

Particularidades de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel

Yoania Povea-Pérez ^(1*) e Ida Mitrani-Arenal ⁽¹⁾

¹*Instituto de Meteorología, Cuba; yoania.povea@insmet.cu; ida.mitrani@insmet.cu*

Recibido: enero 1, 2016	Aceptado: septiembre 30, 2016
-------------------------	-------------------------------

Resumen

Se analizan las particularidades de las inundaciones costeras, generadas por diversos sistemas meteorológicos, que afectan a la bahía de Mariel, con énfasis en el incremento del nivel del mar y el alcance espacial de la inundación. Los análisis de los campos de viento, el mar de viento y el mar de leva que lo acompaña, fueron también realizados y se determinaron las características del oleaje, mediante aproximaciones numéricas. Se estableció el incremento del nivel del mar por causas meteorológicas y astronómicas con los registros mareográficos disponibles en el área. Se calcularon los períodos de retorno de las inundaciones costeras y se investigó su posible impacto en los aspectos económico y social de la zona de estudio. En el área, es posible que se produzca una inundación importante, al menos una vez en 4.2 años, lo cual deberá tenerse en cuenta para las acciones de manejo costero-ambiental que se realicen en el área.

Palabras clave: bahía de Mariel, inundaciones costeras, régimen de oleaje

Particularities of coastal floods in Mariel bay

Abstract

The particularities of the coastal flood regime, generated by meteorological systems that affect to the bay of Mariel, were analyzed with emphasis on the sea level rise, flood duration and spatial dimensions. The wind, wind wave and swell as main fields in the floods, were analyzed too and the wave characteristics were obtained, using some numerical approaches. The sea level rise values were determinate, using the available mareographic records. The return periods of the coastal floods and wind waves were calculated. The possible flood impacts on the economic and social aspects of the study area were investigated. A coastal flood event could occurs at less once on 4.2 years, so it is very important to take into account the local flood regime, before the execution of any shore and environment management action on the study area

Keywords: coastal floods, Mariel bay, wind wave regime

1. Introducción

En respuesta a los acuerdos refrendados por el VI Congreso del Partido Comunista de Cuba que en su Lineamiento 103 promueve la creación de Zonas Especiales de Desarrollo, se decide establecer en Cuba una Zona Especial de Desarrollo, ubicada en el municipio Mariel de la provincia artemiseña. El dragado de la bahía habilitó ese punto de la geografía porque presenta una posición estratégica, ubicada en un punto de amplio intercambio comercial. Se encuentra en el centro donde se cruzan los ejes Norte-Sur y Este-Oeste en el hemisferio occidental, tanto para el transporte aéreo como marítimo. A 1 600km alrededor de la Zona se localizan 32 puertos de 17 países, de los más importantes de la región, para los cuales reviste gran importancia contar con un punto de enlace con el resto del mundo, en la zona central de los mares Interamericanos.

La ubicación de la bahía de Mariel en la costa norte de la región occidental de Cuba y la alta frecuencia con que ésta es afectada por áreas generadoras de oleaje asociadas a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos severos, determinan el alto peligro de ocurrencia de inundaciones. Estos patrones sinópticos pueden ser generadores de inundaciones costeras, fenómenos que pudieran traducirse en cuantiosas pérdidas materiales para las nuevas instalaciones portuarias.

La carencia de estudios científicos que caractericen el comportamiento de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel pone en riesgo los proyectos asociados a la Zona Especial de Desarrollo. Por tal motivo el objetivo central del presente trabajo es analizar el comportamiento de estos eventos, para lo cual se confecciona una cronología de los eventos generados durante los siglos XX y XXI y se caracteriza las particularidades de cada episodio atendiendo al evento que las genera, viento medio, altura de ola significativa y registro mareográfico. Finalmente se estima el régimen de las inundaciones costeras que afectan a bahía de Mariel y se calcula, mediante ajustes de curvas, los períodos de retorno de la altura de ola en aguas profundas y de las inundaciones, en la zona de estudio.

La condición insular de Cuba y la fragilidad de sus ecosistemas, hace que sea altamente susceptible a los desastres naturales, los cuales provocan impactos en la actividad socioeconómica y que pueden conllevar grandes pérdidas económicas y humanas. Resulta de vital importancia la posibilidad de emitir sistemas de Alerta Temprana en la Zona Especial de Desarrollo de Mariel con los aportes realizados por la presente investigación, y constituye una valiosa herramienta para la toma de decisiones por parte de la Defensa Civil en caso de la ocurrencia de episodios de inundaciones costeras.

2. Materiales y métodos

2.1 Características físico-geográficas e hidrometeorológicas de la bahía de Mariel

La bahía de Mariel penetra formando una bolsa en la costa norte de la isla de Cuba, en los 23°01' latitud norte y 82°46' longitud oeste, entre punta Cayuelo y Punta Barlovento. Se comunica con el Golfo de México a través de su boca de entrada, con un estrecho canal de navegación de aproximadamente 100m en su centro que permite el paso de embarcaciones de gran porte. Presenta un ancho de 389m entre costas, una longitud de 4.5km y muestra un espejo de agua con un área de 7.8km² con una profundidad máxima de 10m. El canal presenta 1km de largo y 50m de ancho. El área de la bahía se distingue por dos grandes lóbulos: la ensenada de Laza, con profundidad de 10m y aproximadamente un 15 % del área total, y la bahía de Mariel. Presenta en sus márgenes interiores un perímetro de aproximadamente 32km, lo que le confiere una extensión en su eje central de unos 5km.



Fig. 1 Vista satelital de la bahía de Mariel (<https://earth.google.es>)

Las costas de la bahía son, en su mayor parte, rocosas y escarpadas, con algunas porciones bajas, cenagosas y cubiertas de mangles. La costa oeste de la bahía de Mariel es accidentada y relativamente baja en su mayor parte, sobresale la península Angosta, mientras que la costa oriental es accidentada, rocosa y relativamente alta (ICH, 1988).

2.2 Datos empleados

Para analizar el comportamiento de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel se emplearon los datos horarios de la estación meteorológica 78318 de Bahía Honda, los registros de viento de la boy 42003 ubicada en la zona oriental del Golfo de México, los registros del mareógrafo de Mariel (pertenecientes a la Empresa GeoCuba), los datos históricos de reanálisis en el período de estudio, de 1980 a 2010, libremente disponibles en línea. Como herramientas de trabajo se emplearon el software SPSS v15.0 para el tratamiento estadístico de los datos y el software Curve Expert v1.4 para graficar las funciones de retorno calculadas.

2.3 Descripción estadística de las series de tiempo de los datos de viento de la estación de Bahía Honda y de la boy 42003

Se describe estadísticamente las series de velocidad del viento en la estación de Bahía Honda y de la boy 42003 para lo cual se le calculó a los registros de viento el valor medio, la desviación estándar, los valores máximo y mínimo y la varianza. Se aplicaron pruebas de hipótesis no paramétricas recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) debido a su efectividad y sencillez para explorar la estructura interna de las series (Sneyers, 1990). Específicamente, se efectuaron las pruebas de Wald-Wolfowitz para evaluar el carácter aleatorio de la serie, y las pruebas de Pettit y Mann-Kendall para análisis de tendencia.

2.4 Cálculo de la función de retorno

El cálculo de los períodos de retorno de las inundaciones costeras se realizó mediante la función de distribución de Poisson, destinada al estudio de fenómenos o sucesos en los cuales la probabilidad de ocurrencia sea baja, para lo cual se toma como premisa que los fenómenos en estudio son aleatorios y su ocurrencia es independiente de los demás (Sachs, 1978). Estos postulados se cumplen a plenitud para el caso de las inundaciones costeras provocadas por ciclones tropicales como consecuencia de su baja frecuencia en series hiperanuales y al largo período de las observaciones, así como por la independencia estocástica inherente que tienen en su evolución por temporadas (Hidalgo, 2012). La función de Poisson se describe matemáticamente según la expresión siguiente:

$$P_{(x=n)} = e^{-\lambda} * \frac{\lambda^x}{x!} \quad x = 1, 2, 3 \dots n \quad (1)$$

$$T(k) = \frac{1}{1-Q(k)} \quad (2)$$

Donde $P(x = n)$ es la probabilidad de ocurrencia estimada según la distribución de Poisson, λ es el promedio de ocurrencia del evento, x es el número de sucesos o eventos, e es la base de los logaritmos neperianos, $T(k)$ es el período de retorno (casos/año) y $Q(k)$ es la probabilidad acumulada según la función de distribución de Poisson. Para conocer la función de retorno de las variables continuas que intervienen en la ocurrencia de las inundaciones costeras se empleó la siguiente ecuación:

$$F(\text{casos/año}) = \frac{n.m}{N.M} \quad (3)$$

Donde n es la cantidad de casos en la cuadrícula, m el número de orden, N es la cantidad de casos total para el área y M la cantidad de años analizados. Se ordena la serie de mayor a menor, se le asigna un número de orden y se le aplica la ecuación anterior. Los resultados obtenidos se ajustan mediante el Curve Expert, logrando la curva de mejor ajuste entre la variable analizada y su correspondiente función de retorno.

3. Resultados y discusión

A continuación se presenta la cronología de inundaciones costeras generadas en la bahía de Mariel al paso de sistemas frontales y ciclones tropicales entre 1901 y 2010 (Tabla I). La misma está basada en encuestas populares realizadas por el Instituto de Planificación Física y la Defensa Civil del municipio de Mariel, así como testimonios de los pobladores y el análisis de varias publicaciones de principio del siglo XX, tal como el Diario de la Marina, El Mundo entre otros. Han ocurrido un total de 68 inundaciones costeras con predominio de las inundaciones fuertes (Pérez, 2010), con un total de 33, le siguen las débiles con 18 y las moderadas con 17. Las inundaciones fuertes sólo se reportan de

enero a abril y las ligeras de diciembre a marzo, mientras que las inundaciones moderadas no muestran ningún patrón intermensual.

Tabla I. Cronología de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel (1901-2010)

Fecha	Fenómeno	Intensidad de la inundación
17/09/1901	Huracán	Moderada
21/02/1902	Frente Frío Fuerte	Fuerte
30/03/1906	Frente frío	Fuerte
01/04/1907	Frente frío	Fuerte
10/01/1908	Frente frío	Fuerte
10/10/1909	Huracán	Moderada
15/11/1916	Huracán	Moderada
04/01/1919	Frente Frío Fuerte	Fuerte
09/09/1919	Huracán del Valbanera	Moderada
27/02/1924	Frente Frío Fuerte	Fuerte
20/10/1926	Huracán del 26	Fuerte
01/09/1933	Huracán de Sagua y Cárdenas	Fuerte
04/10/1933	Huracán	Fuerte
26/01/1938	Frente Frío Fuerte	Fuerte
15/11/1940	Frente Frío Fuerte	Fuerte
06/03/1942	Frente Frío Moderado	Moderada
18/10/1944	Huracán del 44	Fuerte
05/12/1945	Frente Frío Moderado	Moderada
14/01/1948	Frente Frío Fuerte	Moderada
21/09/1948	Huracán de Matanzas	Fuerte
05/10/1948	Huracán	Moderada
08/01/1951	Frente Frío Fuerte	Moderada
27/02/1952	Frente Frío Fuerte	Fuerte
03/01/1958	Frente Frío Fuerte	Fuerte
26/01/1966	Frente Frío Fuerte	Fuerte
04/10/1966	INEZ	Moderada
03/02/1970	Frente Frío Fuerte	Fuerte
19/01/1977	Frente Frío Fuerte	Fuerte
03/01/1979	Frente Frío Fuerte	Fuerte
02/03/1980	Frente Frío Fuerte	Moderada
05/11/1982	Frente Frío Fuerte	Ligera
28/02/1984	Frente Frío Moderado	Moderada
29/03/1984	Frente Frío Moderado	Ligera
23/11/1984	Frente Frío Moderado	Ligera
04/01/1985	Frente Frío Moderado	Ligera
12/02/1985	Frente Frío Moderado	Ligera
28/10/1985	JUAN	Fuerte
19/11/1985	KATE	Moderada
05/01/1987	Frente Frío Moderado	Fuerte
25/01/1988	Frente Frío Moderado	Ligera
15/02/1991	Frente Frío Moderado	Ligera
06/02/1992	Frente Frío Fuerte	Fuerte
24/08/1992	ANDREW	Fuerte
13/03/1993	Frente Frío Fuerte	Fuerte
03/03/1994	Frente Frío Moderado	Fuerte
08/01/1996	Frente Frío Moderado	Ligera
04/02/1996	Frente Frío Moderado	Ligera
08/03/1996	Frente Frío Fuerte	Ligera
20/03/1996	Frente Frío Fuerte	Ligera
14/12/1997	Frente Frío Moderado	Ligera

27/12/1997	Frente Frío Débil	Ligera
04/02/1998	Frente Frío Moderado	Moderada
15/03/1999	Frente Frío Moderado	Ligera
07/09/1999	FLOYD	Fuerte
23/02/2002	Frente Frío Moderado	Moderada
Fecha	Fenómeno	Intensidad de la inundación
13/08/2004	CHARLEY	Fuerte
14/09/2004	IVAN	Fuerte
09/07/2005	DENNIS	Fuerte
25/08/2005	KATRINA	Fuerte
20/09/2005	RITA	Fuerte
24/10/2005	WILMA	Fuerte
06/01/2006	Frente Frío Moderado	Ligera
14/01/2006	Frente Frío Moderado	Ligera
12/02/2006	Frente Frío Moderado	Ligera
22/11/2006	Frente Frío Débil	Moderada
31/08/2008	GUSTAV	Fuerte
12/12/2008	Frente Frío Débil	Ligera
03/03/2010	Frente Frío Moderado	Moderada

El número de eventos tiende a aumentar a medida que pasan los años del registro con un incremento desde finales del siglo pasado a principios del actual, así como varios intervalos de años en los que no se registró la ocurrencia de este fenómeno. Los años más activos resultaron 1985, 1996, 2005 y 2006 con reportes de 4 eventos, años en los que el índice ENOS se encontraba en su fase negativa (La Niña), lo que significa que fueron temporadas invernales activas. También puede observarse la tendencia al aumento del número de inundaciones en el primer trimestre del año, pertenecientes al período poco lluvioso y, de modo general, el mes en que más se han reportado inundaciones costeras es el mes de enero (Fig. 2). Atendiendo a los fenómenos que las generan, se obtiene que el 71 % de las inundaciones costeras son provocadas por sistemas frontales, puesto que son más recurrentes, sin olvidar que los ciclones tropicales aunque son eventos de menor frecuencia pueden provocar inundaciones devastadoras (Fig. 3).

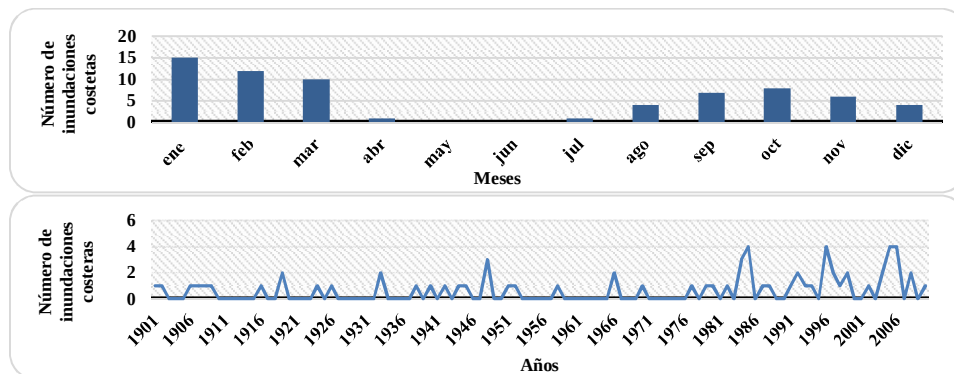


Fig. 2 Variabilidad interanual y mensual del número de inundaciones costeras en la bahía de Mariel

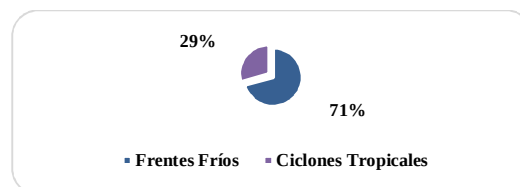


Fig. 3 Inundaciones costeras en la bahía de Mariel según el fenómeno meteorológico que las genera

Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales que generaron inundaciones costeras en la bahía de Mariel en el período estudiado desarrollaron trayectorias específicas con determinada frecuencia, por lo cual fue posible tipificar las mismas en cuatro categorías:

- El organismo penetra en el Golfo de México para luego recurvar
- El organismo atraviesa las provincias habaneras de sur a norte
- El organismo se desplaza de este a oeste en una trayectoria paralela a la costa norte occidental
- El organismo desarrolla un movimiento errático sobre el Golfo de México

La trayectoria más frecuente es en la que atraviesan las provincias habaneras de sur a norte, generando oleaje con peligro de inundaciones por penetraciones del mar por los vientos de sus sectores izquierdos, los cuales llegan a la costa desde rumbo noroeste, impactándola en dirección casi perpendicular. La trayectoria menos frecuente es aquella en la que el organismo mantiene un movimiento caótico sobre el Golfo de México, lo cual propicia que los vientos de su sector izquierdo afecten la mitad norte del Golfo de México, generando olas que se desplazaron de rumbo noroeste y llegan a la costa como mar de leva.

Se correlacionaron de forma no paramétrica a través de las pruebas de Spearman y Kendall las variables “categoría del ciclón tropical” e “intensidad de la inundación” con un nivel de significación de 0.05 para ambos coeficientes y se obtuvo como resultado que la linealidad existente entre las variables es casi inexistente pues ningún valor resultó ser mayor que 0.75, a pesar de que la correlación de Spearman muestra un resultado más favorable.

Sistemas frontales

De un total de 46 sistemas frontales que provocaron inundaciones costeras, 39 se clasificaron como clásicos según el giro de los vientos para un 83%, 22 clasificaron como fuertes según su intensidad, 21 moderados y sólo 3 frentes débiles fueron capaces de generar inundaciones, dado que a pesar de generar campos de viento no tan intensos se conjugaron otros factores como una persistencia del viento superior a las 14 h en los tres casos y un viento del noroeste en el Golfo de México de modo que alcanzara el *fetch* máximo. De las inundaciones generadas hubo tantas fuertes como ligeras con un total de 18 y 10 moderadas. Se analizó la variabilidad mensual del número de inundaciones costeras por sistemas frontales y se obtuvo como resultado que el mes de mayor incidencia es el mes de enero con un total de 15 casos de 46.

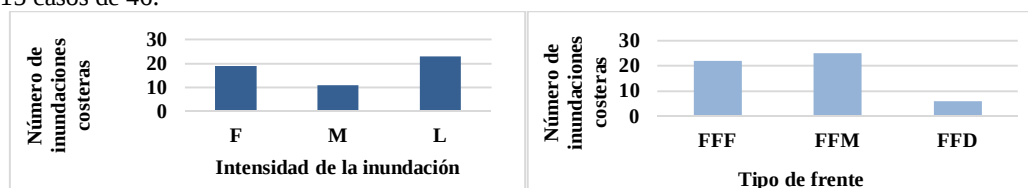


Fig. 4 Frecuencia de las inundaciones costeras por sistemas frontales según su intensidad y según la intensidad del frente

Estadística descriptiva de los registros de la estación de la boya 42003 y de la estación de Bahía Honda

Tabla II. Estadística descriptiva de los registros de la estación de la boya 42003 y de la estación de Bahía Honda

	Boya 42003				
	Máximo	Mínimo	Media Aritmética	Varianza	Desviación Típica
Velocidad del viento(m/s)	47.30	0.00	5.88	9.26	3.04
Altura de la ola significativa(m)	11.04	0.00	1.08	0.52	0.72
	Estación de Bahía Honda				
	Máximo	Mínimo	Media Aritmética	Varianza	Desviación Típica
Velocidad del viento(m/s)	128.00	0.00	9.08	95.92	9.79

Al describir estadísticamente la serie de datos de la boya se halló un valor máximo de 47.3m/s para la variable de velocidad del viento correspondiente al día 20 de noviembre de 1985 a las 17:00 UTC durante el paso del huracán Kate por aguas del Golfo de México. En la altura de la ola significativa el máximo encontrado no se corresponde en el tiempo con el máximo de la velocidad del viento, sino que ocurrió durante el paso del huracán Iván por aguas del Golfo de México el 15 de septiembre de 2004 a la 1:00 UTC, presentando un valor de 11.04m mientras que la media fue de 1.08m. Para la serie de la estación se encontró un máximo de velocidad del viento de un valor de 128m/s correspondiente al 30 de agosto de 2008 al paso del huracán Gustav. Las medidas de dispersión de los datos de la estación costera demuestran que están mucho más dispersos y desviados respecto a la media aritmética que los registros

de la boya. La mayor parte de las anomalías en los registros de la estación están asociadas al paso de sistemas que generaron inundaciones costeras (Tabla II).

Régimen de viento y oleaje en presencia de inundaciones costeras en el área generadora de oleaje

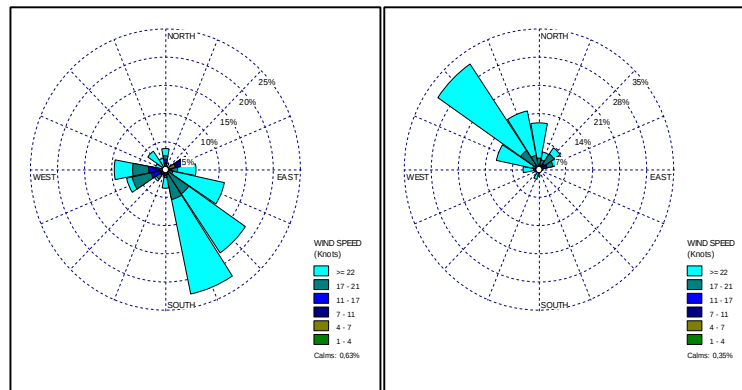


Fig. 5(a, b) Dirección del oleaje y del viento en el área generadora de oleaje

En presencia de inundaciones costeras los elementos de la ola no reflejan una tendencia significativa de un evento a otro, en el caso de la altura de la ola es visible una fluctuación más acentuada del valor propio de la altura de la ola. La dirección de la propagación del oleaje se reduce en el arco direccional al segundo cuadrante y predomina el oleaje que se propaga desde el este-sudeste al sur-sudeste, fundamentalmente este último (Fig. 5a). La velocidad del viento muestra una tendencia a la disminución de un evento a otro. La rosa de los vientos arroja que la dirección predominante del viento es del noroeste puesto que es en esta dirección que el viento alcanza el *fetch* máximo, luego le sigue en frecuencia el norte-noroeste y luego escasos ejemplos con el viento del norte-nordeste (Fig. 5b).

Análisis de los mapas de superficie de presión a nivel medio del mar y de viento

A partir de los mapas de reanálisis fue posible analizar las situaciones sinópticas imperantes durante las inundaciones costeras. Se analizó el comportamiento del viento y se obtuvo que en el 77 % de los casos el viento soplara del noroeste. Debido a que la mayoría se comporta de una manera muy similar aquí, se expone lo que sucedía en la carta de superficie durante el 6 de enero de 2006 que tuvo características similares a la mayoría de las situaciones.

El frente frío estaba asociado a una baja extratropical que estaba situada en el Atlántico sobre los 36 grados de latitud norte y los 72 grados de longitud oeste y dicho frente se extendía hacia el sur-suroeste por el sur de la Florida, el occidente de Cuba y el Golfo de Honduras. Las altas presiones continentales que siguen al frente frío abarcan gran parte el continente y están centradas en el estado de Utah con valor de 1039 hPa. Este sistema abarca una gran extensión y cubre con su influencia gran parte de los EEUU, todo el Golfo de México y el occidente de Cuba. De la unión de los vientos de la periferia del anticiclón con los de la periferia de la baja se generaron vientos del cuarto cuadrante en la mitad occidental con valores de hasta 70km/h en la estación de Bahía Honda que provocaron fuertes marejadas en la costa norte de la región occidental con débiles inundaciones costeras en La Habana y moderadas en el litoral pinareño.

Correlación de los datos de viento de la boya 42003 con los datos de la estación de Bahía Honda

Se correlacionaron linealmente los datos de viento medio de Bahía Honda con la boya que se encuentra en el Golfo de México, el coeficiente obtenido fue 0,06 lo que quiere decir, que la relación lineal que existe entre las variables es débil, un buen resultado sería mayor que 0,75. Es de interés resaltar el hecho de que, el dato de viento medio de la boya se está proporcionando en el lugar donde se genera el oleaje, en pleno mar adentro donde son pocos los factores que contrarrestan la generación del mismo; a diferencia del dato que se obtiene de la estación de Bahía Honda ubicada a 3.1m sobre el nivel del mar, rodeada de elementos orográficos significativos y la fricción con tierra es considerable por lo que es de esperar un resultado de correlación como el obtenido. Es necesario añadir que el oleaje que alcanza a las costas cubanas, con frecuencia es en forma de mar de leva, procedente de un área de generación de olas por vientos de tormenta, que se localiza a una considerable distancia del territorio nacional. Puede ocurrir que el viento en la estación de Bahía Honda sea más débil e incluso de distinta dirección que el que está generando el oleaje. Además, se tiene como antecedente el huracán Juan el cual provocó que el mar estuviera penetrando alrededor de tres días en la costa norte occidental y sin embargo, los vientos registrados no llegaron a ser huracanados por lo que no se

correspondieron con la inundación que estaba sucediendo, sin embargo el oleaje que inundaba la región fue en forma de mar leva por el sistema que se encontraba en aguas del Golfo de México.

Resultados de las pruebas no paramétricas

Tabla III. Resumen de los resultados obtenidos al aplicar las pruebas no paramétricas

		Régimen Normal			Régimen de inundaciones costeras		
	Estadígrafo	FF	WSP	WVHT	FF	WSP	WVHT
Wald-Wolfowitz	WW	50.48	7.13	73.196	10.9	26.09	25.85
	Resultado	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$
Pettitt	Valor extremo	-2524511	2764205	2655493	189	526	487
	Resultado	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$
Mann-Kendall	MK	7.30	-9.69	-6.206	-0.77	-6.09	-2.15
	Resultado	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 > \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$	$\alpha 1 < \alpha 0$

La tabla III sintetiza los resultados obtenidos al aplicar las pruebas no paramétricas recomendadas por la OMM para analizar series temporales. En la misma, es posible comparar el comportamiento de las principales variables involucradas en el proceso de generación del oleaje que se propaga hacia la costa norte occidental y que producen inundaciones costeras en la bahía de Mariel, dividiéndolas en dos categorías: su comportamiento en condiciones normales y su comportamiento en presencia de inundaciones costeras. A partir de los valores obtenidos se puede concluir que la serie velocidad del viento en la estación de Bahía Honda en condiciones normales no se comporta de forma aleatoria y en presencia de inundaciones costeras esta serie se caracteriza por la no existencia de tendencia significativa. La serie velocidad del viento en la boya 42003 en condiciones normales no se comporta de forma aleatoria y muestra una tendencia decreciente significativa al nivel de 0,05. En presencia de inundaciones costeras la variable mantiene las mismas características. La serie altura de la ola significativa en condiciones normales no se comporta aleatoriamente, presenta tendencia decreciente significativa.

Función de retorno

Se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para demostrar que la variable x que cuenta el número de inundaciones costeras por año se ajusta a la distribución de Poisson. Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla IV. La función de distribución de Poisson, destinada al estudio de fenómenos cuya probabilidad de ocurrencia es baja, para lo que se toma como premisa que los procesos en estudio son aleatorios y su ocurrencia es independiente de los demás procesos.

Tabla IV. Ajuste de un modelo de Poisson a la variable aleatoria discreta X que cuenta el número de inundaciones costeras por año

x	S	P(x)	E	V	P(x=k)	Q(x)	T(x)
0	66	0.60	0.00	0.23	0.40	0.40	-----
1	30	0.27	0.27	0.04	0.37	0.76	42.31
2	8	0.07	0.15	0.14	0.17	0.93	14.84
3	2	0.02	0.05	0.10	0.05	0.99	67.42
4	4	0.04	0.15	0.42	0.01	1.00	376.35

- Cada 4.2 años se espera que ocurra al menos una inundación costera en un año en la bahía de Mariel
- Cada 14.8 años se espera que ocurran al menos 2 inundaciones costeras en un año en la bahía de Mariel
- Cada 67.4 años se espera que ocurran al menos 3 inundaciones costeras en un año en la bahía de Mariel
- La probabilidad estimada de que ocurra al menos una inundación costera en un año en la bahía de Mariel es del 40 %.

El modelo se ajusta bajo la expresión:

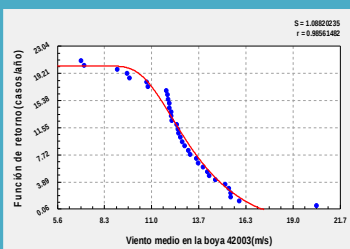
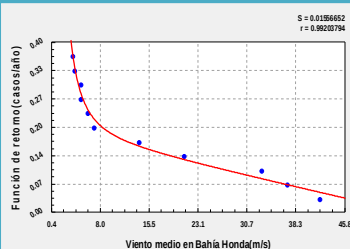
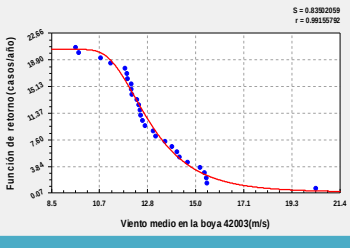
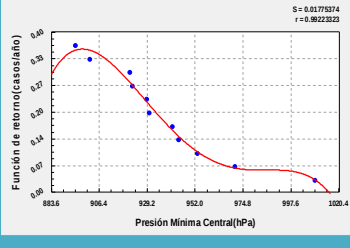
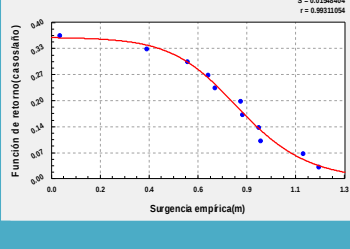
$$P(x) = e^{-0.9} * \frac{0.9^x}{x!} \quad (4)$$

Cálculo del período de retorno mediante ajuste de curvas

Para realizar este cálculo se tomaron 30 años, desde 1980 hasta el 2010 en el cual se originaron un total de 35 inundaciones costeras por frentes fríos. Se tomó la cantidad de sistemas frontales que afectaron a la zona occidental y

se divide por la cantidad que afectaron a toda el área, con la particularidad de que el 100 % de los frentes fríos que azotan al país afectan la zona occidental, por tanto se toma el mismo valor. Conocido el viento medio en la estación de Bahía Honda y en la boya 42003 tanto los valores de velocidad como la función de retorno se someten a pruebas de bondad de ajustes a distribuciones de probabilidad conocidas, obteniéndose la gráfica con el software Curve Expert. A pesar de que son varias las distribuciones que muestran resultados favorables, o sea, alto coeficiente de correlación y pequeño error se escoge la distribución que mejor se ajusta a cada resultado. Hernández en el 2013 demostró que si se calcula la función de retorno respecto a la altura significativa de la ola (Hsig) en aguas del Golfo de México, los resultados son más adecuados. Para las variables extremas (velocidad del viento y altura de ola significativa) no se halla la distribución de mejor ajuste, sino que se utiliza directamente el Modelo de Weibull como recomienda (Tabla V), (CEM, 2006).

Tabla V. Curvas de ajustes entre las variables y su correspondiente función de retorno

Sistemas Frontales		Ciclones tropicales	
 S = 1.08820235 r = 0.98561482	$y = a - b * e^{-c*x^d}$ $a = 2.02804314333E + 001$ $b = 2.36287777539E + 001$ $c = 2.05716694599E + 006$ $d = -5.76225154492E + 000$ <u>Error estándar:</u> 1.089 <u>Coeficiente de correlación:</u> 0.986	 S = 0.01856682 r = 0.98210794	$y = a - b * e^{-c*x^d}$ $a = 1.07205421464E + 000$ $b = 1.05118852748E + 000$ $c = 1.14871352313E + 000$ $d = -8.54659574215E - 001$ <u>Error estándar:</u> 0.027 <u>Coeficiente de correlación:</u> 0.979
Viento medio en la estación(m/s)-Modelo de Weibull		Viento medio en la estación(m/s)-Modelo de Weibull	
 S = 0.83802059 r = 0.99150752	$y = a - b * e^{-c*x^d}$ $a = 20.378819$ $b = 20.184615$ $c = 1.3491431e + 010$ $d = -9.2754933$ <u>Error estándar:</u> 0.835 <u>Coeficiente de correlación:</u> 0.991	 S = 0.01775374 r = 0.98210794	$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ $a = -12649.287$ $b = 53.04347$ $c = -0.083323023$ $d = 5.8114167e - 005$ $e = -1.5185273e - 008$ <u>Error estándar:</u> 0.0177537 <u>Coeficiente de correlación:</u> 0.992
Viento medio en la boya(m/s)-Modelo de Weibull		Presión Mínima Central(hPa)-Polinomio de cuarto grado	
 S = 0.656033031 r = 0.98470128	$y = a - b * e^{-c*x^d}$ $a = 2.02804314333E + 001$ $b = 2.36287777539E + 001$ $c = 2.05716694599E + 006$ $d = -5.76225154492E + 000$ <u>Error estándar:</u> 0.656 <u>Coeficiente de correlación:</u> 0.995	 S = 0.015868054 r = 0.98311054	$y = \frac{a}{1 + e^{b-cx^d}}$ $a = 0.36236742$ $b = -5.6469039$ $c = -7.3001392$ $d = 1.3171921$ <u>Error estándar:</u> 0.015 <u>Coeficiente de correlación:</u> 0.993
Altura de la ola significativa(m)-Modelo de Weibull		Surgencia empírica(m)-Modelo de Richards	

Aporte de la marea meteorológica a la cota de la inundación

Se analiza el registro del mareógrafo durante la inundación y se analizan los resultados. Se decidió usar esta metodología como lo recomienda (Hernández, 2013) tomando la sobreelevación del mar como parámetro para medir la intensidad de la inundación puesto que se tienen los registros del mareógrafo, siendo la única fuente de mediciones hechas en las costas de Cuba, asociadas a la sobreelevación del nivel del mar.

El estudio de las variaciones del nivel del mar se llevó a cabo analizando los datos registrados por el mareógrafo perteneciente a la Empresa de GeoCuba Geodesia instalado en la bahía de Mariel en los 23°01' de latitud norte y 82°46' de longitud oeste. La serie original analizada está compuesta por datos de nivel del mar registrados cada hora, y abarca

el período que va desde el 1 de diciembre de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2010. Los registros tomados por el mareógrafo de Mariel constituyen valores representativos de los niveles de marea de la bahía. A partir de estos datos se obtienen los niveles medios de sobreelevación que puede presentar el mar debido a causas astronómicas. Con estos valores pueden definirse los valores medios de pleamar y bajamar producidos por el efecto de la marea. Estos datos tienen gran significado, y aunque de no ser la marea un factor determinante para la ocurrencia de inundaciones costeras por penetraciones del mar, si pueden contribuir en determinado momento a favorecerlas.

Se hace necesario incorporar el valor de la marea astronómica en cada inundación debido a que la situación empeora si al paso de un sistema meteorológico la marea está en su fase creciente. Es necesario tener además en cuenta que la marea astronómica es importante no sólo por el aporte en altura del valor de la marea, sino también porque la corriente de marea empuja las masas de aguas hacia la costa, favoreciendo el desplazamiento horizontal de la inundación (Mitrani, 2011). De esta manera se procede a la extracción de la marea meteorológica, asumiendo que corresponde a todo el residuo obtenido de la diferencia entre la serie original y la marea astronómica reproducida para el mismo intervalo de tiempo.

A la serie de datos de nivel del mar, registrados por el mareógrafo de Mariel, se le sustrajeron los valores de la marea astronómica y de esta forma se obtuvo el aporte realizado por la marea meteorológica a la cota de la inundación. Se realizaron los cálculos para las fechas de inundaciones costeras del presente siglo, pues sólo están disponibles los registros del mareógrafo y de marea astronómica desde 2001 a 2014, este es un período corto de tiempo que no permite realizar análisis de normas climatológicas pero sí da una panorámica de las características de las mareas en la bahía de Mariel. Se observó que en la mayor parte de los casos el valor de la marea meteorológica es casi insignificante fluctuando siempre entre los 0 y los 0.15 m como promedio. Se destaca un valor máximo de la marea meteorológica correspondiente a las 8:00 del 24 de octubre de 2005 al paso del huracán Wilma. De la misma manera se reportaron casos en los que no existió prácticamente ninguna diferencia entre el nivel del mar registrado, como el 6 de enero de 2006.

Conclusiones

En el período de estudio se han originado un total de 68 inundaciones costeras en la bahía de Mariel con una tendencia al aumento; el mayor número se reporta en el primer trimestre del año. Predominan las inundaciones costeras por frentes fríos aunque las provocadas por ciclones tropicales son más intensas. Predominan los vientos del cuarto cuadrante, fundamentalmente del noroeste, aunque se registraron casos con vientos del oeste-noroeste y nordeste.

La combinación del flujo de la periferia de los centros de bajas presiones con los de los centros anticiclones continentales migratorios fue la situación sinóptica más representativa que favorece la ocurrencia de inundaciones costeras.

Los registros de velocidad de la estación de Bahía Honda no son representativos a la hora de determinar la intensidad de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel.

Cada 4.21 años se espera que ocurra al menos una inundación costera en un año en la bahía de Mariel. La probabilidad estimada de este escenario en un año es del 40 %.

Los regímenes de viento y ola en aguas profundas, en el área de generación del oleaje, se ajustan a las distribuciones de Weibull con altos coeficientes de correlación y muy baja dispersión.

El aporte de la marea meteorológica a la cota de la inundación oscila entre los 0 y 0.15 m.

Recomendaciones

Se recomienda implementar una estación meteorológica costera en la bahía de Mariel y tener en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación en el manejo integrado costero en el área de estudio y zonas aledañas.

Referencias bibliográficas

- Hernández, I., 2013. *Las inundaciones costeras generadas por sistemas frontales en el Malecón Habanero*. Tesis (Diploma). Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC).
- Hidalgo, A., & Mitrani, I., 2012. Particularidades hidrometeorológicas del litoral Gibara-Playa Guardalavaca. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2), 152-163.
- Instituto Cubano de Hidrografía, 1988. *Derrotero de las costas de Cuba. Región marítima del Norte*. La Habana: Editorial Científico-Técnica.
- Mitrani, I., 2011. *Meteorología Marina*. La Habana:
- Pérez Osorio, P., Casals Taylor, R., del Sol Hernández, A., Vega, R., & Hernández Orozco, N. (2003). *Sistema de información y referencia de los fenómenos meteorológicos y oceanográficos que han afectado la costa norte de la región occidental de Cuba con inundaciones costeras por penetraciones del mar. Memorias del II Congreso Cubano de Meteorología 2003*.
- Sachs, L., 1978. *Estadística Aplicada*. Barcelona: Labor
- Sneyers, L., 1990. *On the Statistical Analysis of series of Observation*. World Meteorological Organization, Geneva.

Acerca de las autoras:

Yoania Povea-Pérez: Graduada de Licenciatura en Meteorología en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), 2015, con la disertación *Particularidades de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel*, reconocida con el Premio INSMET -2015 a la Mejor Tesis de Diploma de la Facultad de Medio Ambiente. Especialista en Meteorología en el Centro de Física de la Atmósfera del INSMET. Posgrado en Pronósticos Marinos y Costeros (InSTEC 2016). Participación en 2 proyectos de investigación, con dos publicaciones en memorias de eventos científicos y un Premio Fórum de Ciencia y Técnica 2016.

Ida Mitrani-Arenal: Ingeniera Oceanóloga y Master en Ciencias Iconológicas en 1980, en el Instituto Hidrometeorológico de Leningrado. Doctora en Ciencias Físicas desde 1993, título defendido en el Instituto de Meteorología (INSMET) y aprobado por el MES. 36 años de experiencia profesional en el INSMET. Investigadora Titular, con más de 100 publicaciones en revistas especializadas y memorias de eventos. Profesora Titular del Departamento de Meteorología, del Instituto de Ciencias y Tecnologías Aplicadas (InSTEC). Académica Titular de la Academia de Ciencias de Cuba desde 2007.