

Período de retorno de las inundaciones costeras en el archipiélago cubano

Axel Hidalgo Mayo

E-MAIL: axel.hidalgom@gmail.com

Investigador Auxiliar Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología

Ida Mitrani Arenal

E-MAIL: ida.mitrani@insmet.cu

Investigadora Titular Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

RESUMEN

En el presente artículo se calculó el período de retorno de las inundaciones costeras para cada uno de los asentamientos costeros que reportan estos eventos extremos en el archipiélago cubano, tomando como base el período 1901-2020. Se utilizó la cronología y clasificación de las inundaciones costeras para cada provincia, así como la distribución de Poisson y el test de bondad de ajuste χ^2 . Se concluye que la distribución de Poisson resultó idónea en todos los casos para el nivel de significación del 5%; mientras que el mayor peligro lo presentan La Habana, Baracoa y los asentamientos del golfo de Batabanó, en los cuales se espera la ocurrencia de un evento de inundación al menos una vez cada tres a cinco años.

**PALABRAS
CLAVES:**

cambio climático, inundaciones costeras, períodos de retorno

Return period of coastal flooding in Cuban archipelago

ABSTRACT

In this paper was calculated the return period of coastal floods for each of the coastal settlements that report this extreme event in the Cuban archipelago, based on the period 1901-2020. The chronology and classification of coastal floods for each province was used, as well as the Poisson distribution and the χ^2 goodness of fit test. It is concluded that the Poisson distribution was suitable in all cases for the significance level of 5%; while the greatest hazard is presented by Havana, Baracoa and the settlements of the Gulf of Batabanó in which the occurrence of a flood event is expected at least once every three to five years.

KEYWORDS: climate change, coastal flooding, return period

01 INTRODUCCIÓN

El factor fundamental que determina la ocurrencia de las inundaciones costeras es la sobreelevación del nivel medio del mar, resultado del sistema meteorológico que la genera y su movimiento respecto a la línea costera, así como las características físico-geográficas del área afectada (batimetría y pendiente terrestre). En la naturaleza se identifican tres formas de sobreelevación del nivel del mar por causas meteorológicas: surgencia ciclónica, rompiente de oleaje y arrastre del viento. Estos tres tipos de sobreelevación nunca aparecen aislados pudiéndose combinar los tres a la vez, solo que predominará uno u otro en dependencia de las fuerzas actuantes y las condiciones locales de la zona de estudio (Mitrani et al. 2017).

En los últimos años la frecuencia de los huracanes y los eventos extremos asociados a los mismos, particularmente las inundaciones costeras, se han incrementado sobre el archipiélago cubano, tanto en frecuencia como en intensidad (Ballester et al. 2010, Mitrani et al. 2017). Es de destacar que en Cuba, desde 2005 se han producido inundaciones costeras fuertes a lo largo y ancho de todo el país, las cuales han llegado a ser las más intensas de los registros en varias provincias: Dennis (2005) Granma; Wilma (2005) Malecón Habanero; 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. 2017).

En Cuba el estudio relacionado con el peligro de las inundaciones costeras estuvo centrado durante mucho tiempo en la zona del Malecón Habanero, los asentamientos del golfo de Batabanó y la ciudad de Baracoa, siendo el trabajo de (Moreno 1998) un compendio de los principales avances en este campo de las ciencias meteorológicas hasta los años 90 del siglo XX. Posteriormente comenzaron a estudiarse otras regiones del país, tales como la ciudad de Gibara (Hidalgo y Mitrani 2012), hasta que a raíz de los resultados obtenidos en (Hidalgo et al. 2017) se sentaron las bases para realizar análisis espaciales de este evento meteorológico extremo a lo largo y ancho del archipiélago cubano.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) en (WMO 2018), exhorta a sus miembros a establecer comparaciones, tanto espaciales como temporales, entre las características de las distribuciones de frecuencias de los datos y fenómenos climatológicos con el fin de lograr una mejor interpretación de los mismos. A partir de todo lo planteado con anterioridad, la presente investigación tiene como fin determinar la probabilidad de ocurrencia de los eventos de inundación costera, así como analizar su distribución espacial en los diferentes tramos costeros del archipiélago cubano.

02 CRONOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE LAS INUNDACIONES COSTERAS EN CUBA

En el archipiélago cubano, la sobreelevación del nivel del mar capaz de producir inundaciones costeras por penetraciones del mar depende del sistema meteorológico que las genera y su movimiento respecto a la línea de la costa, así como a las características físico-geográficas del área afectada. En sentido general, la frecuencia y magnitud de estos eventos está modulada por la variabilidad interanual y multianual que presentan los sistemas meteorológicos que los generan: ciclones tropicales para todos los tramos costeros cubanos, frentes fríos (costa norte de las regiones occidental y central), eventos “Sures” (golfo de Batabanó) y la combinación de las altas presiones migratorias con las bajas extratropicales (costa norte de la región oriental), fundamentalmente, en presencia del evento El Niño- Oscilación del Sur (ENOS) (Hidalgo et al. 2017, Mitrani et al. 2017).

Los tramos costeros empleados en la presente investigación se presentan en la figura 1, fueron seleccionados tomando en cuenta las condiciones físico-geográficas (batimetría y pendiente terrestre) y la sobre elevación del nivel del mar causada por fenómenos y eventos meteorológicos que provocan inundaciones costeras (Moreno 1998, Hidalgo et al. 2017, Mitrani et al. 2017). En este sentido, se considera la costa norte occidental la comprendida entre Cabo San Antonio y la Península de Hicacos, la norte central entre la Península de Hicacos y Punta Maternillos, la norte oriental entre Punta Maternillos y Punta de Maisí, la sur oriental entre Punta de Maisí y Cabo Cruz, la sur central entre Cabo Cruz y el Golfo de Cazones, mientras que la sur occidental es la ubicada desde el Golfo de Cazones hasta el Cabo de San Antonio, la cual incluye el golfo de Batabanó así como el sur de la Isla de la Juventud.

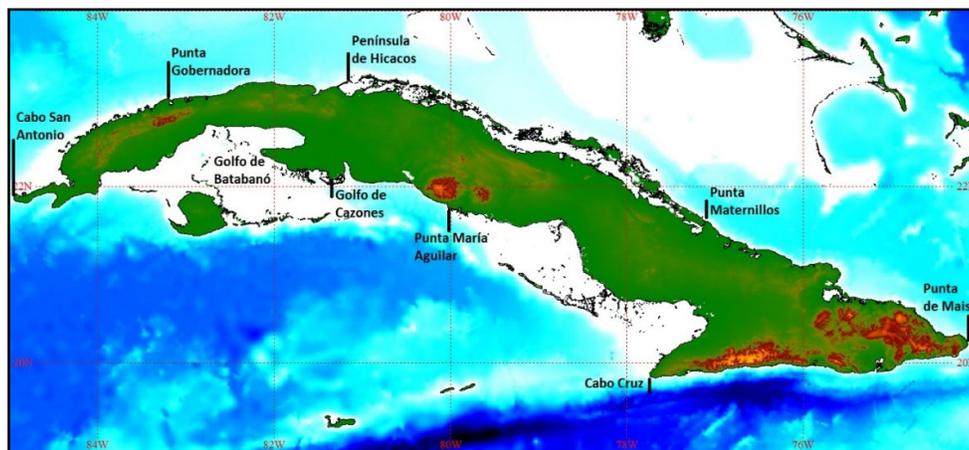


Figura 1 Tramos costeros del archipiélago cubano empleados en la presente investigación.

En este trabajo se consideran eventos de inundación costera aquellos en los cuales el agua de mar avanzó tierra adentro con una afectación directa a uno o varios asentamientos costeros y/o objetivos económicos ubicados en la zona costera del archipiélago cubano. La estratificación de estos eventos meteorológicos extremos se presenta en la tabla 1, de acuerdo a la nueva clasificación para este fin elaborada por (Hidalgo et al. 2017), la cual está basada en el alcance horizontal del agua de mar tierra adentro, las condiciones físico- geográficas y la sobre elevación del nivel del mar por causas meteorológicas que generan los sistemas meteorológicos que los afectan en cada uno de los tramos costeros del territorio cubano.

Tabla 1 Clasificación de las inundaciones costeras en Cuba según el alcance horizontal del agua de mar tierra adentro.

| Clasificación | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 |
|---------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| Ligeras | 0 – 500 m | 0 – 250 m | 0 – 100 m | 0 – 50 m |
| Moderadas | 501 – 1000 m | 251 – 500 m | 101 – 200 m | 51 – 100 m |
| Fuertes | ≥ 1001 m | ≥ 501 m | ≥ 201 m | ≥ 101 m |

Elaborado a partir de (Hidalgo et al. 2017)

- Grupo 1: Costa sur (CS) de las provincias de Artemisa, Mayabeque y Camagüey.
- Grupo 2: Pinar del Río (ambas costas); Isla de la Juventud, Cienfuegos, Villa Clara, Sancti Spíritus (ambas costas), Las Tunas (CS), Holguín y Guantánamo (CS).
- Grupo 3: Matanzas (ambas costas), costa norte (CN) de Camagüey, Las Tunas (CN), Granma y Guantánamo (CN).

- Grupo 4: Artemisa y Mayabeque (CN), Ciego de Ávila (ambas costas) y Santiago de Cuba.

En los casos particulares de La Habana y Baracoa, las clasificaciones se presentan en la tabla 2 y están basadas de igual manera en el alcance del agua de mar tierra adentro, pero con la particularidad de que los puntos de referencia son calles aledañas a los malecones de ambas ciudades.

Tabla 2 Clasificación de las inundaciones costeras para los malecones de La Habana y Baracoa

| Clasificación | Malecón de La Habana | Malecón de Baracoa |
|---------------|--|---|
| Ligeras | Solo se afecta la Avenida Malecón | El agua avanza hasta la avenida contigua al malecón |
| Moderadas | Alcance del agua de mar hasta las avenidas 3ra y 5ta en El Vedado | El agua de mar avanza hasta la Calle Maceo |
| Fuertes | Afectaciones hasta las calles Calzada y Línea en el Vedado, inundándose el túnel en casos extremos | El agua de mar avanza más allá de la Calle Maceo |

Elaborado a partir (Pérez et al. 2001, Hernández et al. 2002)

Los análisis de los períodos de retorno de los eventos de inundación se realizaron para los asentamientos costeros que reportan una mayor frecuencia de inundaciones costeras en el archipiélago cubano, a partir de los resultados de (Hidalgo et al. 2017, Mitrani et al. 2017). La ubicación geográfica de los mismos se presenta en la figura 2, donde se puede apreciar su distribución irregular, existiendo en todas las provincias del país, con excepción de Pinar del Río, Isla de la Juventud y Sancti Spíritus.

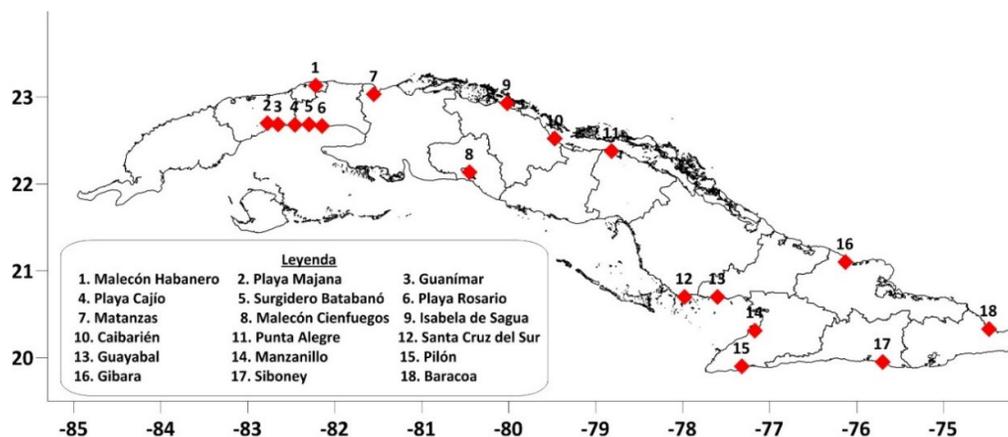


Figura 2 Distribución espacial de los asentamientos costeros utilizados en la presente investigación.

Todos los asentamientos costeros utilizados, con excepción de los malecones de La Habana y de Baracoa, así como Gibara y Siboney están ubicados en zonas costeras de pendiente suave, lo que indica la fuerte incidencia que tienen las características físico- geográficas en el desarrollo y magnitud de las inundaciones costeras en el archipiélago cubano, independientemente del sistema meteorológico que las genera.

03 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL CÁLCULO DE LOS PERÍODOS DE RETORNO

El análisis extremo de los eventos de inundación costera se centra en la caracterización estadística para largas series temporales de una región determinada. Es decir, son un subconjunto de datos que permiten determinar las acciones de diseño a soportar por una obra marítima determinada en

función de su vida útil. Desde el punto de vista probabilístico estos eventos deben ser independientes, o sea que no estén asociados a una misma situación meteorológica.

Para las inundaciones costeras, (Wilks 2019) recomienda el uso de la distribución de Poisson como variable discreta, 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:

$$P(x) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^x}{x!} \quad (1)$$

Donde:

$P(x), \lambda, x$: Probabilidad de ocurrencia del evento n-ésimo, promedio del número de eventos por años y número de eventos en el período de observación respectivamente.

El período de retorno se calculó para los eventos moderados y fuertes, por ser los que ocasionan las mayores afectaciones en el archipiélago cubano (Hidalgo et al. 2017, Mitrani et al. 2017). Para ello se empleó la serie 1901-2020, la cual es homogénea en todos los asentamientos, lo que permitió la comparación del peligro por este tipo de fenómeno meteorológico extremo entre diferentes provincias y costas cubanas.

Para determinar si la distribución de probabilidad escogida es idónea, se empleó la prueba no paramétrica χ^2 la cual tiene la siguiente expresión según (Wilks 2019):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_{0i} - F_{ei})^2}{F_{ei}} = \sum_{i=1}^k \frac{(F_{0i} - n \cdot P_i)^2}{n \cdot P_i} \quad (2)$$

Donde:

i, n : Clases ($i=1, 2, \dots, k$) y tamaño de la muestra.

F_{0i}, F_{ei} : Frecuencia observada y estimada de la clase i respectivamente.

P_i : Probabilidad estimada de la clase i .

Si $\chi^2 > \chi^2_{(1-\alpha; k-m-1)}$ (distribución χ^2 con $k-m-1$ grados de libertad y un percentil $1-\alpha$), se rechaza la hipótesis nula, o sea que la distribución escogida no es adecuada. En este caso m , representa la cantidad de parámetros que se necesitan estimar, como es solamente (λ , media de la distribución) $m=1$. Para un nivel de significación del 5%, la distribución χ^2 con uno y dos grados de libertad y un percentil de 0,95 toma los valores de 3,84 y 5,99 respectivamente.

Aunque la prueba χ^2 tiene limitaciones en los casos que la frecuencia observada es menor que cinco y hay pocas clases, (Dickinson and Chakraborti 2011) recomiendan su uso siempre y cuando la frecuencia esperada sea mayor a 1, en tanto si la distribución tiene un solo grado de libertad estos propios autores recomiendan emplear la corrección de Yates:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(|F_{0i} - F_{ei}| - 0.5)^2}{F_{ei}} \quad (3)$$

Aunque matemáticamente es posible calcular períodos de retorno relativamente largos (por ejemplo, una vez en 50 años o en 100 años), de acuerdo a (Wilks 2019) 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. Matemáticamente el período de retorno se calcula de la siguiente manera:

$$T_r = \frac{1}{1 - P_a} \quad (4)$$

Donde:

T_r, P_a : Período de retorno en años y probabilidad acumulada respectivamente.

04 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL PELIGRO POR INUNDACIONES COSTERAS EN CUBA

La distribución de Poisson empleada en el cálculo del período de retorno de las inundaciones costeras moderadas y fuertes resultó idónea para todos los asentamientos costeros para el nivel de significación del 5%. Para analizar la bondad de ajuste se emplearon los cálculos para dos clases y tres clases (malecón habanero, asentamientos del golfo de Batabanó y malecón de Baracoa que son los únicos donde la clase de frecuencia esperada de dos eventos de inundación en un mismo año son superiores a 1) y se cumple la corrección de Yates (Dickinson and Chakraborti 2011). Los cálculos se realizaron para una muestra de 120 años (1901-2020), en tanto la distribución chi-cuadrado toma el valor de 5,991 y 3,841 para dos y un grado de libertad en el percentil 95 respectivamente.

En la tabla 3 se presenta un resumen de los cálculos realizados en la estimación del período de retorno de acuerdo a la Distribución de Probabilidad de Poisson, así como la bondad de ajuste de la misma de acuerdo a la dódima chi- cuadrado. En todos los asentamientos costeros (ver figura 2) la función de distribución resultó idónea para el nivel de significación del 5% (valor chi-cuadrado calculado inferior al valor chi-cuadrado teórico). Además, en todos los casos la frecuencia esperada (probabilidad estimada de acuerdo a la distribución de Poisson multiplicado por la cantidad de años, en este caso 120) explica más del 99% del período de retorno de los eventos de inundación costera.

Tabla 3 Resumen de la bondad de ajuste χ^2 para la distribución de Poisson en los diferentes asentamientos costeros empleados en la presente investigación.

| Asentamientos costeros | 1 | 2-6 | 7,12 | 8 | 9,10,14,15,17 | 11,13 | 16 | 18 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| λ | 0,442 | 0,300 | 0,058 | 0,033 | 0,092 | 0,042 | 0,117 | 0,242 |
| χ^2 calculada | 1,340 | 3,207 | 0,002 | 0,037 | 0,021 | 0,020 | 0,001 | 0,754 |
| χ^2 teórica | 5,99 | 5,99 | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 5,99 |
| Frec. Esperada (Fe) | 118,8 | 119,6 | 119,8 | 119,9 | 119,5 | 119,9 | 119,2 | 119,8 |
| Fe/Total años (%) | 99,0 | 99,7 | 99,8 | 99,9 | 99,6 | 99,9 | 99,3 | 99,8 |

Elaboración propia

La distribución espacial del período de retorno de las inundaciones costeras en Cuba se presenta en la figura 3, donde se aprecia que el mayor peligro para los eventos moderados y fuertes en el archipiélago cubano ocurre en los malecones de La Habana y Baracoa, así como en los asentamientos costeros del golfo de Batabanó donde se espera la ocurrencia de un evento de inundación al menos una vez entre tres y cinco años, seguido por la ciudad de Gibara con un caso cada nueve años. Estos resultados están a tono con la valoración del peligro realizada por diferentes autores cubanos (Moreno 1998, Mitrani et al. 2017). En el resto del país, los eventos de estas magnitudes pudieran

ocurrir al menos una vez entre 10-20 años en Caibarién, Isabela de Sagua, Pilón, Manzanillo, Siboney, Matanzas y Santa Cruz del Sur; en tanto en Guayabal, Punta Alegre y el malecón de Cienfuegos el peligro disminuye hasta la posibilidad de ocurrencia de un evento cada 20-30 años.

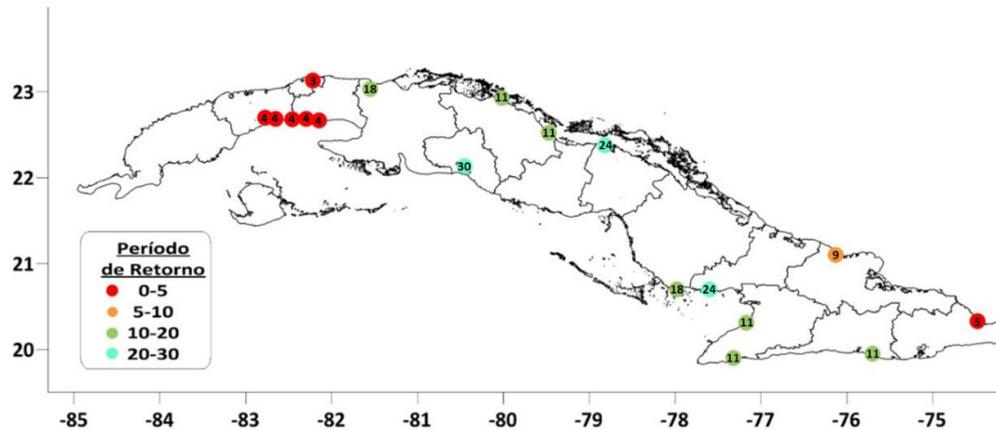


Figura 3 Distribución espacial de los períodos de retorno de un evento de inundación costera moderada o fuerte en un año.

Es importante hacer hincapié en la interpretación de los períodos de retorno de este tipo de fenómeno meteorológico extremo, ya que el peligro está en función de la intensidad del evento (alcance del agua de mar) a partir de la clasificación de (Hidalgo et al. 2017). Aunque la magnitud de los eventos de inundación depende de las particularidades del sistema de la escala sinóptica que lo genera, las características físico- geográficas del lugar tienen un papel preponderante en la amplificación de la inundación, tales como la configuración del fondo marino y la pendiente de la costa. Por ejemplo, en Santa Cruz del Sur y Matanzas, se espera que un evento de inundación moderado o fuerte ocurra una vez cada 18 años, sin embargo, en el asentamiento camagüeyano este tendría un alcance tierra adentro superior a 500 m, mientras que en Matanzas esta solo sería superior a 100 m. Este análisis deja explícito que la interpretación del período de retorno tiene que ir acompañado del alcance del agua de mar tierra adentro, con el fin de poder evaluar las implicaciones tanto sociales como económicas de los mismos.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de analizar el peligro de este tipo de evento meteorológico extremo, es por ejemplo lo que ocurre entre las ciudades de Baracoa y Gibara, donde la primera triplica el peligro a la segunda. No obstante a ello, la diferencia debe analizarse por el valor umbral de la altura significativa de la ola que genera el efecto de wave setup y provoca los eventos de inundación moderadas y fuertes, que para el caso de Baracoa es de 3,5 m, mientras que para Gibara es de 4,5 m (Hernández et al. 2002, Hidalgo y Mitrani 2012). Es decir, que el peligro está condicionado por las características físico- geográficas, y en menor medida por la intensidad de los sistemas meteorológicos que afectan a ambas ciudades que son similares según (Hernández et al. 2002, Hidalgo et al. 2017). Además, Baracoa está más expuesta y a su vez es más vulnerable a este tipo de evento meteorológico extremo que Gibara.

05 CONCLUSIONES

Los asentamientos cubanos que reportan inundaciones costeras presentan una distribución irregular, existiendo en todas las provincias del país, con excepción de Pinar del Río, Isla de la Juventud y Sancti Spiritus. De los mismos, solamente los malecones de La Habana y de Baracoa, así

como Gibara y Siboney están ubicados en tramos costeros de pendiente abrupta, mientras que el resto (14) están situados en zonas de pendiente suave, lo que manifiesta un alto grado de incidencia de las características físico-geográficas en el desarrollo y magnitud de las inundaciones costeras en el archipiélago cubano, lo cual se amplifica en función de las particularidades del sistema meteorológico.

La distribución de Poisson resultó idónea para la estimación del peligro de los eventos de inundación para todo el archipiélago cubano, a partir de la prueba de bondad de ajuste χ^2 para el 5% de significación con una exactitud superior al 99%. La misma arrojó, que los asentamientos costeros con mayor peligro a las inundaciones moderadas o fuertes en el archipiélago cubano son los ubicados en el golfo de Batabanó, así como los malecones de La Habana y Baracoa con una probabilidad de al menos un evento cada tres o cinco años, seguido por la ciudad de Gibara con una posible ocurrencia de un caso cada nueve años. En el resto de los asentamientos cubanos las probabilidades de ocurrencia son superiores a un caso por década.

En el cálculo de los períodos de retorno de los eventos de inundación moderados y fuertes, los elementos físico-geográficos desempeñaron un papel cardinal, ya que estos condicionan la intensidad del evento (alcance del agua de mar tierra adentro), a partir de la clasificación de (Hidalgo et al. 2017), aunque también es significativo la magnitud y particularidades del sistema de la escala sinóptica que lo genera. Esto permite comparar diferentes tramos costeros, independientemente, de las condiciones locales y de los sistemas meteorológicos que las generan.

06 REFERENCIAS

Ballester M., González C. y Pérez R. (2010). "Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico", Editorial Academia, ISBN 978-959-270-175-5, La Habana.

Dickinson J. D. and Chakraborti S. (2011). "Nonparametric Statistical Inference", Fifth Edition, ISBN 978-1-4200-7762-9, Taylor and Francis Group, New York.

Hernández N., Vega R. y 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, ISSN 0864-151X.Cuba

Hidalgo A. y Mitrani I. (2012). "Particularidades hidrometeorológicas del litoral Gibara-Playa Guardalavaca", Revista Cubana de Meteorología, 18 (2): 152-163, ISSN 0864-151X.Cuba

Hidalgo A., Mitrani I. y Pérez G. (2017). "Nueva clasificación de las inundaciones costeras en Cuba", Revista Cubana de Meteorología, 23 (2): 209-2016, ISSN 0864-151X. Cuba

Mitrani I., García E., Hidalgo A., Hernández I., Salas I., Pérez R., Díaz O., Vichot A., Pérez A., Cangas R., Álvarez L., Pérez O., Rodríguez J. A., Rodríguez C.M., Pérez A.L., Morales A., Viamontes J. y Pérez J. (2017). "Inundaciones costeras en Cuba y sus tendencias climáticas", ISBN 978-959-237-730-1, Editorial CITMATEL, La Habana.

Moreno A. (1998). "Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras, Prevención y Reducción de su Acción Destructiva", Informe Final del Proyecto: Cuba 94/003, Instituto de Meteorología, La Habana.

Pérez P. J., Casals R., del Sol A. y Díaz L. (2001). “Análisis de los fenómenos meteorológicos que provocaron penetraciones del mar en el malecón habanero”, *Revista Cubana de Meteorología*, 8 (1): 50-58, ISSN 0864-151X.Cuba

Wilks D. S. (2019). “Statistical Methods in the Atmospheric Sciences”, Fourth Edition, ISBN 978-0-12-815823-4, Elsevier, Amsterdam.

WMO (2018). “Guide of Climatological Practices”, WMO-No. 100, Third Edition, ISBN 978-92-63-10100-6, Secretariat of World Meteorological Organization, Geneva. Download: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5541, February 2019.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Axel Hidalgo Mayo. <https://orcid.org/0000-0001-8786-3463>

Trabajó en el procesamiento de los datos, así como en su análisis e interpretación. Se encargó de la redacción del manuscrito y la edición final del mismo.

Ida Mitrani Arenal. <https://orcid.org/0000-0002-0830-2842>

Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados. Además, trabajó en la revisión del manuscrito.