

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

**PREDICCIÓN DE OLEAJE MEDIANTE EL MODELO
NUMÉRICO DE DENSIDAD ESPECTRO-ANGULAR
DBA**

TESIS
MAESTRO EN CIENCIAS

ROBERTO PADILLA HERNÁNDEZ

Ensenada, Baja California, México, diciembre de 1993

RESUMEN de la tesis de Roberto Padilla Hernández, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOLOGÍA con opción en OCEANOGRAFÍA FÍSICA.

Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 1993.

PREDICCIÓN DE OLEAJE MEDIANTE EL MODELO NUMÉRICO
DE DENSIDAD ESPECTRO-ANGULAR DSA.

Resumen aprobado por:

C. Nava B.

M.C. Cuauhtémoc Nava Button

El modelo numérico de predicción de oleaje conocido como Modelo de Densidad Espectro-Angular DSA es de los llamados modelos de primera generación que se caracterizan en que cada una de las componentes espectrales del oleaje evolucionan independientemente de las otras (evolución desacoplada). Este modelo fue adaptado a la estación de trabajo SUN, aumentándose la resolución espectral tanto en dirección como en frecuencia (pasando de 76 a 352 componentes). Además se modificó la física del modelo incluyendo el término de interacciones no lineales para simular la transferencia de energía entre diferentes componentes espectrales. Esto hace que la evolución del oleaje sea de manera acoplada y como consecuencia convierte al modelo DSA en un modelo de segunda generación (DSANL). Antes y después de la inclusión del término de interacciones no lineales, se hicieron experimentos numéricos con campos hipotéticos de viento propuestos por el proyecto SWAMP (1985) que van desde experimentos de advección pura y campos de viento homogéneos y estacionarios hasta campos de viento complejos como el de un huracán.

A pesar de la sencillez y naturaleza semi-empírica del modelo DSA, sus resultados son similares a los de cualquier modelo participante en el SWAMP. El modelo modificado (DSANL) simula de manera razonable la evolución acoplada del oleaje en todos los casos, excepto en el del huracán en el cual los resultados obtenidos con el DSANL son muy similares a los del DSA debido principalmente a que la parametrización empleada del término de transferencia no lineal de energía entre olas simula una interacción débil.

TESIS DEFENDIDA POR: ROBERTO PADILLA HERNANDEZ
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:

C. Nava B.

M.C. CUAUHEMOC NAVA BUTTON.- Director del Comité



DR. FRANCISCO JAVIER OCAMPO TORRES.- Miembro del Comité

Javi Javier Ochoa de la Torre.

DR. JOSE LUIS OCHOA DE LA TORRE.- Miembro del Comité



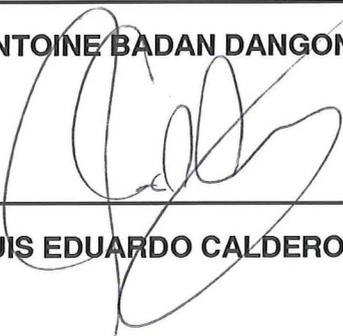
DR. JUAN MANUEL LOPEZ MARISCAL.- Miembro del Comité

José Frez C.

DR. JOSE FREZ CARDENAS.- Miembro del Comité



DR. ANTOINE BADAN DANGON.- Jefe del Departamento de Oceanografía Física



DR. LUIS EDUARDO CALDERON AGUILERA.- Director de Estudios de Posgrado

3 DE DICIEMBRE DE 1993

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISIÓN DE OCEANOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

PREDICCIÓN DE OLEAJE MEDIANTE
EL MODELO NUMÉRICO DE DENSIDAD ESPECTRO-ANGULAR DSA

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS PRESENTA:

ROBERTO PADILLA HERNÁNDEZ

Ensenada, Baja California, diciembre de 1993.

DEDICATORIA

A Lilia y al nuevo ser en nuestro seno.

A mis Padres, mis hermanos y sus retoños por todas sus muestras de amor.

A la Familia Crisóstomo Vázquez, mi nueva familia.

AGRADECIMIENTOS

AL PUEBLO DE MÉXICO por la beca otorgada a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para la realización de la maestría.

A todos mis profesores y compañeros: Tuca, Alejandro, Carmen, Yolanda, Cristóbal, Fermir, Osunac, Ligo, los Troesmas, Mochis (Javier), Ignacia, Griselda, Sonia, Sergio, Marco y Maurilio (q.e.d.), en especial a Tofito y Luis por las discusiones nocturnas.

A Julieta, Lina, Felicitas, Adriana y a todo el personal de la biblioteca por su ayuda y disposición.

A los miembros del Comité de Tesis: M.C. Cuauhtémoc Nava, Dr. Francisco J. Ocampo, Dr. José Luis Ochoa, Dr. Manuel López y M.C. José Frez por sus comentarios y correcciones a esta tesis.

A Temo por sus sugerencias, ayuda, tiempo compartido y discusiones académicas (siempre acaloradas) y a Paco por su valiosa ayuda y amistad.

Al Servicio Meteorológico de la Armada de la República de Argentina, en especial a María Paula Etala por proporcionarnos el Modelo Numérico DSA.

A quienes de alguna manera me brindaron su ayuda durante mis estudios en CICESE, a todos ellos !!GRACIAS!!.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1. Estructura cualitativa del balance espectral de la energía en el espectro unidimensional del oleaje $F(f)$ para los casos en los que se tiene: a) mínima entrada de energía hacia el campo de oleaje y una disipación despreciable en la parte principal del espectro (Hasselmann <i>et al.</i> , 1973); b) máxima entrada de energía hacia el campo de oleaje (Hasselmann, 1974), (ambas tomadas de Khandekar, 1989).	4
2. Razones de transferencia no lineal para un espectro Pierson-Moskowitz, F (línea sólida). La línea punteada denota la razón de transferencia, $\delta F/\delta t$, dada por las ecs. (21) y (22). Las cruces denotan la función de transferencia calculadas a partir de la expresión exacta de S_m (Barnett, 1968).	24
3. Campos de viento utilizados en el estudio de comparación del SWAMP; a) caso II: campo de viento homogéneo y estacionario; b) caso III: idem caso II, pero con 45° de inclinación; c) caso IV: campo de viento de medio plano; d) caso V: campo de viento estacionario con frente diagonal; e) caso VI: campo de viento del huracán.	27
4. Caso II: a) campo de viento homogéneo y estacionario; b) diagrama de vectores donde el módulo y dirección del vector indican el período y dirección de máxima energía, respectivamente; los contornos indican altura de ola en dm; c) espectros limitados en alcance a lo largo de $y = 525$ km; d) espectro bidimensional en el punto A (Figura 4a); el intervalo entre contornos es de 0.1.	33
5. Espectros totalmente desarrollados de los modelos del SWAMP Group (SG) y el DSA. Tomada de la Figura 7.2 del SG y aumentada con los resultados del DSA.	36
6. Caso II: curvas de crecimiento de la energía total E : a) limitado en alcance, b) limitado en tiempo, c) y d) son las curvas de crecimiento de la frecuencia del pico espectral f_p limitado en alcance y tiempo, respectivamente.	37
7. Secuencia temporal del desarrollo espectral en el punto A (Figura 4a); el alcance es de 975 km.	39
8. Caso III: a) campo de viento homogéneo y estacionario con 45° de inclinación, b) idem figura 4b, c) isolíneas de f_p/f_{PM} , d) diagrama de vectores donde el módulo y dirección de éstos indican la magnitud de E/E_{PM} y la dirección promedio, respectivamente.	41

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
9. Espectro bidimensional en el punto F (Figura 8a) para el caso III. Los contornos comprenden valores múltiplos de 0.1 y el espectro está normalizado respecto su valor máximo.	42
10. Caso IV: a) campo de viento de medio plano, b) idem Figura 4b, c) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección de los vectores representan el cociente E/E_{PM} y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$ respectivamente, d) espectro bidimensional normalizado en el punto C (Figura 10a).	45
11. Ubicación de los modelos en el plano de parámetros a través de los valores E_{IV}/E_{II} en los puntos A y B (caso IV Figura 10a). Tomada de la Figura 9.3 del SG y aumentada con los resultados del DSA.	47
12. Ubicación de los modelos en el plano de parámetros de E_C/E_B contra \bar{f}_C/\bar{f}_B para el caso IV. Los índices B y C se refieren a los puntos B y C (Figura 10a); las flechas con magnitud unitaria indican la dirección promedio del oleaje distal en el punto C. Tomada de la gráfica 9.5 de SG y aumentada con los resultados del DSA.	48
13. Caso V: a) campo de viento estacionario con frente diagonal, b) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección del vector indican la energía total E y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$ respectivamente, c) y d) espectros bidimensionales en los puntos B ₁ y B ₂ (Figura 13a), respectivamente.	50
14. Caso V: a) energía total E , b) relajación de la dirección promedio ($\bar{\theta}$). Ambos resultados a lo largo de $y=825$ km, tomada de la Figura 11.5 y 11.6 del SG y aumentadas con los resultados del DSA. Nótese que el alcance se incrementa hacia la izquierda (decremento de x).	51
15. Caso VI: a) campo de viento del huracán, b) idem Figura 13b, c) espectro bidimensional en el punto A (Figura 15a); los intervalos de los contornos son de 0.1.	55
16. Ubicación de la altura significativa máxima H_{max} de los modelos del SWAMP y DSA para el huracán estacionario. Las flechas apuntan hacia la dirección promedio y sus longitudes son proporcionales a H_{max} . (Figura 12.4a de SG, modificada con los resultados de DSA).	58

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
17. Caso VII: a) evolución de la densidad espectral del oleaje local y oleaje distal después del cambio en la dirección del viento, b) y c) distribuciones espectrales a las 3 y 6 hrs respectivamente, después de cambio en la dirección del viento, para un punto en el centro de la malla.	59
18. a) espectro unidimensional (F) y el término (S_{ni}) obtenido de acuerdo a Barnett (1968); b) mismo espectro F de la Figura a) y S_{ni} obtenido a partir de la expresión modificada de la parametrización de Barnett (1968); c) distribución espectral bidimensional de S_{ni} correspondiente a a); y d) distribución espectral bidimensional de S_{ni} correspondiente a b).	61
19. Caso II para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y dirección de estos indican el período y dirección de la componente de máxima energía del oleaje respectivamente y los contornos indican altura de ola en decímetros, b) espectros limitados en alcance, y c) espectro bidimensional en el punto A (Figura 4a).	65
20. Secuencia temporal del desarrollo espectral en el punto A (Figura 4a) para el DSANL; el alcance es de 975 km.	68
21. Caso III para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y dirección del vector indican el período y dirección de la componente de máxima energía, respectivamente; los contornos indican altura de ola en dm, b) isóneas de f_v/f_{PM} , c) diagrama de vectores donde el módulo y dirección de éstos indican la magnitud de E/E_{PM} y la dirección promedio, respectivamente.	69
22. Caso IV para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y dirección del vector indican el período y dirección de la componente de máxima energía, respectivamente, los contornos indican altura de ola en dm, b) diagrama de vectores donde el módulo del vector indica E/E_{PM} y su dirección, la dirección promedio del oleaje, c) espectro bidimensional en el punto C (Figura 9a).	71
23. Caso V para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección del vector indican la energía total E y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$ respectivamente, b) y c) espectros bidimensionales en los puntos B_1 y B_2 , respectivamente (Figura 13a).	73

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
24.	Caso VI para DSANL: del huracán, a) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección del vector indican la energía total E y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$, respectivamente, b) espectro bidimensional en el punto A (Figura 15a); los intervalos de los contornos son de 0.1.	76
25.	Caso VII para el DSANL: a) evolución de la densidad espectral de las frecuencias del pico espectral del oleaje local y oleaje distal después del cambio en la dirección del viento, b) y c) distribuciones espectrales a las 3 y 6 hrs respectivamente, después de cambio en la dirección del viento, para un punto en el centro de la malla.	77
26.	Esquema de la propagación puntual que realiza el modelo DSDA.	85
27.	Advección de la componente con período de 10 s. Advección a: a) 90° , b) 67° y c) 45° . Los números dentro de la gráfica a) indican el paso de tiempo los cuales son los mismos para las demás gráficas.	87

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
I.	Modelos usados en el estudio de comparación del SWAMP (SG), y el DSA.	25
II.	Razón de energía total y frecuencia del caso III respecto a las del caso II para <i>un alcance no seleccionados</i> . (Tabla 8.2 del SG incluyendo los resultados del DSA). Los subíndices II y III en E y f_p indican a que caso corresponden.	43
III.	Razón de energía total del caso IV con respecto a la energía total del oleaje limitado en alcance en el caso II para los puntos A y B (Figura 10a). Tabla 9.1 del SG modificada con los resultados del DSA.	46
IV.	Energía total, frecuencia promedio y dirección promedio del oleaje en el semiplano en calma en el punto C. (Tomada de la Tabla 9.2 del SG y aumentada con los resultados del DSA).	47
V.	Características espectrales del oleaje generado en el punto A (Figura 15a) por el DSA y algunos modelos del SWAMP.	56
VI.	Características asociadas a las alturas máximas por el DSA y los modelos del SWAMP. (Tomada de la Tabla 12.2 de SG y aumentada con los resultados del DSA).	57
VII.	Distancias recorridas por diferentes componentes y a diferentes tiempos obtenidas con el modelo DSA y con la teoría lineal.	86

CONTENIDO

	<u>Página</u>
I INTRODUCCIÓN	1
I.1 Antecedentes	2
I.1.1 Antecedentes Generales	2
I.1.2 Antecedentes del Modelo DSA	12
I.2 Objetivos	14
II MODELO NUMÉRICO DE PREDICCIÓN DE OLEAJE DSA	16
III METODOLOGÍA	21
III.1 Incremento de la Resolución en Frecuencia y Dirección	21
III.2 Parametrización del Término de Interacciones no Lineales entre olas S_{nl}	22
III.3 Modelos y Experimentos Numéricos del Grupo SWAMP	25
III.3.1 Caso I: Prueba de Advección	26
III.3.2 Caso II: Crecimiento Limitado en Alcance y Tiempo	28
III.3.3 Caso III: Alcance Inclinado	28
III.3.4 Caso IV: Campo de Viento de Medio Plano	28
III.3.5 Caso V: Frente Diagonal	29
III.3.6 Caso VI: Huracán Estacionario	29
III.3.7 Caso VII: Cambio de 90° en la Dirección del Viento	29
IV RESULTADOS Y DISCUSIONES	31
IV.1 Resultados del Modelo DSA con Propagación Desacoplada	32
IV.1.1 Caso II: Crecimiento Limitado en Alcance y Tiempo	32
IV.1.2 Caso III: Alcance Inclinado	38

CONTENIDO (continuación)

	<u>Página</u>
IV.1.3 Caso IV: Campo de Viento de Medio Plano	44
IV.1.4 Caso V: Frente Diagonal	49
IV.1.5 Caso VI: Huracán Estacionario	54
IV.1.6 Caso VII: Cambio de 90° en la Dirección del Viento	57
IV.2 Resultados del Modelo DSA con Propagación Acoplada (DSANL)	60
IV.2.1 Caso II: Crecimiento Limitado en Alcance y Tiempo	64
IV.2.2 Caso III: Alcance Inclinado	67
IV.2.3 Caso IV: Campo de Viento de Medio Plano	70
IV.2.4 Caso V: Frente Diagonal	72
IV.2.5 Caso VI: Huracán Estacionario	74
IV.2.6 Caso VII: Cambio de 90° en la Dirección del Viento	75
V CONCLUSIONES	79
LITERATURA CITADA	81
APÉNDICE	84

PREDICCIÓN DE OLEAJE MEDIANTE EL MODELO NUMÉRICO DE DENSIDAD ESPECTRO-ANGULAR DSA

I INTRODUCCIÓN

El incremento de zonas urbanas en la costa y la expansión del comercio mundial por vía marítima han creado la necesidad de conocer más y mejor los fenómenos que ocurren en los ambientes costeros y oceánicos, especialmente el fenómeno del oleaje. Una de las herramientas que han sido utilizadas en las últimas décadas para satisfacer esta necesidad es la simulación y predicción del oleaje mediante los llamados modelos numéricos de predicción del oleaje (MNPO).

El desarrollo de métodos de predicción y descripción del estado del mar ha pasado por diversas etapas. Primero se utilizó una relación entre el estado del mar y la rapidez del viento por medio de la escala de Beaufort (Khandekar, 1989). Después se desarrollaron métodos semi-empíricos en los que sobresale el uso de teorías elaboradas con una cantidad reducida de observaciones.

Recientemente, con los avances en los sistemas de cómputo, se crearon los primeros modelos numéricos en los que se supone un balance entre la entrada de energía debida al viento y la disipación de energía debida al rompimiento del oleaje en aguas profundas (MNPO de primera generación).

Posteriormente se desarrollaron modelos de segunda y tercera generación en los que se considera un balance de energía más complejo entre: 1) la entrada de energía al campo de oleaje por la acción del viento; 2) la pérdida o disipación de energía por medio del rompimiento del oleaje; y 3) el intercambio de energía entre olas mediante interacciones no lineales.

Las dos últimas generaciones de modelos (2a. y 3a.) se diferencian en que los modelos de segunda generación representan las interacciones no lineales mediante una parametrización, mientras que los modelos de tercera generación las representan mediante una integral de Boltzman desarrollada por Hasselmann (1962).

Esta evolución se ha dado en función del desarrollo de la computación electrónica existiendo a la fecha desde los MNPO más sencillos (modelos de primera generación) hasta los más complejos (modelos de tercera generación, e.g., modelo WAM). Sin embargo, aunque estos últimos son considerados como los más completos y avanzados, requieren de computadoras muy poderosas y costosas (CRAY y CIBERG) para ser usados como modelos operacionales (predicción de oleaje en tiempo real). Esto ha ocasionado que la mayoría de las agencias responsables de hacer predicciones de oleaje sigan utilizando los MNPO de primera y segunda generación, con modificaciones continuas para mejorarlos y optimizarlos sin mermar su sencillez. Este último aspecto es el tema de esta tesis.

I.1 Antecedentes

I.1.1 Antecedentes Generales

El primer estudio formal sobre análisis y predicción de oleaje comenzó durante la Segunda Guerra Mundial en respuesta a las necesidades de predicción de oleaje para el planeamiento de operaciones anfibas. Este trabajo fue comisionado por la Naval de los Estados Unidos a los Drs. H. Sverdrup y W. Munk, cuyos resultados fueron reportados en 1947. Este modelo utilizaba el Método de Altura Significante. Posteriormente en 1955 Pierson, Neumann y James desarrollaron un método para predecir las características del oleaje conocido como Método del Espectro del Oleaje (Khandekar, 1989).

Ecuación de Balance de Energía

Después de estos primeros intentos se comenzó a estudiar de manera sistemática a los fenómenos relacionados con el aumento, evolución y decaimiento de la energía del oleaje. Estos estudios fueron aprovechados para desarrollar modelos numéricos de predicción de oleaje basados en la ecuación de balance de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(f, \theta, \bar{x}, t) + \nabla \cdot (\bar{C}_g \rho) = S(f, \theta, \bar{x}, t) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad espectral de energía del campo de oleaje y es función de la frecuencia f , la dirección θ , la posición \bar{x} y el tiempo t ; \bar{C}_g es la velocidad de grupo del oleaje a la cual se propaga la energía, y S es la función fuente que representa los procesos físicos de transferencia de energía del viento hacia el oleaje, de disipación de energía y de intercambio de energía entre diferentes componentes espectrales. Esta distribución espectral $\rho(f, \theta, \bar{x}, t)$ que describe la energía contenida por cada banda de frecuencia (Δf) y por cada banda de dirección ($\Delta \theta$) es una manera conveniente y detallada de representar el oleaje y es la más común en los modelos numéricos de predicción de oleaje.

La función fuente S puede ser escrita como

$$S = S_{en} + S_{dis} + S_{nl} \quad (2)$$

Aquí S_{en} representa la energía suministrada por el viento a las olas; S_{dis} representa la disipación de energía del oleaje debida al rompimiento de las olas por saturación de energía y S_{nl} representa la transferencia de energía entre diferentes componentes del espectro, causada por las interacciones no lineales. En la Figura 1 están representados cualitativamente los tres términos de la función fuente.

El problema central en la predicción del oleaje es la formulación correcta de las funciones fuente en la ecuación de balance de energía (ecs. 1 y 2); aunque algunos procesos

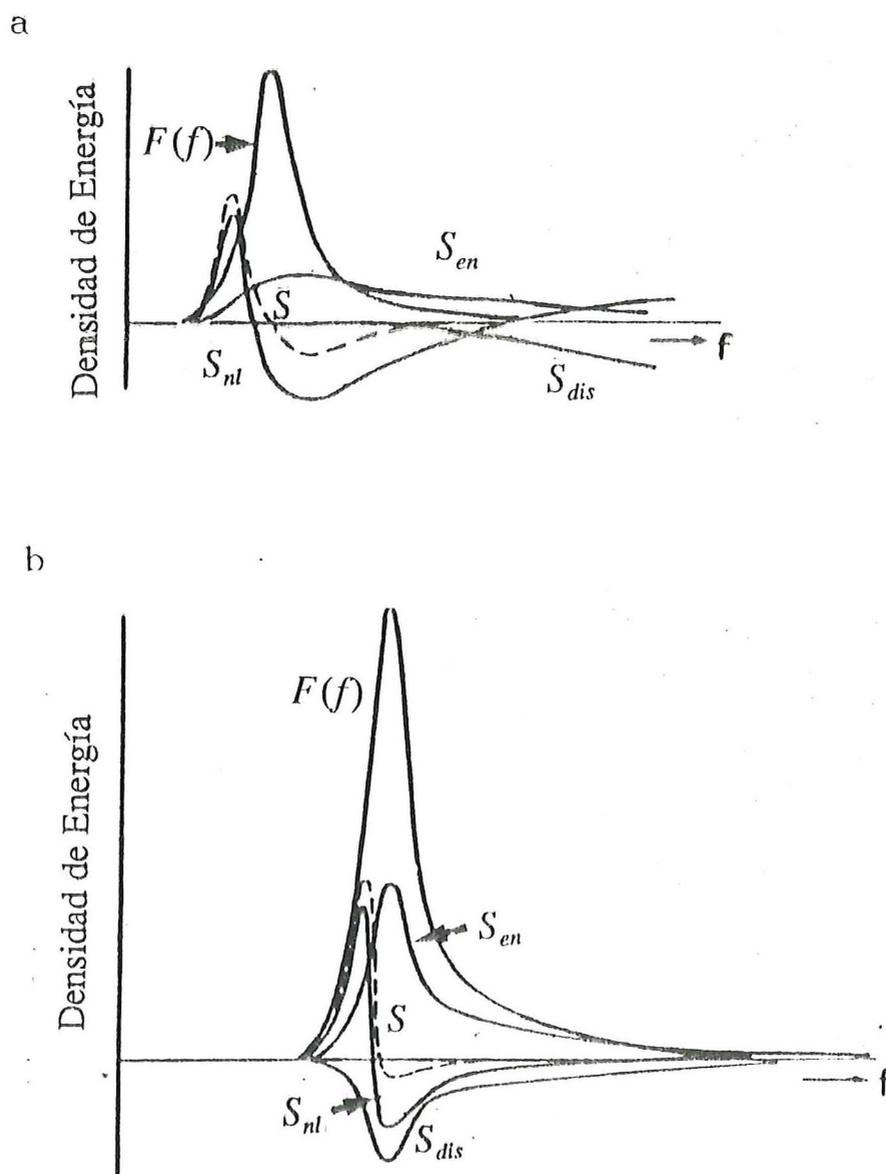


Figura 1. Estructura cualitativa del balance espectral de la energía en el espectro unidimensional del oleaje $F(f)$ para los casos en los que se tiene: a) mínima entrada de energía hacia el campo de oleaje y una disipación despreciable en la parte principal del espectro (Hasselmann *et al.*, 1973); b) máxima entrada de energía hacia el campo de oleaje (Hasselmann, 1974), (ambas tomadas de Khandekar, 1989).

se han entendido teóricamente en los límites de ondas de amplitud pequeña, aún no se comprende completamente cómo las olas ganan y pierden energía. Al igual que en el pasado, estos problemas siguen siendo superados mediante suposiciones establecidas intuitivamente.

Han surgido muchos trabajos acerca de los términos de la función fuente; la primer teoría sobre generación del oleaje surgió en el siglo pasado, a mediados del presente siglo se investigó sobre la disipación de su energía, y finalmente, acerca de la transferencia no lineal de energía entre olas. Este último término ha sido reconocido, por medio de mediciones y de la teoría, como de gran importancia para el balance de energía dentro del espectro. A continuación se citan algunos de los trabajos más relevantes encaminados a formular correctamente estos términos.

Generación y Crecimiento del Oleaje S_{en}

Entre las primeras teorías de generación del oleaje basadas en argumentos matemáticos está la teoría de inestabilidad de Kelvin-Helmholtz. Esta teoría supone que la presión del aire está desfasada en 180° con respecto a la elevación de la superficie del agua, y para rapidez de viento grande, la distribución de la presión sobre la superficie debida al efecto de Bernoulli puede causar que una onda de amplitud infinitesimal crezca en contra de las fuerzas de gravedad y tensión superficial. Esta teoría predice una rapidez crítica del viento de 6.56 m/s para la generación de las olas (Lamb, 1945 §268).

La siguiente teoría sobre generación de oleaje fue propuesta por Jeffreys (1924, 1925) (citado en Khandekar, 1989) en la cual se despreja el esfuerzo tangencial del viento y se considera que el único mecanismo importante para la transferencia de energía del viento al oleaje es la diferencia de presiones normales entre la parte trasera y delantera de la cresta de la ola.

Eckart (1953) propuso una teoría de generación del oleaje en la que la generación se lleva a cabo en una tormenta donde existen ráfagas de viento en forma circular distribuidas aleatoriamente dentro de la tormenta y moviéndose con la rapidez promedio del viento.

Las teorías más importantes sobre generación de oleaje (ya que son las más usadas en los MNPO) aparecieron simultáneamente; la de Phillips (1957) y la de Miles (1957). En su teoría, Phillips (1957) propone que la generación de las olas se debe a una distribución aleatoria de presiones normales asociadas con las ráfagas de un viento turbulento; las olas se desarrollan más rápido por medio de un mecanismo de resonancia que ocurre cuando una componente de cierto número de onda de la distribución de presión de la superficie se mueve a la misma rapidez que la componente del oleaje del mismo número de onda.

Miles (1957) describe otro mecanismo para la generación de las olas en base al flujo cizallante $U(z)$ del viento (donde z es la altura) y encuentra que la razón a la cual la energía es transferida del viento hacia las olas de rapidez c es proporcional a la curvatura del perfil, $-U''(z)$, en la elevación donde $U = c$; ésto da como resultado el crecimiento exponencial del oleaje de amplitud infinitesimal (este crecimiento no permanece exponencial a medida que la amplitud aumenta).

Miles (1957) mencionó que su teoría puede ser un complemento al mecanismo propuesto por Phillips (1957). Así, algunos MNPO recientes (Barnett, 1968; Ewing, 1971; Gunther *et al.*, 1979 y Golding, 1983) incluyen el término de generación como un término compuesto por un crecimiento lineal (el de Phillips, 1957) y un crecimiento exponencial (el de Miles, 1957). El término de crecimiento lineal es efectivo sólo en el estado incipiente de la generación del oleaje y, después de ésto, se utiliza la función de crecimiento de Miles.

Young (1988) no utilizó un mecanismo de generación de oleaje, sino un espectro "semilla" y basa la entrada de energía en el mecanismo de Miles (1957) modificado por Snyder *et al.* (1981); esta modificación está fundamentada en el análisis de mediciones de campo. En el modelo WAM (The WAMDI Group, 1988) se adaptó la función fuente de entrada de energía dada por Snyder *et al.* (1981) escalada en términos de la velocidad de fricción según Komen *et al.* (1984).

Disipación de Energía S_{dis}

El crecimiento del oleaje bajo la influencia del viento no puede crecer de manera indefinida y las interacciones no lineales del oleaje son generalmente incapaces de extraer energía de una banda de frecuencia dada tan rápido como entra la energía a partir del viento excepto, posiblemente, cerca del pico espectral (ver Figura 1). Por lo tanto el tamaño de las olas debe estar limitado por otro proceso, que es el del rompimiento del oleaje por saturación de energía. Dentro de la zona de generación del oleaje este proceso es de primera importancia para el balance de energía en el espectro.

Phillips (1958) propuso una forma funcional del espectro para el intervalo de frecuencias donde ocurre el rompimiento por saturación, conocido como el "intervalo de equilibrio". Sin embargo en la actualidad es generalmente reconocido que no existe un espectro universal de equilibrio en frecuencias altas de la forma en que Phillips lo propuso (Kitaigorodskii, 1986; The WAMDI Group, 1988).

Por lo general el término S_{dis} es representado mediante un espectro límite (espectro de saturación) cuya forma varía de modelo a modelo. Barnett (1968) utilizó la fórmula propuesta por Phillips (1958); Young (1988) utilizó un espectro de saturación como el límite máximo de crecimiento dentro de un intervalo de frecuencias en lugar de una forma analítica de S_{dis} . Resio (1981) también utilizó un espectro de saturación (el espectro Kitaigorodskii). En el modelo WAM (The WAMDI Group, 1988) la disipación está basada en una función modificada a la propuesta por Komen *et al.* (1984), y no existe en este modelo ninguna suposición *a priori* acerca de la forma espectral.

Transferencia no Lineal de Energía entre Componentes del Oleaje S_{nl}

Los modelos de primera generación no incluyen el término de interacciones no lineales S_{nl} y en su formulación se supone que la evolución del espectro de energía está controlada por el balance entre la energía aportada por el viento (S_{en}) y la energía disipada por rompimiento del oleaje en aguas profundas (S_{dis}). Sin embargo, éstos modelos no pueden

reproducir adecuadamente algunas características de los espectros de las olas observadas en la naturaleza como: 1) el rápido crecimiento de energía en las frecuencias bajas, 2) el fenómeno de sobresaturación, y 3) la evolución del espectro ante cambios bruscos espaciales y temporales en el campo de viento.

Hasselmann *et. al.*, (1973) asocian estas características, así como el desarrollo de un pico de energía pronunciado que migra hacia frecuencias bajas, a la transferencia de energía de frecuencias altas hacia frecuencias bajas ocasionada por las interacciones no lineales (resonantes) entre las componentes del espectro.

Hasselmann (1962) mostró que el balance de energía en el espectro es más complejo que el supuesto en los primeros MNPO y que el término de interacciones no lineales entre olas juega un papel muy importante en la forma y evolución del espectro.

Phillips (1960) mostró que bajo ciertas condiciones, las perturbaciones de tercer orden pueden llegar a ser significativamente grandes e inestables. Estas condiciones, llamadas condiciones de resonancia, están dadas por

$$k_1 \pm k_2 \pm k_3 \pm k_4 = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_1 \pm \sigma_2 \pm \sigma_3 \pm \sigma_4 = 0$$

donde cada pareja (σ_i, k_i) corresponde a la frecuencia y número de onda de olas que satisfacen la relación de dispersión

$$\sigma^2 = g h \tanh(kh) \quad (4)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y h es la profundidad medida desde el nivel medio del agua.

Phillips (1960) mostró que existe una configuración de tres números de onda k_1, k_2 y k_3 que interactúan para transferir continuamente energía a una cuarta componente de número de onda k_4 cuya amplitud crece linealmente con el tiempo.

Hasselmann (1962) desarrolló la ecuación de transferencia de energía

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} E(k_4) = & \int \int \int_{-\infty}^{\infty} \frac{9\pi g^2 \sigma_4 D_4}{4\zeta_w^2 \sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 \sigma_4^2} \{D_4 \sigma_4 E_1 E_2 E_3 + D_3 \sigma_3 E_1 E_2 E_4 \\ & - D_2 \sigma_2 E_1 E_3 E_4 - D_1 \sigma_1 E_2 E_3 E_4\} \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) \\ & \cdot \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k_4) dk_1 dk_2 dk_3 \end{aligned} \quad (5)$$

donde $E_j = E(k_j)$ es la energía del tren de olas con número de onda k_j , D_j son los coeficientes de acoplamiento y están en función de los números de onda de k_1 a k_4 y de las funciones delta, $\delta()$, ζ_w es la densidad del agua.

Las interacciones resonantes no pueden considerarse como fuente de generación o disipación de energía ya que no cambian la energía total de las olas. Sin embargo, este término es la fuente principal de energía (en lugar del aporte directo del viento) en las frecuencias bajas (cara delantera del espectro) transfiriendo energía de las componentes de frecuencias altas hacia las frecuencias bajas (Figura 1).

Hasselmann (1962) mencionó que las interacciones no lineales también podrían jugar un papel importante en el amortiguamiento del oleaje distal al atravesar éste por una zona de generación de oleaje.

Estudios recientes hechos por Hasselmann y Hasselmann (1985) y Hasselmann *et. al.*, (1985) han demostrado que las integrales de Boltzmann de la ec. (5) pueden ser evaluadas completamente usando un algoritmo eficiente de integración, el cual puede ser manipulado por la presente generación de supercomputadoras. Esto ha llevado al desarrollo de la tercera generación de modelos de oleaje operacionales.

La evaluación del término de interacciones no lineales plantea grandes problemas debido a los requerimientos de cómputo para su cálculo, sin embargo su inclusión en los MNPO es importante debido a la necesidad de mejorar tanto el conocimiento del fenómeno del oleaje como nuestras predicciones.

Como consecuencia de los problemas en los requerimientos de cómputo para evaluar la ec. (5) muchos modelos actuales (de segunda generación) siguen utilizando una parametrización de dicho término.

Hasselmann y Hasselmann (1985) mencionan las principales características de la transferencia de energía por interacciones no lineales y, además, que su simulación satisfactoria es un requerimiento importante para cualquier esquema de parametrización. En resumen, las propiedades son las siguientes:

- 1) S_{nl} tiene típicamente una distribución en frecuencia con tres lóbulos positivo-negativo-positivo (entrada-salida-entrada de energía). La ubicación y magnitud del lóbulo positivo en frecuencias bajas depende en gran medida de la forma espectral, y esto es una característica que gobierna la evolución del espectro del oleaje.
- 2) El lóbulo positivo (entrada de energía) en las frecuencias altas tiende a tener una distribución direccional más ancha que los otros dos lóbulos.
- 3) El lóbulo positivo en frecuencias bajas está concentrado en una banda de frecuencia angosta y también tiene una relativa distribución direccional angosta.
- 4) Las interacciones son en un intervalo relativamente pequeño en el espacio de los números de onda, por lo que las razones de transferencia más grandes se encuentran cercanas al pico espectral, particularmente para espectros angostos.

Clasificación de los MNPO

Debido a la gran importancia del término S_{nl} en la física del oleaje los MNPO se han clasificado de acuerdo a la manera en que se representa ese término. Los MNPO de primera generación consideran la evolución del espectro como un balance entre S_{en} y S_{dis} sin considerar el término S_{nl} . Por ésto a esos modelos se les conoce como modelos con propagación desacoplada; en esta clasificación está el modelo DSA (Gelci *et al.*, 1957).

Los MNPO de segunda generación son los que representan el término S_{nl} en forma parametrizada basándose en la forma del espectro. Estos se dividen a su vez en dos subclases: Modelos Híbridos Acoplados (MHA) y Modelos Discretos Acoplados (MDA).

Los MHA representan la región del espectro del oleaje local (frecuencias altas) en forma paramétrica y el oleaje distal en forma discreta; en esta clasificación está el modelo de Gunter *et al.*, (1979). Los MDA mantienen la representación espectral discreta tradicional para todo el espectro; en esta clasificación está el modelos de Barnett (1968); Ewing (1971); Resio (1981); Golding (1983) y el de Young (1988).

La inclusión del término S_{nl} en forma parametrizada generalmente mejora las predicciones en los modelos de segunda generación comparados con los de primera; sin embargo, debido al número relativamente pequeño de parámetros usados para calcular el término S_{nl} , los modelos de segunda generación tienen dificultades para representar el espectro complejo generado por campos de viento que cambian rápidamente (Young, 1988).

En 1985 se llevó a cabo un estudio de comparación de MNPO, el Proyecto SWAMP (Sea WAve Model Project) para esclarecer las similitudes y diferencias existentes entre los modelos desarrollados para predicción de oleaje en tiempo real, compilar estadística de oleaje y estudios de validación (The SWAMP Group, 1985, de aquí en adelante SG). Las pruebas de los modelos participantes en el proyecto SWAMP se llevaron a cabo con campos hipotéticos de viento que van desde el más sencillo (viento homogéneo y estacionario) hasta campos complejos (huracán estacionario y en movimiento). Se propuso, al final de las pruebas, que debía desarrollarse un modelo de tercera generación, en el que el espectro fuera calculado a partir solamente de la integración de la ecuación de transporte, sin restricciones *a priori* del espectro.

En 1988 el grupo WAMDI presentó su modelo de tercera generación dentro del marco del WAve Modeling program (WAM) indicando que el cálculo exacto de las interacciones no lineales en el espectro consumen demasiado tiempo de computadora, aún en las computadoras vectoriales disponibles (The WAMDI Group, 1988).

Los modelos de tercera generación son muy caros computacionalmente y aunque los modelos de primera y segunda generación tienen menos física del fenómeno del oleaje son más baratos y su exploración resulta muy interesante sobre todo si se trata de hacer cambios para mejorarlos.

Actualmente la mayoría de los MNPO que se usan en forma operacional son de primera y segunda generación, como por ejemplo: el Operational Spectral Ocean Wave Model (SOWM) usado por la Naval de los EUA desde 1974 (en 1985 se hizo una nueva versión del SOWM con malla global llamado GSOWM); el modelo GONO (GOLven NOordzee) usado operacionalmente en el *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut* (KNMI) y el modelo BMO desarrollado en el *British Meteorological Office* (BMO), ambos modelos son de segunda generación y son aplicados en el Atlántico del Norte, (Khandekar, 1989).

El modelo DSA que es de primera generación es usado operacionalmente en Francia y en la República de Argentina.

1.1.2 Antecedentes del MNPO DSA

El modelo de predicción de oleaje DSA fue uno de los primeros modelos espectrales discretos basados en la ec. (1). Fue reportado por Gelci *et al.* en 1957 pero ya se tenía en operación un año antes en el Centro Meteorológico de Casablanca (Gelci y Chavy, 1978).

A este modelo se le conoce como Modelo de Densidad Espectro-Angular (DSA), y está basado en tres términos fuente: un término teórico de advección, uno de generación y otro más de disipación. Los dos últimos fueron ajustados empíricamente para reproducir la dependencia del crecimiento en alcance (D) y duración observadas.

Al Modelo DSA se le han hecho mejoras a través del tiempo; en su primera y segunda versión (DSAI y DSAIL), el modelo hacía predicciones en un sólo punto, en el cual el campo de viento en espacio y tiempo era obtenido a partir de cartas construidas de observaciones. Además se usaba un diagrama de propagación para el cálculo de la advección y las razones de cambio de la energía espectral.

Con la invención de las computadoras se diseñó una malla numérica para el modelo DSA resultando las versiones DSAIII y DSAIV (Lebel y Gelci, 1959). Gelci *et al.*, (1963) compararon resultados del DSAIII con análisis del oleaje del KNMI y concluyen que los resultados son aceptables y que las discrepancias provienen generalmente de errores en la estimación del viento. Posteriores modificaciones del DSA han sido reportadas por Gelci y Cazale (1962).

Savina y Fons (1966) describen el Modelo DSAV indicando que esta versión resultó de dos mejoras: una relativa al tratamiento de la propagación, la otra acerca de la naturaleza del término del amortiguamiento. Fons (1966) describe las generalidades del modelo DSAV y hace un desglose de los errores cometidos al hacer la predicción con el modelo y compararlos con campo reales de oleaje.

Gelci y Chavy (1978) presentan las características operacionales del DSAV y hacen tres tipos de comparaciones con sus resultados: la primera comparación con resultados del modelo de Barnett, siendo muy similares; la segunda comparación es con el análisis sinóptico del KNMI, notándose diferencias en los resultados en varias zonas del área de predicción, y la tercera comparación es con datos de oleaje registrados en distintas localidades, observándose que el modelo sobrestima la energía en frecuencias medias y la subestima en frecuencias altas y bajas.

El presente trabajo surgió de un convenio de cooperación entre el Servicio Meteorológico de la Armada de la República de Argentina (SMARA) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESSE). El objetivo general del convenio es el de avanzar en el conocimiento de la dinámica de las olas oceánicas y en particular adaptar y mejorar un modelo de predicción de olas a escala regional para proveer información necesaria para el tratamiento de problemas relativos a ingeniería de costas y procesos de erosión de playas.

El modelo numérico DSA utilizado en esta tesis fue gentilmente proporcionado por el SMARA. En su versión original el modelo consideraba sólo 6 bandas de período (4, 7, 10,

13, 16 y 19 segundos). La banda de los 4 s tenía 4 direcciones, la banda de los 7 s con 8 y las demás bandas con 16 direcciones, con lo cual el modelo consideraba un total de 76 componentes.

El modelo DSA es de primera generación (propagación desacoplada) el cual toma en cuenta dos términos fuente; uno que simula la ganancia de energía del oleaje por el viento y otro que simula la disipación de energía por rompimiento en aguas profundas. El modelo puede ser forzado con vientos hasta de 80 nudos con resolución de 5 nudos.

I.2 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es el de adaptar y mejorar el modelo DSA (versión V) aumentando su resolución tanto en frecuencia como en dirección e incluyendo un término que represente paramétricamente la transferencia de energía por interacciones no lineales. Para lograr lo anterior se proponen los siguientes objetivos específicos:

- a) Adaptar el MNPO de Densidad Espectro-Angular (**Modelo DSA**) de primera generación en una estación de trabajo SUN.
- b) Mejorar la resolución del espectro de energía del oleaje simulado por el modelo tanto en frecuencia como en dirección aumentando de 6 a 22 bandas de frecuencia con 16 direcciones cada una de ellas.
- c) Incluir un término de transferencia de energía entre olas debido a interacciones no lineales, es decir, convertirlo a un modelo de segunda generación (**Modelo DSANL**).
- d) Hacer experimentos numéricos con el DSA y DSANL utilizando los campos hipotéticos de viento propuestos por el Grupo SWAMP (SG), comparar los resultados entre ellos y con los resultados de los MNPO participantes en el proyecto SWAMP.
- e) Evaluar el potencial del modelo así modificado.

En el capítulo siguiente se describe el modelo numérico DSA y se presentan las suposiciones en las cuales fue fundamentado el modelo DSA por GELCI *et al.* (1957) y Lebel y Gelci (1959).

En el capítulo tres se presenta la metodología empleada para llevar a cabo los objetivos propuestos, es decir, se explica el aumento de resolución en dirección y frecuencia, la forma paramétrica utilizada para representar las interacciones no lineales y los experimentos propuestos por el SWAMP.

En el capítulo cuatro se describen y discuten los resultados. Primero los resultados obtenidos con el modelo DSA (modelo con propagación desacoplada) comparándolos con los obtenidos por los modelos del SWAMP. Luego se presentan los resultados del modelo DSANL, es decir, el DSA con el término no lineal S_{nl} incluido (modelo con propagación acoplada) y se comparan, principalmente, con los resultados del modelo original (DSA). Las conclusiones se exponen en el capítulo cinco.

II MODELO NUMÉRICO DE PREDICCIÓN DE OLEAJE DSA

El MNPO DSA se basa en una doble descomposición de la energía del oleaje; una en función de la frecuencia (espectro) y otra en función de la dirección (angular). A cada una de estas componentes $\rho(f, \theta)$ se le conoce como densidad espectro-angular.

La energía total E , con la cual se puede calcular una altura característica de las olas, se obtiene integrando la densidad espectro-angular, es decir,

$$E(x, t) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho(f, \theta, x, t) df d\theta \quad (6)$$

donde f es la frecuencia, θ la dirección de propagación, \bar{x} la ubicación en el espacio y t el tiempo.

El modelo está basado en las siguientes hipótesis (Lebel y Gelci, 1959):

- 1) Hipótesis de propagación independiente.

Cada tren de onda (también llamada componente) se propaga independientemente de los otros trenes de onda dentro de su dirección y con su rapidez de grupo $C_g = g/(4f\pi)$ correspondiente (g es la aceleración de la gravedad).

- 2) Hipótesis de crecimiento independiente.

La amplitud de una componente dada varía bajo el efecto del viento; crece con un viento favorable y disminuye con un viento contrario. Se supone que el crecimiento de las olas no depende de la amplitud real de la componente considerada sino de la magnitud y dirección del viento.

Estos mismos autores critican sus hipótesis y mencionan que la primera es clásica y es el resultado de la linealización de las ecuaciones de onda al considerar sólo olas de amplitud pequeña. En cuanto a la segunda ellos la consideran cuestionable, pues el intercambio de energía entre el viento y una componente dada depende, *a priori*, del estado del mar, es decir, de la suma de todas las componentes.

Si se considera un viento que sopla durante cierto tiempo sobre un mar inicialmente en calma, y según las suposiciones en las cuales se basa el modelo semi-empírico DSA (Savina y Fons, 1966), se pueden observar tres fases sucesivas:

- 1) Crecimiento de la energía del oleaje.
- 2) Propagación del oleaje en la dirección del viento.
- 3) Aparición gradual del amortiguamiento.

La variación de la energía en cada caso es proporcional al tiempo, con lo que para un punto i de la región considerada se tiene

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \Pi_i + \Phi_i + \Psi_i \quad (7)$$

donde Π es el término de propagación, Φ es el término de ganancia de energía y Ψ es el término de amortiguamiento.

La Propagación (Π)

La función Π propaga la energía de una componente de un punto a otro transportándola dentro de su dirección y con la rapidez de grupo C_g correspondiente a su frecuencia f dada por

$$C_g = \frac{g}{4f\pi} \quad (8)$$

Así en el instante t la densidad espectro-angular considerada al inicio del cálculo en el punto (x, y) es la que viene de un punto vecino, es decir,

$$\rho_i(x, y, f, \theta) = \rho_{i-dt}(x - C_g \cos \theta dt, y - C_g \sen \theta dt, f, \theta) \quad (9)$$

entonces

$$\Pi = -\bar{C}_g \cdot \nabla \rho \quad (10)$$

El Crecimiento (C)

El crecimiento de dos diferentes componentes espectrales del oleaje se debe al forzamiento directo del viento y al intercambio de energía entre ellas, por lo que el crecimiento C se puede expresar como $C = \Phi + S_{nl}$ donde Φ es el término de crecimiento debido al forzamiento del viento y S_{nl} representa al crecimiento de cualquier componente espectral debido al intercambio de energía con otras componentes. Sin embargo, por falta de teoría y datos sobre el término de interacciones no lineales, este último no fue considerado en el modelo DSA (Savina y Fons 1966).

El crecimiento Φ está definido como una función de la rapidez del viento (W), de la diferencia entre la dirección (θ) de una componente del oleaje y la dirección del viento (ω), y también como función de la frecuencia (f), es decir,

$$C = \Phi(W, |\theta - \omega|, f) \quad (11)$$

La forma de la función Φ está determinada experimentalmente con los siguientes límites:

- Para un viento inicialmente nulo que se establece repentinamente con una rapidez W , la frecuencia con mayor energía f_p (frecuencia del pico espectral) queda determinada por la relación $(f_p)_{inicial} \sim 5/W$.
- En régimen de viento permanente f_p tiende a $3/W$.
- La frecuencia mínima del espectro es $\sim 2/W$.

Donde W está dada en nudos y f en Hz y las constantes 5, 3 y 2 tienen unidades de [nudos Hz].

Con estas condiciones Φ toma la forma

$$\begin{aligned} \Phi(W, 0, f) &= \alpha f^{-2} (W - 2/f)^3 = P(f, W) & f > 2/W \\ &= 0 & f \leq 2/W \end{aligned} \quad (12)$$

El coeficiente α es función de W y se determinó por un análisis dimensional, obteniéndose

$$\alpha(W) \sim \frac{10^{-2}}{2W} \quad (13)$$

Para expresar Φ en función de $|\theta - \omega|$ se toma en consideración que para un viento transversal al oleaje ($|\theta - \omega| = 90^\circ$) las olas no reciben energía y la energía recibida es mayor cuanto menor sea $|\theta - \omega|$, entonces

$$\Phi(W, |\theta - \omega|, f) = P(f, W) \delta(|\theta - \omega|) \quad (14)$$

donde δ es la función de distribución angular de energía definida como

$$\begin{aligned} \delta(|\theta - \omega|) &= \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \omega) & |\theta - \omega| < \frac{\pi}{2} \\ &= 0 & |\theta - \omega| > \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

esta distribución angular cumple

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \delta(|\theta - \omega|) d(\theta - \omega) = \frac{1}{2} \quad (16)$$

Finalmente, la función Φ se escribe como

$$\Phi(W, |\theta - \omega|, f) = \frac{10^{-2}}{\pi W} f^{-2} (W - 2/f)^3 \cos^2(\theta - \omega) \quad f > 2/W$$

$$= 0 \quad f \leq 2/W$$
(17)

f esta dada en [Hz] y W en [nudos], y las constantes 10^{-2} en [$m^2/(s^2 \text{ nudos}^2)$] y 2 en [nudos Hz], entonces Φ está expresada en [m^2/rad].

El Amortiguamiento (Ψ)

Savina y Fons (1966) suponen que el amortiguamiento es proporcional a la densidad de energía de la componente $\rho(f, \theta)$, a la energía total del espectro (E), y a la cuarta potencia de la frecuencia considerada, o sea

$$\Psi = -A f^4 \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho df d\theta \quad (18)$$

donde A es una constante de amortiguamiento ($A = 0.016 \text{ s}^3/m^2$) y Ψ en [m^2/rad].

Utilizando las ecuaciones (10), (17) y (18) la ecuación general de la evolución de la densidad espectro angular puede escribirse finalmente como

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\bar{C}_g \cdot \nabla \rho + \frac{10^{-2}}{\pi W} f^{-2} (W - 2/f)^3 \cos^2(\theta - \omega) - A f^4 \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho df d\theta \quad (19)$$

La formulación de las ecuaciones anteriores carecen de rigurosidad física pero como se dijo antes, el modelo DSA es un modelo semi-empírico el cual está justificado por sus resultados.

III METODOLOGÍA

Se hicieron principalmente dos cambios en el modelo DSA; uno para tener una distribución espectral más detallada, aumentando la resolución en frecuencia y dirección (sección III.1); el otro en la física del oleaje que el modelo considera introduciendo un término de transferencia de energía por interacciones no lineales S_{nl} en forma parametrizada (sección III.2).

Antes y después de la introducción del término S_{nl} se hicieron experimentos numéricos con campos hipotéticos de viento propuestos por el SWAMP (sección III.3).

III.1 Incremento de la Resolución en Frecuencia y Dirección

Originalmente el modelo DSA consideraba seis bandas de período con un ΔT de 3 s en el intervalo de los 4 a los 19 s, con 16 direcciones cada banda, excepto para las bandas de los 4 y 7 s, las cuales tenían 4 y 8 direcciones respectivamente, haciendo un total de 76 componentes (Fons, 1966).

Se modificó el modelo DSA pasando de 6 bandas de período a 22 bandas de frecuencia en el intervalo de 0.04 a 0.25 Hz con Δf constante de 0.01 Hz y con 16 direcciones para todas y cada una de las frecuencias, totalizando 352 componentes.

El objetivo de aumentar la resolución en frecuencia y dirección del modelo DSA fue el de obtener un espectro mejor definido y cuyas componentes que antes se propagaban juntas como un sólo paquete de energía viajen ahora en paquetes de ancho de banda Δf más pequeña y así obtener más separación de diferentes bandas de frecuencias con su respectiva velocidad de grupo y energía.

El problema de aumentar el número de frecuencias se reduce a aumentar los ciclos para el cálculo de las densidades espectro-angulares y el de las variables que dependen de todas las componentes (energía total, frecuencia promedio, dirección promedio, etc.) y a utilizar más capacidad de almacenamiento en la computadora, aspectos que no representaron ningún inconveniente en la estación de trabajo *SUN Workstation* disponible.

III.2 Parametrización del Término de Interacciones no Lineales entre Olas S_{nl}

Una dificultad ya tradicional en los MNPO ha sido la de representar adecuadamente el término S_{nl} ya que el tiempo necesario para calcular la expresión exacta de ese término excede con mucho los límites prácticos para un MNPO operacional. La evaluación numérica de la expresión exacta del término S_{nl} que representa las interacciones no lineales entre olas involucra integraciones triples las cuales consumen demasiado tiempo, aún en computadoras vectoriales (The WAMDI Group, 1988), por lo que es necesario parametrizarlo de alguna manera (Hasselmann *et al.*, 1985).

En este trabajo se introdujo al modelo DSA la parametrización del S_{nl} propuesta por Barnett (1968) en la que la transferencia de energía debida a interacciones entre olas tiene la forma

$$S_{nl} \approx \Gamma - \tau\rho \quad (20)$$

donde Γ y τ son funciones integrales de ρ definidas como:

$$\tau = \frac{7.5 \times 10^7 E^2}{g^4 f} (1 + 16 |\cos(\theta - \bar{\theta})|) \bar{f}^7 (f - 0.53\bar{f})^3 \quad f > 0.53\bar{f}$$

$$= 0 \quad f \leq 0.53\bar{f} \quad (21)$$

$$\Gamma = \frac{4.4 \times 10^8 E^3 \bar{f}^8}{g^4} \cos^4(\theta - \bar{\theta}) \left(\frac{f - 0.42\bar{f}}{f} \right)^3$$

$$\cdot \exp \left[-4 \left(1 - \frac{\bar{f}}{f} \right)^2 + 0.1 \left(\frac{\bar{f}}{f} \right)^5 \right] \quad f > 0.42\bar{f} \quad \text{y} \quad |\theta - \bar{\theta}| < \pi/2$$

$$= 0 \quad f \leq 0.42\bar{f} \quad \text{o} \quad |\theta - \bar{\theta}| \geq \pi/2 \quad (22)$$

donde la energía total E , la frecuencia promedio \bar{f} y dirección promedio $\bar{\theta}$ que caracterizan el campo de oleaje están dadas por:

$$E = \int \int \rho(f, \theta) df d\theta \quad (23)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{E} \int \int \rho(f, \theta) f df d\theta \quad (24)$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{E} \int \int \rho(f, \theta) \theta df d\theta \quad (25a)$$

Debido a que la ecuación (25a) presenta un inconveniente ya que dependiendo de la convención que se use, de 0° a 360° o de -180° a 180° , no da necesariamente el mismo resultado. En este trabajo se utilizó la expresión

$$\bar{\theta} = \arctan \left(\frac{\int \int \rho(f, \theta) \sin \theta df d\theta}{\int \int \rho(f, \theta) \cos \theta df d\theta} \right) \quad (25b)$$

Las ecuaciones (21) y (22) se aplican a espectros cuya forma es muy similar a un espectro totalmente desarrollado. También funcionan bien para espectros "parcialmente desarrollados", aunque los resultados deben ser modificados introduciendo factores que dependen de la forma espectral (Barnett, 1968), tales como la frecuencia donde está situado el pico espectral (f_p) y la frecuencia promedio (\bar{f}). La Figura 2 ilustra la comparación de las razones de transferencia de energía calculadas con la parametrización de S_m y con la expresión exacta para un espectro Pierson-Moskowitz (Barnett, 1968).

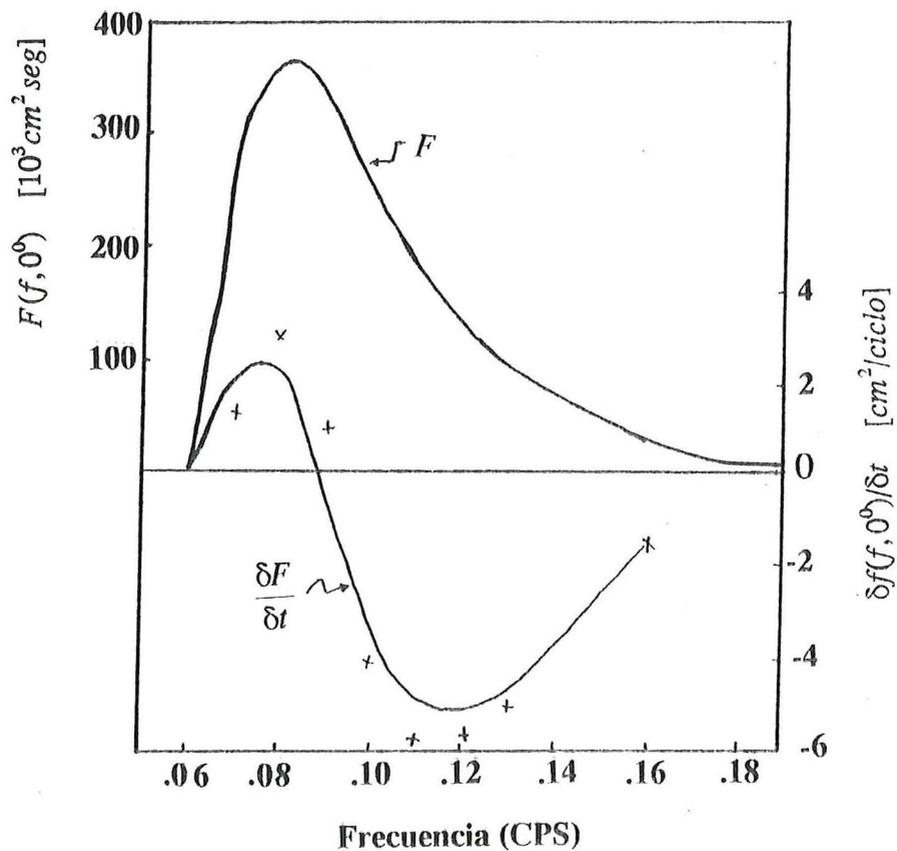


Figura 2. Razones de transferencia no lineal para un espectro Pierson-Moskowitz, F (línea sólida). La línea punteada denota la razón de transferencia, $\delta F / \delta t$, dada por las ecs. (21) y (22). Las cruces denotan la función de transferencia calculadas a partir de la expresión exacta de S_{η} (Barnett, 1968).

III.3 Modelos y Experimentos Numéricos del Grupo SWAMP

Los experimentos numéricos del Proyecto de Modelado de Oleaje, conocido como SWAMP por sus siglas en inglés (Sea Wave Modeling Project, SG), consisten en corridas de los MNPO participantes (Tabla I) utilizando seis campos de viento específicos con el objetivo de revelar las diferencias básicas entre ellos. En estos experimentos se imponen campos de viento homogéneos y estacionarios, condiciones de fronteras asimétricas, cambios repentinos en la dirección del viento, y distribuciones discontinuas espaciales del viento.

Tabla I. Modelos usados en el estudio de comparación del SWAMP (SG), y el DSA.

Modelo	Aplicación	Generación	Clase de modelo
MRI	1, 2	1a.	Propagación Desacoplada
VENICE	1	1a.	Propagación Desacoplada
NOWAMO	1	2a.	Híbrido Acoplado
GONO	1	2a.	Híbrido Acoplado
TOHOKU	2	2a.	Híbrido Acoplado
HYP A	2	2a.	Híbrido Acoplado
BMO	1, 2	2a.	Acoplado Discreto
SAIL	2	2a.	Acoplado Discreto
DNS	2	2a.	Acoplado Discreto
EXACT-NL	3	3a.	Acoplado Discreto
DSA	1	1a.	Propagación Desacoplada

- 1: Predicción operacional
- 2: Estadística regional de oleaje
- 3: Experimentación.

La utilización de campos de viento reales, que no son ni estacionarios ni uniformes, haría muy compleja la comparación de los resultados debido a la superposición simultánea de una gran variedad de influencias y factores, por lo cual se hace evidente la ventaja del uso de campos de viento hipotéticos con características bien definidas.

Las pruebas propuestas en el SWAMP son siete y se aplicaron al modelo DSA. Sólo el caso I consiste en una prueba de advección de energía sin considerar el forzamiento por viento; en los casos del II al VII se utilizaron diversos campos de viento para forzar el modelo numérico DSA.

Todos los casos fueron llevados a cabo en coordenadas cartesianas y para un océano de profundidad infinita. La malla del modelo DSA cuenta con 23×23 puntos y se utiliza $\Delta x = \Delta y = 75$ km y $\Delta t = 1.5$ hrs. Para los experimentos del SWAMP se utilizó una malla de 15×15 puntos excepto en los casos VI y VII donde se utilizó la malla completa. En los casos del II al VI el tiempo total de predicción fue de 45 hrs mientras que para el caso VII fue de 20 hrs.

En todos los casos, excepto en el caso IV (huracán estacionario) se tiene al menos una frontera (considerada como la costa) donde $\rho = 0$ para $t \geq 0$; las demás fronteras son abiertas.

A continuación se describen los siete experimentos (casos) del proyecto SWAMP y sus respectivos campos de viento (Figura 3).

III.3.1 Caso I: Prueba de Advección

Este caso fue propuesto para comparar los esquemas de advección de los modelos espectrales discretos llevando a cabo una propagación de oleaje distal puro. Aunque en SG no se reportan resultados de este caso, los resultados de esta tesis para el caso I se presentan en el apéndice.

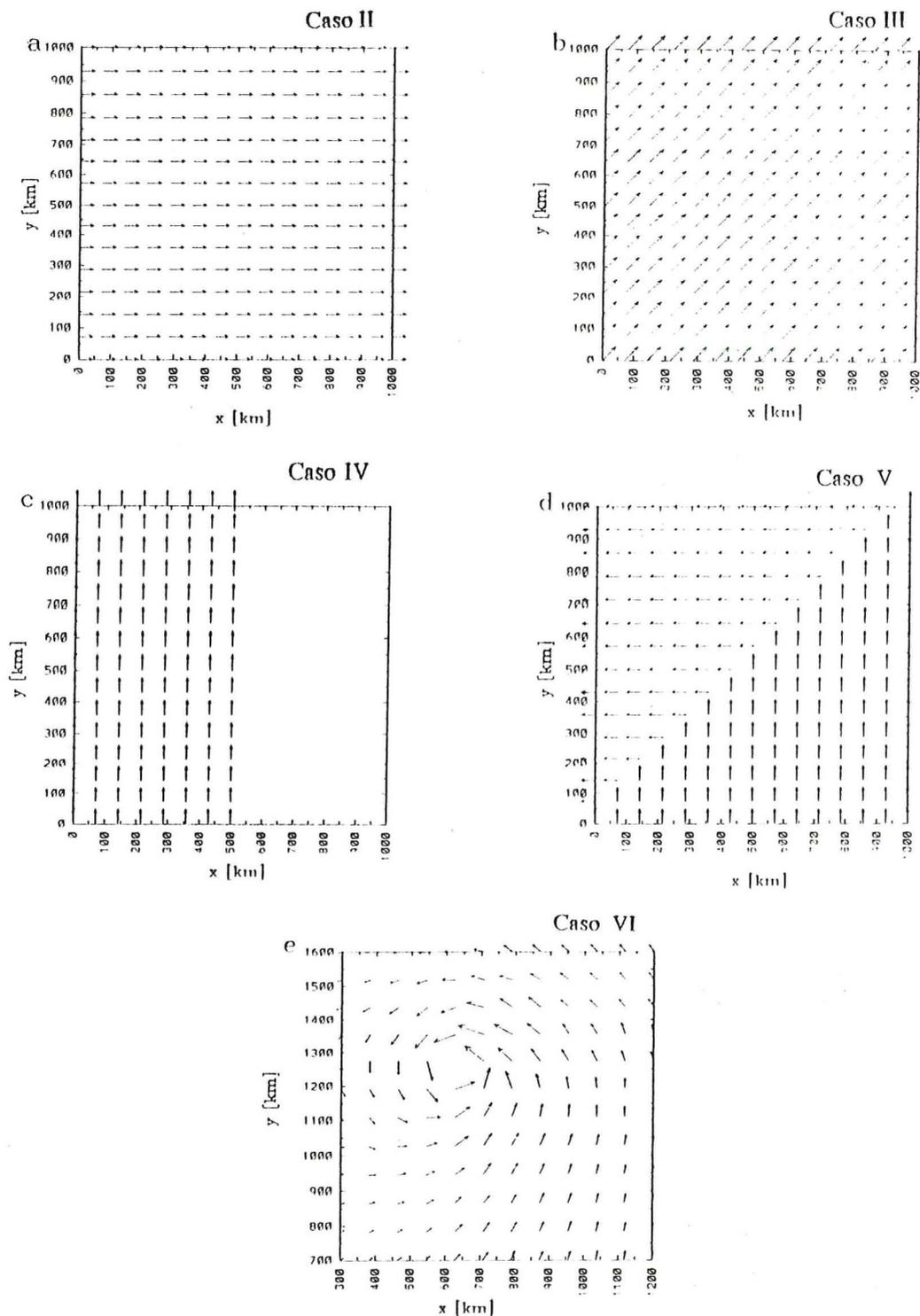


Figura 3. Campos de viento utilizados en el estudio de comparación del SWAMP; a) caso II: campo de viento homogéneo y estacionario; b) caso III: idem caso II, pero con 45° de inclinación; c) caso IV: campo de viento de medio plano; d) caso V: campo de viento estacionario con frente diagonal; e) caso VI: campo de viento del huracán.

III.3.2 Caso II: Crecimiento Limitado en Alcance y Tiempo

Este experimento fue diseñado para investigar el crecimiento del campo de oleaje bajo un viento uniforme y estacionario con el objetivo de comparar a los modelos bajo condiciones de viento y de frontera lo más sencillas posibles. Los resultados de este caso sirvieron de base para la discusión de condiciones más complejas especificadas en los demás casos. El viento sopla ortogonalmente hacia afuera de la costa (Figura 3a) con una rapidez de 20 m/s ($W = 39$ nudos). La condición inicial es un mar en calma en toda el área y la condición de frontera en $x = 0$ km (línea de costa) es $\rho(f, \theta) = 0$ para $t \geq 0$ hrs; las demás fronteras fueron abiertas. El modelo se corrió hasta que se alcanzó el estado estacionario en toda el área.

III.3.3 Caso III: Alcance Inclinado

Representa una generalización del caso II con un viento soplando hacia afuera de la costa y haciendo un ángulo de 45° con ésta (Figura 3b) (los ángulos son medidos a partir del norte y en sentido horario). Fue diseñado para probar la respuesta direccional de los modelos a un viento uniforme con una asimetría muy fuerte en el crecimiento del campo de olas en los puntos fuera de la diagonal, ya que con esta asimetría las componentes espectrales que se propagan en diferentes direcciones alrededor de la dirección promedio están expuestas a alcances diferentes. La condición inicial fue un mar en calma y las condiciones de frontera en $x = 0$ y $y = 0$ se tomó $\rho = 0$ para $t \geq 0$ y para las otras se usó una condición de fronteras abiertas.

III.3.4 Caso IV: Campo de Viento de Medio Plano

El propósito principal de este caso es el de probar los algoritmos de transición del oleaje local a oleaje distal propagando el oleaje desde una región donde hay un campo de viento de 20 m/s ($W = 39$ nudos) hacia una región vecina en calma separadas por un frente lateral (Figura 3c). Además se trata de observar la influencia de este frente lateral en el desarrollo

del oleaje local en el semi-plano con viento. La condición inicial fue un mar en calma y como condición en la frontera $x = 0$ km se tomó $\rho = 0$ para $t \geq 0$ hrs; las demás fronteras fueron abiertas. Los modelos se corrieron hasta alcanzar un estado estacionario.

III.3.5 Caso V: Frente Diagonal

El propósito de esta prueba es determinar la respuesta de los modelos a un campo de viento que cambia su dirección en el espacio. Para ésto se analizó la propagación del oleaje a través de un frente diagonal (de SW a NE). El viento presenta una rapidez de 20 m/s ($W = 39$ nudos) y sopla hacia el norte en los puntos a lo largo y abajo del frente, y hacia el oeste en los puntos que están arriba del frente (Figura 3d). La condición inicial fue un mar en calma y como condición de frontera en $y = 0$ km el espectro fue cero para $t \geq 0$ mientras que las demás fronteras fueron abiertas.

III.3.6 Caso VI: Huracán Estacionario

Representa el campo de viento más complejo considerado en esta tesis. Se incluyó para investigar el desempeño de los modelos bajo condiciones extremas, pero no alejadas de la realidad, y en las cuales varios de los procesos considerados independientemente en los casos anteriores fueron puestos en juego simultáneamente. El campo de viento fue tomado de la Figura 12.1 del SG; la máxima rapidez del viento (40 m/s) se localiza al NE del ojo del huracán (Figura 3e). Existe una asimetría muy fuerte en la rapidez del viento (el viento es más rápido en el NE de la malla) y una asimetría norte-sur en la dirección. La condición inicial fue un mar en calma y todas las fronteras fueron abiertas.

III.3.7 Caso VII: Cambio de 90° en la Dirección del Viento

En esta prueba se considera un campo de viento no estacionario que cambia repentinamente de dirección con el propósito de investigar la relajación (proceso físico que requiere cierto período de tiempo para reaccionar ante cambios bruscos a los que está

sometido el sistema) de la dirección del oleaje formado antes del cambio hacia la nueva dirección. La dirección del campo de viento uniforme es repentinamente cambiado del norte al oeste al tiempo en el cuál la frecuencia del pico espectral $f_p = 2f_{PM}$ (f_{PM} es la frecuencia donde esta situado el pico espectral del espectro Pierson-Moskowitz para determinada rapidez de viento). Para ambas direcciones, la rapidez del viento es de 20 m/s ($W = 39$ nudos). La condición inicial fue un mar en calma y en todas las fronteras fueron abiertas.

IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

Primero se presentan los resultados obtenidos con el modelo DSA, al cual ya se le aumentó la resolución en dirección y frecuencia pero sin el término que representa las interacciones no lineales S_{nl} (modelo con propagación desacoplada), y se discuten comparándolos con los resultados de los modelos del SWAMP. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos con el modelo DSA con el término no lineal S_{nl} incluido (modelo con propagación acoplada al cual se le llamará DSANL), y se comparan principalmente con los del modelo original (el DSA) y con algunos modelos de propagación acoplada del SWAMP.

En las tablas que se presentan en esta sección se muestran los resultados de ambas versiones con el propósito de facilitar las comparaciones. Asimismo los resultados del modelo se presentan en términos de los siguientes parámetros:

Dirección de máxima energía, θ_p , que es la dirección para la cual

$$\int \rho(f, \theta) df \quad (26)$$

es máxima

Frecuencia de máxima energía (frecuencia del pico espectral), f_p , que es la frecuencia para la cual la integral

$$\int \rho(f, \theta) d\theta \quad (27)$$

es máxima.

Período de máxima energía, T_p , y altura característica del oleaje, H , definidos como

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (28)$$

y

$$H = K\sqrt{E} \quad (29)$$

donde $K = 0.353$ y E esta dada por la ec. (6).

Espectro unidimensional, $F(f)$, definido como

$$F(f) = \int \rho(f, \theta) d\theta \quad (30)$$

IV.1 Resultados del Modelo DSA con Propagación Desacoplada

IV.1.1 Caso II Crecimiento Limitado en Alcance y Tiempo

El modelo se forzó con un viento homogéneo y estacionario de 20 m/s ($W = 39$ nudos) de rapidez (Figura 4a) durante 45 hrs, tiempo en el cual la energía total del oleaje ya no varió al alcanzarse el estado estacionario (ver Figura 6b).

En la Figura 4b se observa que para casi todos los puntos de la malla (excepto para algunos situados en $y = 1000$ km) la dirección de la componente de máxima energía θ_p corresponde a la dirección del viento (Figura 4a) mientras que el período de esa componente, T_p , aumenta con el alcance.

La curvatura de las isolíneas de altura de ola en las fronteras norte y sur (Figura 4b) es consecuencia de las condiciones de frontera abiertas utilizadas, en las cuales sólo existe salida de energía. Estas condiciones de frontera son las más comunes en la predicción de oleaje, cuando se supone que no existen zonas importantes de generación fuera de la región considerada (a menos que se tenga un sistema de mallas internas en cuyo caso las condiciones de frontera para cada submalla se toman de las condiciones imperantes en la malla más grande, Young 1988).

En la evolución del espectro unidimensional $F(f)$ con el alcance (Figura 4c) (a lo largo de $y = 525$ km) se observa que la frecuencia mínima (0.06 Hz) de cada uno de los espectros es independiente del alcance debido a que la forma de la función de crecimiento específica

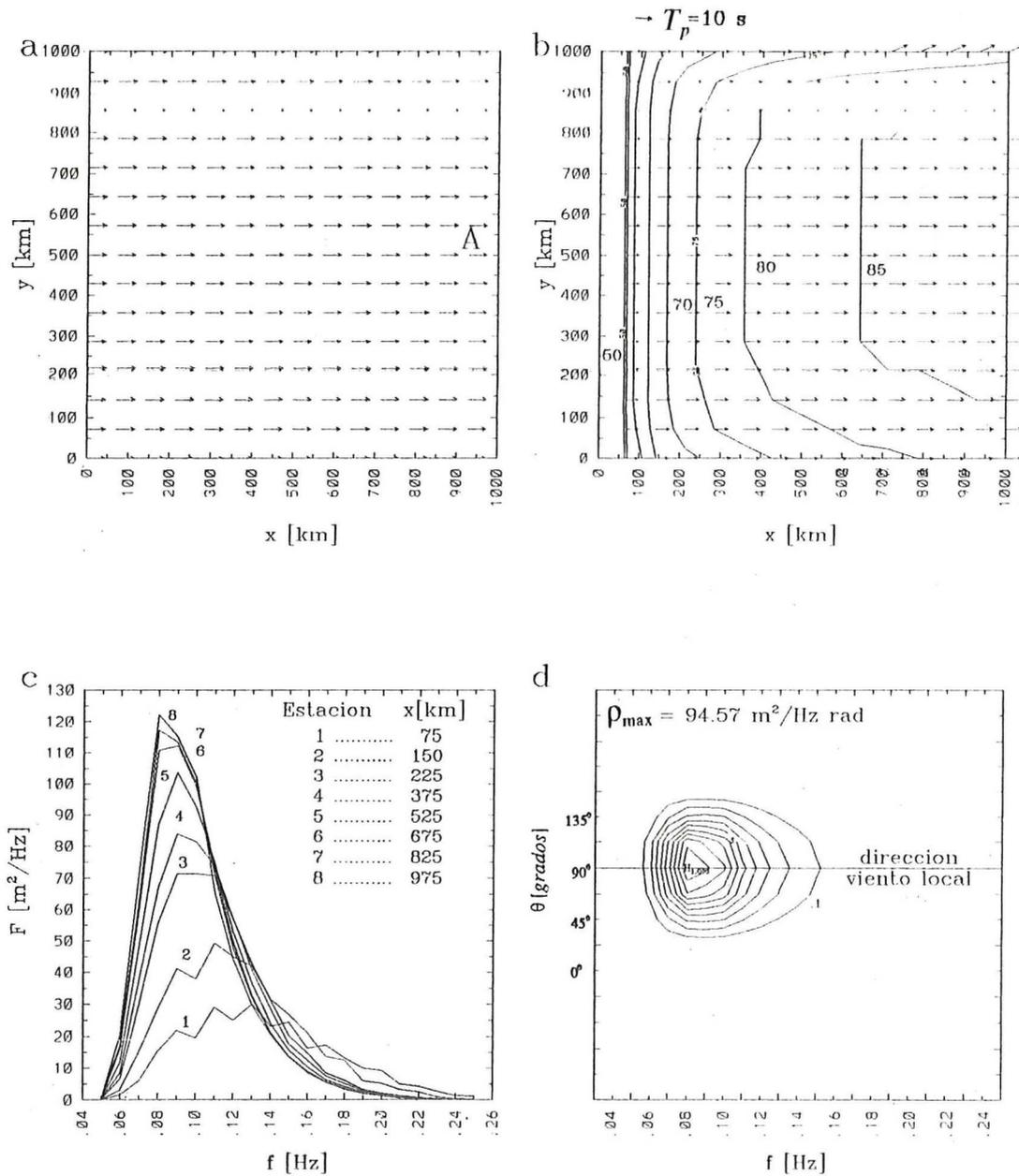


Figura 4. Caso II: a) campo de viento homogéneo y estacionario; b) diagrama de vectores donde el módulo y dirección del vector indican el período y dirección de máxima energía, respectivamente; los contornos indican altura de ola en dm; c) espectros limitados en alcance a lo largo de $y = 525$ km; d) espectro bidimensional en el punto A (Figura 4a); el intervalo entre contornos es de 0.1.

que para una rapidez de viento W (en nudos), sin importar el alcance, todas las componentes con frecuencias $> 2/W$ tendrán energía (en este caso $W = 39$ nudos). Lo anterior difiere de los resultados de los modelos del SWAMP en los que se observa que la frecuencia mínima disminuye conforme el alcance y/o el tiempo aumentan (SG) lo que, de acuerdo a Hasselmann *et. al.* (1973), representa mejor a lo observado en la realidad.

La frecuencia del pico espectral varía entre 0.12 Hz y 0.08 Hz; esta última se establece a las 22.5 hrs de predicción.

Una segunda característica, y la más sobresaliente, es el distinto nivel de saturación alcanzado por cada espectro en las frecuencias altas (cara trasera) en los diferentes alcances (Figura 4c). De acuerdo a Barnett y Wilkerson (1967), el crecimiento de una componente espectral en particular, a lo largo del alcance en una área de generación, muestra un incremento muy rápido excediendo el valor del nivel de equilibrio, luego decae rápidamente por debajo de ese nivel de equilibrio. Este fenómeno, de crecimiento y decaimiento en el contenido de energía para las diferentes componentes espectrales, es conocido como sobresaturación (*overshoot*).

La sobresaturación se considera como una parte integral del proceso de generación del oleaje y se cree que puede ser causada por la transferencia de energía, debida a interacciones no lineales, entre las diferentes componentes del oleaje (Khandekar, 1989). Por esa razón y debido al carácter semi-empírico del modelo DSA no deja de ser sobresaliente el hecho de que este modelo reproduzca la sobresaturación, a diferencia del modelo VENICE (también de primera generación) para el cual es evidente que la cara trasera del espectro (frecuencias altas) están limitadas en su nivel energético no importando el alcance (SG).

En la Figura 4d se ilustra el espectro bidimensional (2D) totalmente desarrollado (es decir, un espectro en el que todas sus componentes han alcanzado su nivel de equilibrio estacionario) en el punto A (Figura 4a) normalizado con el nivel energético de la componente de máxima energía en el espectro ($\rho = 94.57 \text{ m}^2 \text{ Hz}^{-1} \text{ rad}^{-1}$ en $f_p = 0.08$ Hz). El espectro es simétrico con respecto a la dirección del viento local (90°), y su ancho, tanto en frecuencia

como en dirección, depende de la forma de la función de crecimiento. En particular, el ancho en frecuencia depende de la condición de crecimiento especificada para todas y cada una de las frecuencias mayores a $2/W$ (ec.17), mientras que el ancho en dirección depende de la función de distribución angular de energía para $|\theta - \omega| < \pi/2$ (ec. 16).

En la Figura 5 se muestran los espectros unidimensionales $F(f)$ totalmente desarrollados (para un alcance aproximado de 1000 km) generados por los modelos del SWAMP y el modelo DSA. Todas estas distribuciones espectrales se caracterizan por un pico espectral (situado en $f=f_p$), por una cara delantera en frecuencias bajas ($f < f_p$) con gran pendiente, y una cara trasera en frecuencias altas ($f > f_p$) de pendiente suave proporcional a f^{-n} , donde el valor de n varía entre 4 y 5.

En todos los modelos, excepto el TOHOKU y el EXACT-NL, se supone que para tiempo y alcance infinitos se llega a un espectro en equilibrio (espectro totalmente desarrollado) que, en la mayoría de los modelos (MRI, HYP A, SAIL, BMO, DNS y NOWAMO), está dado por el espectro Pierson-Moskowitz (SG). En el DSA, al igual que en los modelos TOHOKU y EXACT-NL, no se supone de antemano algún espectro de equilibrio; el DSA llega a la distribución mostrada por medio de un equilibrio entre la entrada de energía y el amortiguamiento, siendo esta distribución, en general, muy parecida al del espectro Pierson-Moskowitz pero sin ser éste su estado final. La frecuencia en la cual está situado el pico espectral (f_p) dada por el DSA es la más grande de entre todos los modelos.

Comparando la energía total E y la frecuencia pico f_p de los espectros producidos en condiciones limitadas en alcance y tiempo por todos los modelos del SWAMP y el DSA (Figura 6) se pueden observar grandes diferencias a pesar de que fueron calibrados con datos de oleaje limitado en alcance o en tiempo (SG). Las curvas de crecimiento limitado en alcance de E y f_p fueron construidas a partir de los espectros de oleaje en puntos localizados a lo largo de $y=525$ km mientras que las curvas de crecimiento limitado en tiempo fueron construidas a partir de una secuencia de espectros observados en el punto A (Figura 4a).

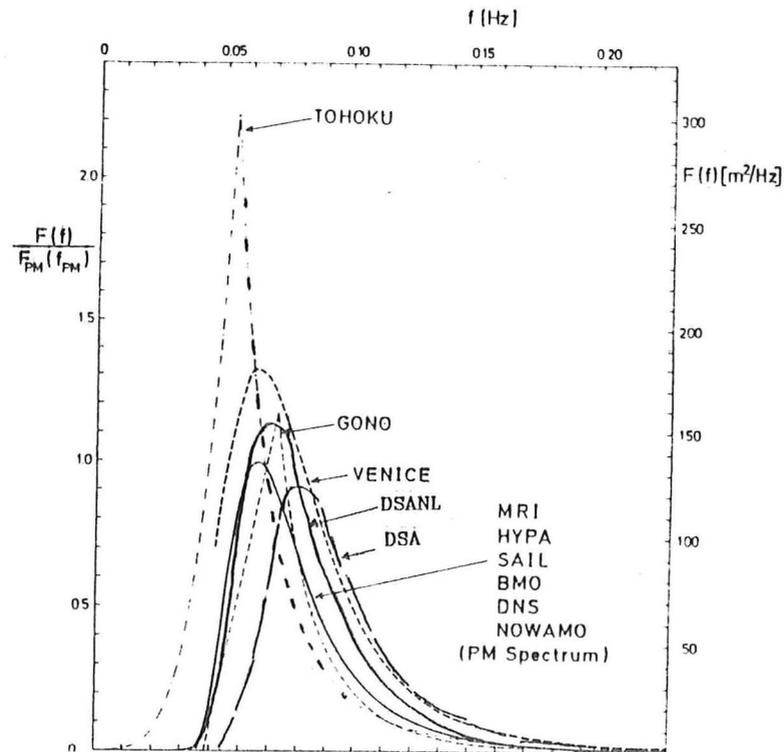


Figura 5. Espectros totalmente desarrollados de los modelos del SWAMP Group (SG) y el DSA. Tomada de la Figura 7.2 del SG y aumentada con los resultados del DSA.

La diferencia en las curvas de crecimiento de E y f_p entre los modelos del SWAMP y del DSA probablemente se deben a las distintas expresiones de la ley de arrastre utilizada para relacionar a la velocidad de arrastre u_* y la velocidad del viento a 10 m de altura U_{10} (SG).

Para alcances cortos (del orden de 200 km) el DSA sobrestima la energía total E y en alcances muy grandes la localiza en el promedio de los modelos del SWAMP (Figura 6a); ésto también puede notarse en la Figura 4c al comparar los espectros a diferentes alcances

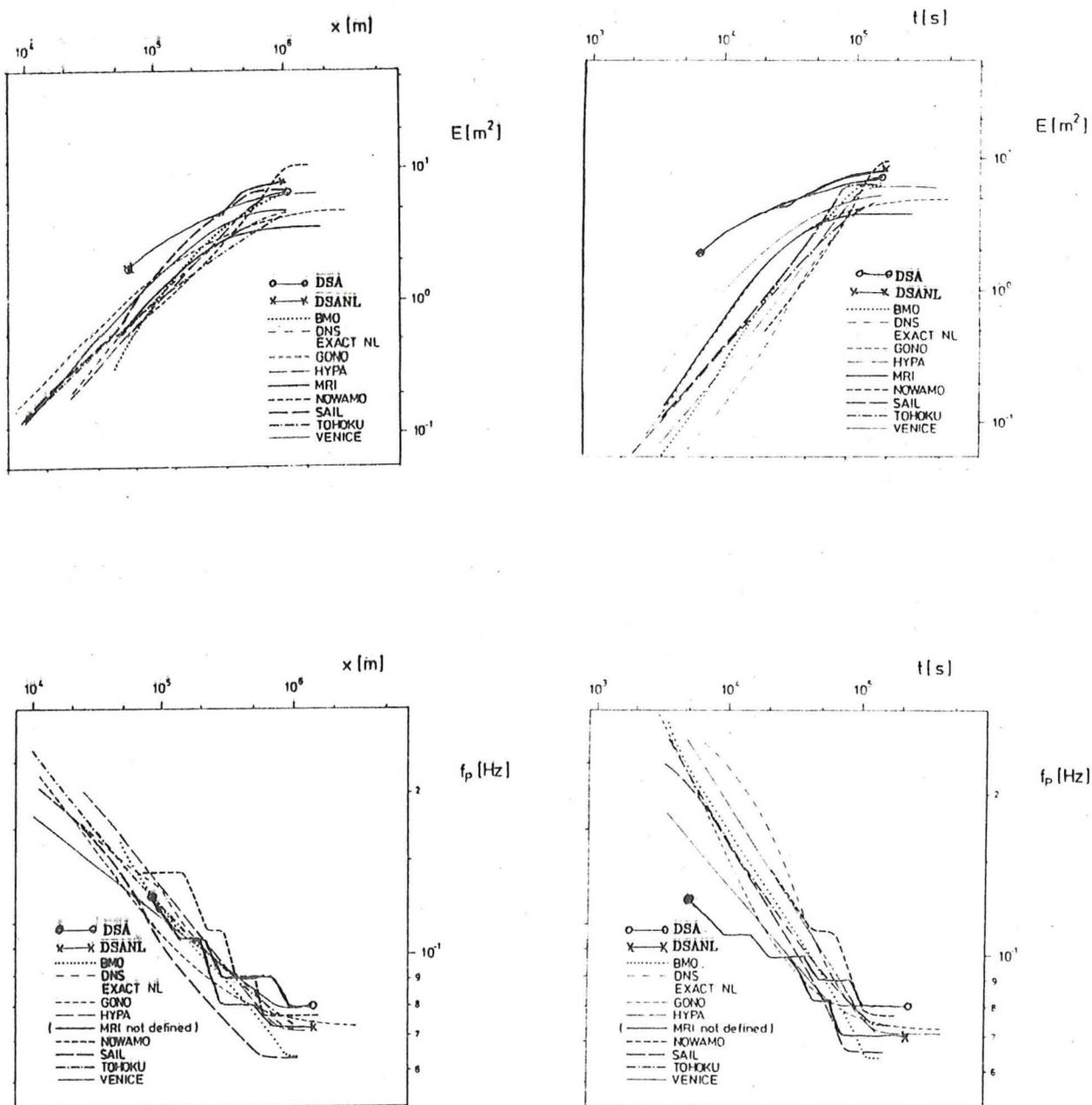


Figura 6. Caso II: curvas de crecimiento de la energía total E : a) limitado en alcance, b) limitado en tiempo, c) y d) son las curvas de crecimiento de la frecuencia del pico espectral f_p limitado en alcance y tiempo, respectivamente.

con los espectros de los otros modelos (Figura 7.3 del SG). Lo mismo puede observarse en el crecimiento de E limitado en tiempo (Figura 6b) pues al inicio existe un nivel energético muy alto en el DSA que a medida que pasa el tiempo va siendo similar al de los demás modelos.

La evolución de la f_p limitada en alcance (Figura 6c) presenta la misma tendencia que las demás curvas pero terminando en la mayor f_p , al igual que en la evolución con respecto al tiempo (Figura 6d), (debido a la forma de la función de crecimiento, ec. 17)

Al observar la evolución temporal del espectro unidimensional $F(f)$ (Figura 7) en el punto A puede inferirse que no existe un espectro límite dado *a priori*; mientras que en el primer espectro ($t = 1.5$ hrs) el nivel energético es similar en la mayoría de las frecuencias, en los espectros siguientes decae muy rápido con la frecuencia (para $f > f_p$) siendo diferente esta razón de decaimiento para todos los tiempos.

IV.1.2 Caso III: Alcance Inclinado

En esta prueba el modelo se forzó con un viento uniforme y estacionario con una rapidez de 20 m/s ($W = 39$ nudos) y una dirección de 45° (Figura 8a). Aunque este campo de viento es similar al del caso II (viento homogéneo y estacionario) existe una asimetría en el alcance para las componentes que se dirigen en dirección distinta a la del viento y que se generan fuera de la diagonal. Esto ocasiona una asimetría en el espectro del oleaje en los puntos fuera de la diagonal.

Sin embargo, las alturas de las olas son simétricas con respecto a la diagonal. Esto se nota en los contornos de la Figura 8b; en la frecuencia del pico espectral (isolineas de f_p/f_{PM} , en la Figura 8c, donde f_{PM} es la frecuencia del pico espectral del espectro Pierson-Moskowitz para un viento dado), y en la dirección promedio $\bar{\theta}$ (Figura 8d). Al comparar estos parámetros a lo largo de los puntos adyacentes a las fronteras sur y este se observa que puntos con igual alcance tienen aproximadamente los mismos valores de H , f_p y $\bar{\theta}$. Este efecto en el DSA es

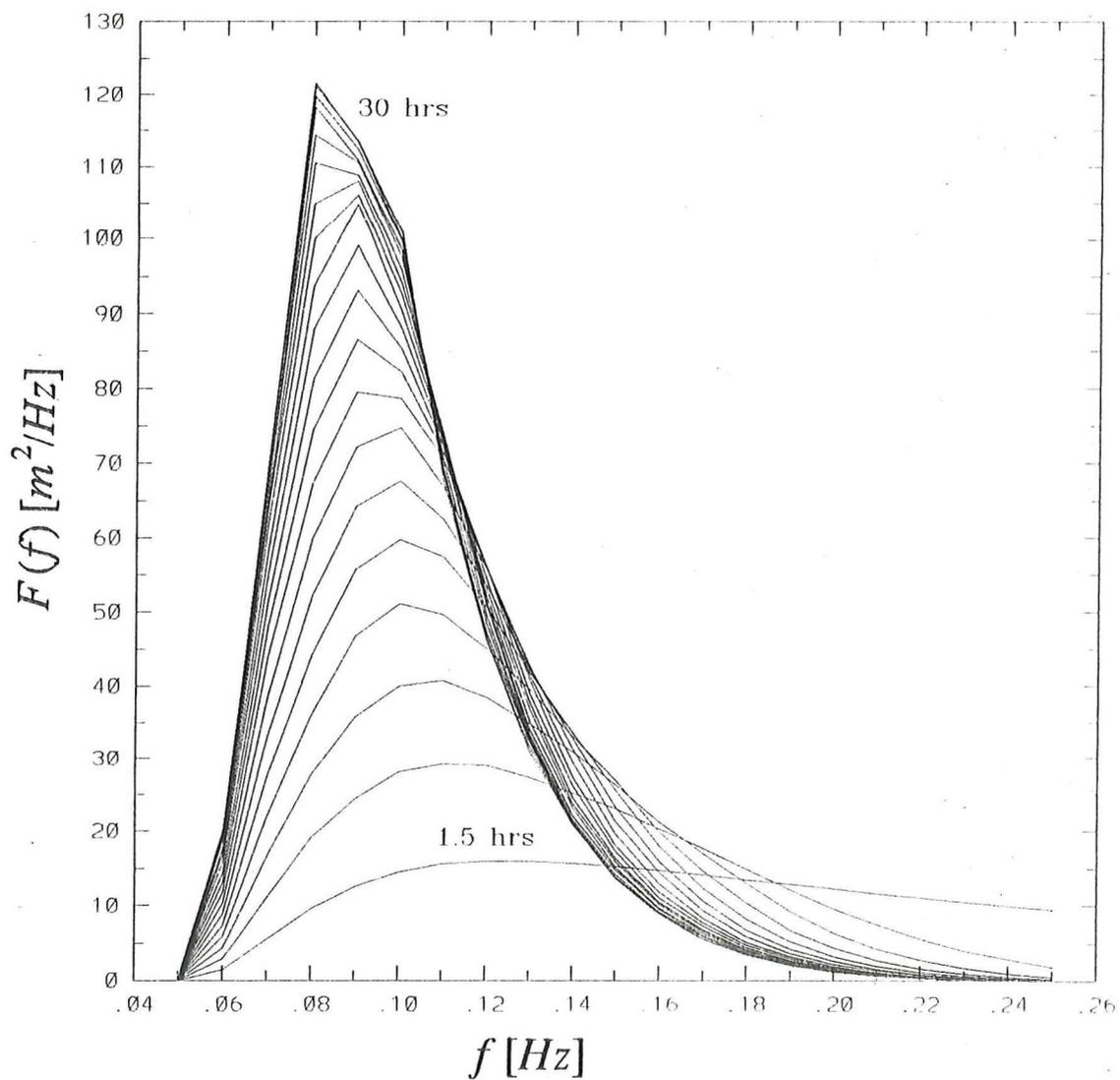


Figura 7. Secuencia temporal del desarrollo espectral en el punto A (Figura 4a); el alcance es de 975 km.

moderado en comparación con los de los modelos MRI y TOHOKU del SWAMP (Figuras 8.2 y 8.3 del SG), ya que los resultados del MRI presentan un efecto muy fuerte por la asimetría en el alcance y en los del TOHOKU este efecto es prácticamente nulo.

Los modelos con propagación desacoplada (MRI y VENICE) son más afectados por la asimetría pero el efecto es más pronunciado en el modelo MRI debido a que su distribución direccional es más ancha. El TOHOKU alcanza también una distribución ancha (Figura 8.4e del SG) pero el oleaje local es forzado a que vaya en la misma dirección del viento; además su razón de crecimiento sólo depende del alcance (SG).

La Figura 9 ilustra el espectro 2D en el punto F (Figura 8a), los valores espectrales están normalizados con el valor de la componente de máxima energía y sólo se grafican los contornos múltiples de 0.1. El pico espectral está situado en 0.10 Hz y en la dirección $\theta = 90^\circ$ (la dirección local del viento es 45°). Los contornos centrados en $f = 0.10$ Hz y $\theta = 67^\circ$ muestran una caída en el nivel energético causada probablemente por la forma en que el modelo advecta la energía. La diferencia entre las direcciones del viento y del pico espectral es debida a la energía advectada por el oleaje distal que viaja paralelo a la costa ($y = 0$ km) y que supera, aunque ligeramente, a la energía generada localmente (el contorno de 0.8 está en la dirección del viento local).

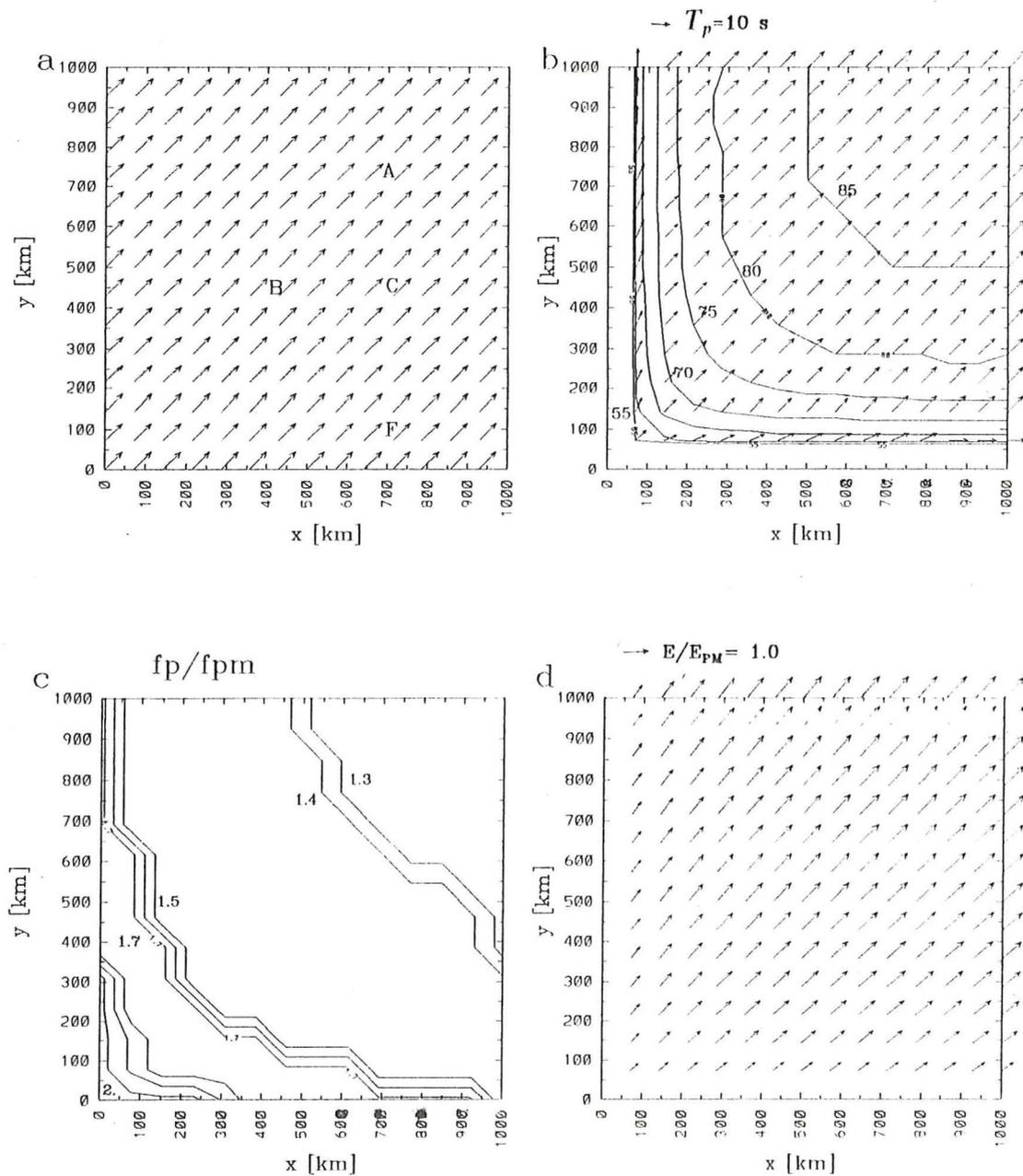


Figura 8. Caso III: a) campo de viento homogéneo y estacionario con 45° de inclinación, b) idem figura 4b, c) isóneas de f_p/f_{PM} , d) diagrama de vectores donde el módulo y dirección de éstos indican la magnitud de E/E_{PM} y la dirección promedio, respectivamente.

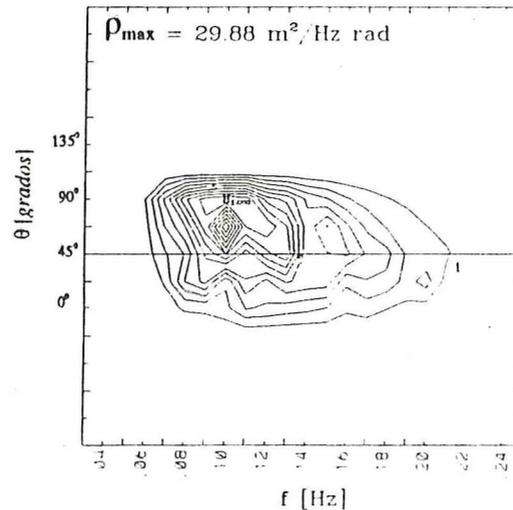


Figura 9. Espectro bidimensional en el punto F (Figura 8a) para el caso III. Los contornos comprenden valores múltiplos de 0.1 y el espectro está normalizado respecto su valor máximo.

Comparando esta distribución espectral con las obtenidas por los modelos del SWAMP (Figura 8.4 del SG), puede observarse que algunos modelos presentan una simetría alrededor de la dirección del viento (modelos NOWAMO, TOHUKU y BMO) ya que sus espectros son forzados a ello. A diferencia de éstos, el modelo HYP A produce un espectro 2D forzado a ser simétrico alrededor de la dirección promedio del oleaje, de tal forma que ni aún el oleaje local (frecuencias altas) está dirigido en la dirección del viento que lo genera.

El modelo DSA produce en el punto F un espectro 2D cuya energía está dirigida principalmente en la dirección del viento local, sin embargo, presenta el pico espectral en dirección paralela a la costa debido a la energía edvectada por el oleaje distal que viaja en esta dirección, entonces puede inferirse que la pérdida de energía en el oleaje distal es poca.

En la Tabla II se presentan valores de la energía total y de la frecuencia del pico espectral para el caso III normalizada con los valores correspondientes del caso II. Las posiciones A, B y C de donde se obtuvieron los resultados para el caso III se muestran en la Figura 8a; los resultados del caso II se obtuvieron en puntos con alcances equivalentes a los del caso III.

Tabla II. Razón de energía total y frecuencia del caso III respecto a las del caso II para los alcances seleccionados. (Tabla 8.2 del SG incluyendo los resultados del DSA). Los subíndices II y III en E y f_p indican a que caso corresponden.

MODELO	Ubicación	E_{III}/E_{II}			f_{pIII}/f_{pII}		
		B (375, 375)	C (750, 375)	A (750, 750)	B (375, 375)	C (750, 375)	A (750, 750)
MRI		0.88	0.99	0.97	1.03	1.00	1.00
VENICE		0.91	0.86	0.95	0.98	1.01	0.98
NOWAMO		-	1.33	1.30	0.76	0.80	0.84
GONO		0.90	0.83	1.04	1.05	1.09	1.02
TOHOKU		0.92	0.75	0.95	1.04	1.10	0.91
HYPY		0.84	0.73	0.91	1.04	1.12	0.96
BMO		0.83	0.73	0.90	0.97	1.17	0.91
SAIL		0.56	0.85	1.00	1.23	0.96	0.84
DNS		0.82	0.70	0.96	1.09	1.13	1.11
DSA		0.90	0.90	0.98	1.00	1.12	1.00
DSANL		0.88	0.88	0.95	1.14	1.00	1.00

El crecimiento del oleaje en el caso III es menor en relación al caso II ($E_{III}/E_{II} < 1$) para el mismo alcance en todos los modelos (excepto en el NOWAMO) debido a que el oleaje que se propaga en dirección diferente a la del viento tiene un alcance más pequeño que en el caso II. En el DSA la frecuencia del pico espectral es la misma ($f_{pIII}/f_{pII} = 1$) a lo largo de la diagonal (puntos A y B). Para el punto C, f_p es un poco mayor en el caso III. En general los resultados del DSA concuerdan con los resultados de los demás modelos; la variación en la energía de este caso con respecto al caso II es menor a $\pm 20\%$ en todos los modelos.

IV.1.3 Caso IV: Campo de Viento de Medio Plano

El campo de viento para este caso se presenta en la Figura 10a. La transición del oleaje desde el semiplano con viento hacia el semiplano en calma es suave (al igual que en los resultados de los modelos VENICE y DNS, (SG)) como puede apreciarse en las isóneas de H en la Figura 10b y en los valores de E/E_{PM} y $\bar{\theta}$ en la Figura 10c. En los modelos híbridos (como el HYPa y BMO) existe una discontinuidad en el espectro bidimensional a través del frente y, por lo tanto, en los parámetros mencionados anteriormente (SG).

Para analizar los efectos de la geometría del campo de viento primero se separaron de los efectos de la razón de crecimiento intrínseco normalizando la energía total de este caso E_{IV} con la energía total limitada en alcance correspondiente al caso II (E_{II}) en A y B, y después se compararon estas energías normalizadas para los puntos A y B (Tabla III y Figura 11). Los puntos fueron elegidos a lo largo de la línea central del semiplano con forzamiento para minimizar los efectos de la asimetría direccional.

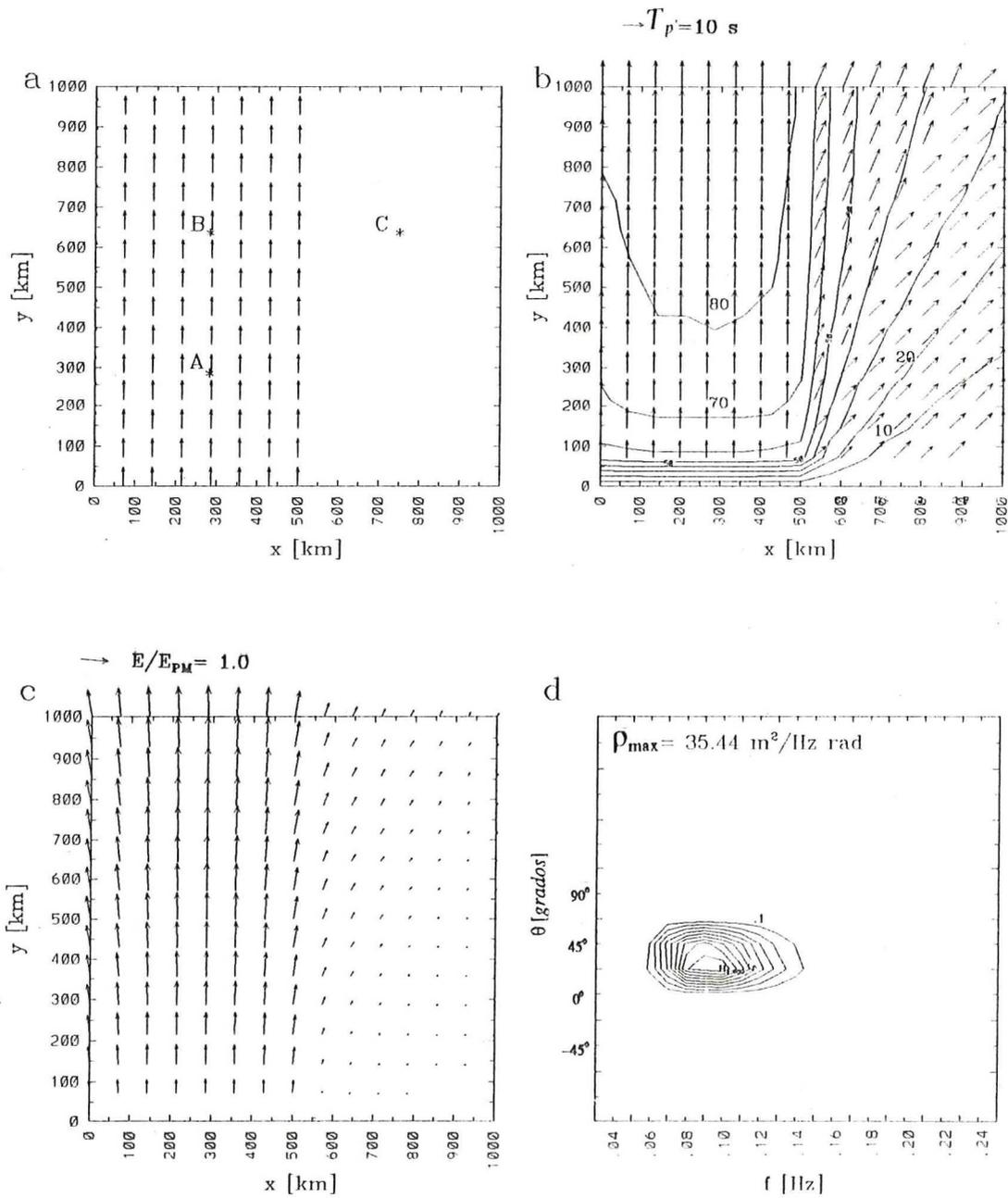


Figura 10. Caso IV: a) campo de viento de medio plano, b) idem Figura 4b, c) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección de los vectores representan el cociente E/E_{PM} y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$ respectivamente, d) espectro bidimensional normalizado en el punto C (Figura 10a).

Tabla III. Razón de energía total del caso IV con respecto a la energía total del oleaje limitado en alcance en el caso II para los puntos A y B (Figura 10a). Tabla 9.1 del SG modificada con los resultados del DSA.

MODELO	A $x = 225 \text{ km}$ $y = 300 \text{ km}$	B $x = 225 \text{ km}$ $y = 675 \text{ km}$
	E_{IV}/E_{II}	E_{IV}/E_{II}
MRI	0.93	0.88
VENICE	0.83	0.87
NOWAMO	0.97	0.83
GONO	1.00	0.99
TOHOKU	1.00	1.00
HYP A	1.00	1.00
BMO	0.94	0.98
SAIL	0.55	0.99
DNS	0.86	0.78
DSA	0.96	0.93
DSANL	1.02	0.91

Los modelos híbridos (HYPA, TOHOKU y GONO) producen resultados muy similares con respecto a los resultados del caso II por lo que para ambos puntos (A y B) los valores de E_{IV}/E_{II} son cercanos a 1 (Figura 11). Los resultados de los modelos discretos (SAIL, VENICE, DNS y MRI) fueron muy influenciados por los efectos de las fronteras laterales. En particular, los resultados del modelo DSA no parecen muy influenciados por las fronteras por lo que sus resultados se parecen más a los de los modelos híbridos que se ubican cerca de la diagonal.

La cantidad de energía advectada por los modelos del SWAMP y el DSA desde la región con viento hacia la región en calma puede apreciarse en la Tabla IV donde se presenta la energía total E , frecuencia promedio \bar{f} y dirección promedio $\bar{\theta}$ del oleaje distal en el punto C normalizadas con los valores correspondientes al punto B el cual tiene la misma distancia a la costa que el punto C. Esta tabla se resume en la gráfica de E_C/E_B contra f_C/f_B mostrada en la Figura 12; las flechas indican la dirección promedio del oleaje en C.

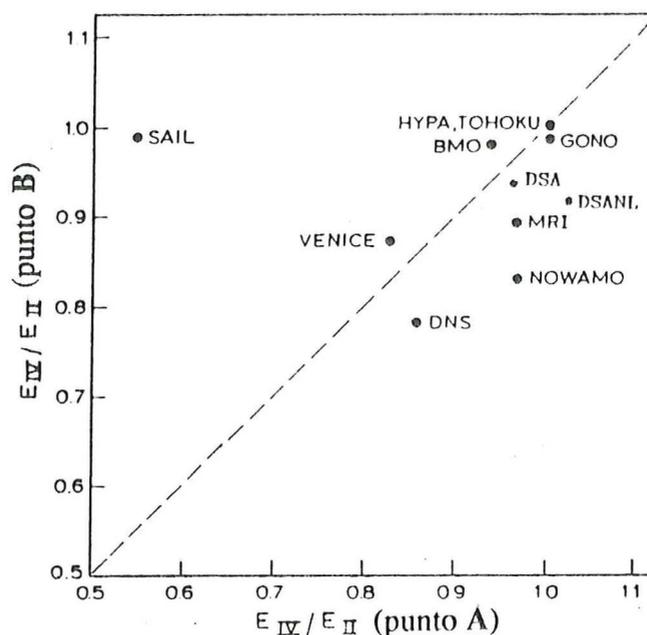


Figura 11. Ubicación de los modelos en el plano de parámetros a través de los valores E_{IV}/E_{II} en los puntos A y B (caso IV Figura 10a). Tomada de la Figura 9.3 del SG y aumentada con los resultados del DSA.

Tabla IV. Energía total, frecuencia promedio y dirección promedio del oleaje en el semiplano en calma en el punto C. (Tomada de la Tabla 9.2 del SG y aumentada con los resultados del DSA).

MODELO	E_c/E_b	\bar{f}_c/\bar{f}_b	$\bar{\theta}_c - \bar{\theta}_b$
MRI	0.24	1.05	39°
VENICE	0.11	1.19	30°
NOWAMO	<0.05	1.18	45°
GONO	0.14	0.97	47°
TOHOKU	0.00	-	-
HYPA	0.18	1.24	45°
BMO	0.10	1.22	47°
SAIL	0.13	1.26	35°
DNS	0.17	1.06	45°
DSA	0.22	0.94	34°
DSANL	0.23	1.01	37°

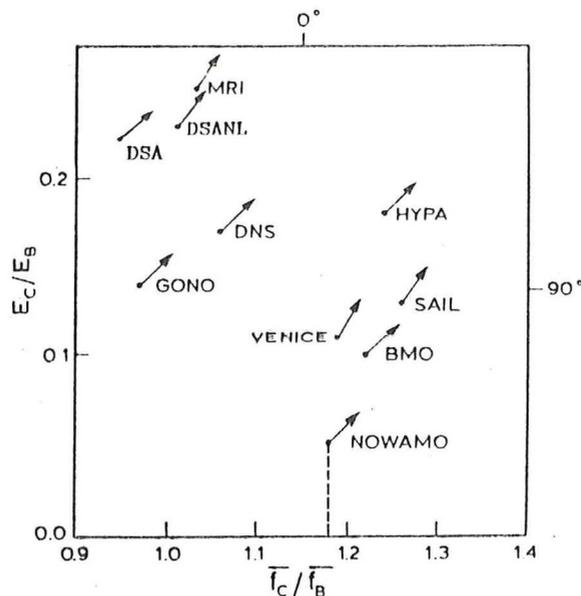


Figura 12. Ubicación de los modelos en el plano de parámetros de E_C/E_B contra \bar{f}_C/\bar{f}_B para el caso IV. Los índices B y C se refieren a los puntos B y C (Figura 10a); las flechas con magnitud unitaria indican la dirección promedio del oleaje distal en el punto C. Tomada de la gráfica 9.5 de SG y aumentada con los resultados del DSA.

La forma funcional de la distribución direccional influye en la cantidad de energía que pasa hacia la región en calma. Esta distribución es más ancha en el DSA ($\sim \cos^2(\theta - \omega)$) que en los modelos del SWAMP (e.g., en el VENICE $\sim \cos^4(\theta - \omega)$), por lo que en la región en calma en el DSA se tiene oleaje distal con más energía en direcciones distintas a la dirección del viento, y consecuentemente con mayor energía total, que en los otros modelos. Esto también puede apreciarse en los espectros 2D observados en el punto C (Figura 10d); el contorno de 0.1 de energía normalizada (con el valor de máxima energía) en el DSA tiene una distribución direccional de 67.5° mientras que en el VENICE tiene una distribución

direccional de 35° (SG).

El DSA y el MRI son los modelos que más energía advectan hacia el punto C, y aunque las diferencias en las predicciones del oleaje distal (en el plano sin viento) no son lo suficientemente significativas para agrupar a los modelos por clases reflejan algunas características particulares (como las razones de crecimiento y las distribuciones angulares) del oleaje local presente en la región de donde el oleaje distal ha sido radiado.

IV.1.4 Caso V: Frente Diagonal

En la Figura 13a se muestra la geometría del campo de viento el cual tiene un frente diagonal y en la Figura 13b se muestra el campo de oleaje producido por ese viento. Las características del campo de olas al sur del frente son similares a las de los campos producidos por los modelos del SWAMP; el oleaje crece uniformemente desde la frontera sur hasta llegar al frente y se desvía ligeramente hacia el frente y hacia la frontera este en los puntos cercanos a estas regiones.

Las Figuras 13c y 13d muestran espectros 2d en los puntos B_1 y B_2 (Figura 13a) respectivamente. Puede observarse que la separación entre el oleaje local y el distal no es tan marcada como podría esperarse en un modelo de primera generación; en este caso (DSA) existe energía considerable en las direcciones intermedias entre los dos picos espectrales. En el modelo VENICE, que también es de primera generación, el oleaje local está totalmente separado del oleaje distal (SG).

En general todos los modelos considerados muestran grandes diferencias en la forma en la que el oleaje cambia su energía total y su dirección promedio al atravesar el frente (Figuras 14a y 14b). La Figura 14a muestra la variación de la energía total de los modelos a lo largo de $y=825$ km. Nótese que el alcance se incrementa hacia la izquierda (decremento de la distancia x)

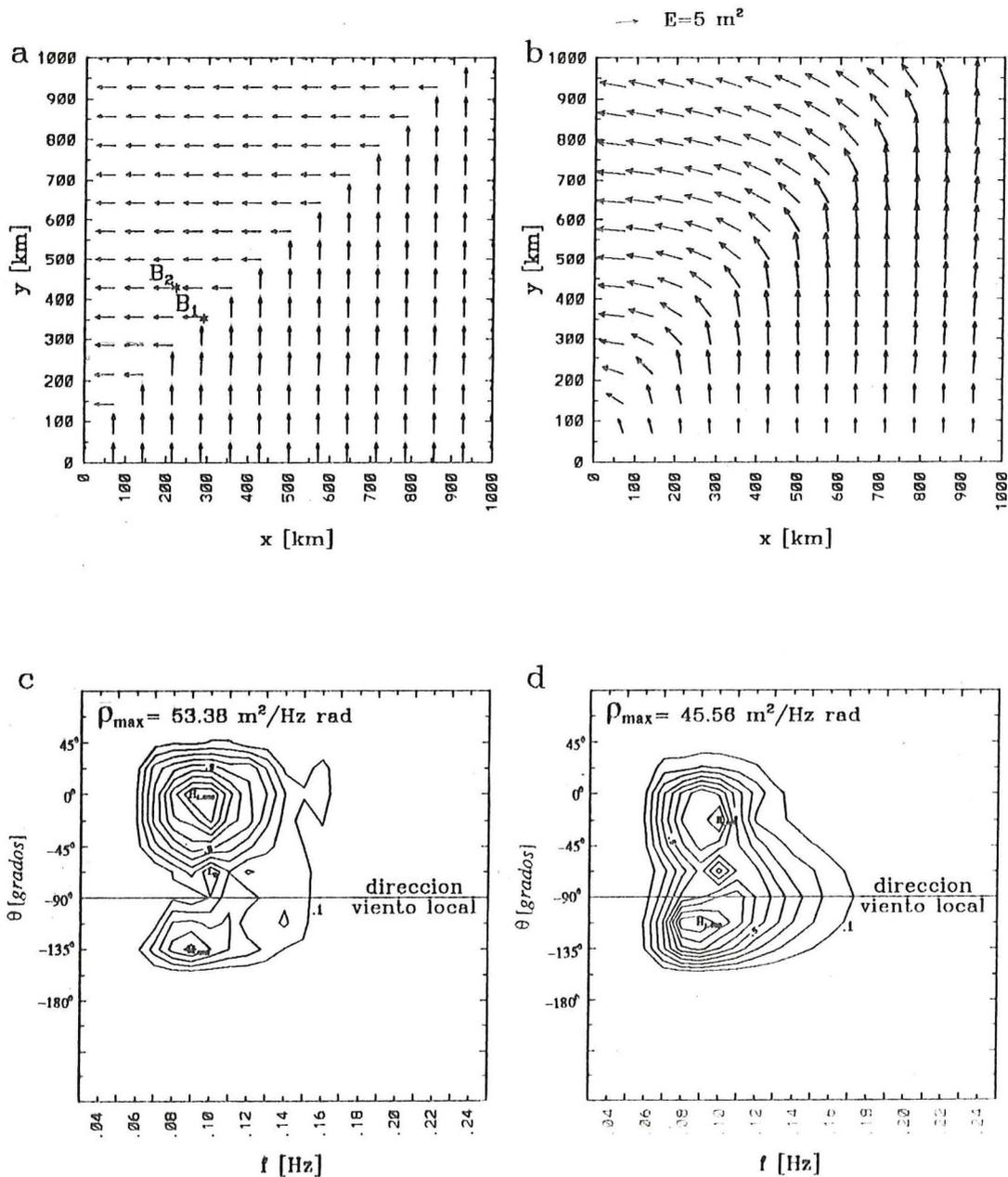


Figura 13. Caso V: a) campo de viento estacionario con frente diagonal, b) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección del vector indican la energía total E y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$ respectivamente, c) y d) espectros bidimensionales en los puntos B_1 y B_2 (Figura 13a), respectivamente.

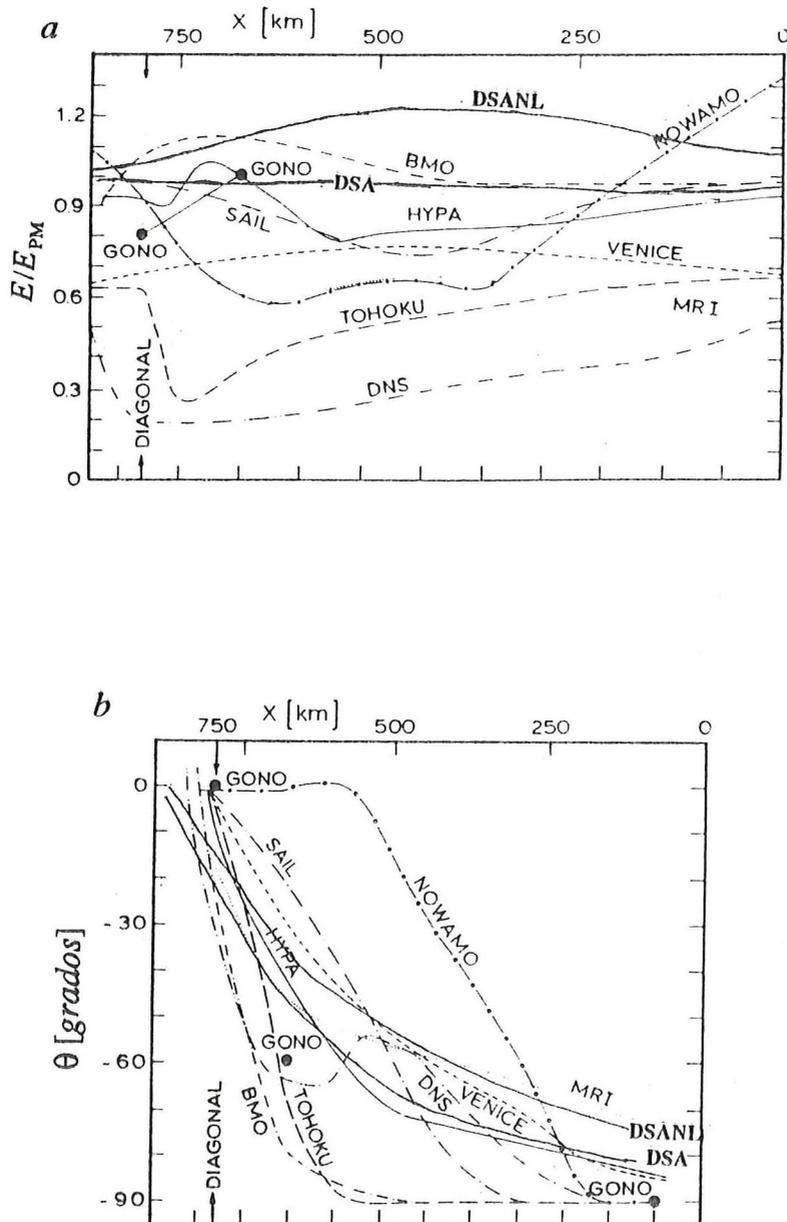


Figura 14. Caso V: a) energía total E , b) relajación de la dirección promedio ($\bar{\theta}$). Ambos resultados a lo largo de $y = 825$ km, tomada de la Figura 11.5 y 11.6 del SG y aumentadas con los resultados del DSA. Nótese que el alcance se incrementa hacia la izquierda (decremento de x).

Los modelos con propagación desacoplada como el VENICE, MRI y DSA muestran una transición suave a través del frente debido al desacoplamiento dinámico entre componentes del oleaje distal y local. Por otro lado, el algoritmo de acoplamiento entre oleaje distal y local del modelo acoplado discreto SAIL es moderado (interacción débil) y por lo tanto también muestra una transición continua.

Sin embargo, de todos los modelos el DSA es el que muestra el menor cambio en la energía total del oleaje al cruzar el frente (sólo se observa una atenuación muy leve). El oleaje de frecuencias altas que se propaga hacia el norte es rápidamente amortiguado, pero se genera de nuevo para crecer y propagarse en y con la nueva dirección del viento (Figura 13d).

Los modelos BMO, GONO e HYP A muestran un incremento en la energía del oleaje a medida que las olas atraviesan el frente mientras que los modelos DNS, TOHOKU y NOWAMO muestran un decremento.

En los modelos de segunda generación (HYP A, BMO y GONO) el incremento en la energía total ocurre cuando se supone (SG) que: 1) una porción significativa de la energía del oleaje que se propaga hacia el norte es inmediatamente transferida hacia el noroeste, es decir, en la dirección media entre la dirección del oleaje distal y el local (modelo HYP A), o es transferida al oleaje local cuando las olas atraviesan el frente (modelos BMO y GONO); 2) la energía restante es retenida sin pérdida significativa como oleaje distal.

El decremento en la energía total del oleaje al atravesar el frente en los modelos DNS, NOWAMO y TOHOKU tiene en cada uno causas diferentes. En el DNS el algoritmo de transición de oleaje distal a oleaje local limita todas las componentes del oleaje distal con frecuencias mayores a la frecuencia del oleaje local a un espectro de saturación Pierson-Moskowitz con una función de distribución angular $\sim \cos^2(\theta - \omega)$; ésto elimina toda la energía del oleaje que se propaga hacia el noreste y reduce significativamente la energía del oleaje que se propaga alrededor de la dirección oeste.

En el modelo NOWAMO el decremento en la energía del oleaje puede ser atribuido simplemente al algoritmo selectivo del oleaje distal, el cual retiene sólo la componente direccional de mayor densidad de energía para cada frecuencia. En el modelo TOHOKU la pérdida de energía es debida a limitaciones técnicas del esquema de advección numérica del oleaje local para cambios discontinuos en la dirección del viento; esto sucede particularmente de manera muy marcada en el presente caso, es decir, campo de viento con un frente a 45° con respecto a los ejes coordenados (SG).

La rapidez con la que se reorienta el oleaje hacia la dirección local del viento (hacia el oeste en la región por arriba del frente) es diferente en todos los modelos (Figura 14b). Por ejemplo, para el BMO la reorientación espacial es rápida mientras que para el DNS es lenta. El DSA muestra la reorientación más lenta de todos los modelos (Figuras 13b y 14b) debido a que existe poco amortiguamiento del oleaje distal y a que la energía de éste pesa considerablemente en el cálculo de $\bar{\theta}$.

El cambio de la dirección promedio del oleaje hacia el oeste en los puntos inmediatamente y sobre el mismo frente (región con viento dirigido hacia el norte) se debe a la contribución del oleaje, generado debajo del frente, que se propaga hacia el noroeste como consecuencia de la forma de la función de distribución angular y del poco amortiguamiento del oleaje que se propaga en dirección diferente a la del viento. Esto último se aprecia claramente en los resultados del caso III para el punto F (Figuras 8a y 9).

Los modelos con propagación desacoplada como el VENICE, MRI y DSA muestran una transición suave a través del frente, debido al desacoplamiento dinámico entre componentes del oleaje distal y local; por otro lado, el algoritmo de acoplamiento entre oleaje distal-oleaje local del modelo acoplado discreto SAIL es moderado y por lo tanto también muestra una transición continua.

IV.1.5 Caso VI: Huracán Estacionario

El forzamiento para el modelo en este caso es un huracán estacionario cuyo campo de viento asociado se muestra en la Figura 15a; el campo de olas generado se muestra en la Figura 15b.

En este caso se analiza y discute principalmente el campo de oleaje resultante, ya que éste da una idea clara de como los modelos toman en cuenta todos los factores que están en juego en este campo de viento.

En el modelo DSA las mayores alturas de ola se encuentran al noroeste del ojo del huracán, y al igual que los demás modelos del SWAMP (exceptuando el modelo NOWAMO), produce un campo de oleaje con dirección similar a la del campo de viento. La única región en la que la dirección promedio del oleaje difiere de la dirección del viento local es en el suroeste de la malla. En esta región la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$ es hacia el sur mientras que el viento está dirigido hacia el noroeste. Esto se debe a que en esa región el viento es muy débil y a que la mayor parte de la energía presente en esos puntos proviene de la zona que se encuentra al oeste del ojo del huracán donde la dirección del viento es hacia el sur (Figura 15b).

A pesar de que la mayoría de los MNPO producen campos de olas similares en este caso, existen diferencias muy significativas en sus distribuciones espectrales (SG). Estas diferencias son principalmente en la frecuencia y en el nivel energético del pico espectral, y además, en la amplitud de las distribuciones espectrales tanto en frecuencia como en dirección (Tabla V).

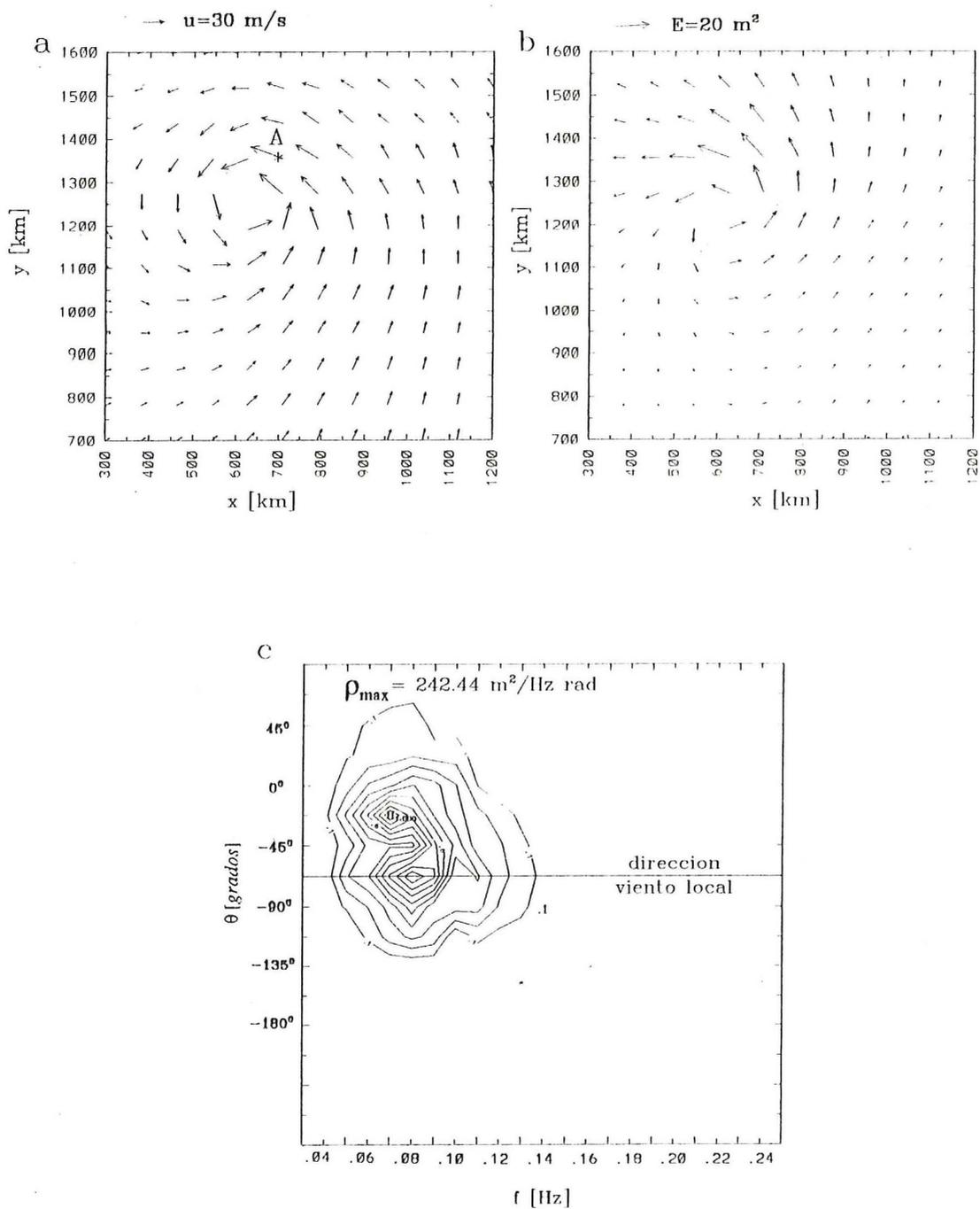


Figura 15. Caso VI: a) campo de viento del huracán, b) idem Figura 13b, c) espectro bidimensional en el punto A (Figura 15a); los intervalos de los contornos son de 0.1.

Tabla V. Características espectrales del oleaje generado en el punto A (Figura 15a) por el DSA y algunos modelos del SWAMP.

MODELO	f_p [Hz]	$\theta_p - \omega$	$\Delta f_{0.1}$ [Hz]	$\Delta \theta_{0.1}$
MRI	0.05	20°	0.08	180°
HYP A	0.08	34°	0.07	180°
GONO	0.06	0°	0.08	190°
BMO	0.05	0°	0.04	195°
DNS	0.07	15°	0.07	123°
DSA	0.07	45°	0.10	215°
DSANL	0.07	45°	0.10	210°

f_p : frecuencia del pico espectral

$\theta_p - \omega$: desviación de la dirección del pico espectral con respecto a la del viento local

$\Delta f_{0.1}$: extensión del espectro en frecuencia ($f_{max} - f_{min}$) para el contorno de 0.1

$\Delta \theta_{0.1}$: extensión del espectro en dirección ($\theta_{max} - \theta_{min}$) para el contorno de 0.1

El DSA presenta la distribución espectral mas ancha, tanto en frecuencia como en dirección, y presenta energía en frecuencias muy bajas (Figura 15c) debido a la forma de la función de crecimiento (ec. 17) y a la propagación desacoplada característica del modelo. Esto último ocurre de una manera similar en el modelo MRI (SG).

El promedio de las alturas máximas obtenidas por los modelos del SWAMP es de 14 m (Tabla VI); las alturas máximas extremas fueron dadas por los modelos HYP A (8 m) y BMO (25 m). La altura máxima alcanzada por el DSA es de 16 m. La mayoría de los modelos ubicó la altura máxima cerca y al noroeste del ojo del huracán; el DSA la ubicó en el norte del ojo.

La Figura 16 ilustra la ubicación de las alturas significantes máximas H_{max} y las correspondientes direcciones promedio obtenidas por los modelos del SWAMP y el DSA.

Tabla VI. Características asociadas a las alturas máximas por el DSA y los modelos del SWAMP. (Tomada de la Tabla 12.2 de SG y aumentada con los resultados del DSA).

	MRI	VENICE	NOWAMO	GONO	TOHOKU	HYPY	BMO	SAIL	DNS	DSA
$(H_p)_{\max}$ (m)	14	11	14	16	13	8	25	14	10	16
*Ubicación	NE	NE	NE	NE	W	NE	NE	NE	NE	N
Distancia (km)	80	90	50	60	80	100	50	50	60	75
Distancia $H_p/2$	325	240	450	250	260	>500	150	400	>500	300
\bar{f} en $(H_p)_{\max}$	0.08	0.09	0.11	0.08	0.08	0.10	0.07	0.08	0.10	0.08
$\bar{\theta}$ en $(H_p)_{\max}$	NW	NW	NW	NW	S	NNW	NW	NW	NW	NW

* Indica la ubicación donde se alcanza la altura máxima H_{\max} respecto a la ubicación del ojo del huracán.

IV.1.6 Caso VII: Cambio de 90° en la Dirección del Viento

En este caso, se tiene inicialmente un campo de viento uniforme, con una rapidez de 20 m/s ($W = 39$ nudos) y dirigido al norte; al alcanzar un mar semidesarrollado (*i.e.*, cuando $f_p = 2f_{PM}$), la dirección del viento se cambia instantáneamente del norte hacia el oeste.

La evolución de la energía de los picos espectrales correspondientes al oleaje local y al distal, después del cambio en la dirección del viento (*i.e.*, para $t \geq 0$), se muestra en la Figura 17a. El desarrollo del nuevo oleaje local fue inicialmente idéntico al caso del crecimiento limitado en tiempo (caso II). El decaimiento del oleaje distal en los resultados del DSA es lento como en los modelos MRI y TOHUKU (SG), e independiente del aumento de la energía del oleaje local ya que el DSA es un modelo de propagación desacoplada.

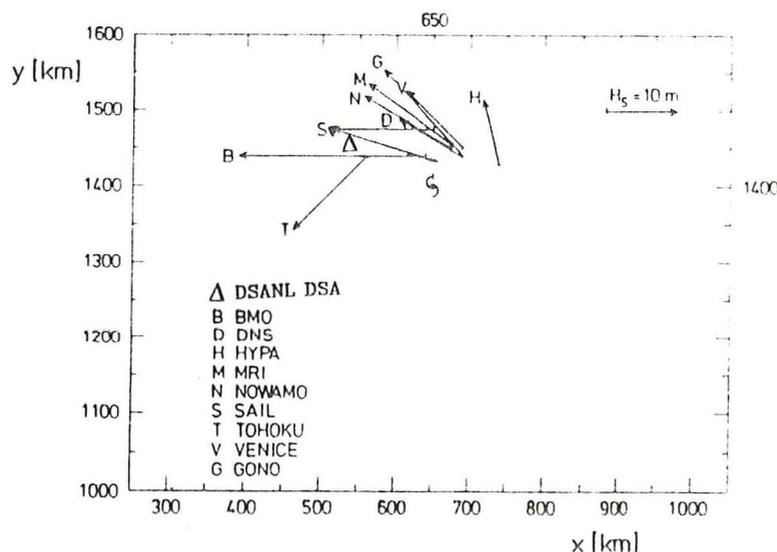


Figura 16. Ubicación de la altura significativa máxima H_{max} de los modelos del SWAMP y DSA para el huracán estacionario. Las flechas apuntan hacia la dirección promedio y sus longitudes son proporcionales a H_{max} . (Figura 12.4a de SG, modificada con los resultados de DSA).

La distribución espectral producida por el DSA (Figuras 17b y 17c) es congruente con los modelos del SWAMP, aunque en $t = 3$ hrs existe aún mucha energía en el oleaje distal ($\bar{\theta} = 0^\circ$) y en $t = 6$ hrs la mayor parte de la energía ya se encuentra en la dirección del viento local ($\bar{\theta} = 90^\circ$).

Las distribuciones espectrales del DSA y de los modelos del SWAMP son muy variadas y reflejan las diferencias que existen en ellos en cuanto a: 1) parametrización del término que representa las interacciones no lineales entre componentes del oleaje, 2) disipación de la energía del oleaje, y 3) razones de crecimiento.

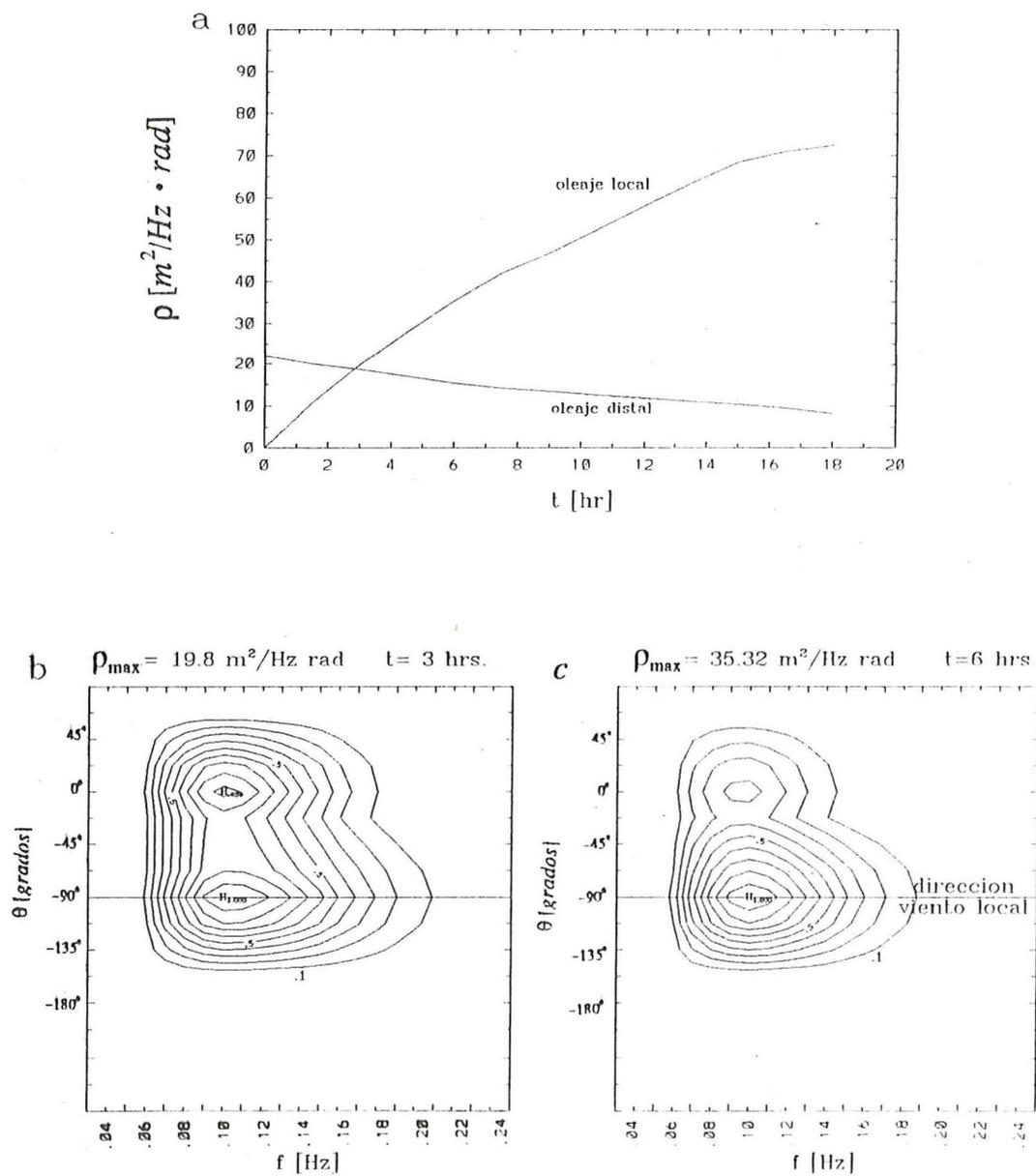


Figura 17. Caso VII: a) evolución de la densidad espectral del oleaje local y oleaje distal después del cambio en la dirección del viento, b) y c) distribuciones espectrales a las 3 y 6 hrs respectivamente, después de cambio en la dirección del viento, para un punto en el centro de la malla.

IV.2 Modelo DSA con Propagación Acoplada (DSANL)

El término que representa las interacciones no lineales entre olas, S_{nl} , en los MNPO de propagación acoplada depende, en general, de parámetros que determinan la forma del espectro. La función que se introdujo al modelo DSA es la función paramétrica propuesta por Barnett (1968).

La forma y las características del término S_{nl} , tal como lo propone Barnett (1968), pueden observarse, al igual que en su distribución espectro-direccional, en las Figuras 18a y 18c respectivamente. Estas distribuciones corresponden al oleaje generado en el punto A (Figura 4a). Las características más sobresalientes de S_{nl} son:

- 1) Tres lóbulos en la distribución en frecuencia: un primer lóbulo positivo situado en un intervalo angosto en frecuencias bajas; un segundo lóbulo negativo situado en un intervalo muy amplio en frecuencias intermedias; y un tercer lóbulo positivo situado en las frecuencias altas.
- 2) La distribución direccional del primer lóbulo es más angosta que la distribución direccional de los otros dos.
- 3) S_{nl} tiene valores muy grandes en el segundo y tercer lóbulo.

La forma y características del término S_{nl} en este caso no corresponden con las propiedades de la transferencia no lineal de energía entre olas mencionadas por Hasselmann y Hasselmann (1985) (sección I.1.1). Las principales diferencias cuantitativas son:

- 1) Las razones de transferencia más grandes deben encontrarse cerca del pico espectral, es decir, entre el primer y segundo lóbulo de la distribución espectral de S_{nl} .
- 2) Las magnitudes del segundo y tercer lóbulos deben ser menores, y más aún, la magnitud del tercer lóbulo debería ser relativamente menor que los otros dos.

Estas diferencias ocasionan lo siguiente:

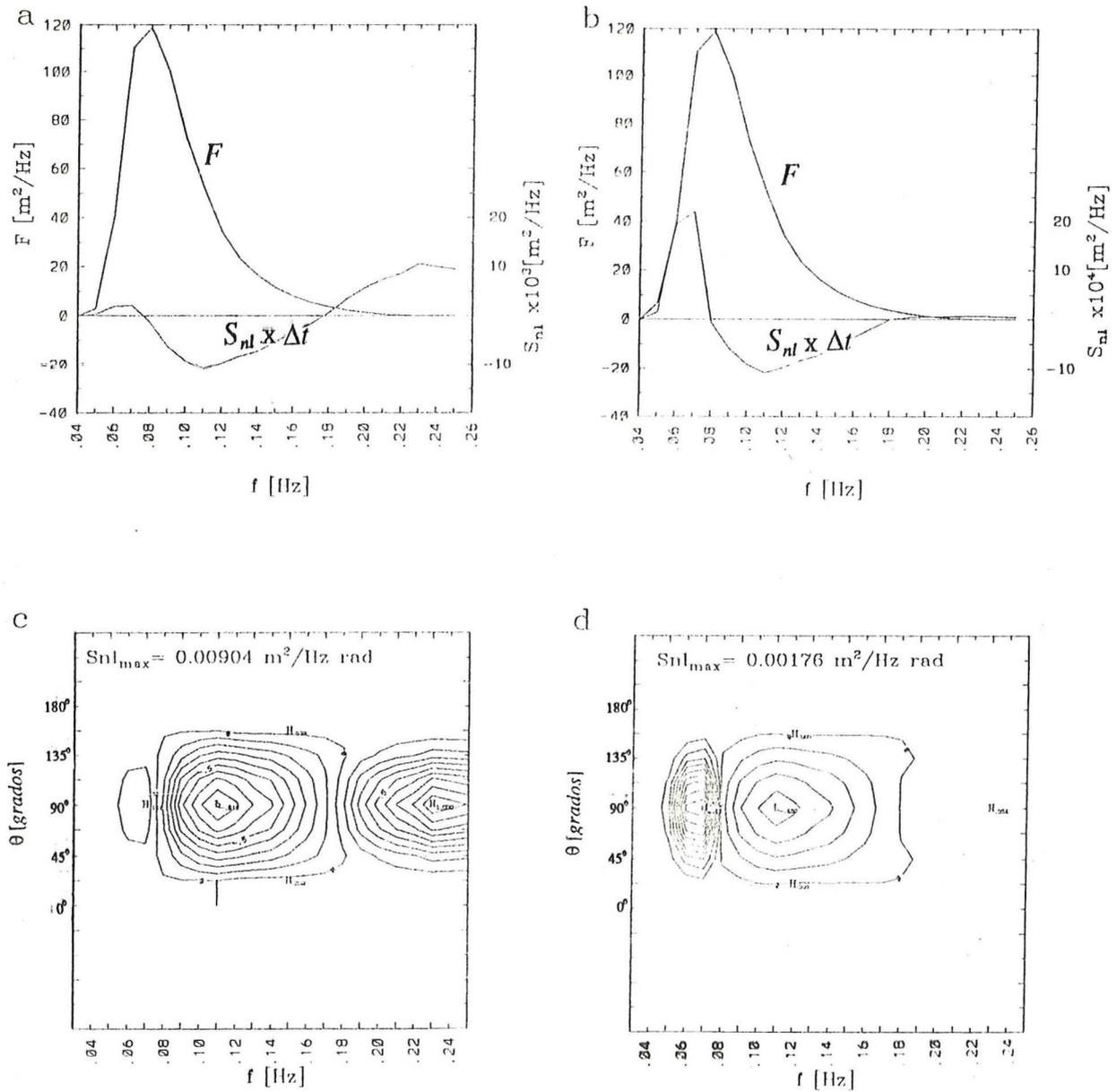


Figura 18. a) espectro unidimensional (F) y el término (S_{nl}) obtenido de acuerdo a Barnett (1968); b) mismo espectro F de la Figura a) y S_{nl} obtenido a partir de la expresión modificada de la parametrización de Barnett (1968); c) distribución espectral bidimensional de S_{nl} correspondiente a a); y d) distribución espectral bidimensional de S_{nl} correspondiente a b).

- 1) El tercer lóbulo introduce energía en exceso deformando el espectro y creando inestabilidades que se propagan con velocidad igual a la de las componentes espectrales donde se producen. La magnitud del tercer lóbulo de S_{nl} es muy grande en comparación con el de S_{nl} para los espectros dados por otros modelos (Hasselmann *et al.*, 1973; Hasseemann *et al.*, 1985; Hasselmann y Hasselmann, 1985; Resio, 1981). En éstos la magnitud del tercer lóbulo es menor o igual a la mitad de la magnitud del primer lóbulo; incluso existen espectros para los cuales la distribución S_{nl} no presenta el tercer lóbulo dependiendo de las características propias del espectro.
- 2) La magnitud del lóbulo negativo de S_{nl} es tan grande que produce valores negativos de energía en las componentes espectrales correspondientes.

Debido a los resultados poco satisfactorios obtenidos con la función original de Barnett (1968); ésta se modificó hasta obtener resultados congruentes con los modelos del SWAMP. Hasselmann y Hasselmann (1985) también trabajaron con una modificación de la parametrización de Barnett (1968), mencionan que la motivación principal para desarrollar nuevas parametrizaciones de S_{nl} es que las usadas en los modelos de segunda generación no pueden reproducir la forma del espectro del oleaje observado cuando no se introducen restricciones *ad hoc*.

La modificación que se hizo al término S_{nl} en este trabajo consistió en disminuir en un orden de magnitud las amplitudes del segundo y tercer lóbulo, y en multiplicar el tercer lóbulo por $(\bar{f}/f)^3$ (factor que depende de la forma del espectro).

Así, la nueva expresión de S_{nl} es

$$S_{nl} = (\Gamma - \tau\rho)\beta\xi \quad (31)$$

donde Γ y τ siguen siendo definidas por las ecuaciones (21) y (22) de la parametrización original, y β y ξ se definen como

$$\beta = 0.1 \quad (\Gamma - \tau\rho) < 0 \quad \text{ó} \quad f > f_p \quad (32)$$

$$= 1.0 \quad (\Gamma - \tau\rho) \geq 0 \quad \text{y} \quad f \leq f_p$$

y

$$\xi = \left(\frac{\bar{f}}{f}\right)^3 \quad (\Gamma - \tau\rho) > 0 \quad \text{y} \quad f > f_p \quad (33)$$

$$= 1.0 \quad (\Gamma - \tau\rho) \leq 0 \quad \text{ó} \quad f \leq f_p$$

Con las expresiones anteriores la forma de la distribución de S_{nl} no se modifica sustancialmente; lo que se altera es sólo la magnitud de los lóbulos (Figura 18b y 18d) quedando ahora la zona de mayor interacción alrededor del pico espectral y la de menor interacción en las frecuencias altas.

Barnett (1968) menciona que su parametrización funciona bien para espectros parcial y totalmente desarrollados. En esta tesis, para determinar la etapa de desarrollo del espectro más conveniente para comenzar a considerar las interacciones no lineales, se tomó como criterio la frecuencia promedio (\bar{f}_{PM}) del espectro Pierson-Moskowitz el cual, para un viento dado, es un espectro totalmente desarrollado. El término S_{nl} se consideró al momento de cumplirse la condición

$$\bar{f} \leq 1.2\bar{f}_{PM} \quad (34)$$

En las siguientes secciones se describirán y discutirán los resultados obtenidos con el DSA modificado (DSANL) al incluirle el término S_{nl} dado por las ecuaciones (31), (32) y

(33), y al cumplirse la condición dada por la ec. (34). La presentación de los resultados obtenidos con el DSANL es análoga a la de los resultados obtenidos con el DSA (sección IV.1).

IV.2.1 Caso II: Crecimiento Limitado en Alcance y Tiempo

El DSANL produce alturas mayores en la parte derecha de la región (Figura 19a) en comparación con el DSA (Figura 4b). Esto es debido a que el término S_{nl} transfiere energía de frecuencias medias hacia frecuencias bajas y altas; las frecuencias bajas tienen un nivel de saturación mayor y, por lo tanto, la energía que ganan por interacciones la pueden conservar por más tiempo y advechar con mayor rapidez resultando en una mayor acumulación de energía con respecto al DSA en toda la malla y en particular en la zona este.

Lo anterior se puede observar también en los espectros unidimensionales $F(f)$ correspondientes a diferentes alcances (Figura 19b). El nivel energético de todas las frecuencias para cada alcance es mayor en el DSANL que en el DSA. Los espectros 1 y 2 son idénticos a los dos primeros del DSA (Figura 4c) ya que a éstos no se les sumó el término $\Delta t S_{nl}$ porque para esos alcances (75 km y 150 km) no se cumple la condición $\bar{f} \leq 1.2\bar{f}_{PM}$. Para alcances mayores de 150 km los espectros son diferentes a los correspondientes del DSA en nivel energético, frecuencia del pico espectral, y energía en las frecuencias menores a 0.06 Hz (frecuencias para las cuales no hay energía en los resultados del DSA). La energía en frecuencias menores a 0.06 Hz se debe exclusivamente a la transferencia por interacciones no lineales.

La forma, la frecuencia del pico espectral y el nivel energético del espectro unidimensional $F(f)$ del DSANL reflejan las interacciones no lineales. El espectro producido por el DSANL, en general, se parece más al de los modelos del SWAMP que al del DSA (Figura 5) en cuanto a la frecuencia y nivel energético del pico espectral, frecuencia mínima presente, y nivel energético en las frecuencias altas.

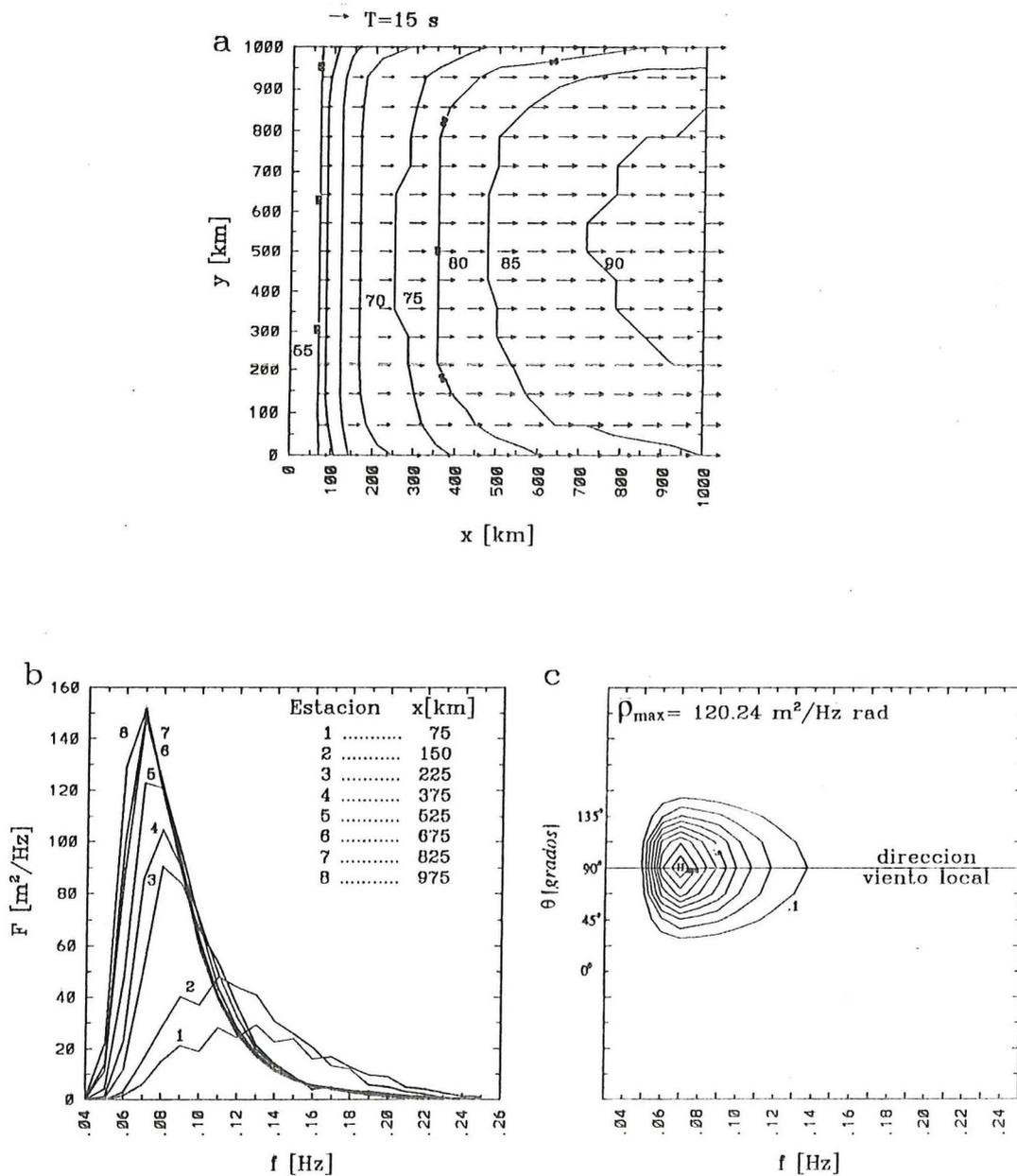


Figura 19 Caso II para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y dirección de estos indican el período y dirección de la componente de máxima energía del oleaje respectivamente y los contornos indican altura de ola en decímetros, b) espectros limitados en alcance, y c) espectro bidimensional en el punto A (Figura 4a).

Al comparar espectros bidimensionales producidos por el DSANL (Figura 19c) y por el DSA (Figura 4d) en el punto A (Figura 4a) puede observarse que para el espectro producido por el DSANL: 1) el nivel energético es mayor que el del espectro producido por el DSA, 2) la frecuencia del pico espectral disminuyó, y 3) el contorno de energía normalizada de 0.1 tiene una distribución en frecuencia mas angosta. La distribución en dirección es similar en ambos espectros.

Las curvas de evolución de la energía total E y frecuencia del pico espectral f_p con respecto al alcance para el DSANL (Figuras 6a y 6c respectivamente) presentan desviaciones con respecto a las curvas correspondientes del DSA en $D \sim 300$ km que es donde comienza a sumarse el término de interacciones no lineales. La magnitud al final de la curva de E del DSANL es un poco mayor que la producida por el DSA.

Una de las consecuencias de la transferencia de energía por interacciones no lineales es una disminución más rápida de la frecuencia del pico espectral, lo que es evidente en la Figura 6c para el DSANL cuyas f_p son menores a las del DSA.

En la evolución temporal de los parámetros E y f_p (Figuras 6b y 6d respectivamente) en el punto A (Figura 4a) pueden notarse características muy similares a las de la evolución en el espacio. Primero existe un intervalo de tiempo donde las curvas de E y f_p del DSA y DSANL son iguales y en aproximadamente 9 hrs, que es el tiempo a partir del cual se empieza a considerar el término S_{nl} , las curvas divergen. El término S_{nl} ocasiona que E sea un poco mayor en el DSANL con respecto al DSA y que el pico espectral se desplace un poco más hacia las frecuencias bajas.

La Figura 20 ilustra la evolución temporal del espectro $F(f)$ en el punto A, y, comparándola con su análoga (Figura 7) del DSA, la diferencia entre las dos series de espectros es notoria en $t=9$ hrs, tiempo en el cual se introduce el término S_{nl} . Al comparar el nivel energético de los picos espectrales a las 9 hrs en los espectros generados por el DSA y el DSANL, la f_p del DSANL tiene mayor energía, sin embargo la energía total en los dos

espectros es casi la misma debido a que en el espectro del DSANL las componentes espectrales en frecuencias medias y altas bajaron su nivel al transferir su energía hacia frecuencias bajas.

IV.2.2 Caso III: Alcance Inclinado

Al igual que en el caso II el DSANL, en comparación con el DSA, produce alturas mayores y espectros con el pico espectral en frecuencias mas pequeñas para alcances mayores a 300 km (Figuras 21a y 8b respectivamente), que es la región en donde se cumple que $\bar{f} > 1.2\bar{f}_{PM}$ y, por lo tanto, donde se introduce el término S_{nl} en la evolución del espectro.

En los resultados del DSANL la razón $f_p/f_{PM} = 1.3$ se da en un alcance de 320 km, mientras que para el DSA se da en un alcance de 950 km, y por lo tanto, el DSANL presenta una mayor variación (disminución) en la frecuencia del pico espectral a través de toda el área. La distribución espacial de f_p presenta una variación más uniforme en el DSANL (Figura 21b) que en el DSA (Figura 8c).

A pesar de que en los casos II y III la energía E producida por el DSANL es mayor que la del DSA, la energía relativa de E en el caso III con respecto al caso II (E_{III}/E_{II}) es menor para el DSANL que para el DSA (Tabla II). De ésto se infiere que la asimetría en el crecimiento del caso III afectan más al DSANL que al DSA.

Las razones f_{pIII}/f_{pII} para el DSANL se mantienen iguales a las del DSA, a excepción del punto B (Figura 8a) donde la razón es 1.14. La diferencia entre f_{pIII} y f_{pII} es de sólo un Δf ya que $f_{pIII} = 0.08$ Hz y $f_{pII} = 0.07$ Hz. Si la resolución en frecuencia fuese más pequeña tal vez la razón de f_{pIII}/f_{pII} fuese menor.

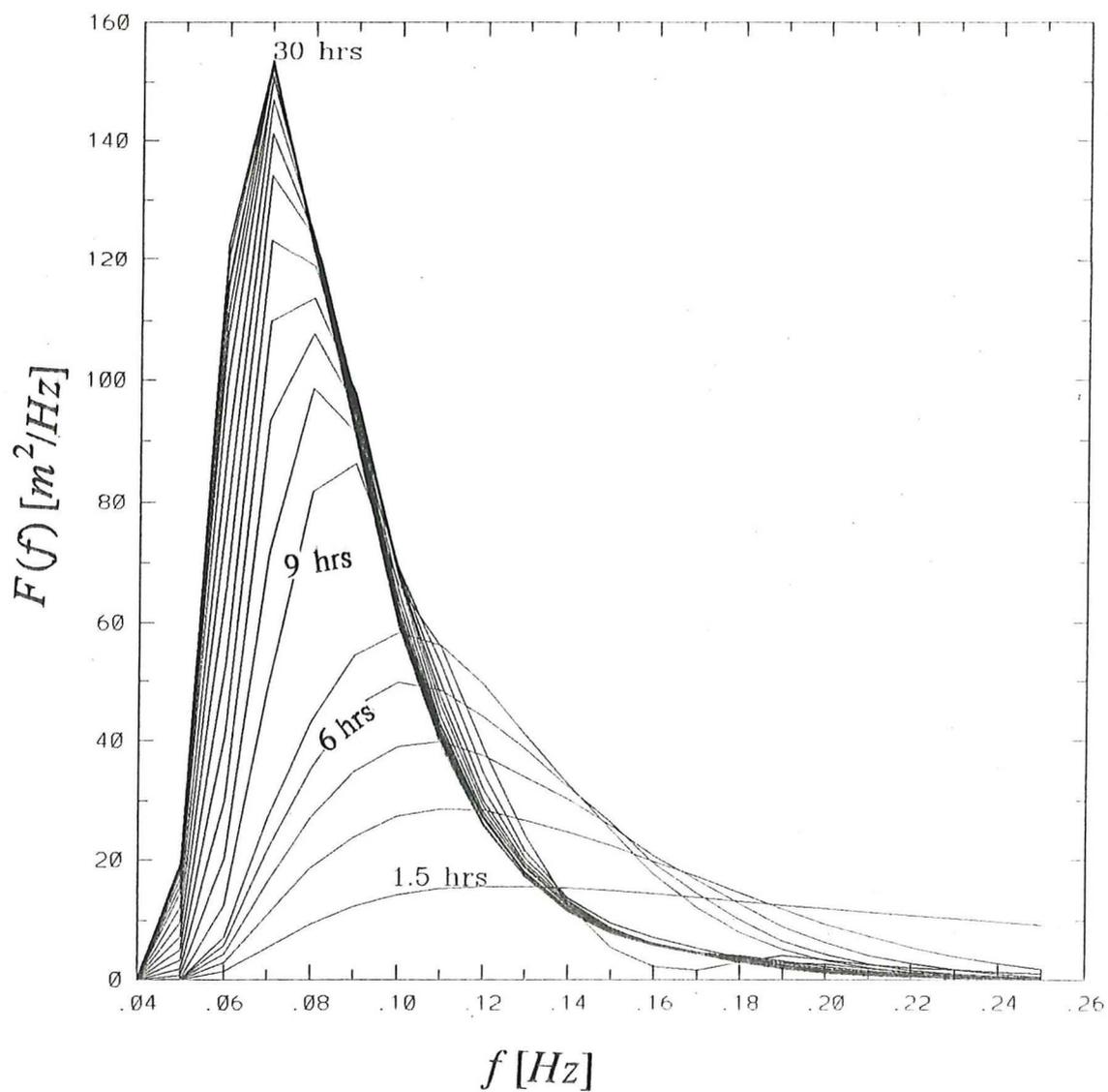


Figura 20. Secuencia temporal del desarrollo espectral en el punto A (Figura 4a) para el DSANL; el alcance es de 975 km.

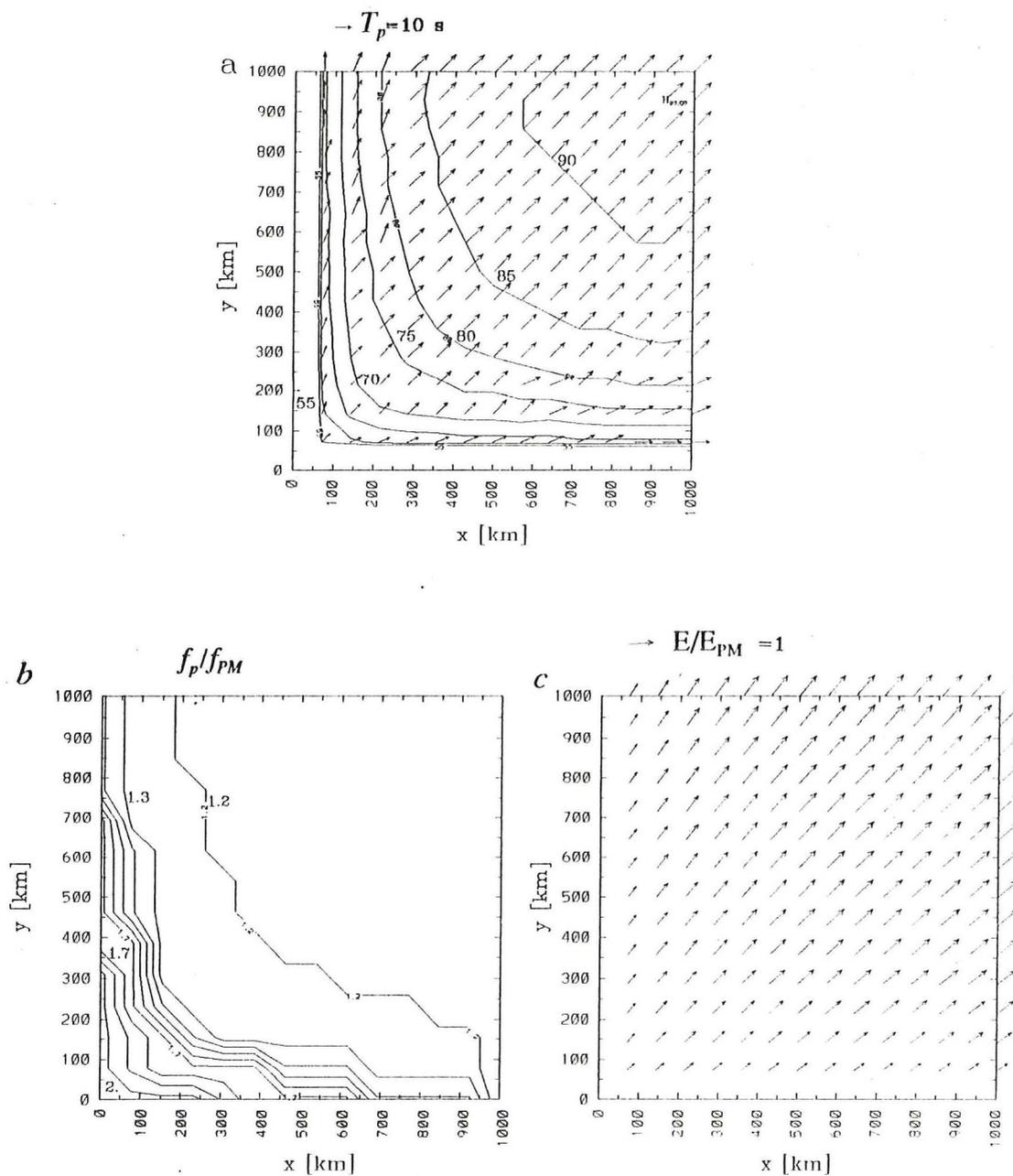


Figura 21. Caso III para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y dirección del vector indican el período y dirección de la componente de máxima energía, respectivamente; los contornos indican altura de ola en dm, b) isolíneas de f_p/f_{PM} , c) diagrama de vectores donde el módulo y dirección de éstos indican la magnitud de E/E_{PM} y la dirección promedio, respectivamente.

La diferencia mas notoria entre el DSANL y DSA es en la dirección de propagación de la componente de máxima energía θ_p , ya que en el DSANL, aunque también es simétrica con respecto a la diagonal (Figura 21a), se distribuye de una manera menos uniforme que en el DSA (Figura 8b). Sin embargo, apesar de ésto, la dirección promedio $\bar{\theta}$ (Figura 20c) también tiene la dirección del viento como en el DSA.

El espectro bidimensional en el punto F (Figura 8a) para el DSANL (no se muestra) es la misma que para el DSA (Figura 9) debido a que en ese punto el espectro no ha alcanzado el grado de desarrollo requerido para que se den las interacciones no lineales.

IV.2.3 Caso IV: Campo de Viento de Medio Plano

El campo de oleaje producido por DSANL (Figura 22a) es similar al del DSA (Figura 10b) en cuanto a nivel energético E , dirección promedio $\bar{\theta}$, y dirección principal θ_p . Sin embargo, como en el caso II, la diferencia es notoria en la distribución espectral 2D. Las diferencias entre los dos modelos (DSANL y DSA) pueden apreciarse mejor en las distribuciones espectrales (Figura 22c y Figura 10d) para el punto C (Figura 10a). En el DSANL f_p es menor ($f_p=0.08$ Hz) que en el DSA ($f_p=0.10$ Hz), y la distribución espectral del DSANL es más angosta en frecuencia y más ancha en dirección que la del DSA.

Comparando las energías en los puntos A y B (Figura 10a) entre el caso IV y el caso II, resalta el hecho de que para alcances cortos (punto A) las energías son similares $E_{IV}/E_{II}=1.02$ (Tabla III), pero para alcances grandes (punto B) el crecimiento se reduce en el caso IV, $E_{IV}/E_{II}=0.91$. Esto es debido a que en el caso IV se tiene menor contribución de los puntos laterales que en el caso II, por la diferencia en lo ancho del campo de viento (para el caso II se tomó la energía en $y=525$ km).

En el plano de parámetros de la Figura 11 la diferencia entre el DSANL y el DSA no es clara pues no se distribuyen de acuerdo al tipo de modelo (DSA primera generación, y

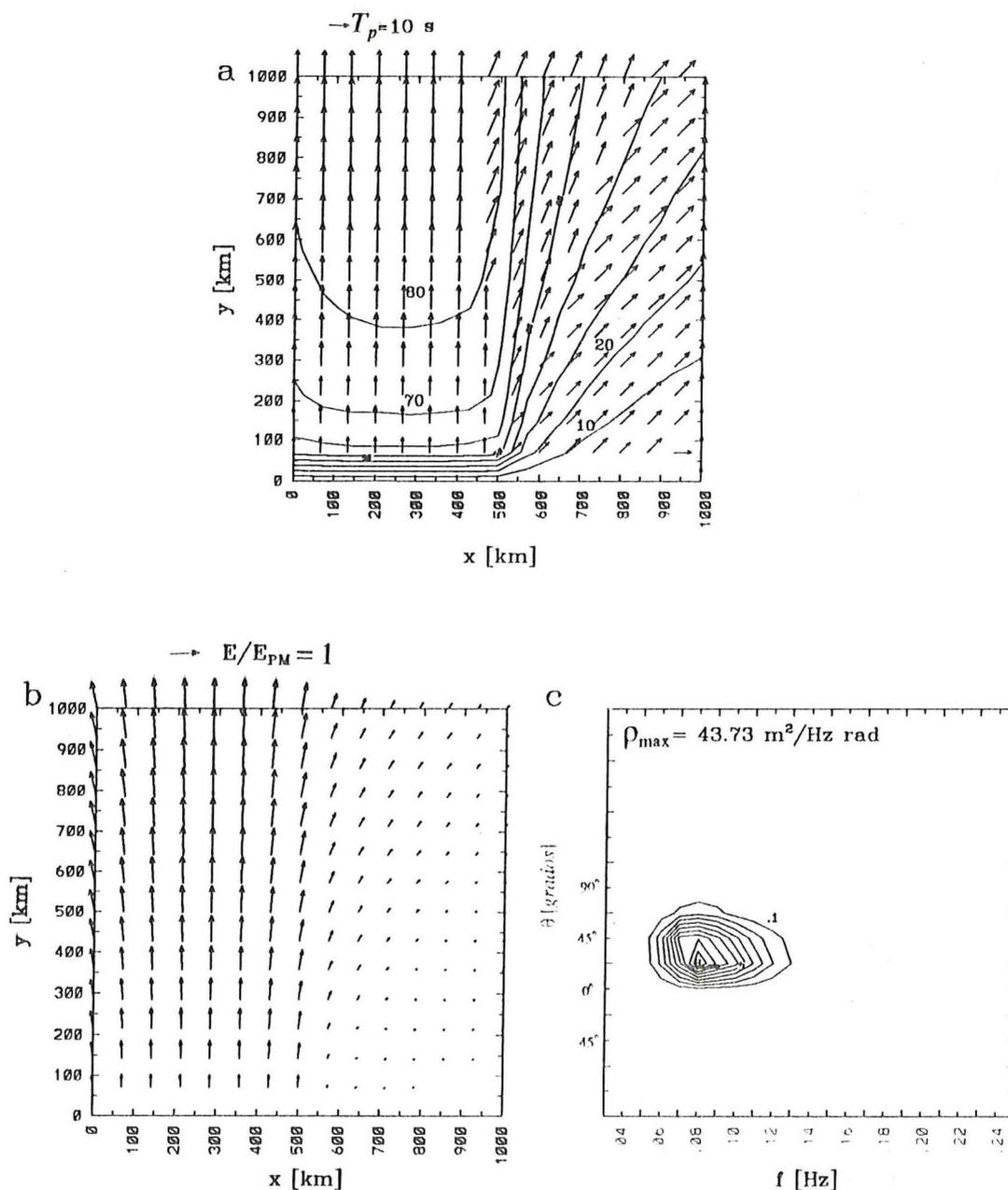


Figura 22. Caso IV para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y dirección del vector indican el período y dirección de la componente de máxima energía, respectivamente, los contornos indican altura de ola en dm, b) diagrama de vectores donde el módulo del vector indica E/E_{PM} y su dirección, la dirección promedio del oleaje, c) espectro bidimensional en el punto C (Figura 9a).

DSANL segunda generación) como los demás. Esto se debe a que el DSA se comporta más como los modelos discretos acoplados haciendo menos significativos los cambios en los valores de E y \bar{f} en el DSANL.

En la Tabla IV pueden observarse las razones de E , \bar{f} y $\bar{\theta}$ para el DSANL en el punto C con respecto al punto B. En los dos puntos el nivel energético es más alto que el alcanzado en el DSA pero la razón E_C/E_B del DSANL aumentó en un 5% aproximadamente. Esto indica que con las interacciones no lineales se advecta más energía hacia la zona en calma, en un intervalo de frecuencias más angosto (Figura 22c) y frecuencias más bajas (tal como lo demuestra la razón \bar{f}_C/\bar{f}_B de la Tabla IV).

La diferencia en las direcciones promedio $\bar{\theta}_C - \bar{\theta}_B$ fue de 37° en el DSANL y de 34° en el DSA; no es una diferencia muy significativa pero indica que está llegando más energía de puntos con alcance más grande, es decir, S_{nl} provoca una distribución angular de energía.

IV.2.4 Caso V: Frente Diagonal

Este caso es quizá donde es más clara la influencia del término de interacciones no lineales S_{nl} sobre la propagación y la forma del espectro acercando más así los resultados del modelo DSANL a los resultados de los modelos de segunda generación del SWAMP.

La Figura 23a ilustra el campo de oleaje por medio de vectores donde la dirección y la magnitud del vector representan la dirección promedio $\bar{\theta}$ y la energía total E respectivamente. Si se observa el cambio en dirección arriba del frente y se compara con la Figura 13b (DSA) puede observarse que la reorientación del oleaje hacia la nueva dirección es aún mas suave en el DSANL que en el DSA lo que también puede corroborarse en la Figura 14b (línea en $y = 825$ km).

En la energía total (Figura 14a) se produce un aumento a medida que el oleaje atraviesa el frente debido a dos causas: primero, una gran porción de la energía que se propaga hacia

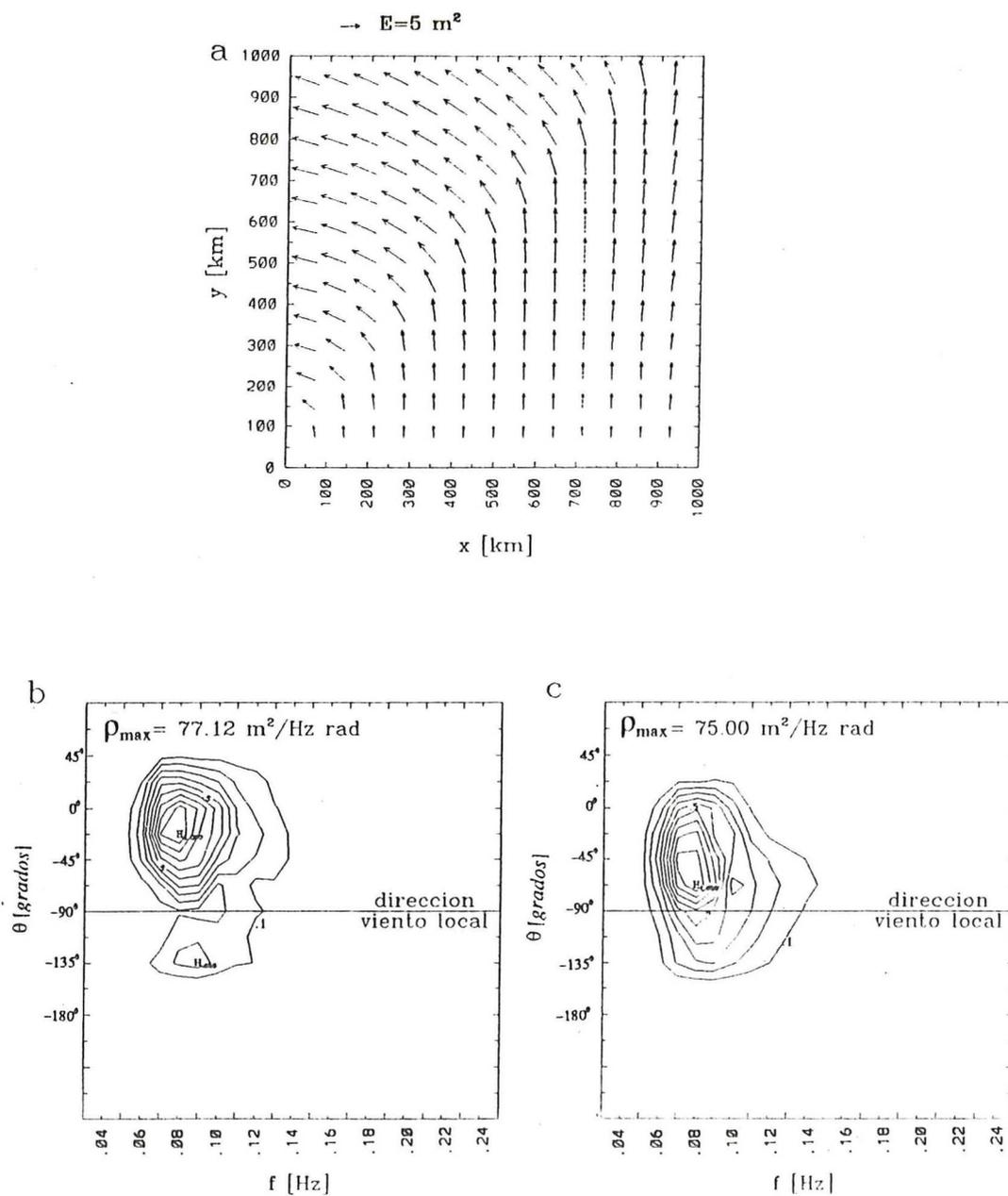


Figura 23. Caso V para el DSANL: a) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección del vector indican la energía total E y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$ respectivamente, b) y c) espectros bidimensionales en los puntos B_1 y B_2 , respectivamente (Figura 13a).

el norte es inmediatamente transferida en energía que se propaga a una dirección media entre la dirección del oleaje distal y la dirección del oleaje local; y segundo, la energía restante es retenida sin pérdida significativa como oleaje distal.

Lo anterior puede verse detalladamente en las Figuras 23b y 23c que ilustra las distribuciones espectrales en B_1 y B_2 (Figura 13a) respectivamente. La Figura 23b es similar a la Figura 13c; pueden observarse dos picos espectrales pero ahora con los resultados del DSANL el pico máximo se trasladó de la dirección 0° en el DSA a -22.5° en el DSANL. Esto quiere decir que las interacciones no lineales transfieren energía de la dirección 0° , que correspondió al viento debajo del frente, hacia direcciones más cercanas a la del viento nuevo (-90°).

En la Figura 23c se ilustra el espectro 2D en el punto B_2 ; éste representa la influencia que tienen las interacciones no lineales sobre la forma del espectro. Ahora se tiene un espectro con un sólo pico a diferencia del DSA (Figura 13d); el cambio es muy notable y puede observarse claramente que el oleaje distal ha sido absorbido o redireccionado hacia una dirección intermedia entre la dirección original del oleaje distal (0°) y la dirección del oleaje local (-90°).

Se dice que el oleaje distal ha sido redireccionado o absorbido por que el nivel energético aumentó en todo el espectro y no sólo en el pico espectral (ésto sólo puede simularse en un modelo de segunda generación). Lo anterior provoca que la reorientación de la dirección promedio $\bar{\theta}$ del DSANL (Figura 14b) sea la más suave de todos los modelos.

IV.2.5 Caso VI: Huracán Estacionario

En este caso los resultados son prácticamente los mismos que los obtenidos con el modelo DSA. La similitud de la dirección promedio y altura del oleaje es clara (Figuras 24a y 15b). Incluso las distribuciones espectrales (Figuras 24b y 15c y la Tabla V)

tienen muy pocas diferencias; la distribución en dirección es un poco más angosta en los resultados del DSANL con apenas 5° menos (para el contorno de 0.1) que la distribución espectral dada por el DSA.

Lo anterior es probablemente, como lo señala Young (1988), debido al número relativamente pequeño de parámetros usados para calcular el término S_{nl} , lo que hace que los modelos de segunda generación tengan dificultades para representar el espectro complejo generado por campos de viento que cambian rápidamente (en este caso la heterogeneidad se tiene en el espacio).

IV.2.6 Caso VII: Cambio de 90° en la Dirección del Viento

En los resultados de este caso, al igual que en el caso V, resalta el efecto de la función de interacciones no lineales dentro de los resultados. En la Figura 25a se representa la evolución de la energía en la frecuencia del pico espectral del oleaje distal y oleaje local después del cambio en la dirección del viento ($t=0$) para un oleaje inicialmente semidesarrollado ($\bar{f} = 2\bar{f}_{PM}$).

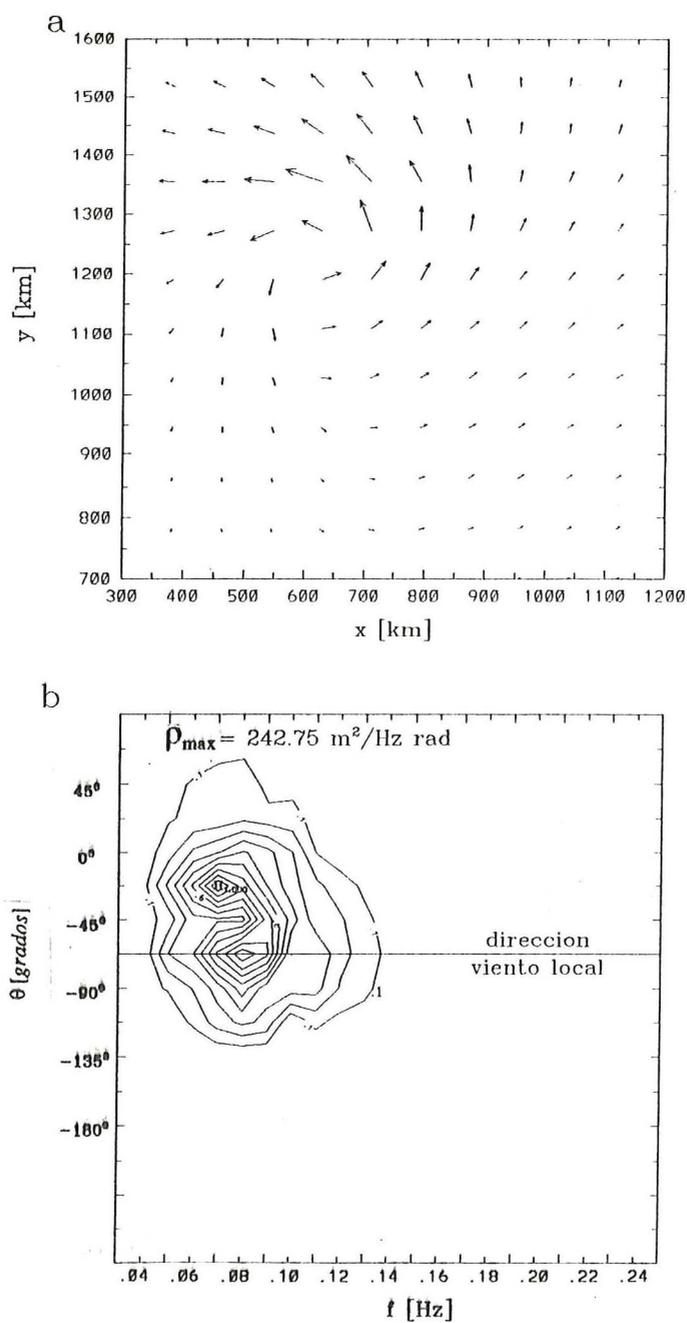


Figura 24. Caso VI para DSANL: del huracán, a) diagrama de vectores donde el módulo y la dirección del vector indican la energía total E y la dirección promedio del oleaje $\bar{\theta}$, respectivamente, b) espectro bidimensional en el punto A (Figura 15a); los intervalos de los contornos son de 0.1.

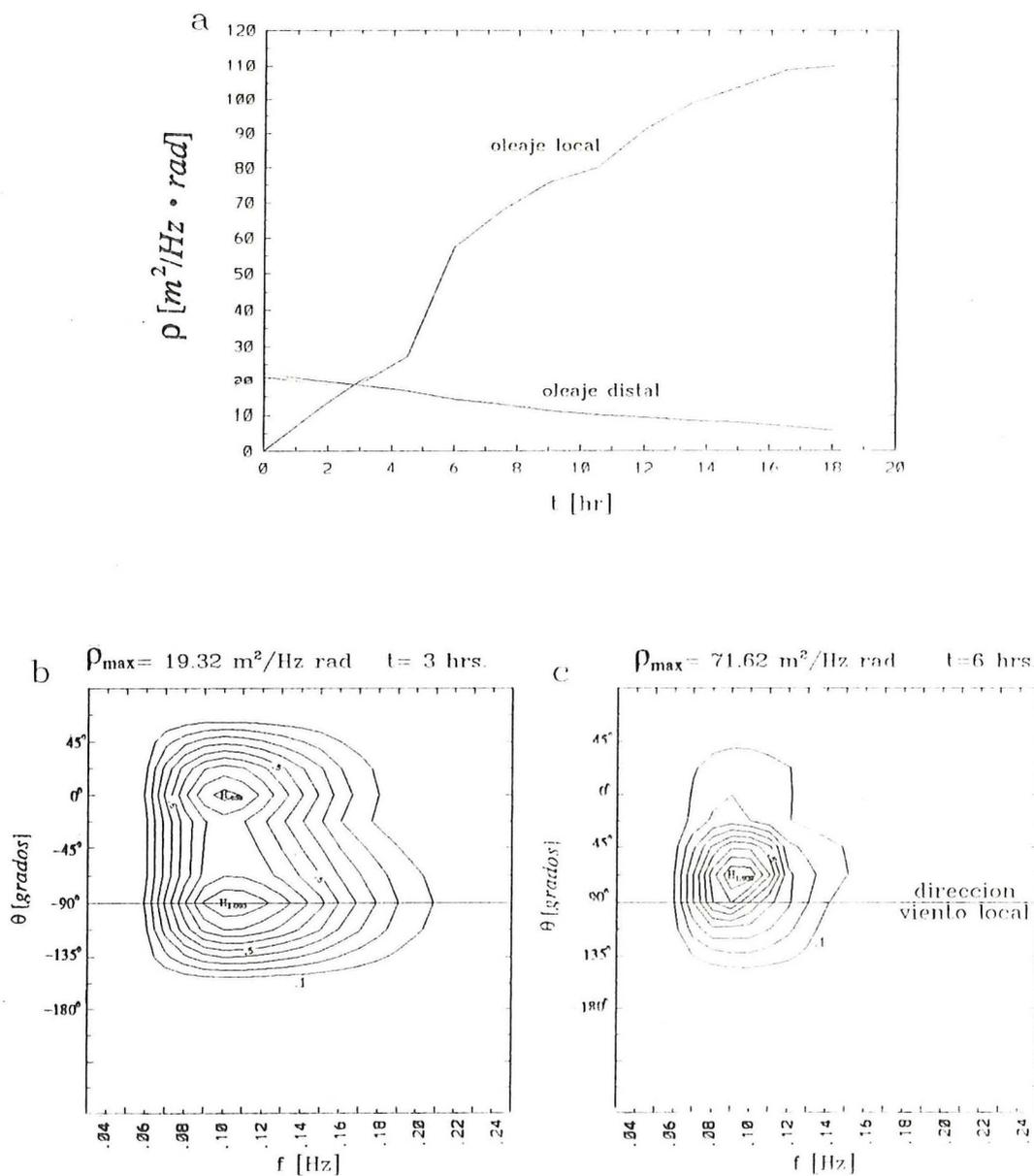


Figura 25. Caso VII para el DSANL: a) evolución de la densidad espectral de las frecuencias del pico espectral del oleaje local y oleaje distal después del cambio en la dirección del viento, b) y c) distribuciones espectrales a las 3 y 6 hrs respectivamente, después de cambio en la dirección del viento, para un punto en el centro de la malla.

A diferencia del DSA (Figura 17a) la evolución de la energía del oleaje local en el DSANL presenta pequeños saltos (debidos precisamente a la energía recibida por interacciones no lineales) mientras que la energía del pico espectral del oleaje distal tiene una disminución muy regular. Esto se debe a que el pico espectral del oleaje local recibe energía de varias componentes y por eso la ganancia de energía es grande mientras que la pérdida de energía del pico espectral del oleaje distal es lenta y regular.

La pérdida de energía es un poco mayor en frecuencias altas en el DSANL que en el DSA, porque en el DSA la pérdida de energía del oleaje distal es por amortiguamiento y en el DSANL es, además, por el paso de energía a otras componentes.

La Figura 25b representa la distribución espectral del DSANL en el punto (975 km, 825 km) usando la malla completa (1650 km por 1650 km). Esta distribución es muy similar a la del DSA (Figura 17b) debido a que las interacciones no lineales no han tenido lugar por que no se ha alcanzado el desarrollo requerido. Sin embargo, comparando la Figura 25c con la Figura 17c, pueden observarse muy bien los cambios que han generado las interacciones. Estos cambios pueden explicarse de la misma manera que se explicó para el espectro de la Figura 23c del caso V. Esto es, la energía que se propaga en dirección del primer campo de viento fue redireccionada a una dirección intermedia entre la dirección del primer campo de viento y la dirección del segundo campo de viento debido a las interacciones no lineales.

V CONCLUSIONES

La sencillez en la formulación de los términos fuente del modelo DSA permite hacer predicciones, en estaciones de trabajo (*SUN*), en un tiempo real muy corto; por cada dos días de simulación numérica del oleaje se requieren de sólo siete minutos de procesamiento, para una malla de 16 por 16 puntos.

El incremento de la resolución en frecuencia y en dirección permite observar un espectro más detallado diferenciando de manera más clara el oleaje local, oleaje distal, frecuencia promedio y frecuencia del pico espectral, dirección promedio y dirección del pico espectral. Esto a su vez, permitió modelar de manera más detallada la transferencia de energía entre componentes por interacciones no lineales.

Los resultados obtenidos por el DSA utilizando los campos de viento propuestos por el Grupo SWAMP muestran las principales características del modelo como :

- 1) Limitación *a priori* del intervalo de frecuencias con energía, una vez establecido el campo de viento.
- 2) Ausencia de un espectro límite, especialmente para el "intervalo de equilibrio" ($f > f_p$).
- 3) Poco amortiguamiento para todas las componentes del espectro.
- 4) Cambios lentos de los parámetros del espectro -energía total (E), frecuencia promedio (\bar{f}), y dirección promedio ($\bar{\theta}$)- ante cambios bruscos en el campo de viento.

Fue necesario modificar la parametrización del término de interacciones no lineales dada por Barnett (1968) para ser adaptada a las distribuciones espectrales generadas por el DSA.

La parametrización del término de interacciones no lineales funciona bien para condiciones de crecimiento limitadas en alcance y tiempo, y cuando el campo de viento varía lentamente (en espacio y tiempo), pues en estas situaciones el tiempo (o distancia) de ajuste de la forma de las interacciones no lineales es pequeño comparado con el tiempo (o distancia)

en el cual el viento cambia bruscamente. Sin embargo, para campos de viento que cambian muy rápido la parametrización del término S_{nl} no funciona bien ya que contiene pocos grados de libertad como para que simule satisfactoriamente el intercambio de energía entre componentes del oleaje en una gran variedad de distribuciones espectrales generadas en esos campos de viento

A pesar de que la parametrización del término S_{nl} simula una interacción débil reproduce las principales características de los modelos de segunda generación como son:

- 1) Migración del pico espectral hacia frecuencias bajas.
- 2) Disminución de la frecuencia menor que contiene energía debido exclusivamente por transferencia de energía entre bandas espectrales.
- 3) Cambios en la dirección de máxima energía (para algunos campos de viento).
- 4) Modificación, aunque en menor grado, de la energía total, la dirección promedio y la frecuencia promedio.

Generalmente los modelos de segunda generación suponen una forma espectral límite sobre todo para el oleaje local, debido a que las parametrizaciones simples de S_{nl} producen inestabilidades en el espectro (SG). Sin embargo en el DSANL no fue necesario limitar explícitamente el crecimiento del oleaje demostrando que los cambios hechos al término S_{nl} propuesto por Barnett (1968), aunque produce una interacción débil, mantiene estable al espectro.

En general los modelos DSA y DSANL producen buenos resultados con una calidad comparable a la de cualquier modelo del SWAMP, aunque aquellos sean modelos con muchas carencias, como la resolución del campo de viento que se introduce para forzarlos y formulaciones con inconsistencias físicas.

Se puede concluir que el modelo DSANL tiene un gran potencial para ser usado de manera operacional en predicciones con campos reales de viento, dadas las razones anteriores expuestas y porque es un modelo computacionalmente muy económico.

LITERATURA CITADA

- Barnett, T. P. y J. C. Wilkerson, 1967. On the generation of ocean wind waves as inferred from airborne radar measurements of fetch-limited spectra. *J. Marine Res.* 25(3): 292-238.
- Barnett, T. P. 1968. On the generation, dissipation and prediction of ocean wind waves. *J. Geophys. Res.* 73(2): 513-529.
- Eckart, C. 1953. The generation of wind waves on a water surface. *J. Appl. Phys.*, 24(12): 1485-1494.
- Ewing, J. A. 1971. A numerical wave prediction method for the North Atlantic Ocean. *Deut. Hydrogr. Zeitschrift*, 24: 241-261.
- Fons, C. 1966. Prevision de la houle. La methode de densites spectro-angulaires N° 5. (D.S.A.5). *Cahiers Océanographiques*, Janvier 1966.
- Gelci, R., H. Cazale, y J. Vassal, 1957. Prévision de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bulletin d'information du Comité central d'oceanographie et d'etudes des côtes.* IX, 8 sept., oct. 1957. 416-435.
- Gelci, R. y H. Cazale, 1962. Une équation synthetique de l'évolution de l'état de la mer. *Journal de Mécanique et de Physique de l'atmosphère.* No. 16, 15-41.
- Gelci, R., P. Chavy y E. Devillaz. 1963. Traitement numérique de l'état de la mer. *Cahier Océanographiques*, XVème année, No. 3, mars 1963.
- Gelci, R. y E. Devillaz, 1970. Le calcul numérique de l'état de la mer. *La Houille Blanche* No. 25, 117-136.
- Gelci, R. y P. Chavy, 1978. Seven years of routine numerical wave prediction with the DSA 5 model. *Turbulent Fluxes Through the Sea Surface, Wave Dynamics and Prediction*, (Ed. A. Favre and K. Hasselmann), Plenum, 556-591.
- Golding, B. W. 1983. A wave prediction system for real-time sea state forecasting. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 119: 393-416.

- Gunther, H., W. Rosenthal, T. J. Weare, B. A. Worthington, K. Hasselmann y J. A. Ewing, 1979. A hybrid parametrical wave prediction model. *J. Geophys. Res.* 84(C9): 5727-5738.
- Hasselmann, K. 1962. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 1. General theory. *J. Fluid Mech.* 12: 481-500.
- Hasselmann, K. 1963. On the nonlinear transfer in a gravity wave spectrum. Part 2. Conservation theorem wave-particle analogy; irreversibility. *J. Fluid Mech.* 15: 273-281.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell, y H. Walden, 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project, (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z., Suppl. A.*, 8(12).
- Hasselmann, S. y K. Hasselmann, 1985. Computation and parameterization of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I: A new method for efficient computation of the exact nonlinear transfer integral. *J. Phys. Oceanogr.* 15: 1369-1377.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J. H. Allender y T. P. Barnett, 1985. Computation and parameterization of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterization of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.* 15: 1378-1391.
- Khandekar, M. L. 1989. *Operational Analysis and Prediction of Ocean Wind Waves.* Springer-Verlag, New York. 214 pp.
- Kitaigorodskii, S. A. 1986. The equilibrium range in wind-wave spectra: Physical arguments and experimental evidence for and against their existence. p 9-40. En: *Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface.* (Phillips, O. M. and K. Hasselmann, ed.) Plenum Press., New York. 694 pp.
- Lamb, H. 1945. *Hydrodynamics.* Dover, New York. 738 pp.

- Lebel, F. y R. Gelci. 1959. La prévision numérique de l'état de la mer a l'aide d'un ordinateur. *Journal de Mécanique et de Physique de l'atmosphère*. No. 2, 81-99.
- Miles, J. W. 1957. On the generation of the surface waves by shear flows. *J. Fluid Mech.* 3: 185-204.
- Phillips, O. M. 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *J. Fluid Mech.* 2: 417-445.
- Phillips, O. M. 1958. The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. *J. Fluid Mech.*, 4: 426-434.
- Phillips, O. M. 1960. On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 1. The elementary interactions. *J. Fluid Mech.*, 9, 193-217.
- Phillips, O. M. 1977. *The Dynamics of the Upper Ocean*. Cambridge University Press. Cambridge. 336 pp.
- Resio, D. T. 1981. The estimation of wind-waves generation in a discrete spectral model. *J. Phys. Oceanogr.* 11: 510-525.
- Savina, A. y C. Fons, 1966. Analyse et prévision de l'état de la mer. Méthode D.S.A. 5. *La Houille Blanche*, No. 3.
- Snyder, R. L., F. W. Dobson, J. A. Elliot y R. B. Long. 1981. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *J. Fluid Mech.*, 102: 1-59.
- The SWAMP Group, 1985. *Ocean Wave Modeling*. Principal results of a wave model intercomparison study conducted by the Sea Wave Modeling Project (SWAMP) and first presented at a symposium on Wave Dynamics and Ratio Probing of the Ocean Surface, held May 13-20, 1981, in Miami, Florida. Plenum Press, New York, 256 pp.
- The WAMDI Group, 1988. The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* 18: 1775-1810.
- Young, I.R. 1988. A shallow water spectra wave model. *J. Geophys. Res.* 93(C5): 5113-5129.

APÉNDICE

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el experimento numérico de advección pura, que es el caso I de los experimentos del SWAMP. Para su realización se eligieron 3 componentes espectrales: el período de 10 s con 3 direcciones 45°, 67° y 90°. Los resultados se tomaron a tres pasos de tiempo $1\Delta t$, $10\Delta t$ y $20\Delta t$.

La energía en cada frecuencia es advectada con la velocidad de grupo para aguas profundas

$$C_g = \frac{g}{4\pi f} \quad (35)$$

La formulación analítica del fenómeno de la propagación es

$$C_g \cdot \nabla \rho = \frac{g}{4\pi f} \cos \theta \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{g}{4\pi f} \operatorname{sen} \theta \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (36)$$

sin embargo, en el modelo DSA ésta no se resuelve por diferencias finitas, sino mediante el procedimiento de propagación puntual, que se describe a continuación.

Convencionalmente denotaremos a la dsa (densidad espectro angular) afectada en un punto i, j cualquiera (Figura 26) como $\rho_{f,\theta}^{i,j}$. Para cada t la $\rho_{f,\theta}^{i,j}(x, y, t)$ es la que proviene de un punto localizado en $\bar{x} - \bar{C}_g \Delta t$, es decir

$$\rho_{f,\theta}^{i,j}[(x - C_g \cos \theta \Delta t), (y - C_g \operatorname{sen} \theta \Delta t), t - \Delta t] \quad (37)$$

Este punto puede no corresponder a un nodo de la malla sino que está separado por las distancias u y v , por cual la dsa para el punto i, j proviene entonces del nodo más cercano al punto $\bar{x} - \bar{C}_g \Delta t$, en este caso del $i-1, j-1$ (Figura 26).

Así, para cada componente del espectro y en cada paso de tiempo existe un mapa de distancias a los nodos más próximos cuando esas componentes no llegan exactamente sobre los nodos al irse propagando, pero para componente $\rho(\theta_i, f_j)$ en toda la malla la distancia a los nodos es la misma, es decir, existe una matriz de distancias (u y v) que se calcula a cada paso de tiempo y que se aplican a todos los puntos de la malla.

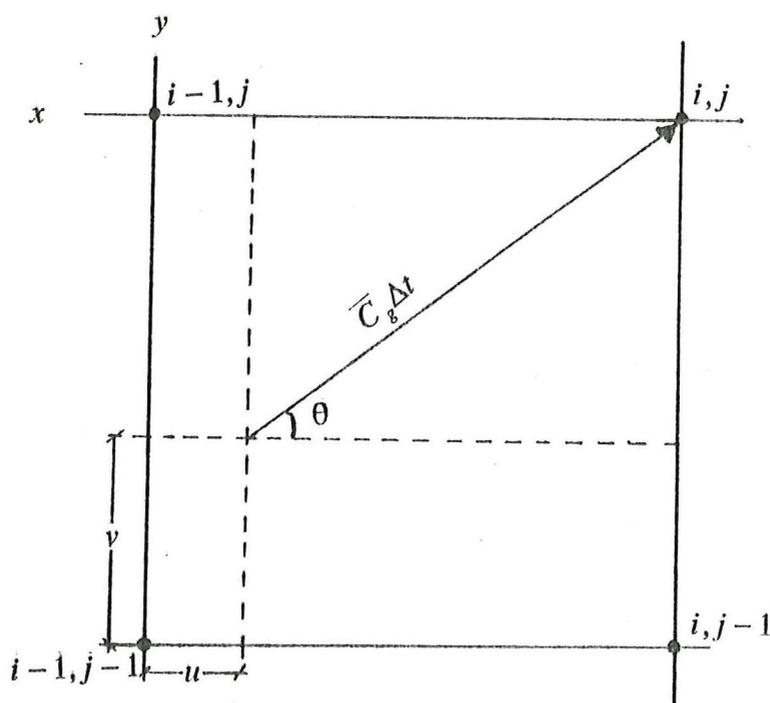


Figura 26. Esquema de la propagación puntual que realiza el modelo DSA.

Para resolver numéricamente la ecuación de advección la mayoría de los MNPO lo hacen por medio de diferencias finitas, con lo cual se provoca una difusión numérica de la energía, aunque no es deseable en los MNPO minimizar la difusión numérica en la ec. de advección (Khamdekar, 1989), desafortunadamente esa difusión hace crecer el ancho de la distribución de energía en el espacio con la raíz cuadrada del tiempo transcurrido, debe ser linalmente tal como lo hace la dispersión (ec. 35).

No existe difusión numérica de la energía que se está propagando en las tres direcciones (Figura 27) debido precisamente a este método de advección en el modelo numérico DSA.

Tabla VII. Distancias recorridas por diferentes componentes y a diferentes tiempos obtenidas con el modelo DSA y con la teoría lineal.

dTL [km]	42			421			842		
Δt [1.5 hrs]	1			10			20		
θ	90°	67°	45°	90°	67°	45°	90°	67°	45°
dM [km]	75	75	0	425	404	424	825	906	848
Δd [km]	33	33	42	4	17	3	17	64	6

dTL: distancias que deben recorrer las componentes según la Teoría lineal.

dM: distancia recorrida según el modelo.

Δd : diferencias en distancias recorridas por las componentes según el modelo y teoría lineal.

Se hicieron cálculos de las distancias recorridas por las componentes en cada uno de los pasos de tiempo en que se hicieron las corridas y se compararon con las distancias calculadas usando teoría lineal (Tabla VII). Las diferencias entre las distancias que calcula el modelo y las calculadas por medio de la ec. (36) se deben solamente a la resolución de la malla.

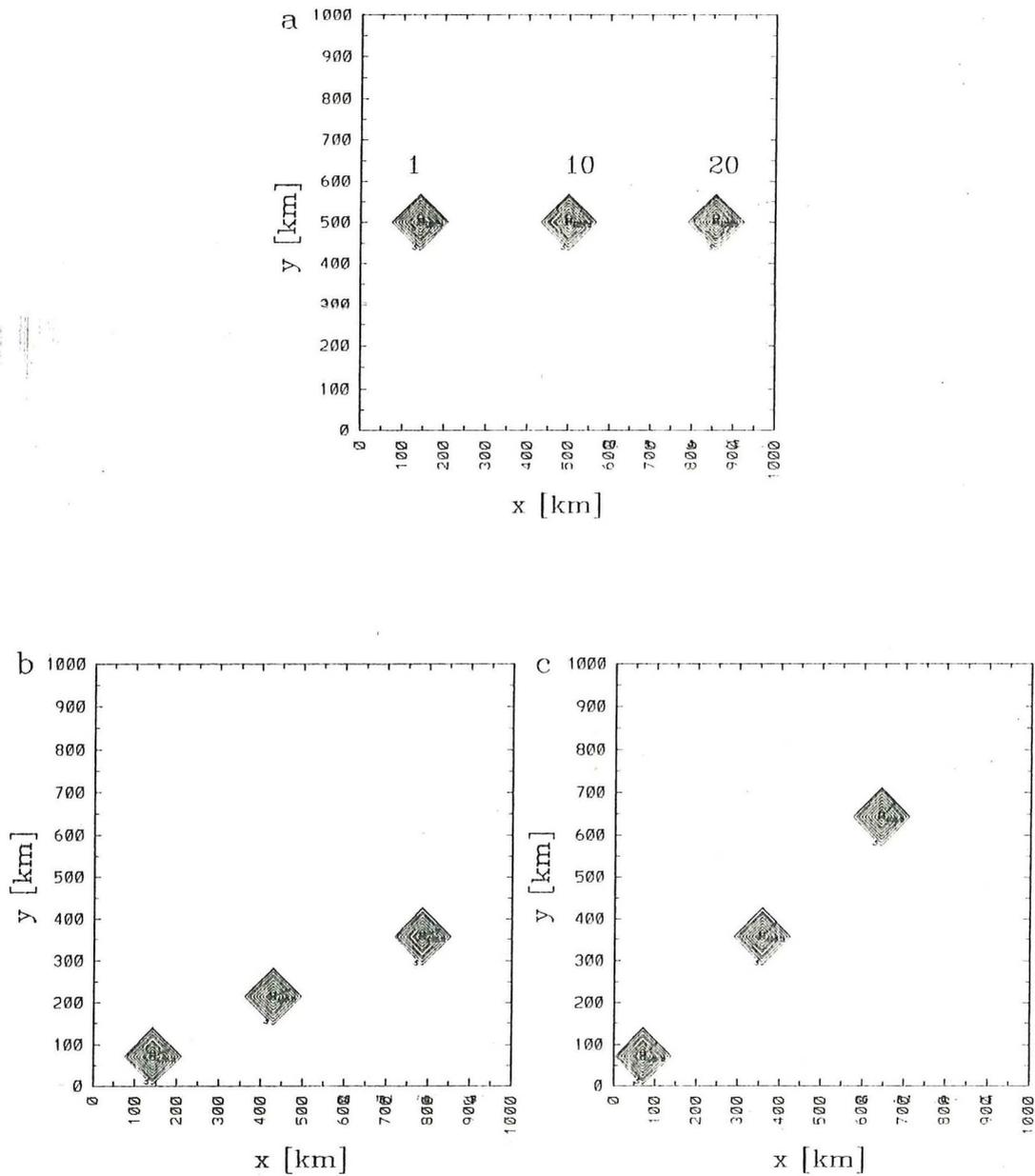


Figura 27. Advección de la componente con período de 10 s. Advección a: a) 90° , b) 67° y c) 45° . Los números dentro de la gráfica a) indican el paso de tiempo los cuales son los mismos para las demás gráficas.

GLOSARIO

Alcance (*fetch*):

Distancia sobre la que el viento sopla sin cambiar su magnitud y dirección.

Oleaje Distal (*swell*):

Oleaje que ha abandonado la zona de generación.

Oleaje Local (*sea*):

Oleaje que se encuentra en la zona de generación.

Asomeramiento (*shoalling*):

Proceso por medio del cual se modifican algunas características del oleaje (dirección, altura, velocidad y longitud de onda) debido a su paso por profundidades iguales o menores a la mitad de su longitud de onda.

Espectro totalmente desarrollado (Espectro Saturado):

Espectro de energía del oleaje en el cual todas sus componentes han alcanzado un equilibrio estacionario para un campo de viento dado.

Sobresaturación (*overshoot*):

Crecimiento, más allá de la saturación, de una componente espectral en particular, a lo largo del alcance en un área de generación.

DEFINICIÓN DE SÍMBOLOS

x, y	: coordenadas espaciales.
t	: coordenada temporal.
f	: frecuencia.
T	: período.
θ	: dirección.
$\bar{\theta}$: dirección promedio.
θ_p	: dirección de la componente espectral con máxima energía.
ρ	: densidad de energía espectro-angular.
\bar{C}_g	: velocidad de grupo.
S_{en}	: función que representa la ganancia de energía de las olas por el viento.
S_{dis}	: función que representa la disipación de la energía del oleaje.
S_{nl}	: función que representa las interacciones no lineales entre olas.
U	: rapidez del viento expresada en m/s.
W	: rapidez del viento expresada en nudos.
U_{10}	: rapidez del viento a 10 m sobre el nivel del mar.
u_*	: velocidad de arrastre.
c	: rapidez de fase de las olas.
E	: energía total del oleaje en un punto.
Φ	: función de crecimiento del oleaje en el modelo DSA.
Π	: función de propagación del oleaje en el modelo DSA.

Ψ	: función de amortiguamiento del oleaje en el modelo DSA.
g	: aceleración de la gravedad expresada en m/s^2 .
δ	: función de dispersión angular del oleaje.
ω	: dirección del viento.
A	: constante de amortiguamiento.
Δf	: ancho de banda en frecuencia del espectro de energía del oleaje.
$\Delta\theta$: ancho de banda en dirección del espectro de energía del oleaje.
\bar{f}	: frecuencia promedio del oleaje.
f_p	: frecuencia de la componente espectral con máxima energía.
H_s	: altura significativa del oleaje.
$F(f)$: espectro unidimensional del oleaje.
f_{PM}	: frecuencia del pico del espectro Pierson-Moskowitz.
\bar{f}_{PM}	: frecuencia promedio del espectro Pierson-Moskowitz.
D	: alcance.