

# Modelo híbrido para la caracterización del oleaje

Gabriel Ruiz-Martínez  
Rodolfo Silva-Casarín

Universidad Nacional Autónoma de México

Dulce María Pérez-Romero

Universidad de Granada, España

Gregorio Posada-Vanegas

Universidad Nacional Autónoma de México

Eric Gustavo Bautista-Godínez

Instituto Politécnico Nacional, México

*La modelación de los fenómenos físicos es una tarea muy compleja y hasta las mejores representaciones son sólo simplificaciones de la realidad. En el caso de los modelos numéricos, la veracidad de los resultados depende de las hipótesis propias de las ecuaciones que resuelven y de la calidad de los datos de entrada. Una práctica para incrementar significativamente la precisión de los resultados es la integración de modelos combinados o híbridos que permiten subsanar las deficiencias mediante una interacción conjunta. En este trabajo se presenta un modelo híbrido compuesto por un modelo de tercera generación (WAM), que estima el campo de oleaje en aguas profundas como función de datos de viento, y otro, de segunda generación (HURAC), que a partir de datos ciclónicos calcula los campos de viento, oleaje y presión atmosférica. Este segundo modelo se presenta en una versión actualizada, en la que se ha mejorado la precisión, como lo muestra la validación que aquí mismo se expone, y se ha optimizado su ejecución. Los resultados del modelo híbrido se comparan con las mediciones de siete boyas oceanográficas que registraron los efectos de 13 huracanes en el Golfo de México y el Caribe mexicano durante el año 2005. El incremento en la precisión de los resultados con respecto a la modelación utilizando únicamente el WAM o el HURAC, convierte al modelo híbrido en una fuente confiable de información del clima marítimo en aguas profundas tanto en condiciones medias como durante la ocurrencia de fenómenos extraordinarios.*

**Palabras clave:** WAM, HURAC, huracán Wilma, oleaje, huracanes, modelos numéricos, Golfo de México.

## Introducción

Históricamente, dos terceras partes de la población mundial se han establecido en poblaciones y desarrollos litorales (Komar, 1998). Resulta innegable, entonces, la relevancia política, económica, social y ambiental que, globalmente, está depositada en las

costas marinas. Consecuencia de ello es la necesidad de generar un conocimiento más amplio y profundo de los distintos fenómenos que suceden en las regiones costeras, ya que de esta comprensión depende el grado de preservación y/o explotación sostenible que se logre de sus recursos naturales.

El entendimiento, medición y predicción de escenarios juegan un papel medular en la ejecución de trabajos ingenieriles encaminados a modificar las playas, ya sea para explotarlas económicamente o para mantenerlas en un estado de equilibrio. El éxito en la planificación, proyección y uso de dichas obras depende de la consecución de información que permita conocer las posibles reacciones que tendrá el medio natural ante las alteraciones generadas y, a partir de ello, evaluar las repercusiones positivas, negativas y los medios de mitigación.

La herramienta de diagnóstico que permite anticipar la respuesta de una playa ante algún tipo de alteración es el análisis morfodinámico del litoral, que puede definirse como la descripción de las formas costeras y la interpretación de su interacción con los procesos físicos del medio que la rodea (Woodroffe, 2002). La interacción entre la costa y el medio es el objeto de estudio de la hidrodinámica, rama que para cumplir a cabalidad con su función, requiere de valores conocidos de los agentes físicos (oleaje, viento, corrientes y variaciones de largo periodo) de la costa.

En este sentido, el oleaje es uno de los agentes marinos principales, pues dicho fenómeno regula el comportamiento de las corrientes costeras y, dada la cantidad de energía que descarga sobre las playas, el motor de la evolución morfológica. Para conocer numéricamente el oleaje cercano a la costa es necesario partir de una base de datos, lo más amplia posible, del clima marítimo en aguas profundas. El marco ideal señala que dichos datos serían resultado de la medición sistemática; desafortunadamente, México carece de una fuente de información generalizada y los datos de oleaje disponibles corresponden a trabajos muy locales y de corta duración. Ante tal deficiencia, la ingeniería costera moderna se ha dado a la tarea de realizar predicciones numéricas de las condiciones marinas en aguas profundas a partir de datos de viento, de los cuales sí se cuenta con información confiable.

Hasta donde es del conocimiento de los autores y de acuerdo con Pérez *et al.* (2008), el banco de información de campos de viento más completo y con acceso libre a través de Internet es la base de datos del proyecto de reanálisis del NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, [www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/)). Este proyecto reanaliza los campos de viento, utilizando datos históricos de diversas fuentes de medición tanto en tierra como en boyas, barcos y satélites, para generar una base de datos con información meteorológica de todo el mundo desde 1948 hasta fechas recientes (Kalnay *et al.*, 1996). El principal inconveniente de esta base de

datos es que sus resultados tienen baja resolución tanto espacial como temporal (los datos se proporcionan cada seis horas y espaciados a dos grados tanto en latitud como longitud). Más aún, Cox *et al.* (1999) y Swail *et al.* (1999) concluyen que los vientos del proyecto NCEP/NCAR empleados para hacer estudios de oleaje en el Atlántico Norte son útiles para la predicción del oleaje; sin embargo, los resultados del reanálisis subestiman la magnitud de los vientos cuando se registran valores máximos debidos a tormentas.

De la incapacidad del reanálisis de NCEP/NCAR de representar adecuadamente la ocurrencia de tormentas, así como la importancia y frecuencia que tienen en el litoral mexicano (Silva *et al.*, 2000), nace la inquietud de los autores por desarrollar un modelo que represente adecuadamente los fenómenos extremos a la par de las condiciones medias. El resultado es el modelo híbrido que se presenta en este artículo, el cual utiliza un modelo de tercera generación (*WAM*) para la predicción de las condiciones medias de oleaje y un modelo paramétrico (*HURAC*) que solamente corrige la estimación en los casos de condiciones extraordinarias asociadas con la influencia de los ciclones tropicales. El primer modelo es alimentado por los datos de viento de NCEP/NCAR y el segundo tiene la capacidad de calcular sus propios campos de viento y presión atmosférica en función del radio ciclostrófico del huracán. A continuación se presenta una breve descripción de ambos modelos.

### **Modelo de generación de oleaje (*WAve Model*)**

Este modelo fue desarrollado por un grupo de investigadores de diferentes institutos que integran el Wave Model Development and Implementation Group (WAMDI GROUP, 1988). El modelo fue implementado bajo las recomendaciones derivadas del proyecto Sea Wave Modelling Project (SWAMP).

El *WAM* es un modelo de generación de oleaje que resuelve la ecuación de transporte de energía mediante un método de solución implícita:

$$\frac{dF}{dt} + \frac{\partial}{\partial \phi_w} (\dot{\phi} F) + \frac{\partial}{\partial \lambda_w} (\dot{\lambda} F) + \frac{\partial}{\partial \theta_w} (\dot{\theta} F) = S \quad (1)$$

donde  $F(f^*, \theta_w, \phi_w, \lambda_w)$  es la función de densidad espectral que tiene como variables dependientes  $f^*$ , la frecuencia;  $\theta_w$ , la dirección de propagación del oleaje;  $\phi_w$  y  $\lambda_w$ , los valores de latitud y longitud, respectivamente, del punto espacial de la malla de cálculo y  $t$ , el tiempo. El término  $S$ , en el lado derecho de la ecuación (1), simboliza un parámetro tanto de fuente como de sumidero de la

energía de las olas; este término exhibe los efectos producidos por el aporte de energía del viento ( $S_{in}$ ), las interacciones no lineales entre las olas ( $S_{nl}$ ) y la disipación de la energía ( $S_{ds}$ ) como:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2)$$

La primera variable de las tres funciones principales de generación y disipación del oleaje es el término de energía por viento definido por Janssen (1989):

$$S_{in} = \beta F \quad (3)$$

En la cual  $F$  es la función de densidad espectral y  $\beta$  es la función que relaciona el crecimiento exponencial de la energía del oleaje e integra un factor de escalamiento de la velocidad mediante la velocidad de fricción  $u_*$  (cfr. Snyder *et al.*, 1981).

Para determinar las interacciones no lineales de la ecuación del balance de energía del oleaje, el WAM maneja la teoría expuesta por Hasselmann (1960), con la cual se estima la transferencia de energía entre las diferentes componentes y direcciones del espectro del oleaje; la hipótesis de esta teoría es que dentro de un grupo de cuatro olas existirá un intercambio de energía siempre y cuando se cumplan las condiciones de resonancia para el número de onda y frecuencia. El proceso de determinación de las interacciones entre todas las componentes del espectro requiere de un gran tiempo de proceso computacional, por lo que el WAM, para optimizar el tiempo, incorpora una parametrización discreta ( $di$ ) de la interacción dividida en cuatro componentes de la forma:

$$S_{nl}^{di}(k_4) = \sum_{\gamma=1,2} A_\gamma \omega_4 [n_1^\gamma n_2^\gamma (n_3^\gamma + n_4^\gamma) - n_3^\gamma n_4^\gamma (n_1^\gamma + n_2^\gamma)] \quad (4)$$

Donde  $n_i^\gamma = \frac{F(k_i^\gamma)}{\omega_i^\gamma}$ ,  $i = 1,2,3$  y  $\gamma = 1,2$  y  $A_\gamma$  son coeficientes de acoplamiento.

Debido a que la energía del oleaje no puede incrementarse infinitamente a través del medio que la transmite, las olas llegan a desarrollar un grado de saturación que disipa su energía en el momento que la ola rompe, inclusive en aguas profundas. Como una respuesta a la incertidumbre que aún representa entender en su totalidad el mecanismo de disipación de energía por rompiente, el WAM incorpora el siguiente mecanismo de ajuste:

$$S_{ds} = -2.33 \times 10^{-5} \hat{\omega} (\omega_w / \hat{\omega})^2 (\hat{\alpha} / \hat{\alpha}_{pm})^2 F \quad (5)$$

Donde  $\hat{\omega} = E^{-1} \iint F(f^*, \theta_w) \omega_w df^* d\theta_w$  es la frecuencia media,  $E = \iint F(f^*, \theta_w) df^* d\theta_w$  es la energía total,  $\hat{\alpha} = E \hat{\omega}^4 g^{-2}$  es el parámetro de esbeltez de la ola y  $\hat{\alpha}_{pm} = 3.01 \times 10^{-3}$  representa el parámetro para el espectro Pierson Moskowitz. La función  $S$  fuente/sumidero debe incluir tanto el término de disipación por la interacción con el fondo como los términos de la ecuación de dispersión del oleaje, para que la ecuación de balance de energía del oleaje pueda llegar a ser válida y aplicable en aguas someras (Pérez, 2005).

### **Modelo de predicción de oleaje con viento ciclostrófico (HURAC)**

El modelo paramétrico de ciclones HURAC, que se describe en este apartado, tiene como fundamento los modelos Hydromet-Rankin Vortex de Holland (1980) y Bretschneider (1990). Dicho modelo mejora substancialmente la caracterización del campo de vientos y oleaje; además, simplifica la implementación numérica de la metodología presentada en los trabajos de Sánchez *et al.* (1998), Silva *et al.* (2000) y Silva *et al.* (2002). El modelo HURAC está compuesto por tres submodelos, que a continuación se describen, los cuales generan el cálculo de los campos de presión, viento y oleaje.

#### *Modelo de presión atmosférica*

En lo que se refiere al modelado numérico de la presión atmosférica que realiza el HURAC, la ecuación (6) proporciona dicho valor:

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0) \exp(-R/r) \quad (6)$$

Donde  $P_0$  es la presión en el centro del huracán;  $P_r$  la presión a una distancia radial  $r$ ;  $P_N$  la presión normal, y  $R$  es el radio de vientos ciclostróficos máximos. Las unidades de medida de las presiones de la expresión anterior se encuentran en milibares y las distancias en kilómetros.

#### *Modelo de viento*

Para la modelación del viento se determinan los valores del gradiente máximo del campo de vientos y la velocidad que alcanza el viento a diez metros sobre el nivel del mar. El gradiente máximo de vientos  $U_R$  (en  $\text{km h}^{-1}$ ) para un ciclón estacionario se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_0} - 0.5fR \quad (7)$$

En la cual  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $f=2\omega\sin\phi$ ,  $\omega$  es la velocidad angular de la Tierra,  $\omega\approx 0.2618$  rad/h, y  $\phi$  es la latitud ( $^{\circ}$ ). Por otro lado, la velocidad del viento que se evalúa a diez metros sobre el nivel del mar, en km.h $^{-1}$ , para un ciclón en movimiento y para una distancia  $r$  medida desde el centro del ciclón, se establece por:

$$W = 0.886(F_v U_R + 0.5 V_F \cos(\theta + \beta)) \quad (8)$$

Donde  $(\theta + \beta)$  representa el ángulo total entre la velocidad de traslación,  $V_F$  (en km.h $^{-1}$ ), y la velocidad del viento  $U_r$  (en km.h $^{-1}$ ), a una distancia radial,  $r$ , desde el centro del huracán, positiva en el lado derecho y negativa en el lado izquierdo;  $F_v$  es un factor de amortiguamiento que se evalúa como la relación de la velocidad del viento en  $r$ ,  $U_r$  (en km.h $^{-1}$ ) y  $U_R$ . El factor  $F_v$  es aproximado a través de las siguientes relaciones:

$$F_v = 1 - 0.971 \text{Exp}\left(-6.826\left(\frac{r}{R}\right)^{4.798}\right); \quad \frac{r}{R} < 1 \quad (9)$$

$$F_v = \text{Exp}\left(A \ln^3\left(\frac{r}{R}\right) \text{Exp}\left(B \ln\left(\frac{r}{R}\right)\right)\right); \quad \frac{r}{R} \geq 1 \quad (10)$$

Donde:

$$A = -0.99 * (1.066 - \exp(-1.936 N_c)) \quad (11)$$

$$B = -0.357(1.4456 - \exp(-5.2388 N_c)) \quad (12)$$

### Modelo de oleaje

Para evaluar la altura de ola significante  $H_s$ , para un ciclón no estacionario, el modelo de oleaje aplica la siguiente ecuación:

$$H_s = 0.2887 F_h \left( 1 - \frac{6.69 N_c}{1 + 10.3 N_c - 3.25 N_c^2} \right) \sqrt{R(P_N - P_0)} \left( 1 + \frac{V_F \cos(\theta + \beta)}{2U_R F_v} \right)^2 \quad (13)$$

Donde  $F_h$  es aproximado a través de la siguiente relación:

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + 0.742 \left( \frac{r}{R} - 1 \right) + 0.07382 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)^2}; \quad \frac{r}{R} < 1 \quad (14)$$

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + 0.742 \left( \frac{r}{R} - 1 \right) + 0.07382 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)^2} - \frac{N_c \left( \frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + C \left( \frac{r}{R} - 1 \right) + \frac{N_c}{10} \left( \frac{r}{R} - 1 \right)^2}; \quad \frac{r}{R} \geq 1 \quad (15)$$

Donde:

$$C = \frac{0.37 N_c^{2.55}}{0.13 + N_c^{2.55}} \quad (16)$$

En la cual  $N_c$  representa el número de Coriolis ciclostrófico ( $N_c = fR/U_r$ ). Una estimación muy aproximada del periodo de ola asociado con la altura de ola significante se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$T_s = 12.1 \sqrt{H_s/g} \quad (17)$$

En la expresión anterior,  $T_s$  está dado en segundos; la altura significante,  $H_s$ , en metros, y la aceleración de la gravedad en metros sobre segundo cuadrado.

### Relaciones complementarias

Los modelos paramétricos de presión, viento y oleaje que se reportan en la literatura, generalmente dependen de la siguiente información: posición del centro del huracán, presión central, valor de presión de la última isobara cerrada y del radio ciclostrófico, conocido también como radio de máximo gradiente. Debido a que no todos los reportes meteorológicos dan a conocer el valor de la presión central, el modelo HURAC fue diseñado para eliminar dicha deficiencia de información utilizando el criterio de Silva et al. (2002), en el cual se proponen dos curvas para estimar la presión central en función de la velocidad superficial máxima del viento, una para el océano Atlántico y la otra para el océano Pacífico, que son, respectivamente:

$$P_0 = 1019.08 - 0.182V_v - 0.0007175V_v^2 \quad (18)$$

$$P_0 = 1017.45 - 0.1437V_v - 0.00088V_v^2 \quad (19)$$

Donde  $P_0$  es la presión central del huracán en milibares (mb) y  $V_v$  es la velocidad máxima del viento promedio en un minuto, en  $\text{km.h}^{-1}$ ; siendo esta última magnitud la velocidad que normalmente se reporta en los boletines meteorológicos.

Actualmente, todos los parámetros que se requieren para la modelación de la interacción oleaje con viento ciclostrófico pueden encontrarse en muchos boletines climatológicos, con excepción del radio ciclostrófico, que propiamente nunca se reporta. Despues de analizar el comportamiento de 26 huracanes, Silva et al. (2002) proponen la siguiente relación:

$$R = 0.4785 P_0 - 413.01 \quad (20)$$

Donde el radio ciclostrófico,  $R$ , está dado en kilómetros, y puede tomar valores máximos y mínimos de 38 y 15, respectivamente, para presiones centrales superiores a 880 milibares.

Los avisos meteorológicos y la ubicación de los puntos de interés para estimar los campos de presiones, viento y oleaje se reportan generalmente en coordenadas geográficas, pero las ecuaciones de la (6) a la (20) utilizan unidades métricas (kilómetros) para definir las distancias. Para omitir la transformación de coordenadas, el modelo usa la siguiente aproximación para calcular el radio  $r$ :

$$r = |E_x a \cos(\operatorname{sen}[\phi_i] \operatorname{sen}(\phi_c) + \cos(\phi_i) \cos(\phi_c) \cos(\lambda_c - \lambda_i))| \quad (21)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud y  $\phi$  es la latitud. Los subíndices  $i$  y  $c$  indican las posiciones del punto de interés y del centro del ciclón, respectivamente. El radio de la Tierra,  $E_x$  para cualquier latitud, se determina como:

$$E_x = \frac{E_{ra}^2 E_{re}}{(E_{ra} \cos \phi)^2 + (E_{re} \operatorname{sen} \phi)^2} \quad (22)$$

Donde  $E_{ra}$  representa el radio de la Tierra en el ecuador (6 378.135 km) y  $E_{re}$  el radio polar de la Tierra (6 356.75 km). El ángulo que se circunscribe entre el centro de ciclón y la velocidad del viento en el punto de interés,  $\beta$ , se puede evaluar como:

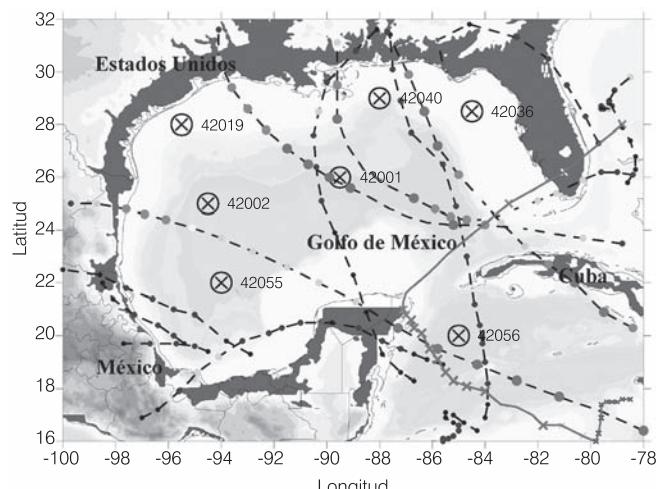
$$\beta = a \tan 2 (\lambda_i - \lambda_c, \phi_i - \phi_c) \quad (23)$$

Para obtener los ángulos de incidencia del viento y oleaje se utiliza una formulación análoga a la ecuación (23), donde se sustituyen los valores de las latitudes y longitudes por las componentes del viento ( $u$  oleaje) evaluadas a una distancia  $\Delta\phi$  y  $\Delta\lambda$ , respectivamente.

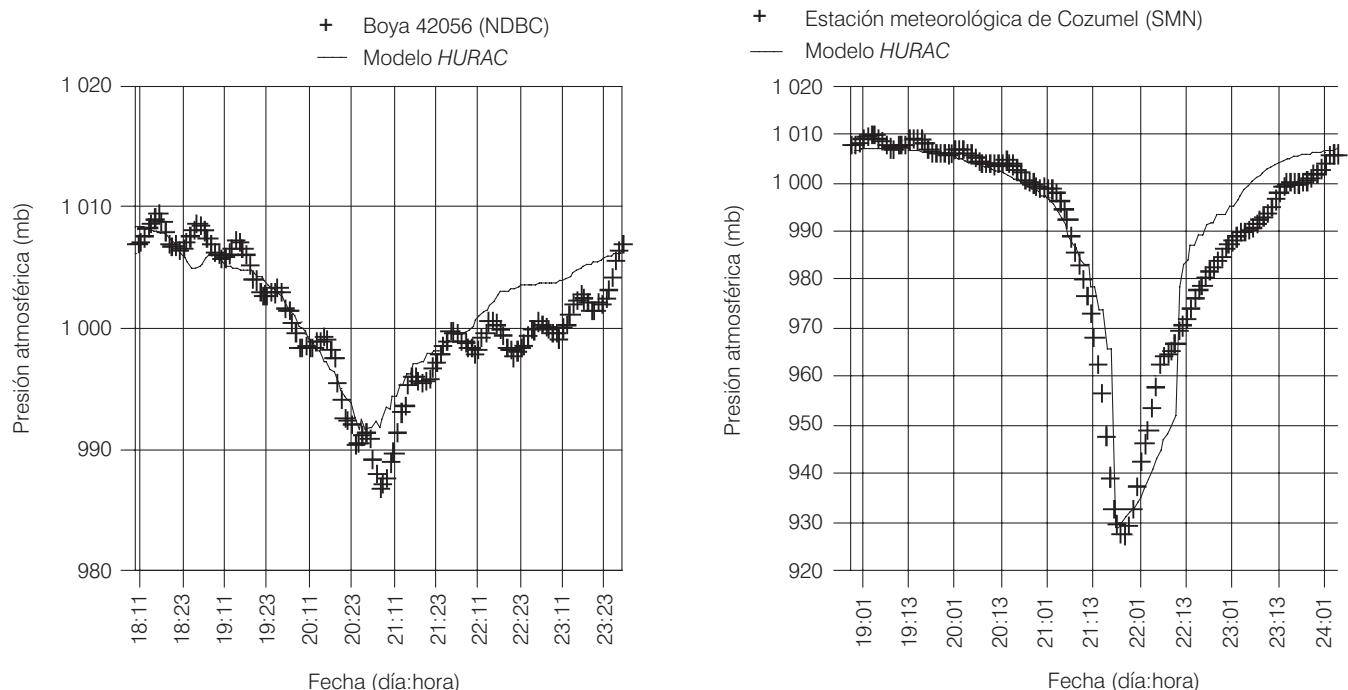
#### Validación del HURAC

Para validar el modelo *HURAC* se eligió el huracán *Wilma* que se presentó en el año 2005. En la ilustración 1 se puede ver la trayectoria del huracán, indicada con una X la posición del centro que se registró a intervalos de seis horas. La comparación entre los resultados de viento y oleaje obtenidos con el modelo *HURAC* y mediciones, se realizó con datos de: (a) una boyas del NDBC (National Data Buoy Center, [www.ndbc.noaa.gov](http://www.ndbc.noaa.gov)); (b) la estación meteorológica de Cozumel del SMN (Servicio Meteorológico Nacional de la Conagua, <http://smn.cna.gob.mx/>); (c) perfiladores de corriente y oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Silva et al., 2009) y del sistema de reanálisis de vientos superficiales del HRD de la NOAA (Hurricane Research Division de la National Oceanic and Atmospheric Administration, [www.nhc.noaa.gov/](http://www.nhc.noaa.gov/)). En las ilustraciones 2, 3 y 4 se observa la comparación entre los resultados obtenidos del modelo con los datos medidos de presión, velocidad de viento y altura de ola. Se identifica que en los tres casos existe una buena correlación y que el modelo *HURAC* es capaz de reproducir los efectos del huracán *Wilma*.

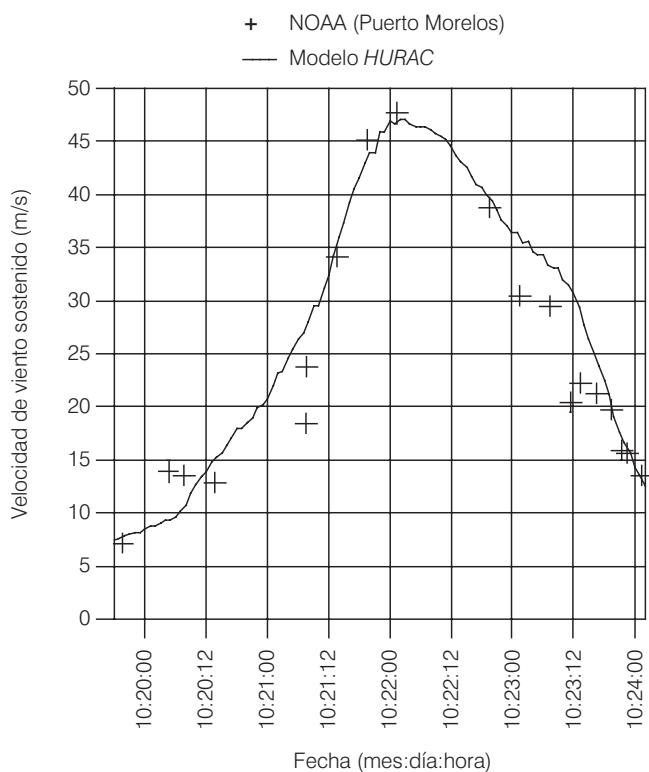
**Ilustración 1. Posición geográfica de las boyas de la NOAA y trayectoria de 13 ciclones tropicales que afectaron el Golfo de México y la porción del Caribe mexicano durante 2005. Con línea continua se presenta la trayectoria del huracán Wilma.**



**Ilustración 2. Comparación entre las presiones atmosféricas calculadas con el modelo HURAC versus registros de la boya 42056 del NDBC y del SMN en la isla de Cozumel durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).**



**Ilustración 3. Comparación de los vientos calculados con el modelo HURAC y los datos estimados por el proyecto HRD durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).**

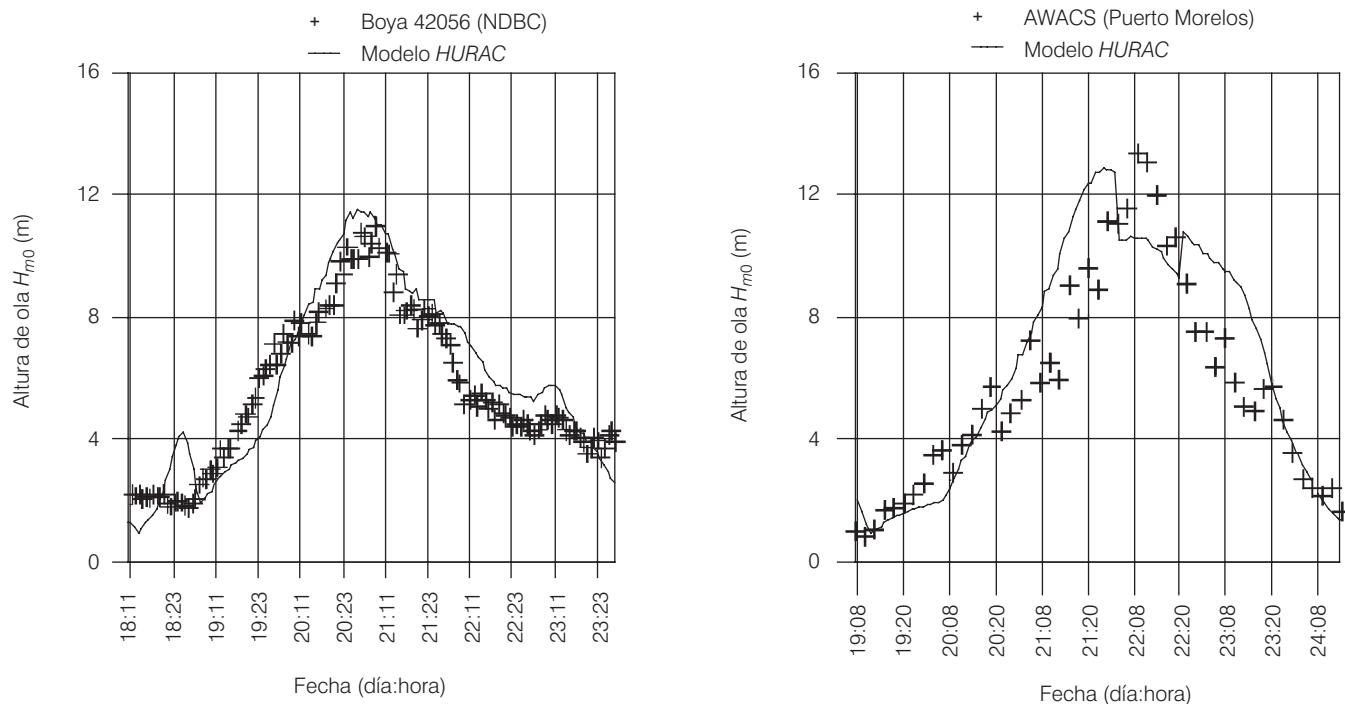


### Modelo híbrido WAM-HURAC

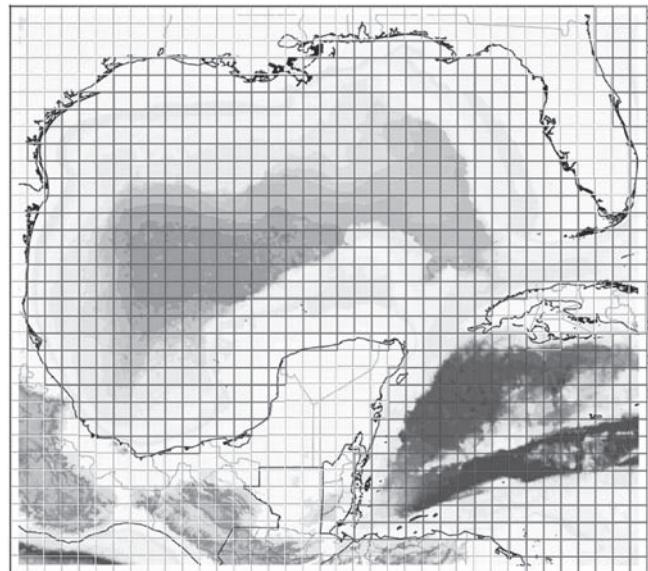
El modelo híbrido WAM-HURAC se utilizó para modelar el clima de oleaje correspondiente al año 2005, en donde se tuvo la afectación de 13 huracanes (*Arlene, Bret, Cindy, Dennis, Emily, Gert, José, Katrina, Rita, Stan, Tammy, Wilma y Gamma*) en la vertiente atlántica mexicana (ilustración 4). La metodología que se sigue es la siguiente:

1. El modelo WAM se implementó en una zona que cubre en su totalidad la extensión del Golfo de México y mar Caribe (ilustración 5). La batimetría se obtuvo del BODC (British Oceanographic Data Center, [www.bodc.ac.uk/data/online\\_delivery/gebco/](http://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/)) y los campos de viento de la base de datos del NCEP/NCAR. Siguiendo la metodología utilizada por Pérez *et al.* (2008), el modelo se ejecutó con estos datos de entrada y se obtuvieron los campos de oleaje correspondientes a todo 2005.
2. Por otro lado, utilizando los boletines meteorológicos del NHC (National Hurricane Center de la NOAA, <http://www.nhc.noaa.gov/>), se identificaron los ciclones tropicales que afectaron la zona de interés (malla numérica). Una vez realizado este proceso, se interpolaron los avisos para tener la ubicación geográfica y presión central a cada hora; con esta

**Ilustración 4. Comparación de las presiones atmosféricas calculadas con el modelo HURAC versus registros de la boya 42056 del NDBC y los valores medidos en Puerto Morelos, Quintana Roo (reportados por Silva et al., 2009) durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).**



**Ilustración 5. Malla numérica del Golfo de México y mar Caribe utilizada para el modelo híbrido (resolución espacial de dos grados por dos grados).**



información se ejecutó el modelo HURAC, limitando su aplicación a un radio de 500 km medidos desde el centro del meteoro, de tal forma que se obtuvo para

todos los nodos de la malla numérica un registro discontinuo en el tiempo de los datos de viento y oleaje.

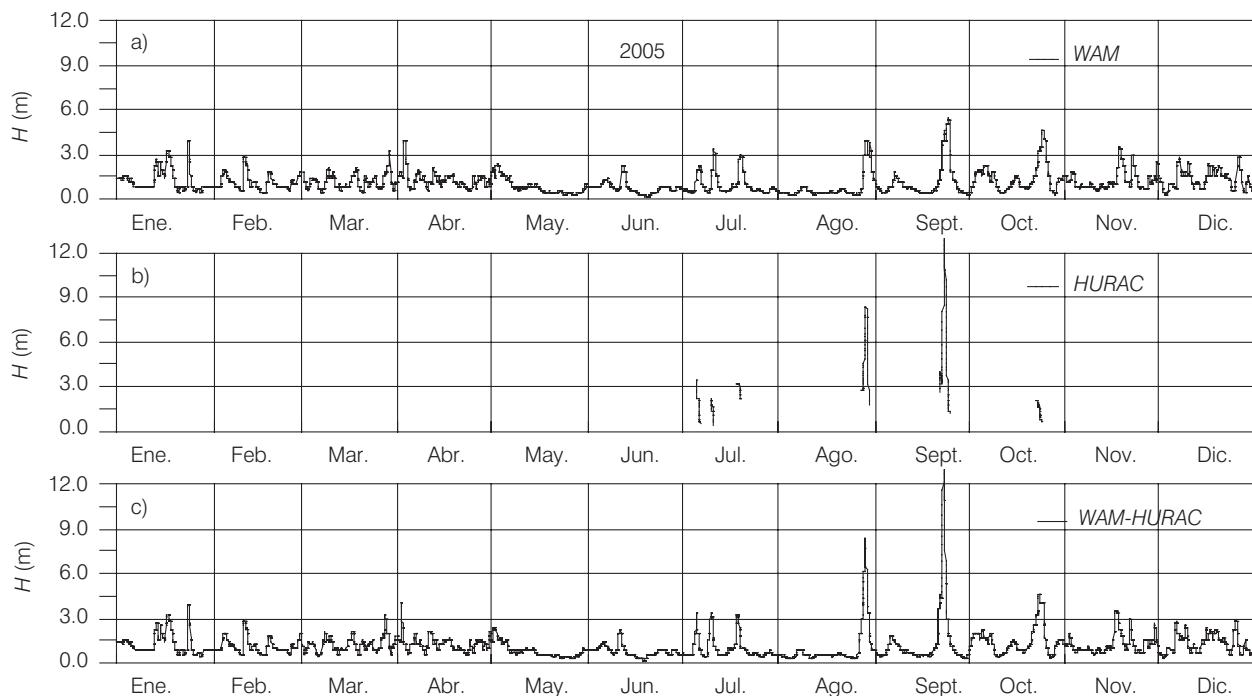
3. Finalmente, los resultados obtenidos con el WAM, en las fechas correspondientes a la afectación de cada uno de los ciclones, fueron sustituidos por los datos generados por el modelo HURAC, siempre y cuando estos últimos fueran diferentes de cero.

Los resultados de la metodología quedan esquematizados en la ilustración 6. Para el punto ubicado en la coordenada 89.5° W, 26° N, durante 2005 se presenta lo siguiente: en el panel a), los resultados obtenidos con el modelo WAM; en el panel b), los resultados del modelo HURAC, y en el panel c) los resultados obtenidos de la combinación de ambos modelos (modelo híbrido). Cabe señalar que la ubicación de este punto coincide con la localización de la boya 42001 del NDBC.

## Resultados y validación

Para validar los resultados obtenidos por el modelo híbrido WAM-HURAC, se eligieron siete boyas oceanográficas del NDBC, en función de la trayectoria de los huracanes

**Ilustración 6. Esquematización de la metodología empleada para el punto ubicado en la coordenada 89.5° W, 26° N. Valores de la altura de ola obtenida con: a) el modelo WAM, b) resultados del modelo HURAC y c) resultados con el modelo híbrido WAM-HURAC.**



elegidos y la localización de las mismas. En la ilustración 4 se observa la posición de las boyas, así como la trayectoria de los eventos.

En las ilustraciones 7 a 13 se muestran, en los incisos a), b), c) y d), las rosas de oleaje y viento de los datos medidos por las boyas, contrastadas con los datos calculados del modelo híbrido. Las gráficas correspondientes a los incisos e) y f) representan la evolución de las alturas significantes del oleaje y el comportamiento del viento de los datos estimados por el modelo híbrido y los valores registrados por las boyas a lo largo de los distintos meses del año 2005. Los incisos g) y h) presentan la comparación de las distribuciones de probabilidad de la altura del oleaje y la velocidad de viento calculadas versus magnitudes medidas por las boyas.

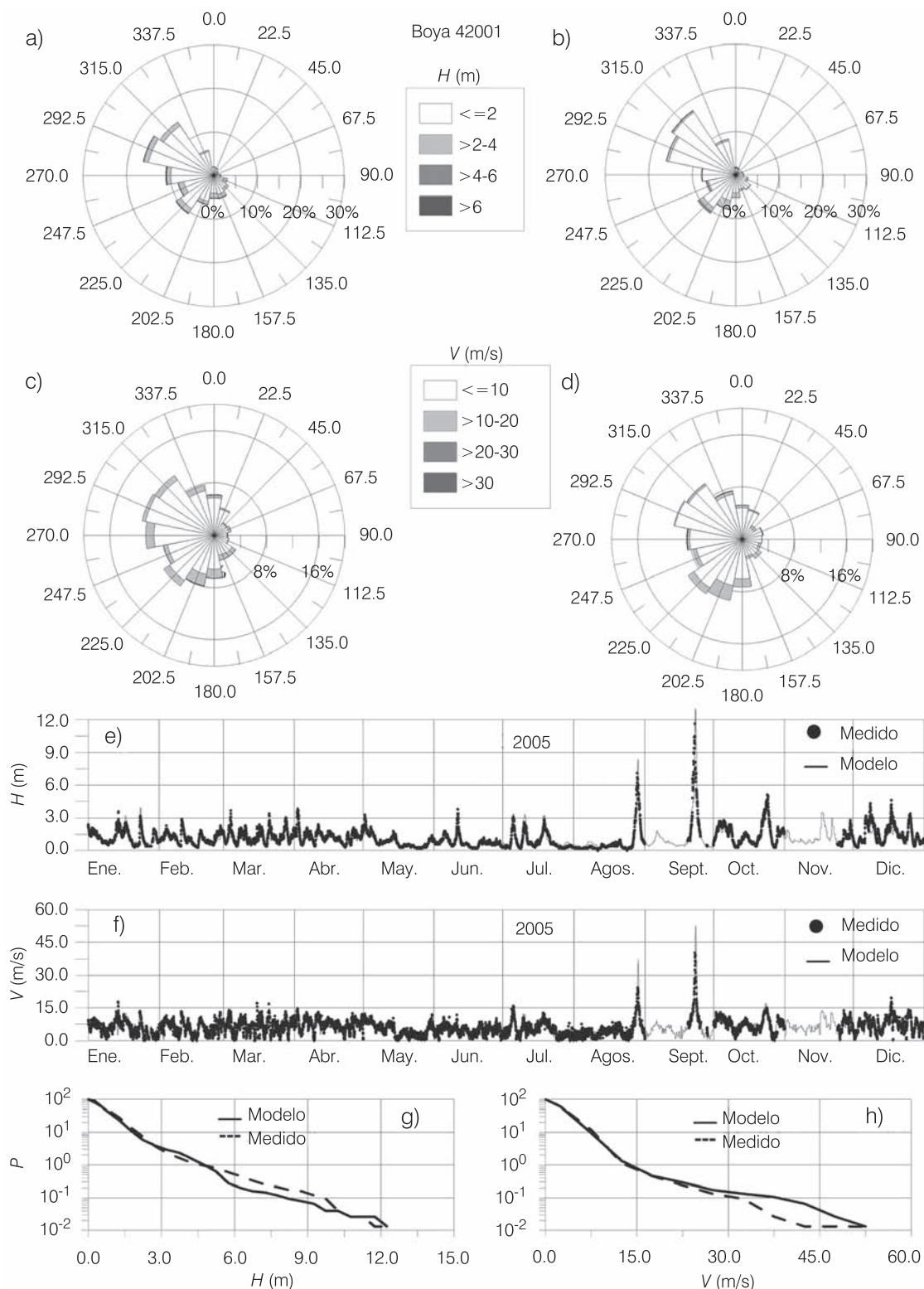
A partir de las comparaciones que se mostraron en las ilustraciones 7 a 13, el ajuste entre los datos medidos y los valores calculados, para las direcciones del oleaje y viento ocurridas en 2005, es muy bueno si se toma en cuenta que los datos fuente son una combinación de un re-análisis de vientos medios (en seis horas y en una celda de  $2^\circ \times 2^\circ$ ; ver ilustración 5) y los obtenidos a través de un modelo paramétrico muy simple de implementarse. En la verificación de la

información de la boya y del modelo híbrido se detectan algunas interrupciones en los datos que proporcionan las boyas. Posiblemente esta pérdida de información se debe a fallas técnicas propias de los instrumentos de medición; aunque en determinados casos, las fechas en que se presentó la suspensión de información coinciden con los días en los cuales alguna tormenta o huracán pasó cerca de la boya.

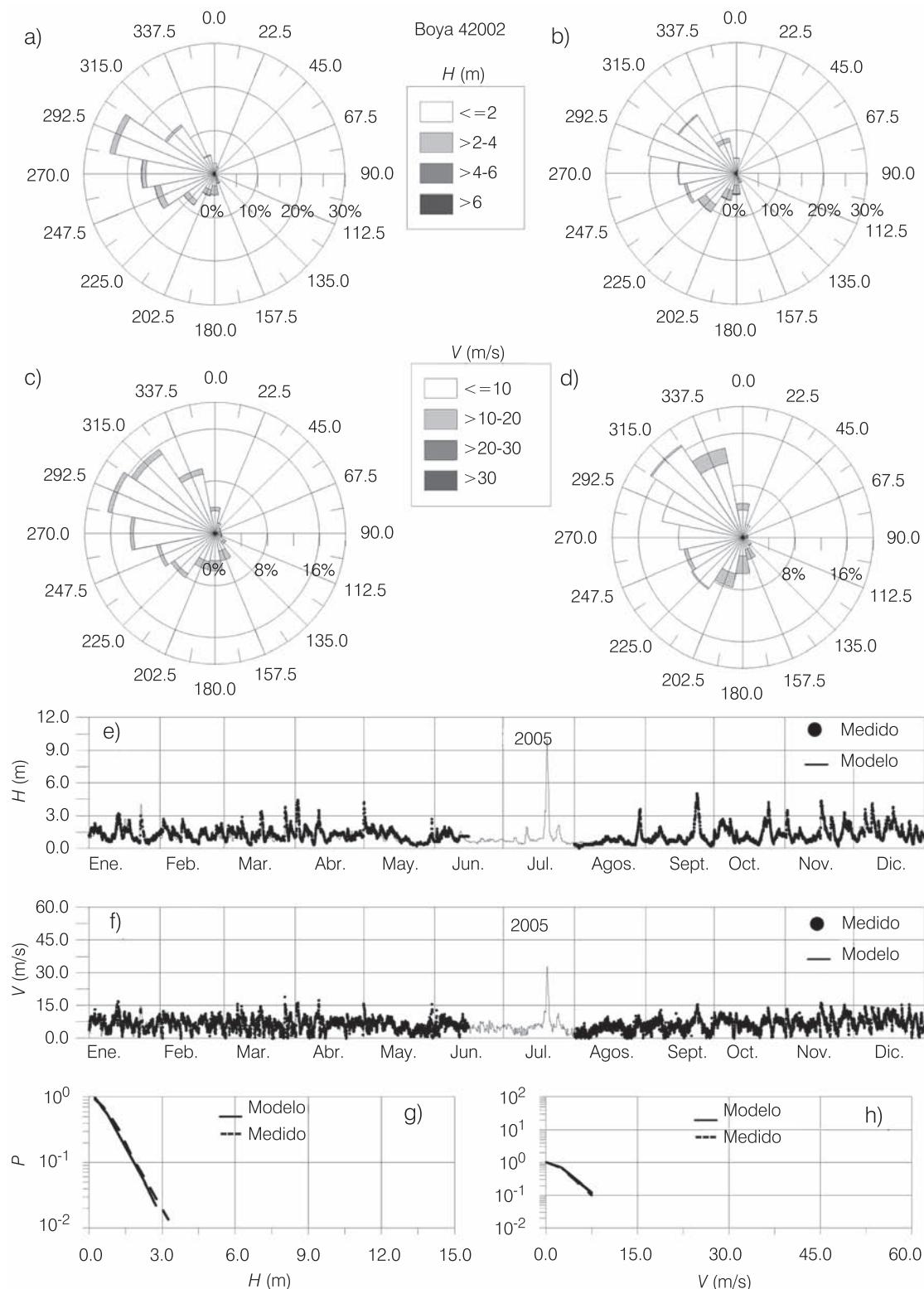
En resumen, parte de las diferencias entre los datos obtenidos a través del modelo numérico y los registrados por las boyas se deben principalmente a la calidad de los vientos utilizados para forzar el modelo WAM, la precisión de los modelos WAM y HURAC, así como la falta de información en los registros de las boyas.

Es importante resaltar que, como ha sido verificado por otros autores, entre ellos Pérez *et al.* (2008), los resultados obtenidos a través del modelo WAM son muy sensibles a la calidad y resolución tanto espacial como temporal de los vientos que se utilizan para forzar el modelo. A pesar de ello y en virtud de que para realizar un re-análisis de oleaje de más de 25 años son muy pocas las fuentes disponibles, y más aún las de libre acceso, confiables, el modelo híbrido resulta ser práctico y muy confiable.

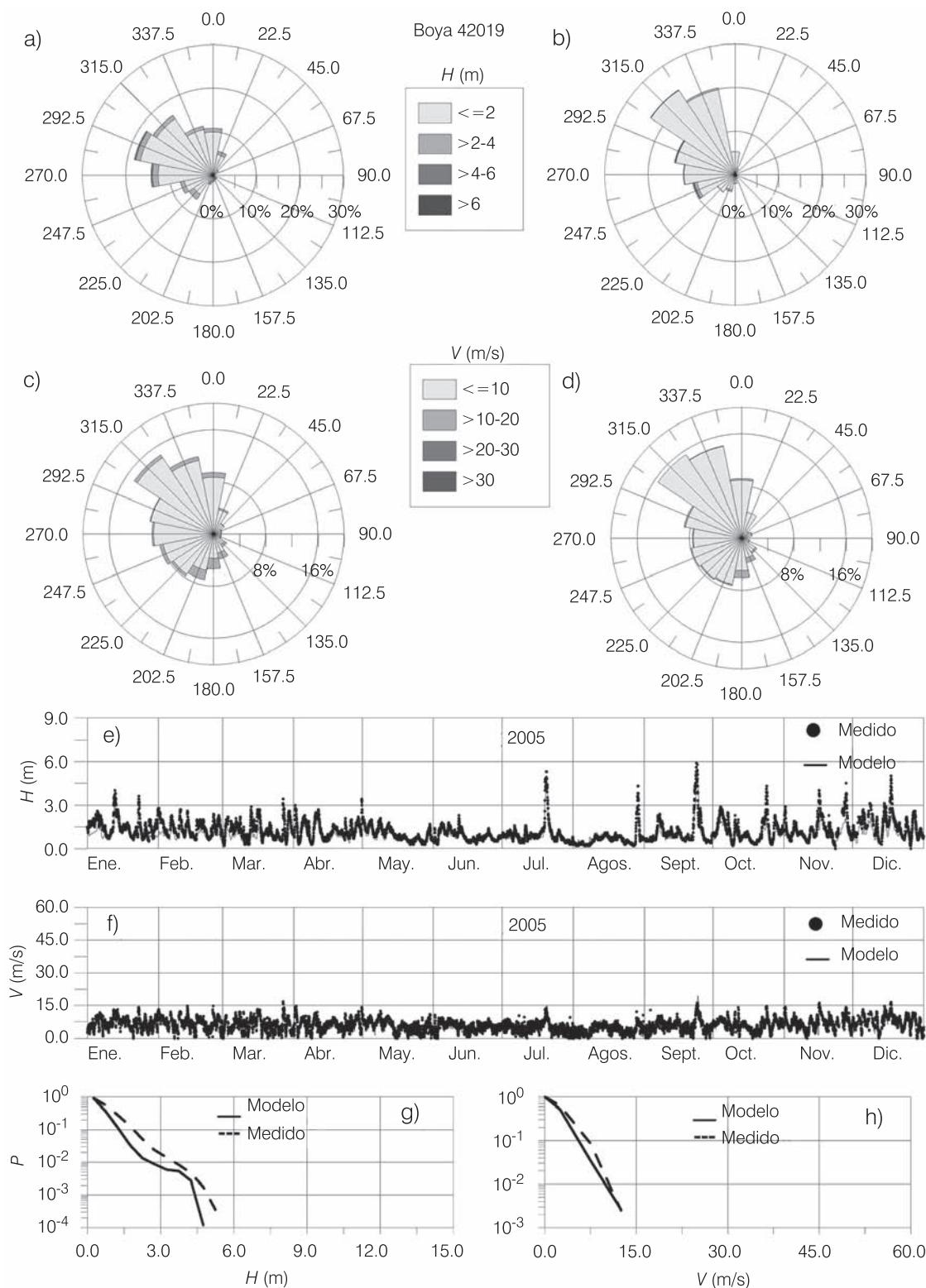
**Ilustración 7.** Para el año 2005, las rosas de oleaje: a) boyas 42001; b) modelo, las rosas de viento; c) boyas 42001; d) modelo; e) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; f) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de g) alturas de ola y h) vientos medidos y calculados.



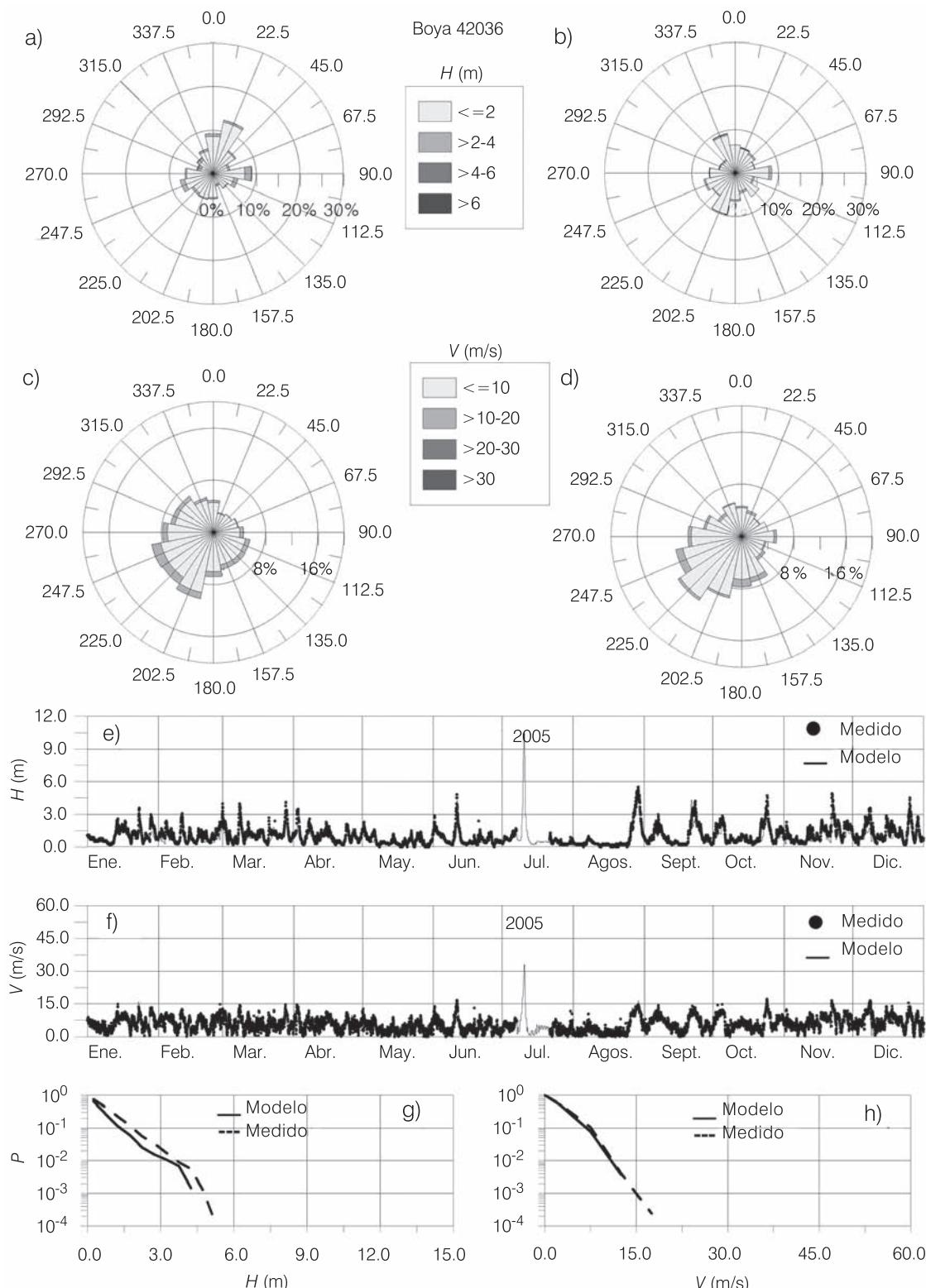
**Ilustración 8.** Para el año 2005, las rosas de oleaje: a) boyas 42002; b) modelo, las rosas de viento; c) boyas 42002; d) modelo; e) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; f) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de g) alturas de ola y h) vientos medidos y calculados.



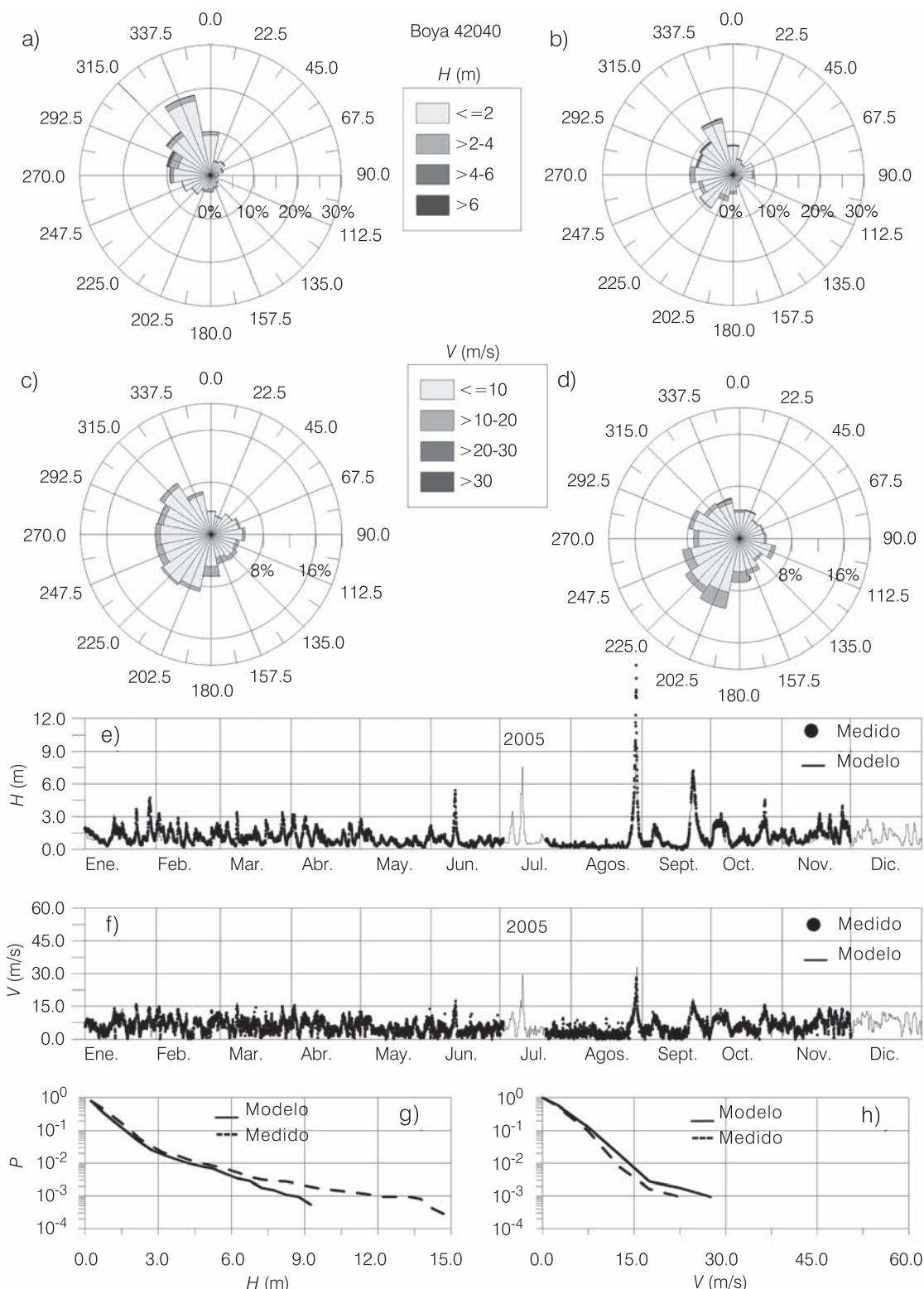
**Ilustración 9.** Para el año 2005, las rosas de oleaje: a) boyas 42019; b) modelo, las rosas de viento; c) boyas 42019; d) modelo; e) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; f) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de g) alturas de ola y h) vientos medidos y calculados.



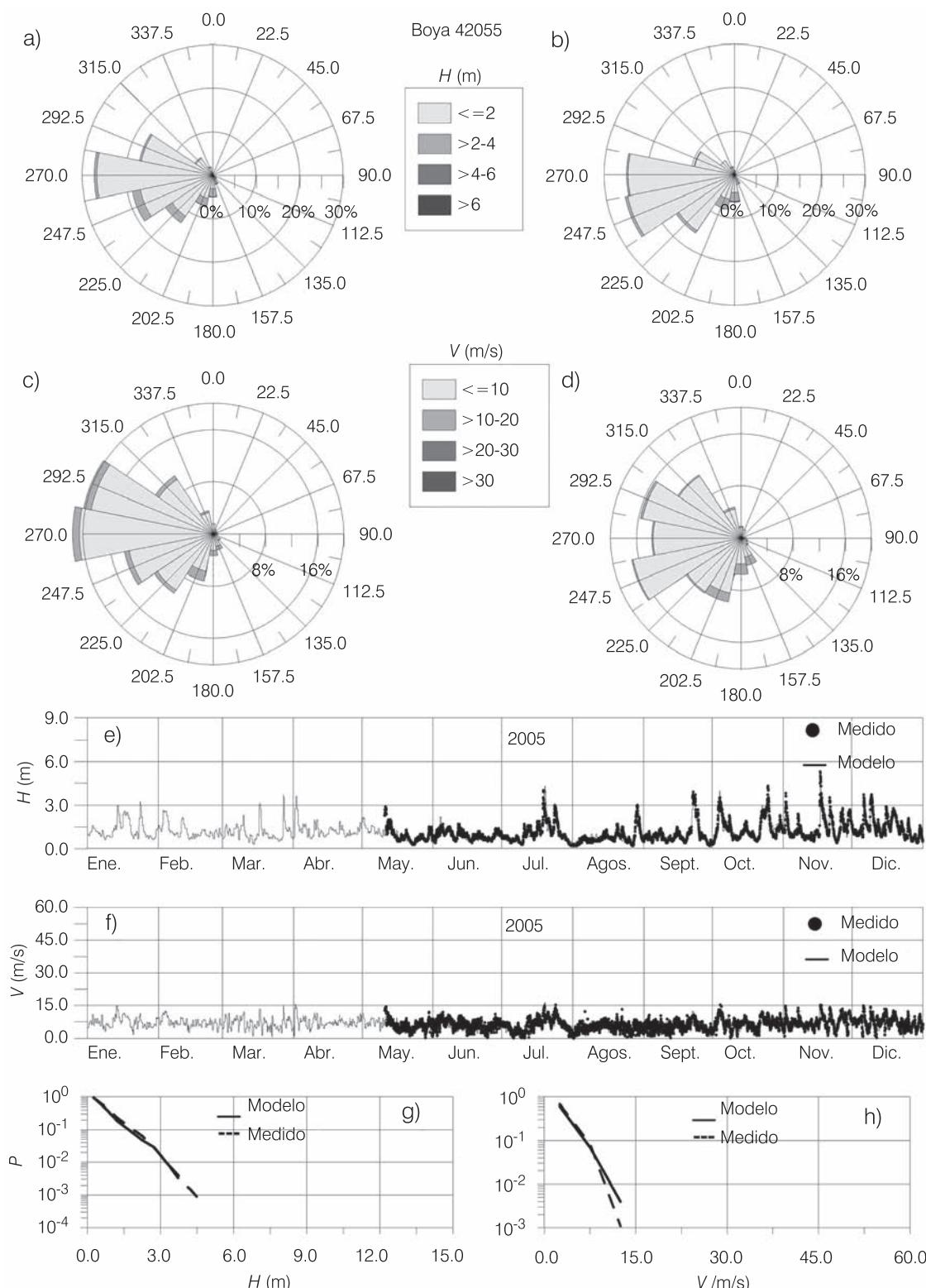
**Ilustración 10.** Para el año 2005, las rosas de oleaje: a) boyas 42036; b) modelo, las rosas de viento; c) boyas 42036; d) modelo; e) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; f) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de g) alturas de ola y h) vientos medidos y calculados.



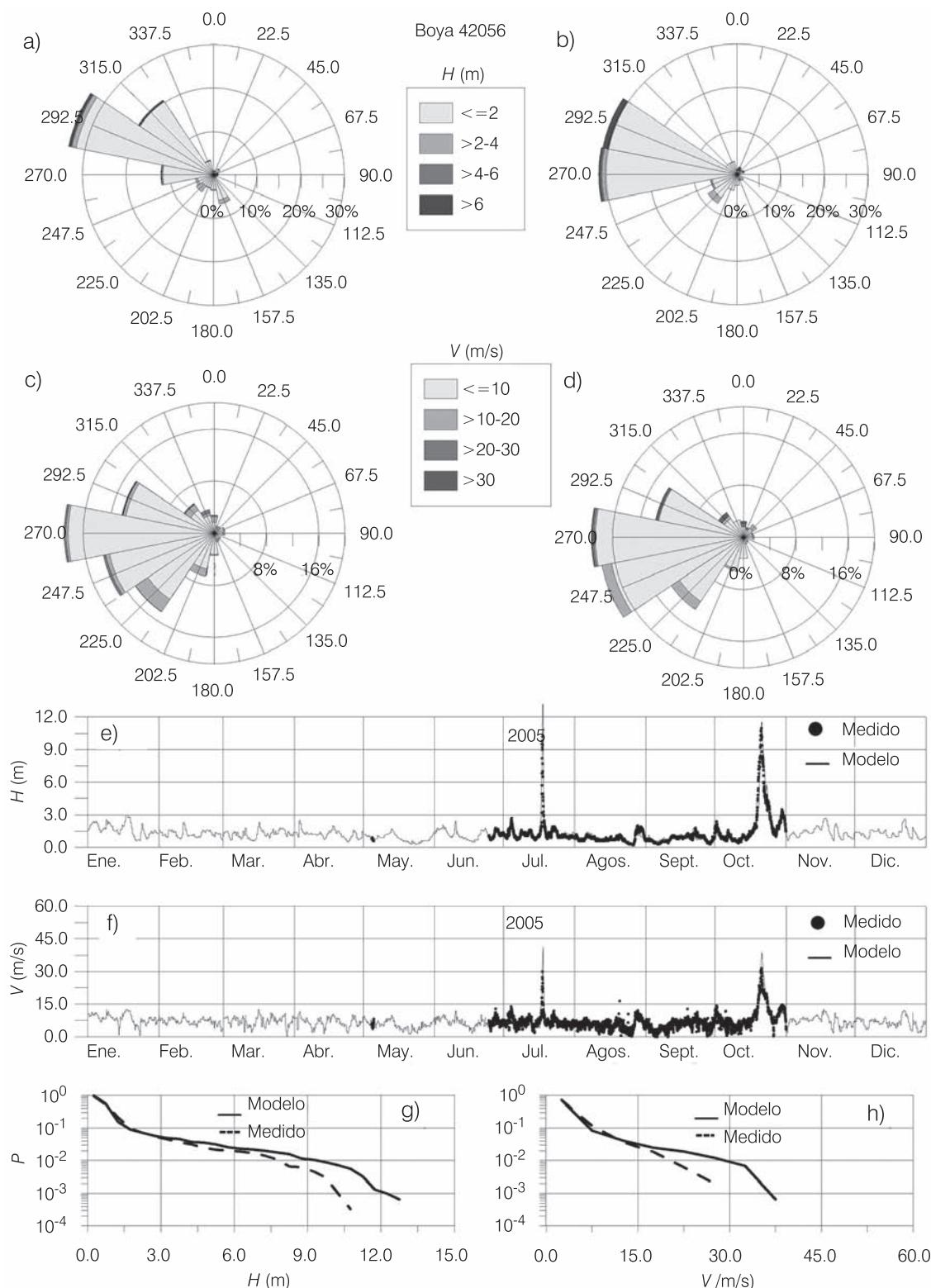
**Ilustración 11.** Para el año 2005, las rosas de oleaje: a) boyas 42040; b) modelo, las rosas de viento; c) boyas 42040; d) modelo; e) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; f) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de g) alturas de ola y h) vientos medidos y calculados.



**Ilustración 12.** Para el año 2005, las rosas de oleaje: a) boyas 42055; b) modelo, las rosas de viento; c) boyas 42055; d) modelo; e) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; f) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de g) alturas de ola y h) vientos medidos y calculados.



**Ilustración 13.** Para el año 2005, las rosas de oleaje: a) boyas 42056; b) modelo, las rosas de viento; c) boyas 42056; d) modelo; e) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; f) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de g) alturas de ola y h) vientos medidos y calculados.



## Conclusiones

La versión actualizada del modelo paramétrico *HURAC* ajusta adecuadamente los datos registrados en sitio. En esta nueva versión se mejoró la precisión y se simplificó la ejecución para evaluar los campos de viento y oleaje. Este avance permitió integrar el modelo híbrido de una forma simple.

Los datos obtenidos por el modelo híbrido —que son el resultado de las predicciones del modelo *WAM* y la inserción en los casos de ciclones tropicales de los resultados del *HURAC*— muestran una excelente semejanza con valores registrados por las boyas oceanográficas. De hecho, el coeficiente de determinación (evaluado como el cuadrado del coeficiente de correlación) entre los datos de oleaje obtenidos numéricamente y aquellos registrados por las boyas 42001, 42002, 42036, 42040, 42055 y 42056 fueron de 0.89, 0.88, 0.83, 0.84, 0.89, 0.88 y 0.94, respectivamente.

En virtud de la facilidad de implementación y de los resultados obtenidos a través de su validación, la nueva versión del modelo *HURAC* puede usarse como una herramienta para la predicción del viento y oleaje generado por ciclones tropicales en sistemas de pronóstico en tiempo real.

Con el modelo híbrido, utilizando las mismas fuentes de información, ahora es posible la construcción de atlas y bases de datos que permitan a los ingenieros en campo la obtención de información necesaria para la estimación del oleaje costero, la cual, al menos en México, es inexistente.

## Agradecimientos

Al Fondo Mixto Conacyt-Quintana Roo por el patrocinio brindado para la realización del proyecto "Evaluación de alternativas para la recuperación de playas en la zona norte de Quintana Roo" bajo el contrato QROO-2005-C01-16924. Los autores hacen un reconocimiento especial al doctor Juan Carlos Carretero de Puertos del Estado de España por su ayuda en la implementación del modelo *WAM*. Igualmente se agradece el apoyo proporcionado por la Coordinación de Sistemas de Cómputo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial al ingeniero Fernando Maldonado Salgado, responsable del área de servidores UNIX, por el apoyo técnico en el uso del clúster del mismo Instituto.

Recibido: 25/09/2007  
Aprobado: 15/08/2008

## Referencias

- BRETSCHNEIDER, C.L. Tropical cyclones. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Vol. 1. Houston: Gulf Publishing Co., 1990, pp. 249-370.
- COX, A.T., CARDONE, V.J. and SWAIL, V.R. *On the use of in-situ and satellite wave measurements for evaluation of wave hindcasts*. CLIMAR 1999 Preprints. Sept. 8-15, Vancouver, Canada, 1999.
- HASSELMANN, K. Grundgleichungender Seegangsvoraussage. *Shiffstechnik*. Vol. 7, 1960, pp. 191-195.
- HOLLAND, G.L. An analitical model of wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review*. Vol. 108, 1980, pp. 1212-1218.
- JANSSEN, P.A.E.M. Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 19, 1989, pp. 745-754.
- KALNAY, M., KANAMITSU, R., KISTLER, W., COLLINS, D., DEAVEN, L., GANDIN, M., IREDELL, S., SAHA, G., WHITE, J., WOOLLEN, Y., ZHU, A., LEETMAA, B., REYNOLDS, M., CHELLIAH, W., EBISUZAKI, W., HIGGINS, J., JANOWIAK, K.C., MO, C., ROPELEWSKI, J., WANG, ROY J. and DENNIS, J. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 77, 1996, pp. 437-471.
- KOMAR, P.D. *Beach processes and sedimentation*. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998, 547 pp.
- PÉREZ, D.M. *Verificación de un modelo de tercera generación para estimar oleaje en la vertiente atlántica mexicana*. Tesis de maestría en Ingeniería. México, D.F.: UNAM, 2005, 79 pp.
- PÉREZ, D.M., BOLAÑOS, R. y SILVA, R. Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 2, abril-junio de 2008, pp. 5-20.
- SÁNCHEZ, C., SILVA, R., GOVAERE, G., and CONTRERAS, A. Comparison of 4 wave prediction models. *5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*. Melbourne, 1998, pp. 134-145.
- SILVA, R., DÍAZ, G., CONTRERAS, A., BAUTISTA, G. and SÁNCHEZ, C. Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast. *6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*. Melbourne, 2000, pp. 137-151.
- SILVA, R., GOVAERE, G., SALLES, P., BAUTISTA, G. and DÍAZ, G. Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast. *Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering*. World Scientific. Singapore, 2002.

- SILVA, R., MENDOZA, E., ESCALANTE, E., MARIÑO, I. y RUIZ, F. Oleaje inducido por el huracán *Wilma* en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Ingierería hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 2, abril-junio de 2009, pp. 93-109.
- SNYDER, R.L., DOBSON, F.W., ELLIOT, J.A.S. and LONG, R.L. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 102, 1981, pp. 1-59.
- SWAIL, V.R., COX, A.T. and CARDONE, V.J. Trends and potential biases in NCEP-driven ocean wave hindcasts. *2nd Conf. on Reanalysis*. Redding, 1999.
- WAMDI GROUP. The WAM model – A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 18, 1988, pp. 1775-1810.
- WOODROFFE, C.D. *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, 623 pp.

### Abstract

RUIZ-MARTÍNEZ, G., SILVA-CASARÍN, R., PÉREZ-ROMERO, D.M., POSADA-VANEGAS, G. & BAUTISTA-GODÍNEZ, E.G. *Hybrid model for ocean wave characterization.* Hydraulic engineering en Mexico (in Spanish). Vol. XXIV, no. 3, July-September, 2009, pp. 5-22.

The special characteristics or the hypothesis accepted in the governing analytical expressions of numerical models, or inadequate input data may cause these models to be inaccurate when estimating physical phenomena. One means of overcoming these limits is the integration of combined or hybrid models. The hybrid tool presented here is composed of a third-generation model (WAM) which estimates the deep water wave field as a function of wind data and another model (HURAC), which uses cyclonic data to compute the wave, wind, and atmospheric pressure fields. This second model is presented here as an updated version in which the accuracy has been enhanced (as shown by the validation described in this paper) and the execution has been optimized. The results of the hybrid model are compared to the data measured by 7 oceanographic buoys which registered the effects of 13 hurricanes in the Gulf of Mexico and the Mexican Caribbean over the 2005 season. The good correlation between both sets of data makes the hybrid tool a reliable information source for gathering information on the marine climate in deep water for both mean and extraordinary conditions.

**Keywords:** WAM, HURAC, Hurricane Wilma, Tropical Cyclone Wave Modeling, Hurricane Model, Parametric Numerical Model.

### Dirección institucional de los autores:

Gabriel Ruiz-Martínez

Estudiante de doctorado  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Ingeniería  
Coordinación de Hidráulica  
Edificio 5, 4º piso, cubículo 406  
Círculo Escolar, Ciudad Universitaria  
04510 México, D.F.  
teléfono: + (52) (55) 5623 3600, extensión 8633  
GRuizM@ii.unam.mx

Rodolfo Silva-Casarín

Investigador Titular  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Ingeniería  
Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos  
Edificio 5, 4º piso, cubículo 414b  
Círculo Escolar, Ciudad Universitaria  
04510 México, D.F.  
teléfono: + (52) (55) 5623 3668  
fax: + (52) (55) 5623 3600, extensión 8057  
rsilvac@ii.unam.mx

Gregorio Posada-Vanegas

Investigador  
Universidad Autónoma de Campeche  
Centro Epomex

Av. Universidad s/n entre Juan de la Barrera y Calle 20  
Colonia Buenavista  
24039 San Francisco de Campeche, Campeche, México  
teléfono: + (52) (981) 811 9800, extensión 62305  
gposadav@hotmail.com

Dulce María Pérez-Romero

Estudiante de posdoctorado  
Universidad de Granada  
Centro Andaluz de Medio Ambiente  
Avenida del Mediterráneo s/n  
18006 Granada, España  
dpromero@hotmail.com

Eric Gustavo Bautista-Godínez

Investigador  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Instituto Politécnico Nacional  
Ezime-Azcapotzalco  
Avenida de las Granjas 682  
Colonia Santa Catarina Azcapotzalco  
México, D.F.  
teléfono: + (52) (55) 5729 6000, extensión 64482  
erbautista@ipn.mx