

El Impacto de las Olas generadas por un Huracán sobre Arrecifes Coralinos: Inferencias basadas en Modelos Numéricos

Omar G. Lizano R.*
Aurelio Mercado **
Manuel L. Hernández A.**

Abstract

A simulation for the case of hurricane David (August, 1979), of the deep water waves over a coraline reef to the southwest of Puerto Rico was made. The wave patterns and their characteristics are analyzed and correlated with the effects produced in the reef. It is speculated about the hurricane impact according to the direction and position respect to a reef.

Resumen

Se simuló la propagación de olas, desde agua profunda, para el caso del huracán David (agosto, 1979), sobre un arrecife coralino al suroeste de Puerto Rico. Las características y el patrón del oleaje son analizadas, y correlacionadas con los efectos producidos en el arrecife. Se especula acerca del impacto de un huracán según la dirección y posición respecto de un arrecife.

Introducción

La mayoría de trabajos sobre los efectos de parámetros ambientales en arrecifes, se han concentrado en aspectos como el impacto de los huracanes sobre comunidades y estructuras (Glynn *et al.*, 1964; Hernández *et al.*, 1977; Mata 1981, Woodley *et al.*, 1981), sedimentación y turbidez del agua (Goreau 1964, Barner 1968, Cortés y Risk, 1985), variación de salinidad y concentración de nutrientes (Goreau 1964, Cooper 1966, Johannes 1972), entre otros. Sin embargo, uno de los factores que más afectan a un arrecife de coral, durante un huracán, son las olas, mediante la velocidad del flu-

* Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) y Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEF), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

** Departamento de Ciencias Marinas, Recinto Universitario de Mayaguez, Universidad de Puerto Rico.

jo que generan en el fondo, la cual suministra la fuerza necesaria para romper las formas arrecifales, principalmente las formas ramificadas como *Acropora palmata*. Se han publicado pocos trabajos que relacionen los parámetros físicos con los cambios en un arrecife durante huracanes. Los trabajos de Kjerfve y Dinnel (1983) y Kjerfve et al. (1986) han utilizado relaciones empíricas suministradas por Bretschneider y Tamaye (1976) para calcular altura de ola y magnitud de viento en agua profunda. Se han utilizado métodos manuales para estudiar la propagación de olas hacia aguas llanas (Hernández et al., 1977; Lugo 1982, Kjerfve y Dinnel, 1983; Graus et al., 1984; Kjerfve et al., 1986). El objetivo de este trabajo es estudiar las características del oleaje de un huracán sobre un arrecife, utilizando una de las técnicas más recientes: un modelo de refracción-difracción de la energía del oleaje, para asociarlas con los cambios morfológicos observados sobre el arrecife. La información generada con estos modelos puede facilitar la formulación de hipótesis sobre cambios o permanencia de crecimientos coralinos, dispersión de organismos marinos, transporte de sedimento, o para evaluar la eficacia de los arrecifes como rompeolas costeros.

Material y Métodos

El régimen del oleaje simulado mediante un modelo numérico de generación de olas durante el huracán David (Lizano 1991), fue utilizado para estudiar las características del oleaje alrededor del arrecife de Cayo Turrumote, en la costa suroeste de Puerto Rico (Figura 1). Los valores de altura, periodo y dirección de las olas fueron obtenidos del modelo para aquellas direcciones que pudieran alcanzar al arrecife desde agua profunda (> 80 m). La propagación de olas hacia la costa fue analizada con un programa de refracción-difracción (que en adelante llamaremos RCPWAV) creado originalmente por Ebersole (1985) y modificado por Lizano (1988) para incluir transporte de sedimentos.

Los datos de entrada del programa incluyen batimetría, altura, periodo y dirección de oleaje. Los datos de salida se presentan como una matriz de valores en el área de análisis con los siguientes parámetros:

1. Altura y dirección del oleaje
2. Índice de rompimiento del oleaje
3. Velocidad de corrientes a lo largo de la costa
4. Razón de transporte de sedimento a lo largo de la costa
5. Densidad de energía de la ola
6. Flujo de energía de la ola
7. Velocidad del flujo en el fondo, producido por la ola

Los parámetros 3, 4, 5, 6, 7 y 8 descritos anteriormente, fueron agregados por Lizano (1988) para incluir estudios de transporte de sedimentos.

Los valores de profundidad tomados de un mapa batimétrico de la zona fueron interpolados a un tamaño de rejilla de 55 m (Figura 1a) coincidentes con la magnitud de la mínima longitud de ola analizada ($Lo(m) = 1.56 T^2$, donde "T" es el periodo de ola en segundos), siguiendo los criterios de Ebersole (1986). Los resultados de este modelo se presentan sólo para el área mostrada en la Figura 1b.

Una marejada de tormenta de 0.5 m de altura fue estimada para este huracán (Lizano 1988). Este valor fue sumado a los valores interpolados de profundidad, como un valor de profundidad adicional, para realizar el análisis de refracción de olas.

Resultados

Las características del oleaje simulado para el huracán David de 1979, se muestran en la Tabla 1 (Lizano 1991), donde "Ho" es la altura de la ola en metros, "T" es el periodo en segundos y "Az" es la dirección en grados de estas olas, pronosticadas en agua profunda, al suroeste de Puerto Rico.

Tabla 1
Características de las olas pronosticadas en aguas profundas por un modelo de olas durante el huracán David

No.	Hora*	Ho (m)	T(s)	Az(grd)**
1	30	5.7	10.0	49
2	33	4.6	9.1	40
3	36	3.8	9.1	38
4	39	3.5	9.1	28
5	42	3.1	9.1	24
6	45	2.8	9.1	23
7	48	2.5	8.3	2

* Número de horas luego de iniciada la simulación con el modelo numérico de olas (Lizano 1988) a las 0 horas del 31 de julio de 1979 (62.8° W y 15.6° N).

** Dirección desde donde vienen las olas con respecto al Este Magnético.

Los rasgos principales de la propagación de estas olas sobre el arrecife de Cayo Turrumote, obtenidos con el modelo RCPWAV, se muestran en las Figuras 2 a la 6. El análisis indica que:

1. Una convergencia de energía de olas a lo largo de la pendiente norte de la prolongación arrecifal al sureste del cayo, producto de la batimetría local y del efecto de convergencia de energía (Pierson 1952) detrás de áreas poco profundas (Figuras 2, 4 y 5).

2. La altura máxima de las olas obtenida sobre la prolongación arrecifal al sureste del cayo alcanzó los 7 metros (Figura 2b).
3. La mayoría de los grupos de olas analizados, excepto el último de la Tabla 1 ($H_0 = 2.5$ m, $T = 8.3$ s, $Az = 2^\circ$), muestra también una convergencia de energía sobre las áreas de 8 y 12 metros de profundidad al suroeste del cayo (véanse estos contornos de profundidad en la Figura 1b). Las alturas de ola alcanzan hasta 5 m (Figura 4b) y las velocidades de fluido en el fondo sobrepasan los 3 m/s (Figura 4b).
4. Para todos los tipos de olas analizadas, menos del 50% de la energía de ola en agua profunda alcanza el cayo propiamente dicho (contorno igual a 0.5 en las Figuras 3a y 6a). Aparecen en la distribución valores de hasta el 400% del correspondiente valor de energía en agua profunda (contorno igual a 4 en la Figura 6a). (Estos contornos de energía de ola representan la energía dividida por el valor correspondiente en agua profunda: $E = \rho g H_{rms}^2 / 8$ donde H_{rms} es la raíz cuadrática media de la altura de la ola, ρ es la densidad del agua de mar y g la constante gravitacional).
5. Olas de 1 a 2 m en su mayoría rompen sobre el cayo con velocidades de fluido en el fondo entre 1 y 2 m/s (véanse las Figuras 2b, 3b, 4b, 5b y 6b).
6. Las mayores velocidades del fluido en el fondo, se obtienen a lo largo de la pendiente norte de la prolongación arrecifal, alcanzando hasta 4 m/s a profundidades sobre los 16 m (Figura 3b).
7. Un área de convergencia diferente se obtiene con el grupo de características de ola que se muestran en la Figura 5. Aparecen olas rompiendo cerca del extremo sureste del cayo con alturas entre 3 y 4 m, y con velocidades del fluido en el fondo sobre los 3 m/s (Figuras 5b y 6b).

Discusión

Algunos cambios y efectos documentados y observados en el arrecife de Cayo Turrumote (Mata 1981) pueden ser relacionados con los resultados obtenidos en este trabajo.

Todas las poblaciones de los corales *Porites porites* y *Acropora cervicornis* alrededor del cayo fueron severamente afectados durante el huracán David (Mata 1981). Graus et al. (1984), siguiendo los trabajos de Hernández et al. (1977), concluyen que las velocidades de fluido de 1 m/s son suficientes para romper estas estructuras arrecifales. Es importante mencionar que fueron obtenidos valores que oscilan entre 1 y 2 m/s alrededor del Cayo para la mayoría de características de olas analizadas en este estudio (véanse por ejemplo las Figuras 3b y 6b).

El coral *Acropora palmata* sufrió el mayor daño durante el huracán David. Mata (1981) menciona una disminución del 100% de la cobertura de esa especie a lo largo de la extensión arrecifal ubicada al sureste del Cayo. Graus et al. (1984) encontraron

que velocidades entre 1 y 4 m/s (véase la Figura 7) podrían romper esta forma arrecifal. La mayoría de las características de olas analizadas en este estudio produjeron velocidades sobre los 3 m/s (ejemplo: Figura 3b) a lo largo de esa extensión arrecifal, la cual podría explicar el rompimiento observado de esos corales.

Gran parte de la alta población de *Acropora palmata* fue transportada desde la extensión arrecifal ubicada al sureste hasta el extremo este (Mata 1981), formando una muralla de pedazos grandes, que es muy típica en los arrecifes coralinos después del paso de un huracán (Hernández *et al.*, 1977). Este transporte podría deducirse de la prevaleciente componente noroeste de la mayoría de direcciones de olas analizadas sobre la extensión arrecifal, como se muestra por ejemplo en las Figuras 2a, 4a y 5a.

Sobre la extensión arrecifal al sureste del Cayo se encuentran crecimientos coralinos vivos de gran tamaño a profundidades mayores de los 20 m. Una explicación para su existencia es el transporte de todo depósito de sedimento (que normalmente sepulta estas estructuras) en ocasiones de estos acontecimientos meteorológicos extremos (Lizano 1988). Velocidades del fluido en el fondo sobre los 3-4 m/s producidos en esta zona por la alta convergencia de energía, como se muestra en la Figura 3b, podrían sustentar esa hipótesis.

Según Chapell (1980), las primeras formas arrecifales en ser afectadas por las corrientes marinas son las más débiles, como *Acropora cervicornis*, luego las colonias de *Acropora palmata* y *Porites porites*, y así sucesivamente, hasta afectar en menor grado a aquellas formas de coral masivo e incrustado como *Montastrea cavernosa* y *Montastrea annularis*.

En general, para una condición severa de oleaje, como es el caso de un huracán, que genere olas por ejemplo, con alturas de 5 m rompiendo sobre un arrecife, se producirían velocidades de fluido de 3.4 m/s a 10 m de profundidad. Condiciones como estas son capaces de producir una destrucción del 100% de los corales arborescentes que se encuentran sobre esas profundidades en cualquier arrecife. Por otro lado, bajo estas condiciones, la profundidad máxima a la cual se inicia el movimiento de sedimento (densidad específica de 2.65 y diámetro de 1 mm) es 36 m (SPM 1984).

En el caso de que un huracán pase alrededor de un arrecife, con fuerza necesaria para fracturar, al menos, colonias de coral arborescentes, podría tener dos direcciones de transporte de estas colonias, según la dirección predominante del oleaje, la cual a la vez depende de la posición relativa del huracán con respecto al arrecife. Si la posición del huracán, con respecto al arrecife, produce una dirección predominante del oleaje hacia afuera de la costa, el transporte de coral fracturado seguiría por las pendientes arrecifales hacia la base del arrecife. Mientras que si la dirección predominante de oleaje es hacia la costa, el material coralino fracturado produciría las típicas acumulaciones de coral muerto sobre la costa; como es el caso del arrecife en Cayo Turrumote, según lo evidencia Hernández (1977). Por otro lado, como el transporte de sedimento durante un huracán se puede iniciar a profundidades considerables (30-40 metros), aquellas colonias de coral que no sufran daño, como los corales del tipo

masivo: *Montastrea cavernosa*, y que aún puedan recuperarse si son barridos del sedimento depositado sobre ellos, podrían ser beneficiados, como es el caso del arrecife en Cayo Turrumote, según lo evidenciaron las observaciones (Lizano 1988).

Es importante subrayar que en este trabajo se ha asumido el paso de un huracán alrededor de un arrecife y no sobre el arrecife, pues es conocido que cuando el ojo del huracán pasa sobre el arrecife, ninguna estructura coralina sobrevive (Woodley et al., 1981).

Conclusión

El presente trabajo ha utilizado una de las técnicas más recientes en la propagación de oleaje hacia las costas, para explicar los cambios que sobre un arrecife generó el paso de un huracán. La correlación entre las observaciones y los resultados de este estudio, prueban la aplicabilidad de estos modelos numéricos.

La información que se deriva del presente análisis de refracción sobre el arrecife de Cayo Turrumote, puede ser utilizada para deducir cambios inducidos por huracanes en cualquier arrecife y/o para explicar el transporte de sedimentos y dispersión de organismos en estas estructuras.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la tesis sometida por el primer autor (O. G. Lizano), a la Universidad de Puerto Rico como requisito parcial para obtener un doctorado en Ciencias Marinas. El mismo expresa su gratitud a sus profesores consejeros, Dr. Manuel Hernández A. y Prof. Aurelio Mercado I. por su ayuda, sugerencias y aliento durante sus años en el Departamento de Ciencias Marinas.

También expresa su gratitud al Dr. Manuel M. Murillo (Universidad de Costa Rica) por sus gestiones para obtener el apoyo económico para realizar parte de sus estudios de posgrado, y a las Instituciones que se lo brindaron: CONICIT-AID. La hace extensiva también al Dr. Manuel Hernández A. (Universidad de Puerto Rico) por el apoyo económico complementario de sus estudios de posgrado, a través del fondo del Departamento de Ciencias Marinas, de FEMA (Federal Emergency Management Agency) y del Programa Sea Grant del Recinto Universitario de Mayaguez.

Asimismo expresa su agradecimiento al Dr. Walter Fernández y al Dr. José A. Vargas (Universidad de Costa Rica) por la revisión y crítica a este trabajo.

Referencias

- Barner, A.H. "A Freshwater 'Kill' on the Coral Reefs of Hawaii", Hawaii Inst. Mar. Biol. Tech. Rep. 15, 29 pp., 1968.
- Bretschneider, C.L. and E. Tamaye. *Hurricane Wind and Wave Forecasting Technique*, Look Lab/Hawaii, 6, 1-29, 1976.

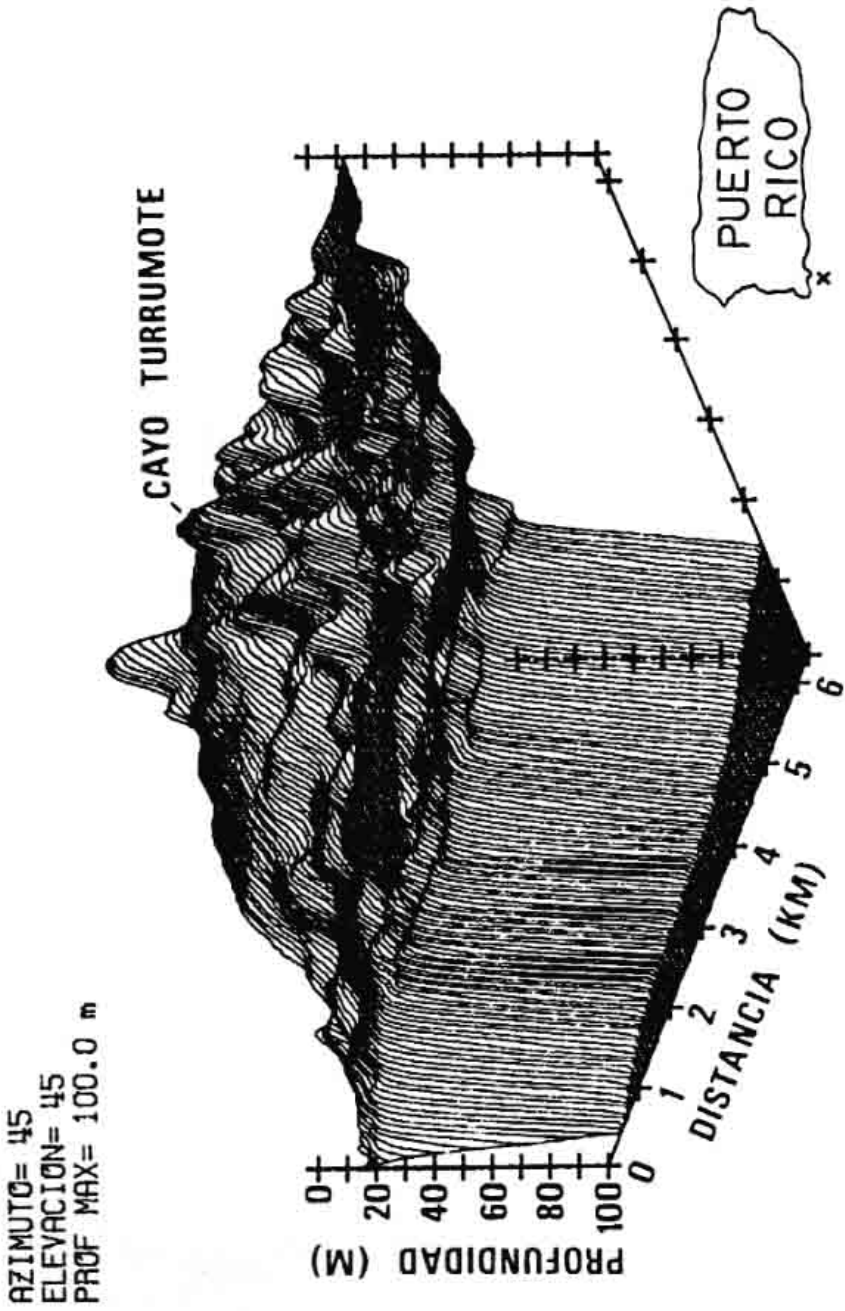


Figura 1a. Area de estudio. Batimetría en tres dimensiones.

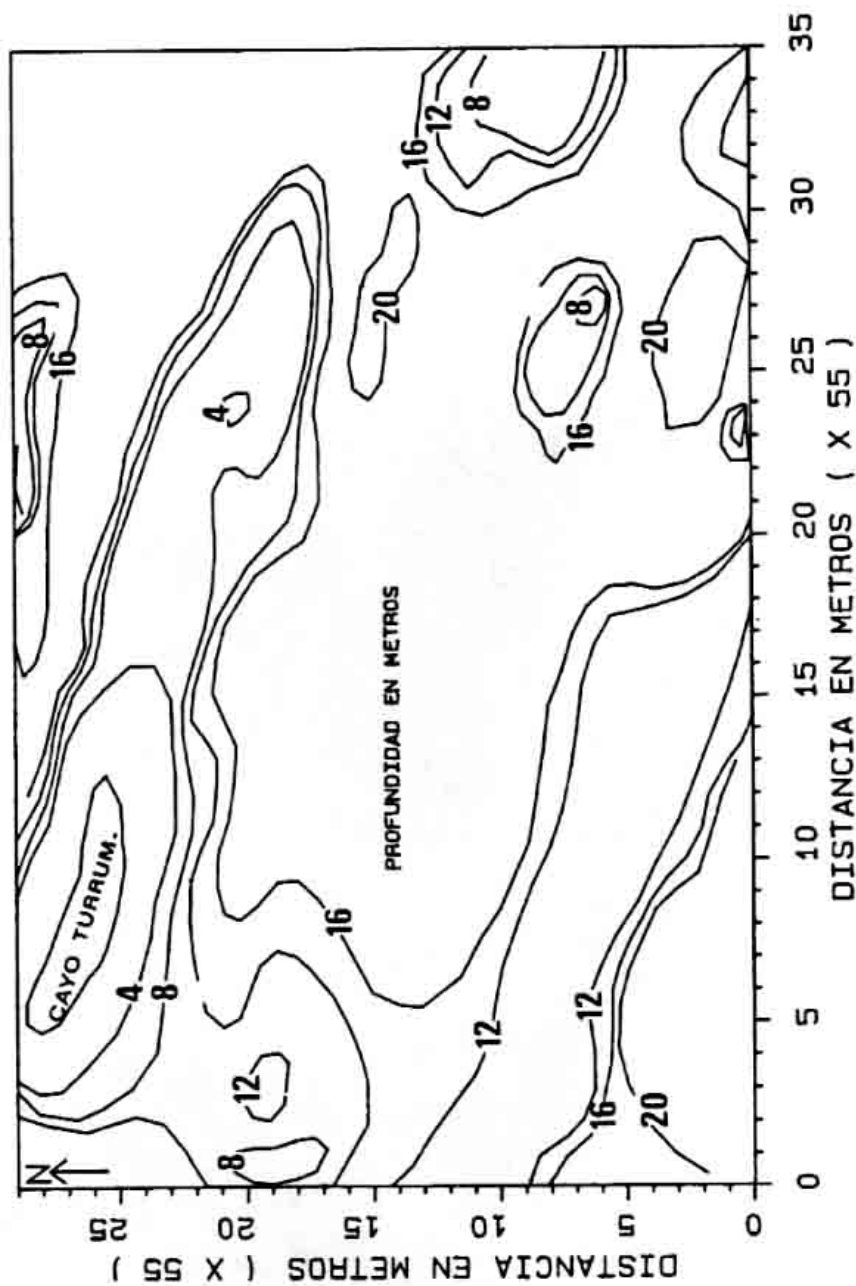


Figura 1b. Contornos de profundidad en metros. Cayo Turrumote, Puerto Rico.

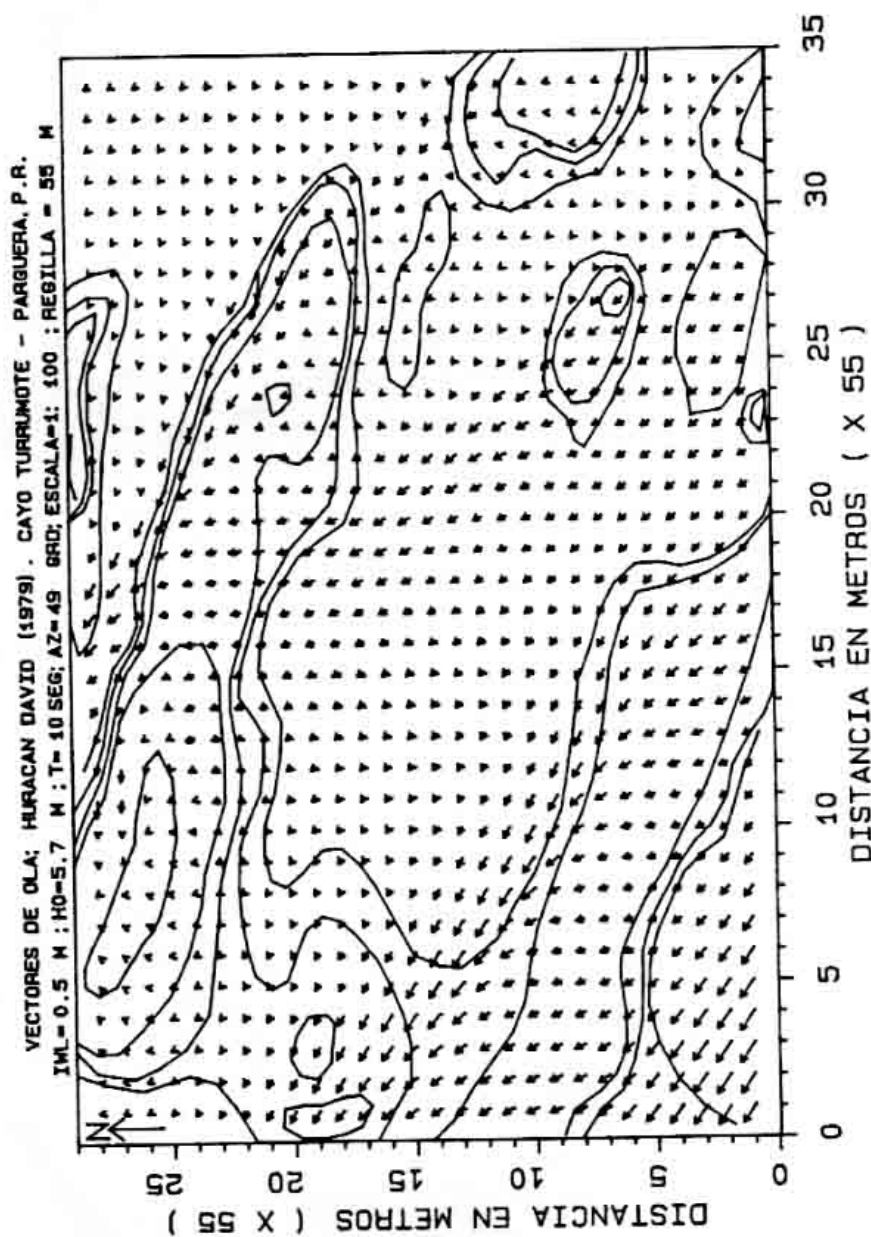


Figura 2a. Vectores de ola.

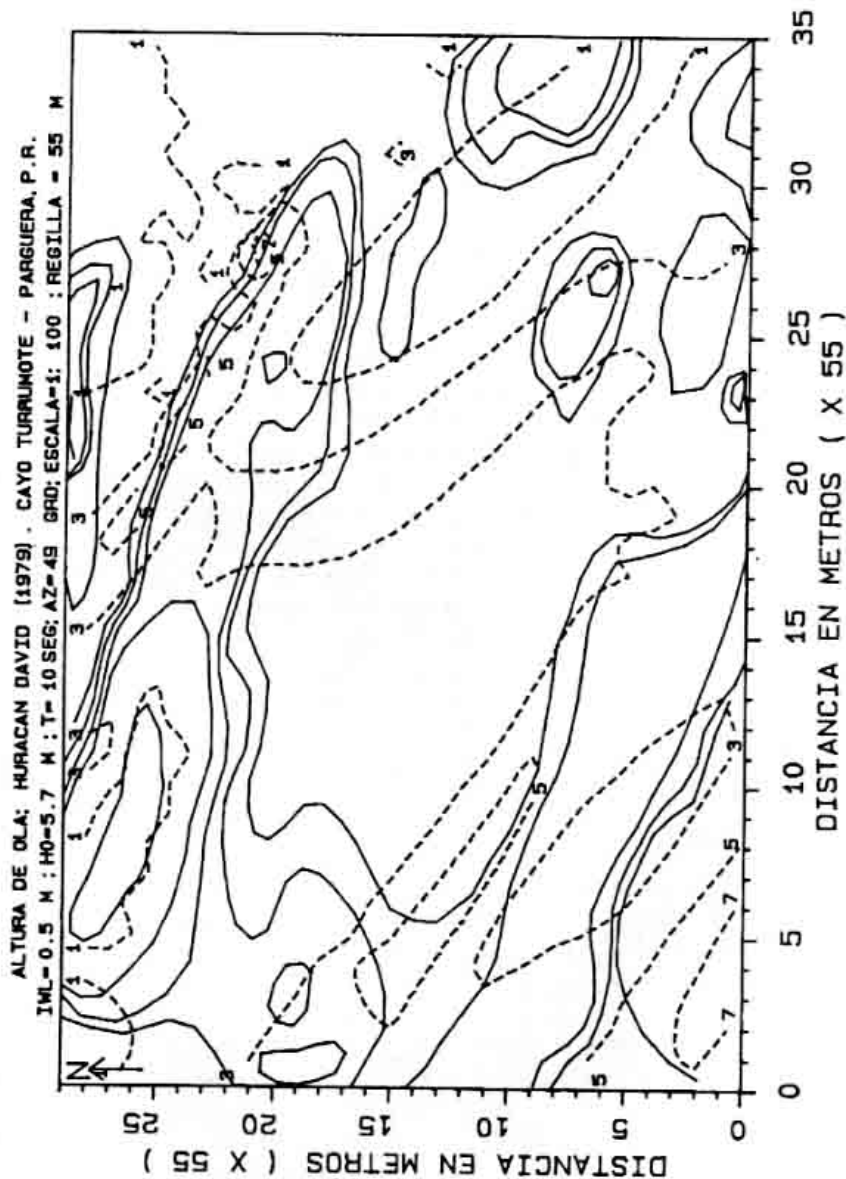


Figura 2b. Altura (m). Huracán David a las 30 horas de simulación. $H_0 = 5.7$ m, $T = 10$ seg, $Az = 49^\circ$. (H₀: altura de ola en agua profunda (> 80 m); T: periodo de ola; Az: dirección desde donde vienen las olas con respecto al este magnético).

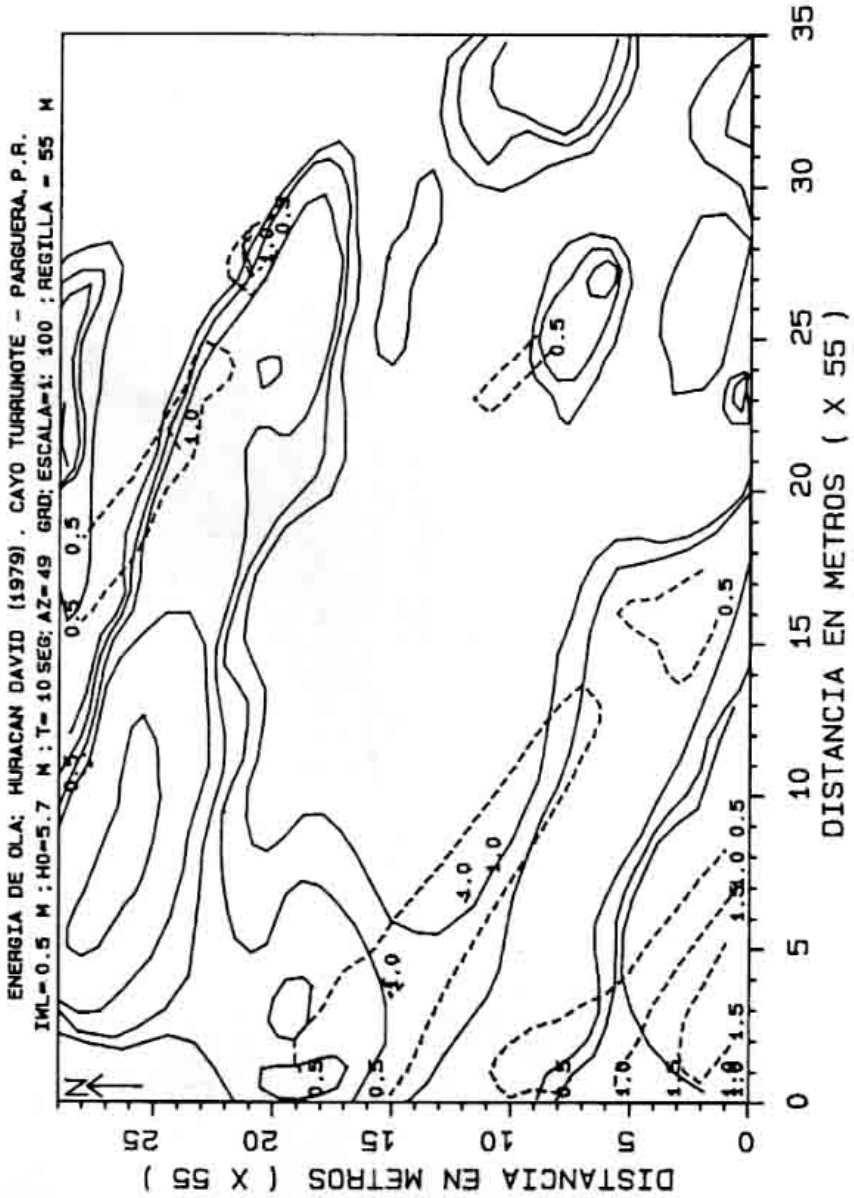


Figura 3a. Energía de ola (%).

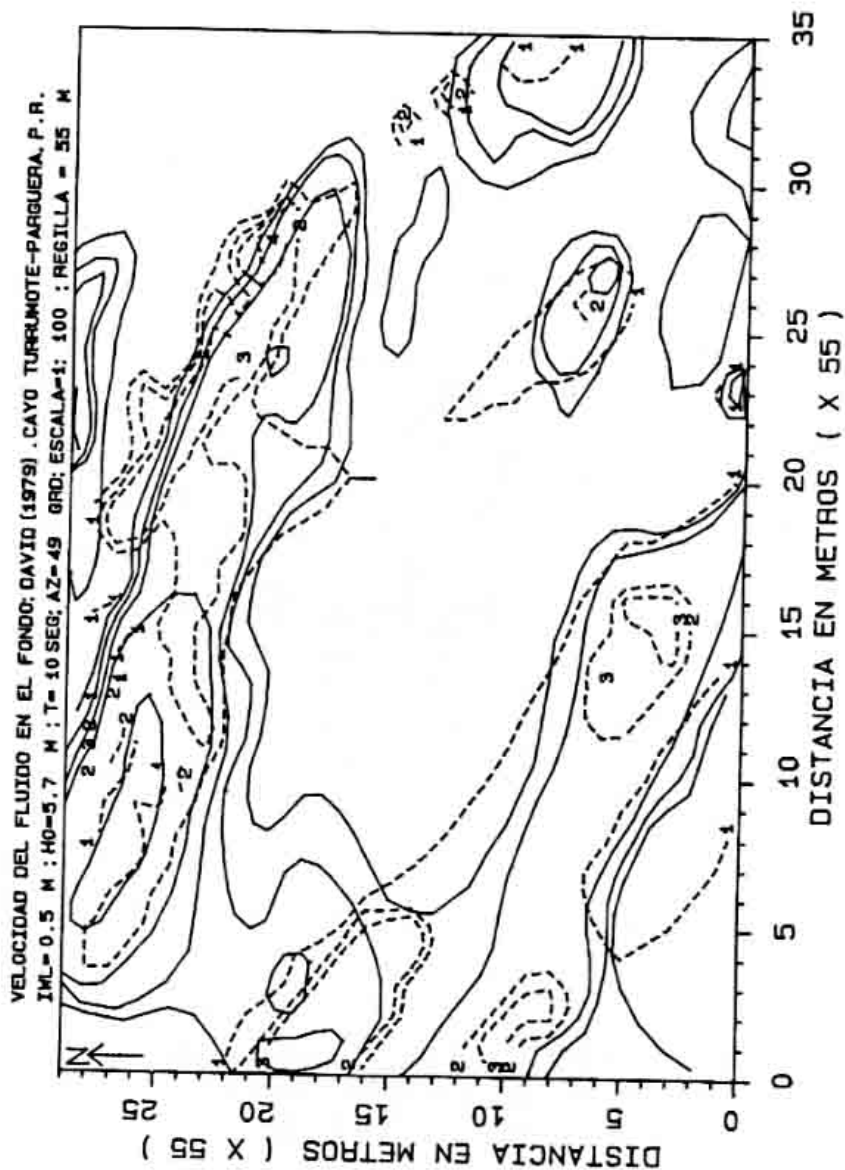


Figura 3b. Velocidad del fluido en el fondo (m/s). Huracán David a las 30 horas de simulación. Ho = 5.7 m, T = 10 s, Az = 49° (Abreviaciones en Figura 2b).

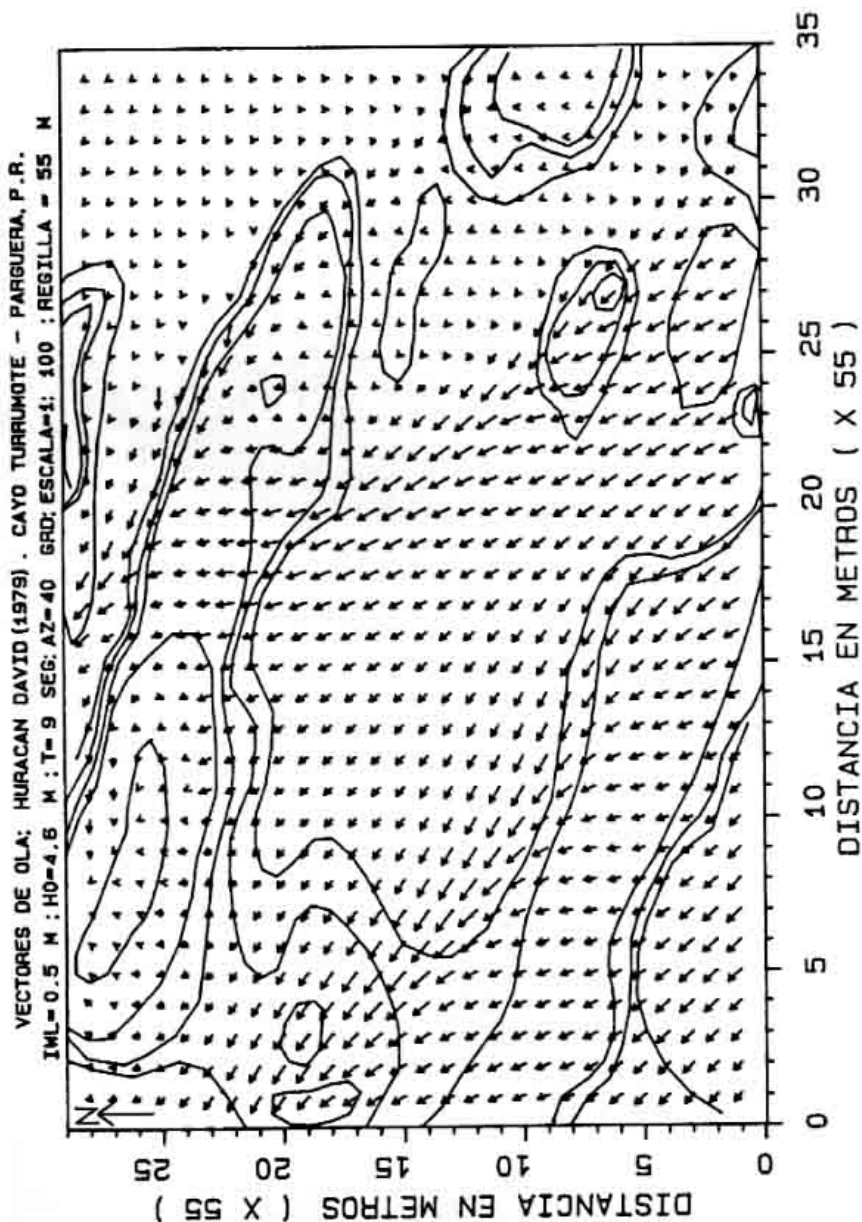


Figura 4a. Vectores de ola.

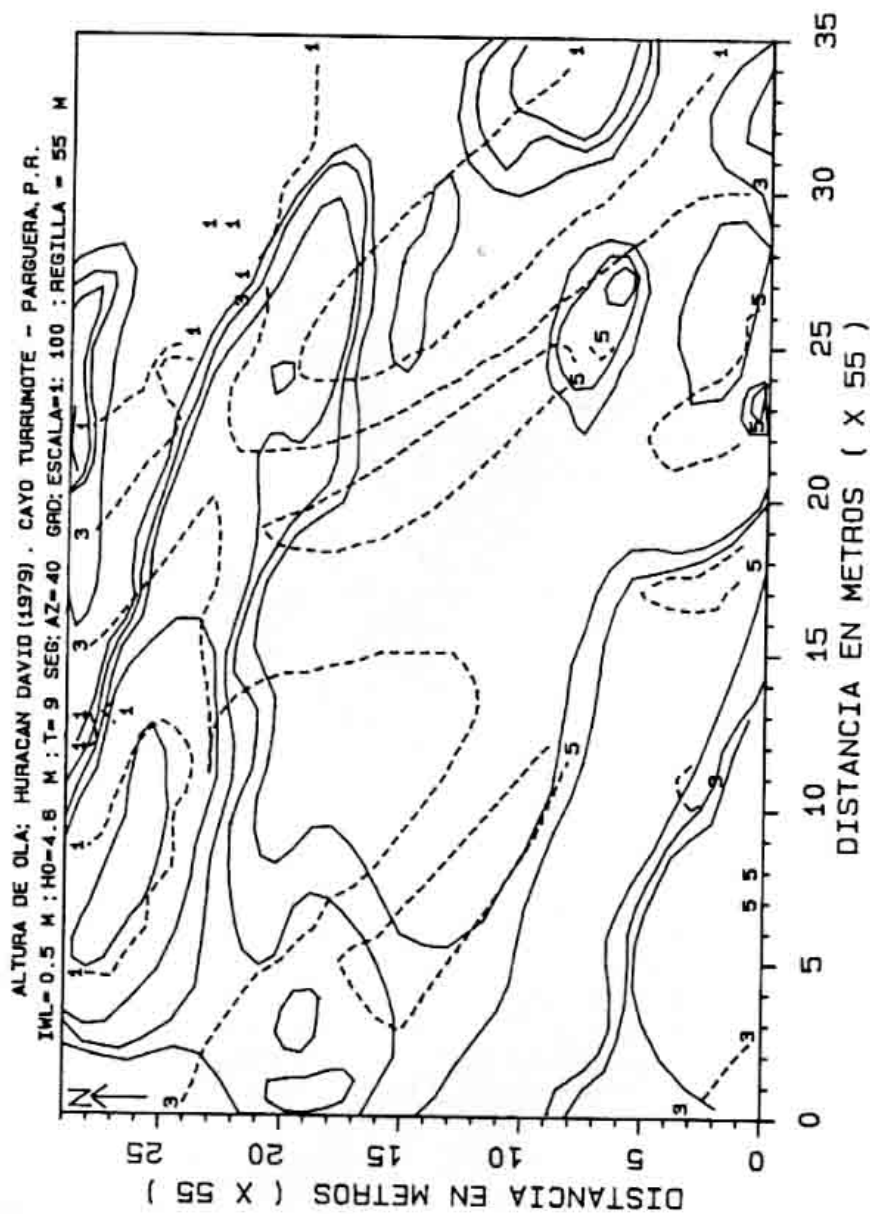


Figura 4b. Contornos de altura (m). Huracán David a las 33 horas de simulación. $H_0 = 4.6$ m, $T = 9.1$ s, $Az = 40^\circ$ (Abreviaciones en Figura 2b).

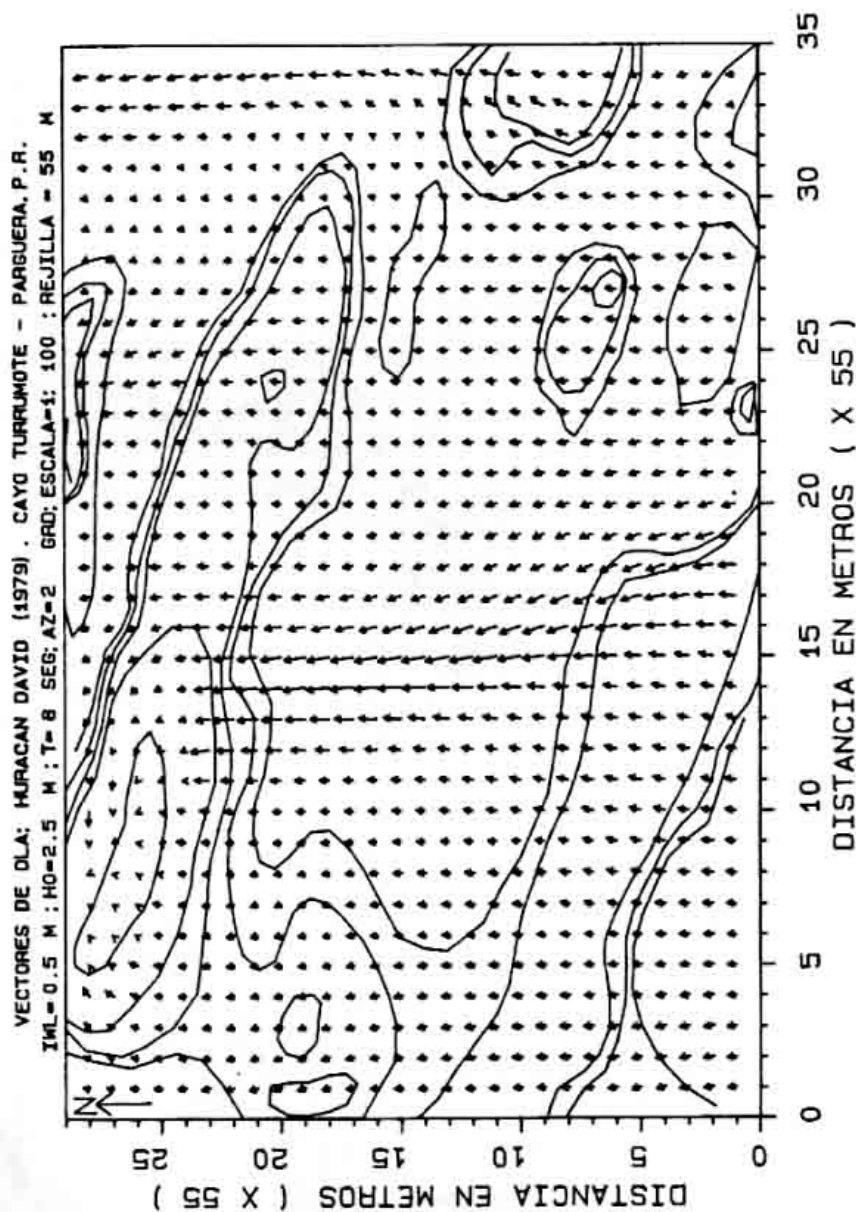


Figura 5a. Vectores de ola.

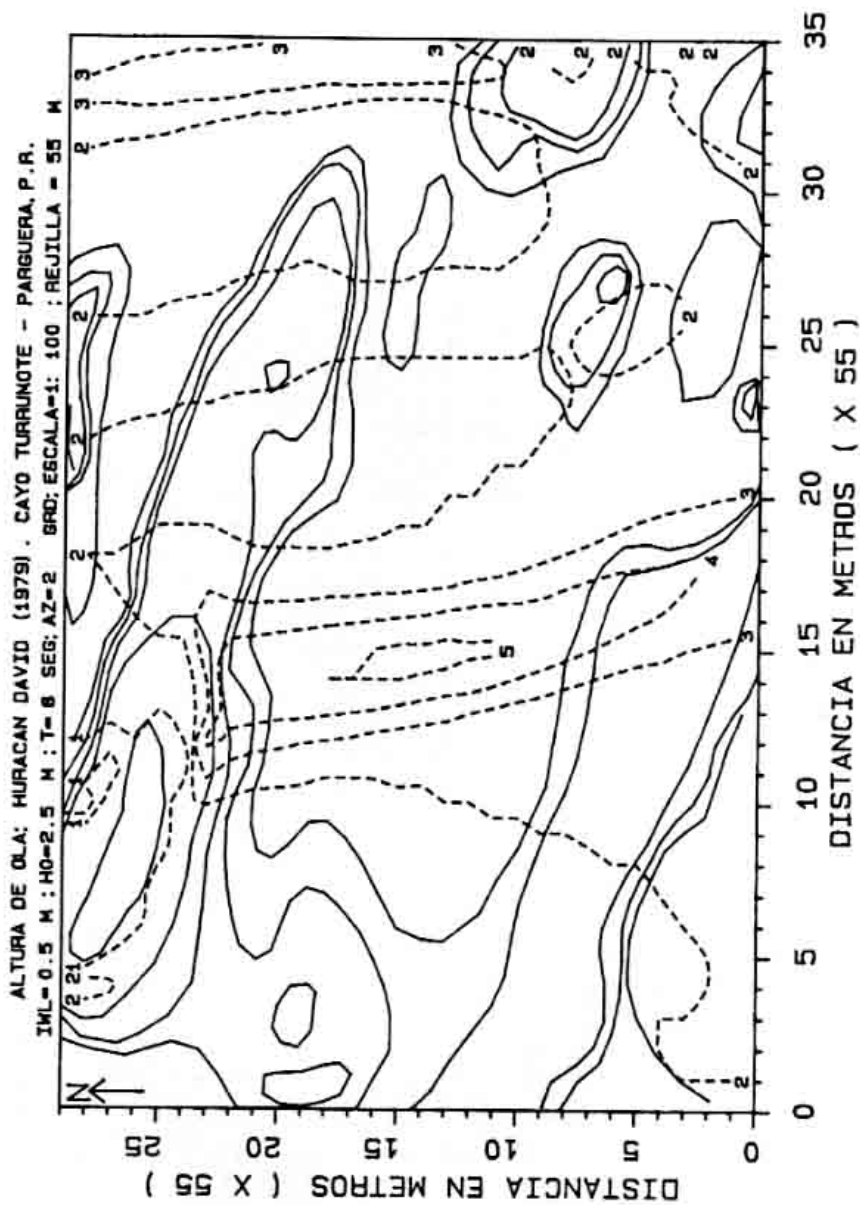


Figura 5b. Altura (m). Huracán David a las 48 horas de simulación. $H_0 = 2.5$ m, $T = 8.3$ s, $Az = 2^\circ$ (Abreviaciones en Figura 2b).

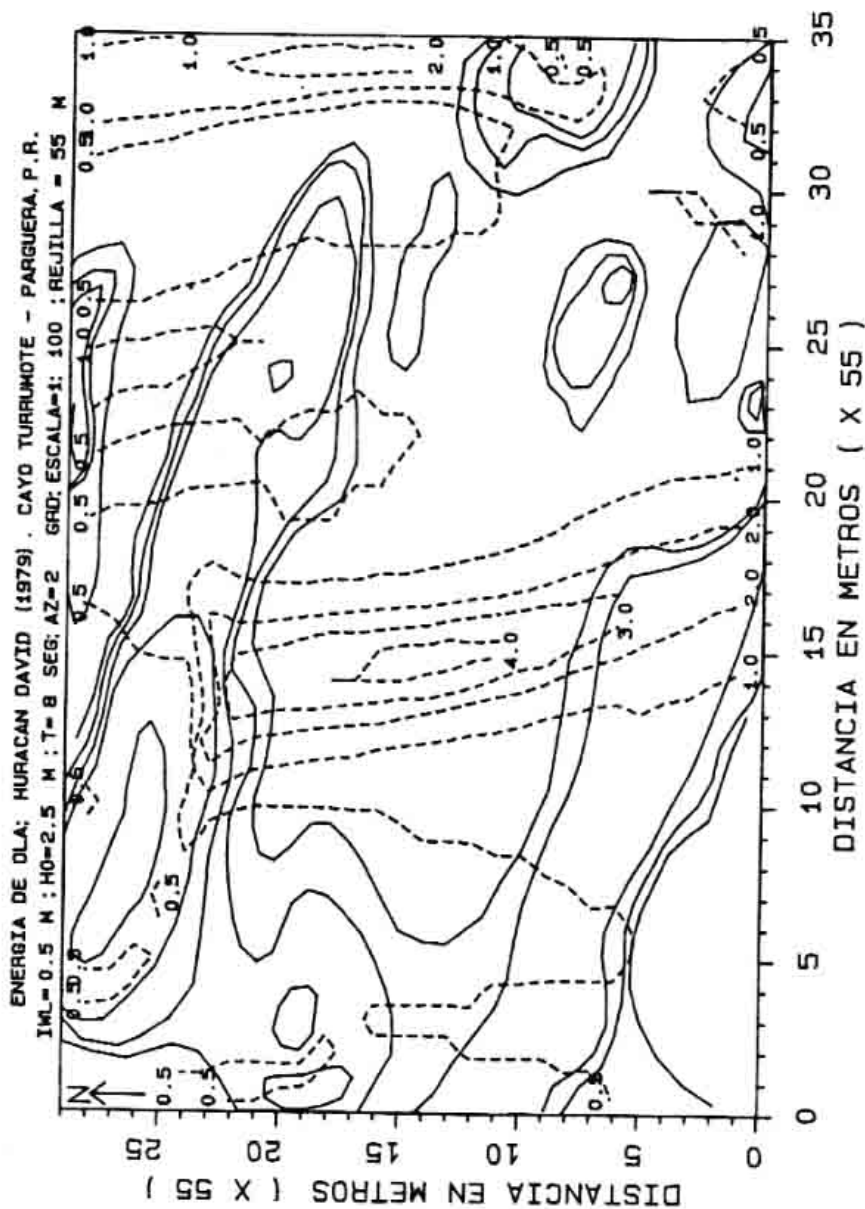


Figura 6a. Energía de ola (%).

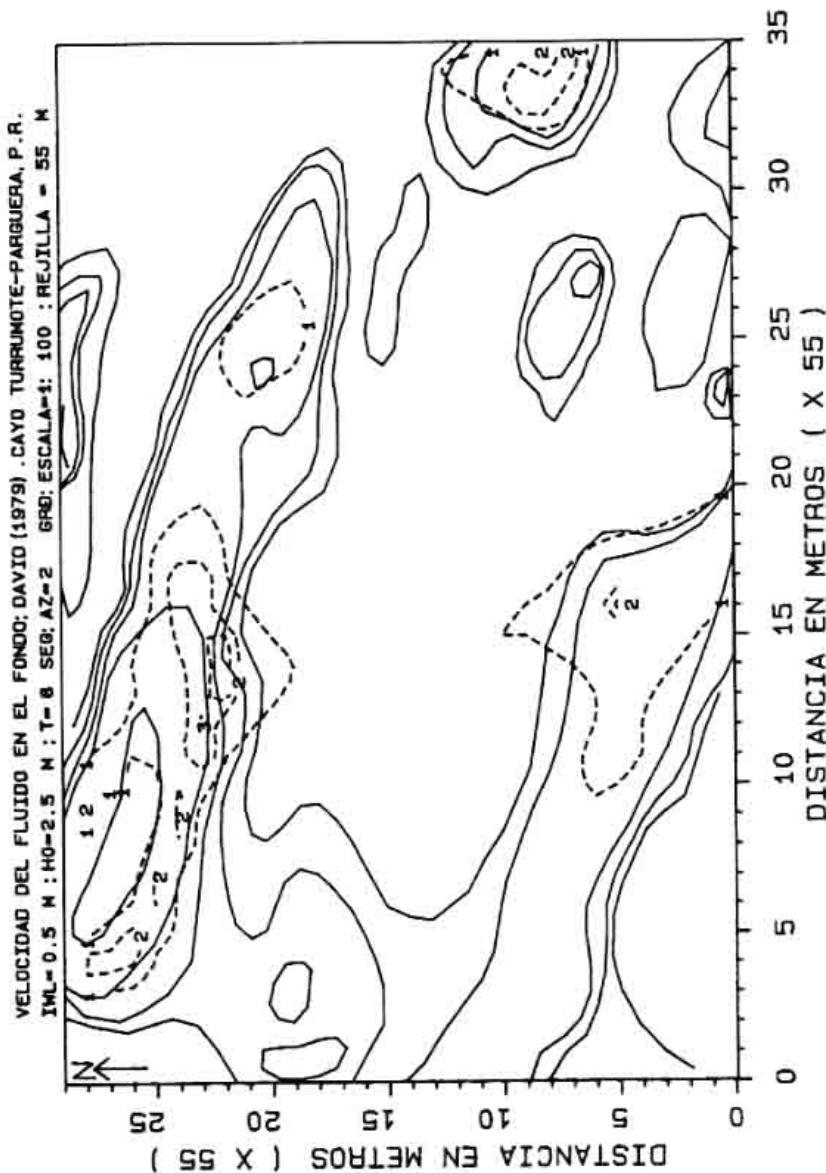


Figura 6b. Velocidad del fluido en el fondo (m/s). Huracán David a las 48 horas de simulación. $H_0 = 2.5$ m, $T = 8.3$ s, $Az = 2^\circ$ (Abreviaciones en Figura 2b).

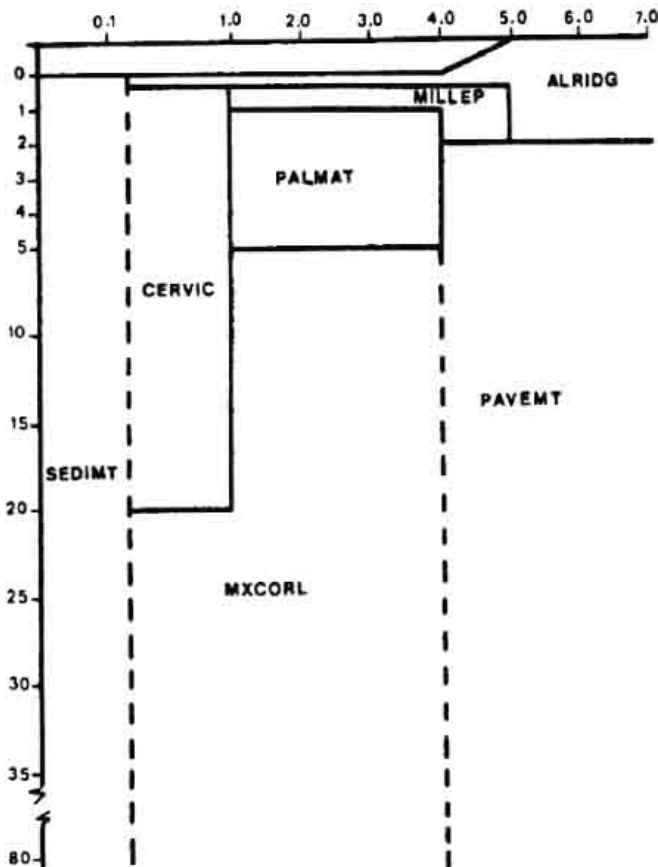


Figura 7. Intervalos de rompimiento de diferentes estructuras arrecifales bajo la acción de las olas (según Graus *et al.*, 1984). Sedimt: Zona de sedimento; Alridg: Plataforma de algas; Millep: Millepora; Palmat: Palmata; Cervic: Cervicornis; Mxcoral: Coral mixto; Pavemt: Sustrato basal.

Cooper, M.J. "Destruction of Marine Flora and Fauna in Fiji Caused by the Hurricane of February 1965", *Pacif. Sci.*, 20,137-141, 1966.

Cortés, J. y H.M. Guzmán. "Arrecifes coralinos de la costa Atlántica de Costa Rica", *Brenesia* 23,275-292, 1985.

Cortés, J. and M.J. Risk. "A Reef under Siltation: Cahuita, Costa Rica", *Bull. Mar. Sci.*, 36 (2),339-356, 1985.

Ebersole, B.A. "Refraction-Diffraction Model for Linear Water Waves", *J. of Waterways, Ports, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. III, No. 6, 939-953, 1985.

- Ebersole, B.A., Ciolone, M.A. and Prater, M.D. "Regional Coastal Processes Numerical Modeling System", Report 1, RCPWAVE. A linear wave propagation model for engineering use, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss., 72 pp., 1986.
- Goreau, T.F. "Mass Expulsion of Zooxanthellae from Jamaica Reef Communities after Hurricane Flora", *Science*, 145,383-395, 1964.
- Glynn, P.W., L.R. Almodaver and J.G. Gonzales. "Effects of Hurricane Edith on Marine Life in Parguera, Puerto Rico", *Carib. J. Sci.* 4,335-345, 1964.
- Graus, R.R., I.G. McIntyre and B.E. Herchenroder. "Computer Simulation on the Reef zonation at Discovery Bay, Jamaica: Hurricane Disruption and Long-term Physical Oceanography Controls", *Coral Reefs*, 3,59-68, 1984.
- Hernández-Avila, M.L., H.H. Roberts and L.J. Rouse. "Hurricane-Generated Waves and Coastal Boulder Rampart Formation", *Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp.*, D.L. Taylor, ed., Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, Miami, Fl., 2, 71-78, 1977.
- Johannes, R.E. "Coral Reefs and Pollution". In: *Marine Pollution and Sea Life*, Fishing News (Books), Ed. M. Ruivo, London, pp. 34-66, 1977.
- Kjerfve, B. and S.P. Dinnel. "Hindcast Hurricane Characteristics on the Belize Barrier Reef", *Coral Reefs*, 1,1-5, 1983.
- Kjerfve, B., K.E. Mafill, J.W. Porter and J.D. Woodley. "Hindcasting of Hurricane Characteristic and Observed Storm Damage on a Fringing Reef", Jamaica, West Indies, *J. Mar. Res.*, 44,119-148, 1986.
- Lizano, O.G. *Modelo de predicción de olas generadas por huracanes en el Mar Caribe*, Tesis de Doctorado, Universidad de Puerto Rico, Mayaguez, 1988.
- _____. "Pronóstico de oleaje durante el huracán David (1979) a su paso por el Mar Caribe al sur de Puerto Rico", *Ciencia y Tecnología*, 15 (1-2), 5-12, Universidad de Costa Rica, 1991.
- Lugo, A. *Wave Energy Distribution on Margarita Reef Southwestern Puerto Rico*, M.Sc. Thesis, University of Puerto Rico, Mayaguez, 1982.
- Mata, J.L. *The Effects of Hurricane David on the Benthic Algae of a Coral Reef in La Parguera, Puerto Rico*, M.Sc. Thesis, University of Puerto Rico, Mayaguez, 1981.
- SPM. *Shore Protection Manual*, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 2 Vols., 1066 pp., U.S. Government Printing Research Center, Washington, D.C., 1984.
- Woodley, J.D., E.A., Chornesky, P.A. Clifford, J.B.C. Jackson, L.S. Kaufman, N. Knoulton, J.C. Land, M.P. Pearson, T.W. Porter, M.C. Rooney, K.W. Rylaarsdam, V. J. Tunnicliffe, C.M. Whale, J.L. Wolff, A.S.G. Curtis, M. D. Dallmeyer, B.P. Jupp, M.A.R. Kochl, J. Neigel and E.M. Sides. "Hurricane Allen's Impact on Jamaican Coral Reefs", *Science*, 214,749-755, 1981.