



ARTÍCULO

## Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de Tercera Generación

### Hurricane wave simulation using parametric wind models in a Third Generation wave model

Fecha recepción: 2006-09-25 / Fecha aceptación: 2006-10-16

**Omar G. Lizano**

E-mail: olizano@cariari.ucr.ac.cr

Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI)

Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR)

Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria (DFAOP),

Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

### Resumen

Dos modelos paramétricos de viento fueron usados para simular la distribución del oleaje en huracanes en uno de los, así llamados, modelos de tercera generación. Se usaron varias condiciones durante huracanes en el Golfo de México y frente a la península de Florida para probar y ajustar los modelos de viento. La información usualmente disponible en las oficinas meteorológicas, como: presión central, radio de viento máximo y las posiciones geográficas, es la única necesaria para crear un perfil de viento con estos modelos paramétricos. Se obtuvieron resultados comparables entre las alturas de olas medidas y las simuladas por el modelo de olas. Esto demuestra la utilidad de estas herramientas para realizar diagnóstico y pronóstico de oleaje durante huracanes en la región. Esta información es valiosa para las entidades gubernamentales como ayuda en la toma de decisiones apropiadas en la eventualidad de presentarse estos fenómenos meteorológicos, los cuales podrían ser más frecuentes e intensos en el futuro.

**Palabras claves:** Modelos paramétricos de viento, pronóstico de oleaje, olas de huracán, Golfo de México, modelos de olas de Tercera Generación.

**CIOH**  
www.cioh.org.co

## Abstract

Two parametric wind models were used to simulate the hurricane wave distribution in the so-called third-generation wave models. Several hurricane conditions in the Gulf of Mexico and in front of the Florida peninsula were used for testing and adjusting the wind models. Information usually available in the meteorological offices, such as hurricane central pressure, maximum wind radio, and the geographic positions, are the only input data needed to create a wind profile with these parametric models. Good results were achieved between the measured wave height and those simulated by the wave model. The outcomes of this study show the usefulness of these tools to carry out wave forecasting and hindcasting during hurricane conditions in the region. This information is valuable for governmental entities in order to make the appropriate decisions in the eventuality of the presence of these weather phenomena, which could be more frequent and intense in the future.

**Key words:** Parametric wind models, wave forecast, hurricane waves, Gulf of Mexico, Third Generation wave models.

## Introducción

Aunque los modelos de predicción que toman en cuenta muchos de los procesos océano-meteorológicos son esenciales para simular oleaje en huracanes, muchas aplicaciones solo requieren modelos paramétricos que simulen las condiciones reales. Modelos paramétricos son aquellos en los cuales el perfil del viento es representado por ecuaciones relativamente simples. Si contienen parámetros de ajuste bien seleccionados, estos modelos también son capaces de reproducir los campos actuales de viento durante un ciclón tropical usando los datos disponibles en las oficinas meteorológicas. Una variedad de ecuaciones se han sugerido para modelar la distribución espacial básica del viento. A la fecha, parece haber tantos modelos como investigadores

trabajando en este campo. Myers [1] suministró la fórmula más ampliamente usada, la cual relaciona la presión  $p$  y la distancia radial  $r$  desde el centro de un huracán [2]:

$$p = p_0 + (p_n - p_0)e^{-\frac{R_{max}}{r}} \quad (1)$$

Aquí  $p_0$  es la presión central,  $p_n$  es la presión ambiente y  $R_{max}$  es el radio de viento máximo. Usando las expresiones anteriores y la relación del viento gradiente [3,4] en  $r = R_{max}$ , se obtiene la aproximación para el viento máximo más empleada:

$$V_{max} = K \left[ (P_n - P_o)^{1/2} - 0.5fR_{max} \right] \quad (2)$$

Aquí  $V_{max}$  es la velocidad máxima del viento a la distancia  $R_{max}$  del centro de la tormenta,  $K$  es un parámetro relacionado a la densidad del aire y  $f$  es el parámetro de Coriolis.

Una de las primeras aplicaciones para simular la distribución espacial de los campos del viento fuera del ojo del huracán fue el modelo del vórtice Rankine [5]. Después de éste, muchas expresiones fueron desarrolladas con diferentes objetivos para calcular el viento radial como una función de parámetros conocidos de la tormenta [6,7,8,9,10,11,12,13]. Cardone et al. [14] usó una forma modificada del modelo de vórtice móvil de Chow [15] para especificar la velocidad del viento en un modelo numérico. Sin embargo, como el modelo asume condiciones de estado estable, produce resultados similares a los anteriores modelos de viento paramétricos [16]. Cardone et al. [17] y Thompson y Cardone [18] describen una versión más general de un modelo capaz de aproximar irregularidades en el perfil radial del viento el cual es también una aplicación de un vórtice móvil en un flujo de capa límite. Vickery et al. [19] hizo mejoras sobre la aplicación de Vickery y Twisdale [13] modelando más acertadamente la asimetría del viento en huracanes con gran velocidad de avance. En el modelo de DeMaria et al. [20] el

perfil del viento puede ser ajustado a cualquier requerimiento del viento a distancias radiales grandes.

Todos las anteriores relaciones paramétricas de viento para huracanes han funcionado relativamente bien en muchas aplicaciones [16]. Estas incluyen cálculos de marejada de huracán, diagnóstico y pronóstico de oleaje [21,15,22,23,24]. Además, estos modelos también, han demostrado que reproducen la distribución espacial del oleaje usando los así llamados modelos de Tercera Generación [25] en condiciones de huracán. Se sabe que los modelos de olas son sensibles a la parametrización de la fuente del viento [26,25,27]. Específicamente en huracanes, la variación rápida de los vectores de viento produce procesos de generación de oleaje complejos que aún son evaluados en los modelos numéricos de oleaje [28]. Aunque el diagnóstico del oleaje para el Huracán Camille en 1969 con el modelo WAM (**WA**ve **M**odeling) dio buenos resultados entre las condiciones de oleaje medidas y simuladas, surgieron aun algunas dificultades [25]. Con un modelo de segunda generación Lizano [22] mostró que, cambiando los parámetros de ajuste en el modelo de viento, es posible obtener diferentes respuestas del modelo de generación de olas. Wornom y Welsh [29] compararon los modelos SWAN (Simulating **WA**ves in **N**earshore areas) ver. 40.11 y WAM en un caso de huracán. Ellos mostraron que el modelo SWAN produce mejores resultados, especialmente cerca de la costa, debido a su parametrización [30]. Padilla *et al.* [31] indican que el modelo SWAN responde más rápido a los cambios del campo de viento.

El presente artículo tuvo por objetivo mostrar los resultados de la aplicación de dos modelos paramétricos del viento [12,32,22,33] utilizando datos tomados por boyas oceánicas de la NOAA durante el paso de huracanes por el Golfo de México y al este de la Península de Florida. Velocidad del viento y alturas de olas fueron comparadas con datos in situ para un amplio rango de condiciones de huracán. La versión 40.01 del modelo SWAN fue usada

para estudiar las respuestas en generación de oleaje a la entrada del viento y para calcular la distribución espacial del oleaje. La implementación y desarrollo de un sistema integrado para diagnóstico y pronóstico de oleaje en condiciones de huracanes como este estudio muestra, podría ayudar a estandarizar herramientas y orientar decisiones de emergencia en estos países.

## Metodología

Se hizo una revisión por Internet (<http://www.ndbc.noaa.gov>) en el National Data Buoy Center (NDBC) de los datos disponibles de la boya de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) durante huracanes en el Golfo de México y en sus aguas vecinas (Apéndice A). El programa HUREVAC 2000 fue usado para extraer y graficar de datos de las trayectorias de huracanes en estas regiones (Figura 1).



**Figura 1.** Trayectorias de huracanes y posiciones de boyas de la NOAA.

Específicamente para el Huracán George, información adicional sobre  $R_{max}$  fue extraída del National Hurricane Center (NHC), también de Hsu y Yan [34] y Hsu *et al.* [35]. Debido a la falta de información acerca de  $R_{max}$  para el resto de los huracanes, éste parámetro fue calculado de acuerdo con su categoría de huracán según la recomendación de Hsu y Yan [34].

La respuesta del código SWAN, versión 40.01, a los perfiles del viento usados en las aplicaciones de Lizano [32,22,33] fueron estudiadas y comparadas con datos de las boyas tomadas durante el huracán George a su paso por el Golfo de México. La distribución espacial del viento  $V(r)$  fue calculada usando la siguiente parametrización [32,22,33]:

$$V(r) = V_{max} \left( \frac{2R_{max}r}{R_{max}^2 + r^2} \right), \quad r < R_{max} \quad (3)$$

$$V(r) = \left( \frac{V_{max}}{C_1 r^k} \right) * \text{Log} \left( \frac{R}{C_2 r^m} \right), \quad r > R_{max} \quad (4)$$

Se realizó una calibración de la ecuación 4 con los valores de  $k$  y  $m$  para obtener un mejor ajuste en el perfil de la altura de la ola generado por el modelo SWAN y los datos de las boyas. Los parámetros originales de Collins and Viehman [9]:  $k = 0.15128$  y  $m = 1.607$  fueron restablecidos en el modelo de viento. Se usaron los valores originales de  $C_1=3.354$  y  $C_2=1.265 \times 10^{-3}$ . La ecuación 2 fue modificada de la siguiente manera:

$$V_{max} = 0.885 \left[ (P_n - P_o)^{1/2} - fR_{max} \right] + 0.5V_F \quad (5)$$

El valor de  $K=0.885$  es tomado de Murty [2].  $V_F$  es la velocidad de avance del huracán, agregada para simular la asimetría del viento en el cuadrante derecho [21,26,22,28]. Debe notarse que el término  $0.5fR_{max}$  de la ecuación 2 fue reducido a  $fR_{max}$  para obtener mejor resultados en altura de ola.

La formulación del modelo paramétrico de Holland [12], tomado de Gica y Teng [23], fue escrita en una subrutina de Fortrán 90. La ecuación es:

$$V(r) = 0.8 * \left\{ \left[ \frac{B}{\rho_a} \left( \frac{R_{max}}{r} \right)^B (P_n - p_0) e^{-\left( \frac{R_{max}}{r} \right)^B} + \left( \frac{r^f}{4} \right)^2 \right]^{0.5} - \frac{r^f}{2} \right\} \quad (6)$$

Aquí  $\rho_a = 1.15 \text{ kg/m}^3$ .  $B = 1.5 + (980 - p_0)/120$  siguiendo la recomendación de Young y Burchell [28].

El modelo de olas SWAN versión 40.01, de dominio público [30] fue descargado desde Internet de la Delf University of Technology (<http://swan.ct.tudelft.nl/home.htm>), compilado en Fortrán 90 y ejecutado en microcomputadoras tipo PC. La batimetría TOPO5 de la United States Geological Survey (USGS), interpolado a 2.5 grados, fue usado para proveer la información de entrada en el modelo de olas. Los límites de la región geográfica utilizada para calcular las características espaciales de los huracanes fue lo suficientemente grande como para simular al menos 60 horas antes de que alcanzaran las boyas donde se estaba registrando información. Un tamaño de rejilla de 18.51 km fue usado como la resolución espacial del modelo de olas en todas las simulaciones de huracanes. Dado que este tamaño de rejilla es siempre más pequeño que los radios de viento máximo utilizados (Apéndice A), permite que el modelo de olas puede tener buena resolución en la distribución espacial de la altura de las olas [36]. El código SWAN fue ejecutado con la parametrización de triadas [30] para tomar en cuenta las condiciones de aguas llanas en algunos casos (Tabla 1).

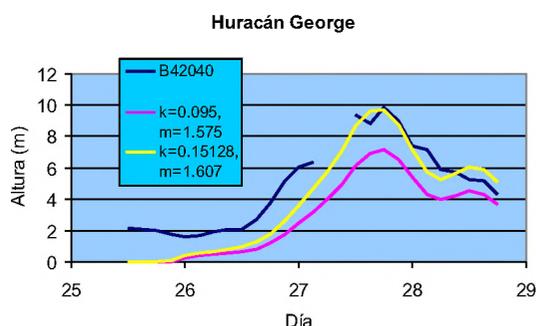
**Tabla 1.** Información del National Data Buoy Center (NDBC) - NOAA

Estac.	ID (Fig.1)	Pos. (grados)	Prof. Agua (m)
42001	(B01)	25.92 N 89.68 W	3,246.0
42040	(B40)	29.21 N 88.20 W	237.7
42039	(B39)	28.80 N 86.06 W	283.5
42036	(B36)	28.51 N 84.51 W	53.0
41009	(B09)	28.50 N 80.18 W	42.0
41010	(B10)	28.90 N 78.55 W	841.2

## Resultados

La Figura 2 muestra los perfiles simulados y observados de la altura de ola conforme el Huracán George se aproximaba a la boya No. 42040 (B40, Figura 1) en el interior del Golfo de México. En las aplicaciones de Lizano [32,22,33] se utilizó un modelo de olas de segunda generación con los valores  $k=0.095$  y

$m = 1.775$  en el modelo de viento. En este caso, utilizando el modelo de tercera generación, SWAN ver. 40.11, se encuentra que cambiando estos parámetros a sus valores originales de Collins and Viehman [9]:  $k = 0.15128$  y  $m = 1.607$ , el perfil de altura de ola ajusta mejor al observado. Estos últimos valores fueron usados entonces, para el resto de las simulaciones.



**Figura 2.** Perfiles de altura de ola (m) durante el Huracán George observados y simulados por el modelo según parámetros en la boya NOAA B42040.

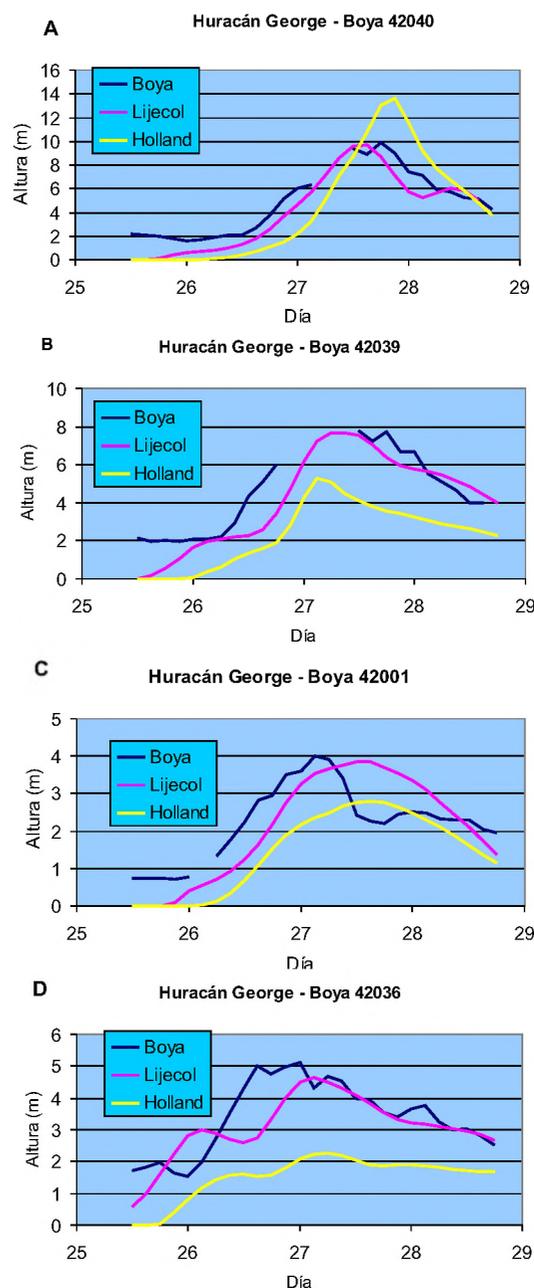
La aplicación de los dos modelos de viento utilizados en este estudio se muestra en la Figura 3. Comparando los perfiles de la altura de las olas generadas por el modelo SWAN, se encuentra que el modelo empleado en Lizano [32,22,33] (en los sucesivo llamado Lijecoll), tiene un mejor ajuste que el modelo de Holland (Tabla 2).

**Tabla 2.** Desviación media absoluta entre los valores de altura de ola observada y la simulada usando los distintos modelos de viento

Gráfico	Modelo	
	Lijecoll	Holland
3A	1.295	2.105
3B	0.986	2.629
3C	0.709	0.870
3D	0.578	1.873
4A	0.831	1.245
4B	1.710	2.424

Los perfiles de alturas de las olas obtenidas con el modelo de viento de Holland sobrestiman los valores observados cuando el ojo del huracán

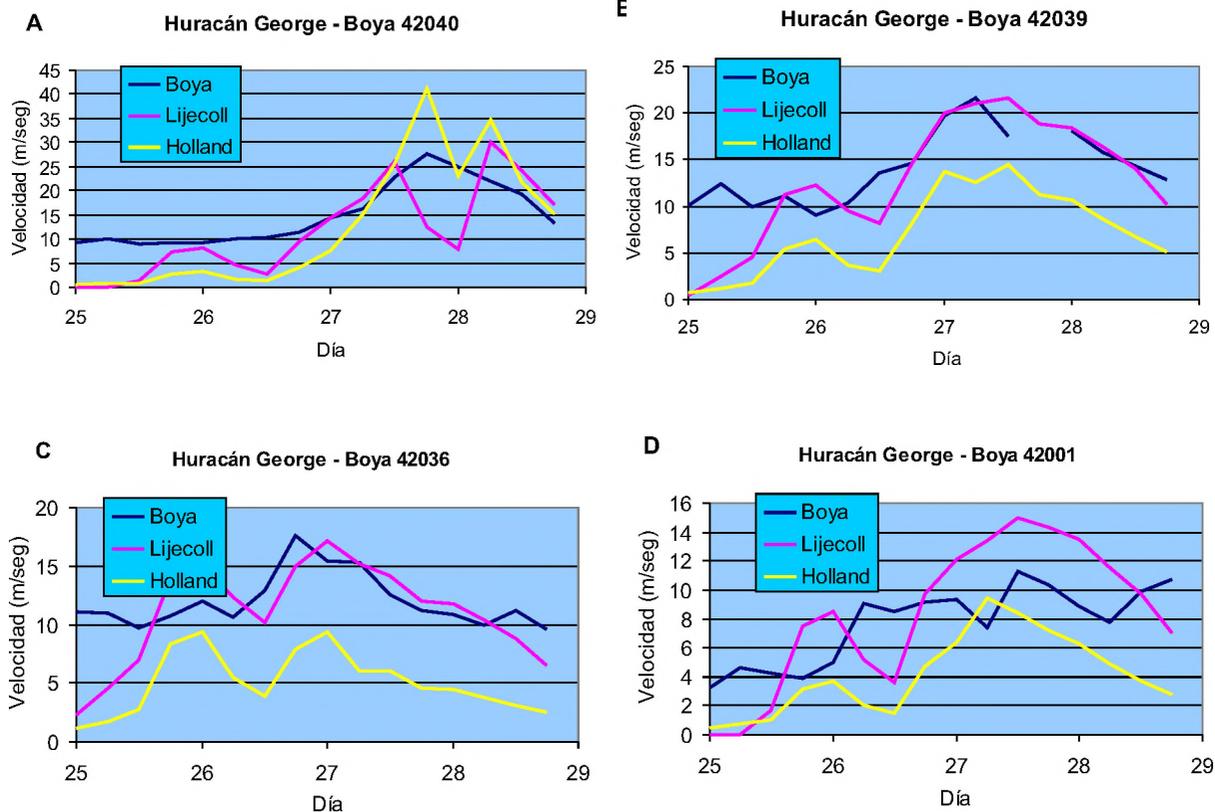
pasa cerca de la boya No. B42040 (Figura 3A), y subestima los valores observados para boyas mas alejadas de la trayectoria del huracán: B42039, B42001 y B42036 (Figuras 3B, 3C, y 3D).



**Figura 3.** Perfiles de altura de ola (m) observados y simulados durante el Huracán George en boyas de la NOAA usando los modelos de viento paramétricos Lijecoll y de Holland.

La Figura 4 muestra los perfiles del viento observados y simulados con los dos modelos de viento para el huracán George. El modelo de viento Lijecoll muestra valores más ajustados a lo observado que los del modelo de Holland. Los perfiles de altura de ola mostrados en las figuras anteriores, Figuras 3, están relacionados a estos perfiles de viento. Donde se sobrestiman valores del viento (ejem.:

Figura 4A), se sobrestiman los valores de las alturas del oleaje (Figura 3A). Donde se subestiman magnitudes del viento, se subestiman valores de alturas de olas. Este es el caso con el modelo de Holland para las posiciones más alejadas de la trayectoria del huracán (ver Figuras 3B y 4B, 3C y 4C, 3D y 4D).

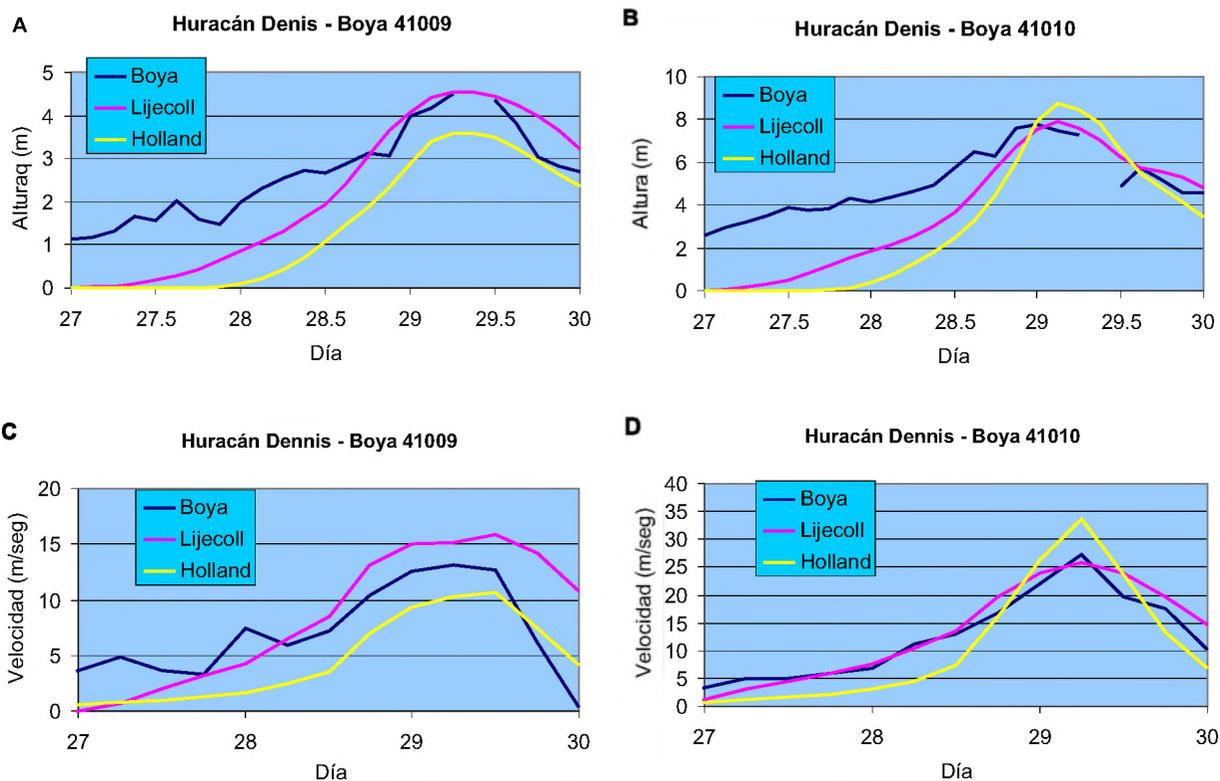


**Figura 4.** Perfiles de viento (m/seg) observados y simulados durante el Huracán George en boyas de NOAA con los modelos de viento Lijecoll y de Holland.

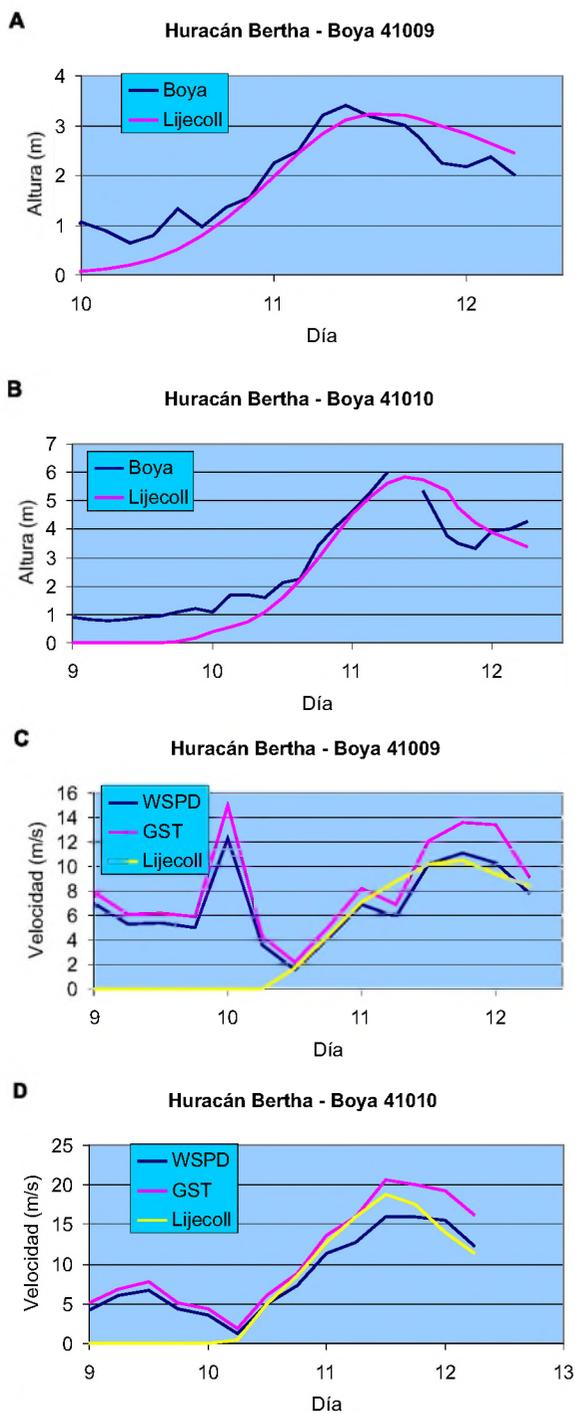
El Huracán Denis a su paso frente a la Península de Florida (Figura 1) permitió obtener otros resultados. La Figura 5 muestra de nuevo, un mejor ajuste con el modelo Lijecoll (tabla 2) de la altura de ola para las dos estaciones: B41009 y B41010 (Figuras 5A y 5B).

Aplicaciones adicionales se realizaron con el modelo de viento Lijecoll. La Figura 6 muestra

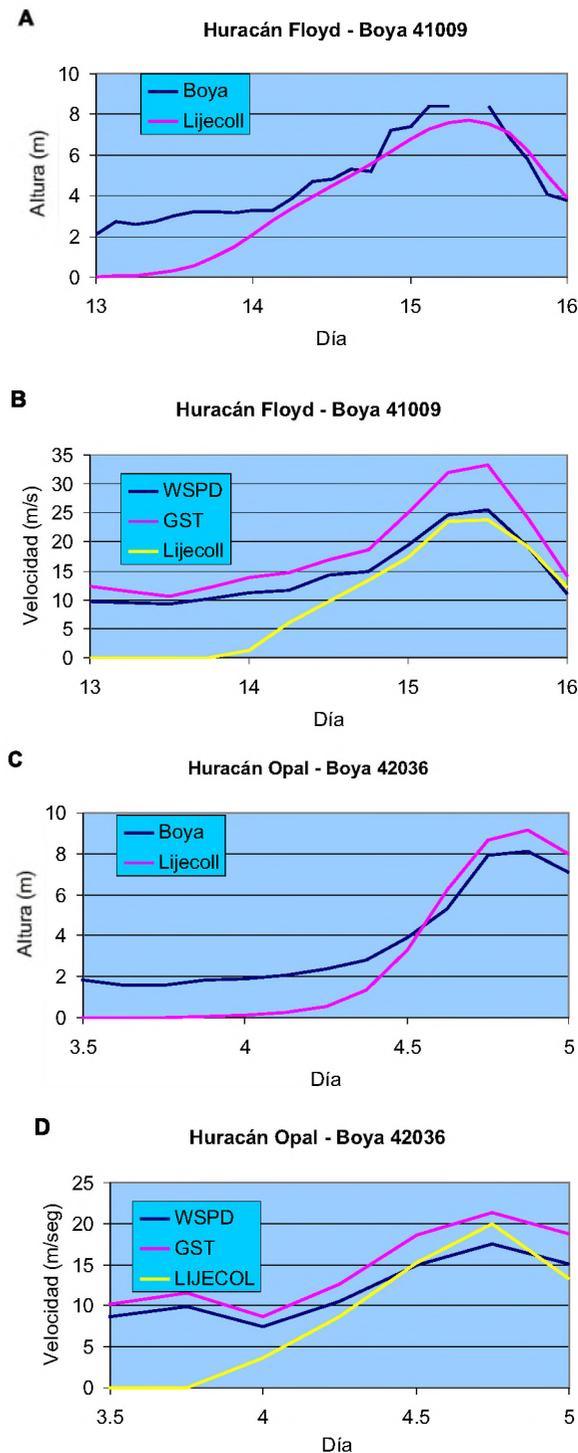
el caso del Huracán Berta y la Figura 7 el caso del Huracán Floyd y Opal. Un buen ajuste se logra tanto en magnitud del viento como en altura de ola entre los valores observados y simulados en ambos casos. Estos resultados demuestran que la combinación de este modelo de viento y el de olas SWAN, versión 40.01, son una técnica válida para diagnosticar y pronosticar la distribución espacial del oleaje durante huracanes.



**Figura 5.** Perfiles de altura de ola (m) y viento (m/seg) observados y simulados durante el Huracán Denis en boyas de la NOAA usando los modelos de viento paramétricos Lijecoll y de Holland.



**Figura 6.** Perfiles de olas (m) y viento (m/seg) observado y simulado durante el Huracán Berta en boyas NOAA usando el modelo de viento Lijecoll. WSPD: velocidad de viento promediado sobre un período de 8 minutos. GST: pico 5 o 8 segundos de velocidad de ráfaga medido durante período de 8 o 2 minutos.



**Figura 7.** Perfiles de ola (m) y viento (m/seg) observados y simulados durante el Huracán Opal en boyas NOAA usando el modelo de viento Lijecoll.

## Discusión

En general, la mayoría de los modelos paramétricos de viento sólo calculan la magnitud del viento alrededor del vórtice del huracán e ignoran las condiciones ambientales (flujo geostrófico) en las cuales está inmerso. Con la información generada por un modelo de viento, los modelos de generación de olas necesitan un tiempo para madurar y dispersar apropiadamente el campo de oleaje [26]. Esta condición es frecuentemente una fuente de error en los modelos de olas, especialmente durante huracanes donde se dan variaciones rápidas de la magnitud y dirección del viento [25]. Dado que en el presente estudio no fue dada ninguna condición de frontera respecto al oleaje para el modelo SWAN, éste asigna un valor cero al campo de alturas de olas al principio de cualquier simulación. Por esta razón, los perfiles de las alturas de las olas simuladas muestran al principio una altura cero, lo cual es usualmente menor que el valor observado en las boyas si hay otras fuentes de generación de oleaje. Este es el caso para todas las simulaciones realizadas en este estudio (Figuras 3, 4, 6 y 7). Tan pronto como el oleaje madura y se dispersa la energía de las olas, los valores simulados se van aproximando más a los valores observados. Padilla [31] mostró que el modelo SWAN responde rápidamente a los cambios del vector viento. Esto es lo que también muestra esta aplicación específica con el código SWAN versión 40.01: el campo de oleaje madura en un corto tiempo y reproduce el campo de olas con alturas similares a las observadas durante huracanes típicos de la región, como muestran las figuras anteriores.

Por otro lado, la asimetría característica del viento sobre el cuadrante derecho del huracán, la cual es calculada por el modelo Lijecoll, parece necesaria para generar mayor energía de ola sobre esta región. Este es el caso para el Huracán George con los perfiles de altura de ola mostrados en las boyas B42039 y B42036 (Figuras 3B y 3D). El patrón del modelo de viento de Holland es simétrico alrededor del

ojo del huracán, por lo que no reproduce esta asimetría del viento en el cuadrante derecho. Recientemente Willoughby y Rahn [37], usando datos de 606 vuelos a través de ciclones tropicales en el Atlántico y Pacífico tropical de éste, mostraron que el modelo de Holland sobrestima los valores observados del viento alrededor del ojo y subestima los valores conforme la distancia al centro del huracán aumenta. Esta característica del modelo de Holland podría contribuir con la sobrestimación de la altura de ola alrededor del ojo, como se observó en algunos casos, y con la subestimación de las alturas de olas a distancias más allá del centro del huracán, como se calculó para la mayoría de los casos simulados. Tal como lo establece Cardone et al. [18], dada una exactitud en el campo de viento, los modelos de olas de Tercera Generación reproducen muy bien las condiciones espaciales del oleaje.

Estos modelos de viento y olas proveen la mejor forma de conocer la distribución especial del oleaje durante huracanes y son herramientas útiles para generar información importante para la toma de decisiones políticas en el caso de estos eventos extremos. El Pacífico mexicano y las costas del Caribe han sido impactados históricamente por huracanes con su destrucción asociada, impacto económico y pérdida de vidas humanas. Los residentes del Caribe aún recuerdan el Huracán Fifi en Honduras en septiembre de 1974. Más reciente aún, el Huracán Mitch (octubre de 1998) causó destrucción en toda Centroamérica calculada en más de \$6.000 millones. En ambas regiones mucho del impacto de los ciclones está relacionado no solamente a la carencia de avisos, sino también, a la carencia de herramientas apropiadas de pronóstico en las oficinas meteorológicas. La implementación y desarrollo de un sistema integrado de pronóstico y diagnóstico de condiciones de oleaje en huracanes podría ayudar en minimizar los impactos y a orientar las decisiones de estos países.

## Agradecimientos

AL PROGRAMA MESOAMERICANO DE INTERCAMBIO ACADÉMICO ANUIES-CSUCA por el apoyo financiero de los intercambios académicos entre Centro de Investigación Científica y de Educación Superior (CICESE) de Ensenada Baja California, México y el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica. A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por el apoyo financiero a través del proyecto No. 805-96-279.

## Referencias bibliográficas

- [1] Myers VA. Characteristics of U.S. hurricanes pertinent to levee design for Lake Okeechobee. Florida. U.S. Weather Bureau. Hydromet. Report No. 32. 1954; p. 106.
- [2] Murty TS. Storm surges, Meteorological Ocean Tides. Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic. Sciences. 1984; 212.
- [3] Holton JR. Introduction to dynamic meteorology. Academic Press, New York. 1992; p. 319.
- [4] Reyes S. Introducción a la meteorología. Universidad Autónoma de Baja California. B.C. México. 2001; p. 464.
- [5] Depperman CE. Notes on the origin and structure of Philippine Typhoons. Bull. Amer. Meteor. Soc. 1947; 28:399-404.
- [6] Jelesniansky CP. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf. Mon. Weather Rev. 1965; 93:343-360.
- [7] Jelesniansky CP. SPLASH (Special program to list amplitudes of surges from hurricanes): 1. Landfall Storms. TM-46. (COM-72-10807). National Weather Service. NOAA. 1972; p. 52.
- [8] Patterson MM. Hindcasting hurricane waves in the Gulf of Mexico. J. Petrol. Eng. 1972; p. 321-328.
- [9] Collins J, and Viehman M. A simplified empirical model for hurricane wind fields. Paper No. OTC 1346. Offshore Technology Conference. 1971.
- [10] Overland JE. Providing winds for wave models: In: Earle MD, and Malahoff A. (eds.), ocean wave climate. Plenum press. New York. 1977; p. 3-37.
- [11] Pagenkopf JR, and Pearce BR. Evaluation of techniques for numerical calculation of storm surges. Report No. 119. Department of Civil Engineering, MIT. Cambridge, Massachusetts. 1975; p. 120.
- [12] Holland GJ. An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes. Mon. Weather Rev. 1980; 108:1212-1218.
- [13] Vickery PJ, and Twisdale A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions. ASCE J. Struct. Eng. 1995; 121(11):1700-1709.
- [14] Cardone VJ, Greenwood CV, and Greenwood JA. Unified program for the specification of hurricane boundary layer winds over surfaces of specified roughness. Final Report. Contract Report CERC-92-1. Department of Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1992.
- [15] Chow SH. A study of the wind field in the planetary boundary layer of a moving tropical cyclone. M.Sc. Thesis in Meteorology, School of Engineering and Science. New York University, New York. 1971.
- [16] CEM (Coastal engineering manual). Part II. Chapter 2. Meteorology and wave climate. Publications from Marine Construction and Coastal Engineering. Revisado 03 de marzo, 2007. Home Page: <http://www.vulcanhammer.net/marine/>.
- [17] Cardone VJ, Cox AT, Greenwood JA, and Thompson EF. Upgrade of the tropical cyclone surface wind field model. Miscellaneous paper CERC-94-14. U.S. Army Corps of Engineers. 1994.
- [18] Cardone VJ, Jensen RR, Resio DT, Swail VR. and Cox AT. Evaluation of contemporary ocean wave models in rare extreme events: The "Halloween Storm" of October 1991 and the "Storm of the Century" of March 1993. J. Atmos. Oceanic Technol. 1996; 13(1):198-230.
- [19] Vickery PJ, Skerlj PF, Steckley AC, and Twisdale LA. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations. ASCE J. Struct. Eng. 2000; 126(10):1203-1221.
- [20] DeMaria M, Aberson SD, and Ooyama KV. Nested spectral model for hurricane track forecasting. Mon. Weather Rev. 1992; 120:1628-1640.
- [21] SPM (Shore protection manual). Volume I. Department of the Army. Waterways experiments station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi. 1984.
- [22] Lizano OG. Modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico durante huracanes. Geofísica. 1990; 33:75-103.

[23] Gica E, and Teng MH. Numerical simulation of storm surge generated by Hurricane Iwa in Hawaii. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. EM 2002. Columbia University, New York. 2002.

[24] Peng M, Xie L, and Pietrafesa LJ. A numerical study of storm surge and inundation in the Croatan-Albermarle-Pamlico estuary system. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2003; 59:121-137.

[25] WANDI Group. The WAM Model-A Third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Oceanogr. 1988; 18:1775-1809.

[26] SWAMP Group. Ocean wave modeling. Plenum press. New York. 1985; p. 256.

[27] Ponce S, and Ocampo-Torres FJ. Sensitivity of wave model to wind variability. J. Geophys. Res. 1998; 103(C2):3179-3201.

[28] Young IR, and Burchell GP. Hurricane generated waves as observed by satellite. Ocean Engng. 1996; 23(8):761-776.

[29] Wornom SF, Welsh DJ, and Bedford KW. On coupling the SWAN and WAM wave models for accurate nearshore wave predictions. J. Coast. Engng. 2001; 43(3):161-201.

[30] Ris RC. Communications on hydraulic and geotechnical engineering. Spectral modeling of wind waves in coastal areas. Report No. 97-4. Faculty of Civil Engineering. Delf University of Technology. 1997; p. 160.

[31] Padilla-Hernández R, Osuna P, Monbaliu J, and Holthuijsen L. Intercomparing third-generation wave model nesting. 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Jan. 27-30, Melbourne, Florida. 1998; p. 102-112.

[32] Lizano OG. Modelo de predicción de olas generadas por huracanes en el Mar Caribe. Ph.D. Thesis in Department of Marine Sciences. University of Puerto Rico. Mayaguez Campus. 1988; p.118.

[33] Lizano OG, Ocampo FO, Alvarado LF, Puig JM, y Vega R. Evaluación de modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico de oleaje en Centroamérica y México. Tóp. Meteorol. Oceanog. 2001; 8(1):40-49.

[34] Hsu S.A, and Yan Z. A note on the radius of maximum wind for hurricanes. J. Coast. Research. 1998; 14(2): 667-668.

[35] Hsu SA, Martin Jr. MF, and Blanchard BW. An evaluation of the USACE's deepwater wave prediction techniques under hurricane conditions during Georges in 1998. J. Coast. Research. 2000; 16(3):823-829.

[36] Lizano OG. Efectos del tamaño de rejilla y el número de frecuencias en un modelo espectral de pronóstico de olas. Tóp. Meteorol. Oceanog. 1997; 4(1):39-50.

[37] Willoughby HE, and Rahn, ME. Parametric representation of the primary vortex. Part I: Observation and evaluation of the Holland (1980) Model. Mon. Weather. Rev. 2004; 132:3033-3048.

## Apéndice A

### Información sobre parámetros de huracanes

Fecha(UTC)hr*	Long	Lat	$P_0$ (mb)	$R_{max}$ (Km)	
<b>Huracán George - Golfo de México, set, 1998</b>					
25/0000	00	79.0	22.7	987.0	64.8
0600	06	80.2	23.4	986.0	64.8
1200	12	81.3	23.9	982.0	101.8
1800	18	82.4	24.6	975.0	92.5
26/0000	24	83.3	24.8	974.0	46.3
0600	30	84.2	25.2	975.0	50.8
1200	36	85.1	25.7	974.0	46.3
1800	42	85.9	26.2	975.0	46.3
27/0000	48	86.5	50.0	969.0	46.3
0600	54	87.2	50.6	970.0	46.3
1200	60	87.8	28.2	962.0	46.3
1800	66	88.3	28.8	962.0	50.0
28/0000	72	88.5	29.3	961.0	50.0
0600	78	88.7	29.8	964.0	50.0
1200	84	88.9	30.4	965.0	50.0
1800	90	88.9	30.6	984.0	50.0
<b>Huracán Denis - Florida, ago, 1999.</b>					
26/0600	00	73.1	23.8	995.0	34.0
1200	06	73.6	24.1	995.0	34.0
1800	12	74.0	24.4	990.0	34.0
27/0000	18	74.4	24.8	993.0	34.0
0600	24	75.0	25.2	988.0	34.0
1200	30	75.5	25.6	988.0	34.0
1800	36	75.9	25.9	987.0	34.0
28/0000	42	76.2	26.1	982.0	34.0
0600	48	76.7	26.5	976.0	34.0
1200	54	77.0	27.1	973.0	34.0
1800	60	77.3	27.7	969.0	46.0
29/0000	66	77.7	28.3	969.0	46.0
0600	72	77.9	29.0	970.0	46.0
1200	78	78.4	29.9	971.0	46.0
1800	84	78.4	30.8	967.0	46.0
30/0000	90	78.1	31.9	964.0	46.0
0600	96	77.6	32.8	962.0	46.0

Huracán Bertha - Florida, jul, 1996.

09/0000	00	66.1	19.4	970.0	34.0	
	0600	06	67.7	20.3	960.0	51.0
	1200	12	69.4	21.4	965.0	51.0
	1800	18	71.1	22.5	967.0	46.0
10/0000	24	72.6	23.6	969.0	46.0	
	0600	30	74.0	24.5	971.0	34.0
	1200	36	75.3	25.4	968.0	34.0
	1800	42	75.8	26.4	966.0	34.0
11/0000	48	76.4	27.5	968.0	34.0	
	0600	52	76.8	28.3	972.0	34.0
	1200	60	77.5	29.2	977.0	34.0
	1800	66	78.0	30.0	980.0	34.0
12/0000	72	78.3	30.7	982.0	34.0	
	0600	78	78.6	31.2	984.0	34.0

Huracán Floyd - Florida, set, 1999.

11/1200	00	62.0	21.9	962.0	46.0	
	1800	06	63.0	22.5	966.0	46.0
12/0000	12	64.1	22.7	967.0	46.0	
	0600	18	65.2	22.8	960.0	46.0
	1200	24	66.2	23.0	955.0	51.0
	1800	30	67.4	23.2	940.0	48.0
13/0000	36	68.7	23.4	931.0	48.0	
	0600	42	70.0	23.6	922.0	48.0
	1200	48	71.4	23.9	921.0	48.0
	1800	54	72.9	24.1	923.0	48.0
14/0000	60	74.0	24.5	924.0	48.0	
	0600	66	75.3	24.9	927.0	51.0
	1200	72	76.3	25.4	930.0	51.0
	1800	78	77.0	26.1	930.0	51.0
15/0000	84	77.7	27.1	933.0	48.0	
	0600	90	78.5	28.2	935.0	51.0
	1200	96	78.9	29.3	943.0	51.0
	1800	102	79.1	30.6	947.0	46.0
16/0000	108	78.7	32.1	950.0	46.0	

Huracán Opal Golfo de México, oct, 1995.

02/1200	00	92.3	21.0	973.0	34.0	
	1800	06	92.3	21.2	972.0	34.0
03/0000	12	92.2	21.7	970.0	34.0	
	0600	18	92.0	22.2	969.0	34.0
	1200	24	91.6	22.8	968.0	34.0
	1800	30	91.0	23.5	965.0	46.0
04/0000	36	90.1	24.5	953.0	51.0	
	0600	42	89.4	25.9	935.0	51.0
	1200	48	88.5	27.3	919.0	48.0
	1800	54	87.7	29.0	938.0	51.0
05/0000	60	86.8	31.0	950.0	34.0	

\* Hora de simulación del modelo de olas