

Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México

Dulce María Pérez Romero¹
Rodolfo Bolaños^{2,3}
Rodolfo Silva Casarín¹

¹Instituto de Ingeniería, UNAM

²Laboratorio de Ingeniería Marítima
Universidad Politécnica de Cataluña. D1 Campus Nord.
Jordi Girona 1-3, 08034.
Barcelona, Spain

³Proudman Oceanographic Laboratory.
Joseph Proudman Building
6 Brownlow Street.
Liverpool L3 5DA
UK.

Resumen. En este trabajo se evalúa el comportamiento del modelo *WAM* en la predicción de oleaje generado por huracanes utilizando los campos de viento del programa de reanálisis del NCEP/NCAR en el Golfo de México. Se modela el oleaje generado por dos huracanes ocurridos en la historia reciente de México, Gilberto (1988) e Isidore (2002) y se analizan los espectros de oleaje en cuatro puntos seleccionados frente a los puertos más importante de esta zona. Los resultados de altura de ola significativa y periodo medio se comparan con las mediciones de tres boyas oceanográficas situadas en la parte Norte del Golfo de México. La concordancia entre la modelación y las mediciones es satisfactoria.

Palabras clave: *WAM*, *NCEP/NCAR*, predicción, huracanes.

Abstract. In this paper the behavior of the *WAM* model in the prediction of waves induced by hurricanes using wind fields of the NCEP/NCAR reanalysis program is evaluated. This is done by simulating the wave fields generated in the Gulf of Mexico by two recent hurricanes, Gilbert (1988) and Isidore (2002). The wave spectra at four points in front of the most important ports of

the area are also analyzed. The results of significant wave heights and periods are compared with the field measurements from three oceanographic buoys located in the northern part of the Gulf of Mexico. The agreement between the model results and the measurements is satisfactory.

Keywords: WAM, NCEP/NCAR, prediction, hurricanes.

Introducción

El uso y la explotación racional, rentable y sustentable de los recursos marítimos de un país requiere, entre otras cosas, de la adecuada caracterización del clima marítimo. El conocimiento del viento, el oleaje, la marea y las corrientes que se presentan en una zona es fundamental para el desarrollo de actividades como: diseño, construcción y mantenimiento de infraestructura marítima y portuaria, operatividad en puertos y marinas, determinación de rutas de navegación, planeación de actividades costa fuera, protección civil, entre otras. Esta caracterización, para que sea adecuada requiere de dos actividades fundamentales, la medición en campo de variables meteorológicas y oceanográficas y el desarrollo de modelos numéricos que, adecuadamente validados, permitan hacer predicciones útiles para las actividades antes citadas.

En Ingeniería Marítima, la modelación del oleaje ha sido una de las principales líneas de investigación, gran parte de los esfuerzos se han orientado al desarrollo de modelos numéricos que permitan reproducir la generación del oleaje por la acción del viento y su propagación hacia la costa. En las últimas décadas, el acelerado progreso de los sistemas de cómputo ha permitido el desarrollo de modelos de oleaje muy robustos, tal es el caso del *WAM (WAve Model)*, modelo que simula la generación de oleaje por la acción de viento ampliamente aceptado y utilizado a nivel mundial.

En México la caracterización climática del litoral es deficiente, esto a pesar de que es ahí donde se realizan algunas de las actividades económicas más importantes. Además, se estima que anualmente se presentan alrededor de 23 huracanes en las costas del litoral mexicano (Silva et al, 2000) y estos fenómenos hidrometeorológicos merecen especial atención ya que por sus vientos intensos, oleaje de gran magnitud, precipitaciones y marea de tormenta, pueden llevar al límite la resistencia de la infraestructura y constituyen un riesgo para la población y las actividades económicas, como se ha puesto de manifiesto recientemente con el paso del huracán Wilma en 2005.

La instrumentación disponible en las costas es aún escasa, existe una red de mareógrafos importante operados por instituciones como la Secretaría de Marina Armada de México, el Instituto de Geofísica de la UNAM (*Universidad Nacional Autónoma de México*) y el CICESE (*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*). Éste último ha implementado además otros instrumentos de medición de variables oceanográficas en las costas del Pacífico Mexicano, sin embargo es necesario implementar otros instrumentos, como boyas oceanográficas que permitan monitorear más variables; aunque ya se cuenta con dos en el Golfo de México, no son suficientes.

En lo que respecta a la predicción de oleaje el panorama tampoco es alentador, la mayoría de las predicciones hechas o al menos las que se hacen públicas, consisten en gran medida en extrapolaciones de estudios hechos en Estados Unidos. Recientemente algunas instituciones mexicanas han iniciado la implementación de modelos numéricos de predicción de oleaje, y con ello la búsqueda de datos de entrada adecuados. Debe recordarse que la bondad de los resultados de cualquier modelo es, en buena medida, función de los datos de entrada, y para el caso de los modelos de generación de oleaje, los resultados dependen directamente de la calidad de los campos de viento con los que se fuerce el modelo (Komen et al, 1994).

Para la predicción de campos de viento el *Servicio Meteorológico Nacional (SMN)* cuenta con el modelo *MM5*, desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania y el *NCAR (Nacional Center for Atmospheric Research)*. Es un modelo muy robusto, y ha sido validado por el *SMN* con muy buenos resultados, desgraciadamente no cuentan con registros históricos para ser utilizados en estudios como el que aquí se presenta.

Hasta ahora la base de datos de campos de viento más completa a la que se tiene acceso libre a través de la página de Internet www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis es la del programa de reanálisis del *NCEP/NCAR (Nacional Centers for Environmental Prediction / Nacional Center for Atmospheric Research)*. El objetivo de este proyecto es hacer un reanálisis de campos de viento utilizando datos históricos de diversos tipos, como mediciones en tierra, boyas, barcos, satélites entre otros, para generar una base de datos con información meteorológica de todo el mundo, desde 1948 hasta la fecha (Kalnay et al, 1996). La principal desventaja de estos campos de viento es su baja resolución tanto espacial como temporal (datos cada 6 horas, espaciados 2 grados en latitud y longitud). Estudios como el de Cox, Cardone y Swail (1999) y Swail y Cox (1999), que utilizan estos vientos para hacer un estudio de oleaje en el Atlántico Norte, han mostrado que son muy útiles para la predicción del oleaje, sin embargo suelen presentar algunas subestimaciones para los picos de las tormentas.

Utilizando los campos de viento del *NCEP/NCAR* y el modelo *WAM* la división de Ingeniería de Puertos y Costas del Instituto Mexicano del Transporte inició, en el año 2004, la realización de “El Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano”, con la finalidad de definir las condiciones del oleaje medio y extremal que se presenta en los litorales nacionales. Han realizado un análisis de los principales parámetros estadísticos del oleaje desde el 1 de enero de 1958 al 31 de diciembre de 2001 y cuentan con un plan para el desarrollo de una red de información de oleaje a nivel

nacional que incluirá predicciones de oleaje y mediciones en aguas costeras mexicanas. El plan contempla 8 estaciones dentro del Golfo de México: Mezquital, Altamira, Tampico, Veracruz, Coatzacoalcos, Dos bocas, Campeche y Progreso (Montoya y Duarte, 2005).

Ante el panorama anteriormente descrito y dado que las condiciones de oleaje extremal en nuestro país están limitadas principalmente por la ocurrencia de huracanes (Rosengaus, 1990; Rosengaus, 2001), el objetivo de este trabajo es verificar el comportamiento del modelo *WAM* en la generación de oleaje por huracanes utilizando campos de viento del programa de reanálisis del *NCEP/NCAR*. Se recurre a esta base de datos ya que es a la que se tiene acceso libre y actualmente está siendo utilizada por otras instituciones de nuestro país. Se modela el oleaje generado por dos huracanes, Gilberto (1988) e Isidore (2002) y se analiza si los resultados que se obtienen son adecuados para considerar, al modelo y a los datos de entrada en conjunto, una posible herramienta para la predicción de oleaje ante este tipo de fenómenos meteorológicos. Finalmente se realizara una evaluación sobre las consideraciones y características de los dos huracanes en las costas mexicanas.

El Modelo de generación de oleaje WAM

A mediados de los ochentas surgen los modelos denominados de tercera generación, el grupo *WAMDI (Wave Model Development and Implementation Group)* desarrolló el primero en su tipo: *WAM (WAve Model)*. El *WAM* integra la ecuación de balance de energía sin restricción alguna en la evolución del espectro. En aguas profundas es capaz de representar la generación, propagación, disipación por rotura e interacciones no lineales entre olas. En aguas someras puede modelar procesos de transformación como la refracción y disipación de la energía por la interacción con el fondo (Komen et al 1994, *WAMDI GROUP*, 1988). La ecuación de balance de energía es la siguiente:

$$\frac{dF}{dt} + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\dot{\phi} F \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\dot{\lambda} F \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\dot{\theta} F \right) = S \quad [1]$$

donde $F(f, \theta, \phi, \lambda)$ es la función de densidad espectral, f representa la frecuencia, θ dirección de propagación del oleaje, ϕ la latitud, λ la longitud, t el tiempo y el término S engloba los términos fuente/sumidero de energía, a través del cual se representan las tres principales funciones de generación y disipación del oleaje que son: el aporte de la energía del viento S_{in} , las interacciones no lineales entre componentes S_{nl} , la disipación de la energía S_{ds} .

El aporte de la energía del viento se modela utilizando la formulación propuesta por Janssen (1989) donde el suministro de energía del viento se traduce en un crecimiento de las componentes del espectro de oleaje. Dicho crecimiento es lineal en las bajas frecuencias y exponencial en las altas. De esta forma, el término de energía por viento se define por:

$$S_{in} = \beta F \quad [2]$$

donde F es la función de densidad espectral y β es la función relacionada con el crecimiento exponencial. El WAM utiliza la función β propuesta por Snyder *et al.* (1981), que escala la velocidad mediante la velocidad de fricción u_* . Así, β se define por,

$$\beta = \max \left\{ 0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{u_*}{c} \cos \theta - 1 \right) \right\} \omega \quad [3]$$

donde $\omega = 2\pi f$ representa la frecuencia angular (del viento o del oleaje), ρ_a la densidad del aire, ρ_w la densidad del agua y F es la función de densidad espectral.

El esfuerzo que el viento genera sobre las olas, τ , depende del estado del oleaje, para calcularlo Janssen (1991) propuso la expresión:

$$\tau = \left(\kappa U(z) / \ln \left(\frac{z}{z_{ob} + z_o} \right) \right)^2 \quad [4]$$

donde z es la elevación sobre el nivel medio del mar en la que se tiene la medición de velocidad del viento, generalmente 10 m, $U(z)$ la velocidad del viento a dicha elevación, z_{ob} la rugosidad por ondas capilares y z_o la rugosidad por pequeñas ondas de gravedad:

Las interacciones no lineales entre olas se modelan siguiendo la teoría de Hasselman (1960). Su teoría permite estimar la transferencia de energía entre los diferentes componentes y direcciones, como la determinación de las interacciones entre todas las componentes del espectro es poco práctica, ya que consume mucho tiempo de cómputo, para optimizar este cálculo el WAM incorpora una parametrización discreta de la interacción dividida en cuatro componentes (*cuadruplets*) de la forma

$$S_{nl}^{di}(k_4) = \sum_{\gamma=1,2} A_{\gamma} \omega_4 \left[n_1^{\gamma} n_2^{\gamma} (n_3^{\gamma} + n_4^{\gamma}) - n_3^{\gamma} n_4^{\gamma} (n_1^{\gamma} + n_2^{\gamma}) \right] \quad [5]$$

donde

$$n_i^{\gamma} = \frac{F(k_i^{\gamma})}{\omega_i^{\gamma}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad \gamma = 1, 2 \quad \text{y } A_{\gamma} \text{ es el coeficiente de acoplamiento.}$$

La energía del oleaje no puede crecer indefinidamente, en la realidad cuando las olas alcanzan un grado de saturación disipan su energía por rotura, aún en aguas profundas. Este mecanismo de disipación de energía es complejo y se conoce muy poco de él, es por eso que el término que incorpora el WAM para representarlo es más un mecanismo de ajuste que la representación del fenómeno. Dicho término, S_{ds} , surge de una modificación del modelo de Komen *et. al* (1984) para la disipación por rotura,

$$S_{ds} = -2.33 \times 10^{-5} \hat{\omega} (\omega / \hat{\omega})^2 (\hat{\alpha} / \hat{\alpha}_{PM})^2 F \quad [6]$$

donde $\hat{\omega} = E^{-1} \iint F(f, \theta) \omega df d\theta$ es la frecuencia media, $E = \iint F(f, \theta) df d\theta$ representa la energía total, $\hat{\alpha} = E \hat{\omega}^4 g^{-2}$ es el parámetro del peraltamiento de la ola y $\hat{\alpha}_{PM} = 4.57 \times 10^{-3}$ representa el parámetro para el espectro Pierson-Moskowitz.

Para que la ecuación de transferencia de energía [1] sea válida y aplicable también en aguas someras, es necesario que la función S fuente/sumidero incluya un término de disipación por la interacción con el fondo. También es necesario incluir en los demás términos la ecuación de la dispersión dada por,

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kD)} \quad [7]$$

donde D representa la profundidad, ω la frecuencia y k es el número de onda.

El término de disipación por fricción de fondo corresponde al desarrollado por Hasselmann (1973) en el estudio JONSWAP

$$S_{bf} = -\frac{\Gamma}{g^2} \frac{\omega^2}{\sinh^2 kD} F \quad [8]$$

donde el valor del parámetro es de $\Gamma = 0.038 \text{ m}^2/\text{s}^3$ y F es la función de densidad espectral.

La formulación para determinar la disipación de energía se pone ahora en términos del número de onda y no de la frecuencia

$$S_{ds} = -(2.36 \times 10^{-5}) \bar{\omega} \left(\frac{k}{\hat{k}} \right) \left(\frac{\bar{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 F \quad [9]$$

donde el número de onda medio es ahora $\hat{k} = \left(E^{-1} \int F(k) k^{-1/2} dk \right)^{-2}$ y $\bar{\alpha} = E \hat{k}^2$.

El término de disipación de energía es modificado para que incluya el número de onda además de la frecuencia, y se agrega un término de refracción por influencia del fondo, θ_D ,

$$\theta_D = \frac{1}{kR} \frac{\partial \omega}{\partial D} \left(\sin \theta \frac{\partial D}{\partial \phi} - \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right) \quad [10]$$

donde R es un factor de escala.

Implementación numérica

Se utilizó la versión *WAM cycle 4* proporcionada por *Puertos del Estado*, dependencia gubernamental encargada de la planeación y operación de la infraestructura portuaria española (Carretero y Gomez, 2000). El modelo se implementó en la zona de estudio que se muestra en la Ilustración 1, se incluye además del Golfo de México y mar Caribe, parte del océano Atlántico. Las condiciones generales para la puesta en marcha del modelo fueron las siguientes: un mallado uniforme con una resolución de 0.25° en latitud y longitud, paso de tiempo para la propagación de 10 minutos para cumplir con la estabilidad del modelo bajo el criterio de *Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)* y espectro discretizado en 30 frecuencias, con un valor mínimo de $f = 0.0417 \text{ Hz}$ y 24 direcciones. Para analizar la evolución temporal de los espectros direccionales se eligieron cuatro puntos, situados en profundidades de más de 50 m, frente a los puertos más importantes del Golfo de México: 1) Altamira, 2) Veracruz, 3) Progreso y 4) Morelos.

Los datos de entrada al modelo son la batimetría y los campos de viento, se utilizó una batimetría con dos minutos de resolución obtenida de la base de datos del *National Geophysical Data Center* (www.ngdc.noaa.gov) y los campos de viento del programa de reanálisis *NCEP/NCAR*. Debido a la baja resolución de los campos de viento la información debió ser interpolada tanto en el tiempo como en el espacio y antes de elegir los huracanes a modelar fue necesario verificar que se reprodujeran de manera aceptable las tormentas.

Validación de datos de viento y resultados del modelo WAM

Tanto los campos de viento como los de oleaje se compararon con los registros de las boyas oceanográficas que el *Data Bouy Center* de la NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*) tiene en el Norte del Golfo de México. La Ilustración 1 muestra la posición de las boyas elegidas para las validaciones. Las variables que se utilizaron fueron: la velocidad de viento a 10 m sobre la superficie, reportada a cada hora, y calculada como el promedio de las mediciones del anemómetro en un periodo de 8 minutos, la altura de ola significativa (H_s) y el periodo medio (T_z), reportados también a cada hora, pero obtenidos a partir del análisis espectral de 20 minutos de registro de los desplazamientos de la superficie libre.

Los campos de viento del NCEP/NCAR se modificaron en el procedimiento del reanálisis por datos medidos entre los que se encuentran los de las boyas oceanográficas, por lo que puede parecer redundante compararlos con las mediciones de las boyas propuestas. Sin embargo no existe otra fuente de medidas continuas de viento sobre el mar por lo que se utilizan estas para tener una validación preliminar de los vientos.

Huracán Gilberto (1988)

Gilberto ha sido uno de los huracanes más destructivos que han azotado las costas de nuestro país (Rosengaus, 1990). Impactó tierra en Puerto Morelos, Qroo el 13 de septiembre de 1988 con una velocidad de viento máxima reportada por el SMN de 287 km/hr. Esto lo hace más intenso aún que los huracanes Wilma (230 km/hr) y Emily (215 km/hr) del año 2005. Los estados más afectados fueron Quintana Roo, Yucatán, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila. Además de las pérdidas humanas y la destrucción de infraestructura, este huracán ocasionó la erosión de más del 60% de las playas que se localizan entre punta Cancún y Punta Nizuc. Desde entonces hasta la

fecha, la erosión es continua y la llegada de otros huracanes como Wilma (2005) agrava enormemente la situación. La trayectoria del huracán Gilberto se muestran en la Ilustración 1.

Validación

Para el huracán Gilberto, las boyas 42002 y 42003 (la boya 42001 no reportó datos de viento para ese periodo) se muestra en la Ilustración 2a. En ambos casos la tendencia es de sobreestimación, en la boya 42002 los vientos del *NCEP/NCAR* simulan bien el paso de la tormenta pero existen dos puntos que están por debajo de los valores alcanzados durante el pico.

La comparación entre los resultados del *WAM* y los registros de las boyas se muestran en la Ilustración 2b, para la altura de ola significativa y la Ilustración 2c para el periodo medio. El modelo acierta satisfactoriamente en la tendencia de evolución de la altura de ola, aunque en algunos casos subestima magnitudes. En la boya 42001, la tendencia es bien representada, no así las magnitudes del 7 al 11 de septiembre. En cuanto a la comparación con la boya de 42002 el pico de la tormenta se subestima en un 40% aproximadamente, lo cual se atribuye a la subestimación de los vientos durante el pico de la tormenta. Con la boya 42003 el resultado es similar, la posición de los picos es exitosamente reproducida, sin embargo la magnitud de estos es subestimada. En lo que respecta el periodo medio, las tendencias se reproducen satisfactoriamente pero existe una diferencia en los picos de las tormentas hasta de 3 segundos. En la Tabla 1 se muestran los parámetros estadísticos de las comparaciones de las tres variables analizadas.

Distribuciones espaciales

Con la finalidad de tener un panorama general de la afectación del huracán en toda la zona del Golfo de México y mar Caribe se presenta las distribuciones espaciales de los campos de viento y

la altura de ola significativa para los días 14, 15 y 16 de septiembre. La Ilustración 3a muestra los campos de viento, la intensidad se representa con la escala de color y su dirección con ayuda de vectores cuya longitud está escalada respecto a la intensidad. La Ilustración 3b muestra las distribuciones espaciales de altura de ola significativa, los vectores indican la dirección del oleaje. Los días 14 y 15 de septiembre se presentan las mayores velocidades de viento en la península de Yucatán, generando oleaje de más de 5m de altura de ola significativa. A medida que el huracán cruza la península con rumbo *NW* el oleaje en las costas de Tabasco y Veracruz se incrementa, pero no de manera considerable. Esto se debe probablemente a que el *fetch* es limitado y el oleaje no se alcanza a desarrollar. Cabe aclarar que los mapas que se presentan, tanto de viento como altura de ola significativa, no corresponden necesariamente a las condiciones más intensas, además el pico de la tormenta pudo haberse suavizado por la resolución temporal utilizada. Young (2006) señala que el oleaje generado por un huracán tendrá una velocidad de grupo aproximadamente igual a la velocidad del desplazamiento de la tormenta, esto permite que el oleaje, que permanecerá dentro de la zona de vientos máximos, alcance su máxima magnitud. Si la velocidad del huracán disminuye el oleaje se propagará dejando a la tormenta detrás, si el huracán aumenta su velocidad, el oleaje quedará rezagado de la tormenta. En este caso se observa un desfase entre el viento y el oleaje, esto verifica que el huracán se desplazó a una velocidad mayor que la de propagación del oleaje.

Series de tiempo en la costa mexicana

Las series de tiempo de altura de ola significativa y dirección y de velocidad de viento y dirección para los cuatro puntos elegidos se presentan en la Ilustración 8 (izquierda). Los picos de altura de ola significativa están desfasados entre sí siguiendo la trayectoria del huracán. En los gráficos de dirección se aprecia que el viento varía en todas direcciones sin embargo el oleaje se desarrolla y

sigue la direcciones de viento más constantes con una diferencia en algunos casos hasta de 90°. El punto 4 muestra dos picos de altura significante con distintas direcciones, el primer pico se debe al viento principalmente del Este, antes de que el huracán tocara tierra, y el segundo debido al viento del Sur al pasar el huracán por la península de Yucatán.

Espectros de oleaje

En el caso de huracanes generalmente los espectros están dominados por el *swell* generado por los vientos máximos en algún punto de la trayectoria de la tormenta mezclados con el oleaje local generado por los vientos en ese punto, esto genera espectros que abarcan varias direcciones pero que en general son unimodales (Young, 2006). En el caso del huracán Gilberto los espectros modelados en los cuatro puntos seleccionados se mostraron en general unimodales, en frecuencia y dirección. Sin embargo se presentaron anchos en dirección. Excepcionalmente en los puntos 1 y 2 se presentaron espectros bimodales para fechas después del 16 de septiembre, cuando el huracán estaba más cerca de esa zona, posiblemente debido a la influencia orográfica sobre el patrón de vientos. La Ilustración 3 muestra los espectros direccionales correspondientes a las mismas fechas de los mapas espaciales. El 14 de septiembre cuando el huracán se acercaba a la península de Yucatán, el espectro del punto 4 (Puerto Morelos) muestra una concentración de energía en dirección *SE* siguiendo la dirección de los vientos. A medida que el huracán cruza la península y se aleja del puerto, los vientos cambian en intensidad y dirección y lo mismo sucede con la concentración de energía. Este punto fue de los más afectados ya que, aunque no es el que presenta mayor altura si es el que presenta mayor duración.

Huracán Isidore (2002)

Según la reseña del Servicio Meteorológico Nacional el huracán *Isidore* impactó territorio mexicano el 22 de septiembre de 2002 aproximadamente a 45 km al Este de Puerto Progreso, Yucatán, con vientos máximos sostenidos de 205 km/hr. Se situó en la península hasta el día 24 de septiembre cuando, ya degradado a tormenta tropical, retornó al mar siguiendo una trayectoria hacia las costas de Louisiana y Mississippi en los Estados Unidos. Los estados más afectados fueron Quintana Roo, Yucatán y Campeche, causando grandes daños materiales principalmente por inundaciones. La trayectoria del huracán se muestra en la Ilustración 1.

Validación

En la Ilustración 5a se muestra la comparación de las boyas 42001, 42002 y 42003 con los datos de viento del *NCEP/NCAR*. Se observa que las velocidades del viento son ligeramente sobreestimadas, aunque también hay valores por debajo de los registrados. La tendencia de la tormenta, incluidos los picos, se reproduce satisfactoriamente. En lo que se refiere a altura de ola significativa (Ilustración 5b), el ajuste del modelo con las mediciones de las tres boyas es muy bueno, y aunque el modelo predice un valor ligeramente menor al pico máximo, la evolución es descrita adecuadamente. Los resultados del periodo medio Ilustración 5c muestran una subestimación, el error medio absoluto es de aproximadamente 20%. Los errores para las tres variables analizadas se presentan en la Tabla 1.

Distribuciones espaciales

La Ilustración 6a muestra los campos de vientos asociados al paso del huracán *Isidore*. Los días 23 y 24 de septiembre. Cuando el huracán toca tierra en la península de Yucatán se aprecia una disminución en la intensidad de los vientos, que recobran fuerza nuevamente el 25 de septiembre

cuando el huracán regresa al mar siguiendo una trayectoria ya rumbo a las costas de los Estados Unidos. Las distribuciones de altura de ola asociadas al paso de *Isidore* se muestran en la Ilustración 6b. El oleaje generado al paso de este huracán fue importante en toda el área de estudio, pero las zonas más afectadas fueron los Estados de Quintana Roo y Campeche. Una vez más se aprecia un desfase entre los campos de viento y el oleaje generado, pero para este caso mucho menor y se debe a el huracán *Isidore* se situó sobre la península de Yucatán del 22 al 24 de septiembre con una velocidad de desplazamiento menor a la de Gilberto.

Series de tiempo en la costa mexicana

Las series de tiempo para los cuatro puntos elegidos se muestran en la Ilustración 8 (derecha). Como el huracán se situó en la península de Yucatán, los vientos afectaron todo el golfo y los picos de altura de ola significativa para los tres puntos se presentan casi al mismo tiempo. Al salir de la península el huracán se aleja de las costas mexicanas y disminuye el oleaje. El punto 3 presenta dos picos el primero se debe a la localización de *Isidore* sobre la península y el segundo cuando el huracán retorna al mar y recobra fuerza. Dada la trayectoria de este huracán (al norte del punto 4), se aprecia que para los puntos 1 y 2 el viento predominante en dirección NE durante el pico de *Hs*. La altura de ola significativa en el punto 4 es la que presento menor altura y menor duración debido a su ubicación en la parte izquierda del huracan.

Espectros de oleaje

Los espectros de oleaje para este caso (**Error! Reference source not found.**) muestra los correspondientes a las mismas fechas de los mapas de distribuciones espaciales. Se observa que los puntos cercanos a la trayectoria de la tormenta (punto 3 y punto 4) muestran espectros con

más variabilidad direccional en cambio los puntos 1 y 2 presentan espectros con energía concentrada en menos direcciones que corresponden al *swell* que se propagó fuera de la tormenta.

Discusión

La distribución espacial del oleaje mostró una clara correlación con la distribución de viento con un desfase que está relacionado con la velocidad del huracán. Este hecho hace que los espectros direccionales sean en su mayoría anchos sin llegar a desarrollar bimodalidad, sin embargo en zonas donde la orografía puede ser importante se puede presentar espectros bimodales. Las comparaciones entre las direcciones del viento y del oleaje muestran que el oleaje principal es *swell* como se ha reportado también con datos medidos (Young, 2006). Estos aspectos marcan la importancia de realizar validaciones no sólo de parámetros integrados sino también de la forma del espectro, porque como ya han mostrado otros autores (Bolaños et al, 2007) la calidad de la predicción disminuye al considerar la forma espectral.

Desde el punto de vista de riesgo costero y manejo portuario ambos huracanes presentaron condiciones de riesgo para todo el litoral del golfo de México, sin embargo por su ubicación y dada la trayectoria de los huracanes, las zona más vulnerable es la expuesta de la península de Yucatán. Dentro del golfo de México, el litoral suele estar del lado izquierdo de los huracanes (ver Rosengaus, 2001) pero a pesar de ello en los puntos cercanos a los puertos se modelaron alturas de ola significativa de hasta 5m. Una característica importante de los temporales de oleaje y de importancia para el riesgo y manejo portuario es la duración, esta dependerá principalmente de la trayectoria del huracán. Para los casos aquí estudiados la zona afectada durante mayor tiempo fue la península de Yucatán.

La validación del modelo de vientos mostró valores muy aceptables, sin embargo, hay que considerar que los campos de viento han sido modificados por mediciones de diferentes fuentes

por lo que la validación podría estar sesgada. Por esto, la validación es limitada principalmente en la región del caribe y el sur del golfo de México donde prácticamente no existen datos.

Conclusiones

- La implementación de un modelo de predicción de oleaje debe hacerse junto con un modelo de predicción de campos de viento. En el caso de México como de otras zonas del mundo, ese modelo de viento debe ser capaz de simular adecuadamente los campos de viento generados por huracanes. Además es fundamental continuar con la instrumentación de las costas que permita validar los modelos implementados. Estas dos herramientas permitirán un mejor aprovechamiento de los recursos costeros y una mejor protección a la población que ahí habita.
- De acuerdo a las comparaciones de los resultados del modelo con los datos de las boyas oceanográficas se observó que el modelo WAM tiende a subestimar los picos de las tormentas sin embargo, es necesario validar los campos de viento en costas mexicanas para intentar estimar el rango de subestimación debida a la física del modelo de oleaje (Jensen, Cardone y Cox, 2006).

Agradecimientos

Se agradece a Puertos del Estado de España haber proporcionado el modelo WAM y en especial al Dr. Juan Carlos Carretero por su asesoría para su puesta en marcha.

Referencias

- BOLAÑOS, R., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., CATEURA, J. Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modelling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems*. 2007. En imprenta.
- CARRETERO, J.C., GÓMEZ, M. Modifications to the WAM cycle 4 code operational at Clima Marítimo (CM). Puertos del Estado España. 2000, pp 16.
- CHARNOCK, H. Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol 81, 1955, pp. 639-640.
- GÜNTHER, H., HASSELMANN, S., JANSSEN, P.A.E.M. The WAM model cycle 4. Modellberatungsgruppe, 1992, 102 pp.
- HASSELMANN, K. Grundgleichungen der Seegangsvoraussage. *Shiffstechnik* Vol 7, 1960, pp. 191-195.
- 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.
- JANSSEN, P.A.E.M. Quasi-Linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.* Vol 21, 1991, pp. 1631-1642.
- KOMEN, G.J., CAVALERI, L., DONELAN, M., HASSELMANN, K., HASSELMANN, S., JANSSEN, P.A.E.M. Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press. 1994, 532 pp.
- LIZANO, O. G., OCAMPO, J. F., ALVARADO, L. F., VEGA, R., PUIG, J. M. Evaluación de modelo numéricos de tercera generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. *Top. Meteor. Oceanog.* 2001, Vol 8, pp. 40-49.

MILES, J. W. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 3, 1957, pp. 185-204.

PHILLIPS, O. M. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 2, 1957, pp. 417-455.

PHILLIPS, O. M. The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 4, 1958, pp. 426-434.

ROSENGAUS, M. *Gilbert*, ejemplo de huracanes de gran intensidad. Ingeniería Hidráulica en México, vol V, No. 1, 1990, pp. 13-36.

ROSENGAUS, M. Análisis de la temporada 2000 de ciclones tropicales en México. Ingeniería Hidráulica en México, vol XVI, No. 4, 2001, pp. 5-23.

SILVA, R. DÍAZ, G., CONTRERAS, A., BAUTISTA, G., & SANCHÉZ, C. Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast. 6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Melbourne Fl. 2000, pp. 134-145.

WAMDI GROUP. 1988. The WAM model – A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* Vol 18, 1988, pp. 1775-1810.

YOUNG, I. R. Direccional spectra of hurricane wind waves. *Journal of Geophysical research*, Vol. 111, 2006, pp. 1-14.

Lista de Cuadros

Lista de ilustraciones

HURACÁN GILBERTO (1988)				
VIENTO				
	BIAS	EMA	RMSE	SI
BOYA 42001	sin datos	Sin datos	sin datos	sin datos
BOYA 42002	0.33 [m/s]	0.33 [m/s]	2.03 [m/s]	24 %
BOYA 42003	1.11 [m/s]	1.11 [m/s]	1.89 [m/s]	23 %
ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE				
	BIAS	EMA	RMSE	SI
BOYA 42001	-0.56 [m]	0.78 [m]	1.18 [m]	47 %
BOYA 42002	-0.43 [m]	0.60 [m]	1.06 [m]	41 %
BOYA 42003	-0.21 [m]	0.47 [m]	0.61 [m]	29 %
PERIODO MEDIO				
	BIAS	EMA	RMSE	SI
BOYA 42001	-1.28 [s]	1.37 [s]	1.62 [s]	26 %
BOYA 42002	-0.91 [s]	0.94 [s]	1.08 [s]	18 %
BOYA 42003	-1.33 [s]	1.35 [s]	1.65 [s]	28 %
HURACÁN ISIDORE (2002)				
VIENTO				
	BIAS	EMA	RMSE	SI
BOYA 42001	-0.23 [m/s]	2.00 [m/s]	2.58 [m/s]	31 %
BOYA 42002	-0.21 [m/s]	1.81 [m/s]	2.23 [m/s]	26 %
BOYA 42003	0.99 [m/s]	2.15 [m/s]	2.65 [m/s]	31 %
ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE				
	BIAS	EMA	RMSE	SI
BOYA 42001	-0.07 [m]	0.33 [m]	0.42 [m]	22 %
BOYA 42002	0.03 [m]	0.30 [m]	0.40 [m]	18 %

BOYA 42003	-0.23 [m]	0.42 [m]	0.65 [m]	33 %
PERIODO MEDIO				
	BIAS	EMA	RMSE	SI
BOYA 42001	-0.14 [s]	0.70 [s]	0.86 [s]	17 %
BOYA 42002	-0.87 [s]	1.02 [s]	1.16 [s]	21 %
BOYA 42003	-0.95 [s]	1.15 [s]	1.30 [s]	22 %

Tabla 1 Parámetros estadísticos del ajuste entre mediciones y modelación, para Gilberto (1988) e Isidore (2002)

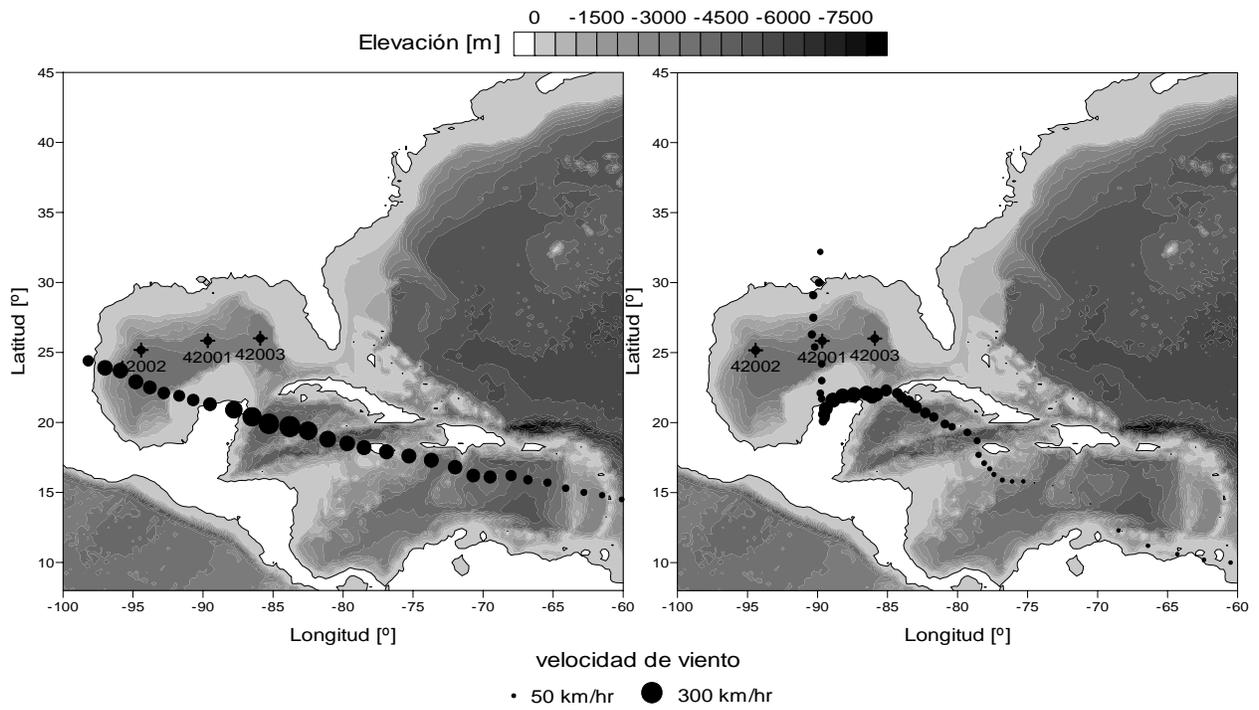
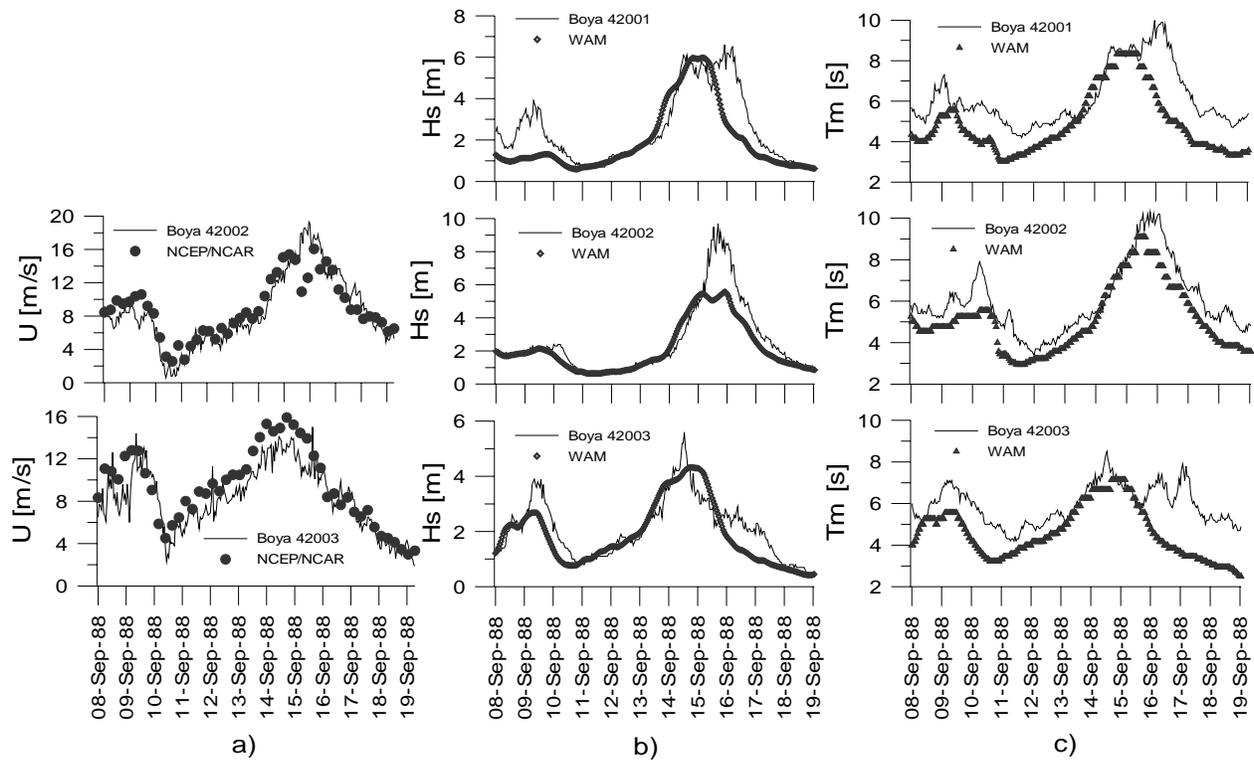


Ilustración 1 Zona de estudio y localización de las boyas utilizadas para la validación. a) trayectoria del huracán Gilberto (1988), b) trayectoria del huracán Isidore (2002)



**Ilustración 2 Comparación con mediciones de boyas oceanográficas para el huracán Gilberto (1988):
a) vientos NCEP/NCAR, b) altura de ola significativa WAM, c) periodo medio WAM**

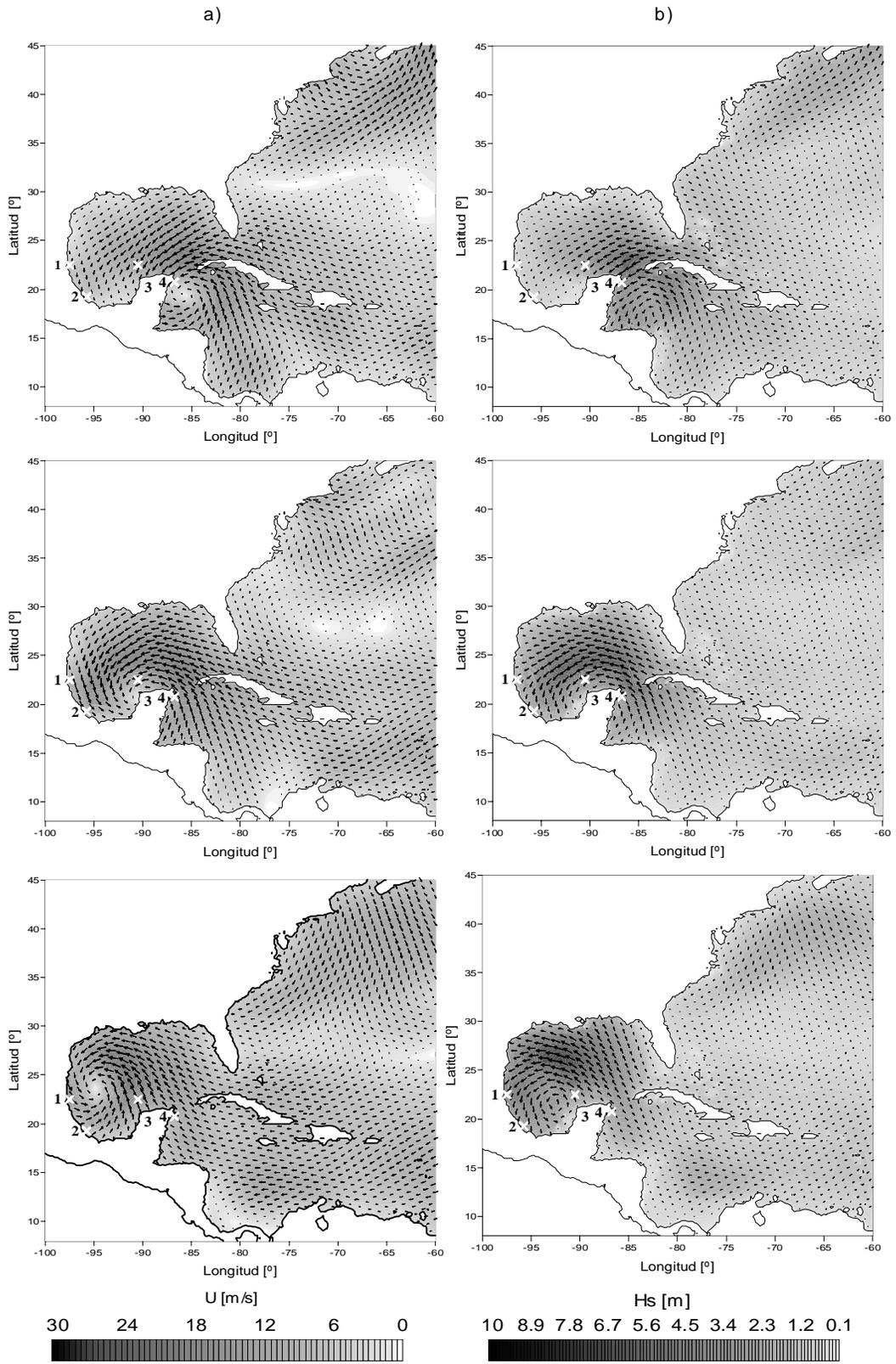


Ilustración 3 Distribuciones espaciales al paso del huracán Gilberto (1988): a) campos de viento, b) altura de onda significativa. Las “X” muestran el punto utilizado para discutir el efecto en la costa.

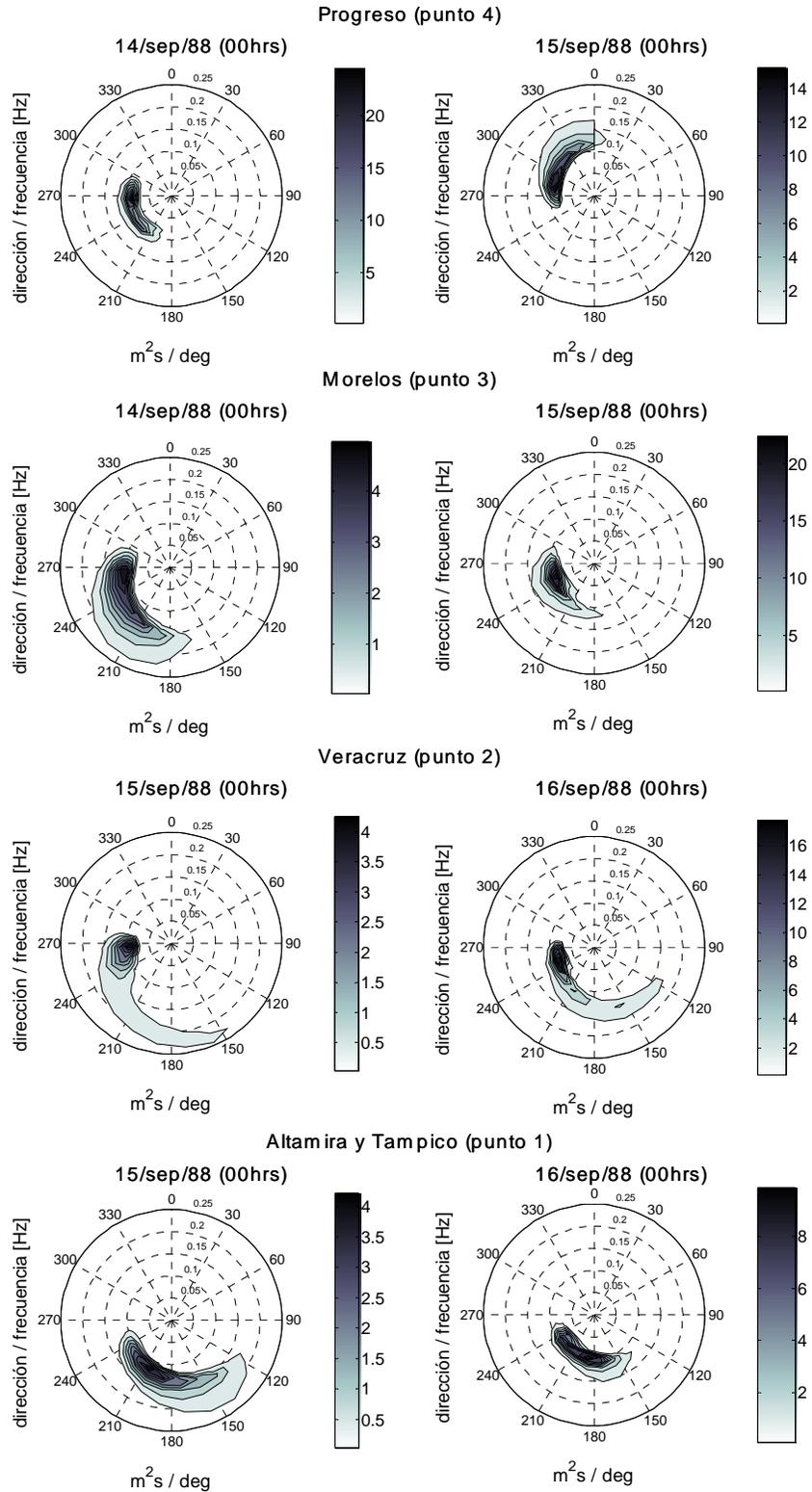
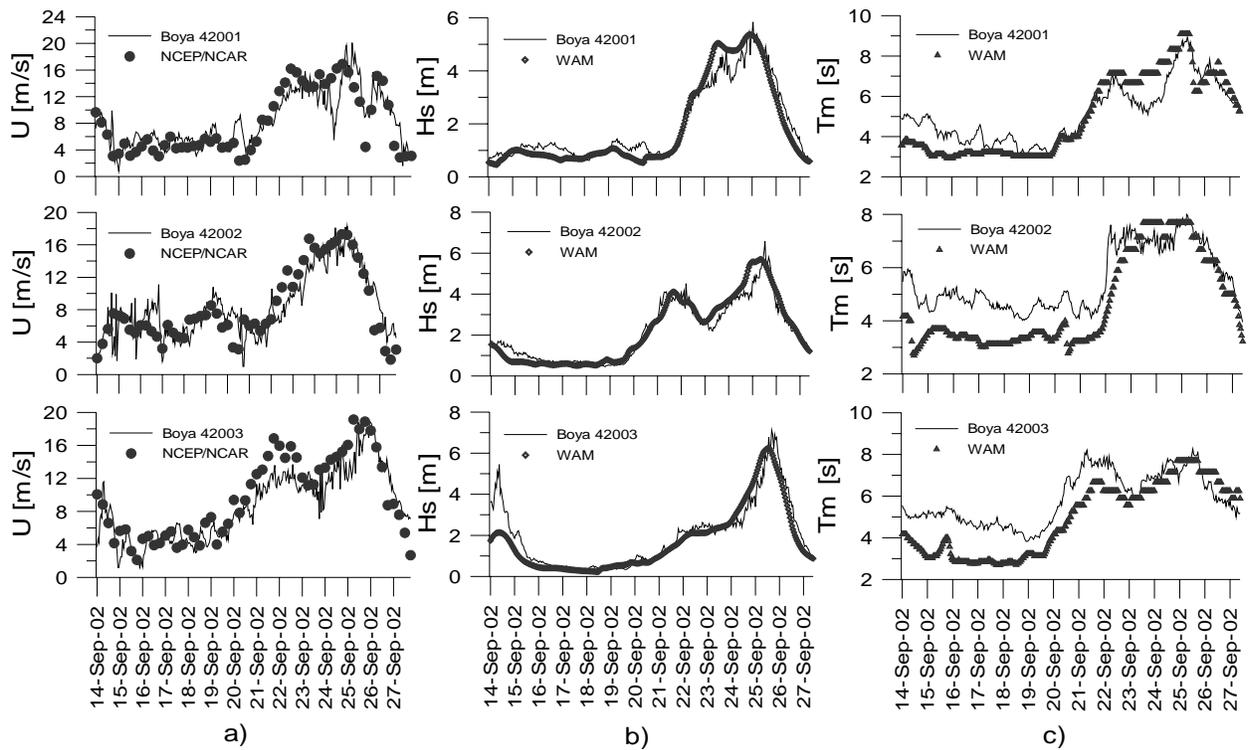


Ilustración 4 Espectros direccionales de los 4 puntos seleccionados al paso del huracán Gilberto (1988)



**Ilustración 5 Comparación con mediciones de boyas oceanográficas para el huracán Isidore (2002):
a) vientos NCEP/NCAR, b) altura de ola significativa WAM, c) periodo medio WAM**

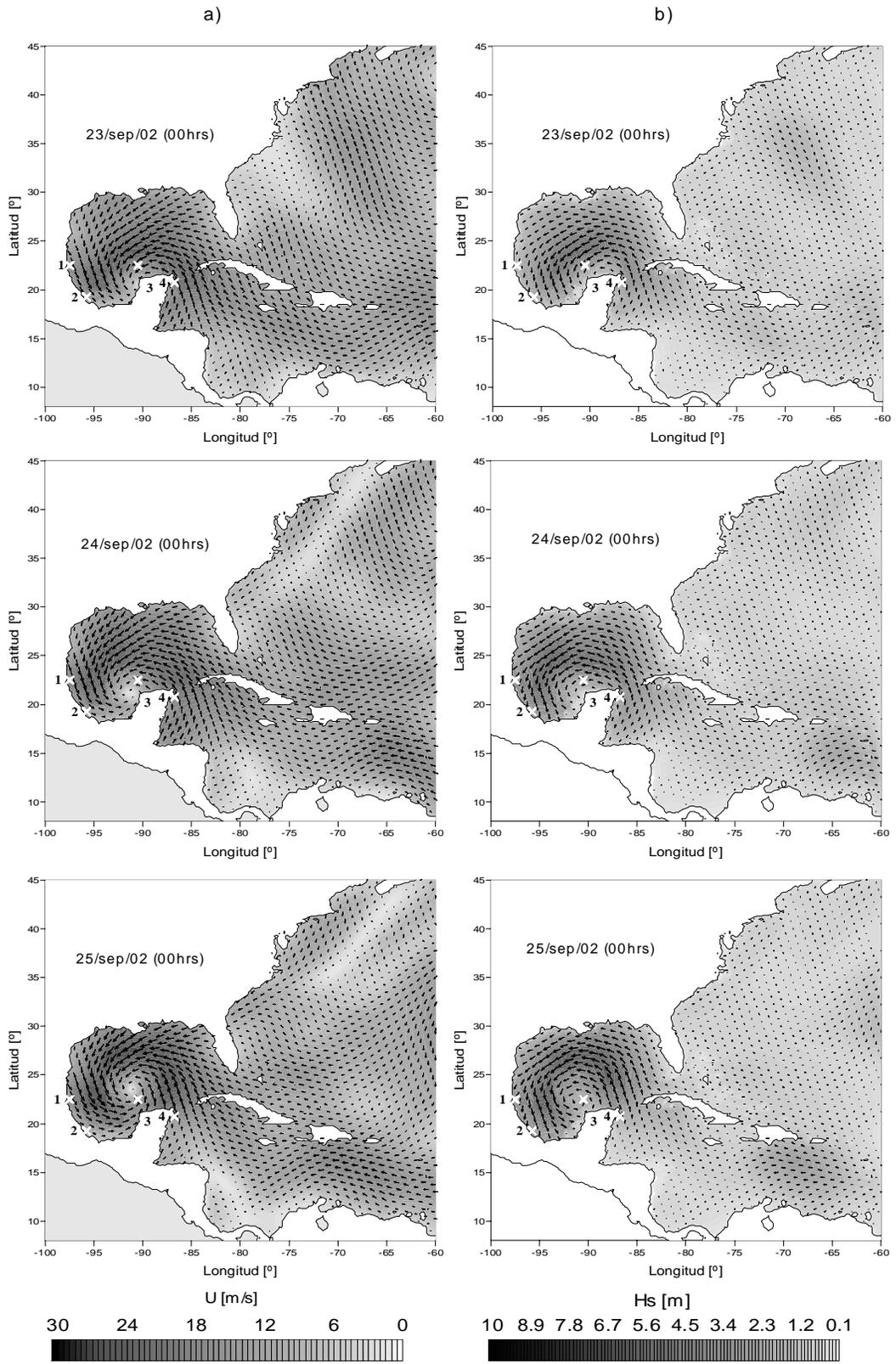


Ilustración 6 Distribuciones espaciales al paso del huracán Isidore (2002): a) campos de viento, b) altura de ola significativa

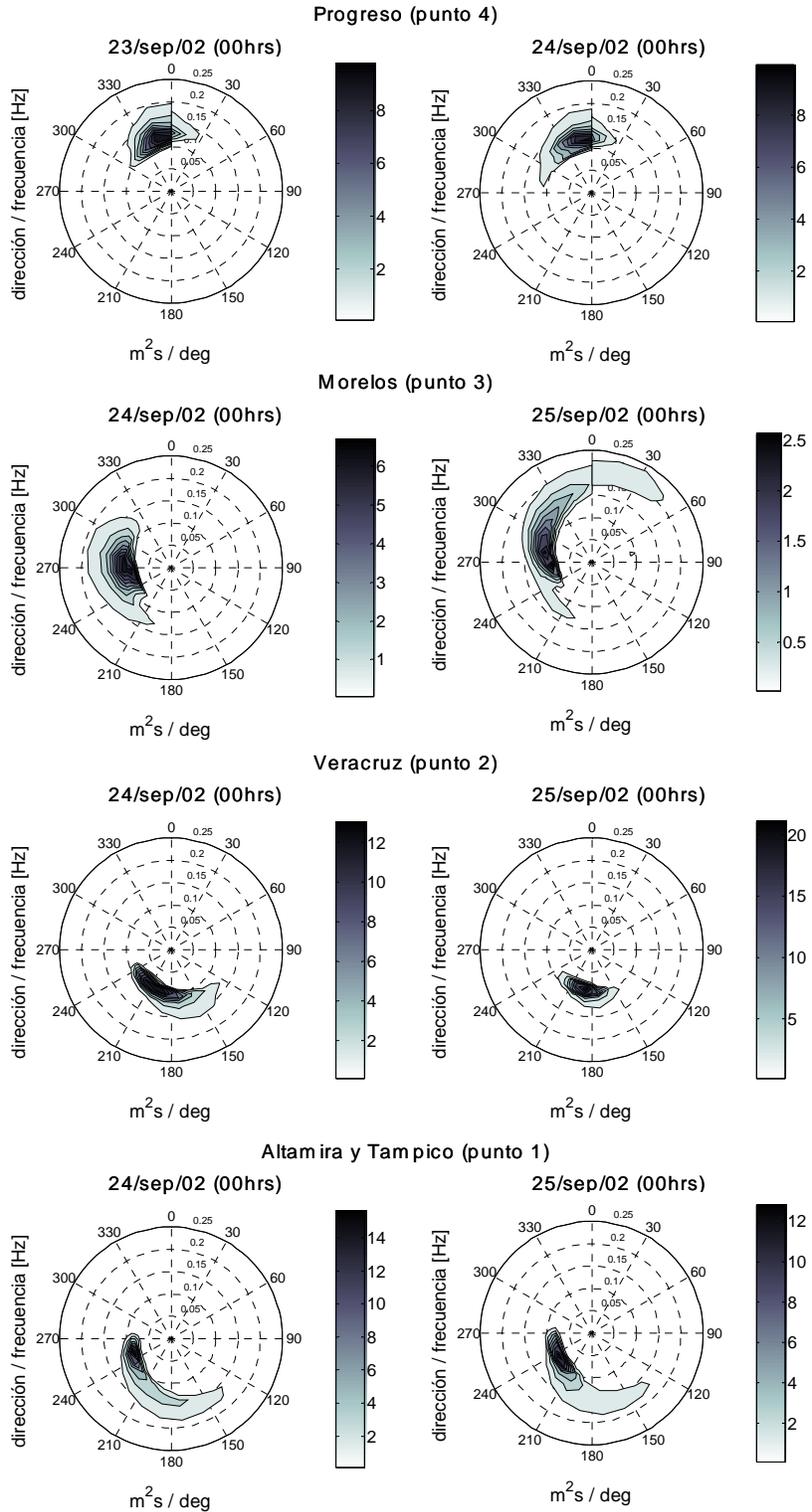


Ilustración 7 Espectros direccionales de los 4 puntos seleccionados al paso del huracán Isidore (2002)

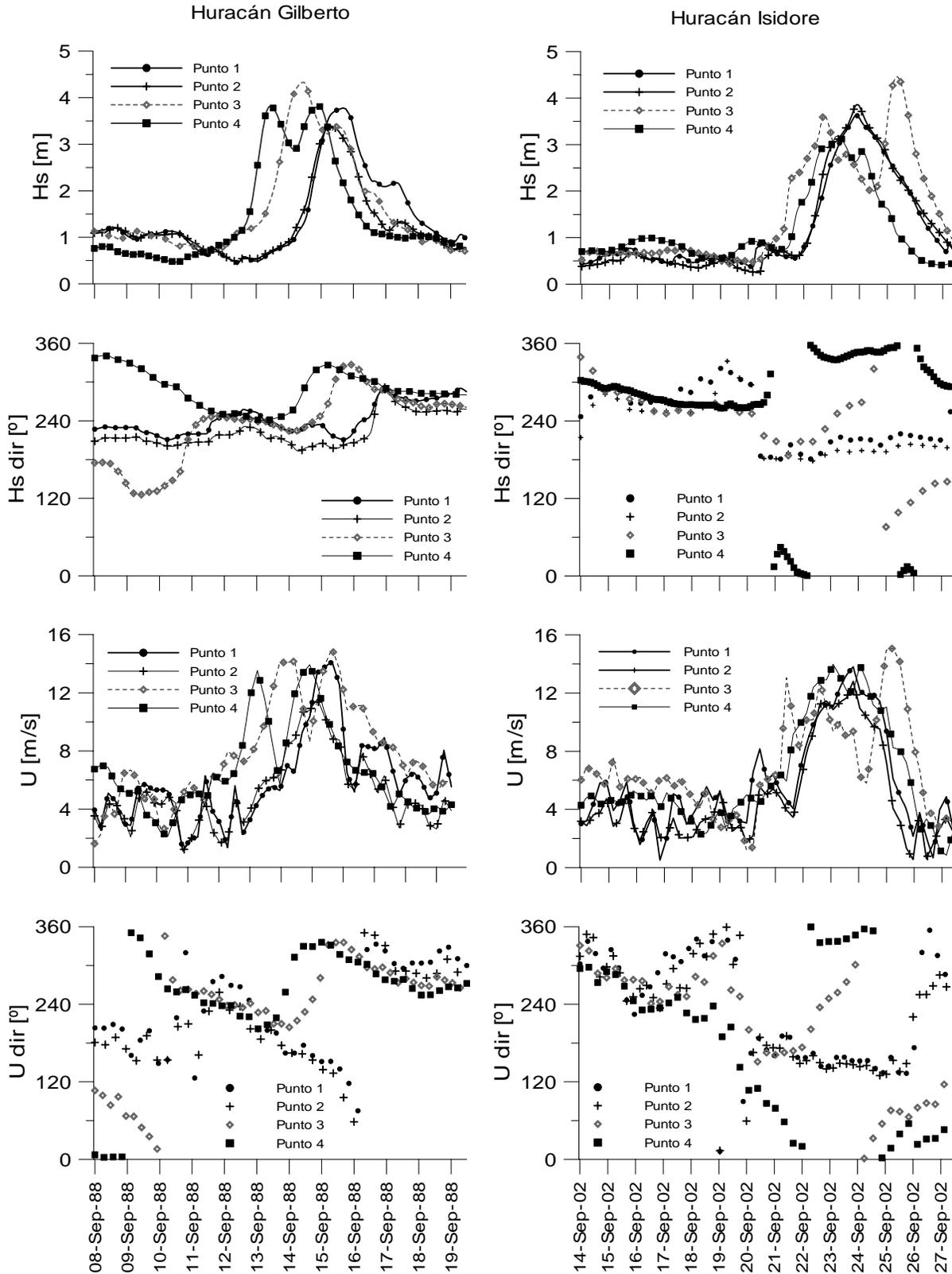


Ilustración 8 Series de tiempo correspondientes a los cuatro puntos seleccionados