

Estudio del oleaje generado por un huracán de categoría 5 en la costa sur de las provincias orientales de Cuba

Humberto L. Varona-González ^{(1)*}, Leoandris Martínez-Serrano ⁽²⁾, Jesús Pavón-López ⁽³⁾
y Henry Hodelin-Shombert ⁽³⁾

⁽¹⁾D Laboratorio de Oceanografía Física Estuarina e Costeira - LOFEC. Depart. Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco. – UFPE. Av. Arquitetura, s/n. 50740-550 - Cidade Universitária. Recife. PE. Brasil.

Email: humberto.varona@gmail.com

⁽²⁾ Delegación Provincial CITMA. Santiago de Cuba. Email leoandris.martinez@cnt.uo.edu.cu

⁽³⁾ Departamento de Física, CCEN, Universidad Federal de Pernambuco, Recife, Brasil
henry.hodelin@gmail.com, jesus880708@gmail.com,

Recibido: mayo 28, 2013	Aceptado: octubre 4, 2013
-------------------------	---------------------------

Resumen

En este trabajo se realizó la simulación del oleaje generado por un huracán de categoría 5 con la trayectoria más probable entre la costa sur oriental de Cuba y Jamaica, en la misma se utilizó el modelo numérico de refracción - difracción de Grassa para la obtención de la distribución espacial de olas en las zonas cercanas al litoral, también se determinaron las formas de los frentes de olas para los diferentes ángulos de incidencia. La malla de cálculo se obtuvo a partir de la georeferenciación y vectorización de la batimetría de las cartas náuticas 11000, 11201 y 11403 y aplicando el método de triangulación de Delaunay con interpolación lineal.

Palabras clave: Huracán, Oleaje, Simulación

A Study on the Waves Generated by a Category 5 Hurricane in the Southern Coast of the Cuban Eastern Provinces

Abstract

This paper deals with the simulation of waves generated by category 5 hurricanes with the most probable trajectory between the southern coast of the eastern region in Cuba and Jamaica. The numerical refraction - diffraction model of Grassa's has been used to obtain the spatial distribution of waves in nearshore areas, and the front shapes of waves for the different angles of incidence were also determined. The calculation mesh was obtained from the georeferencing and vectorization of the bathymetry of the charts 11000, 11201 11403 applying the Delaunay triangulation method with linear interpolation

Key words: Hurricane, Simulation, Waves

1.-Introducción

La zona del Caribe occidental donde se encuentra Cuba, es un área de gran actividad ciclónica, teniendo como consecuencia que el oleaje durante el desarrollo de estos fenómenos atmosféricos se comporte de forma muy caótica, asociado a los fuertes vientos que se generan en estos fenómenos meteorológicos, vientos fuertes sostenidos, muchas veces superiores a los 117 km/h durante intervalos de tiempos largos, pueden generar olas gigantescas, que pueden impactar contra la costa con gran fuerza, provocando deformaciones en todo el litoral, logrando así que el mar penetre varios metros tierra adentro, ocasionando cuantiosos daños económicos, pérdidas de vidas humanas y destruyendo instalaciones cercanas a la línea de costa. En la actualidad en muchos países las muertes asociadas a los huracanes han disminuido considerablemente, entre otras cosas, gracias a los avances alcanzados en el estudio y la predicción de estos fenómenos, además de los avisos acertados sobre la aproximación de los huracanes para las evacuaciones oportunas. Cuando los huracanes se forman en el Atlántico Norte, vienen desde el Este y generalmente pasan por: el Norte del Oriente cubano; entre el Sur del Oriente cubano y Jamaica; o por el Sur de Jamaica. La zona de estudio de esta investigación comprende el Sur de las provincias orientales desde Cabo Maisí (Guantánamo) hasta Cabo Cruz en (Granma) que tiene más de 300 Km de costa. Las trayectorias más probables de huracanes que pasan cerca de Cuba oriental, están en nuestra zona de estudio.

Los huracanes son fenómenos meteorológicos que pueden generar condiciones extremas de oleaje sobre la superficie del océano. Bajo estas condiciones, pocos instrumentos de medición pueden instalarse en aguas profundas, por lo cual la información real de la altura y dirección de las olas que puede obtenerse es poca. Por lo tanto, una información amplia de la distribución de estos parámetros solo se puede lograrse mediante modelos numéricos que simulan las condiciones del oleaje ante un ciclón.

Por tal causa el estudio del oleaje producido por ciclones tropicales en la región Sur Oriental, ajustado con un modelo de viento que se acople a modelos paramétricos y numéricos de generación de oleaje, es de gran importancia para determinar cómo se modifican los frentes de olas en su propagación hacia la costa, la distribución espacial de alturas de olas, el período de las olas incidentes, los fenómenos que influyen en la modificación de los frentes de olas como la refracción, la difracción, la reflexión entre otros. Todo lo anterior, acondicionado a las características climatológicas de nuestra área de análisis, nos permitiría la disminución de los riesgos costeros, el fortalecimiento de las obras de ingeniería civil cercanas al litoral, la toma de decisiones pertinentes para la evacuación de personas y animales en las zonas vulnerables a inundaciones costeras por oleaje de gran intensidad y la protección de las vías de transportes.

2. Materiales y métodos

Para la determinación de la distribución espacial de alturas de olas durante el paso de ciclones tropicales, se revisó la cronología de todos los organismos meteorológicos del período correspondiente entre 1910 - 2009, de la cual se tomaron los datos de los boletines meteorológicos de presión central, velocidad de vientos máximos y posición geográfica. La trayectoria representada en la **Fig. 1** fue la utilizada para las simulaciones del comportamiento del viento, esta se determinó promediando la posición de los ciclones tropicales, de las trayectorias entre el S de Oriente y Jamaica, de un total de 112 ciclones tropicales que afectaron a nuestro país, el 20%, tienen su recorrido en la trayectoria mencionada, de aquí la importancia de determinar el oleaje que provocan los diferentes estadios de los ciclones tropicales para la trayectoria más probable.

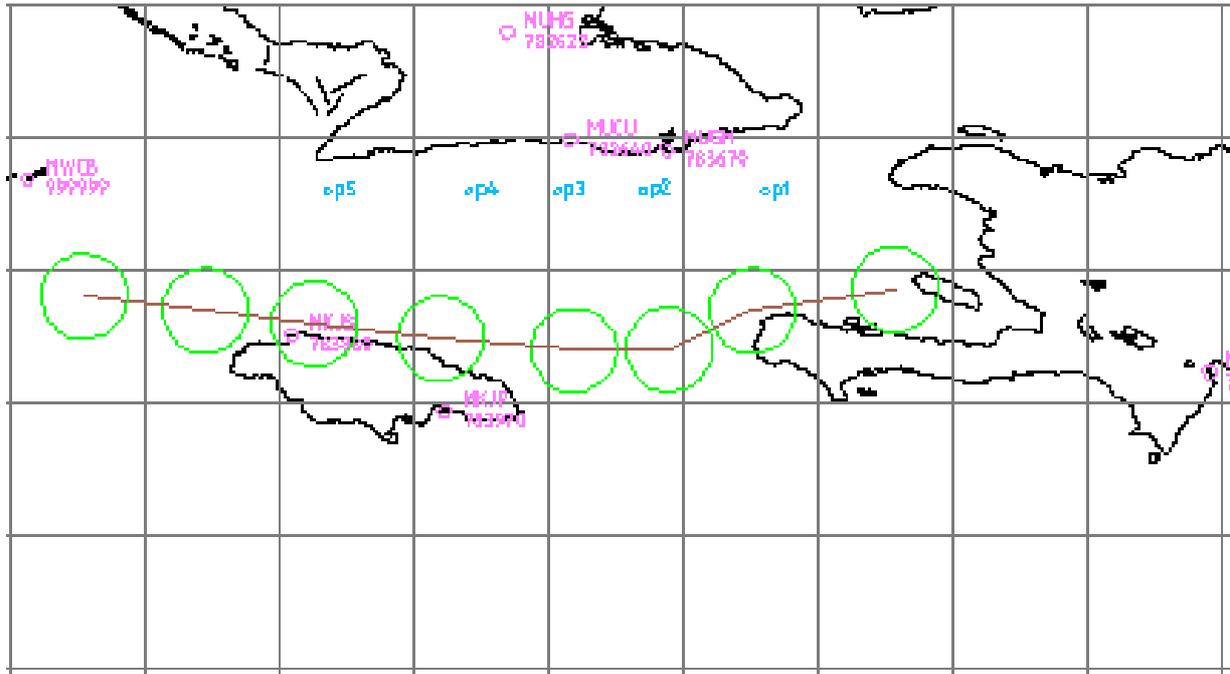


Fig. 1. Trayectoria más probable entre el sur de Oriente y Jamaica

2.1. Modelo de viento

Un modelo de distribución de olas requiere estar acoplado a un modelo de viento que pueda dar una descripción completa de la variación espacial y temporal del campo de vientos durante un ciclón.

El modelo de viento seleccionado para la determinación de la velocidad puntual en la región de estudio, fue tomado de (Varona, 2011), el cual se calibró a nuestra región mediante Typhoon 2.1 (software para la determinación de campo de vientos generados por un huracán utilizando modelos numéricos) con datos experimentales de huracanes registrados por las boyas 42056, 42057 y 42058 durante el paso de los huracanes Ida, Paloma y Dean (http://www.ndbc.noaa.gov/maps/west_caribbean_hist.shtml), describiendo el comportamiento de la velocidad fuera del radio ciclostrofico R_{max} , y está dado por la expresión:

$$V_r = K \left(\left(\frac{V_{max} \cdot R_{max}}{r} \right)^m - 1 \right) \quad \text{para} \quad r > R_{max} \quad (1)$$

Siendo:

K y m coeficientes estimados a partir de simulaciones de los huracanes Ida, Dean y Paloma.

V_{max} la velocidad en el radio de vientos máximos (m/s)

r la distancia desde el centro del ciclón hasta los puntos de estudio (p1, p2, p3, p4 y p5), (tabla I), (Km)

V_r es la velocidad en el punto en cuestión a la distancia r (m/s)

R_{max} radio de vientos máximos o radio ciclostrofico (Km) y se determina mediante la ecuación descrita por (Varona et al, 2011):

$$R_{max} = aP_o + b\varphi - c$$

a , b y c - Son coeficientes estimados a través de los datos de los huracanes que atravesaron el Atlántico desde 1998 hasta el 2008.

P_o Presión atmosférica en el ojo del huracán (hPa).

φ Latitud geográfica.

Tabla I Posición geográfica de los puntos de estudio

Puntos de análisis de la velocidad					
Posición	p1	p2	p3	p4	p5
Latitud	19.59° N				
Longitud	74.40° W	75.30° W	75.94° W	76.60° W	77.65° W

2.2. Transformación del oleaje

Para realizar un estudio detallado de la distribución espacial de alturas de olas en todo el litoral del Sur de Oriente se escogieron los mismo puntos (p1, p2, p3, p4 y p5) determinados por (Varona *et al*, 2011), alineados cercanos a la costa, que se distribuyeron en todo el espacio del litoral Sur Oriental, donde se conoce la velocidad del viento para cada posición de la trayectoria representada en la **Fig. 1**; de esta forma establecieron las condiciones iniciales en dichos puntos de un frente de olas entrante, cuyas características: dirección, altura y período se conocen en aguas profundas, se suponen olas de período constante, con frentes de ondas planos; como causa de la refracción se ha tenido en cuenta únicamente la variación de la profundidad y de la difracción el contorno de las líneas de costa, despreciándose otras causa como la acción de corrientes marinas (Egorov, 1983), la reflexión, la interferencia, entre otras.

2.2.1 Condiciones Iniciales

En el cálculo de los condiciones iniciales para la simulación del oleaje hasta la costa, se determinó el ángulo de incidencia del oleaje β (**Fig. 2**), siendo el ángulo formado entre la ortogonal a la recta desde el centro del huracán (punto C) hasta cada punto de estudio (punto p) y la línea con dirección norte desde el punto p.

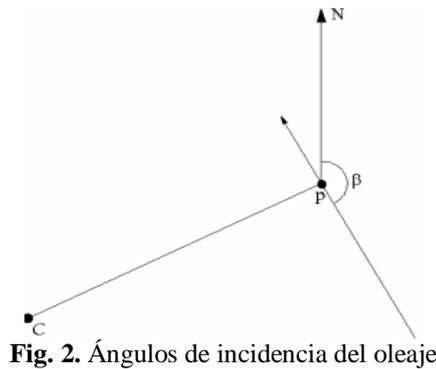


Fig. 2. Ángulos de incidencia del oleaje

La **Fig. 3** muestra las direcciones del campo de olas generado en los puntos (p1, p2, p3, p4 y p5), determinadas por (Varona, *et al*, 2011).

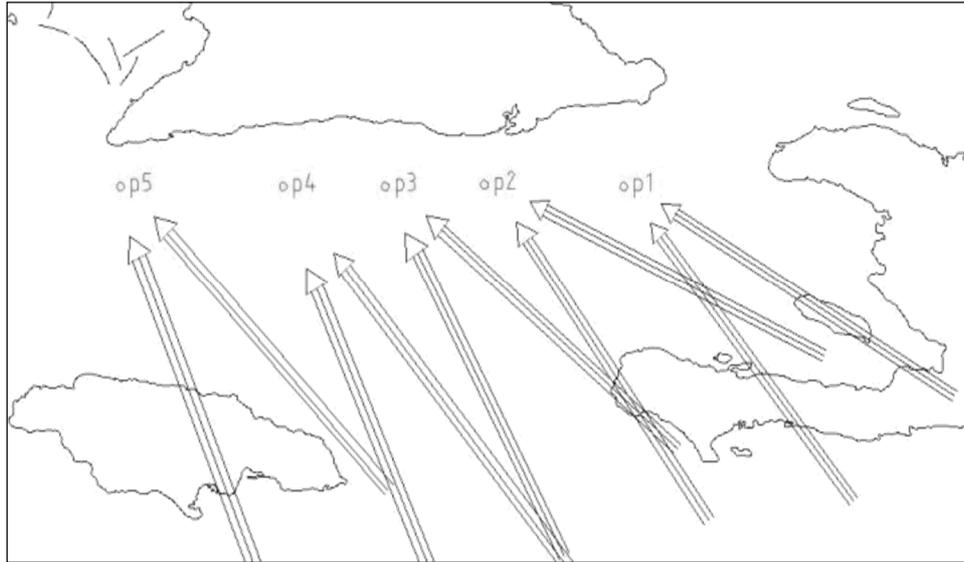


Fig. 3. Direcciones del oleaje incidente en los puntos (p1, p2, p3, p4 y p5).

Para la simplificación de los cálculos solo se tuvo en cuenta 3 ángulos: ángulo mínimo 114.7°, ángulo medio 136.7° y ángulo máximo 155.4°.

Para la determinación de las alturas de las olas incidentes se calculó primeramente la altura de ola en R_{\max} , utilizando la expresión dada en (USACE, 1984):

$$H_{\max} = 5.03 \cdot e^{\left(\frac{R_{\max} \cdot \Delta P}{4700}\right)} \cdot \left[1 + \frac{0.29\alpha V_f}{\sqrt{U_R}}\right] \quad (2)$$

H_{\max} Altura de olas en el radio de vientos máximos (m)

$\Delta P = P_N - P_O$ Gradiente de presión (mm de Hg)

P_O Presión central (mm de Hg)

P_N Presión normal (mm de Hg)

V_f Velocidad de traslación de la tormenta (m/s)

α Coeficiente que depende de la velocidad de avance del huracán y del incremento de la longitud del fetch, para un huracán que se mueve despacio $\alpha = 1$.

U_R Velocidad de vientos máximos sostenidos a 10 m sobre la superficie del mar en R_{\max} , y se determina como:

$$U_R = 0.865 \cdot V_{\max} + 0.5V_f \quad (\text{m/s})$$

Para la obtención de las alturas de olas incidentes en los puntos, se utilizó la expresión:

$$\frac{H_r}{H_{\max}} = A \cdot e^{-B \frac{r}{R_{\max}}} \quad (3)$$

H_{\max} Altura de olas en el radio de vientos máximos (m).

H_r Altura de olas en a la distancia (m).

r La distancia desde el centro del ciclón hasta los puntos de estudio (km).

R_{max} Radio de vientos máximos o radio ciclostrofico (km).

La ecuación (3) fue determinada por Varona (2010), dado que en la figura original (USACE, 1984) solo se pueden determinar H_r / H_{max} para $r / R_{max} \leq 7.0$ y en algunos casos analizados se tiene que $r / R_{max} > 7.0$, determinándose que para un huracán de categoría 1 y otro de categoría 5 las alturas de las olas generadas en la frontera del modelo matemático utilizado fueron de 2.2 m y 3.9 m respectivamente.

Todos los modelos paramétricos utilizados son para oleaje monocromático y nos interesaba conocer el oleaje lo más real posible por lo que el periodo utilizado en las simulaciones fue determinado según el criterio de (Ortiz, Arteche y Sanz, 2004) y utilizando los datos experimentales del periodo dominante que registraron las boyas 42056, 42057 y 42058 durante el paso de los huracanes Ida, Paloma y Dean. El periodo dominante medio para las olas cortas fue de 6.9 s, para olas medias de 9.1 s y para las olas largas de 14.3 s.

2.2. 2. Condiciones de Frontera

Conocidas la dirección, altura y período en los puntos indicados se simuló el oleaje hasta la costa, para ello se utilizó la línea de costa del sur de Oriente dada en la escala 1:70000 en formato Arc/info, obtenido de Internet del NGDC (National Geophysical Data Center) que se localiza en <http://rimmer.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/getcoast.html>, se utilizó la batimetría del sur de Oriente representada en la Fig. 4, cuyos datos fueron extraídos de las cartas náuticas 11000, Las indias Occidentales escala 1:4 250 000, 11201 Mar Caribe en la escala 1:1 000 000 y 11403 Parte Occidental de Cuba escala 1: 500 000 a partir de la georreferenciación y vectorización utilizando SATVEC 1.01 (desarrollado por Arbois y Varona, 2011), la malla de cálculo se generó con SATVEC utilizando el método de triangulación de Delaunay con interpolación lineal, la cual tiene las siguientes características, 101 x 23 nodos, desde los 73.5°-78.5° W y 19°-20.5° N.

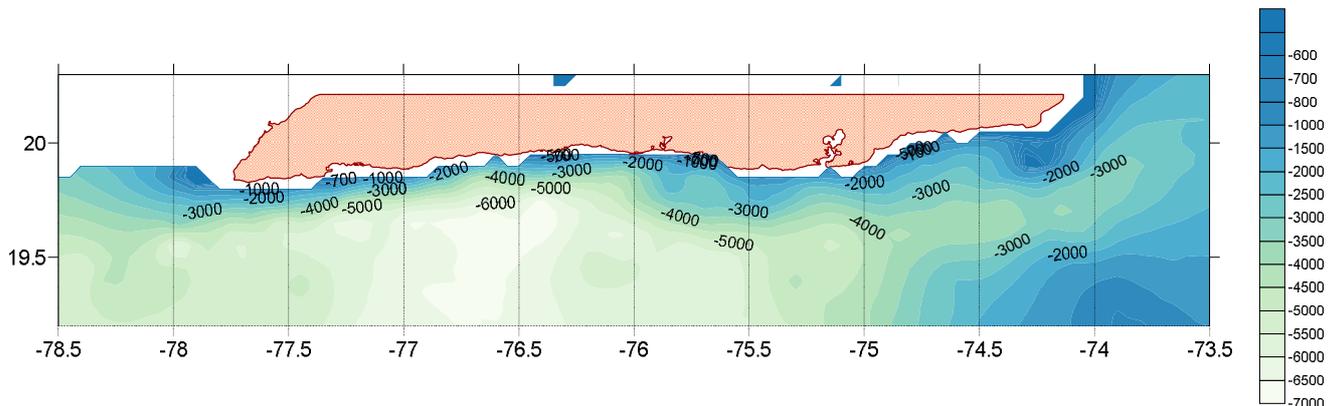


Fig. 4. Representación gráfica del relieve del fondo marino de la zona sur-oriental cubana.

2.2.3. Modelo numérico para la simulación del oleaje hasta la costa

Puesto que la superficie del fondo no es susceptible de ser representada analíticamente, en general, la resolución del problema exige la utilización de modelos numéricos aproximados, por esta razón se utilizó el REF/DIF 1, teniendo como parámetros de entrada (dirección, altura y período de olas incidentes en los puntos), este es una herramienta computacional creada por Grassa del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX) de España, que realiza el cálculo mediante diferencias finitas de la propagación de ondas lineales, utilizando un modelo bidimensional y estacionario.

3. Resultados y discusión

De la **Fig. 5** a la **Fig. 7** se muestran los resultados de los cálculos de la propagación del oleaje generado por un huracán de categoría 5 desde el contorno Sur de la malla de cálculo hasta la costa. Estos cálculos se realizaron considerando que incidían 3 tipos de oleaje: las olas cortas, con un período de 6.9 s; las medias de 9.1 s y las olas largas de 14.3 s, para las direcciones de incidencia del oleaje proveniente del segundo cuadrante de 114.7° subfiguras (a); de 136.7° subfiguras (b) y de 155.4° subfiguras (c).

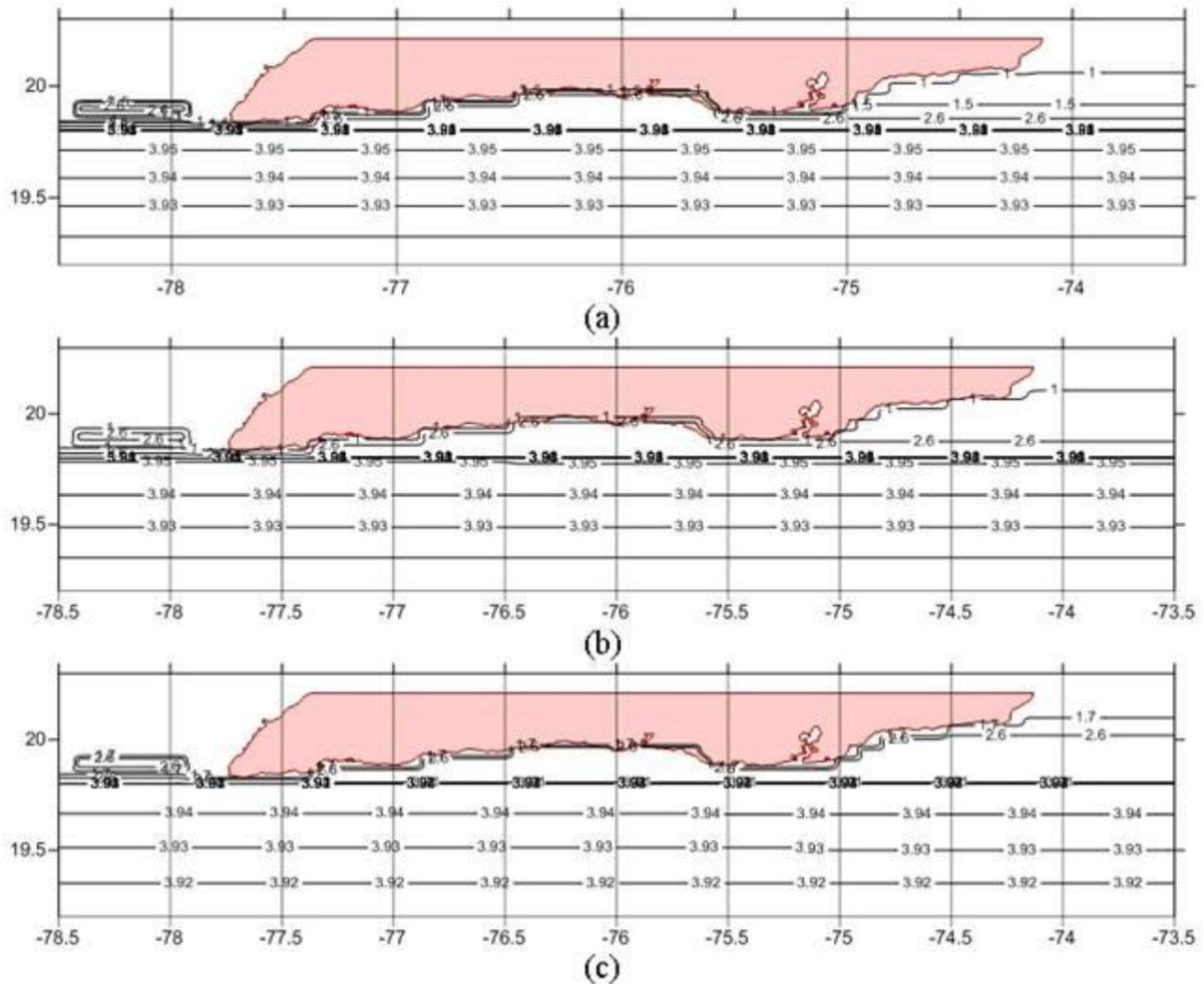


Fig. 5. Distribución espacial de la altura de olas cortas (en m) generadas por un H5

En la **Fig. 5** se muestran las líneas de igual altura de las olas cortas, desde el contorno S hasta en canto del beril, creciendo muy ligeramente (0.01 m) la altura de ola, en (a), cada 25.3 km; en (b) cada 28.3 km y en (c) cada 30.9 km, esto se debe únicamente a la interacción ola – ola. A partir del canto del beril, como la profundidad decrece considerablemente rápido, empieza a decrecer la altura de la ola, llegando hasta las costa olas con alturas entre 0.7 – 1.2 m en (a), entre 1.0 - 1.2 m en (b) y entre 0.9 – 1.2 m en (c).

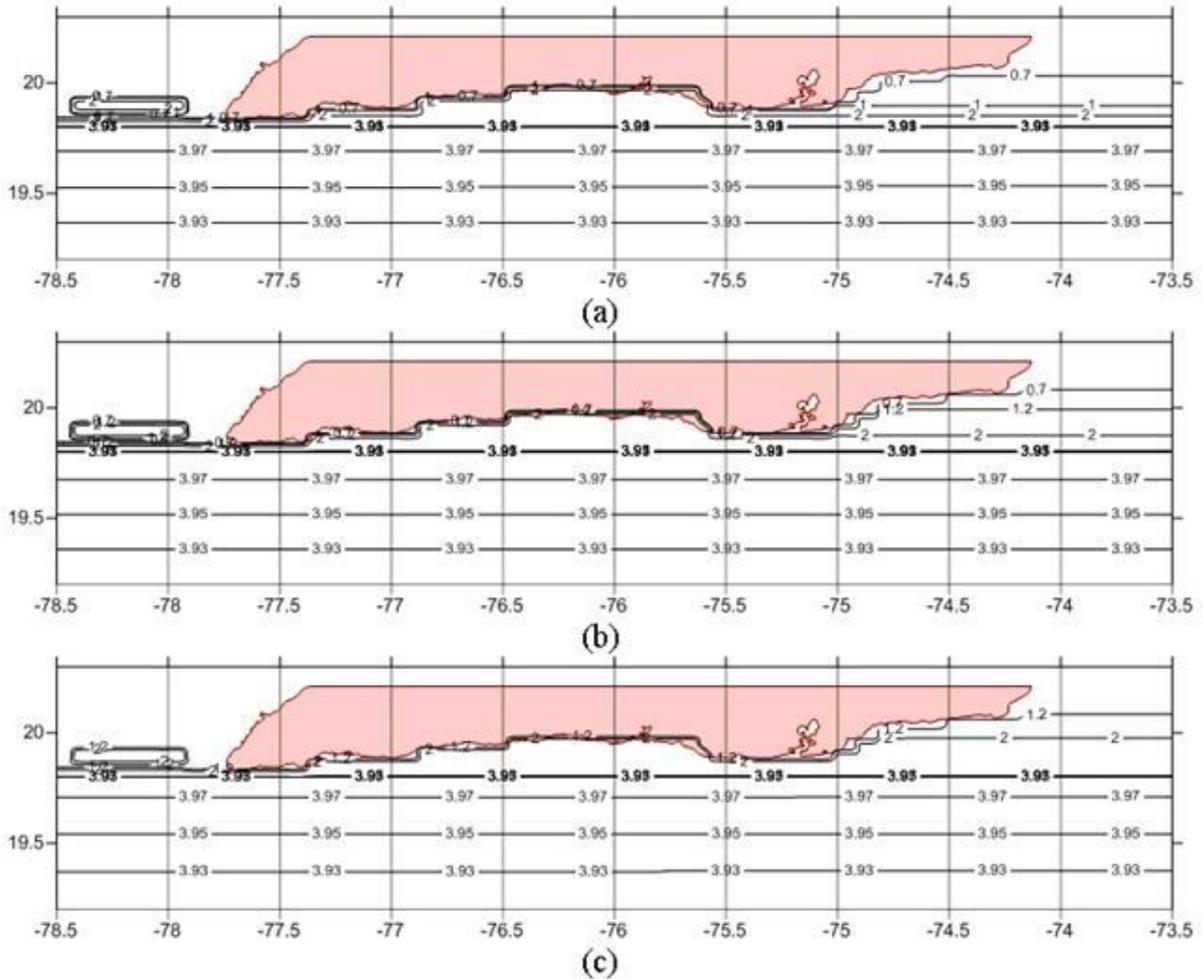


Fig. 6. Distribución espacial de la altura de olas medias (en m) generadas por un H5

En la **Fig. 6** se muestran las líneas de igual altura de las olas medias, desde el contorno S hasta en canto del beril, creciendo muy ligeramente (0.01 m) la altura de ola, en (a), cada 15.6 km; en (b) cada 15.5 km y en (c) cada 16.9 km, esto se debe únicamente a la interacción ola – ola. A partir del canto del beril, empieza a decrecer la altura de la ola, llegando hasta la costa olas con alturas entre 0.4 – 1.2 m en (a), entre 0.6 - 0.7 m en (b) y entre 1.0 – 1.2 m en (c).

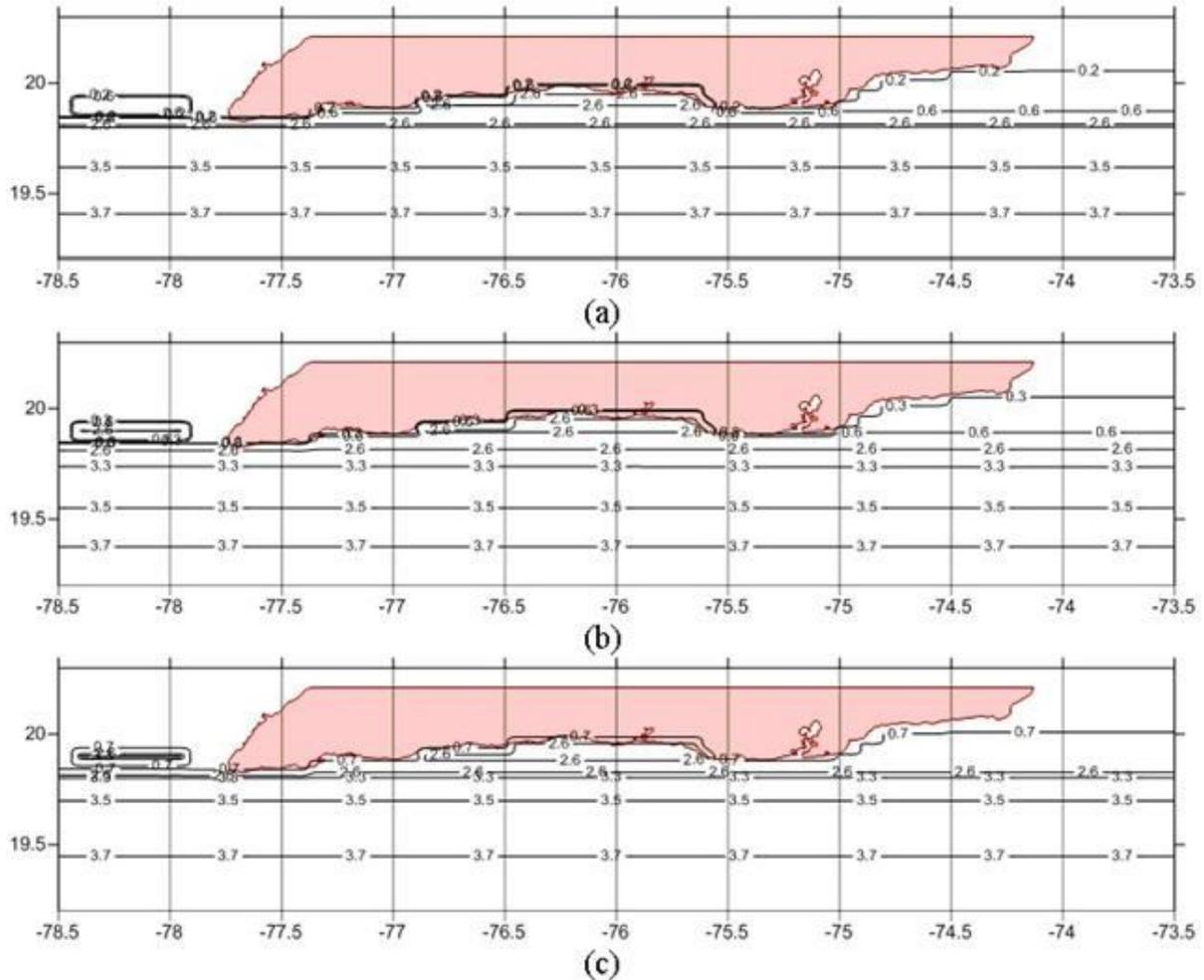


Fig. 7. Distribución espacial de la altura de olas largas (en m) generadas por un H5

En la **Fig. 7** se muestran las líneas de igual altura de las olas largas, donde podemos observar que el oleaje se comporta diferente a las olas cortas y medias, desde el contorno S hasta en canto del beril, su altura de olas disminuye 0.1 m entre líneas de igual altura de olas, disminuyendo en (a), cada 20.8 Km; en (b) cada 18.1 Km y en (c) cada 24.6 Km, debido a la interacción entre las olas. A partir del canto del beril, continua disminuyendo la altura de la ola, llegando hasta la costa olas con alturas entre 0.15 – 0.4 m en (a), entre 0.2 – 0.4 m en (b) y entre 0.4 – 1.2 m en (c). También notamos que al S de la provincia Santiago de Cuba ha aumentado el efecto de la refracción, cambiando la distribución espacial de las olas, y observamos que se cierra la línea de igual altura de olas de 1.2 m, siendo menos de la mitad de la altura de olas generadas por un huracán de categoría 1 en esa zona.

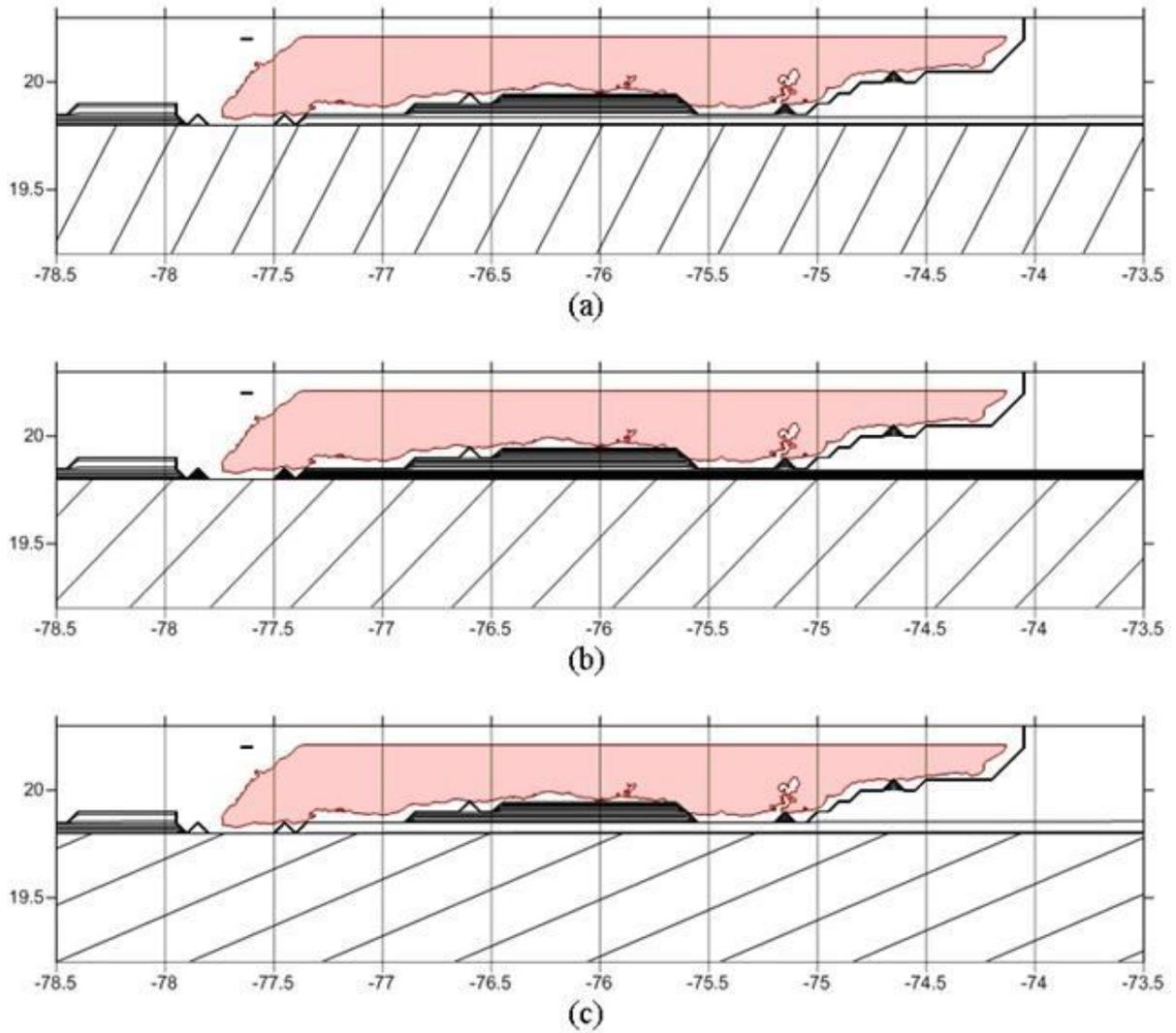


Fig. 8. Distribución de los frentes de olas largas generadas por un H5

En la **Fig. 8** se observa que la forma de los frentes de olas en las cercanías de la costa son prácticamente iguales, independientemente del ángulo de incidencia del oleaje.

Conclusiones

1. La distribución espacial de olas es muy similar para olas cortas y medias. Desde el contorno Sur hasta el canto de beril se comporta con muy poca variación la altura de las olas debido a la interacción ola – ola.
2. En las olas cercanas a la costa en el huracán de categoría 5 las alturas de las olas cortas oscilan entre 1.0 - 1.7 m, las olas medias oscila entre 0.7 – 1.2 m y las olas largas oscila entre 0.2 – 0.7 m.

Referencias

- Egorov, N. I. (1983). *Oceanografía Física*. Moscú. 263-303p
- Grassa, J. M. (1989). Apuntes para la utilización del modelo REFDIF de refracción - difracción y aproximación parabólica. Centro de Estudios de Puertos y Costas. Madrid.
- Ortiz, F. J., J. L. Arteche, P. Sanz (2004). Caracterización del Oleaje en las Aguas Costeras del Cantábrico. El Clima entre el Mar y la Montaña. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria. Serie A. 4:95-104p.
- Varona, H. L. (2011). Modelo del Campo de Viento Generado por un Huracán. XII Simposio de la sociedad cubana de Física.
- Varona, H. L., Y. C. Arias (2011). Determinación del Radio del Ojo y del Radio de Vientos Máximos de un Huracán. XII Simposio de la sociedad cubana de Física.
- Varona, H. L., L. Martínez, H. Hodelin, J. Pavón (2010). Determinación de los Parámetros del Oleaje Incidente Producido por Huracanes Cuasi-estacionarios en la Costa Sur Oriental de Cuba. Informe Interno del Dpto. de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Oriente.
- Varona, H. L. (2010). Ampliación del Modelo USACE para la determinación del campo de Olas generadas por un Huracán. Informe Interno del Dpto. de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Oriente.
- USACE (1984). Shore Protection Manual. Vickburg, Mississippi, 3-81 a 3-84p.

Acerca de los autores:

Humberto L. Varona-González.

Investigador del departamento de oceanografía, UFPE, Pernambuco, Brasil. Master en Física, investiga en los temas de procesos costeros, huracanes, interacción océano-atmósfera, interacción ola-corriente marina. Modelos WRF, ROMS, WAVEWATCH III y SWAN.

Leoandris Martínez-Serrano.

Investigador de la delegación provincial del CITMA, Santiago de Cuba. Licenciado en Física, profesor adjunto del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Oriente, Cuba.

Henry Hodelin-Shombert.

Investigador del departamento de Ciencias de Materiales, CCEN, UFPE, Pernambuco, Brasil. Licenciado en Física. Es colaborador del grupo de Clima Marítimo y Procesos Costeros de la Universidad de Oriente, Cuba.

Jesús Pavón-López.

Investigador del departamento de Óptica Aplicada, CCEN, UFPE, Pernambuco, Brasil. Licenciado en Física. Es colaborador del grupo de Clima Marítimo y Procesos Costeros de la Universidad de Oriente, Cuba.