de inundación en Baracoa es de 2.5 m, mientras que para Gibara es de 3.5 m (Hernández et al., 2002; Hidalgo & Mitrani, 2012; Hidalgo et al., 2016), esto está dado por la condiciones físico- geográficas y no por la intensidad de los sistemas meteorológicos que afectan a ambas ciudades que son similares

según (Hidalgo et al., 2016 y 2017). Además, la ciudad primada de Cuba está más expuesta y a su vez es más vulnerable a este tipo de evento meteorológico extremo.

Para el viento máximo y la altura significativa de la ola la distribución de Gumbel resultó adecuada para ambas estaciones de acuerdo a la prueba de Kolmogorov- Smirnov para el nivel de significación del 5%, excepto en el viento máximo para Punta Maisí que lo fue para 1%. De acuerdo al método de cálculo empleado y para un intervalo de confianza del 95% es de esperarse al menos una vez en cincuenta años un viento máximo sostenido de 160 km/h y 180 km/h, así una altura de la ola de 8 m y 9 m con errores de 40 km/h y 60 km/h y 1.6 m y 2.6 m para para las estaciones de Punta de Maisí y Cabo Lucrecia respectivamente.

Aunque no existen diferencias significativas entre los períodos de retorno para el viento máximo y la altura significativa de la ola para Cabo Lucrecia y Punta de Maisí (5 km/h y 1 m), los intervalos de confianza si presentan marcados contrastes, los cuales están dados por la mayor variabilidad para ambas variables existentes en

Tabla 2. Períodos de retorno de las inundaciones costeras para las ciudad de Gibara y Baracoa en la costa nororiental de Cuba.

Casos/año	Gibara					Baracoa				
	Fo	Pe	Fe	Pa	Tr	Fo	Pe	Fe	Pa	Tr
0	41	0,7459	43,2648	0,7459	--	19	0,4447	25,7929	0,4447	--
1	11	0,2186	12,6811	0,9646	3,9	23	0,3604	20,9011	0,8051	1,8
2 o más	3	0,0320	1,8584	0,9966	28,2	8	0,1460	8,4686	0,9511	5,1
Bondad de Ajuste	$\chi^2 = 0.4035$					$\chi^2 = 1.6577$				

Donde:

Fo: Frecuencia observada

Pe: Probabilidad calculada de acuerdo a función de distribución de Poisson.

Fe: Frecuencia estimada.

Pa: Probabilidad acumulada de acuerdo a la distribución de Poisson.

Tr: Período de retorno.

Tabla 3. Períodos de retorno de los vientos fuertes y de la altura significativa de la ola de acuerdo al método de los máximos anuales para la costa nororiental de Cuba.

Período de Retorno	Velocidad máxima del viento		Altura significativa de la ola	
	Punta de Maisí	Cabo Lucrecia	Punta de Maisí	Cabo Lucrecia
1/10	120±25 km/h	130±35 km/h	6±1.0 m	6±1.6 m
1/25	145±30 km/h	160±50 km/h	7±1.4 m	8±2.2 m
1/50	160±40 km/h	180±60 km/h	8±1.6 m	9±2.6 m

Tabla 4. Estadígrafos, coeficientes y medidas de la bondad de ajuste empleados en el cálculo de los períodos de retorno del viento máximo y la altura significativa de ola por intermedio de la distribución de Gumbel para la costa nororiental de Cuba.

Parámetros	Velocidad del viento		Altura de la Ola	
	Punta de Maisí	Cabo Lucrecia	Punta de Maisí	Cabo Lucrecia
\bar{X}	76.7 km/h	73.5 km/h	4.4 m	3.6 m
s	33.1 km/h	40.9 km/h	1.4 m	2.1 m
A	25.8 km/h	31.9 km/h	1.1 m	1.6 m
B	61.8 km/h	55.1 km/h	3.7 m	2.6 m
Bondad de Ajuste	$C_{\alpha=5\%}=0.2243$	$C_{\alpha=5\%}=0.2873$	$C_{\alpha=5\%}=0.2243$	$C_{\alpha=5\%}=0.2591$
	$C_{\alpha=1\%}=0.2689$	$C_{\alpha=1\%}=0.3444$	$C_{\alpha=1\%}=0.2689$	$C_{\alpha=1\%}=0.3507$
D_n	0.2534	0.2271	0.0861	0.0975

Cabo Lucrecia, aunque los valores medios sean mayores para Punta de Maisí. Esto conlleva a que las acciones de manejo costero para la provincia de Holguín tengan que ser más conservadoras que las que se realicen a la costa norte de Guantánamo.

Los períodos de retorno obtenidos en este trabajo son superiores a los graficados por (Pérez, 1994), citado por (Juantorena *et al.*, 2010), tanto para la altura significativa de la ola como para la velocidad máxima del viento. Para aguas profundas de la costa norte oriental (Pérez, 1994) determinó que para una vez en diez años la velocidad del viento sería de 25 m/s (90 km/h) y altura de la ola significativa de 4 m, mientras que en esta investigación para la misma probabilidad se obtuvieron valores de 125-130 km/h y 6 m. La diferencia está dada, como se había mencionado en la sección introductoria de este artículo científico, por el aumento en la frecuencia de los ciclones tropicales en esta región desde 2008, los que han incrementado a su vez los eventos de inundación costera, así como los episodios de vientos máximos y oleaje extremo desde mediados de la primera década del presente siglo (Hidalgo & Mitrani, 2015). El incremento de estos fenómenos antes mencionados no es exclusivo de esta zona del país, ya que para otras regiones del archipiélago cubano se ha determinado tendencias similares (Mitrani *et al.*, 2012 y 2016), producto del incremento de la actividad ciclónica en la Región IV, la cual incluye el Atlántico Norte, el golfo de México y el mar Caribe (Ballester *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

1. Durante el período 1960-2018, los regímenes extremos de viento, oleaje e inundaciones costeras para la costa norte de la región oriental de Cuba ocurrieron al paso de los ciclones tropicales, así como por la combinación de las bajas extratropicales y los anticiclones migratorios durante el período poco lluvioso.
2. Para las ciudades de Gibara y Baracoa ocurren inundaciones costeras con alturas de la ola de 2.5 m y 3.5 m respectivamente, mientras que se espera para estos dos asentamientos al menos un evento de inundación ocurra una vez cada dos y cuatro años en ese orden. En el caso particular de Baracoa el peligro se acentúa aún más por la mayor exposición y vulnerabilidad que presenta esta urbe ante este tipo de evento meteorológico extremo.
3. Las distribuciones teóricas empleadas (Poisson para los eventos de inundación y Gumbel para los regímenes extremos de viento y oleaje) resultaron idóneas para las pruebas de bondad de ajuste X^2 y Kolmogorov- Smirnov para niveles de significación del 5% y 1%, lo que permite aseverar que los cálculos para estas tres variables sean confiables y puedan ser aplicables a planes de contingencia y acciones de manejo costero a nivel provincial y local.
4. Las diferencias entre los períodos de retorno para los regímenes extremos de viento y oleaje para Cabo Lucrecia y Punta de Maisí no superan los 20 km/h y 1 m, sin embargo los intervalos de confianza son marcadamente diferentes debido a la mayor variabilidad

existente en estas variables para Cabo Lucrecia.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la dirección del Instituto de Meteorología y al Programa de Investigación “Meteorología y Desarrollo Sostenible del País” por permitirnos desarrollar el Proyecto “Proyección de las inundaciones costeras en Cuba” (2018-2021), en el marco del cual se obtuvieron los resultados que se presentan en este artículo científico, así como a todos los compañeros que formaron parte del mencionado proyecto. Además, se reconoce la colaboración de la MSc. Arisleydis Peña De la Cruz del CMP de Guantánamo por habernos facilitados los datos del viento máximo para la estación meteorológica de Punta de Maisí.

REFERENCIAS

- Aarnes, O. J.; Breivik, Ø. & Reistad, M. 2012. “Wave Extremes in the Northeast Atlantic”. *Journal of Climate*, 25(5): 1529-1543, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00132.1.
- Ballester, M.; González, C. & Pérez, R. 2010. *Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico*. La Habana: Editorial Academia, 170 p., ISBN: 978-959-270-175-5.
- British Oceanographic Data Center 2009. *GEBCO Digital Atlas*. version 2.12, [Windows], Liverpool, United Kindom: Natural Enviromental Research Council, Available: https://www.bodc.ac.uk/resources/help_and_hints/software_updates/documents/gda_v2.12_software.zip.
- Caires, S. 2011. *Extreme Value Analysis: Wave Data*. (ser. JCOMM Technical Report No. 57), Geneva: World Meteorological Organization and Intergovernmental Oceanographic Commission, 33 p.
- Caires, S. & Sterl, A. 2005. “100-Year Return Value Estimates for Ocean Wind Speed and Significant Wave Height from the ERA-40 Data”. *Journal of Climate*, 18(7): 1032-1048.
- Cochran, W. G. 1954. “Some methods for strengthening the common χ^2 test.”. *Biometrics*, 10(4): 417-451.
- Córdova, O., L.; García, M. & López, A. 2018. “Cronología de las inundaciones costeras en la provincia de Ciego de Ávila. Periodo 1960-2017”. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(2): 136-145, ISSN: 0864-151X.
- Dickinson, J. & Chakraborti, S. 2003. *Nonparametric Statistical Inference*. (ser. Statistics: Textbooks and Monographs, no. ser. 168), Fourth Edition ed., New York: Marcel Dekker, Inc., 645 p., ISBN: 0-8247-4052-1.
- Dowdy, S.; Wearden, S. & Chilko, D. 2004. *Statistics for Research*. (ser. Wiley Series in Probability and Statistics), Third Edition ed., New Jersey: John Wiley&Sons, 627 p.
- Goda, Y. 2000. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. (ser. Advances Series on Ocean Engineering), Second Edition ed., vol. 15, New Jersey-London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 443 p., ISBN: 981-02-3256-X.
- González, C. M.; González, P. & Hernández, J. F. 2017. “Evaluación de la afectación del huracán Irma, utilizando la modelación numérica en las provincias de Artemisa y Mayabeque”. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(3): 363-377, ISSN: 0864-151X.
- Hernández, N.; Vega, R. & Casals, R. 2002. “Estudio de los Sistemas Meteorológicos que han afectado a Baracoa por penetraciones del mar e inundaciones costeras.”. *Revista Cubana de Meteorología*, 9(2): 58-68.
- Hidalgo, A. & Mitrani, I. 2012. “Particularidades hidrometeorológicas del litoral Gibara-Playa Guardalavaca”. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2): 152-163, ISSN: 0864-151X.
- Hidalgo, A. & Mitrani, I. 2015. “Tendencias climáticas de las inundaciones costeras en el litoral Gibara-Playa Guardalavaca, provincia Holguín, Cuba”. *Revista de Climatología*, 15: 93-102, ISSN: 1578-8768.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I. & Pérez, G. 2017. “Nueva clasificación de las inundaciones costeras en Cuba”. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2): 209-216, ISSN: 0864-151X.

- Hidalgo, A.; Mitrani, I.; Pérez, G.; Hernández, N.; Córdova, O., L.; Regueira, V.; Ramírez, W.; González, C. M.; Machado, A.; Perigó, E.; Lorenzo, L.; Agüero, K.; Vinajera, V.; Jiménez, J.; Boligán, M.; Sánchez, L.; Victorero, A.; Mursulí, A.; García, L.; Ortega, F. E.; Castellanos, M. J.; Araujo, L. A.; Báez, E.; Laborde, N. & Casals, R. 2016. *Cronología de las inundaciones costeras por penetración del mar para el archipiélago cubano*. Resultado Científico, Holguín: CMP Holguín, Instituto de Meteorología, p. 40.
- Insmet 2012. *Atlas Climático de Cuba*. La Habana: Grupo Empresarial Geocuba, 217 p., ISBN: 92-63-10781-5.
- Insmet 2017. *Resumen de la temporada ciclónica 2017*. La Habana: Instituto de Meteorología, Available: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=TEMPORADA&TB2=/Temporadas/temporada2017.html> , [Consulted: September 24, 2018].
- Juantorena, J.; Álvarez, A. & Pérez, O. E. 2010. *Cálculo del peligro de inundaciones costeras por penetraciones del mar Holguín*. La Habana: Grupo de Evaluación de Riesgos, Agencia de Medio Ambiente, Citma, p. 29.
- Lapinel, B. 1989. "Situaciones Sinópticas Predominantes". In: *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*, La Habana: Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba e Instituto de Cubano de Geodesia y Cartografía, ISBN: 84-7819-007-4.
- Lecha, L. B.; Paz, L. R. & Lapinel, B. (eds.). 1994. *El Clima de Cuba*. La Habana: Editorial Academia , 186 p., ISBN: 959-02-0006-9.
- Mazas, F.; Kergadallan, X.; Garat, P. & Hamm, L. 2014. "Applying POT methods to the Revised Joint Probability Method for determining extreme sea levels". *Coastal Engineering*, 91: 140-150, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.05.006.
- Mitrani, I.; Díaz, O. O.; Vichot, A.; Hernández, I.; Hidalgo, A.; García, E. & Rodríguez, J. A. 2012. "Tendencias climáticas de las inundaciones costeras severas en áreas de Cuba". *Revista Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 13(2): 68-84, ISSN: 1729-3790.
- Mitrani, I.; Hernández, I.; García, E.; Hidalgo, A.; Díaz, O. O.; Vichot, A. & Rodríguez, J. A. 2016. "The Coastal Flood Regime around Cuba, the Thermohaline Structure Influence and Its Climate Tendencies". *Environment and Ecology Research*, 4(2): 37-49, DOI: 10.13189/eer.2016.040201.
- Mitrani, I. & Salas, I. 1998. "Elaboración del régimen de oleaje extremo por métodos numéricos.". In: *Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras, Prevención y Reducción de su Acción Destructiva.*, La Habana: Instituto de Meteorología , pp. 73-81.
- Mitrani, I.; Vega, R.; Pérez, R. & Salas, I. 1999. "Determinación de las características extremas del viento, el oleaje y la sobreelevación del nivel del mar en las costas de Cuba.". *Revista Cubana de Meteorología* , 6(1): 38-42.
- Pérez, P. J. 1994. *Estudio del régimen de vientos y olas en diferentes zonas marinas de interés socioeconómico para Cuba*. Informe Técnico, La Habana: Instituto de Meteorología .
- Povea, Y. & Mitrani, I. 2016. "Particularidades de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel". *Revista Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 17(2): 160-170, ISSN: 1729-3790.
- Roque, A., E.; Montenegro, U. & Peña, A. 2018. "Particularidades del viento en la region oriental del país". *Revista Cubana de Meteorología* , 24(3): 335-348, ISSN: 0864-151X.
- Salas, I. & Mitrani, I. 1992. "Elementos de ola de viento en un ciclón tropical.". *Revista Cubana de Meteorología* , 5(2): 40-44.
- Salas, I.; Moreno, A.; Mitrani, I. & Lezcano, J. C. 1992. "Oleaje máximo y régimen hidroclimático de la costa sur de la región oriental.". *Revista Cubana de Meteorología* , 5(1): 12-16.
- Stocker, T., F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S., K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. & Midgley, P., M. (eds.). 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*. Cambridge, UK and New York, USA:

Cambridge University Press, 203 p., ISBN: ISBN 978-92-9169-138-8.

USACE 2006. *Coastal Engineering Manual*. (no. ser. Engineer Manual 1110-2-1100), vol. II, Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1720 p., Available: Available: http://download.library1.org/main/1006000/3b661a9d3c9015dfaa094a55e39eb279/-Coastal%20Engineering%20Manual-U.S.%20Army%20Corps%20of%20Engineers%20%282002_%202006%29.pdf, [Consulted: November 8, 2018].

Vinoth, J. & Young, I. R. 2011. "Global Estimates of Extreme Wind Speed and Wave Height". *Journal of Climate*, 24(6): 1647-1665, DOI: 10.1175/2010JCLI3680.1.

Wilks, D. S. 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Third Edition ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier/Academic Press, 676 p., ISBN: 978-0-12-385022-.

WMO 1994. *Guide to the Applications of Marine Climatology*. (no. ser. WMO # 781), Geneva: World Meteorological Organization, 144 p., ISBN: 92-63-10781-5.

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/)