

## Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México

<sup>1</sup>OMAR G. LIZANO<sup>1</sup>, FRANCISCO J. OCAMPO<sup>2</sup>, LUIS F. ALVARADO<sup>3</sup>, ROLANDO VEGA<sup>2</sup> Y JOSÉ MANUEL PUIG<sup>2</sup>

*Escuela de Física, Universidad de Costa Rica.*

(Recibido 18 de diciembre, 2000; aceptado 10 de enero 2001)

### Abstract

The evaluation and implementation of two public domain wave spectral models: SWAN and WAM to be used in hindcasting and forecasting in the Central American region are presented. The typical model characteristics are analyzed using simulations for simple bathymetric cases. The model responses are evaluated using boundary conditions in the Caribbean region including extreme meteorological conditions like hurricanes. Those natural phenomena's are of great importance given the historical frequency impacts in the region. The SWAN model shows some difficulties to propagate wave energy in big areas generating some wave height and direction anomalies mainly around islands or in low interpolated depth values. The numerical schemes and the different model's variable parameterizations are responsible for the different spatial energy propagation found in some applications in this study. An integrated system could be working for the whole region where the wave information is necessary in activities like fishing, marine transit and transport, port operations and tourist activities.

**Key words:** Central America, Third Generation wave model, Caribbean Sea, hurricanes, wave forecasting.

### INTRODUCCION

Las actividades que se desarrollan en zonas costeras o marítimas como la pesca, el transporte y tránsito marino, la explotación petrolera, las competencias de botes, las operaciones en puertos, la construcción de estructuras y marinas, deportes como el "surfing", requieren cada vez más información sobre pronóstico de oleaje. Las técnicas de pronóstico de oleaje se desarrollaron después de la Segunda Guerra Mundial. Estas usaban relaciones empíricas entre la

velocidad del viento y la altura de la ola para obtener características del oleaje (Sverdrup and Munk 1947, Bretschneider 1952). Versiones más actualizadas de estos modelos aún son usadas por su simplicidad y eficiencia (Bretschneider 1973, CERC 1984). Sin embargo, para prácticas de diseño contemporáneo se requiere el espectro de la energía de ola, información que no suministraban los modelos anteriores. La aplicación de los conceptos espectrales por Pierson and Marks (1952) marcó el comienzo de una nueva era en el pronóstico de oleaje. Algunos

<sup>1</sup>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. Fax: 234-2703 o 207-5619.

E-mail: [olizano@cariari.ucr.ac.cr](mailto:olizano@cariari.ucr.ac.cr)

<sup>2</sup>Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México. E-mail: [ocampo@cicese.mx](mailto:ocampo@cicese.mx)

<sup>3</sup>Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Ministerio de Agricultura, Energía y Minas (MINAE), San José, Costa Rica. E-mail: [luis@meteo.imn.ac.cr](mailto:luis@meteo.imn.ac.cr)

modelos espectrales fueron elaborados por Pierson et al. (1966), Barnett (1968), Ewing (1971) y Cardone et al. (1976). En los últimos años se han desarrollado nuevos modelos espectrales de olas con la creciente capacidad computacional y en función de las recientes teorías sobre modelaje de olas (SWAMP Group 1985, SWIN Group 1985). Las actividades crecientes en nuestras regiones costeras requiere de información mas detallada de lo que suministran los modelos a escala global. Sin embargo, el desarrollo de un sistema integrado para diagnóstico y pronóstico de oleaje en Centroamérica requiere de un compromiso entre equipo computacional, tamaño de área y tamaño de maya utilizada para el cálculo numérico. En este trabajo se presentan los resultados de la implementación de dos modelos numéricos del dominio público y que son adaptables a las condiciones computacionales de la región: WAM y SWAN. Dado que el Caribe Centroamericano es frecuentemente impactada por huracanes (Lizano y Fernández 1996, Lizano 2000) se estudian las respuestas de los modelos bajo condiciones de viento de huracanes utilizando un modelo simple ajustado por Lizano (1990). Se establece un sistema integrado de técnicas de pronóstico de oleaje para Costa Rica donde información sobre de oleaje es necesaria en el manejo y planificación de las actividades marinas.

**Los modelos espectrales de olas.** En general, después de aceptado el espectro de energía de ola para describir el océano, la mayoría de modelos espectrales contemporáneos resuelven la ecuación de balance de energía, que en agua profunda, sin considerar refracción, fricción, difracción y somerización, es dado por (Gelci et al. 1957):

$$\frac{\partial F}{\partial t} + c_g \frac{\partial F}{\partial x} = S_{tot} \quad (1)$$

donde:  $F = F(\omega, \theta, x, t)$  es el espectro de energía de ola,  $c_g = c_g(\omega, \theta)$ ; velocidad de propagación del grupo de olas,  $S_{tot} = S_{tot}(\omega, \theta, x, t)$  la función neta de todos los procesos que agrupan, remueven o distribuyen energía en el espectro de olas,  $\omega (=2\pi f)$  es la frecuencia angular de ola,  $\theta$  es la dirección de la ola,  $x$  es el vector posición de la ola y  $t$  es el tiempo.

En aguas someras, el efecto de profundidad, refracción, fricción con corrientes y fondo, se deben tomar en cuenta en la evolución del espectro de ola, por lo que la ecuación de transporte de energía más general es dada por:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (c_g E) + \frac{\partial}{\partial \theta} ((c_g \cdot \nabla \theta) F) = S_{tot} \quad (2)$$

donde:  $S_{tot} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$

Los términos de la izquierda en la ecuación 2 representan la evolución de la energía de ola en función del tiempo (primer término), la propagación de la energía de ola espacialmente (segundo término) y los efectos de refracción de oleaje (tercer término). Mientras que los términos de la derecha son los llamados términos fuente que representan el crecimiento y decaimiento de la energía de ola e interacciones no lineales entre ellas. El término  $S_{in}$  especifica la energía de entrada al campo de formación de olas desde la atmósfera por el viento.  $S_{ds}$  es la disipación de energía de ola por rompimiento de las crestas en agua profunda, fricción con el fondo en aguas someras, fricción con corrientes marinas, somerización, percolación y rompimiento de ola al llegar a la costa.  $S_{nl}$  es el término de interacciones no lineal entre ondas que cumplen una condición resonante dada (Hasselmann 1962).

Los modelos numéricos que resuelven estas ecuaciones han sido clasificados como de Primera Generación, Segunda Generación y Tercera Generación. En los modelos de Primera Generación cada componente espectral evoluciona esencialmente independiente de todas las otras componentes. Son manejadas por la función de energía:  $S_m = A + B * F$ , donde  $A$  representa el forzamiento externo de turbulencia en la presión atmosférica según Phillips (1957), y  $B * F$  corresponde al mecanismo de retroalimentación lineal de Miles (1957). La interacción no lineal entre ondas es considerada muy débil. En estos modelos entonces, el espectro de energía se representa como un arreglo de paquetes de energía discretizados en dos dimensiones: frecuencia y dirección. Cada uno de los cuales se propaga con su propia velocidad de grupo a lo largo de su propio rayo director, correspondiente al viento que ha contribuido a lo largo de esta trayectoria. Estos son los llamados modelos desacoplados de Primera Generación (SWAMP Group 1985). Se sabe (WANDI Group 1988) que estos modelos sobrestiman la acción del viento y subestiman la fuerza de la transferencia no lineal casi por un orden de magnitud.

En el balance de energía revisada para los modelos de ola de Segunda Generación, la evolución independiente de las componentes individuales de olas es efectivamente proveídos de acoplamiento a través de transferencia de energía no lineal. En estos modelos el “mar de viento” es manejado por una forma espectral independiente de los otros procesos, ajustada con los parámetros de Hasselmann et al. (1976). En estos modelos la parametrización del término  $S_{nl}$  fue necesaria porque el cálculo completo en 3 dimensiones no era posible hacerlo con las computadoras existentes en esa época. De esta forma  $S_{nl}$  se obtiene por ajuste de una familia de funciones que dependen de una serie de parámetros. Estos modelos son así llamados modelos paramétricos de “mar de viento”. La “marejada de fondo” (o mar de leva) se calcula o se propaga con una forma espectral. Ya que esta es casi independiente del viento, los dos esquemas funcionan casi independientes. Estos son los llamados modelos híbridos acoplados. Estos modelos tienen

problema en la transferencia de “mar de viento” a “marejada de fondo” en un cambio rápido de dirección del viento (SWAMP Group 1985).

Los modelos de tercera generación no imponen una forma definida del espectro y la ecuación de transporte de energía se calcula completamente, como también los términos no lineales. Dos modelos de este tipo se describen a continuación.

**El modelo de olas WAM (WAVE Model).** La versión del modelo WAM Ciclo-4 utiliza la Ecuación 2 de transporte de energía para calcular la evolución del espectro direccional de energía  $F$ .

En el término fuente de energía del viento, representado por  $S_{in} = A + B * F$ , la razón de crecimiento exponencial  $B$  es dada por (Janssen 1989, 1991):

$$B = \max \left\{ 0, \varepsilon \frac{\beta_m}{\kappa^2} x^2 \mu \ln^4 \mu \right\} \omega \quad (3)$$

donde  $\varepsilon$  es la razón entre la densidad del aire y la del agua ( $\rho_a/\rho_w$ ),  $\beta_m$  es una constante igual a 1.2,  $\kappa$  la constante de “von Karman” (igual a 0.41),  $x$  y  $\mu$  son funciones de la velocidad friccional del viento y de la altura crítica (donde la velocidad del viento es igual a la velocidad de fase de la ola, LUO 1995).

El término de disipación de energía por rompimiento de las crestas de las olas para esta versión de WAM es dado según las teorías de Janssen (LUO 1995) por:

$$S_{ds}(f, \theta) = -C_{ds} \hat{\omega} (k^2 E_{tot})^2 \left[ (1 - c_{dx}) \hat{k} / k + c_{dx} (\hat{k} / k)^2 \right] \times F(f, \theta) \quad (4)$$

donde  $C_{ds} = 4.5 \times 10^{-5}$  y  $c_{dx} = 0.5$ ,  $E_{tot}$  es la varianza total de energía de ola ( $E_{tot} = \int F(f, \theta) df d\theta$ ),  $\hat{\omega}$  y  $\hat{k}$  son la frecuencia angular inversa promedio y el número de onda inverso promedio (LUO 1995).

Las interacciones no lineales fueron estudiadas por Hasselmann (1962), quien encontró que un grupo de 4 olas podría intercambiar energía cuando se cumpliera la siguiente condición resonante para el número de onda y frecuencia de ola:

$$k_1 + k_2 - k_3 - k_4 = 0 \quad (5)$$

$$\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4 = 0 \quad (6)$$

La razón de cambio de la energía del espectro de ola para un número de onda  $k$  es descrita por la integral de Boltzman:

$$S_{nl}(k) =$$

$$\omega \int \sigma \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k_4) \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \times [N_1 N_2 (N_3 + N_4) - N_3 N_4 (N_1 + N_2)] dk_1 dk_2 dk_3 \quad (7)$$

donde  $S_{nl}(k)$  es el término fuente de interacciones no lineales en función del número de onda,  $N_i = F(k_i)/\omega_i$  es la densidad de acción,  $\sigma$  es el coeficiente de las interacciones de las cuatro ondas,  $\delta$  es la función delta de Dirac. Las interacciones no lineales para aguas someras pueden calcularse de los valores de agua profunda a través de un factor de escala  $R$  (Hasselmann and Hasselmann, 1981),

$$S_{nl}^h = R(k_p h) S_{nl} \quad (8)$$

donde  $R$  es dado por (LUO 1995; Ris 1997):

$$R(k_p h) = 1 + \frac{5.5}{k_p h} \left( 1 - \frac{5.5}{k_p h} \right) \exp \frac{-5.5 k_p h}{6} \quad (9)$$

con  $k_p$  el pico de número de onda del espectro JONSWAP (Hasselmann et al. 1973), y  $h$  la profundidad. El término  $k_p h$  es mayor que 0.5 (LUO 1995).

La fricción que experimenta la ola por el fondo cerca de la costa es calculada según la formulación JONSWAP (Hasselmann et al. 1973).

$$S_{bot}(\omega, \theta) = 0.076 \frac{\omega^2 E(\omega, \theta)}{g^2 \sinh^2(kd)} \quad (10)$$

En el rompimiento de la ola inducido por el fondo se usa la formulación de Battjes and Janssen (1978):

$$S_{surf}(\omega, \theta) = -\alpha Q_b \varpi H_m^2 / (8\pi) \frac{E(\omega, \theta)}{E_{tot}} \quad (11)$$

en la cual  $\varpi$  es la frecuencia angular promedio,  $H_m$  es la altura máxima de ola,  $Q_b$  es la fracción de olas rompiendo,  $E_{tot}$  es la energía total y  $\alpha$  es una constante numérica (Holthuijsen et al. 1993).

El modelo WAM contiene 25 bandas de frecuencia sobre una escala logarítmica con  $\Delta f/f = 0.1$  distribuyéndose sobre un rango de frecuencia  $f_{max}/f_{min} = 9,8$  y 12 bandas de direcciones de 30 grados cada una. La frecuencia mínima usualmente se escoge en 0,042 Hz. Para modelar la evolución de las olas, la ecuación de transporte de energía se resuelve con el método de diferencias finitas. El espacio  $x$ -y

es representado como puntos en una malla. El salto de programación en tiempo puede ser dividido en varios saltos de tiempo de integración. El modelo WAM utiliza un esquema de integración numérico implícito para calcular los términos fuente y un sistema explícito para calcular la ecuación de transporte de energía.

**El modelo de olas SWAN ( Simulating Waves Nearshore).** Con corrientes no uniformes, la energía de ola no es conservada debido al intercambio de energía entre olas y la corriente promedio. La acción de ola  $N$  en vez del espectro de energía de ola  $F$ , es conservada durante la propagación (Phillips 1977), de manera que la ecuación de balance de acción de ola es dada por :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\Omega N}{\partial \Omega} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\omega} \quad (12)$$

donde  $N = N(\Omega, \theta; x, t) = F(\Omega, \theta; x, t)/\omega$ , siendo  $\Omega = \omega + k \cdot U$  (frecuencia aparente, LUO 1995), y  $U$  (m/s) la velocidad de corriente promedio. El primer término de la ecuación (12) representa la razón de cambio de la densidad de acción de ola. El segundo y tercer término son la propagación en el espacio de la densidad de acción de ola incluyendo la somerización por profundidad y corrientes. Los últimos dos términos representan la refracción por corrientes y profundidad. Los términos de la derecha son los términos fuente, donde en este caso se incluye la energía suministrada por el viento, la transferencia de energía a través de las interacciones no lineales: cuadrupletas y triadas, el decaimiento por rompimiento de las crestas de las olas, la fricción con el fondo y rompimiento de la ola inducida por la profundidad (Ris 1997). De los términos fuentes anteriores Battjes (1994) argumenta que la refracción/somerización, el rompimiento de olas y las interacciones entre triadas, son los procesos que dominan en aguas someras.

El modelo SWAN puede utilizar la expresión de Komen et al. (1984) para calcular el término de crecimiento exponencial:

$$B = \max \left\{ 0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} (28 \beta \frac{u_a}{c} \cos(\theta - \varphi) - 1) \right\} \omega \quad (13)$$

donde  $\beta$  es un factor empírico introducido por Komen et al. (1984), y su valor es aproximadamente igual a 1 (LUO 1995).

El término de disipación de energía por rompimiento de las crestas de las olas ( $S_{ds}$ ) es calculado de manera similar a la Ecuación 4, excepto que los coeficientes  $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$  y  $c_{dx} = 0$ , según Komen et al. (1984).

Las interacciones no lineales  $S_{nl}$  en el modelo SWAN son de dos tipos: interacciones onda-onda en cuadrupletas e interacciones onda-onda en triadas. Las cuadrupletas son calculadas de manera similar al modelo WAM Ciclo-4,

excepto que para aguas someras el término  $k_p h$  (Ecuaciones 8 y 9) tiende a 0 y la transferencia no lineal tiende a infinito, de manera que un límite de  $k_p h = 0.5$  es seleccionado en este caso. Así  $R(k_p h) = 4.43$  (Ecuación 9).

**Interacciones triada-onda.** Eldeberky and Battjes (1995) presentaron una expresión simplificada de energía para las interacciones triada-onda que es usado por el modelo SWAN (Ris, 1997):

$$S_{nl3}(\omega, \theta) = S_{nl3}^+(\omega, \theta) + S_{nl3}^-(\omega, \theta) \quad (14)$$

$$S_{nl3}^+ = \max \{ 0, \alpha_{EB} 2\pi c_g J^2 |\sin(\beta)| / \{E^2(\omega/2, \theta) - 2E(\omega/2, \theta) \times E(\omega, \theta)\} \} \quad (15)$$

y:

$$S_{nl3}^-(\omega, \theta) = -2 S_{nl3}^+(\omega, \theta) \quad (16)$$

en las cuales  $\alpha_{EB}$  es un coeficiente que controla la magnitud de las interacciones,  $\beta$  es la bifase, aproximada por:  $\beta = -\pi/2 + \pi/2 \tanh(0.2/Ur)$ , donde  $Ur$  es el número de Ursell dado por (Ris et al. 1999):

$$Ur = \frac{g}{8\pi^2 \sqrt{2}} \frac{HsT^2}{d^2} \quad (17)$$

con  $T = 2\pi/\omega$ . El coeficiente de interacción  $J = g \alpha_{nl3} / \beta_{nl3}$  es dado por Madsen and Sorensen (1993), donde:

$$\alpha_{nl3} = (2k\omega)^2 [1/2 + C_{\omega^2}/gh] \quad (18)$$

$$\beta_{nl3} = -2k_\omega [gh + 2\beta gh^3 k_\omega^2 - (\beta + 1/3)\omega^2 h^2] \quad (19)$$

y donde  $\beta = 1/15$ .

La formulación de la fricción que experimenta la ola por el fondo y el rompimiento inducido por el fondo es similar al modelo WAM (Ecuaciones 10 y 11).

El modelo SWAN Ciclo-2 propaga la densidad de acción de onda para todas las componentes del espectro a través del área computacional usando un esquema implícito. Esto tiene la ventaja de que el tiempo de propagación no está limitado por una condición de estabilidad numérica, como en el caso del modelo WAM, dado que el esquema implícito es incondicionalmente estable en el espacio geográfico y espectral (Padilla et al. 1998). El tiempo es discretizado con un simple paso de tiempo  $\Delta t$ . En el espacio geográfico utiliza un esquema dirigido hacia adelante ("upwind") de primer orden el cual es aplicado a cada uno de los cuatro cuadrantes direccionales (Ris, 1997) en la propagación de ola. Este espacio geográfico es discretizado con un rejilla rectangular con resolución constante  $\Delta x$  y  $\Delta y$ . En el espacio espectral el

esquema es seleccionado por el usuario de un esquema dirigido hacia arriba a un esquema central. El espectro es discretizado con una resolución direccional  $\Delta\theta$  constante y una resolución constante de frecuencia angular relativa  $\Delta\omega/\omega$  (distribución de frecuencia logarítmica), donde  $f_{min} = 0.04$  Hz y  $f_{max} = 1$  Hz típicamente. El esquema numérico usado en la integración de los términos fuente es definido por el usuario. Se puede escoger entre un esquema totalmente implícito, semi-implícito o explícito (Ris et al. 1999).

## MATERIALES Y METODOS

Las versiones de los modelos numéricos de WAM Ciclo-4 y SWAN versión 30.75 que operaban en el CICESE fueron modificadas ligeramente para ejecutarlos en una Workstation Ultra Spark II Enterprise-250 bajo el ambiente de Fortrán 77.

Se realizaron las pruebas que se incluyen en los manuales de los modelos para garantizar su correcta aplicación. Cajas con batimetrías sencillas se utilizaron para conocer la operación y respuesta de los modelos ante diferentes condiciones de frontera.

Los datos de batimetría utilizados para las simulaciones realizadas en el Mar Caribe se obtuvieron de Topo-5 de la NOAA e interpolados en el CICESE a un tamaño de maya de 2.5 minutos.

Comprobada la dificultad del modelo SWAN para propagar oleaje en regiones grandes (Ris 1997), áreas más pequeñas fueron seleccionadas e interpoladas por el paquete IDRISI para Windows (ver. 2.0) con diferentes tamaños de maya para probar la respuesta de este modelo.

Contornos batimétricos alrededor de Puerto Limón (83°W y 10°N) fueron digitalizados de la carta náutica de 1994, No. 28 049, de la Defense Mapping Agency (DMA) de los Estados Unidos e interpolados con los módulos del paquete IDRISI. Esta batimetría fue utilizada para realizar un anidado de mayas en los modelos.

Un modelo integrado de viento para huracanes (Lizano, 1990) fue utilizado para simular la distribución del viento durante el Huracán Joan en 1988 y el Huracán Mitch en 1998 y estudiar las respuestas de los modelos bajo estas condiciones. Este modelo utiliza un perfil de viento dado por:

$$V(r) = V_{max} \left( \frac{2Rr}{r^2 + R^2} \right) \quad r < R \quad (20)$$

$$V(r) = \left( \frac{V_{max}}{C_1 r^k} \right) * \text{Log} \left( \frac{R}{C_2 r^m} \right) \quad r > R \quad (21)$$

donde  $C_1 = 3.354$ ,  $C_2 = 1.265 \times 10^3$  (Collins and Viehnaman, 1971),  $k = 0.095$  and  $m = 1.575$ ,  $R$  es el radio de ojo del huracán y  $r$  es la distancia desde el ojo del huracán.  $V_{max}$  es la velocidad de viento máxima alrededor del ojo del huracán.

Los parámetros para el Huracán Joan fueron obtenidos de Lizano y Moya (1990). Mallas anidadas fueron utilizadas para estudiar la propagación del oleaje del Huracán Joan cerca de la costa de Limón con el modelo SWAN. Los datos del Huracán Mitch fueron obtenidos del National Center for Environmental Prediction (NCEP) de los Estados Unidos.

Para el ejemplo de pronóstico operacional de oleaje para las costas de Costa Rica se utilizaron los pronósticos a escala global del programa WAVWATHC III (Tolman 1989) de la NOAA de los Estados Unidos. Altura, período y dirección de las olas, en agua profunda frente a las costas de Costa Rica, fueron obtenidos de los productos gráficos de este programa para la región del Caribe y Golfo de México. Las cartas náuticas: No. 51 544 de la Defense Mapping Agency (DMA) de los Estados Unidos y la CR 007 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) para el Golfo de Nicoya y Caldera respectivamente, fueron digitalizadas e interpoladas a un tamaño de rejilla de 250 m y 30 m. Utilizando las características del oleaje en agua profunda como condiciones de frontera se ejecutó SWAN en la parte más externa del golfo para generar las condiciones de frontera de un anidado de mayor resolución alrededor del Muelle de Caldera.

Ambos modelos fueron ejecutados con los parámetros usuales recomendados por los manuales de operación. WAM fue ejecutado utilizando  $f_{min} = 0.04177248$  Hz, 25 divisiones en el dominio de la frecuencia, 30 divisiones en el espacio angular. SWAN fue ejecutado utilizando  $f_{min} = 0.04$  Hz,  $f_{max} = 0.4$  Hz, con 36 divisiones en el espacio angular y 25 divisiones en el dominio de la frecuencia.

## DISCUSION DE RESULTADOS

Las Figs. 1 son un ejemplo de algunas de las pruebas que se realizaron con el modelo SWAN con batimetrías sencillas. En ellas se muestra la distribución de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) simuladas con el modelo SWAN y con diferentes condiciones de frontera. La batimetría utilizada en estas cajas varía desde los 114 m de profundidad sobre el borde derecho, hasta los 0 m sobre el borde izquierdo. La Fig. 1-A muestra la distribución del oleaje que se propaga hacia el oeste (izquierda de figura) generado por viento soplando desde el este (derecha de figura). Fig. 1-B muestra la distribución del oleaje propagándose hacia el oeste utilizando solamente una marejada de fondo como condición de frontera sobre el borde derecho de figura. La Fig. 1-C muestra la distribución del oleaje para las dos condiciones anteriores juntas. La Fig. 1-D, con la condición anterior 1-B, pero con viento del sudeste.

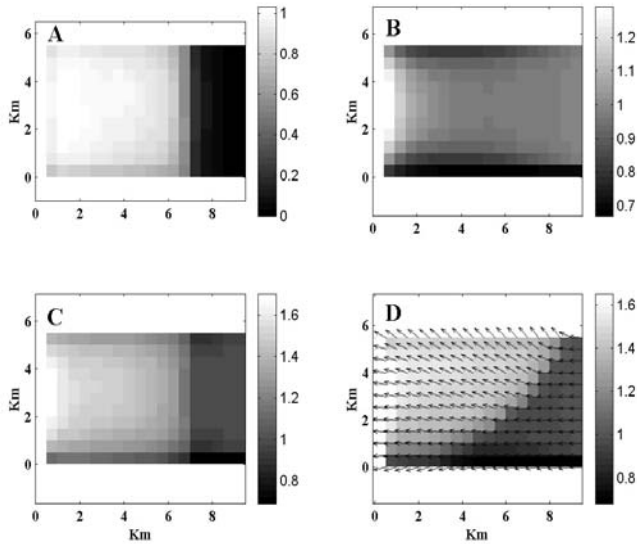


Fig. 1. Distribución de la altura de la ola (m) con el modelo SWAN en una caja con profundidad variable. A: viento del este a 15 m/s. B: oleaje hacia el oeste de 1m y 16 s (sin viento). C: condición A más condición B. D: altura y dirección predominante de las olas con condición B y viento soplando del sudeste a 15 m/s.

La aplicación SWAN en estas cajas sencillas muestra las características típicas de este modelo. Es distinguible el efecto de borde, propio del esquema numérico utilizado en las fronteras, que disipa energía. Se distingue en la Figs. 1, el aumento en la altura de ola al aproximarse a la costa (borde izquierdo). Es claro por ejemplo en Fig. 1-B, el aumento de la altura de la ola al romper cercar de la costa, lo cual es simulado muy bien por este modelo. La Fig. 1-D muestra como un viento del sudeste modifica la marejada de fondo que se propaga desde el borde derecho. Esta era una condición no acoplada en los modelos anteriores de Primera Generación y de difícil manejo por los modelos de Segunda Generación, como mencionamos anteriormente.

En la Fig. 2 se muestra el aérea y la información batimétrica utilizada para realizar las simulaciones de generación y propagación de oleaje en el Mar Caribe.

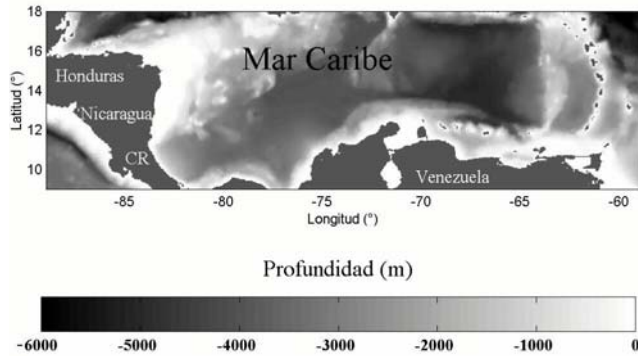


Fig. 2. Mapa batimétrico del Mar Caribe interpolado a una resolución de 2.5' de tamaño de rejilla.

La Fig. 3-A muestra otra de las pruebas realizadas con el modelo SWAN propagando oleaje (sin viento) en el Mar Caribe. Como condición de frontera, en este caso se utilizó una altura de ola de 1 m, un período de 16 s y olas propagándose desde el este. La Fig. 3-B muestra la batimetría interpolada, donde se nota el tamaño de malla utilizada en este caso (37 020 m). La Fig. 3-C muestra los resultados de la simulación por 12 horas con el modelo WAM utilizando viento constante de 15 m/s (sin oleaje como condición de frontera) desde el este en esta misma región.

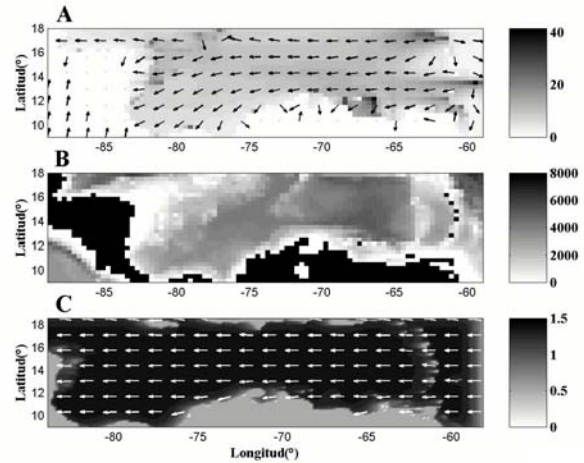


Fig. 3. Distribución de la altura (m) y dirección predominante del oleaje con el modelo SWAN con olas hacia el oeste de 1 m y 16 seg como condición de frontera (A). Batimetría interpolada (37 020 m) para la simulación del caso anterior (B). Distribución de altura y dirección predominante de la ola con modelo WAM con viento constante desde el este a 15 m/s durante 12 horas (C).

Aunque el modelo SWAN es un modelo no reflexivo (Risk 1997), tiene dificultad para propagar oleaje en regiones grandes como muestra la Fig. 3-A. Las grandes variaciones de profundidad entre rejillas adyacentes (Fig. 3-B), actúan para el modelo como paredes verticales generando las inconsistencias en la altura (40 m) y en su dirección de la ola, especialmente alrededor de las islas o en regiones costeras.

Con un esquema de integración numérico diferente (Risk 1997), el modelo WAM no tiene dificultad para simular en regiones grandes y con variaciones de profundidad grandes como muestra la Fig. 3-C. Alturas razonables, no mayores a 1.5 m, se obtienen con este modelo para un viento de 15 m/s.

La Figs. 4 muestra la aplicación del modelo SWAN en un área más cercana a la costa de Costa Rica con diferentes tamaños de rejilla. Como condición de frontera se usó en este caso un oleaje con una altura de 1 m, período de 16 s y olas propagándose desde el este. Diferentes patrones de distribución de altura de ola se muestran según se cambia

el tamaño de rejilla, especialmente alrededor de los bajos batimétricos que se van definiendo al frente a las costas de Nicaragua.

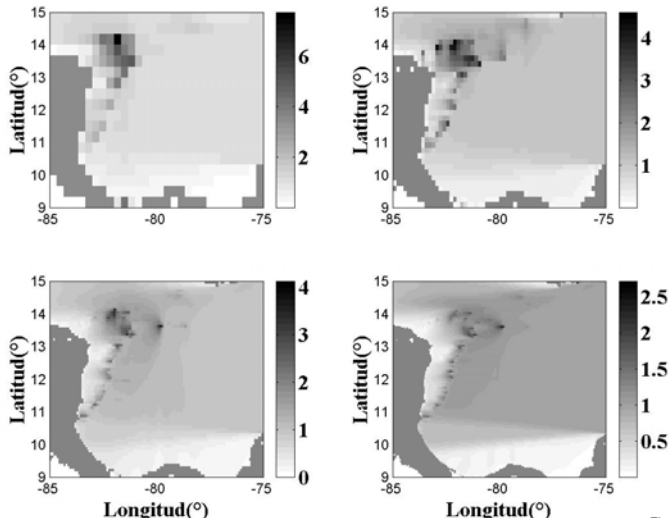


Fig. 4. Distribución de la altura de ola (m) para diferentes tamaños de rejilla. A:37 020 m, B: 18 510 m, C: 9255 m y D: 4627.5 m.

Para el modelo SWAN la resolución del tamaño de la malla es importante para simular oleaje. Menor tamaño de malla que la que muestra la Fig. 4-D, no produjo variaciones significativas en la altura de ola alrededor de esos bajos, pero si aumentó el tiempo computacional.

Las Figs. 5 y 6 muestran los resultados de la simulación del oleaje para el Huracán Joan con los dos modelos WAM y SWAN. Se operaron bajo una condición no-estacionaria durante 72 horas. Como fuente generadora de viento de huracán, se utilizó el modelo de Lizano (1990) descrito anteriormente. Diferentes patrones de distribución de ola se notan en estas figuras. Mayor altura de ola (12 m) muestra el modelo SWAN alrededor del ojo, mientras que WAM generó un máximo de 10 m.

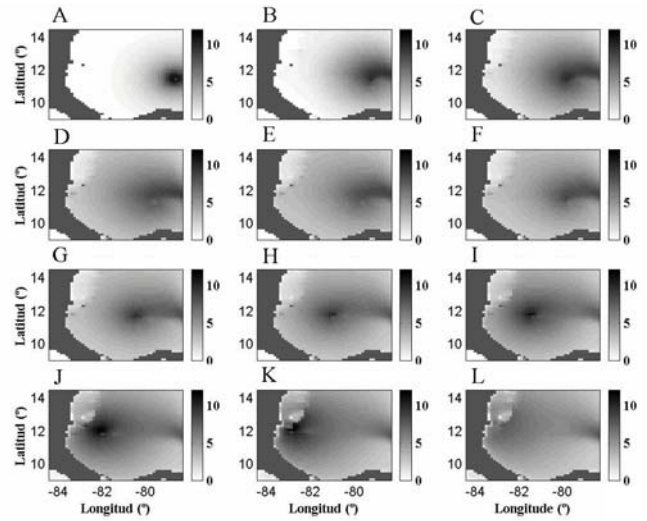


Fig. 5. Distribución de la altura de ola (m), cada 6 horas, para el Huracán Joan con el modelo SWAN. La simulación se inició el 19 de octubre de 1988 a las 10:00 hora local (A) y terminó el 22 de octubre a las 04:00 hora local (L).

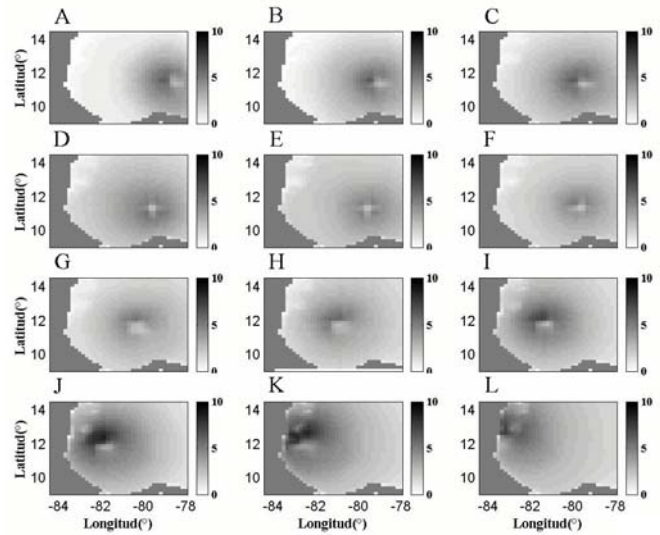


Fig. 6. Distribución de la altura de ola (m), cada 6 horas, para el Huracán Joan con el modelo WAM. La simulación se inició el 19 de octubre de 1988 a las 10:00 hora local (A) y terminó el 22 de octubre a las 04:00 hora local (L).

El modelo SWAN fue ejecutado utilizando la parametrización de Janssen (1991) (Ecuación 3) y la parametrización de Komen et al. (1994) (Ecuación 13). La utilización de ambas expresiones no generó diferencias a la que muestra la Fig. 5. Las diferencias en la distribución y altura del oleaje mostrado en Figs. 5 y 6 son más bien producto de los diferentes esquemas numéricos utilizados por los modelos. El modelo SWAN es más difusivo (Risk 1997) que WAM. Sin embargo como lo menciona Padilla et



al. (1998), SWAN responde más rápido que WAM ante cambios de dirección del viento. Ambos modelos responden a la asimetría del viento a la derecha del huracán (Lizano 1990), generando sobre esa zona una mayor altura de ola. El modelo WAM concentra más las mayores alturas alrededor del ojo, que el modelo SWAN que dispersa más este campo de oleaje, que como muestran la mayoría de las Figs. 5, deja una estela de energía relativamente alta a lo largo de su trayectoria. Las pruebas realizadas con WAM en el Golfo de México ante 3 huracanes por el WANDI Group (1988) mostraron un buen ajuste entre la altura observada y la simulada por el modelo. Queda por evaluar la importancia de la utilización de diferentes constantes en algunas expresiones, como la disipación de energía (Ecuación 4), y las interacciones no lineales (Ecuaciones 7 y 14) en ambos modelos.

La Fig. 7 muestra la aplicación de una malla anidada de SWAN en SWAN para la simulación de oleaje para el Huracán Joan. Oleaje, desde agua profunda, generado en el Caribe adyacente a Costa Rica (Fig. 5), es propagado hacia Puerto Limón cada 6 horas para las 72 horas de simulación de este caso. Una altura máxima de 3.5 m se obtuvo a las 66 horas de simulación (Fig. 7-K) frente a la costa de Puerto Limón. Para la hora 72 (Fig. 7-L) la altura del oleaje iba disminuyendo, dado a la típica dirección del viento hacia fuera de la costa, según la posición del huracán en ese momento.

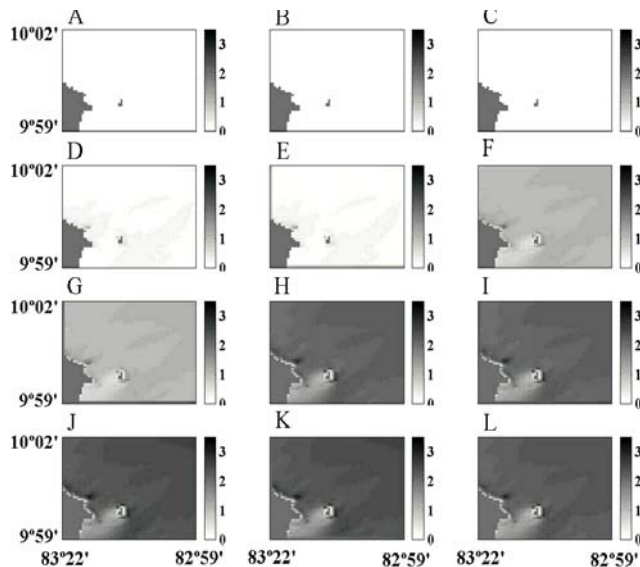


Fig. 7. Distribución de la altura de ola (m), cada 6 horas, para el Huracán Joan con el modelo SWAN frente a la costa de Limón. La simulación se inició el 19 de octubre de 1988 a las 10:00 hora local (A) y terminó el 22 de octubre a las 04:00 hora local (L).

La altura de oleaje simulada compara muy bien con la observada para el caso del Huracán Joan (Quirós 1988, Lizano 2000). Esto indica que estas técnicas de pronóstico podrían ser usadas para generar información valiosa en la

planificación de las operaciones marinas y en la toma de medidas de prevención por parte de los organismos gubernamentales.

La Fig. 8 muestra la simulación del Huracán Mitch frente a las costas de Honduras con el modelo WAM. Una altura máxima de 9 metros se obtuvo para este huracán alrededor del ojo a las 42 horas de simulación (Fig. 8-G).

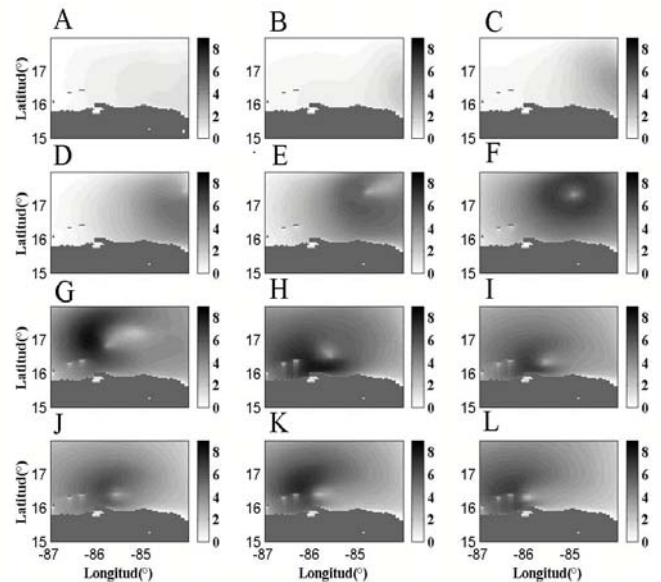


Fig. 8. Distribución de la altura de ola (m), cada 6 horas, para el Huracán Mitch con el modelo WAM. La simulación se inició el 25 de octubre de 1998 a las 21:00 hora local (A) y terminó el 28 de octubre a las 15:00 hora local (L).

La Figs. 9 y 10 muestran como ejemplo, una aplicación específica para las costas de Costa Rica con estos modelos. Para huracanes específicamente se puede generar oleaje en agua profunda, como la mostrada en Figs. 5 y 6, y suministrar esta información como condición de frontera a regiones como las mostradas en las Figs. 9 y 10, y conocer las características de oleaje sobre la costa. Para pronóstico operacional, se pueden utilizar los productos de pronóstico global, como el WAVEWATCH III, como condiciones de frontera y obtener información de pronóstico diario en regiones como las mostradas en estas figuras. Un ejemplo de estos se muestra en las Figs. 9. La Fig. 9-A muestra la propagación del oleaje sobre la parte externa del Golfo de Nicoya. Se utilizó en este caso como condición de frontera, los pronósticos de agua profunda a las 24 horas del 26 de marzo del 2001 del modelo WAVEWATCH III. La Fig. 9-B muestra el anidamiento de SWAN en SWAN alrededor de Puerto Caldera. La Fig. 9-C muestra la distribución del oleaje alrededor de Puerto Limón para ese mismo pronóstico.



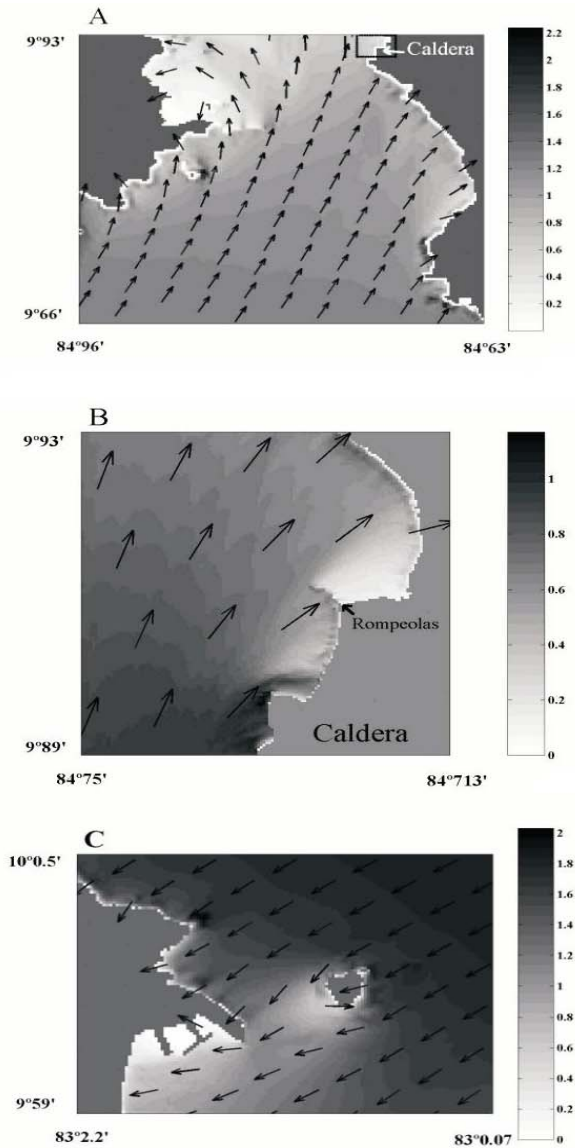


Fig. 9. Distribución de altura (m) y dirección predominante de la ola en la parte externa del Golfo de Nicoya (A) y distribución de altura y dirección predominante de la ola alrededor de Puerto Caldera (B). Como condición de frontera se utilizó una altura de ola de 1.22 m, período de 12 seg y dirección 30°. Distribución de altura (m) y dirección predominante de la ola frente a Puerto Limón (C). Una altura de ola de 1.82 m, 8 seg y 219°.

Operacionalmente se podría suministrar información de las características del oleaje como: altura, período y dirección, en otros lugares de interés (por ejemplo: Puerto de Puntarenas, Playa Jacó, Puerto Quepos, etc., en la costa Pacífica, y como: Puerto Limón y Puerto Moín, en la costa Caribe), lugares donde se requiere esta información para la planificación de las actividades marinas correspondientes. Aplicaciones similares se pueden desarrollar para otras regiones de Centroamérica y México.

## AGRADECIMIENTOS

La adaptación de los modelos numéricos de Tercera Generación se logró gracias al financiamiento del programa de Intercambio Académico entre el CICESE de México y el CIGEFI de Costa Rica (Convocatoria 1999) dado por la Comisión Mexicana para la Cooperación con Centroamérica, la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES) y el Consejo Superior Universitario (CSUCA).

A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica que ha financiado este Proyecto No. 805-94-201.

## REFERENCIAS

- Barnett, T.P. 1968. On the generation, dissipation and prediction of ocean wind-waves. *J. Geophys. Res.* 73: 513-529.
- Battjes, J.A. 1994. Shallow water wave modeling. Proc. Of the Int. Symp.: Waves-Physical and Numerical Modeling. University of British Columbia. Vancouver. Vol. I: 1-23.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random wave. Proc. 16<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Engineering, Hamburg, 569-587.
- Bretschneider, C.L. 1973. Deep water wave forecasting curves. En: Shore Protection Manual. U.S. Army Coastal Engineering Research Center. 36-37.
- Bretschneider, C.L. 1952. The generation and decay of wind waves in deep water. *Trans. Am. Geophys. Union.* 33(3): 381-389.
- Cardone, V., W. Pierson and E. Ward. 1976. hindcasting the directional spectra of hurricane-generated waves. *J. Petrol. Technol.* 28: 385-394.
- CERC (Coastal Engineering of Research Center). 1984. Shore Protection Manual. Vol. I y II. U. S. Government Printing Research Center, Washington, D. C.
- Eldeberky, Y. and J.A. Battjes. 1995. Parameterization of triad interactions in wave energy models. Proc. Coastal Dynamics Conf. 95, Gdansk, Polen. 140-148.
- Ewing, J.A. 1971. A numerical wave prediction method for the North Atlantic Ocean. *Deut. Hydrogr. Z.*, 24: 241-261.
- Gelci, R., H. Cazalé and J. Vassal. 1957. Prévission de la houle, la méthode de densités spectro-angulaire. *Extrait du Bull. d'Inf. Du Comité Central d'Océanographie.* 9(8): 416-435.
- Hasselmann, K. 1962. On the nonlinear energy transfer in a wave spectrum, in *Ocean Wave Spectra.* Englewood Cliffs, Nueva York. Prentice-Hall, Inc. p 191-197.
- Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.I. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerbrug, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden. 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z.*, A8 (12): 95 p.
- Hasselmann, S. and K. Hasselmann. 1981. A symmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity wave spectrum. *Hamb. Geophys. Einzelschr.* Ser. A., *Wiss. Abh.* 52. 163 p.
- Hasselmann, K., D.B. Ross, P. Muller and W. Sell. 1976. A Parametric Wave Prediction Model. *J. Phys. Oceanogr.* 6(2): 200-228.
- Holthuijsen, L.H., N. Nooj and J. Wolf. 1991. Numerical investigation of depth and current refraction of waves. *J. Geophys. Res.* 96(C2): 2737-2748.
- Janssen, P.A.E.M. 1989. Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.* 19: 745-754.

- Janssen, P.A.E.M. 1991. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.* 21: 1631-1642.
- Komen, G.J., S. Hasselmann and K. Hasselmann. 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.* 14: 1271-1285.
- Lizano, O.G. 1990. Un modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico de oleaje durante huracanes. *Geofísica.* 33: 75-103.
- Lizano, O.G. 1997. Efectos del tamaño de la rejilla y el número de frecuencias en un modelo espectral de pronóstico de olas. *Top. Meteorolog. y Oceanograf.* 4(1): 39-50.
- Lizano, O.G. 2000. Hurricane wave simulation in the Caribbean coast of Central America using models of the Third Generation. *Coastal Waves Meeting. International Centre for Coastal Resources Research.* Barcelona, España. 4 p.
- Lizano, O.G. and W. Fernández. 1996. Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Costa Rica durante el período 1886-1988. *Top Meteorol. Y Oceanog.* 3(1): 3-10.
- Lizano, O.G. and R.J. Moya, 1990. Simulación de oleaje durante el Huracán Joan (1988) a su paso por el Mar Caribe de Costa Rica. *Geofísica.* 33: 105-126.
- LUO, W. 1995. Wind wave modeling in shallow water with application to the Southern North Sea. *Katholieke Universiteit Leuven.* Belgica. 198 p.
- Madsen, P.A. and O.R. Sorensen. 1993. Bound waves and triad interactions in shallow water. *Ocean Engineering.* 20(4): 359-388.
- Miles, J.W. 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *J. Fluid Mech.* 3(2): 185-204.
- Padilla-Hernández, R., P. Osuna, J. Monbaliu and L. Holthuijsen. 1998. Intercomparing third-generation wave model nesting, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, Melbourne, Florida, 102-112.
- Phillips, O.M. 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *J. Fluid Mech.* 2(5): 417-445.
- Phillips, O.M. 1977. The dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 1. *J. Fluid Mech.* 9: 193-217.
- Pierson, W.J. and W. Marks. 1952. The power spectrum analysis of ocean wave records. *Trans. Amer. Geophys. Union.* 33: 834-844.
- Pierson, W., L. Tick and L. Baer. 1966. Computer-based procedures for predicting global wave forecasts and wind field analyses capable of using wave data obtained by space craft. *Proc. Nav. Hydrodyn. Symp., 6th,* 499-529.
- Quirós, G.E. 1988. Amenaza del océano a causa del Huracán Joan. Informe Sección de Oceanografía. Universidad Nacional de Costa Rica. 24 p.
- Ris, R.C. 1997. Communications on hydraulic and geotechnical engineering. Report No. 97-4. Faculty of Civil Engineering. Delf University of Technology. 160 p.
- Ris, R.C., N. Booij, L.H. Holthuijsen, R. Padilla-Hernandez and IJ. G. Haagsma. 1999. User Manual. SWAN Cycle 2 version 3075. Faculty of Civil Engineering. Delf University of Technology. 109 p.
- Sverdrup, H. and Munk, W., 1947. Wind, sea and swell: theory of relation for forecasting. H. O. Publication 601. U. S. Naval Oceanographic Office. Washington, D. C.
- SWIM Group. 1985. Shallow Water Intercomparison of Wave Prediction Models. *Q. J. Royal Meteorol. Soc.* 111: 1087-1112.
- SWAMP Group. 1985. Ocean wave modeling. Plenum Press. Nueva York. 256 p.
- Tolman, H.L. 1989. The numerical model WAVEWATCH: A third Generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering.* Delf University of Technology. Rep. 89-2. 72 p.
- WANDI Group. 1988. The WAM Model - A Third Generation Ocean Prediction Model. *J. of Phys. Oceanog.* 18: 1775-1810.