

11

120

**ESTUDIO Y ANALISIS  
 ESTADISTICO  
 DEL OLEAJE  
 GENERADO POR  
 HURACANES  
 EN EL SUROESTE  
 DEL GOLFO DE MEXICO\***

**ROLANDO SPRINGALL G \*\***

\* **ESTE TRABAJO SIRVIÓ PARA QUE EL AUTOR  
 OBTENTARA SU TESIS DOCTORAL EN LA  
 DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES,  
 DE LA FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM,  
 EN JULIO DE 1970**

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

**\*\* PROF.**

**DE LA FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM**

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

12/11/70



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## RESUMEN

1.	INTRODUCCION	1
1.1	<i>Motivo del estudio</i>	1
1.2	<i>Antecedentes</i>	3
1.3	<i>Objetivos</i>	4
1.4	<i>Desarrollo</i>	5
2.	CARACTERISTICAS DE LOS HURACANES EN EL AREA EN ESTUDIO	9
2.1	<i>Antecedentes</i>	9
2.2	<i>Incidencia de ciclones en el área en estudio</i>	15
2.3	<i>Indice de presión central</i>	16
2.4	<i>Radio de máximo viento</i>	31
2.5	<i>Velocidad de desplazamiento</i>	36
2.6	<i>Dirección de movimiento</i>	39
2.7	<i>Características obtenidas</i>	41
3.	CAMPOS DE VIENTO DEBIDO A LOS HURACANES	47
3.1	<i>Antecedentes</i>	47
3.2	<i>Ecuaciones del movimiento</i>	48
3.3	<i>Flujo gradiente</i>	50
3.4	<i>Velocidades sobre el agua</i>	55
3.5	<i>Construcción de los campos de viento</i>	65
4.	OLEAJE GENERADO POR VIENTO	73
4.1	<i>Antecedentes</i>	73
4.2	<i>Consideraciones básicas de la teoría lineal del oleaje</i>	74

4.3	<i>La compleja naturaleza del oleaje</i>	80
4.4	<i>Generación, por viento, del oleaje en aguas profundas</i>	94
4.5	<i>Criterios para obtener el oleaje generado por un huracán</i>	114
5.	OLEAJE EN EL AREA EN ESTUDIO DEBIDO A HURACANES	125
5.1	<i>Antecedentes</i>	125
5.2	<i>Indice de la energía producida por un huracán para generar oleaje</i>	127
5.3	<i>Características del oleaje debido a <math>E_h</math></i>	155
5.4	<i>Análisis estadístico de predicción del oleaje debido a huracanes</i>	167
6.	CONCLUSIONES	173
7.	RECONOCIMIENTO	175
8.	REFERENCIAS	177
	APENDICE A	181
	APENDICE B	191
	APENDICE C	203
	APENDICE D	217

#### ABSTRACT

The variations of the characteristics of the hurricanes that were presented in the study area from 1886 to 1971, are analysed, as well as the frequency of the hurricanes in relation with their position. With this information the most convenient equations are defined for the wind field over the ocean due to hurricanes. A critical review of the theories of the waves dynamic and the generation of the waves is given, including the ones due to the wind field of a hurricane, taking into consideration the variation in the space and in time. Finally, the general equations are defined to evaluate the significant waves caused by the hurricane with their characteristics and frequency.

## RESUMEN

Se analizan las variaciones entre las características de los huracanes que se han presentado en el área en estudio de 1886 a 1971 y su frecuencia de incidencia, integrándose en relación con la latitud de su posición. Con esta información se plantean las ecuaciones más convenientes a utilizar para definir el campo de viento sobre el agua debido a un huracán. Se hace una revisión crítica de las teorías de la dinámica del oleaje y de los criterios de generación del mismo, incluyendo los debidos al campo de viento de un huracán, teniendo en cuenta su variación en el espacio y en el tiempo. Finalmente, se definen las ecuaciones generales para valuar el oleaje significativo debido a esa perturbación, a partir del conocimiento de sus características principales y de sus frecuencias, relacionando estas últimas con las particularidades del oleaje generado.

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 *Motivo del estudio*

Para el diseño de las obras de ingeniería en el mar y en la costa, uno de los requerimientos indispensables, es conocer las características del oleaje. Las que corresponden al oleaje máximo que se selecciona para dimensionar la obra, se designan como oleaje de diseño.

Como existe una relación directa entre los elementos constitutivos de una obra marítima y el oleaje de diseño, el conocimiento de este último, ligado a su frecuencia de incidencia, permite realizar estudios económicos evaluando la magnitud de la obra con su probabilidad de falla.

Para lo anterior se requiere conocer en el sitio de la obra la variación de las características del oleaje respecto a sus frecuencias de incidencia.

Por falta de información directa, el criterio usual para determinar la variación estadística del oleaje en cierto punto, se basa en el análisis de las condiciones climatológicas más desfavorables que se han tenido en un lapso en la zona circunvecina al punto. Seleccionadas las perturbaciones,

se determinan para cada una de ellas las características del oleaje que generen, haciendo uso de alguno de los criterios de predicción de oleaje. Posteriormente se ordenan los valores de las características del oleaje respecto al intervalo analizado y se deduce su variación en relación con sus frecuencias de incidencia.

Este tipo de estudios son en extremo laboriosos y difíciles de realizar debido a que:

- a) Se requieren mapas de las condiciones climatológicas más desfavorables en cierto lapso, a fin de conocer la evolución y posición de los distintos sistemas y fenómenos meteorológicos, respecto al punto que se desee estudiar en particular. Esto depende de la información disponible y de la selección que se realice de las perturbaciones por analizar.
- b) Como los mapas disponibles son los que se emplean para efectuar únicamente pronósticos de tiempo y corresponden a los sistemas de presión de superficie, una vez seleccionados requieren ser revisados y ajustados. Este proceso se basa en los registros de temperatura, presión atmosférica y dirección e intensidad del viento, detectados en las diversas estaciones climatológicas que se encuentran en la zona. Una vez realizado lo anterior, se obtiene para cada mapa la distribución de la velocidad del viento en el área de generación; la cual, ligada a la serie de cartas disponibles para cada tormenta, define el campo de viento de esta.
- c) Conocidos los campos de viento, se procede a la obtención de las características del oleaje generado por ellos. Como en general,

las perturbaciones que se seleccionan corresponden a las de los huracanes, cuyo criterio de generación de oleaje que depende de la velocidad y dirección variables, y de

este tipo de análisis requiere utilizar un criterio de cuenta vientos con velocidad en movimiento.

Como puede observarse, proceder de esta manera en las cas de oleaje en cierto punto implica un valor de una veracidad no lo suficientemente confiable. Si bien, los cuales dependen de la forma de la información disponible. Aunque esto último es un tema de análisis, a la vista de una serie de datos de huracanes y el oleaje generado por estos, se trata de otra manera y tratar de sistematizarlo, obtener en forma más expedita la variación de la información en relación con sus frecuencias de incidencia.

deducir las estadísticas de este trabajo muy grande y los resultados que se obtienen e interpretar la información es posible para cualquier forma de análisis realizados acerca de huracanes. Es posible enfocar el problema de suerte que se pueda obtener las características del oleaje

Lo anterior es el motivo del presente trabajo, la variación de las características del oleaje en relación a sus frecuencias de incidencia, a partir de un modelo matemático de los campos de viento producidos por los huracanes. Para esto, se seleccionó la parte suroeste del Golfo de México entre los 19° y 98° longitud oeste.

El presente estudio de la zona de generación respectivamente mediante un modelo matemático de los huracanes. Para el estudio de México, comprendida entre los 19° y 98° longitud oeste.

A continuación se muestran los antecedentes del estudio, su enfoque y desarrollo.

tuvieron el estudio, su

## 1.2 Antecedentes

Como se indicó, la idea de realización del estudio surge de la importancia que tiene el conocimiento de la estadística de oleaje en la navegación; así como lo difícil de obtener una obra marítima; así como lo difícil de

surge de la importancia que tiene el conocimiento de la estadística de oleaje en la navegación; así como lo difícil de obtener una obra marítima; así como lo difícil de

la siguiendo el criterio tradicional.

Existen diversos estudios básicos que permiten pensar en un enfoque diferente. Bretschneider (1957b) desarrolla un método para obtener en forma directa, las características del oleaje más desfavorable que puede generarse por un huracán estacionario localizado a  $35^\circ$  latitud norte, e indica los ajustes para tomar en cuenta su desplazamiento.

Graham y Nunn (1959) definen las características de los huracanes estándar del proyecto y sus campos de vientos respectivos, para las costas de Estados Unidos de Norteamérica en el Atlántico Norte y en el golfo de México.

Bretschneider y Collins (1964) predicen las condiciones más desfavorables del mar producidas por los huracanes en el Atlántico Norte entre los  $27^\circ$  y  $30^\circ$  latitud norte, para el diseño de una plataforma de perforación (proyecto Mohole). Bretschneider (1972a y b) define un modelo adimensional para la generación de oleaje debido a huracanes, el cual utiliza para valuar las características del oleaje de los huracanes estándar de proyecto para las costas de EUA en el Atlántico Norte y en el golfo de México.

### 1.3 *Objetivos*

A fin de lograr un criterio más expedito para conocer la estadística del oleaje en un punto de la costa del golfo de México y determinar oleajes de diseño, los objetivos son:

- a) Conocer las variaciones de las características de los huracanes que se han presentado en el surcoste del golfo de México y las ecuaciones que permitan valuarlas con base en la frecuencia de incidencia.

- b) A partir de lo anterior, mediante un modelo matemático definir los campos de viento producidos por los huracanes y deducir ecuaciones que definan los parámetros relacionados con la generación del oleaje, a partir del conocimiento de las características de los huracanes.
- c) Obtener las ecuaciones de liga entre las características del oleaje en la zona de generación y las del huracán que las produce.
- d) Variación de las características del oleaje en función de frecuencia de incidencia de los huracanes.

Conocidos los objetivos anteriores, la aplicación y utilidad del estudio es muy amplia, ya que proporciona herramientas dentro de la zona seleccionada de análisis, principalmente para diseño de obras costeras, diseño de plataformas marinas, procesos de difusión y sistemas de alarma.

#### 1.4 Desarrollo

Para llevar a cabo el estudio, este se dividió en varios capítulos, cuyos resúmenes, aparte del de introducción, se indican a continuación:

##### Cap 2. Características de los huracanes en el área en estudio

Con base en la información disponible, se hace un análisis de las características de los huracanes que permiten definir sus campos de presión, ligando estos a la frecuencia de incidencia de las perturbaciones. Para ello, se subdividió el área en estudio en ocho zonas y se analizó la trayectoria que han seguido las perturbaciones ciclónicas de 1836 a 1971; a la vez se determinó para cada zona su frecuencia, dirección y velocidad, y se recopilieron los datos existentes para dicha área de los índices de presión central medidos e inferidos, revisando el criterio propuesto para estas deducciones.

A partir de esa información se revisaron y ajustaron para el área en estudio, las características de los huracanes analizadas para la costa de EUA frente al golfo de México, lo que dio como resultado el conocimiento de la variación de las perturbaciones, para las diversas latitudes de esa área en relación con sus frecuencias de incidencias. Conocida esta variación, se define mediante un modelo matemático el campo de presión que produce un huracán, en cualquier zona del área en estudio.

### Cap 3. Campos de viento debidos a huracanes

Se analizan las ecuaciones que sigue el movimiento horizontal de los huracanes, las que se ajustan para la obtención del viento sobre el agua, de acuerdo con los efectos de fricción. Se revisan los datos disponibles y los parámetros de ajustes tradicionalmente usados se someten a un juicio crítico definiendo los más convenientes.

Con lo anterior, se obtienen las ecuaciones que definen el campo de viento sobre el agua debido a un huracán a partir del conocimiento de su campo de presión y de sus características.

### Cap 4. Oleaje generado por viento

Se hace una revisión crítica de las teorías de la dinámica del oleaje y de los criterios de generación de este, a fin de relacionar los diversos estudios existentes sobre la variación de los espectros del oleaje debido a los parámetros del campo de viento que los generan y la relación de estos últimos con el campo de viento en sí.

Se incluyen las teorías de la generación del oleaje debido al campo de viento de un huracán, para lo cual se considera su variación en el espacio y en el tiempo.

## Cap 5. Oleaje en el área en estudio debido a huracanes

Se definen las ecuaciones generales para valuar el oleaje significativo provocado por una perturbación ciclónica a partir del conocimiento de sus características principales. Con estas variaciones y con la frecuencia de incidencia de huracanes, se deducen para el área en estudio las fluctuaciones de las características del oleaje en relación con estas.

## Cap 6. Conclusiones

Se discuten las expresiones encontradas y se proporcionan los lineamientos generales para su aplicación en el área en estudio.

**FALTA PAGINA**

**No.**

**8**

## 2. CARACTERISTICAS DE LOS HURACANES EN EL AREA EN ESTUDIO

### 2.1 Antecedentes

Los estudios realizados en el lago Okeechobee, Florida, por el US Weather Bureau, permitieron llevar a cabo una revisión conjunta del comportamiento de huracanes en esa región. Al respecto, Schloemer (1954) representa la distribución de presiones de un huracán mediante

$$p = p_o + (p_n - p_o) e^{-R/r} \quad (2.1)$$

donde

$p$  presión a una distancia  $r$  del centro del huracán

$p_o$  presión central

$p_n$  presión normal o asintótica en la periferia exterior del huracán

$R$  radio de máximo viento

A su vez, en los mismos estudios, Myers (1954) utilizó la ec 2.1 para reconstruir campos de presión de perturbaciones históricas y comparó los valores deducidos por dicha ecuación y con los de 69 huracanes, encontrando que esta representa un ajuste razonable de la distribución de presión radial media.

Por su parte Reid (1957) propone, como un índice de la energía que genera un huracán sobre el oleaje, la expresión

$$E = (p_n - p_o) R \quad (2.2)$$

misma que fue utilizada por Wilson (1957) para seleccionar las perturbaciones ciclónicas más desfavorables, en relación con el estudio estadístico del oleaje en el golfo de México, frente a la costa de Estados Unidos. Para valuar los parámetros requeridos en la ec 2.2 aplicó la 2.1, cuyos resultados para los huracanes seleccionados se indican en la tabla 2.1.

Posteriormente, Graham y Nuun (1959), considerando como características de un huracán:

- a) índice de presión central
- b) radio de máximo viento
- c) velocidad de desplazamiento
- d) dirección de movimiento

así como la distribución de presiones propuesta en la ec 2.1, definieron los huracanes estándar de proyecto para las costas norteamericanas frente al golfo de México y al Atlántico Norte. La tabla 2.2 contiene la información de las características de los huracanes obtenidas de mediciones directas, utilizadas en ese estudio.

TABLA 2.1 CARACTERISTICAS DE LOS HURACANES INFERIDAS POR WILSON (1957)  
 (Para todo el análisis se consideró una  $p_n = 1020$  mb)

FECHA			TIEMPO (GMT)	LATITUD (°)	R (mm)	Po (mb)
Sep	5,	1900	1300	22.8	20	920
Sep	6		1300	25	29	920
Sep	7		1300	27.5	27	920
Sep	8		1300	28.5	22	920
Sep	9		1300	29.5	20	920
Ago	14,	1915	1300	19.5	23	900
Ago	15		1300	23	24	900
Ago	16		1300	27	24	910
Sep	28,	1915	1300	23	30	920
Sep	29		1300	26	37	900
Sep	30		1300	29	28	900
Sep	10,	1919	1300	24	25	910
Sep	11		1300	25.5	28	900
Sep	12		1300	27	25.5	900
Sep	14		1300	27.5	21	910
Jun	19,	1921	1300	21	20	900
Jun	20		1300	24	23	900
Jun	21		1300	24	17.5	910
Jun	22		1300	27	20	930
Ago	13,	1932	1300	26	14	920
Sep	2,	1933	1300	23	20	930
Sep	3	1933	1300	25	20	930
Sep	4		1300	26.5	20	910
Sep	18,	1947	1300	26.5	39	900
Sep	19		1300	29	30	970
Oct	1,	1949	1230	19	18	900
Oct	2		0030	20.5	21	900
Oct	2		1230	22	22	900
Oct	3		0030	23	22	900
Oct	3		1230	25	26	910
Oct	4		0030	27	20	900
Oct	4		1230	29.5	15	900

TABLA 2.2a CARACTERISTICAS DE HURACANES MEDIDOS EN LAS COSTAS DE ESTADOS UNIDOS FRENTE AL GOLFO DE MEXICO (ZONA A)  
(Graham y Nunn, 1959)

12

Fecha			IPC (pulgadas)	R ( mn)	Vg (m.p.h.)	F (nudos)	Lat (grad N.)	Long (grad W.)
Z O N A A								
Sep	2	1935	26.35	6	137	9	24.8	80.9
Sep	9	1919	27.44	15	108	8	24.6	82.9
Oct	20	1926	27.52	21	112	16	23.8	81.3
Sep	21	1948	27.62	7	102	8	24.5	81.6
Oct	17	1910	27.80	16	84	11	24.5	82.5
Oct	18	1944	28.02	27	93	13	24.6	82.8
Sep	17	1947	28.03	34	--	--	26.4	81.3
Sep	18	1926	28.05	24	--	17	26.5	81.0
Sep	28	1929	28.15	28	--	10	24.8	81.1
Oct	25	1921	28.29	18	80	10	28.1	82.8
Oct	11	1909	28.30	22	94	10	24.3	81.7
Sep	16	1928	28.30	53	--	--	27.7	81.4
Sep	4	1950	28.30	--	--	--	29.1	83.1
Ago	26	1949	28.37	23	--	14	27.2	81.2
Sep	15	1945	28.39	24	--	10	25.5	81.0
Sep	4	1933	28.48	29	--	11	27.8	81.6
Oct	19	1924	28.70	19	--	8	25.0	83.0
Nov	4	1935	28.73	--	79	--	25.0	81.0
Sep	11	1903	28.84	43	76	7	27.0	81.5
Oct	18	1906	28.84	35	67	6	25.0	81.0
Oct	5	1948	28.85	31	67	13	24.0	81.2
Oct	18	1950	28.88	--	--	--	28.0	81.6
Jun	17	1906	28.91	26	72	--	25.1	80.9
Oct.	7	1941	28.98	18	78	11	29.8	84.7

TABLA 2.2b CARACTERISTICAS DE HURACANES MEDIDOS EN LAS COSTAS DE ESTADOS UNIDOS FRONTE  
AL COLFO DE MEXICO (ZONA B) (Graham y Nunn, 1959)

Fecha			IPC (pulgadas)	R (mm)	Vg (m.p.h.)	F (nudos)	Lat (grad N.)	Long (grad W.)
Z O N A B								
Sep	8	1900	27.64	--	104	--	27.0	90.5
Sep	29	1915	27.87	29	106	10	29.9	90.1
Sep	14	1919	28.00	--	---	20	26.9	90.2
Sep	20	1926	28.20	17	98	7	30.5	87.5
Ju.	21	1909	28.31	19	99	--	26.8	91.0
Ago	25	1926	28.31	27	100	10	29.6	90.7
Ju.	5	1916	28.38	50	81	25	30.7	88.0
Ju.	31	1936	28.46	19	80	9	30.5	86.5
Sep	28	1917	28.48	33	81	13	30.4	87.2
Sep	27	1906	28.50	73	83	16	30.6	88.5
Jun	16	1934	28.52	37	80	16	29.9	91.7
Sep	19	1947	28.57	33	72	16	29.9	90.1
Ago	14	1901	28.72	33	83	14	29.9	90.1
Oct	13	1916	28.76	19	81	21	30.4	87.2
Ago	7	1940	28.76	11	71	8	29.0	92.8
Sep	23	1956	28.76	22	--	10	30.0	86.5
Ju.	27	1943	28.78	16	78	8	28.2	92.0
Sep	30	1929	28.80	65	70	6	30.1	85.7
Ago	30	1950	28.92	21	64	23	30.2	88.0
Sep	21	1920	28.93	28	67	28	29.6	90.7
Sep	20	1909	28.94	88	73	11	29.9	90.1
Oct	7	1941	28.98	18	78	11	29.9	84.7
Jun	27	1957	27.95	19	--	14	29.8	93.6

TABLA 2.2c CARACTERISTICAS DE HURACANES MEDIDOS EN LAS COSTAS DE ESTADOS UNIDOS FRENTE AL GOLFO DE MEXICO  
(ZONA C) (Graham y Nunn, 1959)

Fecha			IPC (pulgadas)	R ( mn)	Vg (m.p.h.)	F (nudos)	Lat (grad N.)	Long (grad W.)
Z O N A C								
Sep	8	1900	27.64	14	104	10	29.2	95.9
Ago	13	1932	27.83	12	108	15	29.1	95.6
Ago	18	1916	28.00	35	116	11	27.5	97.5
Sep	14	1919	28.00	--	---	20	27.7	97.5
Sep	5	1933	28.02	20	105	8	25.9	97.5
Ago	30	1942	28.07	18	88	14	28.5	95.7
Ago	16	1915	28.14	32	83	11	29.8	95.0
Jun	22	1921	28.17	17	97	11	29.7	95.4
Jul	21	1909	28.31	19	99	12	29.0	96.0
Sep	23	1941	28.31	21	81	13	29.7	95.4
Ago	27	1945	28.57	18	88	4	29.0	96.2
Jun	28	1929	28.62	13	82	15	28.5	96.5
Ago	7	1940	28.76	11	71	8	29.9	93.9
Jul	27	1943	28.78	16	78	8	29.5	95.0
Ago	4	1933	28.80	25	76	10	25.9	97.5
Oct	4	1949	28.88	28	78	11	28.9	95.4

A partir de los trabajos de [redacted] se procederá al análisis de las ca [redacted] en el suroeste del golfo de México, [redacted] de estos en dicha región.

## 2.2 Incidencia de ciclones [redacted] en estudio

Para analizar las características de los huracanes que han afectado la costa suroeste del golfo de México, se procedió a acotar el área comprendida entre los 90 y 98° longitud oeste y los 18 y 26° latitud norte, dividiéndola a su vez en ocho zonas (fig 2.1). Además, con las trayectorias preparadas por Cry, Haggard y White (1959) para los huracanes tropicales en el Atlántico Norte de 1886 a 1958, y de 1959 a 1970, se estudiaron la incidencia, dirección y velocidad de los huracanes y tormentas tropicales que se han presentado en el área en estudio. En la tabla se indica la clasificación que diferencia un huracán de una tormenta tropical.

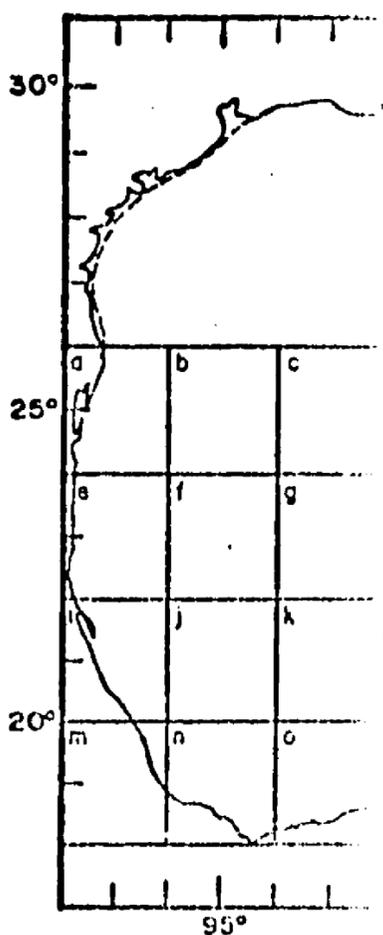
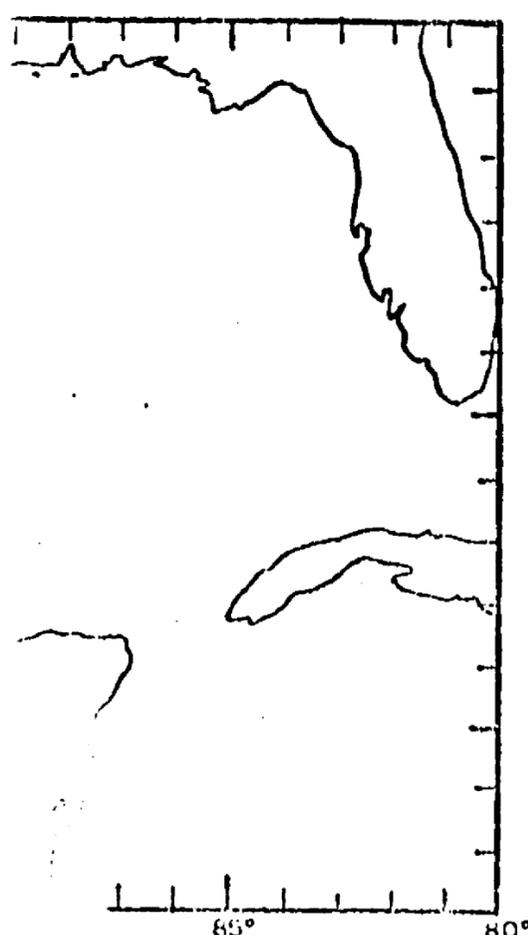


Fig 2.1 Área en estudio y su subdivisión para su análisis



que se subdividió para su análisis

Del análisis anterior, que cubrió un periodo de 86 años (1886-1971), se encontró que en este lapso han habido en el área en estudio 60 huracanes y 89 tormentas tropicales. Los valores obtenidos de la distribución de los mismos, dirección de incidencia y velocidad media de movimiento de cada uno de ellos, en las ocho zonas del área, se indican en la tabla 2.4.

Con esa información básica y la del inciso anterior, se procedió al análisis de las características de los huracanes en el área en estudio.

### 2.3 *Índice de presión central*

El índice de presión central es la mínima presión estimada en un huracán. Si se toma en cuenta que se considera huracán un ciclón con velocidades de viento de 75 mph o mayores (tabla 2.3), Myers (1954) encontró que esa condición se satisface si la presión central es menor de 29 pulg. En la tabla 2.5 se muestran los valores mínimos de la presión central registrados en tierra durante el paso de un huracán. Estos datos permiten conocer el rango de fluctuación que se puede esperar del índice de presión central.

Para cualquier huracán, la presión central se puede obtener de:

- a) observaciones directas de mínima presión
- b) extrapolación de datos observados
- c) inferencia a partir de la distribución de presiones en el exterior

La determinación de la presión central de mediciones directas, ya sea a o b, es la mejor; desafortunadamente, solo en las últimas décadas ha sido posible disponer de una información sistemática de esta, cuando el huracán se encuentra en tránsito sobre el agua, lejos de las costas. La presión central a partir de la distribución de presiones, es un criterio que se basa en la ec 2.1.

TABLA 2.3 ETAPAS DE INTENSIDAD PARA CICLONES TROPICALES  
(Cry, Haggard y White, 1959)

ETAPA	CRITERIO
Desarrollo	Circulación cerrada, vientos sostenidos de 38 m.p.h. o menores ( a partir de 1951 )
Tormenta Tropical	Circulación cerrada, vientos sostenidos de 39 m.p.h. Los vientos pueden ser menores, en porciones de algunas tormentas con anterioridad a 1951
Huracán	Vientos sostenidos de 74 m.p.h. o más altos
Extratropical *	Ciclón tropical modificado por interacción con aires no tropicales. En algunos casos, los vientos pueden permanecer por encima de las velocidades consideradas en un huracán
Disipación	Circulación cerrada, vientos sostenidos de 38 m.p.h. o menores

\* La temperatura superficial uniforme y la humedad característica de los ciclones tropicales en latitudes bajas, son generalmente modificados conforme se mueven hacia el norte. La circulación tropical se ve afectada por aire seco y frío, expandiéndose el área y disminuyendo la velocidad del viento.

TABLA 2.4 CARACTERISTICAS DE LAS TORMENTAS EN EL AREA EN ESTUDIO (1886-1971)

Zona	No. de tormentas	No. veces dirección de entrada								No. veces velocidad media (°L/24h)								
		S	SE	E	NE	N	NW	W	SW	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	10 H*	1	5	3	1						2	1	5	1	1			
	14 T**	1	6	3	3				1		1	4	8	1				
b	15 H	3	7	2	2				1		3	3	5	3	1			
	17 T	4	5	3	3	1			1		2	4	7	1		3		
c	14 H	1	8	2	1				2	1	2	2	5	2	1	1		
	21 T	8	8	2	1				2		4	5	6	2	2	1		1
d	18 H	1	11	3	1				2	1	4	4	3	4	1	1		
	22 T	8	8	2					4	1	3	4	10		3			1
e	14 H	1	2	9	2						4	4	3	2	1			
	13 T		6	3	4				1		2	5	4		1			
f	18 H	2	7	7	2						5	4	6	2	1			
	21 T	4	9	3	2			1	2	1	3	5	4	2	5			1
g	10 H	1	1	5					3		2	2	5	1				
	17 T	7	4	2	1			1	2	1	2	3	6	3	1	1		
h	14 H	1	7	5					1		2	3	5	2	1			1
	20 T	5	8	3					4		4	5	9	1	1			
i	7 H		2	4	1						1	3	2	1				
	11 T		5	3	2	1					5	1	2	1	1	1		
j	19 H	1	6	7	1	1			3	1	4	8	4		2			
	23 T	3	13	5	1	1				1	4	5	4	4	4	1		
k	15 H	1	2	9	1				2		2	3	9	1				
	28 T	3	14	7				1	3	1	6	6	8	3	3	1		
l	12 H	1	2	9								3	6	2	1			
	20 T		8	9	1				2		3	6	5	4	2			
m	3 H			1	2					1			1	1				
	4 T	1		3									3	1				
n	7 H		2	2	2	1					1	2	1	2				
	7 T	1	1	4		1					2		4	1				
o	6 H		1	4	1						1	1	1	3				
	22 T	4	3	6	2				2		4	7	7	2	2			
p	5 H		1	4							1		2	1	1			
	15 T		10	4		1				1	2	3	6		3			

\* H (huracán) \*\* T (tormenta tropical)

TABLA 2.5 VALORES MINIMOS DE PRESION REGISTRADOS EN EL MUNDO DURANTE EL PASO DE UN HURACAN  
(Dunn, Davis y Moore, 1956)

Lower Metacumbe Key, Florida	Sep	2	1935	26.35	pulgadas
Basilan, P. I.	Sep	25	1905	26.85	pulgadas
Cossack, Australia	Ene	7	1881	27.00	pulgadas
Chetumal, México	Sep	28	1955	27.00	pulgadas

TABLA 2.6 VALORES DEL INDICE DE PRESION PARA EL AREA EN ESTUDIO

Latitud	Zonas	Distribución normal		Porcentaje de ocurrencia en 100 años				
		$\mu$ (ec 2.3) (pulgadas)	$\sigma$ (ec 2.4) (pulgadas)	30	20	10	2	1
				Indices de presión central (pulgadas)				
25	a,b,c,d	29.08	0.830	28.64	28.38	28.02	27.38	27.15
23	e,f,g,h	29.18	0.898	28.71	28.42	28.03	27.34	27.09
21	i,j,k,l	29.28	0.966	28.77	28.47	28.04	27.30	27.03
19	m,n,o,p	29.38	1.034	28.84	28.50	28.05	27.26	26.97

Para conocer su factibilidad de aplicación, y ver si era posible obtener mayor información del área en estudio, se hizo una revisión de la ec 2.1, la cual se indica en el siguiente subinciso.

### 2.3.1 Inferencia del índice de presión central a partir de la distribución de presiones en el exterior del ojo

El modelo de distribución de presiones propuesto en la ec 2.1 es simétrico respecto al centro del huracán; sin embargo, en la realidad esta condición difícilmente se cumple, pues se tiene una distorsión del campo de presiones debida al movimiento del huracán, lo que trae como consecuencia que, aunque la expresión 2.1 se pueda resolver por ecuaciones simultáneas conociendo dos niveles de presión,  $p_1$  y  $p_2$ , a una distancia del centro,  $r_1$  y  $r_2$ , respectivamente, en la realidad se tienen diversos valores de  $r$  para cada nivel de presión, y diferentes combinaciones de  $r$  y  $p$  para una línea radial, lo que impide basarse en dos puntos arbitrarios para la solución de la ecuación.

Tratando de obviar lo anterior, Wilson (1957) propone la simultaneidad de la ec 2.1 en una línea radial al centro del huracán, de todos los niveles de presión conocidos, para lo cual desarrolla los *Diagramas en espiral* de la distribución de la presión radial, y presenta en forma gráfica la solución de la ec 2.1 obtenida para diversos valores del radio de máximo viento  $R$ , conservando en cada diagrama como constantes la presión central  $p_0$  y la presión normal  $p_n$ . En la fig 2.2 se muestra un diagrama en espiral para una  $p_0$  de 963 mb y una  $p_n$  de 1013 mb, para valores de  $R$  de 10 a 90 mm.

De esa manera, previo al análisis de distribuciones de presión que se desee estudiar, se requiere la construcción de *Diagramas en espiral* para di

ferentes valores de  $p_o$  y  $p_n$ . Como existen múltiples combinaciones, generalmente se acepta el valor de  $p_n$  constante para todo el análisis y solo se varía  $p_o$ . Disponiendo de estos diagramas, se selecciona uno arbitrariamente y se superpone en el plano de isobaras del huracán que se estudie. Si el diagrama seleccionado corresponde a la presión central del huracán, deberá existir una recta radial donde coincidan las distribuciones de presión del diagrama y las del plano de isobaras, obteniendo la solución de la ec 2.1 y por ende  $p_o$  y  $R$ . En la fig 2.3 se ilustra el proceso.

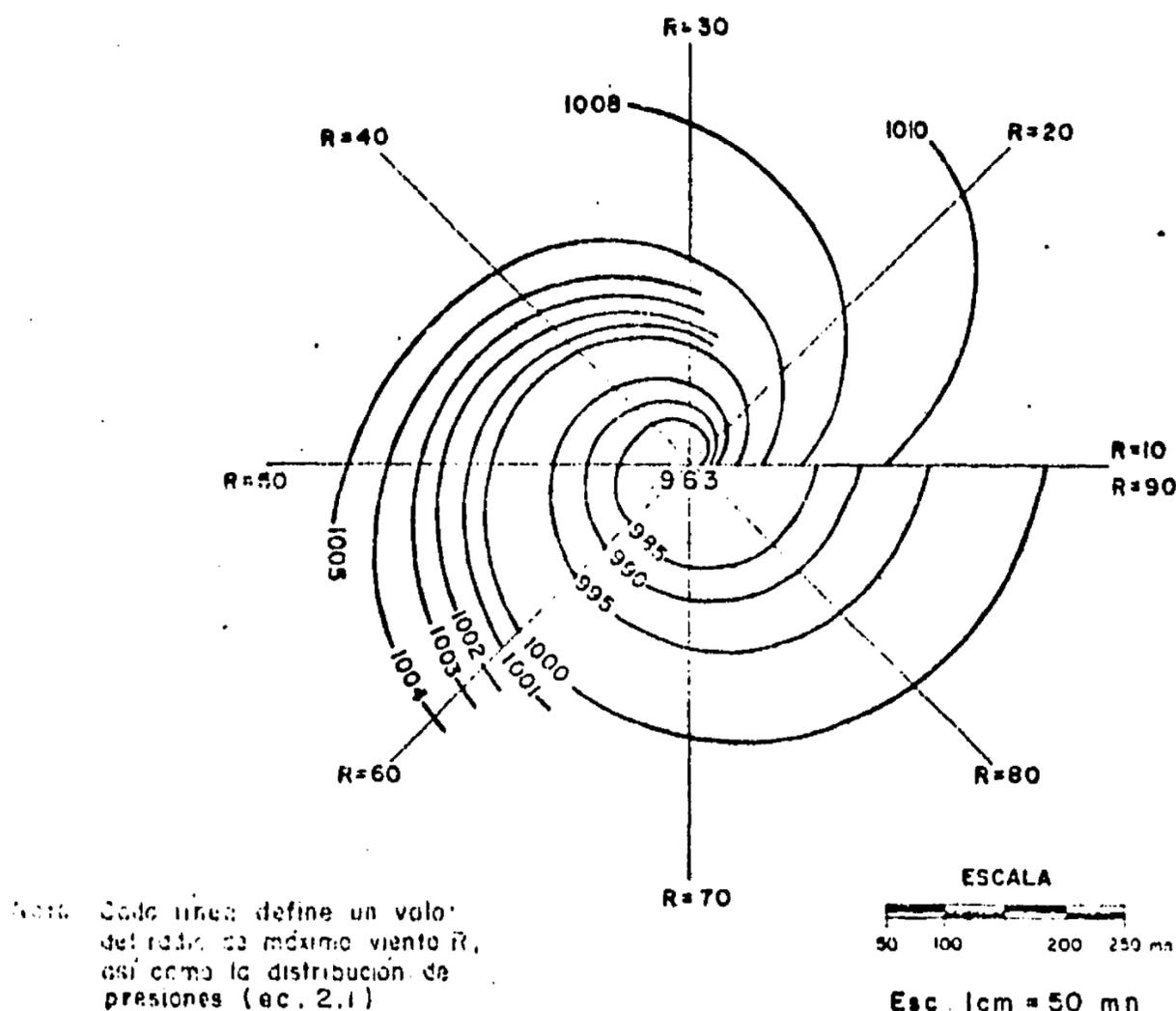
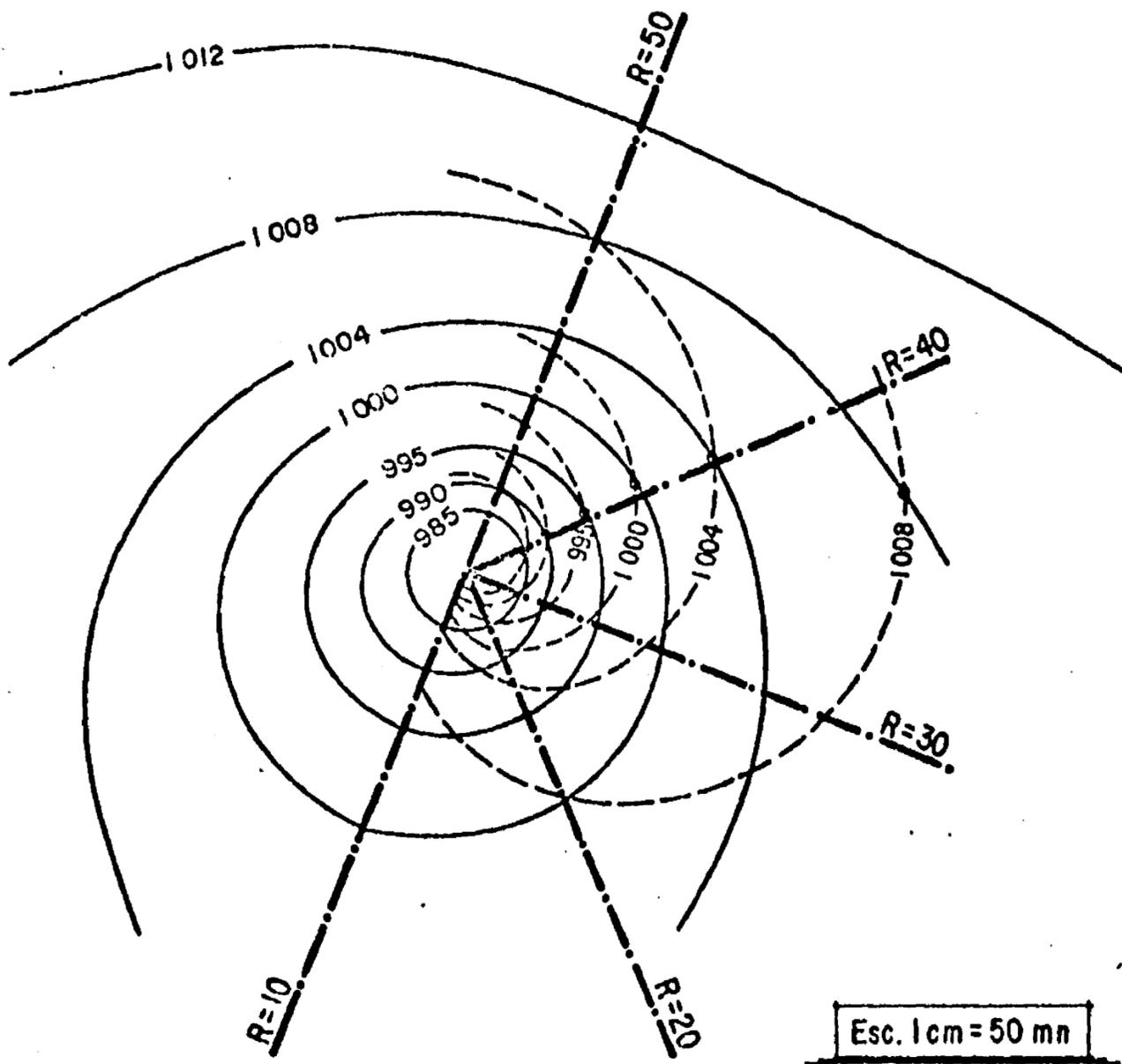


Fig 2.2 Diagrama en espiral de distribuciones de presión radiales del centro del huracán, para una presión central de 963 mb, considerando una presión normal de 1013 mb



—— Isobaras del ciclón Carla, Sept. 8, 1961, 0700 E  
 - - - - Isobaras del diagrama en espiral de la Fig. 2.2

Solución a la ec. 2.1  $\begin{cases} p_0 = 963 \text{ mb} \\ R = 40 \text{ mn} \end{cases}$

Fig 2.3 Superposición de mejor ajuste entre una distribución de presiones de un huracán, y un diagrama en espiral

Aunque el criterio descrito es en sí ingenioso, resulta muy laborioso, e involucra para determinar la presión central : isfacer la ec 2.1 en un plano radial de la distribución de presiones del huracán y no en su totalidad. Para ver cómo influyen estas limitaciones en la obtención de las características de los huracanes, y si los datos logrados por dicho criterio son confiables, se aplicó este al análisis de las distribuciones de presión del huracán Carla (sep 7-12, 1961) durante su tránsito por el golfo de México, del cual se conoce su variación de presión central en toda su trayectoria.

Del análisis, aunque se obtuvieron variaciones menores de cinco por ciento, entre los valores de la presión central medidos y los inferidos, se encontraron diversas inconsistencias y problemas:

- a) Se requieren planos de isobaras con separación de 1 mb entre ellas. En general, los planos de isobaras disponibles son con contornos cada 5 mb, por lo que, previo al análisis, se necesita un ajuste de los mismos.
- b) El criterio es muy laborioso y se requieren muchos tanteos, con el inconveniente de que no siempre se encuentra una línea recta de mejor ajuste. En la mayoría de los casos analizados, la ec 2.1 se cumplió para isobaras mayores de los 995 mb y al noreste del movimiento del huracán.
- c) Se debe tener cuidado al seleccionar la presión normal,  $p_n$ , en la periferia del huracán. Schloemer (1954) estima esa presión como la existente en el cambio de curvatura de las isobaras de ciclónica a anticiclónica. Teniendo en cuenta esa definición, para el

análisis del huracán Carla se consideró una  $p_n$  de 1013 mb. Este valor es el mismo utilizado como constante en los huracanes estándar de proyecto propuestos por Graham y Nunn (1959). Wilson (1957) consideró para todo su análisis un valor de  $p_n$  de 1020 mb, mismo que, de la revisión de los planos de las perturbaciones correspondientes, es un valor excesivo. Al comprobar los valores obtenidos en ese estudio (tabla 2.1), se encontró que si se consideraba una  $p_n$  de 1013 mb, en lugar de la 1020 mb empleada, los valores del índice de presión central aumentaban y los radios disminuían.

Por lo anterior, y si se tiene en cuenta que en la zona en estudio se han presentado 60 huracanes en un lapso de 86 años, de los cuales solo se conoce su presión central en cuatro de ellos por medición directa, y en cinco por inferencia con los errores antes dichos, se ve la conveniencia de enfocarse el problema de otra forma y no valuar los índices de presión central, analizando las distribuciones de presión de los 56 huracanes restantes.

Si se toma en cuenta el efecto de rotación de la tierra sobre la circulación ciclónica de los huracanes, y el comportamiento de los mismos, se puede suponer que sus características cambien de acuerdo con su posición, misma que es factible relacionar con su latitud. Este hecho se ilustra en la fig 2.4, donde se muestra la variación de los índices de presión central en relación con su latitud de los cuatro huracanes de los cuales se tienen datos en el área en estudio. Como puede observarse, los índices disminuyen conforme aumenta la latitud en que se encuentra la perturbación.

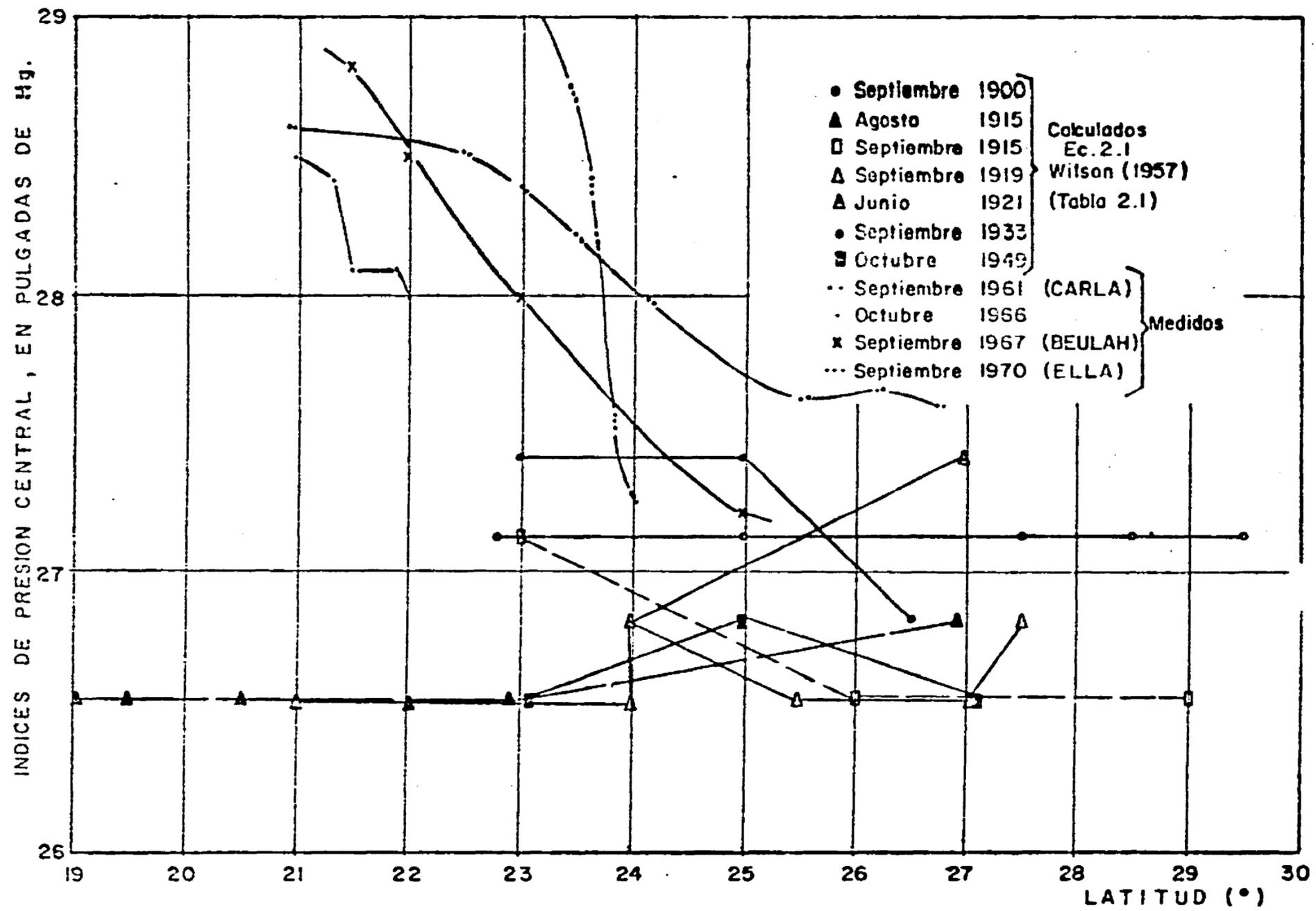


Fig 2.4 Variación de los índices de presión central en relación con su latitud

Esta idea fue usada por Graham y Nunn (1959) al proponer sus huracanes estándar de proyecto, aunque no fue incluida en el análisis de la presión central en el golfo de México. Con esta base se procedió a estudiar la información disponible en ese estudio (tabla 2.2), extrapolarla al área de interés y hacer las inferencias respectivas.

### 2.3.2 Índice de presión central de la extrapolación de datos medidos

Con la información de los índices de presión medidos en un periodo de 57 años (1900 - 1956) en las costas de Estados Unidos frente al golfo de México (tabla 2.2), Graham y Nunn (1959) obtuvieron la variación de estos índices en relación con su frecuencia de incidencia ajustándolo a una base de 100 años por medio de la expresión

$$p = 100 (M - 0.5)/Y$$

donde

p porcentaje de cambio de ocurrencia, por año

M número del evento

Y número de años de registro

Los datos así obtenidos siguen una distribución normal y se muestran en la fig 2.5. A partir de dicho análisis y mediante la información para la costa noroeste del golfo, previo ajuste de los datos de acuerdo con su latitud, se extrapolaron al área en estudio por mínimos cuadrados. Los valores obtenidos, así como las ecuaciones de ajuste encontradas se muestran en la fig 2.6.

Las latitudes constantes sirvieron de base para estudiar la relación existente entre los índices de presión central y sus frecuencias de incidencia, conservándose la ley de distribución normal. En la fig 2.7 se presentan las distribuciones de los índices de presión central para latitudes de 19, 21, 23 y 25° norte, junto con las características de cada distribución, también ajustadas por mínimos cuadrados.

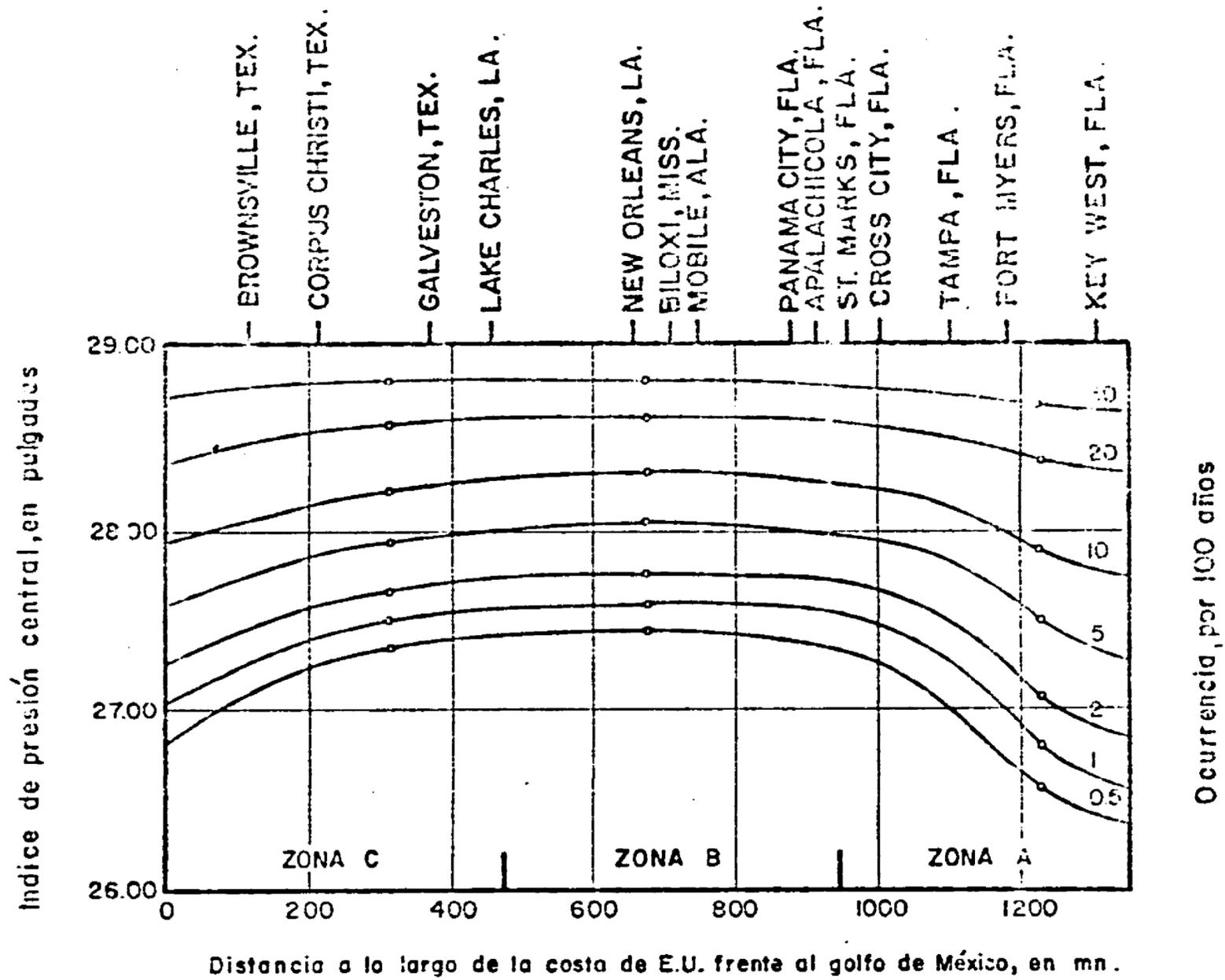


Fig 2.5 Variación geográfica de frecuencia media por 100 años de índices de presión central de huracanes (1900-1956) (Graham y Nunn, 1959)

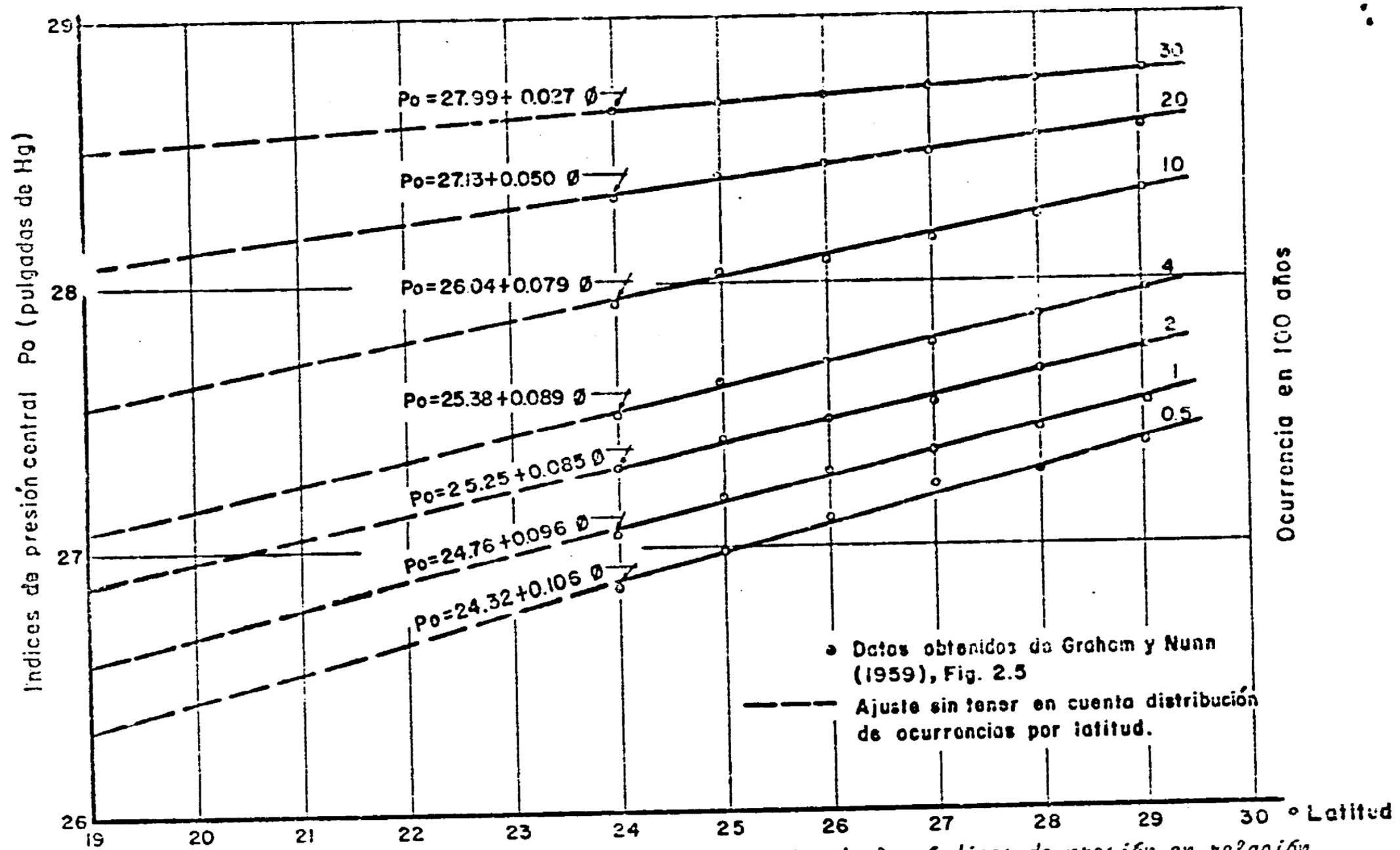


Fig 2.6 Variación de la frecuencia promedio en 100 años de los índices de presión en relación con su latitud

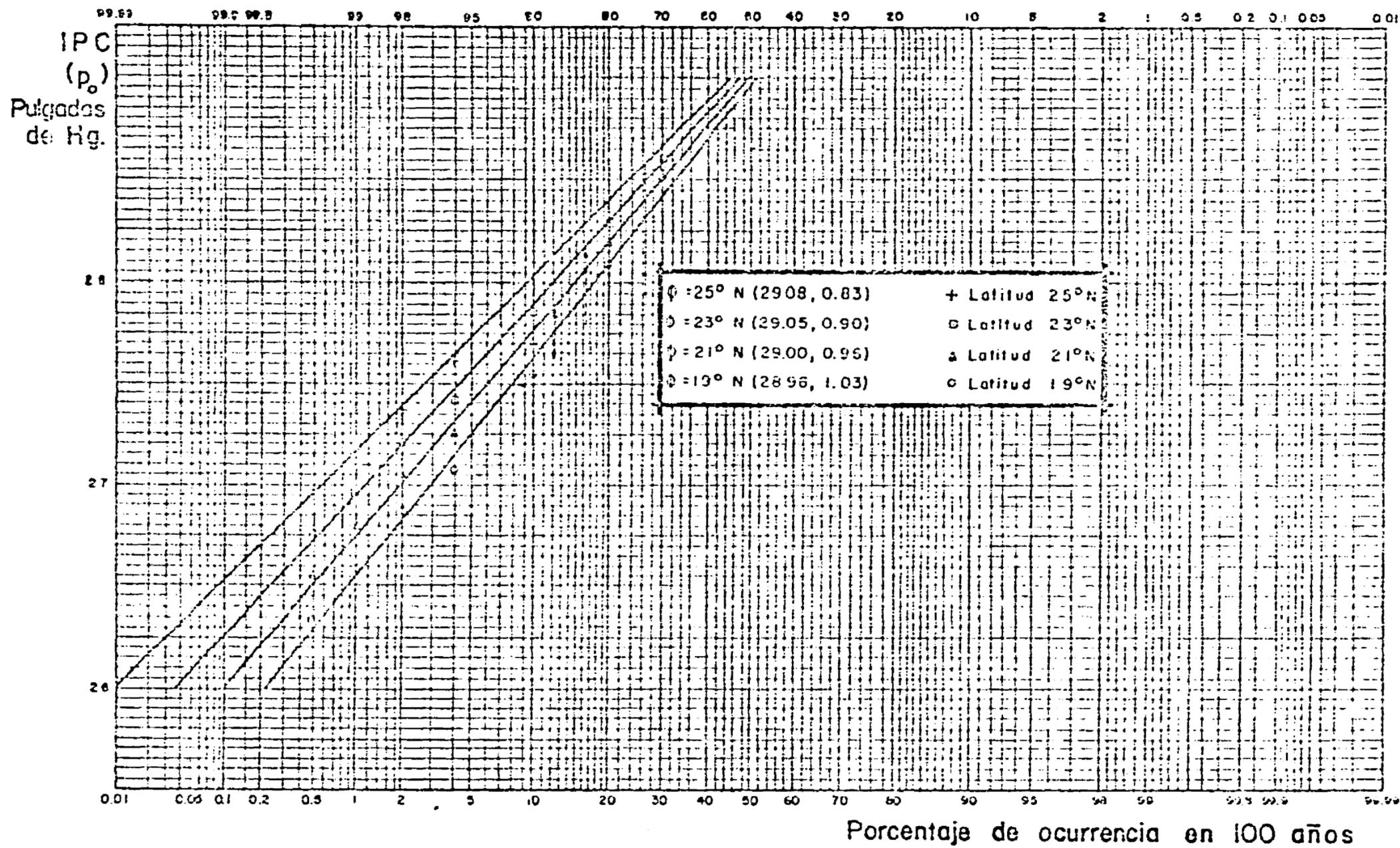


Fig 2.7 Distribuciones de mejor ajuste de IPC para diversas latitudes, de la inferencia de la fig 2.6, sin tener en cuenta la ocurrencia de huracanes por zonas

La información disponible de los índices de presión en el área en estudio (fig 2.4), no permiten comprobar la veracidad de los índices de presión inferidos de la información medida en las costas norteamericanas frente al golfo de México. Afortunadamente, la variancia de las distribuciones de probabilidades de dichos valores cambia poco, y su comportamiento es muy similar al observado en las costas de Estados Unidos, tanto en el golfo como en el Atlántico Norte. Por otra parte, se dispone de la información que se obtuvo del análisis de los ciclones que se han presentado en el área en estudio (tabla 2.4), que permite conocer cuál es la probabilidad, por zonas, de que se presente un huracán o una tormenta tropical (fig 2.8). Si se tiene en cuenta la definición de huracán, al conocer el porcentaje de estos respecto a las tormentas tropicales, automáticamente se sabe la probabilidad de que el índice de presión central sea menor o igual a 29 pulg.

Con dicha base, se procedió a ajustar las distribuciones de los índices de presión obtenidas por extrapolación. En la fig 2.9 se muestra la variación de la probabilidad de que el índice de presión central sea menor o igual a 29 pulg para cada zona del área en estudio y las inferidas por extrapolación, en relación con su latitud. Como puede verse, la probabilidad en general tiende a disminuir conforme decrece la latitud, contraria a la ley obtenida por inferencia. Este comportamiento es lógico si se tiene en cuenta que en esa área del golfo (inciso 2.6), los huracanes vienen en general del sureste, y que su índice de presión central disminuye conforme crece la latitud (fig 2.4).

De esa manera, conservando la variancia de cada distribución extrapolada, se ajustaron las distribuciones (fig 2.7) considerando que la probabilidad de que el índice de presión central sea menor o igual a 29 pulg: 35 por

ciento para los 19° N, 39.3 por ciento para los 21° N, 44 por ciento para los 23° N y 43.5 por ciento para los 25° N (fig 2.9). Las distribuciones así ajustadas de los índices de presión central siguen una ley normal, cuya media se puede valorar de acuerdo con la ecuación

$$\mu_0 = 30.33 - 0.05 \phi \quad (2.3)$$

y su desviación estándar como

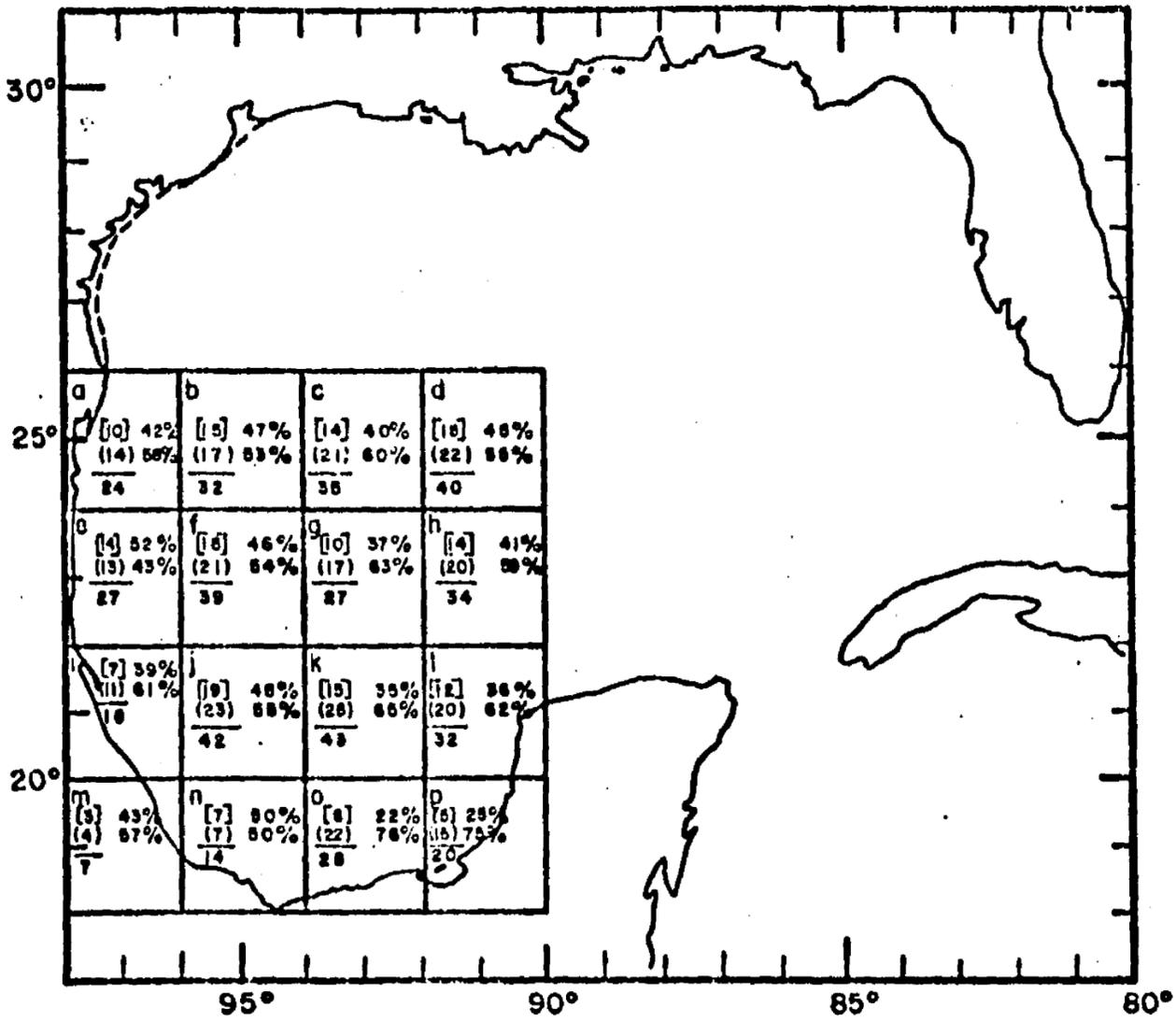
$$\sigma = 1.60 - 0.03 \phi \quad (2.4)$$

en que  $\phi$  es la latitud en grados donde se deseen conocer estas características. En la tabla 2.6 se proporcionan algunos valores de los índices de presión central para el área en estudio, en relación con su latitud y frecuencia de incidencia, mismos que se encuentran en la fig 2.10.

#### 2.4 Radio de máximo viento

El radio de la región de máximo viento en un huracán es un índice del tamaño de este, y un factor importante en su distribución de presiones. La información disponible de mediciones directas del radio de máximo viento durante el paso de un huracán, se muestra en la tabla 2.2. Estos valores, como se indicó, corresponden a mediciones realizadas en las costas de Estados Unidos frente al golfo de México.

De acuerdo con los estudios de Graham y Nunn (1959), los radios de máximo viento tienen una ligera variación con la longitud y ninguna con la latitud; los expresan en función del índice de presión, estableciendo para cada índice un radio de máximo viento mínimo, medio y máximo.



NOTA: Se han presentado en el área en estudio 60 huracanes y 89 tormentas tropicales.

[ ] Núm. huracanes por zona  
 ( ) Núm. tormentas tropicales

Fig 2.8 Relación de tormentas tropicales y huracanes en el área en estudio en 86 años (1886-1971) (tabla 2.4, cols 1 y 2)

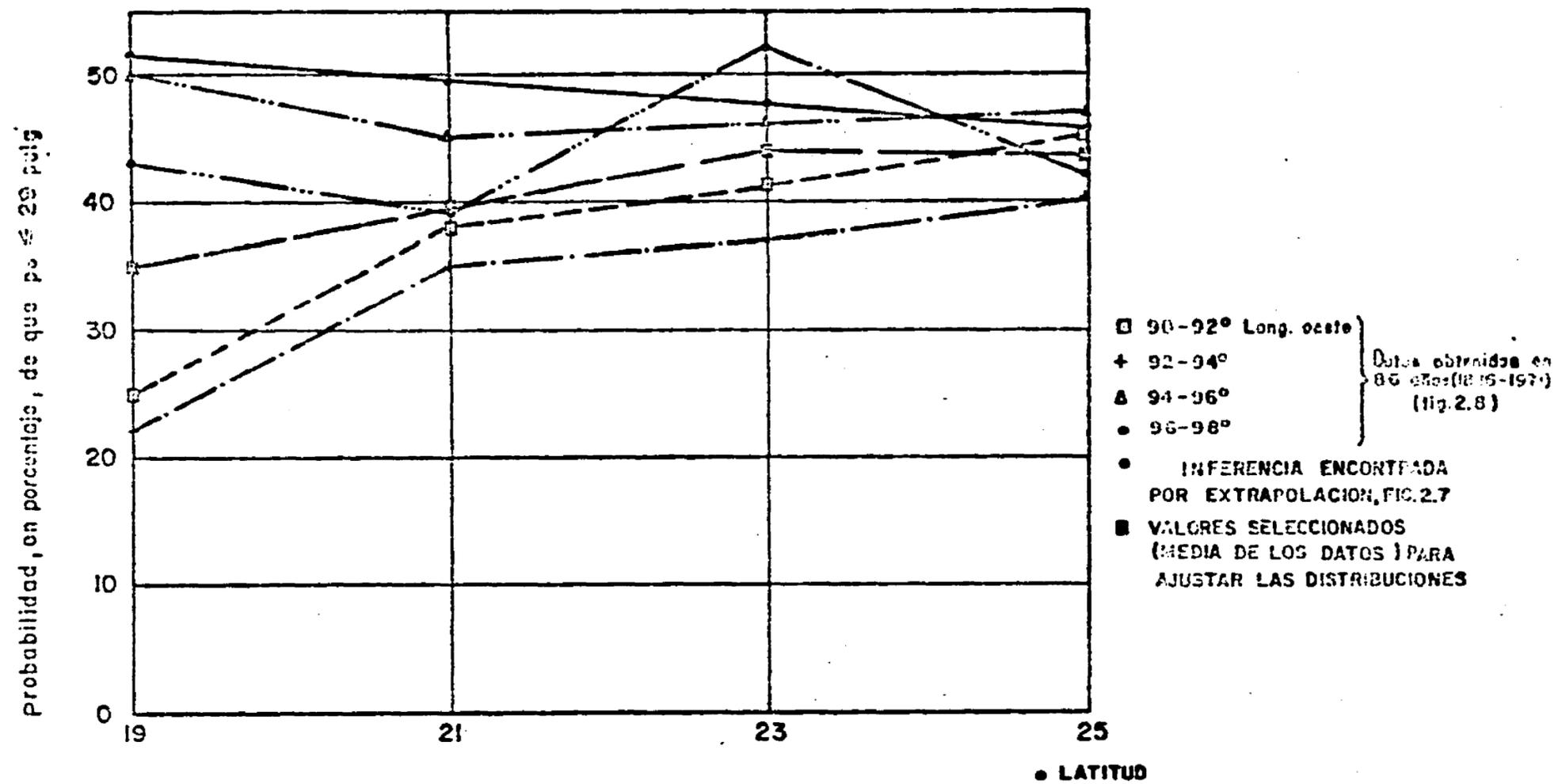


Fig 2.9 Variación de  $P(P_0 \leq 29)$  en relación con la latitud, tanto de los datos disponibles como la inferida por extrapolación

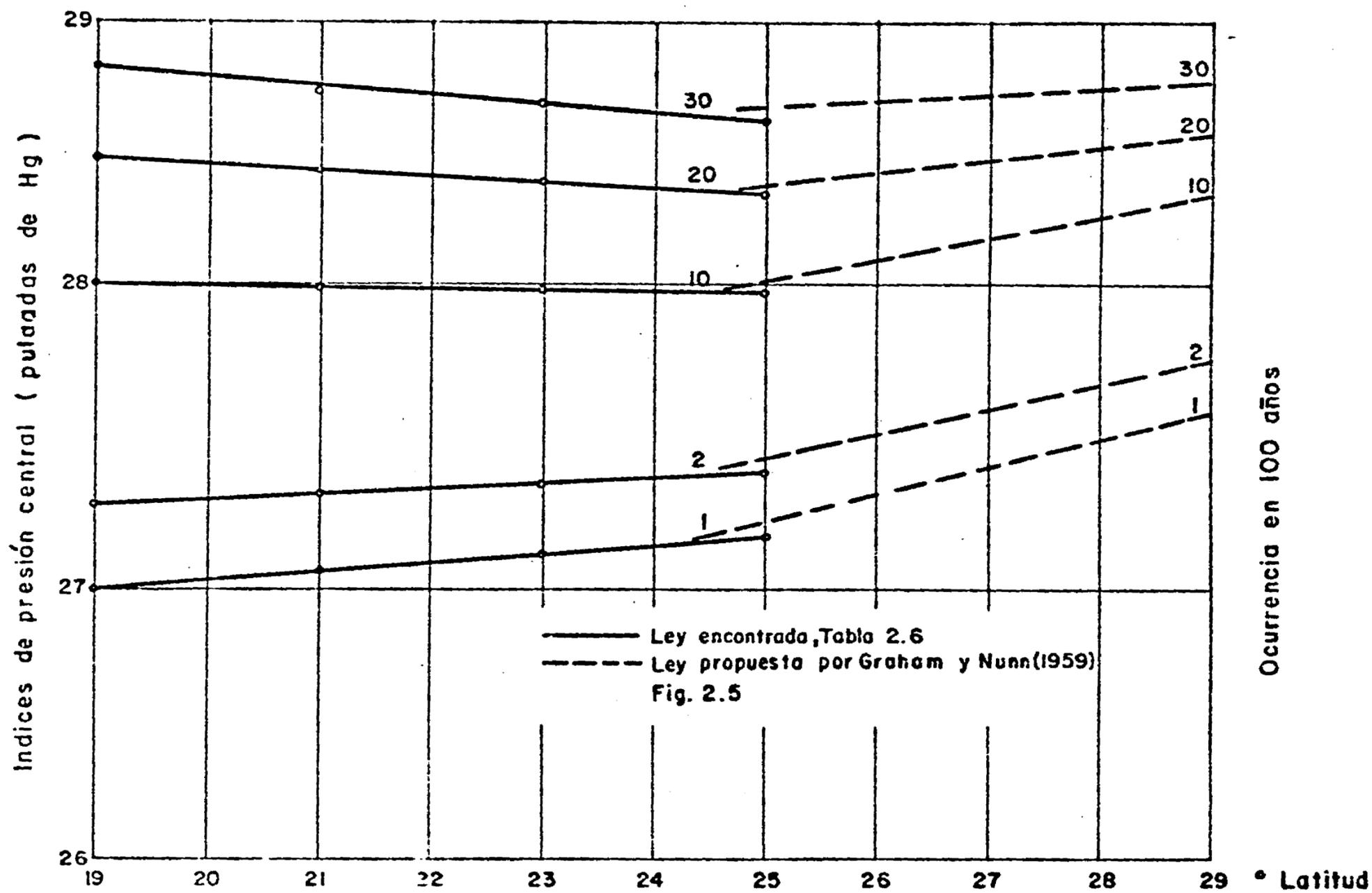


Fig. 2.5 Variación de los índices de presión en relación con su frecuencia de ocurrencia en 100 años y la latitud

Se procedió a la información disponible de los radios de máximo viento entre los 90 y 100 grados de longitud oeste, correspondiente a los límites del área en estudio (zonas B y C), en relación con los índices de presión central respectivamente.

Si se observa la información medida disponible de los radios de máximo viento, solamente se tiene de esta para valores del índice de presión central mayores de 28.5 y existe una gran diversidad de valores del radio para un mismo índice de presión. Con el fin de agrupar mejor esta información, se hizo un análisis de muestras de los radios de máximo viento, con base en rangos de clasificación de los índices de presión. Se encontró que los radios medios de máximo viento para cada rango de los índices de presión central, seguían una ley sencilla que ajustada por mínimos cuadrados, es

$$R = \text{antilog} (0.17 p_0 - 3.45) \quad (2.5)$$

donde  $p_0$  es el índice de presión central, en pulgadas, y R el radio medio de máximo viento, en millas náuticas.

Con objeto de incrementar la información disponible para el análisis de variancia de los radios de máximo viento, se incluyeron los valores obtenidos del ciclón Carla y los deducidos por Wilson (1957), con las limitaciones indicadas en el inciso anterior.

De esa manera fue posible conocer la relación de la variancia de los radios de máximo viento respecto a los índices de presión central. Al considerar que los radios de máximo viento tenían una distribución t de Student en relación con su media; se obtuvo la ecuación para un intervalo de confianza de 1 por ciento, obtenida de la siguiente ecuación:

$$\Delta R = (\text{antilog } (0.67 p_o - 16.7)) \quad (2.6)$$

donde  $\Delta R$  es la variación del radio medio de máximo viento, en millas náuticas, y  $p_o$  el índice de presión central, en pulgadas.

La relación entre la información medida e inferida respecto a las ecs 2.5 y 2.6, se muestra en la fig 2.11. Si se tiene en cuenta que los datos obtenidos por Wilson y otros (1964) de acuerdo con el subinciso 2.3.1, se ve que las ecuaciones 2.5 y 2.6 son representativas de la variación que se puede esperar para el máximo viento en el área en estudio.

### 2.5 Velocidad de desplazamiento

La velocidad de desplazamiento de un huracán puede definirse como la velocidad que sufre su campo de presiones, y definirlo en términos de la información disponible para el área en estudio.

La información disponible para el área en estudio, basada en la trayectoria seguida por los huracanes, hizo posible valorar la velocidad de desplazamiento de estos en función de la longitud de recorrido en cada una de las ocho zonas (tabla 2.4, cols 11 a 19). Considerando intervalos de clasificación para las velocidades de desplazamiento ( $^{\circ}L/24 h$ ), la fluctuación de la velocidad fue correspondiente al intervalo de 1.6 a 2.5, y así sucesivamente. De esta manera, la información disponible permite realizar un análisis estadístico de la velocidad de desplazamiento del huracán en cada zona de consideración. En la fig 2.12 se muestran los resultados de la velocidad de desplazamiento, en porcentajes acumulados, para las diversas zonas en estudio.

en millas náuticas.

radios de máximo

2.11. Si se tie

ben ajustarse de

mencionadas son

los radios de máxi

er la distorsión

ión con la ec 2.1.

de la trayectoria

dad de desplazamien

horas, para cada

ción se hizo consi

; es decir, con

a 1.5; con 2, la

mente. De esta

ferencia estadís

quiere zona en

procesados de la ve

urrencia, para

- Valores medidos entre los 90° N y 98° N (Graham y Hunn, 1959).
- Valores inferidos por Wilson (1957) (Tabla 2.1)
- ▲ Valores obtenidos para el ciclón Carla.

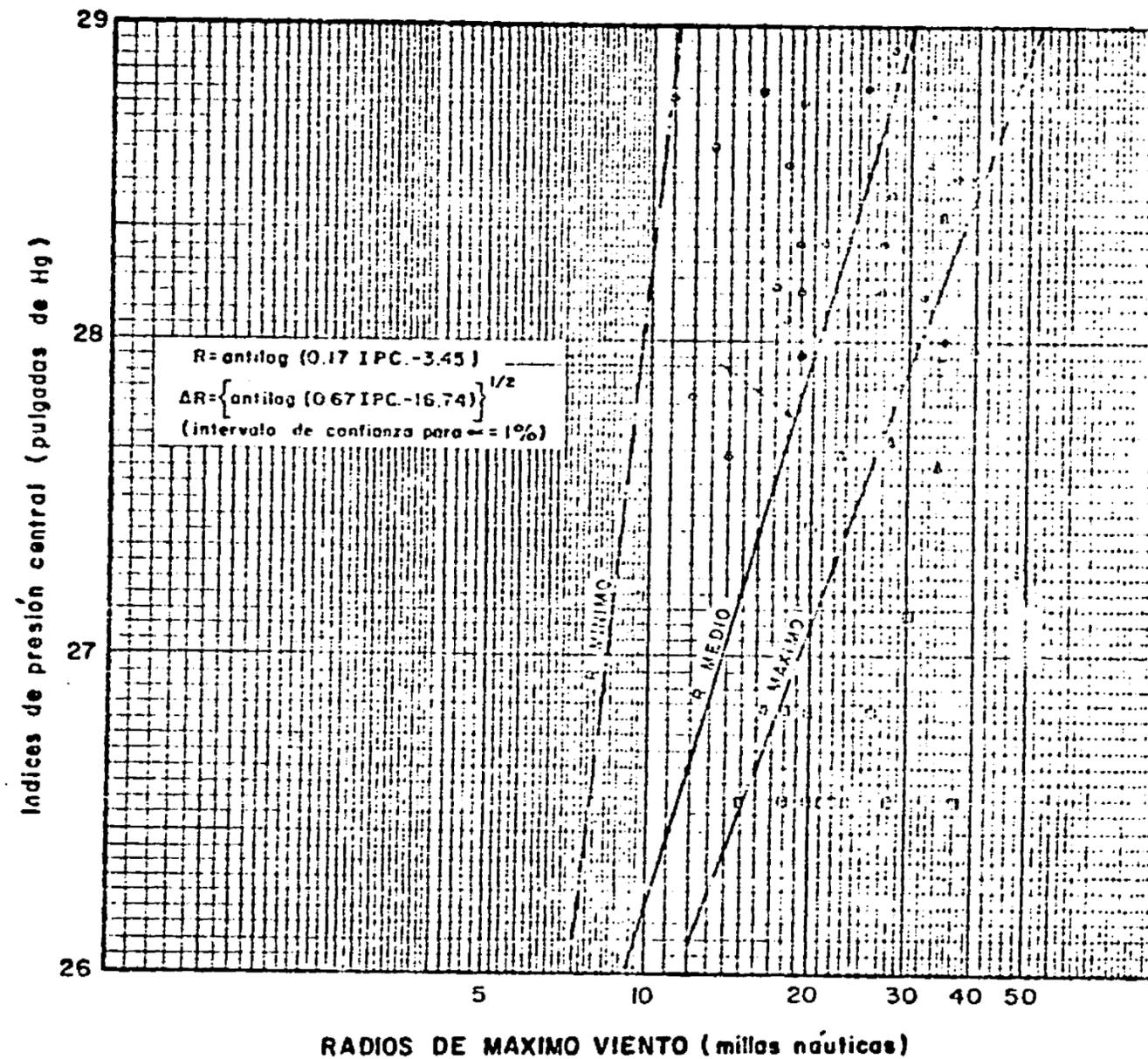


Fig 2.11 Variación de los radios de máximo viento en relación con los índices de presión central para el área en estudio

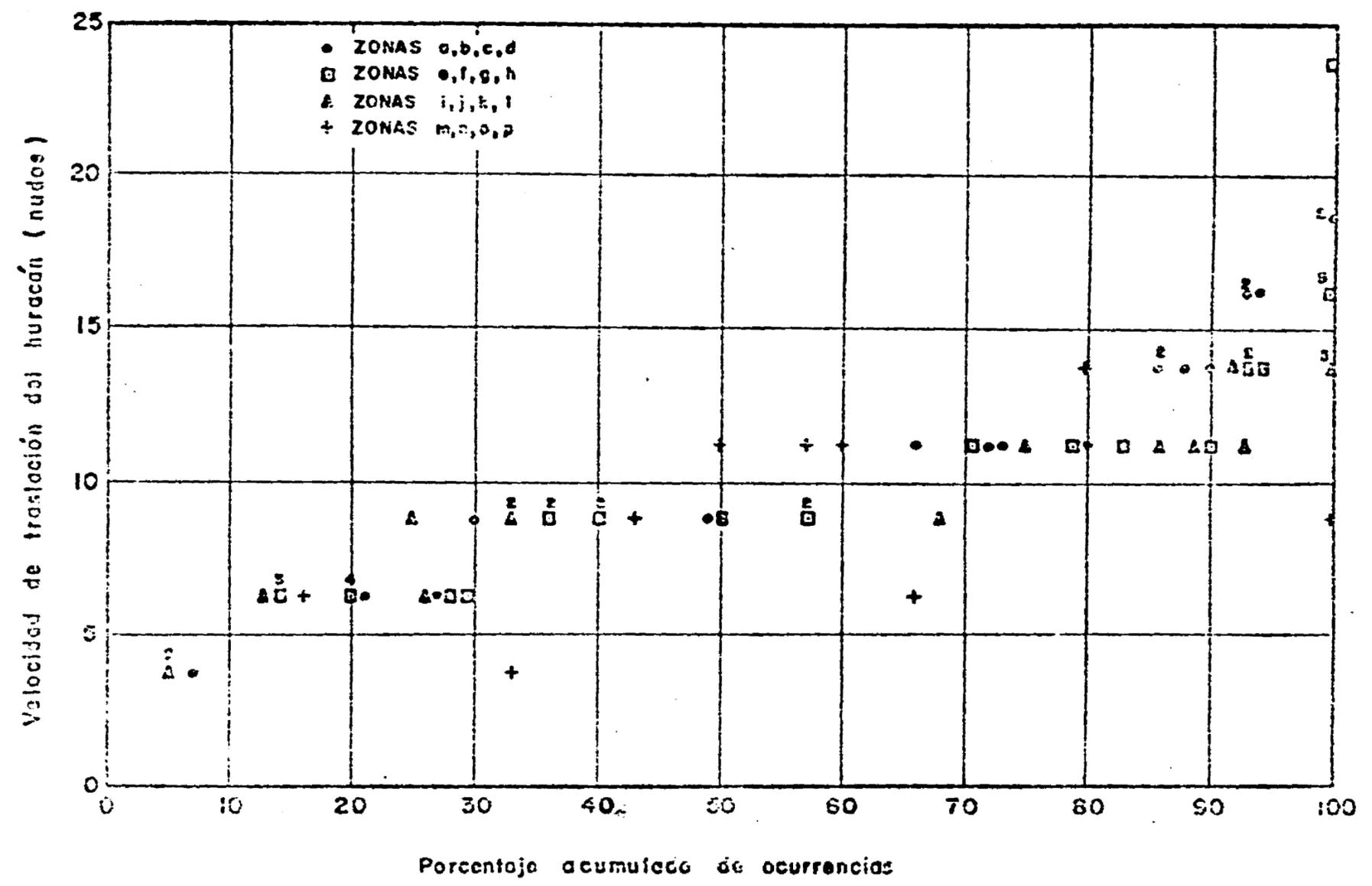


Fig 2.12 Valores procesados de la velocidad de traslación, en porcentajes acumulados de ocurrencia para las diversas zonas en estudio (tabla 2.2, cols 11-19)

Estimando que podría existir una relación entre la velocidad de desplazamiento de los huracanes y la latitud, se hizo un análisis de la información, considerando para cada latitud la distribución promedio obtenida de las zonas correspondientes a esa. En dicho análisis se observó la presencia de fuerte vinculación entre las variaciones de las distribuciones así obtenidas, y poca en relación con la latitud (fig 2.13).

Por lo anterior, se procedió a encontrar la distribución de probabilidades media de todas las velocidades de desplazamiento observadas en el área en estudio, obteniéndose que esta seguía una ley normal, cuyas características, ajustadas por mínimos cuadrados, fueron una media de 9.20 nudos y una desviación estándar de 2.67 nudos (fig 2.14). Esta distribución se consideró representativa de la variación que se puede esperar en el área en estudio, de la velocidad media de desplazamiento de un huracán.

## 2.6 Dirección de movimiento

La dirección de movimiento de un huracán permite conocer la forma en la cual se debe colocar, en cualquier zona del área en estudio, su distribución de presiones, ya que como se indicó, esta sufre una distorsión debido a la velocidad de desplazamiento del mismo.

En la tabla 2.4, cols 3 a 8, se incluye el número de veces que un huracán incidió en cada zona del área en estudio, de acuerdo a una dirección determinada. El proceso de análisis seguido para la obtención de esta información fue similar al realizado para las velocidades de desplazamiento. Así, se consideró dirección sur (S) cuando la dirección de incidencia del huracán fluctuaba en un arco de  $45^\circ$  con media en el sur, etc.

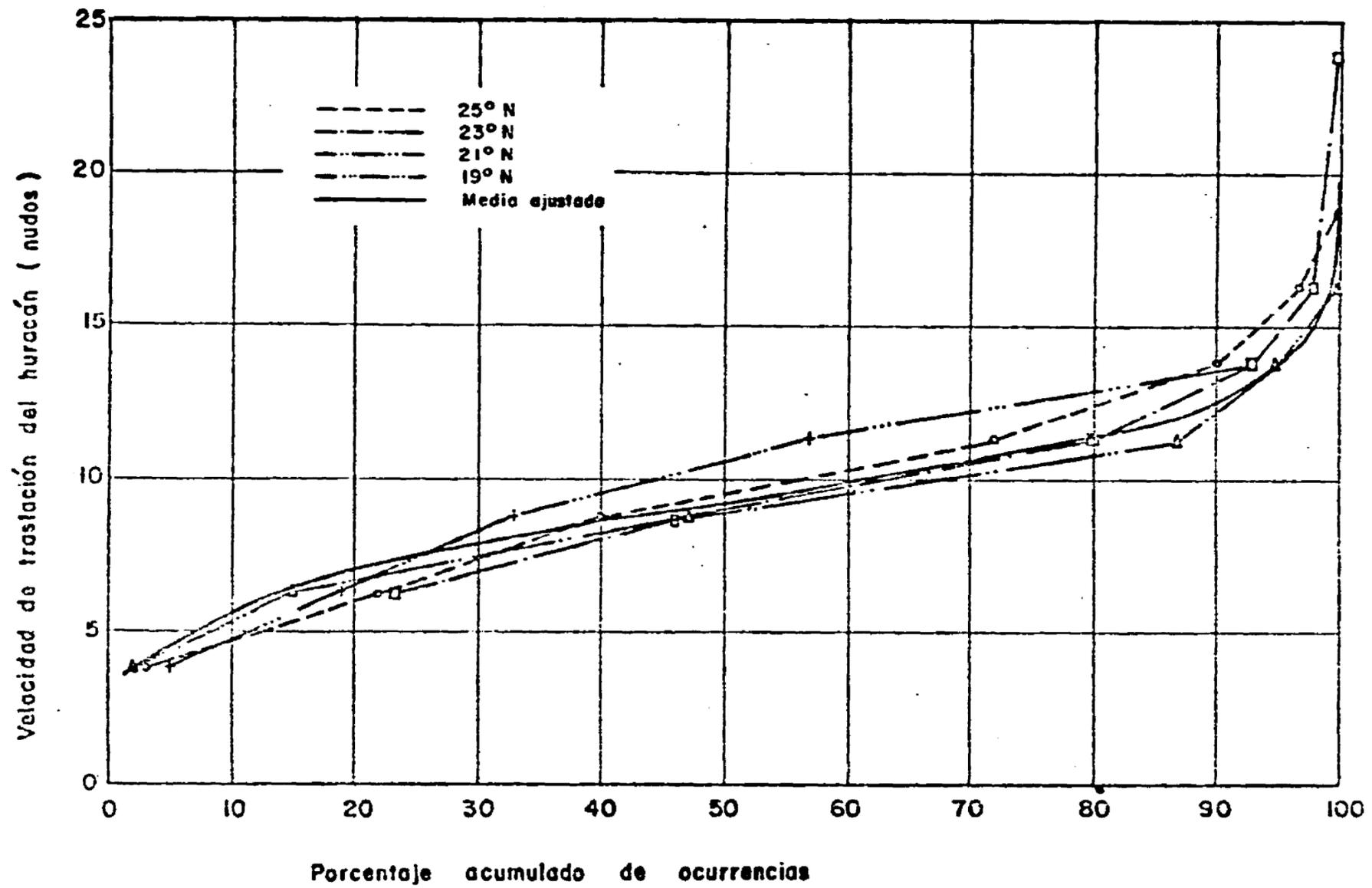


Fig 2.13 Variación de la distribución acumulada de velocidades de traslación del huracán en relación con la latitud

En la fig 2.15 está, en forma gráfica, el porcentaje de incidencias de huracanes en cierta dirección respecto a su latitud. La dirección de incidencia media cambia lentamente con la latitud. Se puede decir que para una latitud de  $25^{\circ}$  N, los huracanes se desplazan en un alto porcentaje en dirección sureste, a los  $23^{\circ}$  N con dirección entre sureste y este, ya los  $21^{\circ}$  N y a los  $19^{\circ}$  N con dirección este.

### 2.7 Características obtenidas

La consistencia de la variación de las características de los huracanes deducidos para el área en estudio, en relación con los estudios hechos en otras regiones y los datos observados, permite considerarlos representativos del comportamiento de los huracanes en esa área. Dichas características son de importancia fundamental para este trabajo si se estima que el conocimiento de la variación de las mismas, así como el porcentaje de incidencias que estos fenómenos tienen en cada una de las zonas analizadas, permitirán estructurar los campos de viento generados por las perturbaciones.

La forma como se ha presentado el análisis de los datos disponibles, hacen factible valuar las características de los huracanes en cualquier punto de interés dentro del área en estudio. La secuela a seguir, de acuerdo con el proceso descrito en este capítulo para integrar las características de un huracán y sus fluctuaciones en una latitud dada, es:

- a) . Con las ecs 2.3 y 2.4, se obtienen las características de la distribución normal que sigue el índice de presión central en esa latitud y, por ende, cualquier valor de este, de acuerdo con la frecuencia seleccionada.

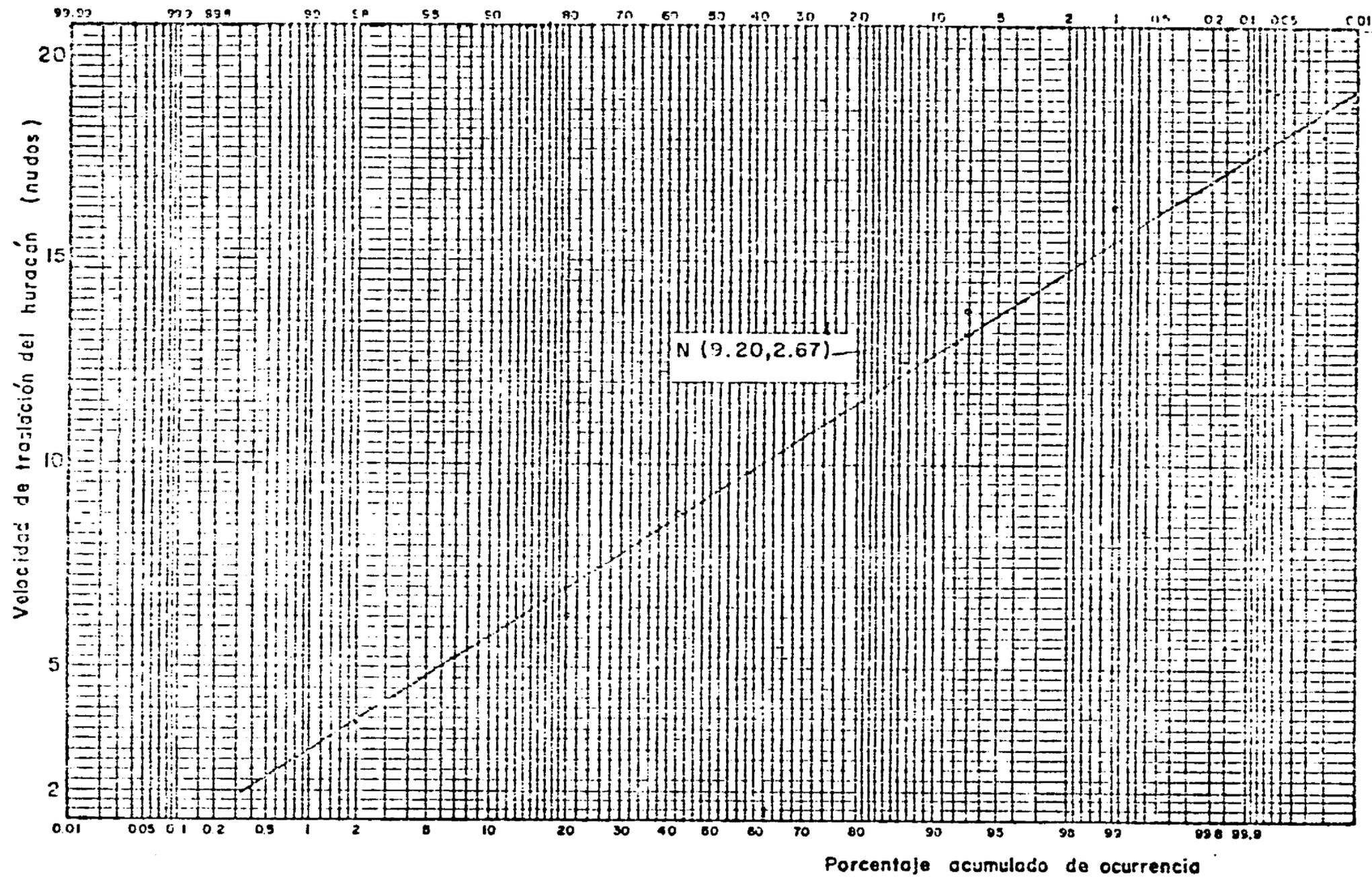


Fig 2.14 Distribución de mejor ajuste para la velocidad de traslación

- b) Conocido el índice de presión central de las ecs 2.5 y 2.6, se determina el radio medio de máximo viento y sus fluctuaciones.
- c) De la fig 2.14 se deduce la variación de las velocidades de desplazamiento, de acuerdo con su frecuencia de incidencia\*.

\* Como no se puede considerar que la frecuencia con que se presenta el índice de presión central sea coincidente con la frecuencia de la velocidad del viento, y como se carece de información para hacer un análisis a este respecto, se adoptó para la zona en estudio el siguiente rango de variaciones de la velocidad del viento:

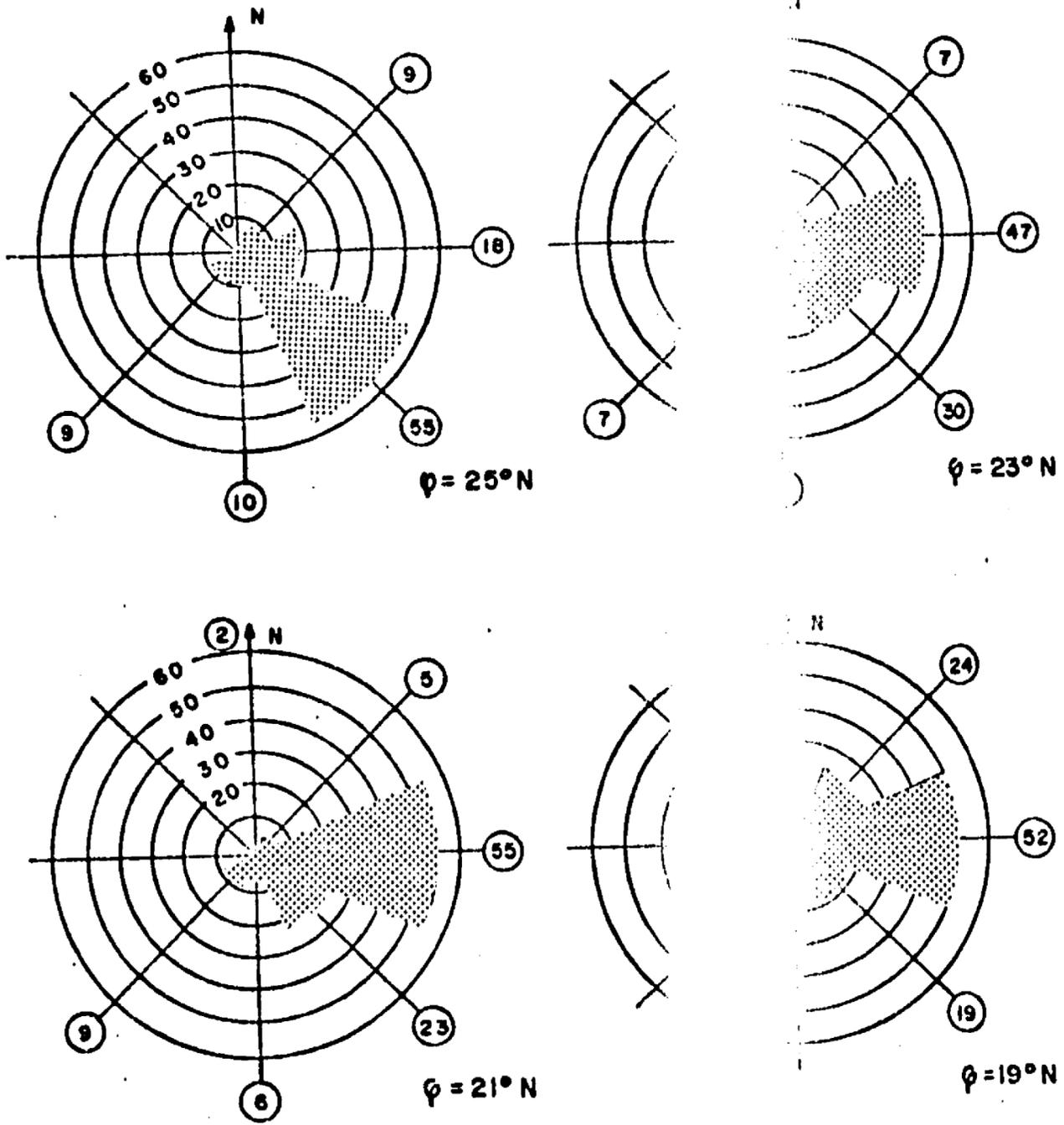
V mínima = 4 nudos

V media = 9.2 nudos

V máxima = 14 nudos

- d) Finalmente, de la fig 2.15 se conoce la dirección de incidencia.

Siguiendo ese proceso, en la tabla 2.7 se incluyeron las características de los huracanes estándar de proyecto para diversas latitudes del área en estudio. Para ello, se consideró al huracán más severo que puede aceptarse razonablemente característico de la zona en estudio, o sea que el índice de presión central tiene una frecuencia de ocurrencia de 1 en 100 años (Graham y Nunn, 1959).



③ Porcentaje de ocurrencia me...

Fig 2.15 Porcentaje de dirección de inc  
relación con la latitud

huracanes en

TABLA 2.7 CARACTERISTICAS DE LOS HURACANES ESTANDAR DE PROYECTO PARA EL AREA EN ESTUDIO

Latitud	Zonas	P <sub>o</sub> (pulgadas)	Radios de máximo viento (mn)			Velocidad de desplazamiento (nudos)			Dirección
			R mín	R med	R máx	V mín	V med	V máx	
25	a,b,c,d	27.15	9.33	14.64	19.95	4.00	9.20	14.00	SE
23	e,f,g,h	27.09	9.23	14.30	19.37	4.00	9.20	14.00	SE - E
21	i,j,k,l	27.03	9.12	13.97	18.81	4.00	9.20	14.00	E
19	m,n,o,p	26.97	9.02	13.64	18.27	4.00	9.20	14.00	E

FALTA PAGINA

No.

46

### 3. CAMPOS DE VIENTO DEBIDO A LOS HURACANES

#### 3.1 *Antecedentes*

En el capítulo anterior se obtuvo para el área en estudio la variación de las características de los huracanes, en relación con su frecuencia de incidencia, que ligado a la ec 2.1, permite estructurar el campo de presiones de un huracán sin desplazamiento. En este capítulo se define el proceso para obtener el campo de viento resultante del campo de presiones, así como su deformación debida al desplazamiento de la perturbación ciclónica. Para lo anterior, a partir de las ecuaciones generales del movimiento, se determina el campo de viento teórico sin considerar efectos de fricción. Posteriormente se hace una revisión y ajuste de la información disponible, para conocer la influencia de la fricción sobre el campo de viento teórico. Con ello, se obtiene la velocidad y dirección del viento sobre el agua, definiendo el campo de viento real.

Conocidas las relaciones entre los campos de presión y los campos de viento, se define el proceso a seguir para su valuación. Con esto se realiza un análisis de la variación que se puede esperar de los campos de viento en el área en estudio, de acuerdo con las características de un huracán estándar de proyecto.

### 3.2 Ecuaciones del movimiento

En problemas meteorológicos, la segunda ley del movimiento de Newton puede simplificarse y expresarse para un movimiento horizontal sin fricción como\*

$$\frac{du}{dt} - fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.2)$$

donde  $u$  y  $v$  son los componentes de la velocidad en la dirección  $x$  y  $y$ , respectivamente

$$\frac{\partial p}{\partial x} \text{ y } \frac{\partial p}{\partial y}$$

el gradiente de presión en la dirección  $x$  y  $y$ , respectivamente,  $\rho$  la densidad del aire y  $f$  el parámetro de Coriolis, el cual se valúa de acuerdo con la ecuación

$$f = 2\Omega \text{ sen } \phi \quad (3.3)$$

siendo  $\Omega$  la velocidad angular de la tierra en un plano horizontal en el polo ( $\Omega = 2\pi/24 \text{ rad/h} = 0.2618 \text{ rad/h}$ ) y  $\phi$  la latitud.

Las ecs 3.1 y 3.2 pueden expresarse en forma vectorial como

\* Véase J. R. Holton, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Academic Press (1972)

$$\frac{dV}{dt} h = f V_h \times k = - \frac{1}{\rho} \nabla h^p \quad (3.4)$$

donde

$$V_h = u i + v j$$

es el vector de velocidad horizontal

y

$$\nabla_h p = \frac{\partial p}{\partial x} i + \frac{\partial p}{\partial y} j$$

es el gradiente de presión horizontal.

Si se considera ahora un sistema de coordenadas naturales  $(s, n, z)$ , con sus direcciones definidas por los vectores unitarios  $i, j$  y  $k$  ( $i$ , orientado paralelamente a la dirección del flujo en cada punto,  $j$  normal con dirección positiva a la izquierda de la dirección del flujo y  $k$  dirigido verticalmente hacia arriba), se tiene que

$$V_h = \frac{ds}{dt} i = V i$$

y la aceleración del movimiento es

$$\frac{dV}{dt} h = \frac{dV}{dt} i + V \frac{di}{dt}$$

De la fig 3.1 se deduce que

$$\frac{di}{dt} = \frac{n}{K} V$$

por lo cual

$$\frac{dV}{dt} h = \frac{dV}{dt} i + \frac{V^2}{K} j$$

donde  $K$  es el radio de curvatura, que se toma como positivo cuando el centro de curvatura está en la dirección positiva de  $j$ .

Respecto a la fuerza de Coriolis, como esta actúa normal a la dirección del movimiento, se tiene que

$$f V_h \times k = fV i \times k = -fV j$$

Así, la ec 3.4 se transforma en un sistema de coordenadas naturales en las siguientes ecuaciones

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} \quad (3.5)$$

$$\frac{V^2}{K} + fV = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3.6)$$

que expresan el balance de las fuerzas paralela y normal a la dirección del flujo, respectivamente. Para un movimiento paralelo a las isobaras,  $\frac{\partial p}{\partial s} = 0$ , y velocidad constante siguiendo el movimiento.

El flujo gobernado por la ec 3.6 se conoce como flujo gradiente; es el resultado del equilibrio entre la fuerza de Coriolis, la fuerza centrífuga y la del gradiente de presión normal al flujo.

### 3.3 Flujo gradiente

La ecuación del flujo gradiente define el comportamiento del campo de velocidades de un huracán; la velocidad del viento resultante (viento gradiente)

te) es la velocidad debida a este, sin tener en cuenta los efectos de fricción.

Para proceder a la obtención del viento gradiente, se ajustará la ec 3.6 a los campos de isobaras analizados en el capítulo anterior. En este caso, la variación del gradiente de presión está referida a una línea radial al centro del huracán y se define mediante la ec 2.1 a partir de las características del huracán. Por lo anterior

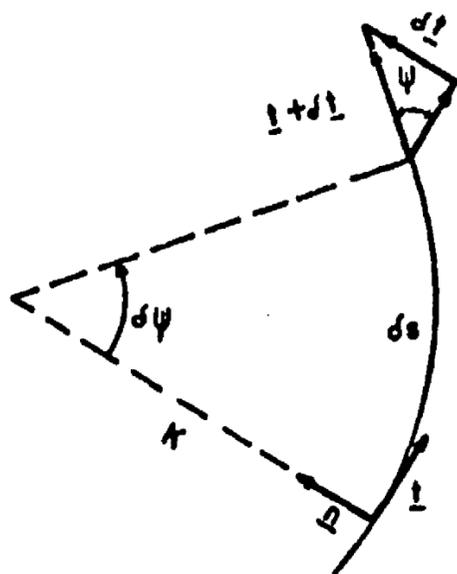
$$-\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{dp}{dr} = (p_n - p_o) \frac{R}{r^2} e^{-R/r} \quad (3.7)$$

El radio de curvatura,  $K$ , se refiere a la curvatura de las trayectorias del campo de viento. Si un huracán no tiene desplazamiento, las trayectorias y las líneas de flujo coinciden, y el radio de curvatura,  $K$ , es igual al radio de las isobaras,  $r$ . Si existe desplazamiento del campo de presiones, se requiere conocer la relación entre el radio de curvatura de las líneas de flujo  $r$  y el radio de curvatura de las trayectorias del campo de flujo,  $K$ , a fin de definir este último.

Para lo anterior, sea  $\beta$  la dirección angular del viento. De la fig 3.2, se deduce que  $\delta s = k\delta\beta$  y que en el límite  $\delta s \rightarrow 0$  y

$$\frac{d\beta}{ds} = \frac{1}{K} \quad \text{y} \quad \frac{\partial\beta}{\partial s} = \frac{1}{r}$$

donde  $\frac{d\beta}{ds}$  significa la cantidad de cambio de la dirección del viento a lo largo de una trayectoria y  $\frac{\partial\beta}{\partial s}$  lo mismo, solo que a lo largo de una línea de flujo en cualquier instante.



$$\delta \psi = \frac{ds}{K} = |\delta t|$$

$\delta t \parallel n$  y en el límite  $ds \rightarrow 0$

$$\frac{dt}{ds} = \frac{n}{K}$$

$$\frac{dt}{dt} = \frac{dt}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{n}{K} v$$

Fig 3.1 Cantidad de cambio de un vector tangente  $t$  siguiendo al movimiento

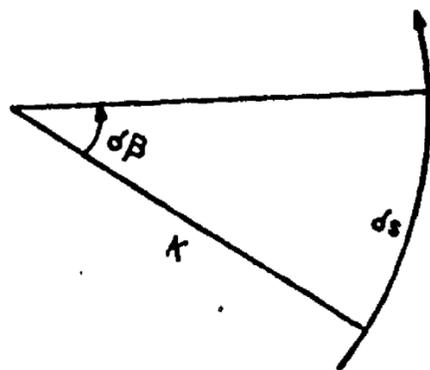


Fig 3.2 Relación entre el cambio en la dirección angular del viento  $\delta B$  y el radio de curvatura  $K$

Así, la cantidad de cambio de la dirección del viento siguiendo el movimiento es

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\partial\beta}{\partial t} + v \frac{\partial\beta}{\partial s} = \frac{\partial\beta}{\partial t} + \frac{v}{r}$$

o

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d\beta}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{v}{K}$$

Por lo que la relación entre  $K$  y  $r$  es

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{v} \frac{\partial\beta}{\partial t} + \frac{1}{r} \quad (3.8)$$

De esta ecuación se concluye que las trayectorias y las líneas de flujo coinciden si la dirección del viento permanece constante en el tiempo. Si el campo de presiones no cambia en su forma siguiendo al movimiento, la variación en las trayectorias del flujo se debe a la velocidad de desplazamiento del sistema, por lo que

$$\frac{\partial\beta}{\partial t} = -V_d \nabla\beta = -V_d \cos \gamma \frac{\partial\beta}{\partial s} = -V_d \cos \gamma \frac{1}{r}$$

donde  $V_d$  es la velocidad de desplazamiento del huracán y  $\gamma$  el ángulo entre las líneas de flujo y la dirección de movimiento del sistema. Sustituyendo esta ecuación en la 3.8, se obtiene

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{r} \left( 1 - \frac{V_d \cos \gamma}{v} \right) \quad (3.9)$$

que es la relación entre la curvatura de las trayectorias y la curvatura de las líneas de flujo (isobaras).

Sustituyendo las ecs 3.7 y 3.9 en la 3.6, se tiene que

$$\frac{v^2}{r} + \left(f - \frac{V_d \cos \gamma}{r}\right) v = \frac{1}{\rho} (p_n - p_o) \frac{R}{r^2} e^{-R/r} \quad (3.10)$$

ecuación que define el campo de viento teórico para un huracán, a partir de sus características. Despejando la velocidad del viento:

$$v_g = -\frac{kr}{2} + \left(\frac{k^2 r^2}{4} + v_c^2\right)^{1/2} \quad (3.11)$$

donde

$$v_g = v \text{ (viento gradiente)}$$

$$k = f - \frac{V_d \cos \gamma}{r}$$

$$v_c^2 = \frac{1}{\rho} (p_n - p_o) \frac{R}{r} e^{-R/r}$$

siendo  $v_c$  el viento ciclostrofico

En el rango de velocidades de interés para la generación de oleaje producidas por un huracán, la diferencia entre el viento gradiente  $v_g$  y el viento ciclostrofico es pequeña, comparada con sus cantidades en sí mismas. Así, la ec 3.11 se puede escribir en forma aproximada como

$$v_g = -\frac{kr}{2} + v_c \quad (3.12)$$

En la fig 3.5 se muestra la aplicación de las ecs 3.11 y 3.12 a un huracán asfórico de proyecto, a una latitud de 22° norte.

Con las unidades de las características de los huracanes a utilizar y considerando una densidad del aire de  $1.175 \times 10^{-3} \text{ gm/cm}^3$  (aire saturado a una

temperatura de 28 °C y presión de 1 000 mb), la ec 3.12 se transforma para su aplicación en:

$$V_g = 104.00 \left( (29.92 - p_o) \frac{R}{r} e^{-R/r} \right)^{1/2} - 0.26 r \text{ sen } \phi + 0.50 V_d \text{ cos } \gamma \quad (3.13)$$

donde

- $p_o$  índice de presión central, en pulg de mercurio
- $r$  distancia radial, en millas náuticas
- $R$  radio de máximo viento, en millas náuticas
- $V_g$  velocidad del viento gradiente, en nudos
- $V_d$  velocidad de desplazamiento del huracán, en nudos
- $\phi$  latitud, en grados
- $\gamma$  ángulo en grados, entre la dirección de desplazamiento y la dirección del viento

De la ecuación anterior, con  $r = R$ , se obtiene el valor del viento gradiente máximo, el cual se expresa para un huracán sin desplazamiento como

$$V_g \text{ máx} = 63.07 (29.92 - p_o)^{1/2} - 0.260 R \text{ sen } \phi \quad (3.14)$$

### 3.4 Velocidades sobre el agua

La ec 3.13 permite definir el campo de velocidades debido a un huracán, sin tomar en cuenta los efectos de fricción. Para determinar el campo de viento de una perturbación ciclónica sobre el agua (aproximadamente a 10 m sobre el nivel medio del mar), se requiere ajustar la ec 3.13 y considerar los efectos antes mencionados, los cuales influyen en la magnitud de la velocidad y en su dirección.

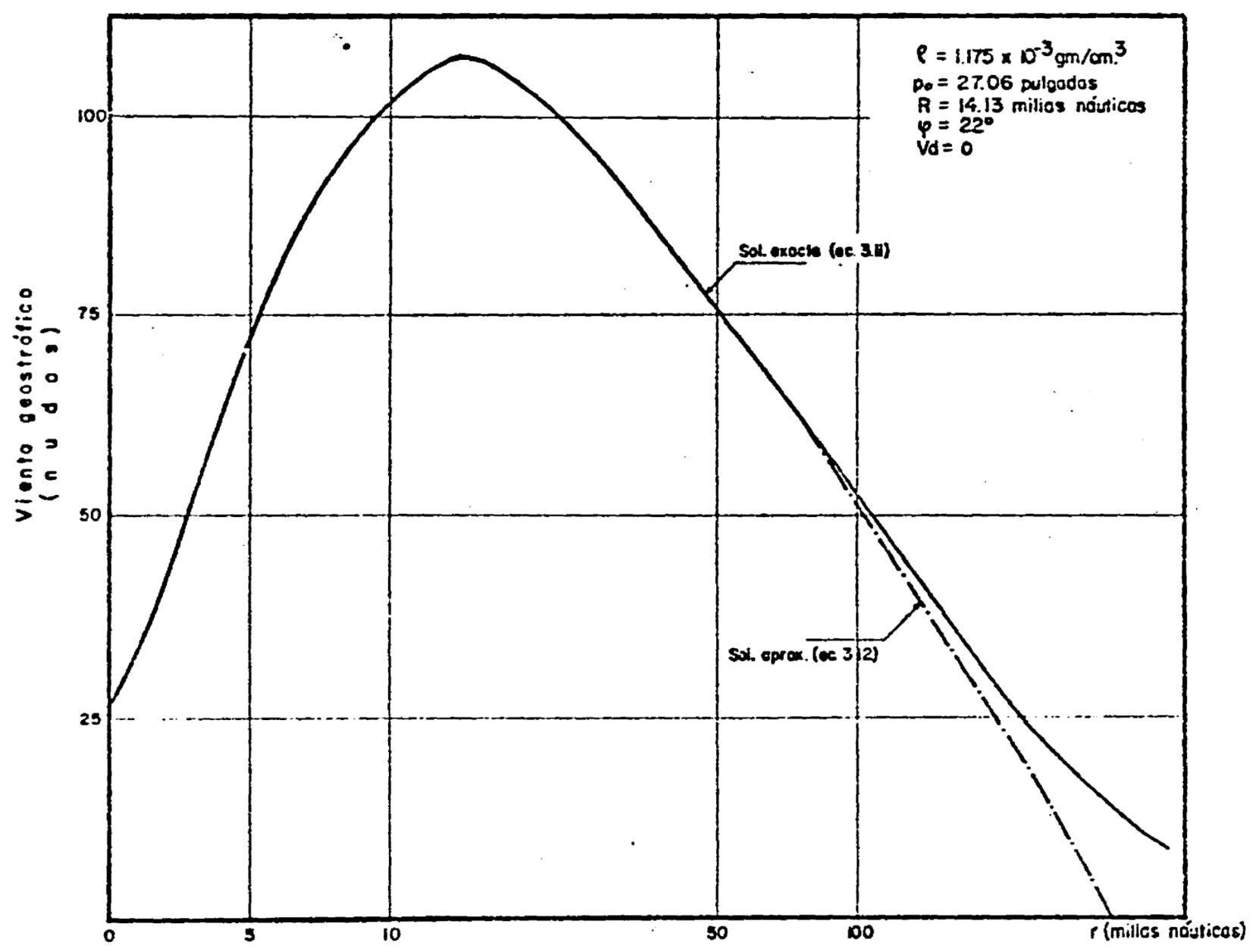


Fig 3.3 Variación de la velocidad del viento geostrófico utilizando la sol. exacta y la sol. aproximada

### 3.4.1 Relación entre el viento gradiente y el viento sobre el agua

Mediciones realizadas durante el paso de los huracanes, permiten conocer la variación del viento gradiente,  $V_g$ , respecto al viento sobre el agua,  $V_o$ ; variación debida a efectos dinámicos y de fricción. En la fig 3.4 se muestran los resultados de las mediciones efectuadas por el US Weather Bureau (Myers, 1954), que implican una disminución en el viento sobre el agua en relación con el viento gradiente conforme se aleja del radio de máximo viento. La relación de  $V_o/V_g$ , medida en el radio de máximo viento,  $R$ , fue de 86.5 por ciento para el huracán de 1949 (curva A); de 99.2 por ciento para el huracán de 1950 (curva B) y de 73.2 por ciento para la media de los cincuenta años (curva C). En ese estudio el US Weather Bureau propone como curva estándar de la variación entre  $V_o$  y  $V_g$  la curva A, por considerarla más confiable y representativa, especialmente si se tiene en cuenta que la curva B fue producida por un huracán asimétrico, y la curva media C se basa en mediciones de diversas estaciones con diferentes alturas de anemómetros e inciertos efectos de fricción.

Graham y Nunn (1959) indican que la velocidad del máximo viento sobre el agua varía entre 75 y 100 por ciento del viento gradiente máximo, y aceptan como representativo y constante para la variación de  $V_o/V_g$  a cualquier distancia  $r$  el valor de 86.5 por ciento, por considerarlo próximo a la media de las fluctuaciones y acorde con la relación máxima obtenida en el huracán de 1949. Bretschneider (1972) usa ese valor para definir un modelo de oleaje debido a huracanes estacionarios adimensionales.

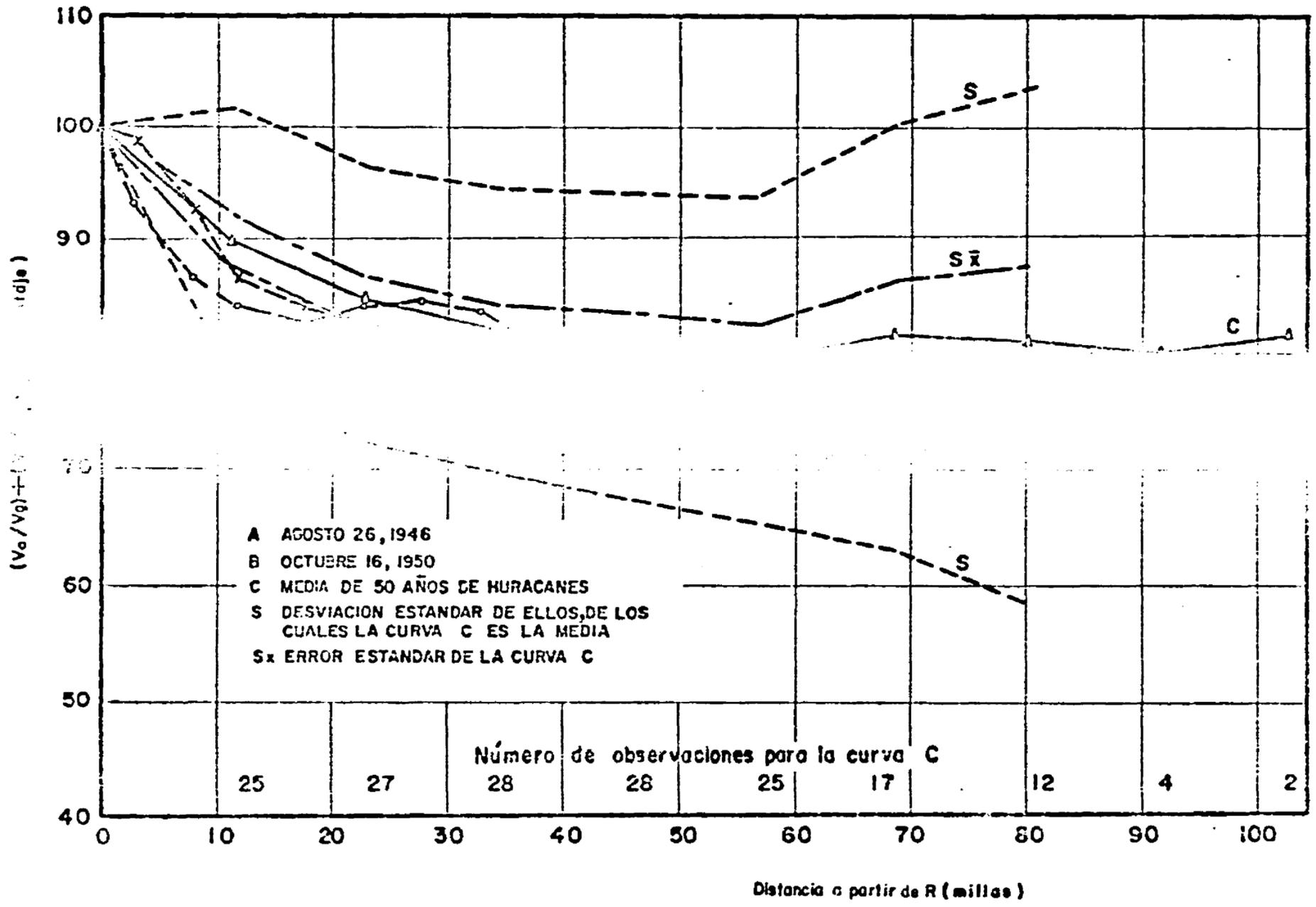


Fig 3.4 Relación de  $V_0/V_g$  con respecto a ese valor en R y a diversas distancias (Myers, 1954)

Del análisis de esta información se deduce que considerar la relación  $v_c/v_g = 0.865$ , es un valor medio coincidente con el estándar propuesto por Myers (1954) para la variación en el radio de máximo viento. Si se acepta que esa variación es constante para cualquier valor de  $r$  (Graham y Munn, 1959), de la fig 3.4 se deduce que se está considerando prácticamente la variación de la máxima desviación estándar de la curva C. Dicha posición permite estar dentro de la seguridad, lo cual, por falta de mayor información, es conveniente para efectos de este estudio.

Por lo anterior, se consideró que la velocidad del viento sobre el agua, para el área en estudio, es de 86.5 por ciento de la velocidad del viento gradiente sin tomar en cuenta efectos de desplazamiento del sistema. De la ec 3.13 se obtiene

(3.15)

$$V_o = 89.95 (29.92 - p_o) \frac{R}{r} e^{-R/r} - 0.230 r \sin \phi + 0.500 v_d \cos \gamma$$

donde  $V_o$  es la velocidad del viento sobre el agua, en nudos. Las otras variables tienen el mismo significado y unidades que las indicadas en la ec 3.13.

Análogamente, para un huracán sin desplazamiento, la máxima velocidad del viento sobre el agua se deduce a partir de la ec 3.14 como

$$V_o \text{ máx} = 54.56 (29.92 - p_o)^{1/2} - 0.23 R \sin \phi \quad (3.16)$$

#### 3.4.2 Dirección del viento sobre el agua

Sin efectos de fricción ni desplazamiento, la dirección del viento se considera paralela a las isobaras. En caso de existir desplazamiento, la dirección del viento se puede referir a las isobaras de acuerdo con la ec 3.9; ajuste que ya fue incluido en las expresiones del viento gradiente y del

viento sobre agua. Debido a los efectos de fricción, la dirección del viento sufre una deflexión hacia el centro del huracán.

Schloemer (1954) proporciona las deflexiones medidas, en diversos huracanes, de la dirección del viento respecto a una perpendicular a un eje radial al centro del huracán y su distancia a este. La información, procesada considerando la distancia en relación al radio de máximo viento, se indica en la tabla 3.1 y en la fig 3.5.

De dichas mediciones se ve que para  $r/R = 1.0$ , el ángulo de deflexión  $\alpha$  varía entre 15 y 35°; para  $r/R \geq 2.0$ , se puede considerar entre los 29 y 40°. Estos valores son diferentes a los considerados por Graham y Num (1959) para definir la dirección de los campos de viento de los huracanes estándar de proyecto, asignando para  $r/R = 1.0$  un valor del ángulo de deflexión  $\alpha$  de 20° y para  $r/R \geq 1.2$  de 25°. De ese estudio, no es posible conocer la razón por la cual consideran los valores anteriores, y tal parece que aceptaron para la deflexión una velocidad nula de desplazamiento del huracán (Bretschneider, 1972).

Por lo anterior, y tratando de encontrar una liga entre las deflexiones medidas y las propuestas, se procedió a valuar la velocidad de desplazamiento media de los huracanes, de los cuales se conoce su deflexión. Esta velocidad, deducida del análisis de las trayectorias de las perturbaciones ciclónicas se indica en el último renglón de la tabla 3.1.

Con esa información adicional, se hizo un ajuste por mínimos cuadrados entre los valores de  $\alpha$  y los correspondientes a la velocidad de desplazamiento  $V_d$ , para  $r/R = 1.0$  y  $r/R = 1.5$ , de cuyo análisis resultó que para  $r/R = 1.0$ , el coeficiente de correlación es muy bajo (0.47), el cual se incrementa (0.67) si en el análisis no se consideran los valores de la deflexión que

permanecieron constantes en esa zona (huracanes de 1926 y 1935). Así, para  $r/R = 1.0$  se encontró que

$$\alpha = 9 + 1.2 V_d \quad (3.17)$$

donde  $\alpha$  es la deflexión, en grados, y  $V_d$  la velocidad de desplazamiento del huracán, en nudos.

Para  $r/R \geq 1.5$  el coeficiente de correlación, entre las deflexiones medias y las velocidades de desplazamiento se incrementó a 0.76, y la relación encontrada fue

$$\alpha = 26 + 0.8 V_d \quad (3.18)$$

con las mismas unidades de la ec 3.17.

En la fig 3.6 se muestran en forma gráfica las ecs 3.17 y 3.18, en relación con los valores usados para su obtención. Si se analizan estas fórmulas y se considera una velocidad de desplazamiento nula, la deflexión obtenida en el caso de la 3.17 es menor que la propuesta por Graham y Nunn (1959); en cambio, el valor obtenido en la 3.18 coincide.

Por lo anterior, y con base en la información disponible y al análisis realizado, se consideraron para este estudio las ecs 3.17 y 3.18, representativas de la ley de variación de la deflexión que sufre la dirección del viento sobre el agua, respecto a una perpendicular al eje radial centro del huracán, para el rango de velocidades de desplazamiento analizadas.

TABLA 3.1 VALORES MEDIDOS EN DIVERSOS HURACANES, DEL ANGULO DE DEFLEXION DE LA DIRECCION DEL VIENTO, EN RELACION CCN LA DISTANCIA AL CENTRO DEL MISMO Y A SU VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (DATOS PROCESADOS DE LAS FIGS 3 a 8 y 12 a 14 DEL ARTICULO DE SCHLOEMER, 1954)

r/R	Oct 17-18 1950 $\alpha$	Ago 26-27 1949 $\alpha$	Oct 5 1948 $\alpha$	Sep 21-22 1948 $\alpha$	Sep 17 1947 $\alpha$	Sep 15-16 1945 $\alpha$	Sep 2-3 1935 $\alpha$	Sep 16-17 1928 $\alpha$	Sep 18 1926 $\alpha$	$\bar{\alpha}$
0.25	-	0.4	-	-	1	-	-	4	-	
0.50	5	7.5	8	-	7.5	-	35	15	35	16.14
0.75	10	20	18	13.5	15	5	35	25	35	18.50
1.00	15	28	25	22	20.5	15	35	32	35	25.26
1.25	19.5	34.5	30	27	25.5	23	35	35.7	35	29.47
1.50	23.8	38	33.8	30.7	29	29	35	38	35	32.46
1.75	26	39.5	35.2	33	31	32.5	35	38.5	35	33.97
2.0	27.5	40	36	35	32	34.5	35	39	35	34.89
2.5	29	40	36	37.2	34.5	36	35	39	35	35.74
3.0	29.6	40	36	38.2	35	36	35	39	35	35.93
3.5	29.6	40	36	39	35	36	35	39	35	36.07
4.0	29.6	40	36	39.8	35	36	35	39	35	36.16
$r/R \geq 1.5$	28.1	39.7	35.7	36.2	33.3	34.6	35	38.8	35	35.20
$V_d$ (nudos)	7.7	15.8	16.5	8.0	8.5	10.1	9	12.9	14.2	11.40

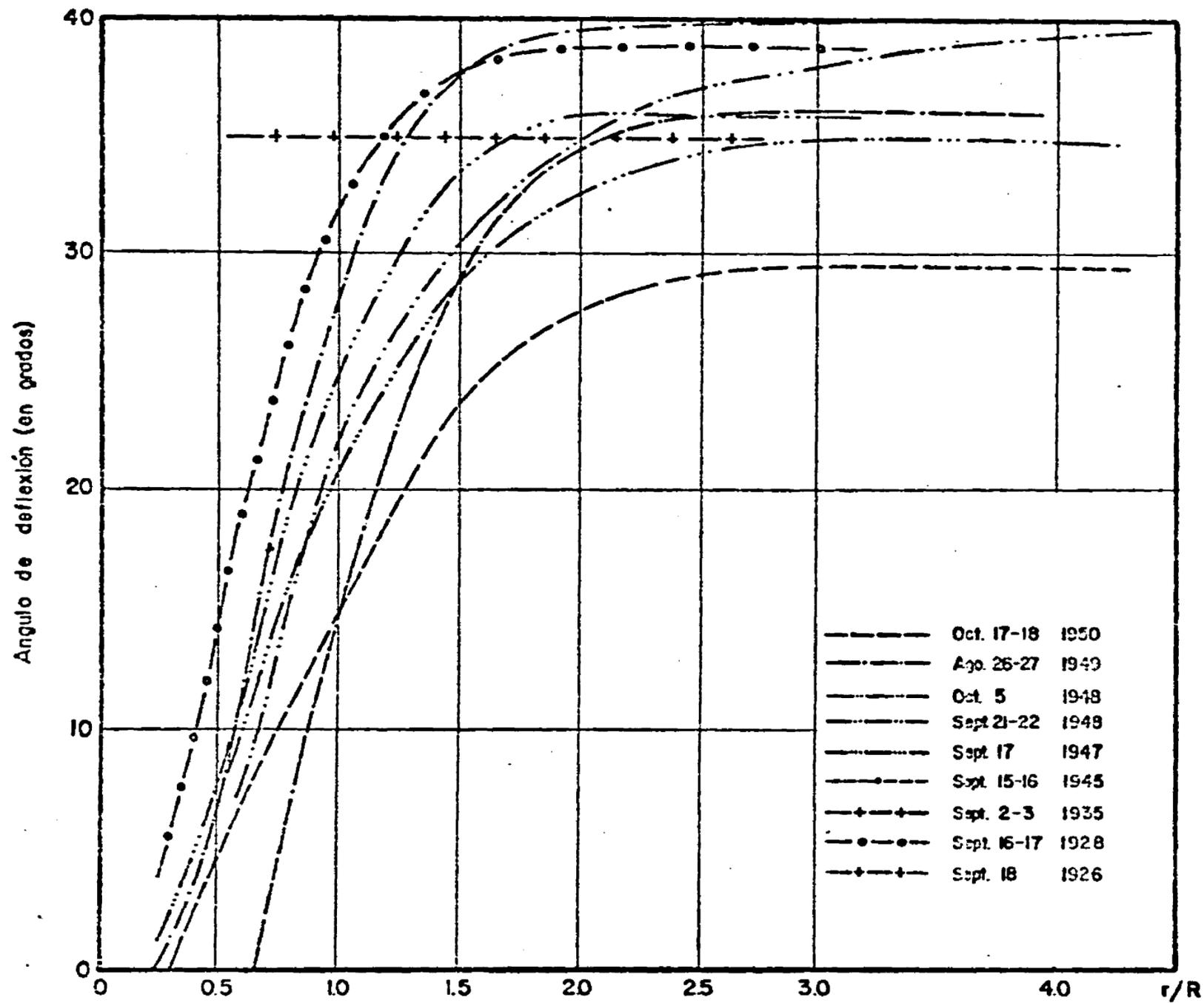


Fig 3.5 Angulos medidos de deflexión de la dirección del viento para diversos huracanes (Tabla 3.1)

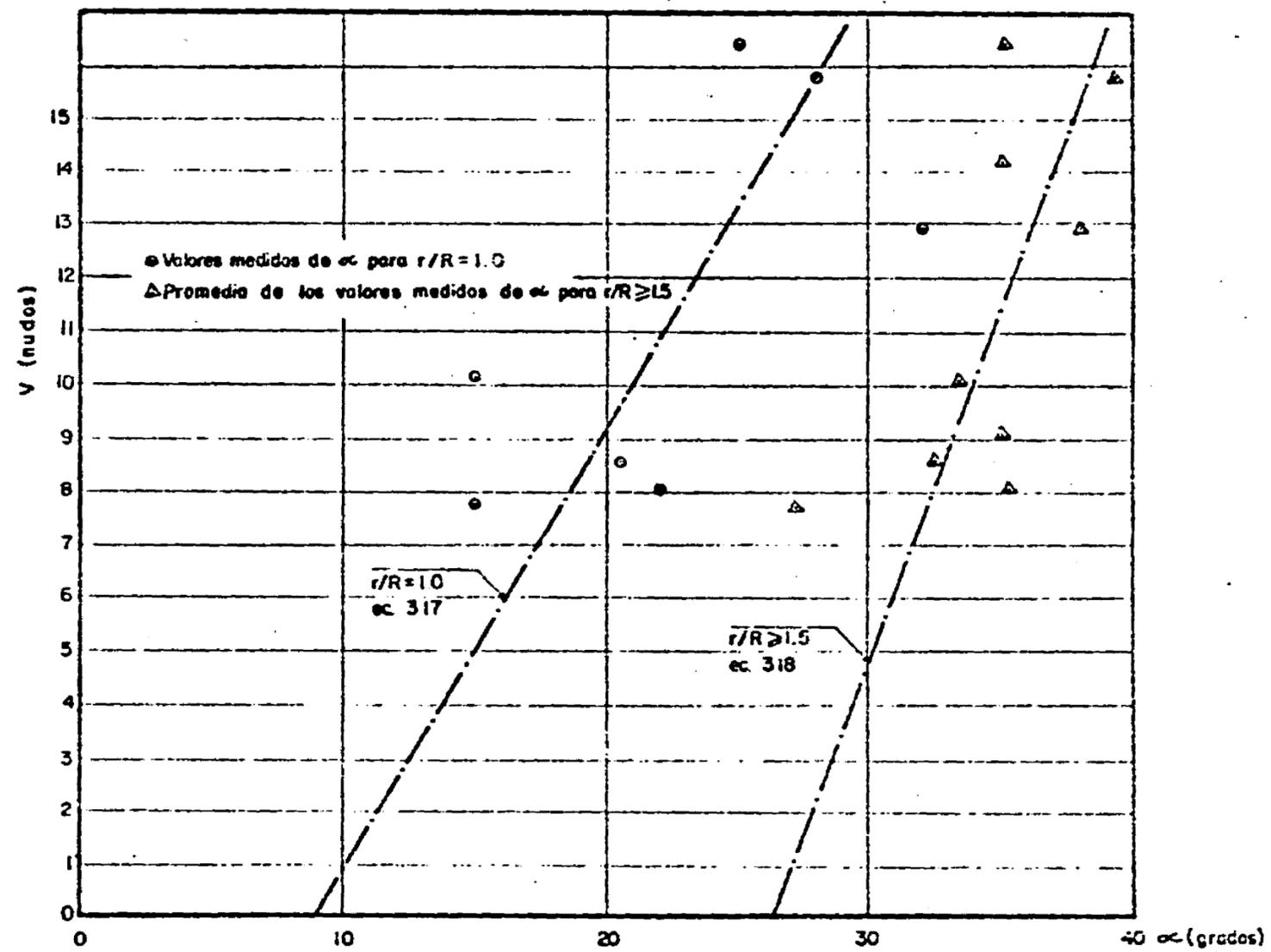


Fig 5.6 Tendencia de los ángulos de deflexión de la dirección del viento en función de  $r/R$  y de la velocidad de desplazamiento del huracán

### Construcción de los campos de viento

Partir de las características de los huracanes determinadas en el capítulo anterior, es posible de acuerdo con las ecs 3.15, 3.17 y 3.18, definir campos de viento para cualquier zona del área en estudio. Con fines de comparación se dedujo el campo de viento producido por el huracán estándar proyectado, para una latitud de 22° norte.

Del proceso descrito en el inciso 2.7, las características correspondientes a ese huracán son:

$$P_o = 27.06 \text{ pulg de mercurio}$$

$$R_{\text{mín}} = 9.17 \text{ mn}, R_{\text{med}} = 14.13 \text{ mn}, R_{\text{máx}} = 19.09 \text{ mn}$$

$$V_{d,\text{mín}} = 4 \text{ nudos}, V_{d,\text{med}} = 9.2 \text{ nudos}, V_{d,\text{máx}} = 14 \text{ nudos}$$

Dirección de desplazamiento: E

Para ver la influencia de cada una de las características del huracán en el campo de viento resultante, se consideró primero el caso de que la perturbación no tenga desplazamiento ( $V_d = 0$ ). En este caso, el campo de viento resultante es simétrico respecto al centro del huracán, y la variación del mismo se obtiene de la ec 3.15, como

$$V_o = 175.87 \left( \frac{R}{r} e^{-R/r} \right)^{1/2} - 0.098 r \quad (3.19)$$

En la tabla 3.2 se indican los valores obtenidos de  $V_o$  para diversos valores de  $r = R$ , para los tres radios de máximo viento mencionados. La variación gráfica de dichos valores se muestra en la fig 3.7.

TABLA 3.2 DISTRIBUCIONES DE  $V_0$  (millas/hora) RESPECTO A  $r$  (mm), PARA EL HURACAN ESTANDAR DE PROYECTO EN LA LATITUD DE  $22^\circ$  N, CONSIDERANDO DIVERSOS VALORES EN  $R$  (mm) y  $V_d = 0$

r/R	$V_c$	r	$V_0$	r	$V_0$	r	$V_0$
		R = 9.17		R = 14.13		R = 19.09	
1	122.84	9.17	105.36	14.13	104.87	19.09	104.39
2	111.53	18.34	94.68	28.26	93.71	38.18	92.74
3	98.98	27.51	82.93	42.39	81.47	57.27	80.01
4	89.37	36.68	73.72	56.52	71.77	76.36	69.83
5	81.95	45.85	66.40	70.65	63.97	95.45	61.55
6	76.07	55.02	60.42	84.78	57.50	114.54	54.59
7	71.27	64.19	55.37	98.91	51.97	133.63	48.57
8	67.27	73.36	51.01	113.04	47.13	152.72	43.24
9	63.86	82.53	47.16	127.17	42.79	171.81	38.43
10	60.92	91.70	43.72	141.30	38.87	190.90	34.01
11	58.35	100.87	40.60	155.43	35.26	209.99	29.92
12	56.08	110.04	37.74	169.56	31.92	229.03	26.09
13	54.05	119.21	35.09	183.69	28.78	248.17	22.47
14	52.23	128.38	32.62	197.82	25.82	267.26	19.02
15	50.58	137.55	30.29	211.95	23.01	286.35	15.73
16	49.07	146.72	28.09	226.08	20.32	305.44	12.56
17	47.70	155.82	26.00	240.21	17.75	324.53	9.50
18	46.43	165.06	24.01	254.34	15.27	343.62	6.54
19	45.26	174.23	22.10	268.47	12.88	362.71	3.66
20	44.17	183.40	20.26	282.60	10.55	381.80	0.84
21	43.16	192.57	18.49	296.73	8.30	400.89	
22	42.21	201.74	16.77	310.86	6.09	419.98	
$V_0=20$			20.15-184.75		16.12-227.84		13.72-261.81

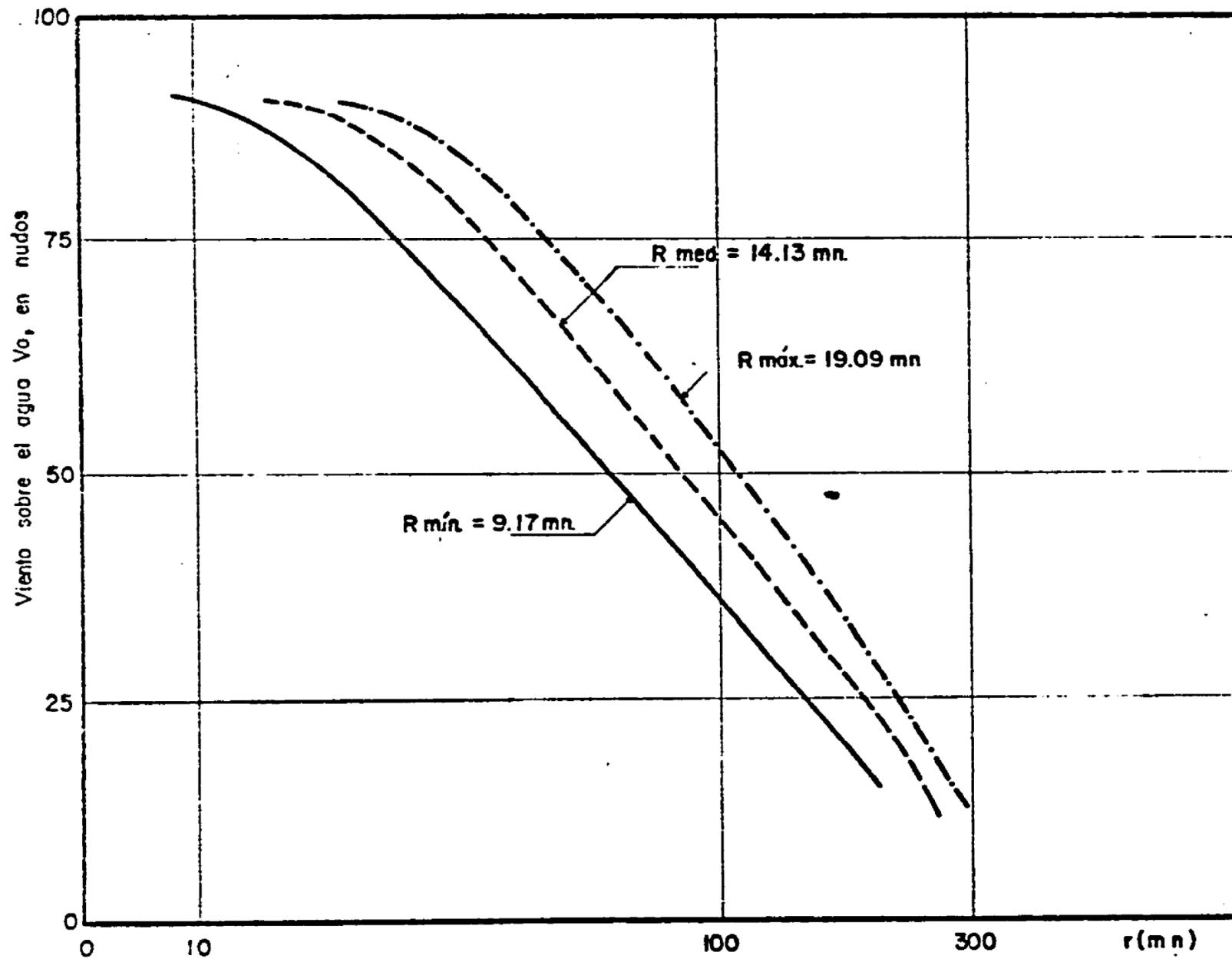


Fig 3.7 Distribución de velocidades sobre el agua,  $V_0$ , respecto a una distancia radial  $r$  al centro del huracán, considerando  $V_d$  nula y diferentes valores de  $R$ , para el huracán estándar de proyecto en la latitud de  $22^\circ\text{N}$

La dirección del viento, teniendo en cuenta las ecs 3.17 y 3.18, es de  $9^\circ$  para  $r/R = 1.0$  y de  $26^\circ$  para  $r/R \geq 1.5$ , respecto a una perpendicular a su eje radial. En la fig 3.8 se presenta el campo de viento resultante, así como las direcciones respectivas del huracán en consideración, con un radio medio de máximo viento.

Si la perturbación ciclónica tiene cierta velocidad de desplazamiento,  $V_d$ , el campo de velocidades sufre una distorsión, incrementando su valor en el sector derecho, respecto a la dirección desplazamiento, y disminuyéndolo en el sector izquierdo, así como un aumento en la deflexión de la dirección.

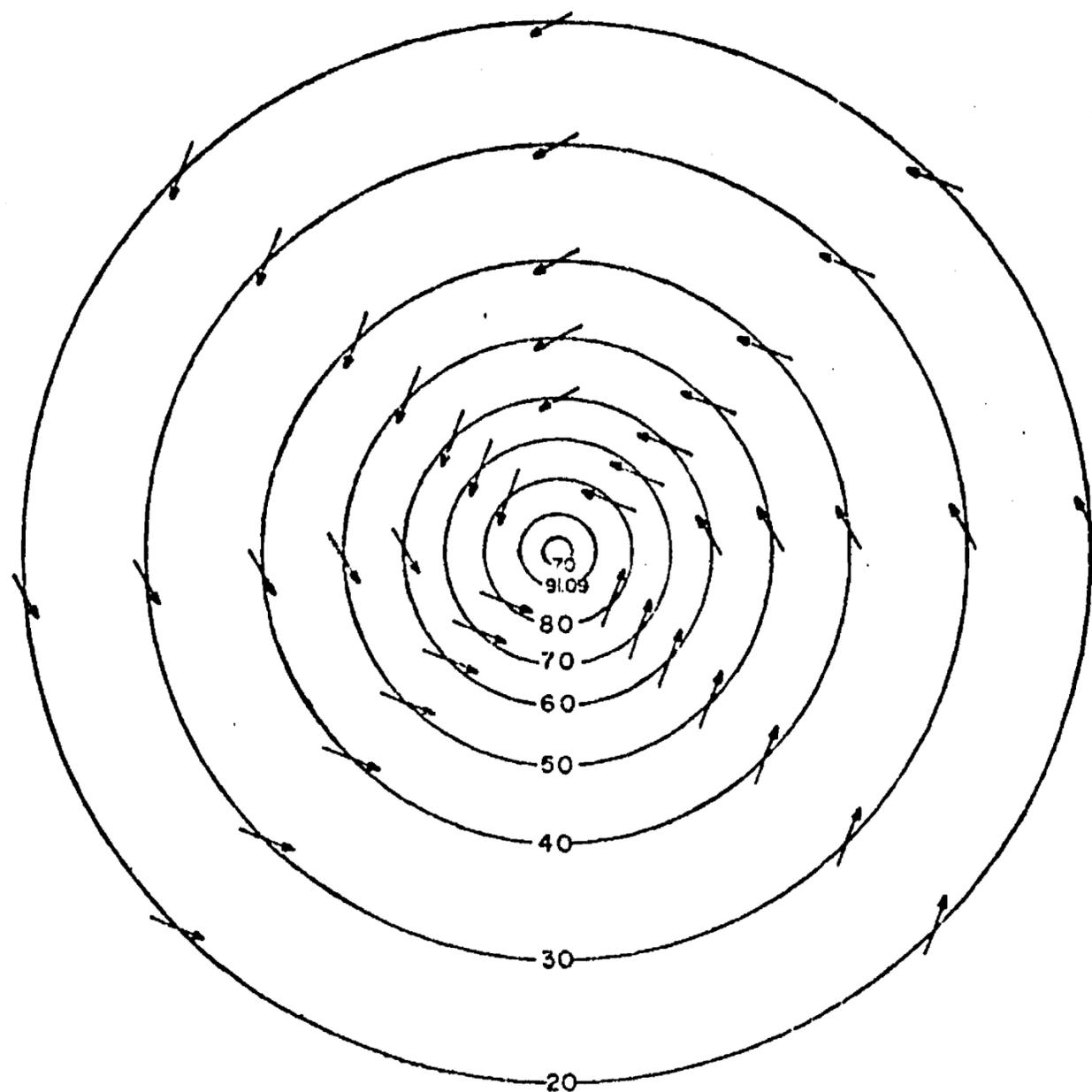
De acuerdo con las ecs 3.15 y 3.19, el efecto de la velocidad de desplazamiento se cuantifica conforme a:

$$V_o = V_o \text{ (ec 3.19) } - 0.500V_d \cos \gamma \quad (3.20)$$

Se deduce de la ecuación anterior que  $V_d$  no influye en los valores de  $V_o$  que se encuentran en el eje que tiene un ángulo igual al de la deflexión del viento, respecto a la dirección del desplazamiento, medido en el sentido de las manecillas del reloj. Análogamente, perpendicular a ese eje se tendrá el eje de simetría del campo de viento, respecto a los valores de  $V_o$ . Sobre el eje de simetría se tendrá el máximo efecto de  $V_d$  a la derecha del movimiento de desplazamiento, y el mínimo a la izquierda.

Lo anterior se ilustra en la fig 3.9, en la que aparece la distorsión que sufre el campo de viento de la fig 3.8, con una velocidad de desplazamiento de

14 nudos. En este caso, de acuerdo con las ecs 3.17 y 3.18, la deflexión de la dirección del viento es de  $17^\circ$  para  $r/R = 1.0$  y de  $37^\circ$  para  $r/R \geq 1.5$ . En la fig 3.10 se indican las distribuciones de velocidades (sin tener en cuenta sus proyecciones) del eje de simetría y del eje con efecto nulo del campo de viento de la fig 3.9.



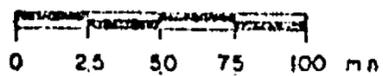
Características del huracán.

$P_0 = 27.06$  pulgadas

$R = 14.13$  mn

$V_d = 0$

ESCALA



$V_u$  en nudos.

1 milla/hora = 0.868357 nudos.

Fig 3.8 Campo de viento a 10 m sobre el agua, producido por el huracán estándar de proyecto para una latitud de  $22^\circ N$

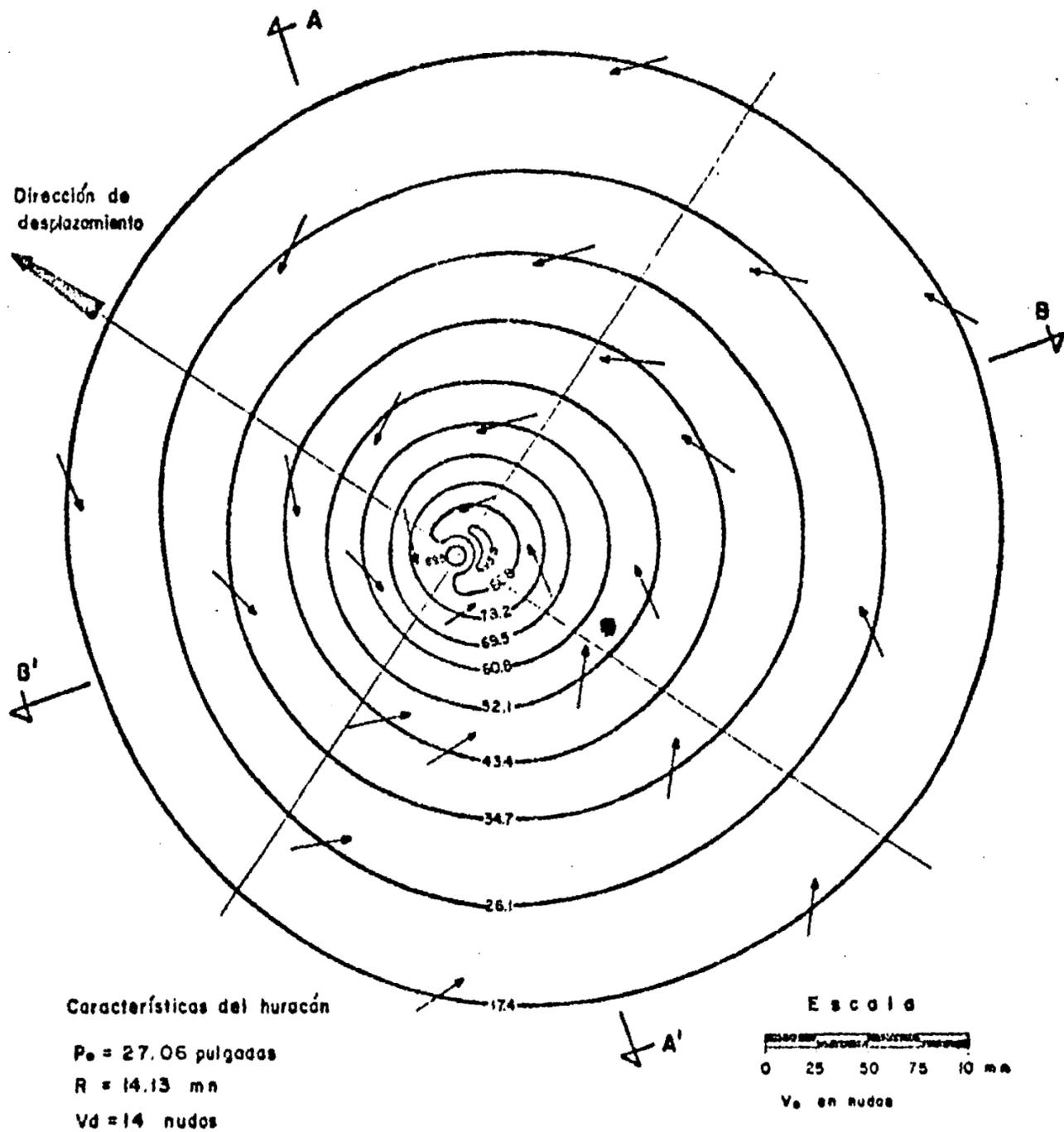


Fig 3.9 Campo de viento a 10 m sobre el agua, producido por el huracán estándar de proyecto para una latitud de  $22^\circ$  N

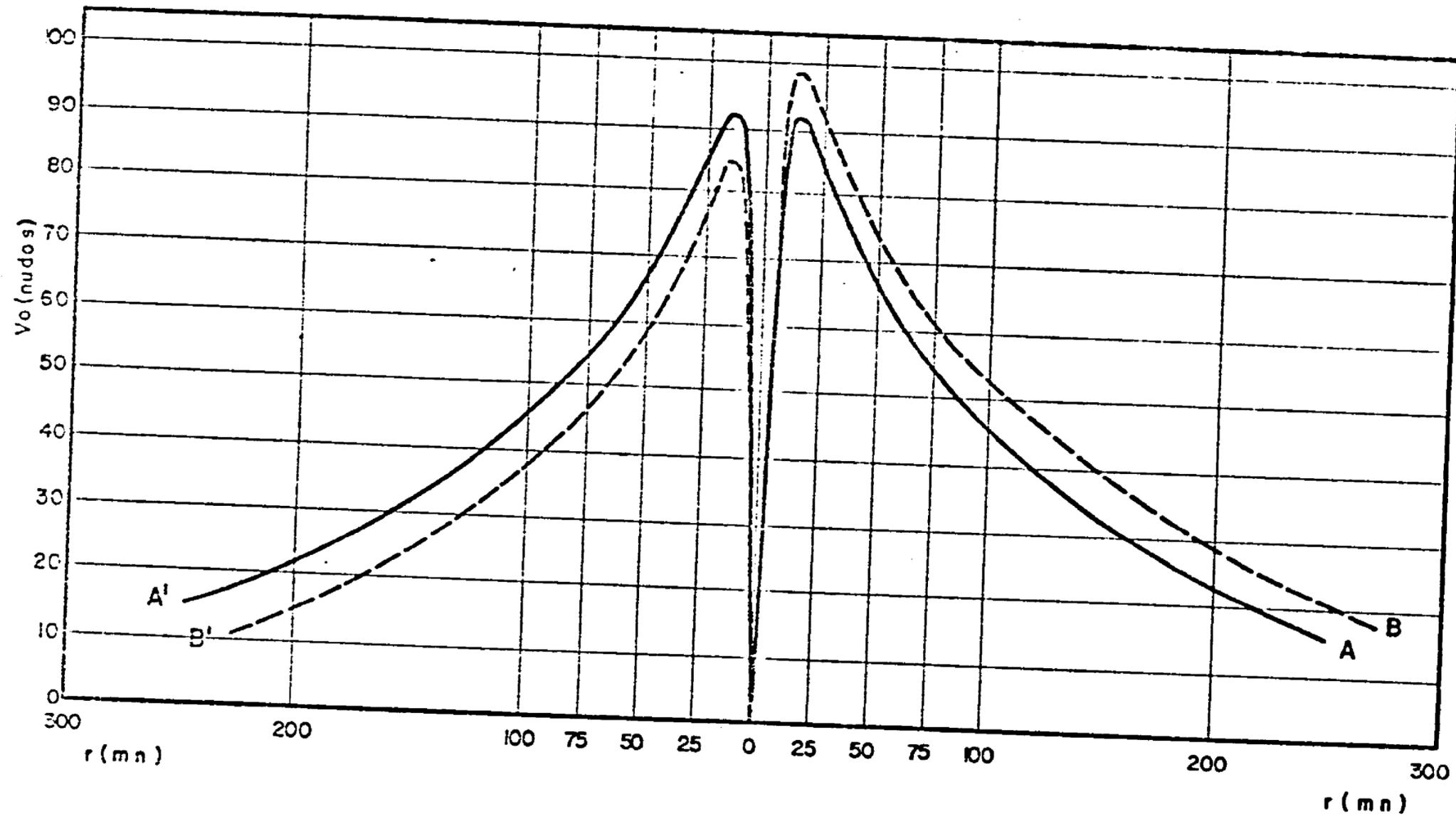


Fig 3.10 Distribución de velocidades del campo de viento de la fig 3.9, a través de dos ejes radiales

**FALTA PAGINA**

No. *72*

## 4. OLEAJE GENERADO POR VIENTO

### 4.1 Antecedentes

A partir de los caps 2 y 3, y con base en ellos es factible definir las características de los huracanes que se pueden tener en el área en estudio, así como sus campos de vientos correspondientes. En este capítulo se analizan los criterios para la obtención del oleaje producido por un huracán, a partir del conocimiento de las relaciones existentes entre las características de su campo de viento y las del oleaje generado por él.

A la fecha, los métodos para conocer el oleaje que una perturbación ciclónica genera, son los propuestos originalmente por Wilson (1955) y por Bretschneider (1957b). El primero, aplicado por Wilson (1957) para el análisis estadístico del oleaje en el golfo de México frente a las costas de Estados Unidos, y el segundo, revisado y ampliado por Bretschneider (1972), para determinar las características del oleaje significante de los huracanes estándar de proyecto en las costas norteamericanas.

Ambos métodos se basan en el criterio de la ola significante, para la generación del oleaje en aguas profundas introducido por Svedrup y Munk (1947), y revisado y ampliado por Bretschneider (1952, 1958b, 1970).

Previo al planteamiento de los criterios mencionados, y a fin de conocer las teorías en las cuales se apoyan, en este capítulo se revisan los conceptos básicos de la teoría del oleaje, y posteriormente se analiza la compleja naturaleza de esta, así como la forma de filtrarla para su interpretación a partir del espectro del oleaje y las distribuciones de probabilidades de sus características. Finalmente, se estudia la generación del oleaje debida al viento y los criterios para la obtención de este al paso de un huracán.

#### 4.2 Consideraciones básicas de la teoría lineal del oleaje

##### 4.2.1 Oleaje armónico simple de pequeña amplitud\*

El desplazamiento de la superficie libre del agua, considerando un oleaje armónico simple de pequeña amplitud, puede expresarse:

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \sigma t) \quad (4.1)$$

donde  $\eta(x, t)$  es la variación de la superficie libre de un oleaje senoidal, función de la posición  $x$  y del tiempo  $t$ , y  $a$  es la amplitud de la ola moviéndose en la dirección positiva del eje  $x$  con velocidad

$$c = \frac{\sigma}{k} \quad \text{con } \sigma = \frac{2\pi}{T} \quad \text{y} \quad k = \frac{2\pi}{L}$$

siendo  $\sigma$  la frecuencia angular,  $T$  el periodo de la ola,  $k$  el número de la ola y  $L$  su longitud (fig 4.1).

\* Para deducciones y discusiones de las ecuaciones, véase Kinsman (1965).

La condición dinámica de la superficie libre está considerada por la ecuación

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z = \eta} \quad (4.2)$$

la cual se obtiene de la linealidad de la ecuación de Bernoulli, aceptando constantes la presión en la superficie libre, la densidad y la profundidad, y nula la tensión superficial. La función  $\phi$  es el potencial de velocidades, que satisface la ecuación de Laplace al considerar el flujo incompresible e irrotacional, y  $g$  la aceleración de la gravedad.

El potencial de velocidades  $\phi$ , asociado al desplazamiento superficial descrito por la ec 4.1, es

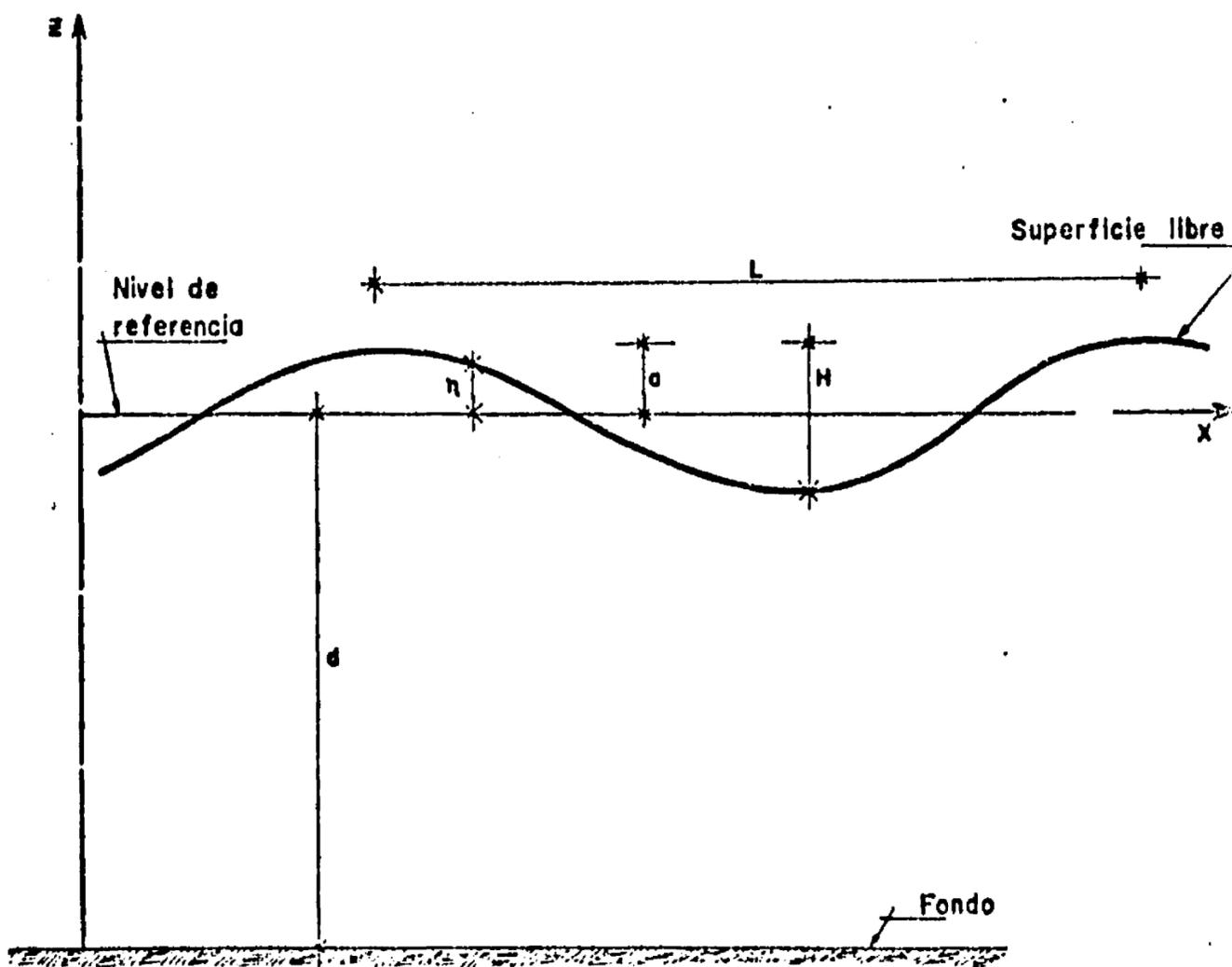
$$\phi = - C a \frac{\cosh k(z + d)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) + Cte \quad (4.3)$$

donde  $d$  es la profundidad del agua, referida al nivel medio de las fluctuaciones de la superficie libre del agua y  $z$  un eje perpendicular a estas (fig 4.1).

De las ecs 4.2 y 4.3 considerando que  $z = \eta$ , que el oleaje es de pequeña amplitud ( $k \eta \ll 1$ ) y que  $H/d \ll 1$ , donde  $H$  es la altura de la ola igual a dos veces su amplitud, se obtiene

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \quad (4.4)$$

que define la velocidad de fase o celeridad de la ola.



- $\eta$  = variación de los desplazamientos de la ola
- $a$  = amplitud de la ola
- $H$  = altura de la ola ( $H = 2a$ )
- $L$  = longitud de la ola
- $T$  = período de la ola
- $C$  = celeridad de la ola ( $C = L / T$ )
- $d$  = profundidad

Fig 4.1 Variación de una ola senoidal para un tiempo fijo

#### 4.2.2 Aproximaciones para aguas profundas y medias

En la teoría del oleaje, los términos usados para clasificar las aguas profundas, intermedias y bajas están ligados a los valores de la relación  $d/L$  (tirante relativo), gobernados por aproximaciones de funciones hiperbólicas.

Como  $k = 2\pi/L$ , la ec 4.4 se transforma en

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh 2\pi \frac{d}{L} \quad (5)$$

Para aguas profundas  $d/L$  es muy grande, por lo que la ecuación anterior se puede escribir como

$$c^2 = \frac{g}{k} = \frac{gL}{2\pi} \quad (6)$$

Si se considera que el periodo de la ola  $T$  es independiente de la profundidad del agua, la relación  $c = L/T$  se conserva en cualquier profundidad, y la ec 4.6 se transforma en

$$c = \frac{gL}{2\pi} = \frac{g}{\sigma} \quad (7)$$

De las ecs 4.6 y 4.7 se puede conocer la relación constante entre la frecuencia del oleaje y el número de la ola para aguas profundas, lo

$$\sigma = (gk)^{1/2} \quad (4.8)$$

Análogamente, para aguas bajas  $d/L$  es pequeña, por lo que la ec 4.5 toma la forma

$$c^2 = \frac{g}{k} 2\pi \frac{d}{L} = gd \quad (4.9)$$

Si se toman en cuenta las ecs 4.5 y 4.6, para aguas profundas, resulta que  $d \geq L/2$ . Para aguas bajas es usual considerar que  $d \geq L/25$ . De acuerdo con Kinsman (1965), si se considera el grado de aproximación usado al acotar las aguas profundas similar al definir las aguas bajas, se debe usar  $d = L/200$ , variación lógica si se tiene en mente que el acotamiento para definir aguas bajas o aguas profundas, se basa en las aproximaciones de las funciones hiperbólicas y en la longitud de las olas sobre la superficie del agua.

#### 4.2.3 Energía de un oleaje senoidal

La energía de una ola es igual al trabajo necesario para cambiar la superficie horizontal del mar en el perfil de la ola. La energía potencial me dia en un área unitaria superficial se puede expresar como

$$E_p = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{1}{2} \rho g \eta^2 dx$$

que de acuerdo con la ec 4.1, se transforma en

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g a^2 = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (4.10)$$



DEPTO. DE FÍSICA

aceleración de la gravedad

altura de la ola

densidad del agua

La energía cinética media por unidad de área es igual a la energía potencial media, ya que se está considerando un sistema dinámico conservativo para pequeñas oscilaciones, Así,

$$E_c = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (4.11)$$

La energía total media por unidad de área se obtiene, de acuerdo con las ecuaciones 4.10 y 4.11, como

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4.12)$$

Trasmisión de la energía

La transmisión de la energía de un tren de oleaje uniforme se puede valorar mediante la ecuación

$$T_e = C_g E \quad (4.13)$$

$T_e$  es la cantidad de trasmisión de energía por ancho unitario y  $C_g$  representa la velocidad con la cual es propagada la energía total media, la cual se conoce como la velocidad de grupo del oleaje.

La relación entre la velocidad de grupo del oleaje,  $c_g$ , y la velocidad de transmisión de fase de la ola,  $c$ , es

$$c_g = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) c \quad (4.14)$$

la cual, para aguas profundas se aproxima a

$$c_g = 1/2 c \quad (4.15)$$

y para aguas bajas a

$$c_g = c \quad (4.16)$$

### 4.3 La compleja naturaleza del oleaje

#### 4.3.1 Espectro del oleaje\*

La solución del oleaje de pequeña amplitud indicada en el inciso anterior, se logra por la linearización tanto de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento, como de sus condiciones de frontera. Aunque obviamente no se está en contacto con la naturaleza real del oleaje, la teoría permite, al ser aplicada a un problema lineal, obtener otras soluciones, mediante el principio de superposición.

\*Para deducciones y discusiones de las ecuaciones, véase Kinsman (1965), cap

Esta idea se emplea, para considerar que el oleaje del océano se puede aproximar a una suma de olas senoidales, con aleatorios números de olas y frecuencias. De acuerdo con esto, el desplazamiento superficial del océano se puede expresar, en tres dimensiones, como

$$\eta(\underline{x}, t) = \int \int_{\underline{k}} \int_{\sigma} B(\underline{k}, \sigma) e^{i(\underline{k} \cdot \underline{x} - \sigma t)} d\underline{k} d\sigma \quad (4.17)$$

siendo la integración  $\underline{k}$  sobre todo el espacio de los números de ola ( $\underline{k}$  es el vector de los números de ola) y la integración  $\sigma$  sobre todas las frecuencias.  $\eta(\underline{x}, t)$  es el desplazamiento de la superficie del mar, función de su posición ( $\underline{x}$  es el vector de posición) y tiempo.

$B(\underline{k}, \sigma)$  se conoce como el espectro de amplitudes del oleaje y está relacionado con los desplazamientos, de acuerdo con la transformada generalizada de Fourier, lo cual se expresa como

$$B(\underline{k}, \sigma) = (2\pi)^{-3} \int \int_{\underline{x}} \int_t \eta(\underline{x}, t) e^{-i(\underline{k} \cdot \underline{x} - \sigma t)} d\underline{x} dt \quad (4.18)$$

cuya integración es sobre todo el espacio coordenado y a través de todo el tiempo.

Como la superficie del mar,  $\eta$ , ec 4.17, se integra sobre todo el espacio de los números de ola y frecuencias, su configuración no se afecta si  $\underline{x}$  se desplaza  $\underline{r}$  y  $t$  en  $\tau$ . Así, de la ec 4.17 es factible obtener  $\eta(\underline{x} + \underline{r}, t + \tau)$ , cuyo espectro de frecuencia se puede expresar como  $B'(\underline{k}, \sigma')$ . Si se multiplican ambas funciones de desplazamiento y se toma la media, se obtiene la función de covariancia para la superficie del mar, que se expresa:

$$Z(\underline{x}, \underline{r}; t, \tau) = \overline{\eta(\underline{x}, t) \eta(\underline{x} + \underline{r}, t + \tau)} \quad (4.19)$$

Si se define como  $\phi(\underline{k}, \sigma; \underline{x}, t)$  la transformada generalizada de Fourier del producto medio  $B'B$ , de acuerdo con las ecs 4.17 y 4.19, la función de covariancia (ec 4.19) se puede escribir

$$Z(\underline{x}, \underline{r}; t, \tau) = \int_{\underline{k}} \int_{\sigma} \phi(\underline{k}, \sigma; \underline{x}, t) e^{i(\underline{k} \cdot \underline{r} - \sigma\tau)} d\underline{k} d\sigma \quad (4.20)$$

cuya inversa es

$$\phi(\underline{k}, \sigma; \underline{x}, t) = (2\pi)^{-3} \int_{\underline{r}} \int_{\tau} Z(\underline{x}, \underline{r}; t, \tau) e^{-i(\underline{k} \cdot \underline{r} - \sigma\tau)} d\underline{r} d\tau \quad (4.21)$$

La función  $\phi$  de las ecs 4.20 y 4.21 es el espectro de potencias en tres dimensiones de los desplazamientos de la superficie del mar, y es la transformada generalizada de Fourier de la función de covariancia, dependiente de los vectores de posición y número de ola, así como de los escalares tiempo y frecuencia. Si el mar se considera como un proceso aleatorio ya sea estacionario, homogéneo o ambos, algunas de las variables se eliminan

Una de las más interesantes interpretaciones del espectro tridimensional de los desplazamientos de la superficie marina, es la de considerarla como un espectro de energía potencial. Si se considera  $\underline{r} = 0$  y  $\tau = 0$ , la función de covariancia (ec 4.19) se transforma en

$$z(\underline{x}, 0; t, 0) = \overline{\eta(\underline{x}, t) \eta(\underline{x} + 0, t + 0)} = \overline{\eta^2(\underline{x}, t)} \quad (4.22)$$

que es la media del desplazamiento al cuadrado, de la superficie del mar. Teniendo en cuenta esto, en la ec 4.20 al multiplicarla por  $1/2 \rho g$ , se obtiene

$$\frac{1}{2} \rho g \overline{\eta^2} = \frac{1}{2} \rho g \int_k \int_\sigma \phi(\underline{k}, r; \underline{x}, t) d\underline{k} d\sigma \quad (4.23)$$

donde la cantidad de la izquierda es la energía potencial media del campo del oleaje (inciso 4.2.5).

#### 4.3.2 Especificaciones de un campo de oleaje

La configuración del oleaje marino varía de manera irregular tanto en espacio como en tiempo, por lo que se considera un proceso aleatorio. Debido a las limitaciones que se tienen para hacer observaciones de este proceso, a fin de utilizar los registros que se obtienen de las observaciones de los desplazamientos de la superficie del mar, se acepta a priori, que estos son típicos del fenómeno, y que los cálculos estadísticos realizados en ellos permiten definir una guía de las leyes que gobiernan el oleaje marino.

Lo anterior implica aceptar que el proceso es homogéneo, estacionario o ambos. Así, el espectro de oleaje que se puede inferir de las observaciones, se halla ligado a las limitaciones de estas. A continuación se indican las formas con las que se ha logrado obtener el espectro de oleaje, y las consideraciones realizadas en las observaciones.

## 4.3.2.1 Observaciones simultáneas en diferentes puntos

Si se realizan observaciones simultáneas de los desplazamientos de la superficie del mar en diferentes puntos espaciales, es decir, si se considera que el mar es homogéneo,  $\underline{x} = 0$ . Con las ecuaciones 4.19 y 4.20 se tiene que:

$$z(\underline{r}; t) = \overline{\eta(\underline{x}; t) \eta(\underline{x} + \underline{r}; t)} = \int_{\underline{k}} \int_{\sigma} \phi(\underline{k}, \sigma; t) e^{i\underline{k} \cdot \underline{r}} d\sigma = \int_{\underline{k}} \phi(\underline{k}; t) d\sigma \quad (4.24)$$

donde

$$\phi(\underline{k}; t) = \int_{\sigma} \phi(\underline{k}, \sigma; t) d\sigma \quad (4.25)$$

es el espectro del número de la ola en dos dimensiones. Representa la contribución de la energía del oleaje, recibida por los componentes del oleaje con números de onda  $\underline{k}$  y las frecuencias  $\sigma$ , las cuales pueden asociarse con los modos de ola.

La inversa de la ec 4.25, se escribe como

$$\phi(\underline{k}, t) = (2\pi)^{-2} \int_{\underline{r}} \overline{\eta(\underline{x}; t) \eta(\underline{x} + \underline{r}; t)} e^{-i\underline{k} \cdot \underline{r}} d\underline{r} \quad (4.26)$$

mentos de la superficie del mar  $\eta = 0$ ; además, en otros aspectos, de las

además proporcionada por  $\bar{\eta}^2$ , dependiente de los modos de ola.

resión y evaluar el espectro del número de la ola, a partir del conocimiento de la variancia de los desplazamientos de la superficie del mar, obtenidos de registros simultáneos en diferentes puntos.

#### 4.3.2.2 Observaciones en un punto fijo

Si se hacen observaciones de los desplazamientos de la superficie marina en un punto fijo, y si se considera que el proceso es estacionario, resulta que, de las ecs 4.19 y 4.20, se tiene

$$Z(\underline{x}; \tau) = \overline{Z(\underline{x}; \tau + \tau, \underline{x})} = \int_{\underline{k}} \int_{\sigma} \phi(\underline{k}, \sigma) e^{-i\sigma\tau} d\underline{k} d\sigma$$

$$) = \int_{\sigma} \phi(\sigma) e^{i\sigma\tau} d\sigma \quad (4.27)$$

donde

$$= \int_{\underline{k}} \phi(\underline{k}, \sigma) d\underline{k} \quad (4.28)$$

es el espectro de frecuencias en una dimensión, que además permite conocer el aporte de energía del oleaje debido a cada frecuencia  $\sigma$ , independiente de los números de ola, los cuales están asociados a cada frecuencia.

La inversa de la ec 4.27 es

$$\phi(\sigma) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta(t) \eta(t + \tau) e^{i\sigma\tau}}{\eta(t) \eta(t + \tau)} d\tau \quad (4.29)$$

ecuación que permite determinar el espectro de frecuencias de los desplazamientos de la superficie del mar, en el punto donde se hace el registro.

Al aceptar que el proceso es estacionario, el espectro de frecuencias es simétrico para  $\sigma = 0$ , con lo cual la ec 4.29 se puede escribir como

$$\phi(\sigma) = \pi^{-1} \int_0^{\infty} \frac{\eta(t) \eta(t + \tau)}{\eta(t) \eta(t + \tau)} \cos \sigma\tau \, d\tau \quad (4.30)$$

y su inversa para  $\tau = 0$  es

$$\bar{\eta}^2 = 2 \int_0^{\infty} \phi(\sigma) \, d\sigma \quad (4.31)$$

De la ec 4.8 es posible conocer, para un oleaje en aguas profundas de pequeña amplitud, la relación existente entre el espectro de frecuencias y el espectro del número de ola, considerando este último como un espectro de frecuencias direccionales. Esta relación es

$$\phi(\sigma) = \frac{2\sigma^3}{g^2} \int_0^{2\pi} \psi(k, \alpha) \, d\alpha \quad (4.32)$$

donde  $k = \sigma^2/g$ , ec 4.8, y el espectro de frecuencias se define como una integral de  $\psi(k)$  sobre todas las direcciones de propagación  $\alpha$ , con un número de ola de magnitud constante.

### 4.3.3 Naturaleza estadística de la superficie del mar

Los desplazamientos superficiales en el océano referidos a un punto dado (subinciso 4.3.2.2), es frecuentemente el resultado de diversas componentes del oleaje, que han sido generadas en diferentes regiones y se han propagado al punto de observación. Si se desprecian las interacciones del oleaje, los desplazamientos superficiales en un punto dado pueden considerarse como la suma de gran número de incrementos independientes de fase aleatoria, lo que permite aplicar el teorema del límite central, y la distribución es en general Gaussiana.

Se han realizado diversos estudios para conocer las distribuciones de probabilidades de las características del oleaje, a partir del análisis de registros de observaciones de los desplazamientos superficiales en puntos fijos. Para su interpretación se han utilizado diferentes métodos (fig 4.2).

Las primeras distribuciones de probabilidades de las características del oleaje fueron deducidas por Putz (1952) a partir de un análisis de 25 registros de oleaje, obteniendo para las alturas y periodos respectivos distribuciones tipo Gamma. Al mismo tiempo, Longuet-Higgins (1952), mediante un análisis matemático de los desplazamientos de la superficie, dedujo que las distribuciones de probabilidad de las alturas del oleaje siguen una distribución tipo Rayleigh, cuando el espectro del oleaje es de una frecuencia de banda estrecha.

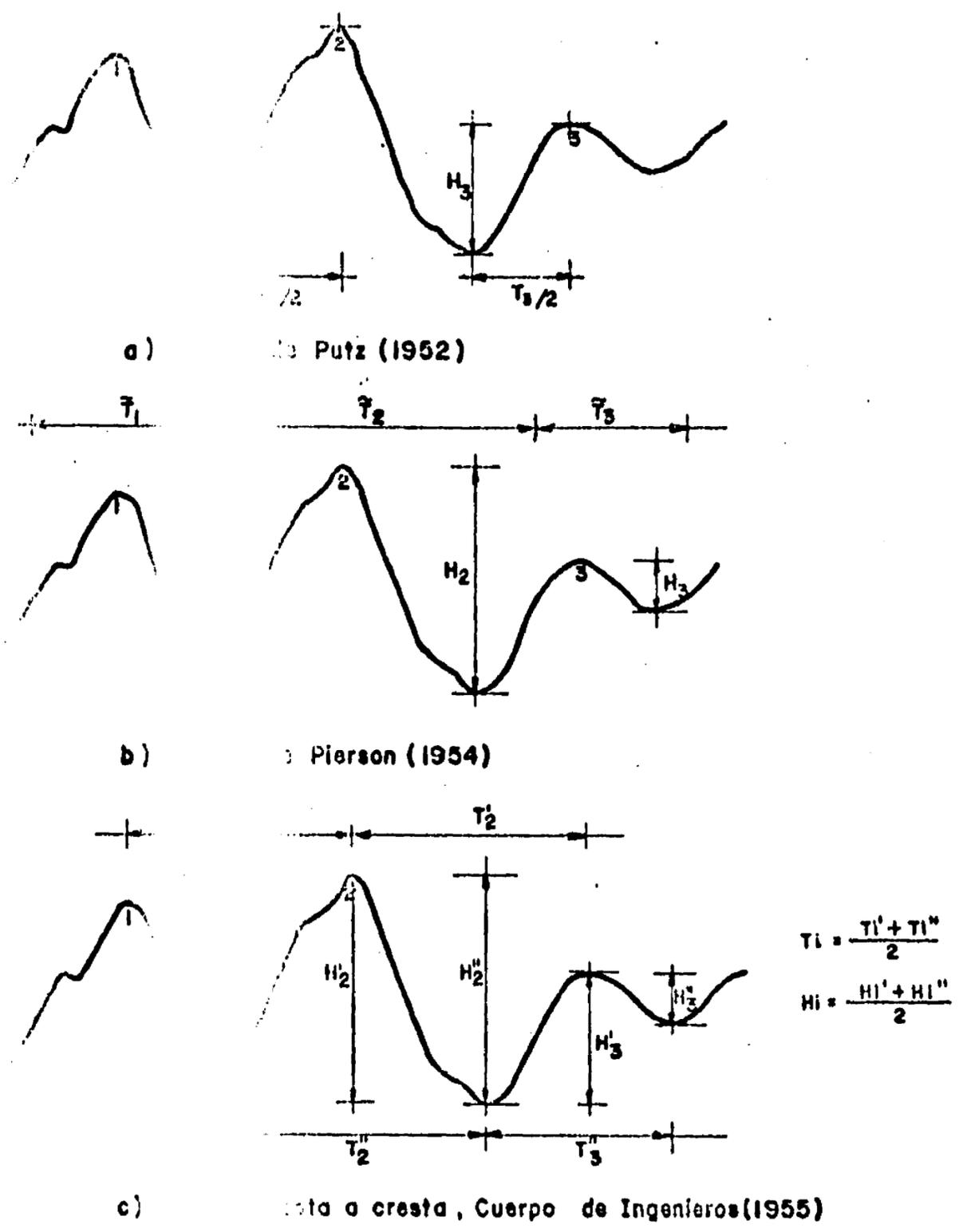


Fig 4.2 Método de análisis de registros de oleaje

Fretschneider (1958a) con 96 registros puntuales de los desplazamientos de la superficie marina (con un promedio de 100 olas cada uno) de siete fuentes diferentes, obtuvo que las distribuciones de probabilidades de mejor ajuste de las características del oleaje analizadas, siguen una distribución de tipo Rayleigh.

Cartwright y Longuet-Higgins (1956) mediante un espectro de oleaje de banda ancha, encontraron a partir de un análisis matemático, que las alturas de ola siguen una distribución de Gauss; un estudio más detallado realizado por Longuet-Higgins (1963) mostró que la distribución de probabilidades de mejor ajuste es del tipo Gram-Charlier. Esto ya había sido observado de un análisis cuidadoso de 40 registros de oleaje efectuado por Kinsman (1960).

Los resultados de esos estudios se analizan a continuación

#### 4.3.3.1 Distribución de probabilidades para las alturas del oleaje

La distribución de probabilidades de tipo Rayleigh, de las alturas del oleaje, se puede indicar como

$$P(\eta) = \frac{\pi\eta}{2} e^{-\frac{\pi\eta^2}{4}} \quad (4.33)$$

donde en este caso  $\eta = H/\bar{H}$ , siendo  $H$  la altura de la ola y  $\bar{H}$  la altura media. En la tabla 4.1 se indican los parámetros estadísticos utilizados en el análisis de los datos del oleaje.

La distribución acumulada de las alturas del oleaje, de acuerdo con la ec 4.33, es

$$F = 1 - e^{-\frac{\pi \eta^2}{4}} \tag{4.34}$$

En la fig 4.3 se muestra la comparación entre la ec 4.34 y los datos analizados por Bretschneider, y en la tabla 4.2 algunos valores de las alturas del oleaje promedio para una altura dada, para diversos valores de probabilidades acumuladas (ec 4.34).

De dicha tabla se deduce que la altura de la ola significativa (de amplio empleo en los criterios de diseño y generación del oleaje, por considerarla igual a la altura del oleaje que se reporta de observaciones visuales, y que se define como la altura media o promedio del tercio más alto de todas las olas) corresponde a  $\eta_p$  para  $P = 0.333$ . Así, la altura de la ola significativa es

$$H_s = 1.598 \bar{H} \tag{4.35}$$

en relación con la altura promedio del oleaje,  $\bar{H}$

Longuet-Higgins (1952) establece que el valor más probable de la altura de la ola máxima que se puede esperar de un registro de observaciones, es función de su longitud de onda y del número de olas, N, obteniendo la expresión

$$a_{m\acute{a}x} / \bar{a} = \sqrt{2N} \tag{4.36}$$

donde  $a_{\text{máx}}$  es el valor más probable de la amplitud de la ola máxima. De acuerdo con la notación que se está considerando (tabla 4.1), la ecuación anterior se transforma en

$$H_{\text{máx}} / \bar{H} = (2/\sqrt{\pi}) (\log N)^{1/2} \quad (4.37)$$

donde  $H_{\text{máx}}$  es el valor más probable de la altura de la ola máxima, función de la altura media del oleaje,  $\bar{H}$ , y del número de olas registradas,  $N$ . El número de olas  $N$  se puede valorar como la duración del registro entre el periodo medio del oleaje,  $\bar{T}$ . En la tabla 4.3 se muestran algunos valores de  $H_{\text{máx}}/H_s$  y de  $H_{\text{máx}}/\bar{H}$  para diversos valores de  $N$ .

#### 4.3.3.2 Distribución de probabilidades para las longitudes del oleaje

Bretschneider (1958a) dedujo que la función de distribución para longitudes del oleaje también puede representarse por una distribución tipo Rayleigh, con el mismo grado de aproximación que para las alturas del oleaje, Así,

$$p(\lambda) = \frac{\pi\lambda}{2} e^{-\frac{\pi\lambda^2}{4}} \quad (4.38)$$

donde  $\lambda = L/\bar{L}$ , siendo  $L$  la longitud de la ola y  $\bar{L}$  la longitud media (tabla 4.1)

TABLA 4.1 PARAMETROS ESTADISTICOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS DE DATOS DE OLEAJE PARA LA OBTENCION DE DISTRIBUCIONES MARGINALES (Bretschneider, 1958a)

CONCEPTO	ALTURA DE LA OLA	LONGITUD DE LA OLA	PERIODO DE LA OLA
Forma Estándar	H	L	T
Media	$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum H_i$	$\bar{L} = \frac{1}{N} \sum L_i = \frac{1}{N} \sum T_i^2$	$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum T_i$
Forma Normal	$\eta = H / \bar{H}$	$\lambda = L / \bar{L} = T^2 / \bar{T}^2$	$\tau = T / \bar{T}$
Altura Media al Cuadrado	$\bar{H}^2 = \frac{1}{N} \sum H_i^2$	$\bar{L}^2 = \frac{1}{N} \sum L_i^2 = \frac{1}{N} \sum (T_i^2)^2$	$\bar{T}^2 = \frac{1}{N} \sum T_i^2$
	$\bar{\eta}^2 = \bar{H}^2 / (\bar{H})^2$	$\bar{\lambda}^2 = \bar{L}^2 / (\bar{L})^2 = \bar{T}^4 / (\bar{T})^2$	$\bar{\tau}^2 = \bar{T}^2 / (\bar{T})^2$
Desviación Estándar de la Media	$S_H = \left[ \frac{1}{N} \sum (H_i - \bar{H})^2 \right]^{1/2}$	$S_L = \left[ \frac{1}{N} \sum (L_i - \bar{L})^2 \right]^{1/2}$	$S_T = \left[ \frac{1}{N} \sum (T_i - \bar{T})^2 \right]^{1/2}$
	$S_\eta = \sqrt{\bar{\eta}^2 - 1} = \frac{S_H}{\bar{H}}$	$S_\lambda = \sqrt{\bar{\lambda}^2 - 1} = \frac{S_L}{\bar{L}}$	$S_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - 1} = \frac{S_T}{\bar{T}}$
Coefficiente de Esviajamiento	$\alpha_{3H} = \frac{1}{N} \sum \left( \frac{H_i - \bar{H}}{S_H} \right)^3$	$\alpha_{3L} = \frac{1}{N} \sum \left( \frac{L_i - \bar{L}}{S_L} \right)^3$	$\alpha_{3T} = \frac{1}{N} \sum \left( \frac{T_i - \bar{T}}{S_T} \right)^3$
Parámetros considerando una distribución tipo Ray Leight	$S_H = 0.523 \bar{H}$	$S_L = 0.523 \bar{L}$	$S_T = 0.280 \bar{T}$
	$\alpha_{3H} = 0.631$	$\alpha_{3L} = 0.631$	$\alpha_{3T} = -0.088$

TABLA 4.2 VALORES DE LAS ALTURAS DEL OLEAJE PROMEDIO  
SOBRE EL FONDO DADA

	$h_p$
	2.653
	2.242
	2.032
	1.796
	1.713
	1.642
	1.598
	1.521
	1.418
	1.328
	1.244
	1.164
	1.085
	1.000

TABLA 4.3 ALTURAS MAXIMAS MAS PROBABLES

Número de olas N	$\frac{H_{\text{máx}}}{H_{33}}$	$\frac{H_{\text{máx}}}{\bar{H}}$
10	1.11	1.78
20	1.25	2.00
50	1.42	2.27
100	1.53	2.45
200	1.64	2.62
500	1.77	2.83
1000	1.86	2.98

#### 4.3.3.3 Distribución de probabilidades para los periodos del oleaje

Teniendo en cuenta la relación que existe entre las longitudes y los periodos del oleaje para aguas profundas (ec 4.9), Bretschneider (1958a) estableció a partir de los datos disponibles y de la ec 4.38, la siguiente distribución para los periodos del oleaje.

$$P(\tau) = 2.7 \tau^3 e^{-0.675\tau^4} \quad (4.39)$$

y la distribución acumulada

$$P(\tau) = 1 - e^{-0.675\tau^4} \quad (4.40)$$

En la fig 4.4 se muestra la relación entre la ec 4.40 y los datos utilizados para su deducción

#### 4.4 Generación, por viento, del oleaje en aguas profundas

La transferencia de energía del viento al oleaje se realiza por fluctuaciones de presión o por esfuerzos tangenciales. Al respecto, existen diversas teorías, las cuales son ampliamente discutidas por Wiegel (1970).

La teoría que sirvió de apoyo a los actuales criterios de predicción de la generación del oleaje por viento, corresponde a Sverdrup y Munk (1947) al relacionar las características del campo de viento con las del oleaje, considerando un viento de velocidad y dirección constantes. Posteriormente la revisó y ajustó Bretschneider (1952), con lo que surge el método de predicción del oleaje significativo, referido como el método de Sverdrup - Munk - Bretschneider.

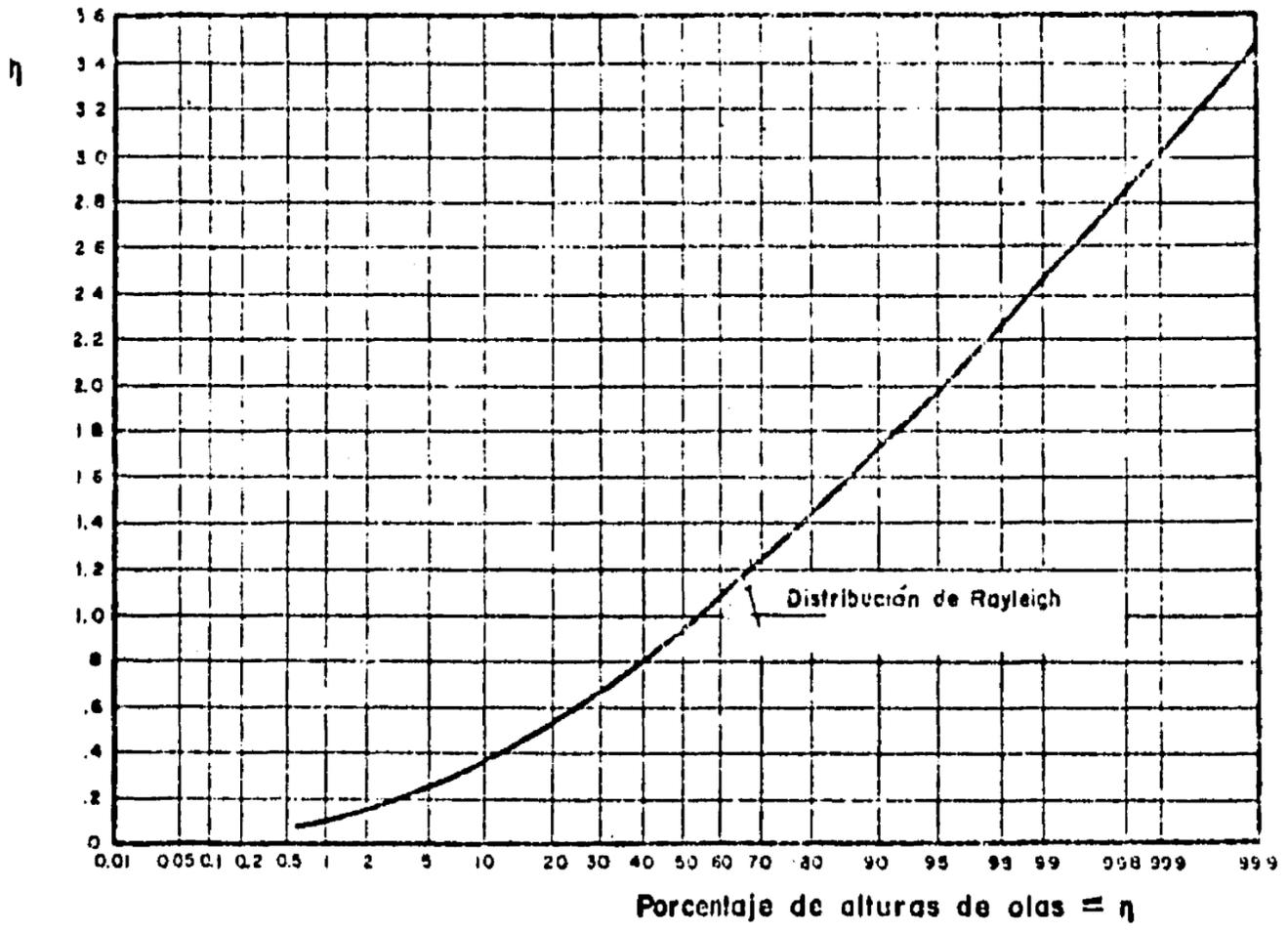


Fig 4.3 Distribución acumulada para  $\eta = H/\bar{H}$

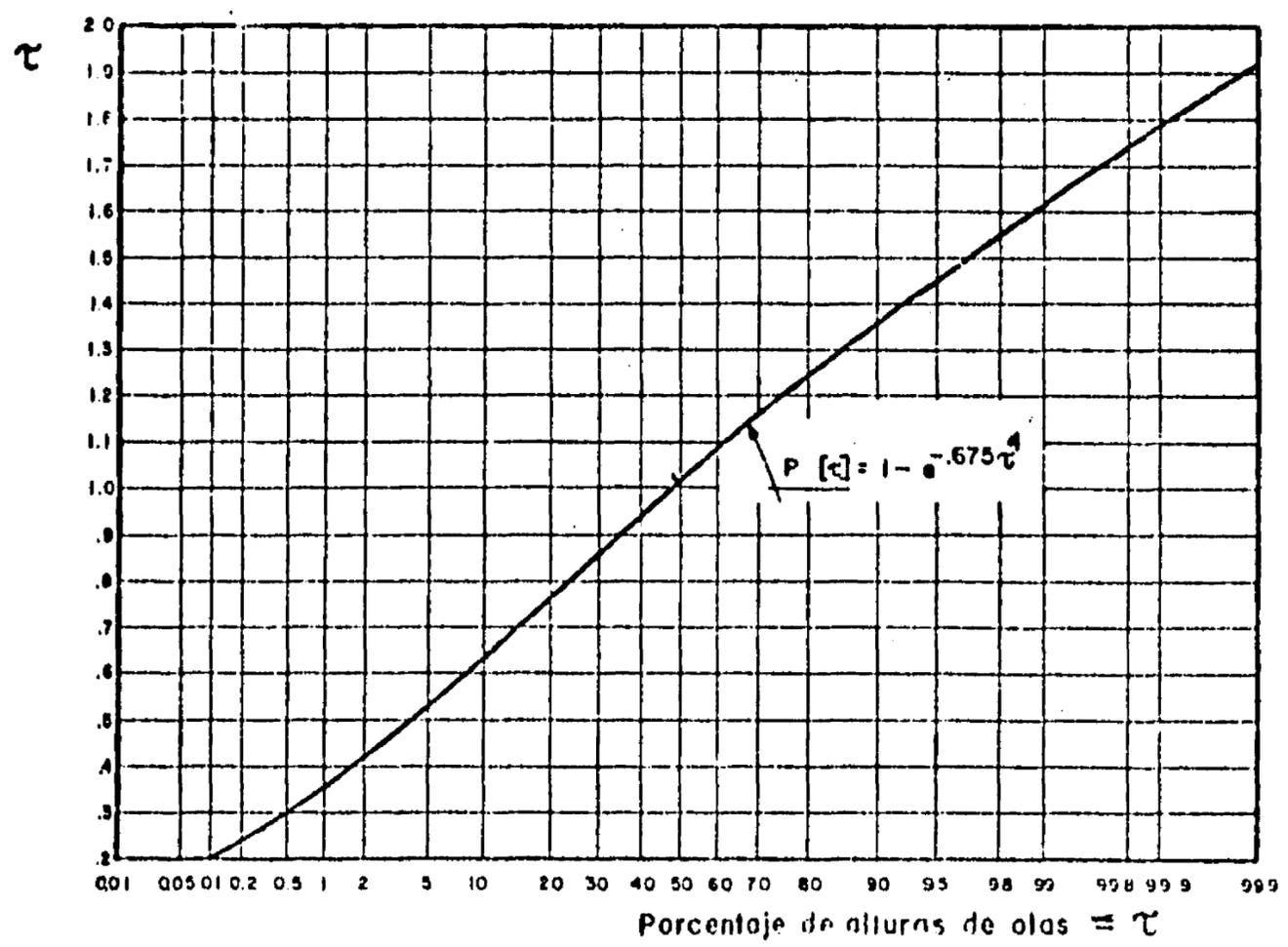


Fig 4.4 Distribución acumulada  $\tau = T/\bar{T}$

Pierson, Neumann y James (1955) establecieron para efectos de predicción la forma de obtener el espectro del oleaje asociado con un viento dado, con lo cual se origina el método del espectro del oleaje, denominado método de Pierson, Neumann y James (PNJ). Una discusión de los criterios SMB y PNJ la realizó Bretschneider (1957a).

Wilson (1955) y Bretschneider (1957b, 1958b, 1970) efectuaron modificaciones a las relaciones entre las características del campo de viento y las del oleaje empleadas en el método SMB; en tanto que un equilibrio entre los métodos SMB y el PNJ, en cuanto a la determinación de las características del oleaje se refiere, lo hizo Wilson (1955) al proponer el método gráfico para la predicción de la generación del oleaje.

Bretschneider (1958b) propuso un espectro del oleaje para olas generadas por viento en aguas profundas, complementando el método SMB.

#### 4.4.1 Relación entre las características del oleaje y las del viento, con dirección y velocidad constantes

En el método SMB, las características del oleaje (H, L, T) dependen de las del viento (U, F, t), de acuerdo con las relaciones

$$\frac{gH}{U^2} = \phi \left( \frac{gH}{U^2}, \frac{gT}{U} \right) \quad (4.41)$$

$$\frac{C}{U} = \frac{gT}{2\pi U} = \psi \left( \frac{gF}{U^2}, \frac{gT}{U} \right) \quad (4.42)$$

donde

- F distancia en la cual el viento actúa sobre el agua, comúnmente conocido como el fetch
- U velocidad del viento a la altura del anemómetro, 10m sobre el nivel medio del mar
- t duración del tiempo que el viento actúa sobre el agua
- H altura de la ola significativa
- T periodo de la ola significativa
- C celeridad de la ola significativa
- g aceleración de la gravedad

Las ecuaciones que relacionan los parámetros anteriormente propuestos por Wilson (1955), y después revisados por Bretschneider (1957b, 1958b, 1970). Estas ecuaciones pueden escribirse:

$$\frac{gH}{U^2} = A_1 \tanh \left( B_1 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{m_1} \right) \quad (4.43)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = A_2 \tanh \left( B_2 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{m_2} \right) \quad (4.44)$$

donde  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $m_1$  y  $m_2$  son constantes, determinadas a partir de los datos disponibles analizados. En la tabla 4.4 se proporcionan los valores encontrados en los diversos ajustes llevados a cabo.

TABLA 4.4 VALORES DE LAS CONSTANTES DE LAS ECS 4.43 Y 4.44 DE ACUERDO CON LOS DIVERSOS AJUSTES REALIZADOS

Constante	Wilson (1955)	Bretschneider (1957 b, 1958 b)	Bretschneider (1970)
$A_1$	0.260	0.283	0.283
$B_1$	0.01	0.0085	0.0125
$m_1$	0.5	0.5	0.42
$A_2$	1.40	1.95	1.2
$B_2$	0.0436	0.047	0.077
$m_2$	0.333	0.25	0.25
$A_1 B_1$	0.0026	0.0024	0.0035
$A_2 B_2$	0.0610	0.0917	0.0924

Estas ecuaciones permiten calcular las características del oleaje significativo en función de las del campo de viento.

En las ecs 4.43 y 4.44 no interviene la duración del viento,  $t$ , pues se considera implícito en la longitud del fetch. La duración del viento,  $t$ , se toma en cuenta con la velocidad de grupo del oleaje,  $C_g$ . Si  $C_g = dx/dt$ , con la ec 4.15 se obtiene

$$t = \int_0^F \frac{1}{C_g} dx = 2 \int_0^F \frac{1}{C} dx \quad (4.45)$$

ecuación que permite calcular:

- a) El tiempo mínimo requerido para que el oleaje generado por determinado fetch,  $F$ , y una velocidad de viento en particular,  $U$ , alcance sus características óptimas
- b) El fetch mínimo para que el oleaje generado para una velocidad de viento cualquiera  $U$ , con un cierto tiempo,  $t$ , alcance sus características óptimas.

La forma como se emplean las ecs 4.43 a 4.45 es:

- a) Para una cierta  $U$  y  $F$ , se determina el tiempo mínimo
- b) Si la duración del viento,  $t$ , es menor o igual al tiempo mínimo, las características del oleaje son función de  $t$ , y las ecs 4.43 y 4.44 se utilizan modificando la longitud del fetch, de acuerdo con el valor obtenido de la ec 4.45 al emplear la duración del viento  $t$

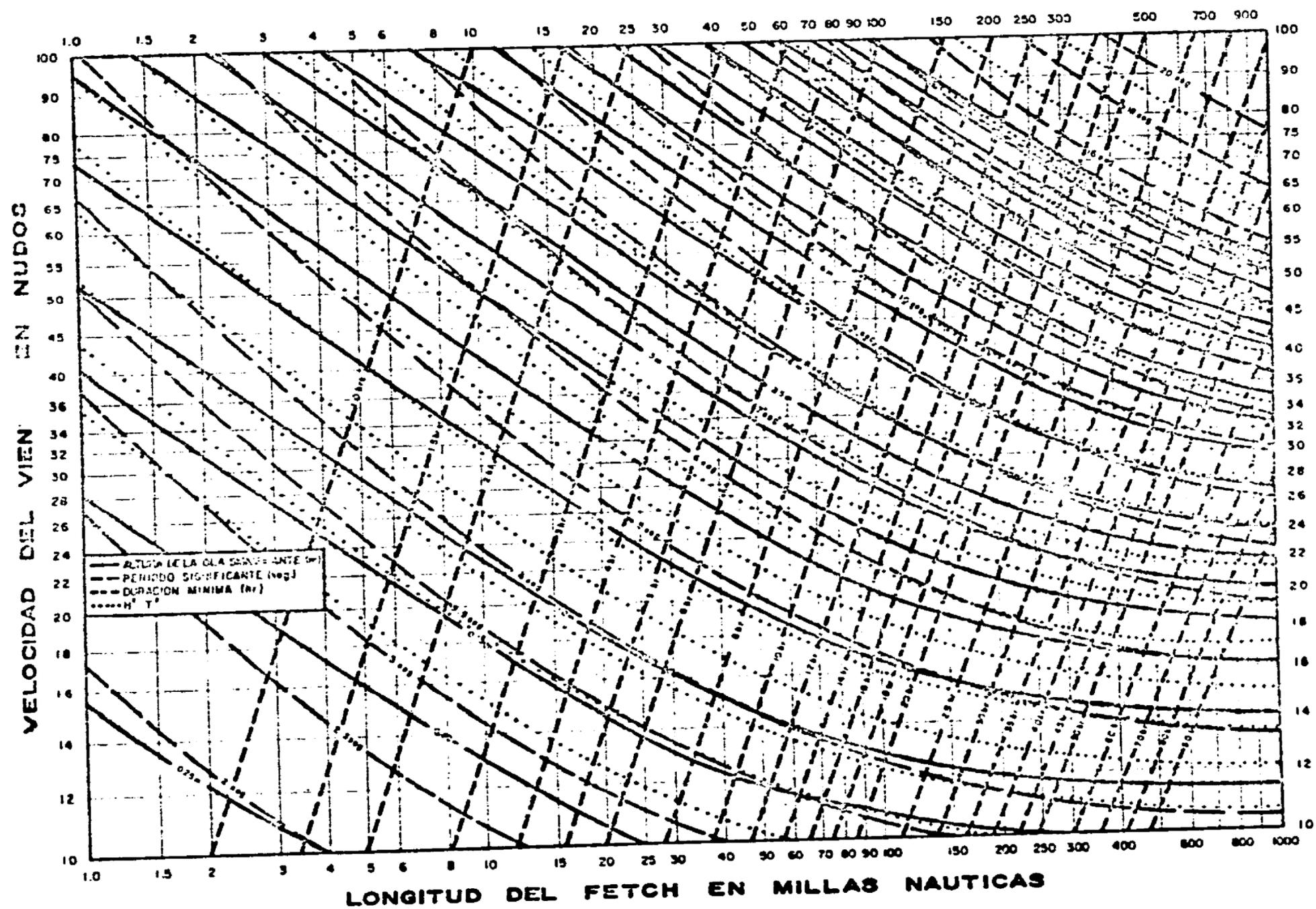


Fig 4.5 Curvas de predicción para el oleaje en aguas profundas como una función de la velocidad del viento, longitud del fetch y duración del viento. Bretschneider (1970)

- c) Si la duración del viento  $t$  es mayor que el tiempo mínimo, las características del oleaje se determinan mediante las ecs 4.43 y 4.44, con la longitud del fetch dato.

En la fig 4.5 se indica la solución a las ecs 4.43 a 4.45 de acuerdo con el último ajuste realizado por Bretschneider (1970). Con base en lo anterior, para emplear estas curvas se entra del lado izquierdo con la velocidad del viento  $U$ , para el cual se requiere determinar las características del oleaje, y se ve qué valor alcanza primero: si la duración del viento  $t$ , o la longitud del fetch  $F$ . El que resulte primero permite obtener la altura del oleaje significativo y su periodo correspondiente.

Para el límite superior de los parámetros de generación, las ecs 4.43 y 4.44 se reducen, respectivamente, a

$$\frac{gH}{U^2} = A_1 \quad (4.46)$$

y

$$\frac{gT}{2\pi U} = A_2 \quad (4.47)$$

siendo  $gF/U^2 = 6 \times 10^5$

El límite inferior para la generación del oleaje, correspondiente a grandes velocidades de viento y fetches cortos, se deduce mediante la transformación de las ecs 4.43 y 4.44 a la forma

$$\frac{gH}{U^2} = A_1 B_1 \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{m_1} \quad (4.48)$$

$$\frac{gT}{2 \pi U} = A_2 B_2 \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{m_2} \quad (4.49)$$

donde  $gF/U^2 = 0.0046$

la relación entre las ecs 4.44 y 4.45 se plantea para los límites de generación como

$$c_g = \frac{1}{2} \left(\frac{gT}{2 \pi U}\right) \left(\frac{T_{op}}{T}\right) \quad (4.50)$$

en la que  $T_{op}$  es el periodo óptimo donde se concentra la máxima energía.

$T_{op}/T$  varía de 1.0 para el límite inferior a 1.027 para el límite superior, con un máximo de 1.0375 para  $gF/U^2$  de 200

#### 4.4.2 Generación del oleaje en aguas profundas para vientos de velocidad y dirección variables, y fetches en movimiento

Si el campo de viento no es demasiado irregular y el movimiento de la tormenta es lento, el método SMB puede usarse considerando promedio de las características del campo de viento.

Las técnicas para utilizar el método SMB para las condiciones antes dichas fueron discutidas por Kaplan (1955); una forma de usarlo se muestra en la fig 4.5 teniendo en cuenta las curvas de energía constante, o sea líneas de

igual  $H^2T^2$  ( $\delta H^2L$ ), las cuales permiten valuar los incrementos del fetch y duración por cambios en la velocidad del viento, y tener en cuenta las condiciones previas de generación del oleaje.

Suponiendo que se requiere determinar las características del oleaje para un campo de viento estacionario, con distribución variable a lo largo del fetch, para utilizar la fig 4.5 se hace lo siguiente:

- a) Se divide el fetch en incrementos iguales,  $\Delta F$ , y se obtiene la velocidad media correspondiente a cada uno, considerándola como la raíz cuadrada media de los valores de la velocidad del viento en los extremos del incremento del fetch, De esta manera, se tendrá una serie de valores de  $U_i$  para cada  $\Delta F_i$ .
- b) Para el primer incremento del fetch,  $F_1$ , y la velocidad  $U_1$ , de la fig 4.5 se obtienen las características del oleaje significativo.
- c) Para el segundo incremento del fetch,  $F_2$ , con velocidad  $U_2$ , se requiere tener en cuenta el campo de oleaje generado en el paso anterior. Para ello, con las características determinadas, se mueve a lo largo de su curva correspondiente  $H^2T^2$  de  $U_1$  a  $U_2$ , obteniéndose un fetch y una duración equivalente para la nueva velocidad  $U_2$ . Este fetch equivalente se suma al incremento del fetch, en este caso,  $F_2$ , que una vez ajustado y con la velocidad  $U_2$ , de la fig 4.5 se obtienen las características del oleaje significativo para estas condiciones.
- d) Se repite el inciso c hasta terminar de analizar la distribución del viento.

Si el campo de viento tiene cierta dirección y velocidad de desplazamiento, se debe considerar un incremento en el fetch efectivo proporcional a

$$1 + k \frac{V_d}{C_g} \quad (4.5)$$

donde

$V_d$  velocidad de desplazamiento del campo de viento

$C_g$  velocidad de grupo del oleaje

$k$  función de la dirección de desplazamiento.

Wilson (1955) introdujo el método gráfico para la solución de las ecs 4.43 a 4.45, utilizando las constantes por él obtenidas (tabla 4.4), con lo que se logró la aplicación general del método SMB para cualquier condición de campo de viento. Para este método se requiere graficar las variables  $H$ ,  $F$ ,  $T$  y  $t$  como funciones de unas con otras para diferentes valores de  $U$ , mediante tres cuadrantes y considerando como ejes de referencia un sistema  $H-t-F-T$ . La aplicación de este criterio para un campo de viento variable se muestra en la fig 4.6.

Una adaptación del método gráfico para computadora digital de alta velocidad la efectuó Wilson (1962) a través de reemplazar la integración gráfica por una integración numérica.

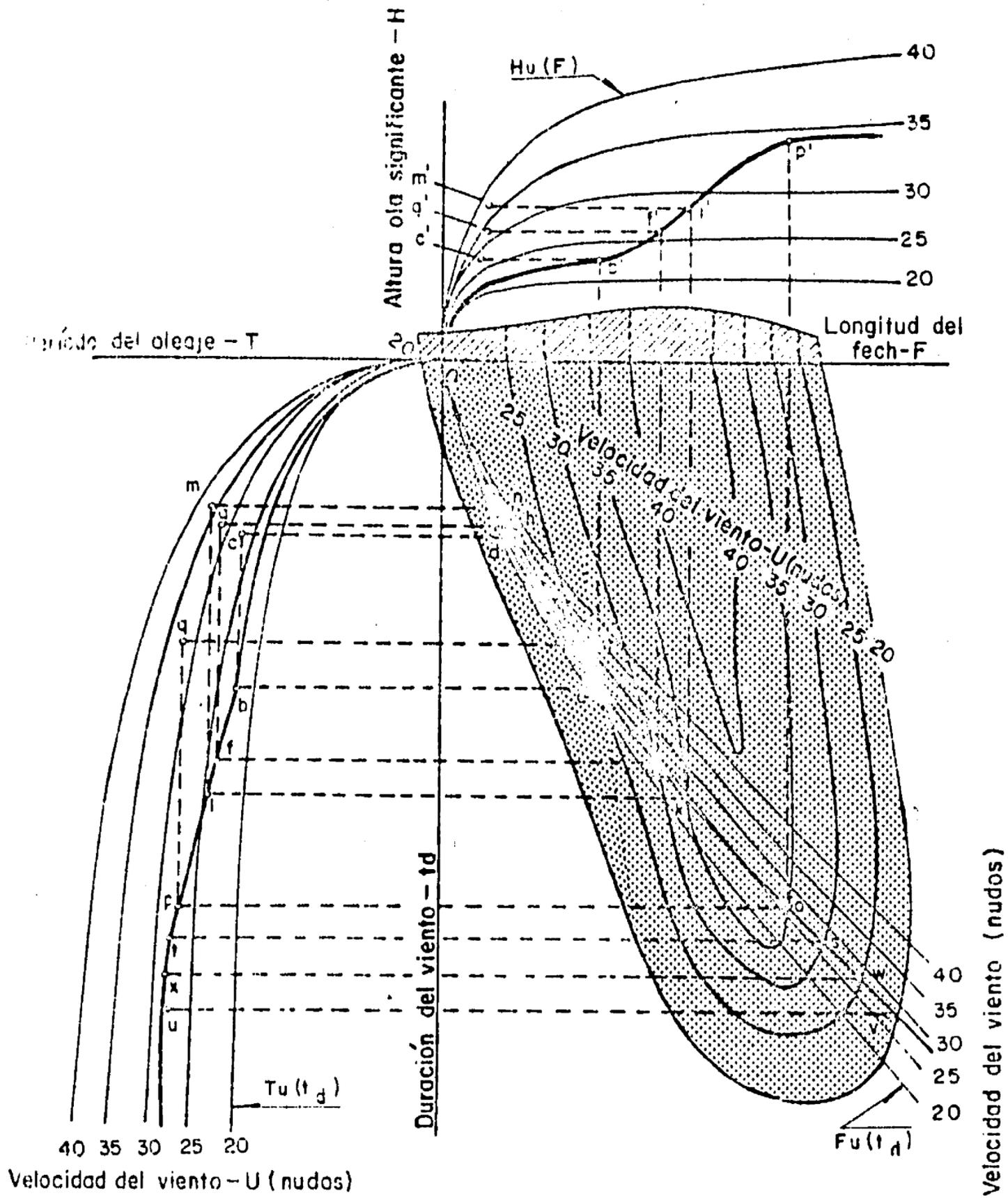


Fig 4.6 Características del oleaje significativo generado por un campo de viento variable en magnitud y dirección (Wilson, 1955)

#### 4.4.3 Espectro del oleaje generado por viento

Los primeros intentos para obtener el espectro del oleaje, en función de las características del campo de viento que lo generan, fue realizado por Neumann (1952) y por Darbyshire (1952). El propuesto por Neumann se basa en una serie de observaciones individuales del oleaje, que junto con el modelo matemático de la variación del desplazamiento superficial del océano, como una función de la posición y el tiempo propuesta por Pierson (1952, 1955), constituyen las bases del método PNJ. Dicho espectro (que representa una envolvente de los datos analizados) se puede escribir como

$$\frac{H}{\tilde{T}^2} = C_1 e^{-\left(\frac{g\tilde{T}}{2\pi U}\right)^2} \quad (4.52)$$

donde

H altura de la ola

$\tilde{T}$  periodo aparente de la ola (fig 4.2b)

U velocidad del viento

$C_1$  una constante

Al elevar al cuadrado la ec 4.52 y después de tomar en cuenta que  $H^2$  es proporcional al área bajo el espectro sobre un intervalo  $d\sigma$ , ec 4.33, para un periodo de banda  $dT$  se tiene

$$S_{H^2}(\sigma)d\sigma = C_2 g^2 T^4 e^{-2\left(\frac{gT}{2\pi U}\right)^2} dT$$

donde  $S_H^2(\sigma)$  es el espectro de frecuencias (suma de  $H^2$  como una función de  $\sigma$ ).  $T = \bar{T}$ , el periodo de banda es diferencial. Al estimar que  $T = 2\pi/\sigma$  y  $dt = (2\pi) d\sigma$ , lo cual también se puede escribir como  $dT = -2\pi\sigma^{-2} d\sigma$ , la ecuación para el espectro de frecuencias se transforma en

$$S_H^2(\sigma) = C (2\pi)^5 g^2 \sigma^{-6} e^{-2 \left(\frac{g}{U\sigma}\right)^2} \quad (4.53)$$

donde  $C$  tiene un valor de  $2 \times 10^5 \text{ seg}^{-1}$ . Análogamente, el espectro de periodos  $S_H^2(T)$  (suma de  $H^2$  como una función de  $T$ ) es de la forma

$$S_H^2(T) = C g^2 T^4 e^{-2 \left(\frac{gT}{2\pi U}\right)^2} \quad (4.54)$$

A partir de la ecuación 4.53 o 4.54, es posible calcular la energía del oleaje,  $E$ , en un rango de frecuencias o de periodos.

El método PNJ se basa en la distribución de las alturas del oleaje propuesta por Longuet-Higgins (1952) (subinciso 4.3.3.1), y se relaciona directamente con los valores de  $H_p$  de acuerdo con la ecuación

$$H_p = \eta_p \bar{H} = 1.772 \eta_p E^{1/2} \quad (4.55)$$

donde

$H_p$  altura del oleaje promedio del porcentaje de olas más altas que se han presentado

$\eta_p$  relación entre  $H_p$  y la altura media  $\bar{H}$  del oleaje, (tabla 4.2)

De acuerdo con la ecuación anterior, la altura de la ola significativa se calcula como

$$H_s = 2.832 E^{1/2}$$

TABLA 4.5 PROPIEDADES FISICAS DE LOS ESPECTROS DE PERIODOS DEL OLAJE GENERADO POR VIENTO

Concepto	Espectro obtenido por Neumann (1952) utilizado en el método de P N J	Espectro obt. por Bretschneider (1958 a) para utilizar con el método de S M B
Espectro de períodos	$S_{H^2}(\tau) = 2 \times 10^{-5} g^2 \tau^4 e^{-2 \left( \frac{g\tau}{2\pi U} \right)^2}$	$S_{H^2}(\tau) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} \tau^3 e^{-0.675 \left( \frac{g\tau}{2\pi U F_2} \right)^4}$ $\alpha = 3.437 \frac{F_1^2}{F_2^2}; F_1 = \frac{g\bar{H}}{U^2}; F_2 = \frac{g\bar{\tau}}{2\pi U}$
a) Energía El área bajo el espectro es $\bar{H}^2$ . De la ec 4.12 se obtiene la energía	$\bar{H}^2 = 0.00594 \frac{U^5}{g^3}; \bar{H}^2 = \frac{4}{\pi} (\bar{H})^2$	$\bar{H}^2 = \frac{4}{\pi} F_1^2 \frac{U^4}{g^2}; \bar{H}^2 = \frac{4}{\pi} (\bar{H})^2$
b) Oleaje significativo De la Tabla 4.2, $\bar{H} = 1.6 H$	$\frac{g\bar{H}}{U^2} = 0.216 \left( \frac{U}{g} \right)^{\frac{1}{2}}$	$\frac{g\bar{H}}{U^2} = 1.6 F_1$
c) Período medio del oleaje $\bar{\tau}$	$\frac{g\bar{\tau}}{2\pi U} = 1.064$	$\frac{g\bar{\tau}}{2\pi U} = F_2$
d) Período óptimo. $T_{op}$ correspondiente a la energía máxima	$\frac{g T_{op}}{2\pi U} = 1.00; \frac{T_{op}}{\bar{\tau}} = 0.94$	$\frac{g T_{op}}{2\pi U} = 1.027 F_2; \frac{T_{op}}{\bar{\tau}} = 1.027$

TABLA 4.5 (CONTINUACION)

Concepto	Espectro obtenido por Neumann (1952) utilizado en el método de P N U	Espectro obt. por Bretschneider (1958 a) para utilizar con el método de S M fs
e) Energía máxima del espectro de períodos	$\left[ S_{H^2}(\tau) \right]_{\text{máx}} = 4.34 \times 10^{-3} \frac{U^4}{g^2}$	$\left[ S_{H^2}(\tau) \right]_{\text{máx}} = 0.279 \frac{F_1^2 U^3}{F_2 g}$
f) Espectro de períodos eliminando la velocidad del viento	$S_{H^2}(\tau) = \left( \frac{64}{9\pi} \right)^3 \frac{\bar{H}^2 \tau^4}{(\bar{\tau})^5} e^{-\frac{64}{9\pi} \left( \frac{\tau}{\bar{\tau}} \right)^2}$	$S_{H^2}(\tau) = 2.7 \bar{H}^2 \frac{\tau^3}{(\bar{\tau})^4} e^{-0.675 \left( \frac{\tau}{\bar{\tau}} \right)^4}$
g) Espectro de períodos considerando la forma normal (tabla 4.1)	$S_{\eta^2}(\tau) = \frac{4}{\pi} \left( \frac{64}{9\pi} \right)^3 \tau^4 e^{-\left( \frac{64}{9\pi} \right) \tau^2}$	$S_{\eta^2}(\tau) = 3.437 \tau^3 e^{-0.675 \tau^4}$

Unidades:

- U en cm/seg
- F en cm
- T en seg
- g=980 cm/seg<sup>2</sup>
- H en cm

TABLA 4.6 PROPIEDADES FISICAS DE LOS ESPECTROS DE FRECUENCIAS DEL OLEAJE GENERADO POR VIENTO

Concepto	Espectro obtenido por Neumann (1952) utilizado en el método de P N J	Espectro obt. por Bretschneider (1958 a) para utilizar con el método de S M B
Espectro de frecuencias	$S_{H^2}(\nu) = 2 \times 10^{-5} (2\pi)^5 g^2 \nu^{-6} e^{-2 \left(\frac{g}{U\nu}\right)^2}$	$S_{H^2}(\nu) = \alpha g^2 \nu^{-5} e^{-0.675 \left[\frac{g}{U\nu F_2}\right]^4}$ $\alpha = 3.437 \frac{F_1^2}{F_2^2}; F_1 = \frac{gH}{U^2}; F_2 = \frac{gT}{2\pi U}$
a) Frecuencia óptima $\nu_{op}$ correspondiente a la energía máxima	$\frac{g}{U\nu_{op}} = \sqrt{\frac{3}{2}} = 1.225$	$\frac{g}{U\nu_{op}} = \sqrt[4]{\frac{5}{2.7}} \quad F_2 = 1.166 \quad F_2$
b) Energía máxima	$S_{H^2}(\nu)_{\max} = 0.033 \frac{U^6}{g^4}$	$S_{H^2}(\nu)_{\max} = \frac{2.12 F_1^2 F_2 U^5}{g^3}$
c) Período medio aparente (fig 4.2)	$\frac{g\bar{T}}{2\pi U} = \frac{1}{2} \sqrt{3} = 0.866$	$\frac{g\bar{T}}{2\pi U} = 0.83 \quad F_2$
d) Relación entre los períodos. $\bar{T}$ y $\bar{T}$	$\bar{T}/\bar{T} = 0.82$	$\bar{T}/\bar{T} = 0.83$
e) Relación entre el período para la $\nu_{op}$ [ $T(\nu_{op})$ ] y $\bar{T}$	$\frac{T(\nu_{op})}{\bar{T}} = 1.15 \quad \frac{T(\nu_{op})}{\bar{T}} = 1.4$	$\frac{T(\nu_{op})}{\bar{T}} = 1.17 \quad \frac{T(\nu_{op})}{\bar{T}} = 1.4$

TABLA 4.6 (CONTINUACION)

Concepto	Espectro obtenido por Neumann (1952) utilizado en el método de P N J	Espectro obt. por Bretschneider (1958 a) para utilizar con el método de S M B
f) ancho del espectro $\epsilon$	$\epsilon = 0.815$	$\epsilon = 1 - \frac{\pi}{4} \div \frac{\ln \bar{T}}{T \text{ mín} - 0.071}$  Para $\bar{T}/T \text{ mín} = 10$ ; $\epsilon = 0.81$
g) Relaciones de alta frecuencia ( $\nabla$ grande)	$S_{H^2}(\nabla) = 2 \times 10^{-5} (2\pi)^5 g^2 \nabla^{-6}$	$S_{H^2}(\nabla) = \propto g^2 \nabla^{-5}$
h) Frecuencia media	$\frac{U \bar{\nabla}}{g} = \sqrt{\frac{32}{9\pi}} = 1.064$	$\frac{U \bar{\nabla}}{g} = \frac{1.111}{F_2}$
i) Relación entre las frec. y los períodos medios	$\frac{\bar{\nabla} \bar{T}}{2 \pi} = 1.11\phi$	$\frac{\bar{\nabla} \bar{T}}{2 \pi} = 1.111$
j) Espectro de frecuencia eliminando la velocidad del viento	$S_{H^2}(\nabla) = 2 \left(\frac{9\pi}{16}\right)^2 H^2 \frac{(\bar{\nabla})^5}{\nabla^6} e^{-\frac{9\pi}{16} \left(\frac{\bar{\nabla}}{\nabla}\right)^2}$	$S_{H^2}(\nabla) = \sqrt{\pi} H^2 \frac{(\bar{\nabla})^4}{\nabla^5} e^{-\sqrt{\frac{\pi}{16}} \left(\frac{\bar{\nabla}}{\nabla}\right)^4}$
k) Espectro de frecuencia considerando la frec. relativa $\nu = \nabla/\bar{\nabla}$	$S_{\eta^2}(\nu) = \frac{81\pi}{32} \nu^{-6} e^{-\frac{9\pi}{16} \nu^{-2}}$	$S_{\eta^2}(\nu) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \nu^{-5} e^{-\sqrt{\frac{\pi}{16}} \nu^{-4}}$

Bretschneider (1958a) desarrolló un espectro de oleaje teórico a partir del conocimiento de la distribución unida de las alturas y longitudes del oleaje, teniendo en cuenta la distribución de probabilidades de ellas (ecs 4.33 y 4.35). Al considerar una correlación cero, se obtiene para el espectro de frecuencias la expresión

$$S_H^2(\sigma) = \alpha g^2 \sigma^{-5} e^{-0.675 \left(\frac{g}{F_2 U \sigma}\right)^4} \quad (4.56)$$

y para el espectro de periodos

$$S_H^2(T) = \alpha \frac{g^2 T^3}{(2\pi)^4 e} e^{-0.675 \left(\frac{gT}{2\pi U F_2}\right)^4} \quad (4.57)$$

donde

$$\alpha = 3.437 \frac{F_1^2}{F_2}, \quad F_1 = \frac{g\bar{H}}{U^2}, \quad F_2 = \frac{g\bar{T}}{2\pi U} \quad (4.58)$$

En las tablas 4.5 y 4.6 se incluye una comparación entre las propiedades físicas del espectro propuesto por Neumann (ecs 4.53 y 4.54) y el obtenido por Bretschneider (ecs 4.56 y 4.57) (Bretschneider, 1958a).

De los resultados se puede ver que el método SMB predice  $H \sim U^2$ , mientras que el PNJ predice  $H \sim U^{5/2}$ , coincidiendo para  $U$  del orden de 30 nudos. Una discusión al respecto fue realizada por Bretschneider (1957a).

De las ecs 4.53 y 4.56 se tiene que para altas frecuencias, la energía es proporcional a  $\sigma^{-6}$  en el caso del espectro de Neumann, y a  $\sigma^{-5}$  para el es-

pectro de Bretschneider. Este último valor es coincidente con el estudio teórico de Phillips (1958) para determinar el rango de equilibrio de los espectros de frecuencia del oleaje generado por viento.

En la última revisión realizada por Bretschneider (1970) al método SMB, se ajustó las ecs 4.56 y 4.57 después de tomar en cuenta los últimos estudios acerca del espectro llevados a cabo por Pierson (1964) y por Pierson y Moskowitz (1964). El ajuste lo realizó considerando que  $\bar{T} = 0.906 T_s$ , donde  $\bar{T}$  es el periodo del oleaje medio y  $T_s$  el periodo de la ola significativa.

Al sustituir las ecs 4.58 en la 4.56 (tabla 4.5, renglones f y g), y teniendo en cuenta la relación entre periodos ya indicada, se logran las siguientes relaciones para el espectro de periodos

$$S(\tau) = 4 \tau^3 e^{-\tau^4} ; \tau = \frac{T}{T_s} ; \int S(\tau) d\tau = 1.0 \quad (4.59)$$

o bien

$$S(T) = \frac{H_s^2}{T_s} S(\tau) ; \int S(T) dT = H_s^2 \quad (4.60)$$

En forma análoga, para el espectro de frecuencias (tabla 4.6, renglones j y k), se tiene

$$S(v) = 4v^{-5} e^{-v^{-4}} ; v = \frac{T_s}{T} = f t_s ; \int S(v) dv = 1 \quad (4.61)$$

o bien

$$S(f) = H_s^2 T_s S(v); \int S(f) df = H_s^2 \quad (4.62)$$

Estas ecuaciones permiten determinar en forma directa el espectro de periodos o de frecuencias del oleaje, una vez conocidas las características de la ola significativa. La fig 4.7 contiene las ecs 4.59 y 4.61

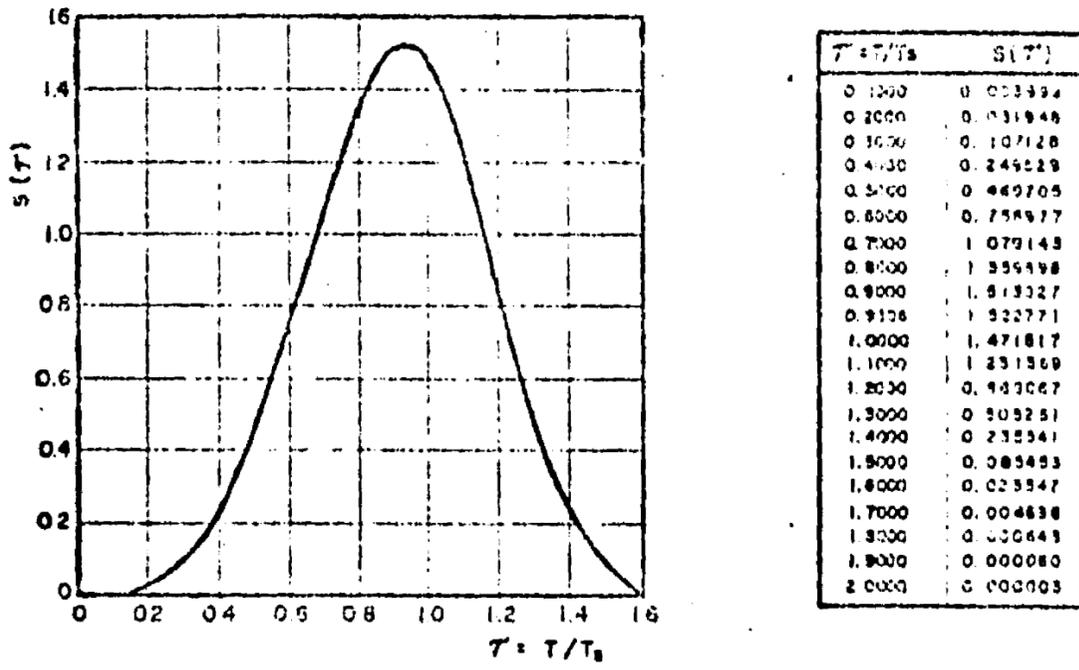
#### 4.5 Criterios para obtener el oleaje generado por un huracán

Los campos de viento sobre el agua producidos por un huracán (cap 3), implican para cierta área de generación variaciones en la velocidad del viento, tanto en magnitud como dirección, así como en el fetch y la duración.

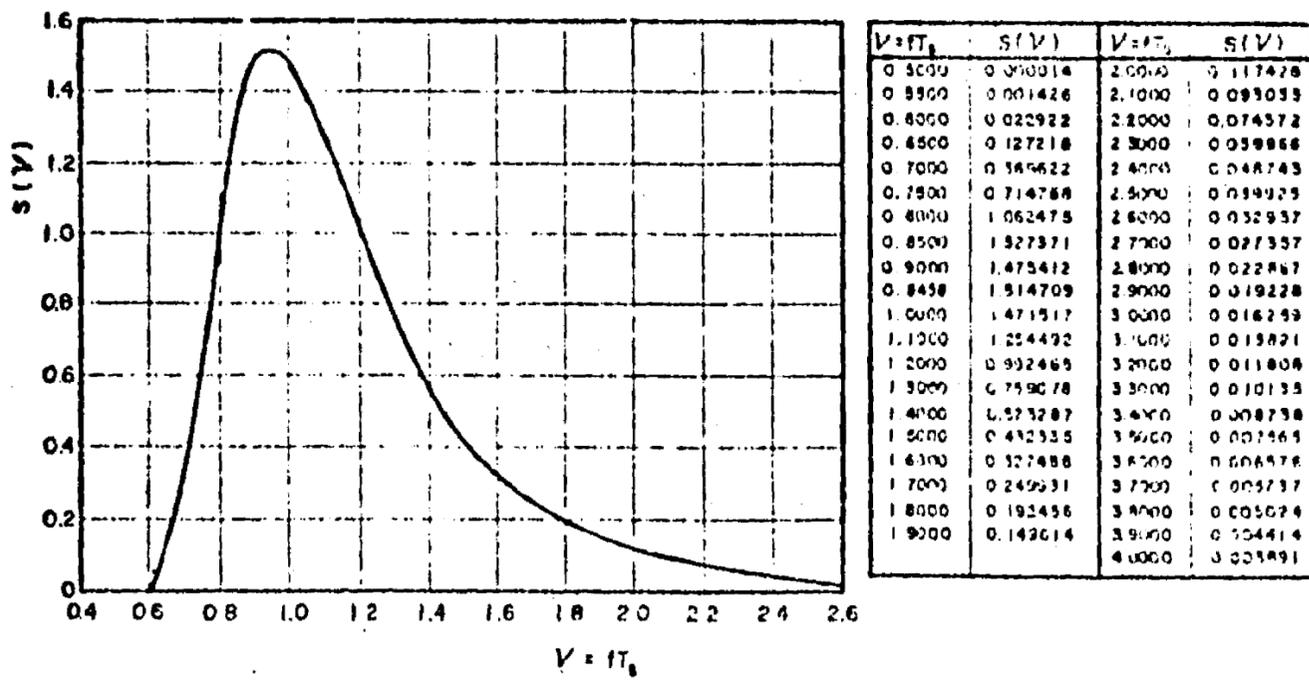
Los criterios para obtener el oleaje debido a un huracán se basan en el método de SMB (subinciso 4.4.2). Las diversas aplicaciones y los resultados se detallan a continuación.

##### 4.5.1 Método gráfico de Wilson

A través del método gráfico de Wilson (1955) para la solución de las ecs 4.43 a 4.45 (subinciso 4.4.2), Wilson (1957) realizó un estudio estadístico del oleaje en el golfo de México, frente a las costas de EUA, con 25 huracanes. El estudio permitió comprobar en forma amplia el uso del método gráfico para analizar los campos de viento debido a huracanes.



a) Espectro de períodos



b) Espectro de frecuencias

Fig 4.7 Espectro del oleaje generado por viento (Bretschneider, 1970)

#### 4.5.2 Oleaje de diseño debido a un huracán

Bretschneider (1957b), con el método SMB, determina por integración numérica, con base en los campos de viento de 13 huracanes estacionarios, relaciones para estimar los máximos valores del oleaje significativo, a una latitud de 35° norte.

A continuación se indica la secuela de cálculo para obtener las relaciones mencionadas. De las ecs 4.48 y 4.49 y los valores de los parámetros correspondientes al ajuste realizado en este estudio (tabla 4.4, col 3), se tiene que

$$H = 0.0555 (U^2 F)^{1/2} \quad (4.48)$$

$$T = 0.5 (U^2 F)^{1/4} \quad (4.49)$$

Además, de las ecs 4.45, 4.50 y 4.64, se obtiene

$$\frac{F}{t} = 0.57 (U^2 F)^{1/4} = 1.14 T \quad (4.50)$$

que es la relación entre las características mínimas de  $F$  y  $t$ . En las ecuaciones anteriores,  $H$  es la altura de la ola significativa, en pies;  $T$  el periodo de la ola significativa, en segundos;  $U$  la velocidad del viento, en nudos;  $F$  la longitud del fetch, en millas náuticas, y  $t$  la duración del viento, en horas.

Para un huracán, el viento es variable tanto en velocidad como en dirección. Para utilizar las ecuaciones 4.63 a 4.65, se puede reemplazar  $U^2 F$  por

$$U^2 F = \int_{x_1}^{x_2} U_x^2 dx \quad (4.66)$$

expresión que es factible aplicar a lo largo de una línea  $x$  del campo de viento de un huracán, donde se desea conocer el oleaje, siendo  $x_1$  y  $x_2$  límites arbitrarios que pueden fijarse como la distancia en la cual  $U_x = 15$  nudos;  $U_x$  es la variación de la velocidad del viento sobre el agua en el eje  $x$ .

De acuerdo con la ec 2.2, propuesta por Reid (1957), la energía cinética de un huracán es proporcional a  $R\Delta p$ ; por otra parte, la energía del oleaje es proporcional a  $H^2$ , ec 4.55 y, por ende, a  $U^2 F$ , ec 4.63. Con esto, el índice de energía del huracán,  $E$ , se puede escribir como

$$E = \int_{x_1}^{x_2} U_x^2 dx = U_r^2 F = (R\Delta p) \quad (4.67)$$

donde

$$U_r^2 = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_1}^{x_2} U_x^2 dx \quad (4.68)$$

A fin de establecer la ec 4.67, Bretschneider consideró distribuciones de viento en una línea a una distancia  $R$  del centro del huracán, y analizó 13

huracanes estacionarios para una latitud de 35° norte, con lo que obtuvo

$$\int_{x_1}^{x_2} U_x^2 dx = 88\,000 e^{R\Delta p/50} \quad (4.69)$$

y

$$U_r^2 = 23 U_R \quad (4.70)$$

donde  $U_R$  es la velocidad del viento a una distancia  $R$  del centro del huracán, siendo  $R$  el radio de máximo viento.

Bretschneider con apoyo en dichas ecuaciones, discutió los casos de generación del oleaje debido a huracanes estacionarios y en movimiento.

Si se tiene en cuenta la ec 4.66, se sustituye la 4.69 en las 4.63 y 4.64, y si se consideran las ecs 4.51 y la 4.70, se tiene:

$$H = 16.5e^{\frac{R\Delta p}{100}} (1+0.208\alpha V_d/U_R^{1/3}) \quad (4.71)$$

$$T = 8.6e^{\frac{R\Delta p}{100}} (1+0.104\alpha V_d/U_R^{1/2}) \quad (4.72)$$

donde

$H$  altura del oleaje significativo, en pies

$T$  periodo del oleaje significativo, en segundos

$R$  radio de máximo viento, en millas náuticas

$p$  diferencia entre la presión normal  $p_n$  y el índice de presión central  $p_o$ , en pulgadas de mercurio

$v_d$  velocidad de desplazamiento del huracán, en nudos, y  $\alpha$  el porcentaje efectivo de  $v_d$ , que debe agregarse al campo de viento de un huracán estacionario para obtener el campo de viento de una perturbación ciclónica en movimiento.

Si  $v_d$  es igual a la velocidad de grupo del oleaje, se dice que la tormenta se mueve con velocidad crítica; con las ecs 4.7 y 4.15, se obtiene que

$$v_c = 1.52T \quad (4.73)$$

donde  $T$  es el periodo del oleaje significativo y  $v_c$  la velocidad crítica, en nudos.

De las ecs 4.72 y 4.73 se deduce

$$v_c = 13.1 e^{\frac{R\Delta p}{200}} (1 - 1.36 e^{\frac{R\Delta p}{200}} / U_R^{1/2}) \quad (4.74)$$

Así, si  $v_d = v_c$ , de las ecs 4.71 y 4.72 se obtienen los valores críticos de la altura y periodo del oleaje significativo, siendo estos los valores máximos posibles.

Para los 13 huracanes tipo analizados para una latitud de 35° norte, Bretschneider dedujo que

- La velocidad crítica es 1.9 veces el periodo del oleaje significativo para un huracán estacionario
- La altura de la ola significativa crítica es igual a 1.56 veces la altura del oleaje significativo para una tormenta estacionaria
- El periodo de la ola significativa crítica es igual 1.25 veces el valor de dicho periodo para una tormenta estacionaria.

Si  $V_d > V_c$ , se requiere utilizar el método gráfico de Wilson (subinciso 4.5.1).

Bretschneider y Collins (1964) aplicaron este criterio para calcular en una primera aproximación, los valores máximos de las características del oleaje producido por los huracanes de proyecto para la costa este de Florida. Además, utilizaron el método SMB (inciso 4.4.2) valuando los espectros de oleaje de los huracanes mencionados, a fin de definir las características de los oleajes de diseño para el proyecto Mohole.

#### 4.5.3 Campo de oleaje debido a un huracán

Bretschneider (1972 a,b), con el criterio propuesto en el inciso anterior obtuvo relaciones básicas para deducir las características del oleaje significativo, considerando en forma adimensional los campos de viento debidos a huracanes. En este caso utilizó el último ajuste a las ecs 4.43 y 4.44 del método SMB (tabla 4.4) y generalizó el criterio para cualquier punto dentro del campo de viento.

Para huracanes estacionarios, con un ángulo de deflexión del viento de  $25^\circ$  (inciso 3.4.2), obtuvo del análisis de 51 perturbaciones cilínicas

$$\frac{H_r}{H_R} = \phi\left(\frac{fR}{U_R}, \frac{r}{R}\right) \quad (4.1)$$

donde  $H_r$  es la altura de la ola significativa, a una distancia  $r$  de centro del huracán, y  $H_R$  es la altura máxima de la ola significativa a una distancia  $R$  del centro del huracán, la cual se determina como

$$H_R = K(R\Delta p)^{1/2} \quad (4.2)$$

$$K = \psi (fR/U_R) \quad (4.77)$$

iendo

$f$  parámetro de Coriolis (ec 3.3)

$U_R$  velocidad del viento sobre el agua, a una distancia  $R$  del centro del huracán

$p$  diferencia entre la presión normal  $p_n$  y el índice de presión central  $p_o$

Las ecs 4.75 y 4.77 se muestran, respectivamente, en las figs 4.8 y 4.9.

Para huracanes en movimiento, con velocidad de desplazamiento menor o igual a la crítica, las características del campo de viento y del campo del oleaje sufren un incremento, cuyas relaciones se pueden escribir para el cuadrante derecho de un huracán, como

$$\frac{\Delta H}{H_r} = \frac{\Delta F}{F} = \frac{2\Delta U}{U_r} + \left(\frac{\Delta U}{U_r}\right)^2 \quad (4.78)$$

y

$$\frac{T_r + \Delta T}{U_r + \Delta U} = \frac{T_r}{U_r} \quad (4.79)$$

donde

$$\Delta U = \frac{1}{2} V_d \cos\theta \quad (4.80)$$

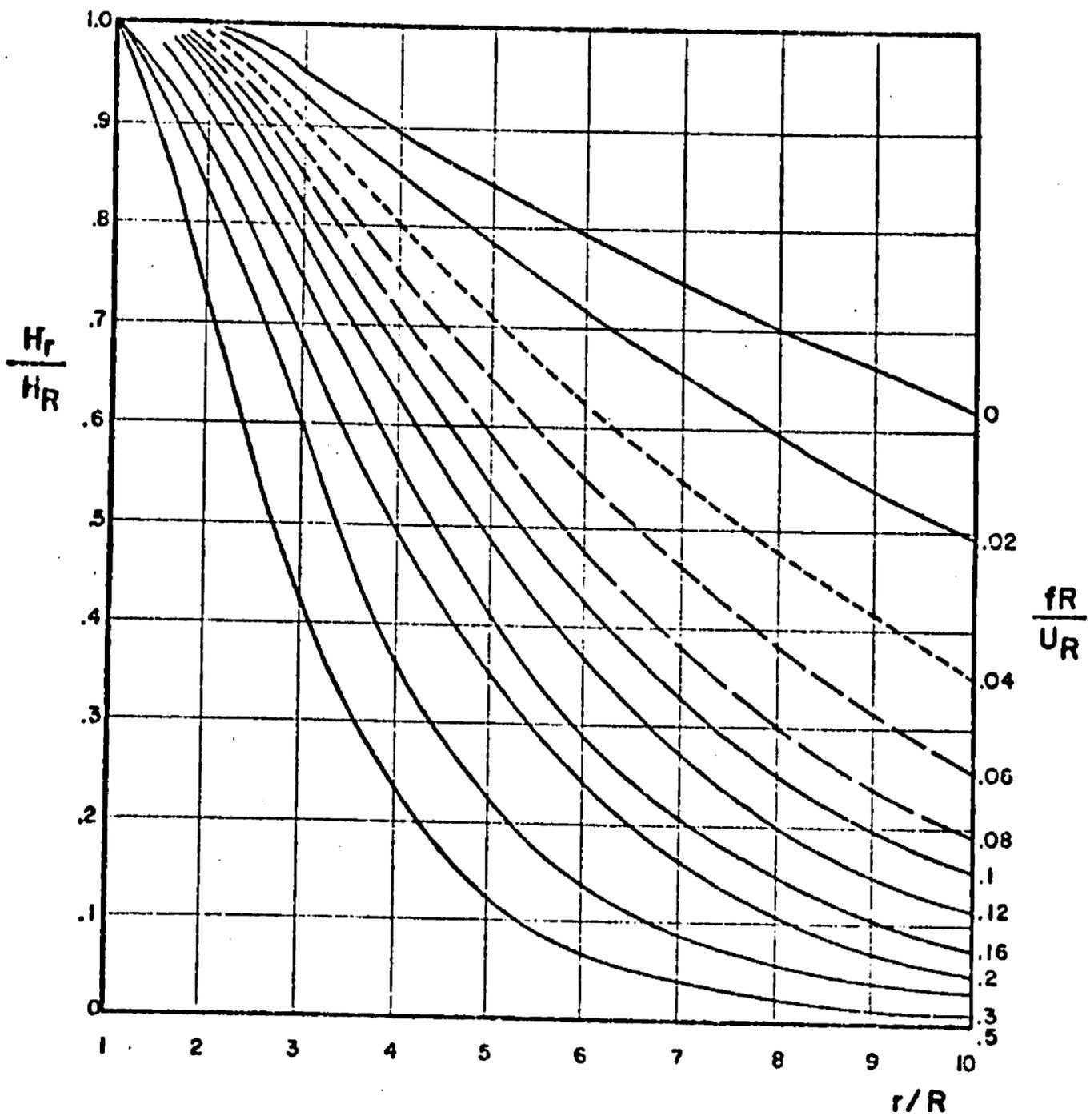


Fig 4.8 Valores de  $H_r/H_R$  contra  $r/R$ , para diferentes valores de  $fR/U_R$   
(Bretschneider, 1972)

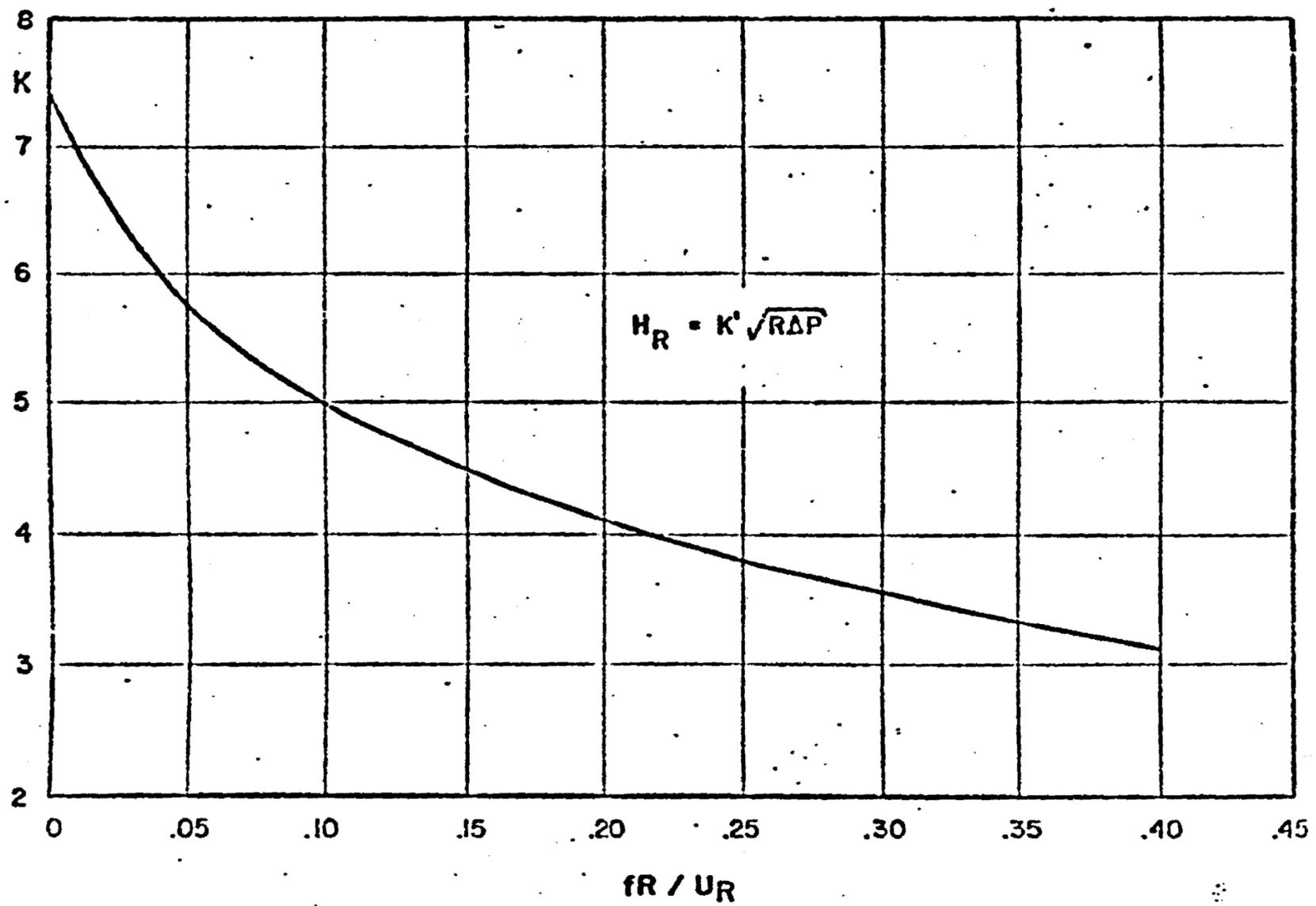


Fig 4.9 Valores de  $K$  contra  $FR/U_R$  para un ángulo de deflexión del viento de  $25^\circ$  (Bretschneider, 1972)

siendo

$H_r$ ,  $T_r$ ,  $U_r$ , y  $F$  las características para un huracán estacionario

$\Delta H$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta U$  y  $\Delta F$  cambios respectivos debido al desplazamiento del huracán

$V_d$  velocidad de desplazamiento

$\theta$  ángulo de posición de  $r$  medido en la dirección contraria al movimiento de las manecillas del reloj, a partir de un eje perpendicular al eje del desplazamiento del huracán.

Este criterio se aplicó a los huracanes estándar de proyecto frente a las costas de EUA, obteniendo las características máximas del oleaje característico.

## 5. OLAJE EN EL AREA EN ESTUDIO DEBIDO A HURACANES

### 5.1 *Antecedentes*

Del capítulo anterior se infiere que es posible determinar el oleaje generado por un huracán, a partir del conocimiento de su campo de viento (caps 2 y 3), con el método gráfico de Wilson (subinciso 4.5.1) y la última revisión efectuada a las ecuaciones del método SMB, o bien conocerlo a partir del criterio adimensional de Bretschneider (subinciso 4.5.3), ajustado a las características de los huracanes en estudio.

Como el objetivo primordial de este trabajo es encontrar para el área en estudio, expresiones generales que permitan valorar el oleaje significativo debido a una perturbación ciclónica a partir de sus características principales y, por ende, conocer las variaciones del oleaje en relación con sus frecuencias de incidencia, en este capítulo se procede de la siguiente manera:

Primero se define el índice de energía producida por un huracán para generar oleaje, y se determina la variación de este respecto a las características de los campos de viento que lo originan. Posteriormente se relaciona el índice de energía con las características del oleaje significativo que produce, previo ajuste de las ecuaciones del método SMB. Este ajuste se hace de acuerdo con las diversas revisiones realizadas del método, el concepto del índice de energía y el rango de valores esperado en el área en estudio.

Conocidas las relaciones entre las características de los huracanes y las del oleaje significativo generado, se integran considerando las variaciones que sufren los campos de viento respecto a un punto frente a la costa, debido a la dirección de desplazamiento de la perturbación.

Finalmente, se valúan las características del oleaje que se pueden esperar en diversos puntos del área en estudio, teniendo en cuenta las probabilidades de incidencia y de ocurrencia de los huracanes. Con esto, se establecen las distribuciones de probabilidades de incidencia de las características del oleaje significativo y sus correspondientes espectros de frecuencia.

## 5.2 Índice de la energía producida por un huracán para generar oleaje

### 5.2.1. Índice de la energía de un huracán

Bretschneider (1957b) (subinciso 4.5.2) después de considerar para el campo de viento de un huracán se tienen grandes velocidades y fetches cortos, definió las relaciones del método SMB para su límite inferior (ecs 4.48 y 4.49), de acuerdo con lo indicado en la tabla 4.4, con lo cual y la definición del índice de la energía de un huracán propuesta por Reid (1955) y que la distribución del viento es variable sobre el fetch, obtuvo la ec 4.67 para valuar el índice de la energía producido por un huracán sobre una línea de generación.

Debido a que la ec 4.48 es básica en la deducción del índice de la energía de un huracán,  $E_h$ , y que sus parámetros de ajuste fueron modificados por Bretschneider (1970) (tabla 4.4), es conveniente ver cómo influyen dichas modificaciones en la definición de  $E_h$ .

La ec 4.48, de acuerdo con el último ajuste, se escribe como

$$\frac{gH}{U^2} = 0.0035 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \quad (5.1)$$

la cual se puede expresar

$$H = 0.0102 U^{1.16} F^{0.42} \quad (5.2)$$

donde

H altura del oleaje significativo, en metros

U velocidad del viento, en nudos

F longitud del fetch, en millas náuticas

Como  $E_h$  es proporcional a la energía del oleaje y esta a su vez es proporcional a  $H^2$ , para una línea x-x del campo de viento de un huracán (Bretschneider 1957b), de acuerdo con la ec 5.2, se tiene que

$$E_h = Ux^{2.32} \Delta x^{0.84} \quad (5.3)$$

donde  $E_h$  es el índice de la energía del oleaje generado en un incremento del fetch  $\Delta x$ , y  $Ux$  es la proyección del viento sobre el agua en la línea x-x.

Si se considera que  $x_1$  y  $x_2$  son los límites de la línea x-x sobre la cual  $Ux \leq 15$  nudos,  $E_h$  para toda la línea se valúa como

$$E_h = \sum_{x_1}^{x_2} U_x^{2.32} \Delta x^{0.84} \quad (5.4)$$

que con incrementos  $x$  constantes, se tiene

$$E_h = \frac{\Delta x^{0.84}}{\Delta x} F \overline{U}^{2.32} \quad (5.5)$$

donde

$$\bar{U}^{2.32} = \frac{\Delta x}{F} \sum_{x_1}^{x_2} U_x^{2.32} \quad (5.6)$$

De la ec 5.5 se deduce que  $E_h$  es variable, dependiendo del incremento de fetch  $\Delta x$  que se emplee. Esto implica que no es factible utilizar la ec 5.4 para definir  $E_h$ , ya que no sería posible acotar su valor; en cambio, con la 4.67 dicho problema no se presenta, ya que en lugar de la 5.1, se usa la expresión

$$\frac{gH}{U^2} = 0.0024 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.05} \quad (5.7)$$

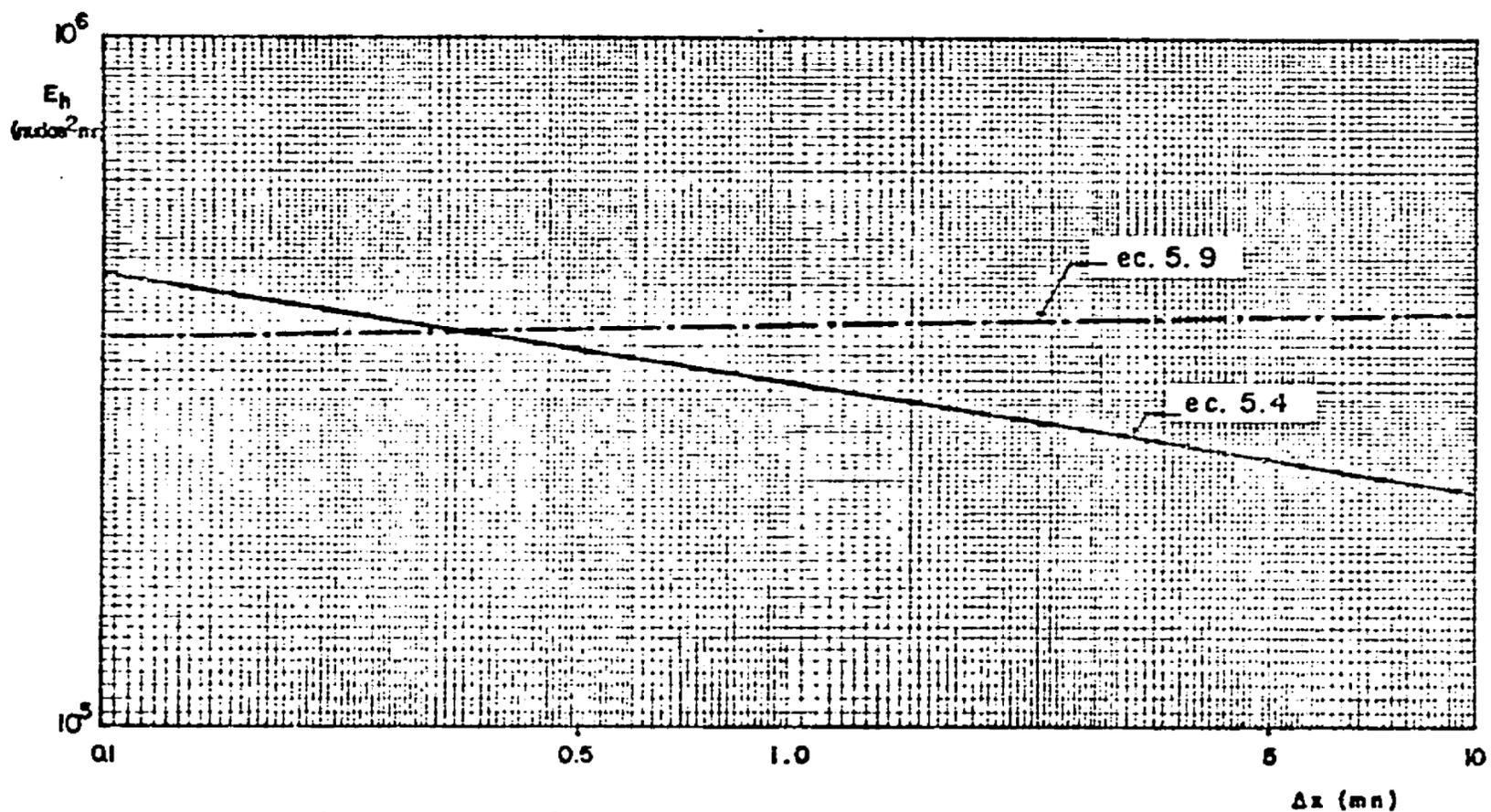
con lo cual

$$H = 0.0170 U F^{0.5} \quad (5.8)$$

por tanto

$$E_h = \sum_{x_1}^{x_2} U_x^2 \Delta x \quad (5.9)$$

En este caso,  $E_h$  no depende del incremento  $\Delta x$  que se utilice, siempre y cuando sea pequeño y tome en cuenta la variación de la distribución del viento. En la fig 5.1 se muestra para un huracán en particular, la variación de  $E_h$  considerando  $\Delta x$  de 0.1 a 10 m mediante las ecs 5.4 y 5.9.



**Características del huracán analizado**

$\phi = 22^\circ$

$p_0 = 27.06$  pulgadas de mercurio

$R = 14.13$  nudos

$V_d = 0$

Características de la recta de generación.

$X_0 = \infty$

$Y_0 = 14.13$

Fig 5.1 Variación del índice de energía del huracán, en relación con el incremento del fetch usado, para el análisis de la distribución de velocidades sobre una línea

...  
 a  
 n  
 i  
 r  
 e  
 r  
 a  
 A  
 pa  
 ca  
 del  
 5.2.  
 Si s  
 hurra  
 camp  
 donde  
 el áng  
 estudi

se deduce que la ec 5.9 es más conveniente para definir el valor puede esperar del índice de la energía del huracán, para generar en una cierta línea de su campo de viento. Además, se tiene el p me, si bien la 5.9 define  $E_h$ , lógicamente la relación más co rrec disponer de mayor información) entre la altura de la ola sig- nific las características del campo de viento, es la correspondiente a la no a la 5.7.

A fin de encontrar un equilibrio entre las ecs 5.1 y 5.7, y utilizar la 5.9 para  $E_h$ , se decidió estudiar las variaciones de  $E_h$  respecto a las caracte rísticas de los huracanes, para posteriormente relacionarlo con las del nificante deducido de la 5.1.

### 5.2.2 Relación de $E_h$ respecto a las características del huracán

Si se toma la ec 5.9 como representativa del índice de la energía del huracán a producir oleaje, en cualquier línea de generación dentro del campo de viento, este se valúa como

$$E_h = \sum_{x_1}^{x_2} (V_o \cos \beta)_x^2 \Delta x \quad (5.10)$$

donde  $V_o$  es la velocidad media del viento sobre el agua para cada  $\Delta x$ , y  $\beta$  el ángulo que forma la dirección de  $V_o$  respecto a la línea x-x que se esté estudiando.

Además, si la velocidad media del viento sobre el agua para cada  $\Delta x$  es el valor que esta tiene en el punto medio de  $\Delta x$ , de la ec 5.15 se tiene

$$V_o = 89.95(29.92 - p_o)^R e^{-R/r)^{1/2} - 0.23r \text{ sen } \phi + 0.5 V_d \text{ cos } \gamma \quad (5.11)$$

donde  $r$  es la distancia del centro del huracán al punto medio del  $\Delta x$ , que se analice.

A fin de conocer una expresión directa, que permita calcular el índice de la energía máxima que se tiene dentro del campo de viento de un huracán en cierta dirección, de las ecs 5.10 y 5.11 se puede considerar que

$$E_h \text{ máx} = \phi(R, V_d, p_o, \phi, \rho) \quad (5.12)$$

De dicho planteamiento, es factible utilizar para su análisis el teorema de Buckingham, para lo cual la ec 5.12 se puede representar más apropiadamente como

$$E_h \text{ máx} = \psi(R, V_d, \Delta p, f, \rho) \quad (5.13)$$

donde  $E_h \text{ máx}$  tiene unidades de  $(L^3 T^{-2})$ ;  $R$  es el radio de máximo viento, con unidades  $(L)$ ;  $V_d$  es la velocidad de desplazamiento del huracán, con unidades  $(LT^{-1})$ ;  $\Delta p$  es la diferencia entre presión normal  $p_n$  y la presión central  $p_o$ , con unidades de  $(FL^{-2})$ ;  $f$  es el parámetro de Coriolis (ec 3.3), con unidades  $(T^{-1})$ ; y  $\rho$  es la densidad del aire, con unidades  $(FT^2 L^{-4})$ .

En este planteamiento, se acepta a priori que  $E_h$  máx también es función de la posición de la recta de generación donde ocurre, la cual si se define con su distancia mínima al centro del huracán, esta se puede representar en coordenadas polares con los parámetros  $r/R$  y  $\theta$ , los cuales son factibles de omitirse en este análisis y considerarlos posteriormente.

Así, en la ec 5.13 se tienen seis variables y tres unidades dimensionales, con lo cual, de acuerdo con el teorema de Buckingham, las soluciones serán función de tres productos adimensionales con tres variables cada uno. Con el criterio simplificado del análisis adimensional propuesto por Bowman y Hansen (1959), del análisis de la ec 5.13 se obtiene que:

$$\frac{E_h \text{ máx } f}{(\Delta p/\rho)^{3/2}} = \psi_1 \left[ \frac{fR}{(\Delta p/\rho)^{1/2}}, \frac{V_d}{(\Delta p/\rho)^{1/2}} \right] \quad (5.14)$$

donde

$\frac{E_h \text{ máx } f}{(\Delta p/\rho)^{3/2}}$       parámetro del índice de la energía máxima debido a un huracán, el cual se puede expresar como PE

$\frac{fR}{(\Delta p/\rho)^{1/2}}$       parámetro de las características principales del huracán, definiéndose como PC

y

$\frac{V_d}{(\Delta p/\rho)^{1/2}}$       parámetro que involucra a la velocidad de desplazamiento, y conviene indicarse en la forma PV

TABLA 5.1 ANALISIS CARACTERISTICOS DE GENERACION DE OLAJE DEBIDOS A HURACANES ESTACIONARIOS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No	Q °L	Po pulg	R m n	Posición Eh máx r/R	Eh máx nudos <sup>2</sup> mn	P E	P C	F der m n	F izq m n	F total m n	U nudos
1	25°	27.15	19.95	2.00	521262	0.02224	0.02551	205	50	255	70.6
2	25	27.38	22.36	1.85	512500	0.02491	0.02935	205	55	260	58.7
3	25	28.02	30.97	1.30	481170	0.03614	0.04781	205	50	255	56.2
4	25	28.64	42.99	1.20	370390	0.05032	0.08085	195	55	250	54.1
5	23	27.09	14.30	2.30	422650	0.01615	0.01672	180	45	225	69.5
6	23	27.34	15.77	2.10	410804	0.01803	0.01931	180	45	225	67.9
7	23	28.03	20.66	1.70	350588	0.02454	0.02956	175	45	220	60.7
8	23	28.71	26.96	1.30	263459	0.03600	0.04822	155	40	195	52.8
9	22	27.06	9.17	2.4	301589	0.01087	0.01023	140	30	170	70.0
10	22	27.06	14.13	2.1	427391	0.01541	0.01576	180	40	220	72.1
11	22	27.06	19.09	2.1	539123	0.01944	0.02129	215	50	265	71.2
12	22	28.00	14.13	2.0	271179	0.01777	0.01923	145	35	180	59.5
13	22	29.00	14.13	2.0	114048	0.02254	0.02778	95	30	125	40.5
14	21	27.03	9.12	2.4	305465	0.01037	0.00968	140	30	170	70.4
15	21	27.30	9.56	2.4	285172	0.01122	0.01066	140	30	170	66.9
16	21	28.04	10.19	2.2	206390	0.01336	0.01341	120	30	150	57.9
17	21	28.77	9.07	2.3	106860	0.01446	0.01526	85	25	110	44.5
18	19	26.97	18.27	2.1	557937	0.01669	0.01744	225	50	275	72.9
19	19	27.26	21.06	2.0	553159	0.01932	0.02117	230	55	285	69.8
20	19	28.05	31.46	1.5	493210	0.02923	0.03771	230	60	290	61.5
21	19	28.84	47.93	1.2	355502	0.04800	0.07560	215	60	275	50.0

UNIVERSIDAD DE GUAYMAS

Así, la ec 5.14 se puede presentar como

$$PE = \psi_1 (PC, PV) \quad (5.15)$$

A fin de establecer la relación indicada en esta ecuación, se seleccionaron en forma aleatoria las características de 21 huracanes dentro del área en estudio, con sus respectivos rangos de fluctuaciones. El análisis se inició con campos de viento estacionarios y posteriormente se involucró el desplazamiento.

### 5.2.3 Determinación de la $E_h$ máx para huracanes estacionarios

Considerando nula la velocidad de desplazamiento del huracán,  $V_d=0$ , la ec 5.15 se puede escribir

$$PE = \psi_2 (PC) \quad (5.16)$$

en la que PE es el parámetro del índice de energía máxima para un huracán estacionario.

Con las características de los 21 huracanes mencionados (tabla 5.1, col 2 a 4), se calculó el índice de energía para diversas líneas de generación hasta encontrar en cada caso las condiciones máximas. Para ello se elaboró un programa para computadora (Apéndice A).

La posición de las líneas de generación máximas se obtuvieron considerando su distancia mínima al centro del huracán. En la tabla 5.1, cols 5 a 12, se muestran respectivamente para cada huracán analizado la posición de la línea de generación máxima, el índice de la energía máxima determinada de acuerdo con la ec 5.10, el parámetro de este, el parámetro de las características PC, las longitudes del fetch a la derecha e izquierda del punto de la recta analizada con distancia mínima al centro del huracán, la longitud total del fetch y la velocidad del viento sobre la línea de generación en el punto de distancia mínima (fig 5.2).

Mediante la ec 5.16, se relacionaron por mínimos cuadrados las parejas de valores de PC y PE (tablas 5.1, cols 7 y 8), considerando expresiones lineales y exponenciales.

Así, se encontró que

$$PE = 0.0044 + 0.4285 PC \quad (5.17)$$

es la ecuación que agrupa los valores analizados con un coeficiente de correlación de 0.992. La relación entre los valores estudiados y la ec 5.17, se indican en la fig 5.3.

Como los parámetros PE y PC contienen variables comunes, es posible que exista una correlación espuria entre ambos (Benson, 1965). Con esto en mente se correlacionó  $E/(\Delta p/\rho)$  contra R, y se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.936. Aunque es lógico pensar que es el coeficiente correcto, se

ve que las variables comunes influyen en última instancia en el valor del índice de la energía máxima,  $E_h$  máx, al afectar el término independiente de la ec 5.17. Además, como esta expresión se utilizará para el rango de valores deducidos, se consideró conveniente procesarla y usarla para valuar  $E_h$  máx; así, al sustituir las expresiones de los parámetros, y aceptar una presión normal de 29.92 pulg y una densidad del aire  $\rho$  de  $1.175 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>, así como la ec 3.3, la 5.17 se transforma en

$$E_h \text{ máx} = 13\ 913 (29.92 - p_o)^{7/6} (R)^{2/3} (\text{sen } \phi)^{-1/3} \quad (5.18)$$

donde

- $E_h$  máx Índice de energía máxima generado por un huracán estacionario, en nudos<sup>2</sup> millas náuticas
- $p_o$  Índice de presión central en pulg de mercurio
- $R$  radio de máximo viento, en millas náuticas
- $\phi$  latitud en grados

Es interesante hacer notar, que al aplicar la ec 5.18 para valuar la energía máxima de los huracanes estacionarios analizados por Bretschneider (1957b) para una latitud de 35°, se obtienen mejores resultados que con la ecuación propuesta por Bretschneider (4.69). La comparación de este análisis se muestra en la tabla 5.2. Finalmente, la ec 5.18 es más general que la 4.69, pues toma en cuenta la latitud a la cual se encuentra el huracán.

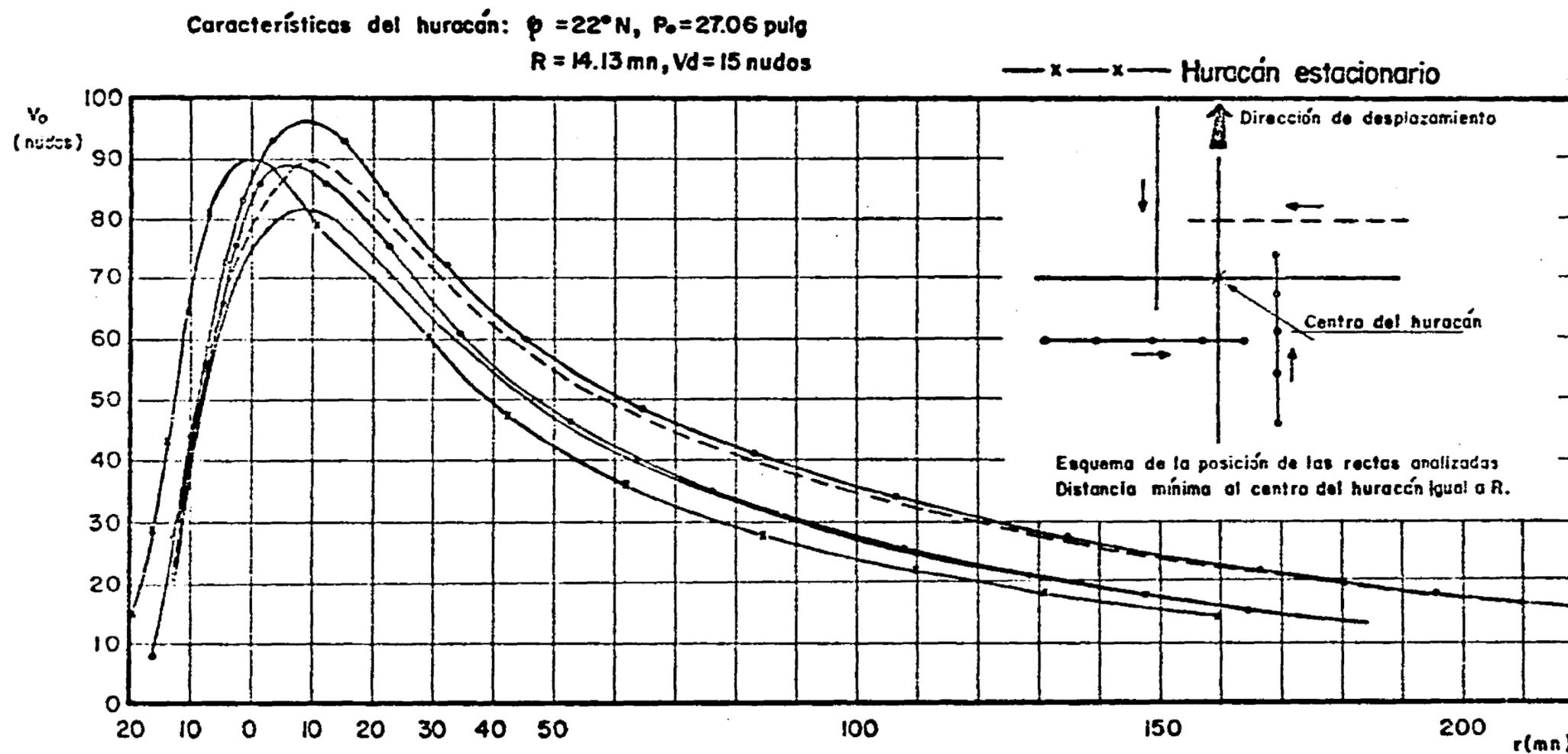


Fig 5.2 Distribución de velocidades de viento sobre el agua,  $V_0$ , en diversas rectas, producidas por el campo de viento de un huracán estacionario y con desplazamiento

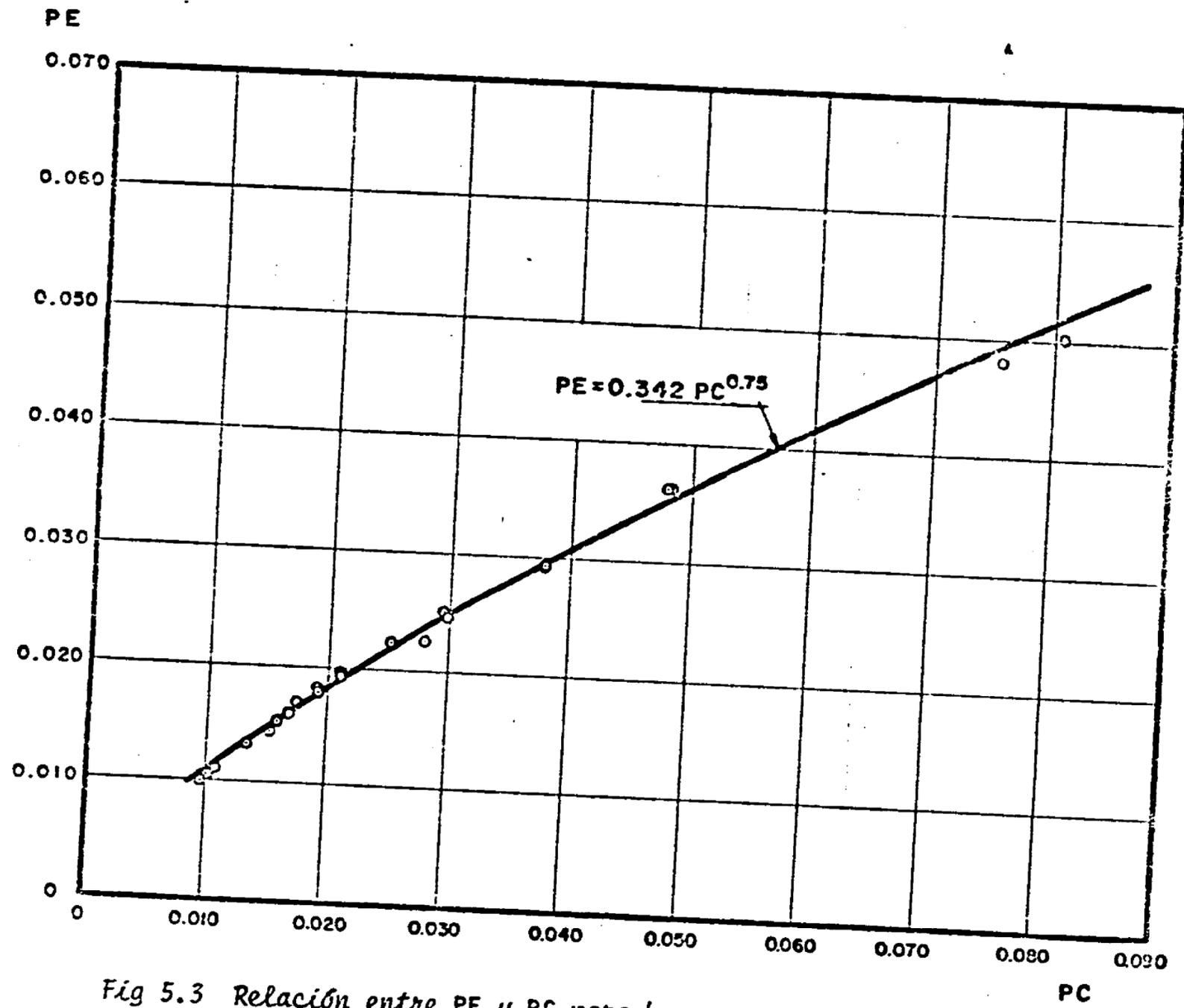


Fig 5.3 Relación entre PE y PC para huracanes estacionarios

TABLA 5.2 COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL INDICE DE ENERGIA MAXIMA DE ACUERDO CON LAS ECS 4.69 Y 5.18, EN RELACION CON LA EC 5.9 APLICADA A CAMPOS DE VIENTO DE HURACANES QUE SE HAN PRESENTADO EN LA COSTA ESTE DE ESTADOS UNIDOS

Huracanes seleccionados por Bretschneider (1957 b) Analizados para una latitud de 35°				Indices de energía ( nudos <sup>2</sup> mn )		
No.	Fecha	R (mn)	$\Delta p$ (pulg de mer.)	Directo ec 5.9	Inferido ec 4.69	Inferido ec 5.18
1	10-15-54	36	2.31	488200	464303	484850
2	9-18-55	50	1.46	354010	378924	358408
3	8-12-55	45	1.40	323340	310237	318697
4	12- 2-25	54	1.02	225920	264790	244321
5	9- 3-13	39	1.15	238300	217487	226979
6	8-17-55	45	0.82	160220	184074	168064
7	9-17-06	37	0.99	189460	183082	188764
8	8-11-40	27	1.19	181960	167325	184614
9	8-23-11	27	1.05	159060	155141	159532
10	8-14-53	30	0.79	118940	141364	122300
11	10-15-47	12	1.33	136250	122552	127300
12	8- 1-44	19.5	0.76	84710	118361	89076
13	8-30-52	12	0.95	83620	110536	82670

respecto a la posición de la línea de generación del oleaje, donde el índice de la energía producida por un huracán estacionario es máximo (tabla 5.1, col 5), se encontró que está ligado con el radio de máximo viento,  $R$ , obteniéndose con un coeficiente de correlación de 0.93 la ecuación:

$$\frac{r}{R} = 2.619 - 0.0345R \quad (5.19)$$

donde  $r$  es la distancia mínima de la línea de generación al centro del huracán, en millas náuticas, y  $R$  el radio de máximo viento, en millas náuticas.

Dicha expresión corresponde a valores del radio de máximo viento menores o iguales a 47 millas náuticas. Para valores mayores se debe considerar que  $r/R$  es igual a la unidad. En la fig 5.4 se muestra la relación entre los diversos valores analizados y la ec 5.19. Finalmente, se obtuvo la expresión que permite calcular la longitud del fetch en la línea de generación, encontrándose que con un coeficiente de correlación de 0.94

$$F = 0.183 E_h^{\text{máx}^{0.553}} \quad (5.20)$$

donde  $F$  es la longitud total del fetch, en millas náuticas;  $E_h^{\text{máx}}$  es el índice de energía máxima generado por un huracán estacionario (ec 5.18), en nudos<sup>2</sup> millas náuticas.

Además, se dedujo que el fetch a la derecha del punto de distancia mínima es aproximadamente cuatro veces el fetch a la izquierda. Esto, permite

acotar el fetch de la línea de generación respecto al centro del huracán.

#### 5.2.4 Obtención de $E_h$ máx para huracanes con desplazamiento

En forma análoga al proceso seguido en el inciso anterior, se realizó el análisis de  $E_h$  máx para huracanes con desplazamiento. Para ello se usaron las mismas características de los 21 huracanes estudiados, solo que con diversas velocidades de desplazamiento, seleccionadas en forma aleatoria y dentro del rango de variación encontrada en el área en estudio. (tabla 5.3, cols 1 a 5).

Como se observó en el cap 3, inciso 3.5, un huracán al desplazarse produce un campo de viento asimétrico, lo que ocasiona campos de generación de oleajes variables dependiendo de la posición de su línea correspondiente al centro del huracán. Eso implica que para conocer las características de la línea de generación con un índice de máxima energía, se requiere para cada campo de viento producido por una perturbación ciclónica, analizar diversas líneas de generación considerando su distancia mínima al centro del huracán y la posición de estas.

Al tomar en cuenta que las líneas de energía máxima generadas por el huracán en movimiento se hallan en el cuadrante superior derecho si el eje de las ordenadas se orienta en dirección del desplazamiento (fig 5.2), se analizaron diversas líneas de generación con distancias mínimas  $r/R$  al centro del huracán entre 1.0 a 2.5 y ángulos de 0 a 45°, variando los primeros en

TABLA 5.3 ANÁLISIS CARACTERÍSTICAS

TABLA 5.3 ANALISIS CARACTERISTICOS DE GENERACION DE OLEAJE DEBIDOS A TROPICANES CON DESPLAZAMIENTO

1	2	3	4	5	6		8	9	10	11	12	13	14
					Posición								
					Eh máx								
tur	$\psi$ (rad)	Po (pulg)	R (mm)	Vd (nudos)	r/R	$\theta$	Eh máx	PE	PC	PV	F der	F izq	F total
1	25	27.15	19.95	10	1.3	20	624803	0.02666	0.02551	0.05778	235	30	265
2	25	27.33	22.36	11	1.2	20	633691	0.03080	0.02955	0.05637	245	30	275
3	25	28.02	30.97	4	1.2	16	503196	0.03780	0.04781	0.02790	220	45	265
4	25	28.64	42.99	18	1.0	24	529544	0.07194	0.03068	0.15299	270	35	305
5	23	27.09	14.30	5	2.0	17	463439	0.01771	0.01672	0.02358	195	35	230
6	23	27.34	15.77	12	1.7	20	517333	0.02271	0.01931	0.07184	225	25	250
7	23	28.03	20.66	6	1.2	19	396587	0.02776	0.02956	0.04197	190	30	220
8	23	28.71	26.96	19	1.0	25	400840	0.05478	0.04822	0.16609	230	25	255
9	22	27.06	9.17	12	2.0	21	388105	0.01399	0.01023	0.06823	185	20	205
10	22	27.06	14.13	5	2.0	17	469350	0.01692	0.01576	0.02843	200	35	235
11	22	27.06	19.09	14	1.2	22	703747	0.02537	0.02129	0.07960	270	25	295
12	22	28.00	14.13	17	1.2	23	400128	0.02623	0.01923	0.11797	210	15	225
13	22	29.00	14.13	20	1.2	25	208162	0.04114	0.02778	0.20050	165	15	180
14	21	27.03	9.12	7	2.2	20	353712	0.01201	0.00968	0.03959	170	25	195
15	21	27.30	9.56	16	1.8	22	405801	0.01596	0.01066	0.09505	205	15	220
16	21	28.04	10.19	10	1.9	19	260458	0.01686	0.01341	0.07013	155	20	175
17	21	28.77	9.07	20	1.2	25	192031	0.02598	0.01526	0.17934	150	10	160
18	19	26.97	18.27	8	1.9	18	645804	0.01932	0.01744	0.04479	260	40	300
19	19	27.26	21.06	15	1.2	22	742967	0.02595	0.02117	0.03844	300	25	325
20	19	28.05	31.46	13	1.1	20	653068	0.03870	0.03771	0.09141	295	35	330
21	19	28.84	47.93	9	1.0	17	428672	0.05788	0.07560	0.03328	255	45	300

intervalos de 0.1 y los segundos cada grado. De esta manera, se estudiaron para cada huracán alrededor de 200 rectas de generación mediante el programa del Apéndice B.

Del análisis anterior se obtuvo la posición de la recta con índice de energía máxima para cada huracán seleccionado. Los valores encontrados de distancia máxima y su ángulo correspondiente se indican en la tabla 5.3, cols 6 y 7; en las cols 8 a 14 se muestran respectivamente para cada huracán estudiando su índice de energía máxima, los parámetros PE, PC, PV, las longitudes del fetch a la derecha e izquierda del punto de cada recta analizada con distancia mínima al centro del huracán y la longitud total del fetch.

A fin de encontrar una expresión que permitiera valuar el índice de energía máxima generado por un huracán de desplazamiento, se procedió a correlacionar los diversos parámetros involucrados en la generación, teniendo en cuenta la ec 5.15. Después de una serie de pruebas, se dedujo la ecuación

$$PE' = PE(1+3.90 PV) \quad (5.21)$$

En este caso, PE' es el parámetro del índice de la energía máxima para un huracán con desplazamiento, PE es el mismo parámetro, solo que para un huracán estacionario (ec 5.17) y PV el parámetro que involucra a la velocidad de desplazamiento. En la fig 5.5 se muestra la relación entre los valores estudiados y la ec 5.21.

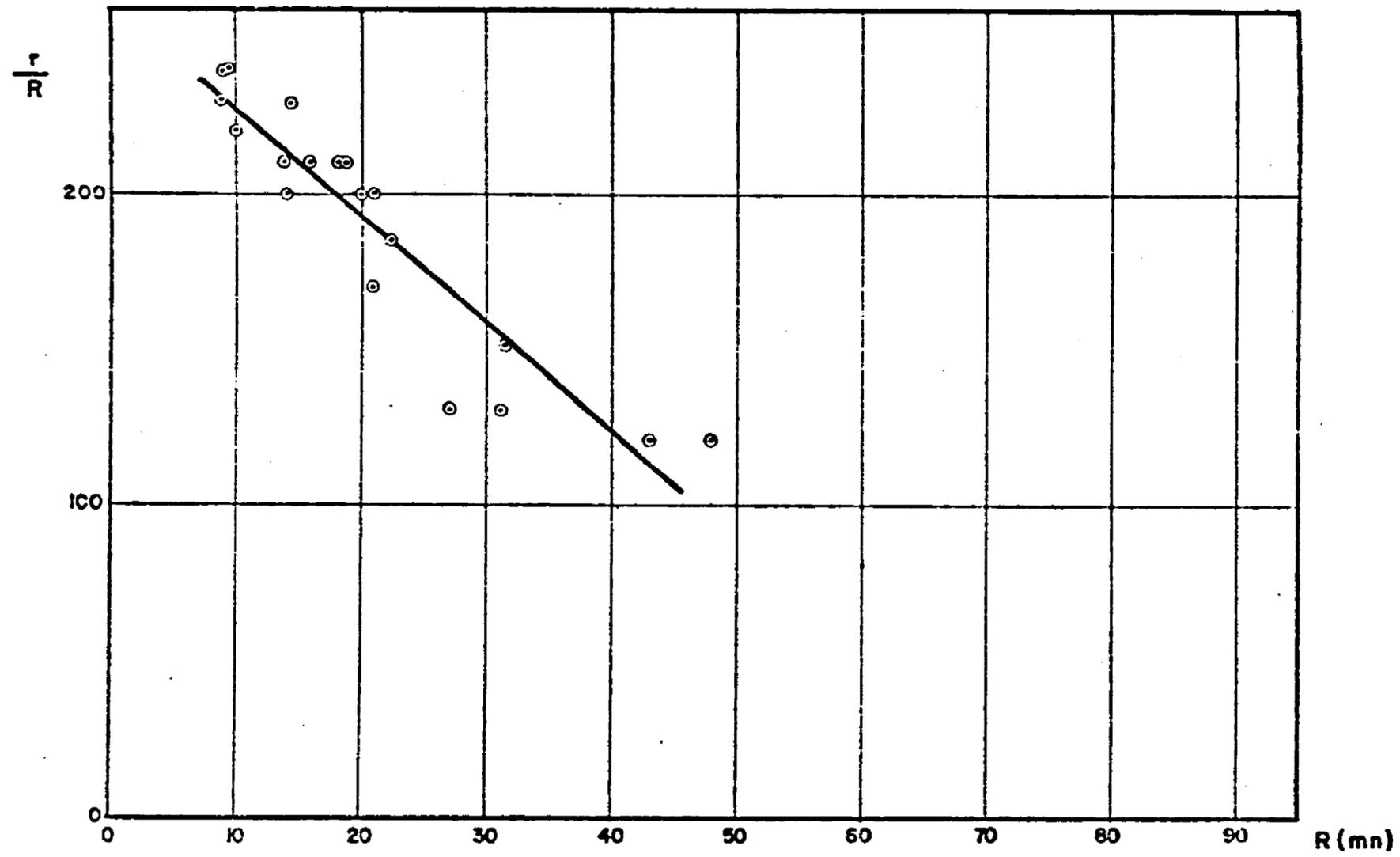


Fig 5.4 Relación entre la distancia mínima de la recta de máximo índice de energía y el radio de máximo viento

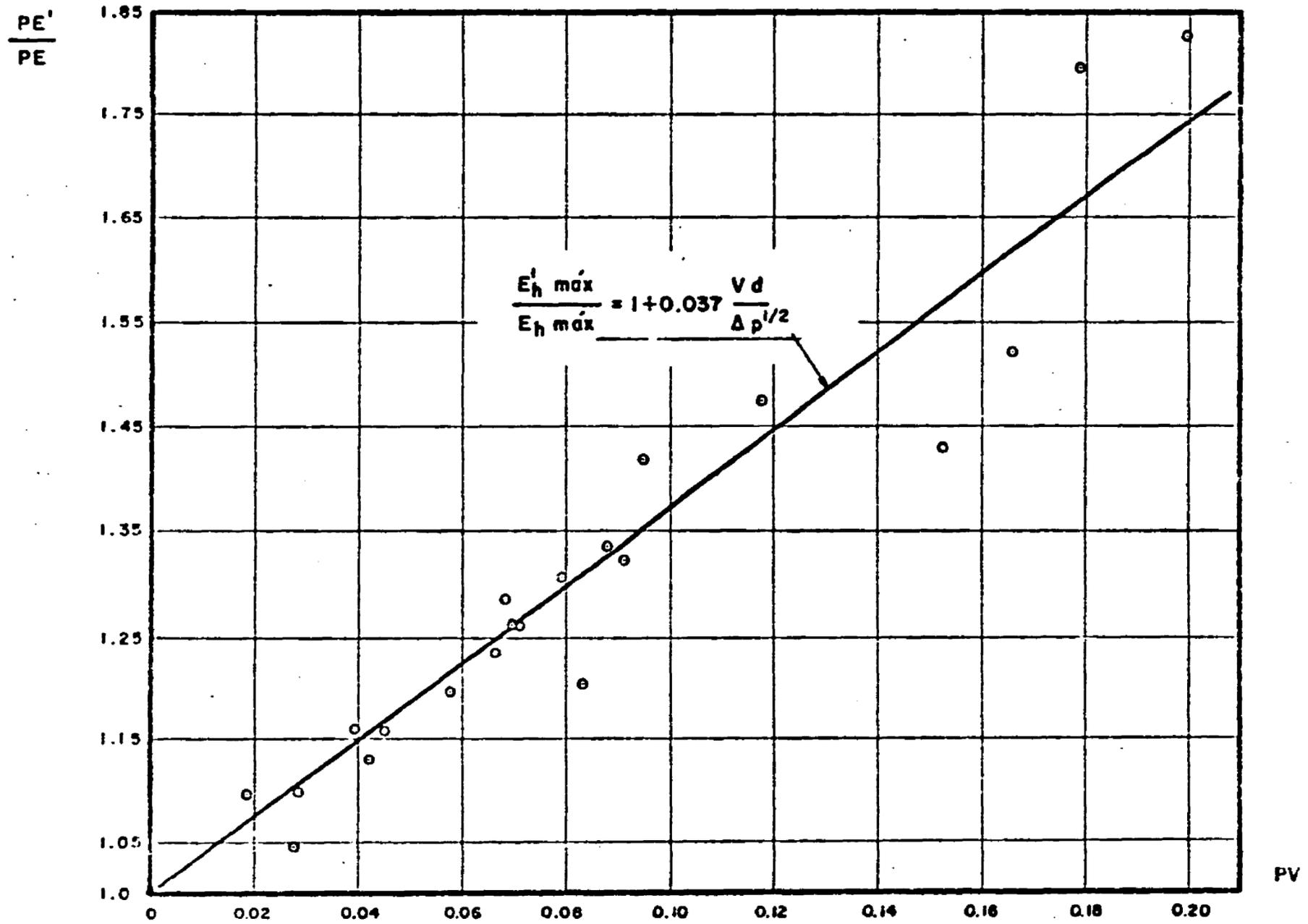


Fig 5.5 Variación del índice de energía máxima producida por un huracán respecto a su velocidad de desplazamiento

con una densidad del aire  $1.175 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ , una presión normal de 29.92 pulg y las expresiones (5.21) y (5.22) definen los parámetros, la ec 5.21 se transforma a

$$E_h^{\text{máx}} = E_h^{\text{máx}} \left[ \frac{V_d}{(29.92 - p_o)^{0.5}} \right] \quad (5.22)$$

donde

- $E_h^{\text{máx}}$  Índice de energía máxima generado por un huracán con desplazamiento, en millas náuticas
- $E_h^{\text{máx}}$  Índice de energía máxima generado por un huracán estacionario, en nudos<sup>2</sup> y millas náuticas
- $p_o$  Índice de presión central, en pulg de mercurio
- $V_d$  velocidad de desplazamiento del huracán, en nudos

A partir de la ec 5.22 y la 5.18 se puede determinar el índice de la energía máxima generado por un huracán con desplazamiento, conociendo las características de este tipo de huracanes.

En cuanto a la posición de las rectas con índice de energía máxima, definidas por su distancia al centro del huracán y el ángulo que esta forma respecto a un eje perpendicular al desplazamiento (tabla 5.3, cols 6 y 7), estas se relacionan con las ecuaciones:



el máximo valor de  $E_h^{\text{máx}}$  se obtiene para  $(r/R)^1$  de 1.2, pero dentro de un rango de valores comprendidos entre 1 y 2,  $E_h^{\text{máx}}$  es el mismo, con lo cual se concluyó que no afecta en la aproximación general de las ecuaciones, utilizar la ec 5.23 para valorar  $(r/R)^1$ .

Además, se dedujo para valorar el fetch total (tabla 5.3, col 14) la ecuación

$$F' = F + 2.47 Vd \quad (5.25)$$

donde

$F'$  fetch total de la recta con el índice de energía máxima para un huracán con desplazamiento, en millas náuticas

$F$  es similar, solo que para un huracán estacionario, en millas náuticas

$Vd$  velocidad de desplazamiento del huracán, en nudos

La variación del fetch a la derecha del punto con distancia mínima se encontró que es del orden de 8.8 veces el fetch a la izquierda (tabla 5.3, cols 12 y 13), con lo que es posible definir la posición de la zona de generación sobre la recta con índice de máxima energía.

Para terminar el análisis, se procedió al estudio de la variación del índice de energía máxima manteniendo constante la distancia mínima de la línea de generación, variando su posición ( $\theta$ ).

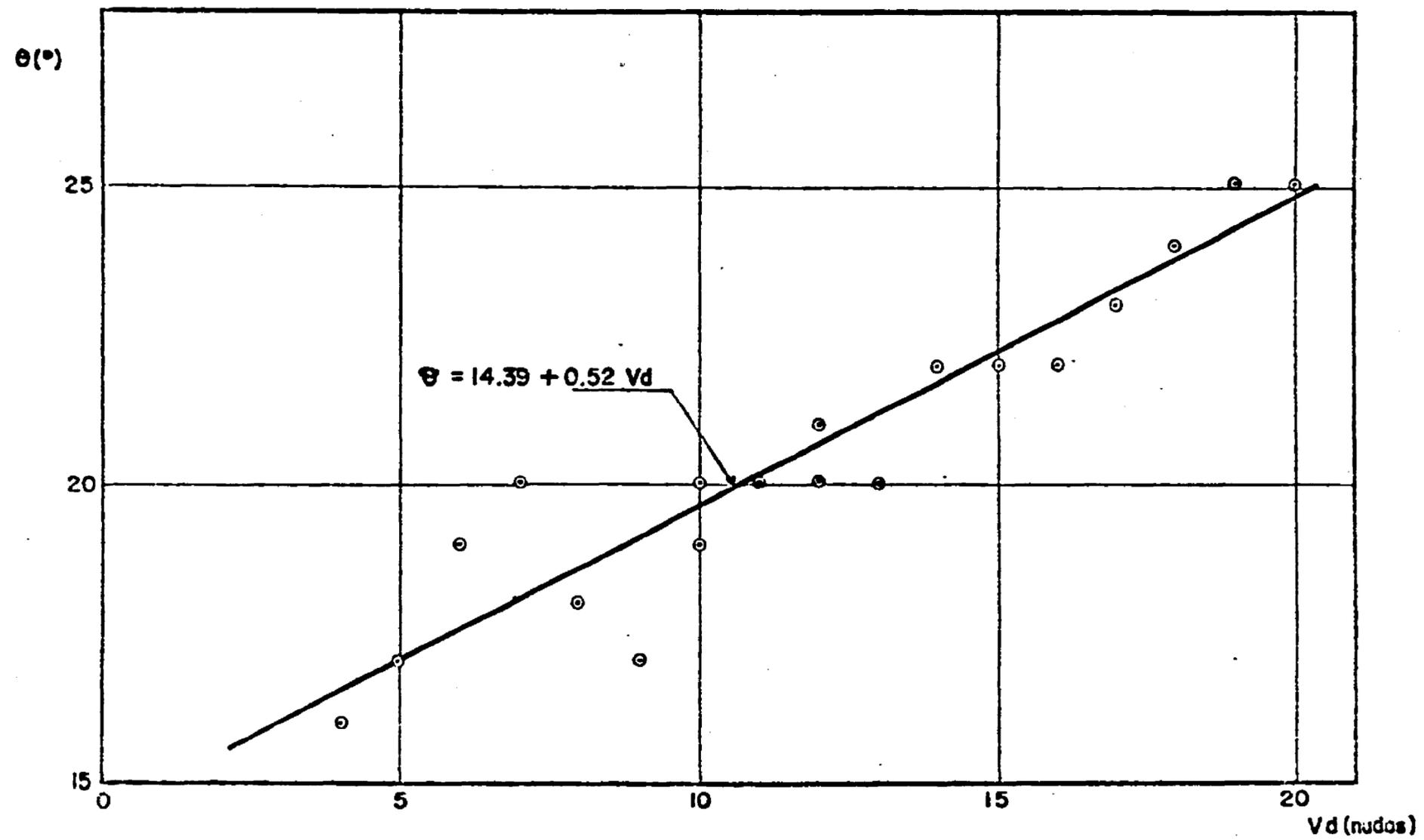


Fig 5.6 Variación del ángulo de posición de la recta de distancia mínima a la línea de máxima generación respecto a la velocidad de desplazamiento de un huracán

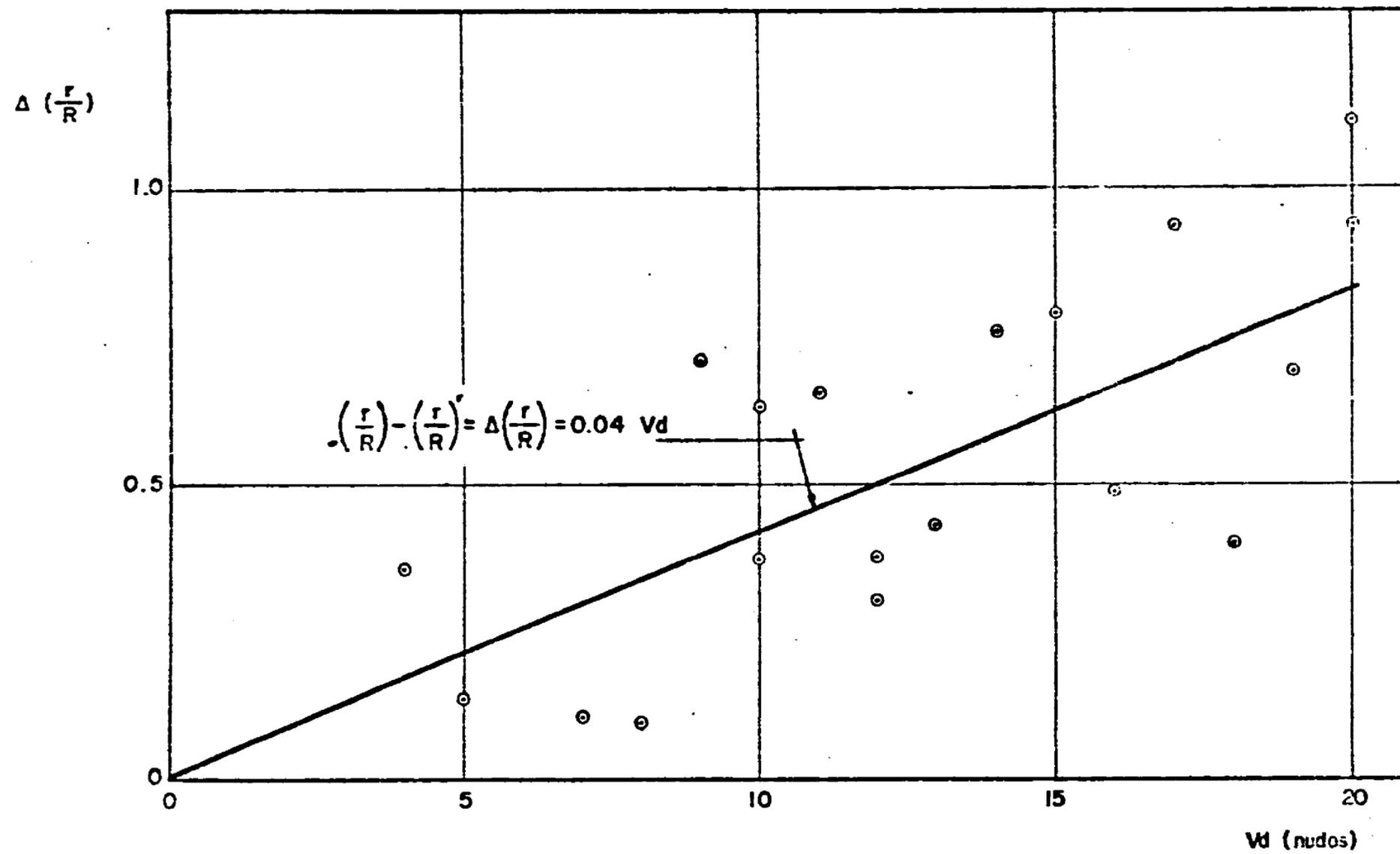


Fig 5.7 Relación entre los cambios de posición de la recta de generación respecto a la velocidad de desplazamiento

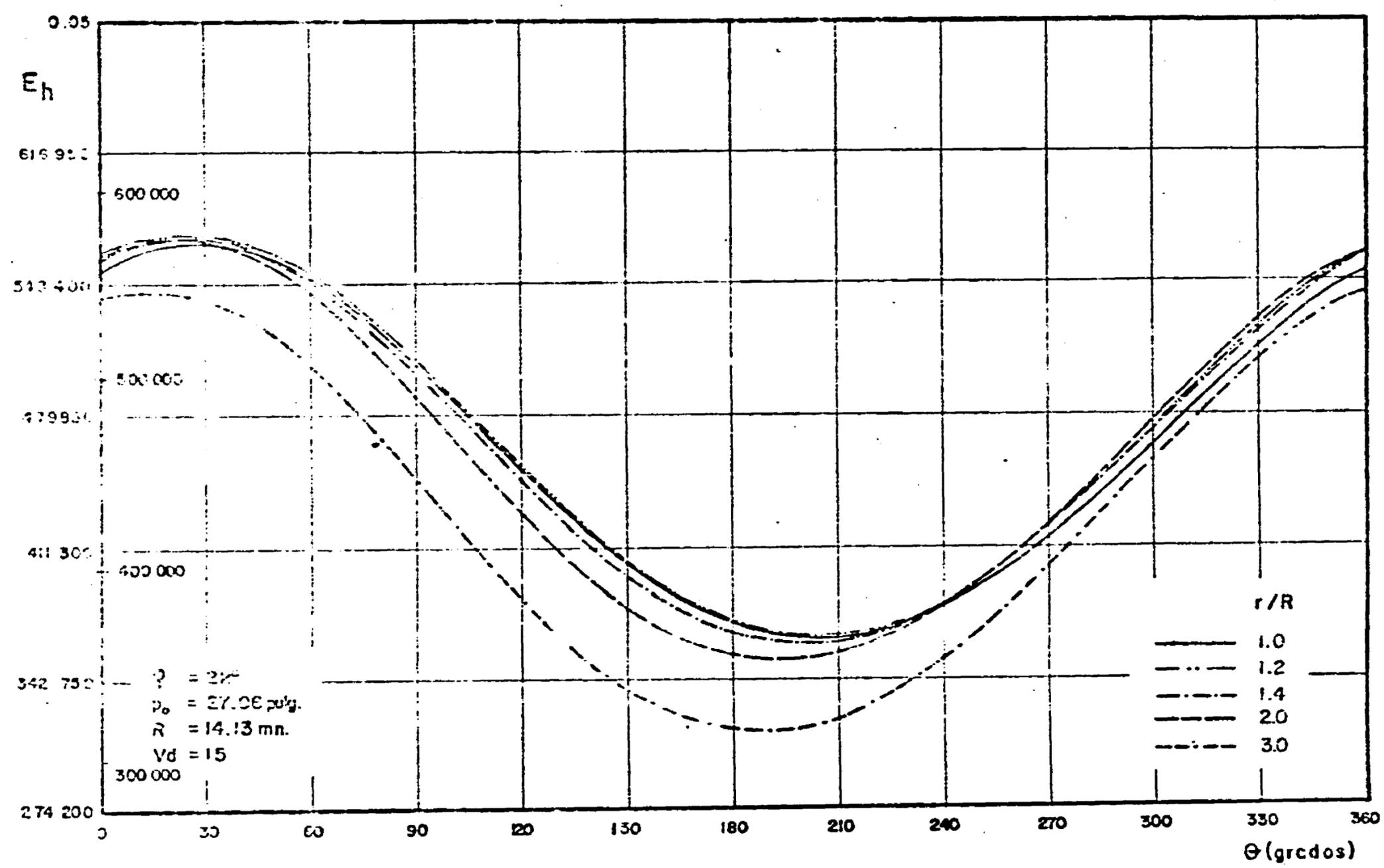


Fig 5.8 Variación del índice de energía  $E_h$  respecto a su posición  $\frac{r}{R}$  y  $\theta$

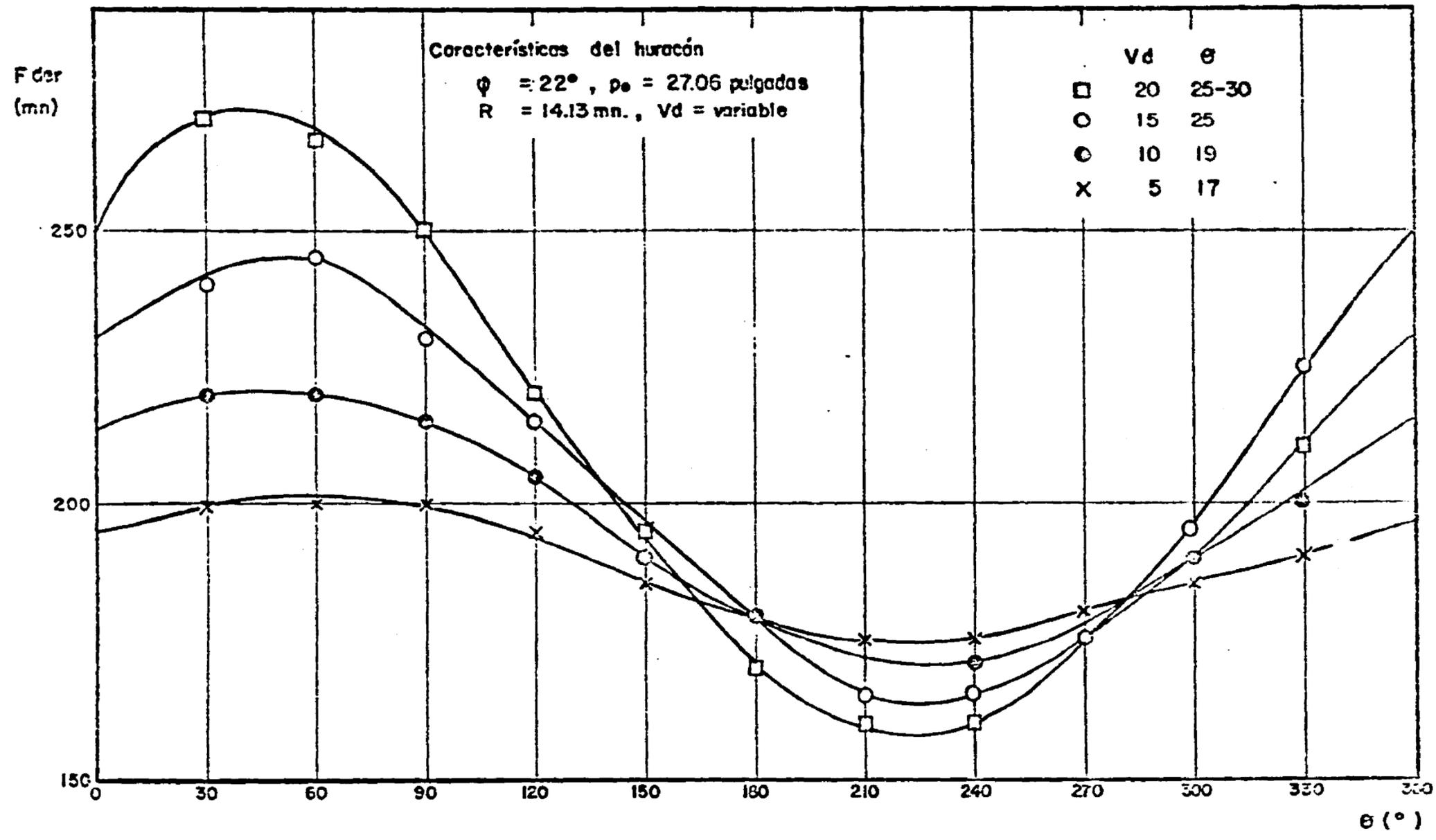


Fig 5.9 Variación del fetch derecho en relación con el ángulo de la recta de distancia mínima y diversas velocidades de desplazamiento del huracán

Como puede observarse en la fig 5.8, la variación del índice de energía es cíclica en cualquier recta con distancia mínima  $(r/R)'$ . Del análisis de los huracanes con desplazamiento seleccionados para el área en estudio, se encontraron estas fluctuaciones se pueden valorar de acuerdo con la expresión:

$$(E'_h)_{\theta'} = \frac{\epsilon}{100} (E'_h)^{\text{máx}}_{\theta} \quad (5.26)$$

donde

$(E'_h)^{\text{máx}}_{\theta}$  índice de máxima energía, sobre una recta con distancia mínima al centro del huracán  $(r/R)'$  y un ángulo  $\theta$

$(E'_h)_{\theta'}$  índice de energía sobre una recta con distancia mínima al centro del huracán  $(r/R)'$  y un ángulo  $\theta'$

$\epsilon$  porcentaje de variación, que se valúa como

$$\epsilon = (100 - 1.2Vd) + 1.2Vd \cos(\theta' - \theta) \quad (5.27)$$

donde  $V$  es la velocidad de desplazamiento del huracán, en nudos.

Análogamente a la variación del índice de energía, se tienen fluctuaciones del fetch de acuerdo con el ángulo de la posición de la línea con distancia mínima al punto de generación. El estudio de las variaciones del fetch permite concluir que el fetch a la izquierda del punto de distancia mínima no varía, permaneciendo constante; en cambio, el fetch a la

5.3  
Con  
en e

derecha sufre una variación similar a la encontrada para el índice de energía, por lo que su variación se puede obtener de acuerdo con la ec 5.27.

En la fig 5.9 se muestran los cambios que sufre el fetch a la derecha para un huracán en particular, para diferentes ángulos  $\theta'$  y  $V_d$ .

### 5.3 Características del oleaje debido a $E_h$

#### 5.3.1 Ecuaciones del método SMB

De acuerdo con el subinciso 4.4.1, las ecs 4.43 y 4.44 del método SMB han sido revisadas y ajustadas en diversas ocasiones (tabla 4.4), por lo que para el análisis de oleaje producido por el campo de viento de un huracán se consideraron con su último ajuste realizado, y para su aplicación se siguieron los lineamientos indicados en el método gráfico de Wilson (subinciso 4.4.2).

Debido a la gran cantidad de información que debía manejarse, se elaboró un programa para la máquina Hewlett Packard, modelo 9830 A. Las bases teóricas y las consideraciones respectivas se incluyen en el Apéndice C.

#### 5.3.2 Oleaje producido por huracanes estacionarios

Con apoyo en las características de los huracanes estacionarios estudiados en el subinciso 5.2.3 (tabla 5.1) y el programa del Apéndice C, se pro-

cedió a determinar las características del oleaje generados por dichas perturbaciones. En la tabla 5.4, cols 2 a 6, se muestran respectivamente, cada huracán analizado, índice de energía máxima, altura máxima del oleaje significativo generado, celeridad, periodo y tiempo requerido para originar dicho oleaje.

A partir de esa información, se procedió a estudiar la relación entre el índice de energía máxima producido por el huracán y las características del oleaje por él generado. De este análisis se encontraron como las mejores relaciones:

$$H = 0.024 E_h \text{máx}^{0.452} \quad (5.26)$$

$$T = 0.644 E_h \text{máx}^{0.222} \quad (5.29)$$

$$t = 0.087 E_h \text{máx}^{0.429} \quad (5.30)$$

donde

H altura de la ola significativa, en metros

T periodo de la ola significativa, en segundos

t duración del huracán para considerarlo estacionario, en horas

$E_h \text{máx}$  índice de la energía máxima, en nudos<sup>2</sup> millas náuticas

La relación entre estas ecuaciones y los valores encontrados se muestran respectivamente en las figs 5.10 a 5.12.

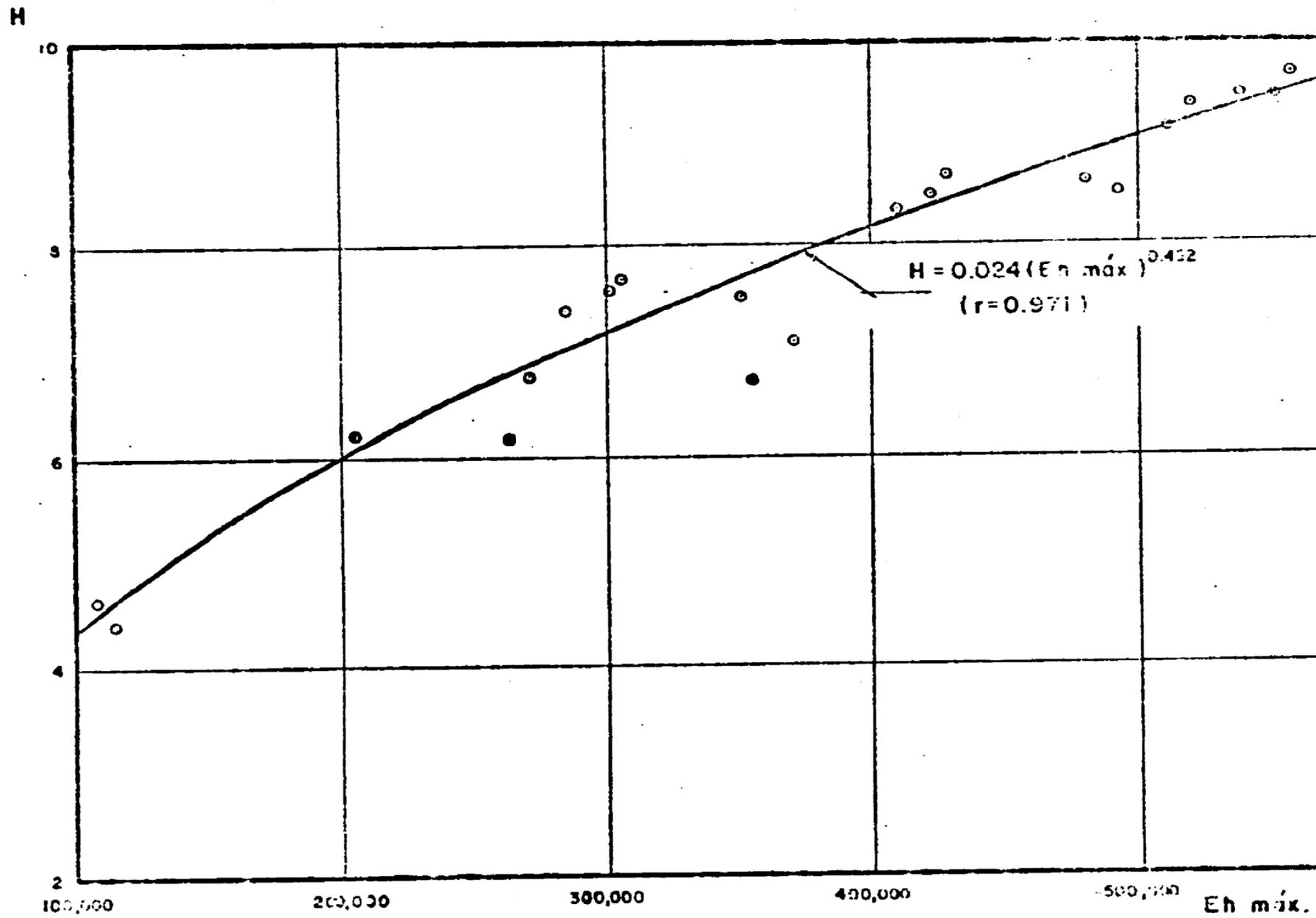


Fig 5.10 Relación entre la altura máxima de la ola significativa y el índice de la energía máxima.  
huracanes estacionarios

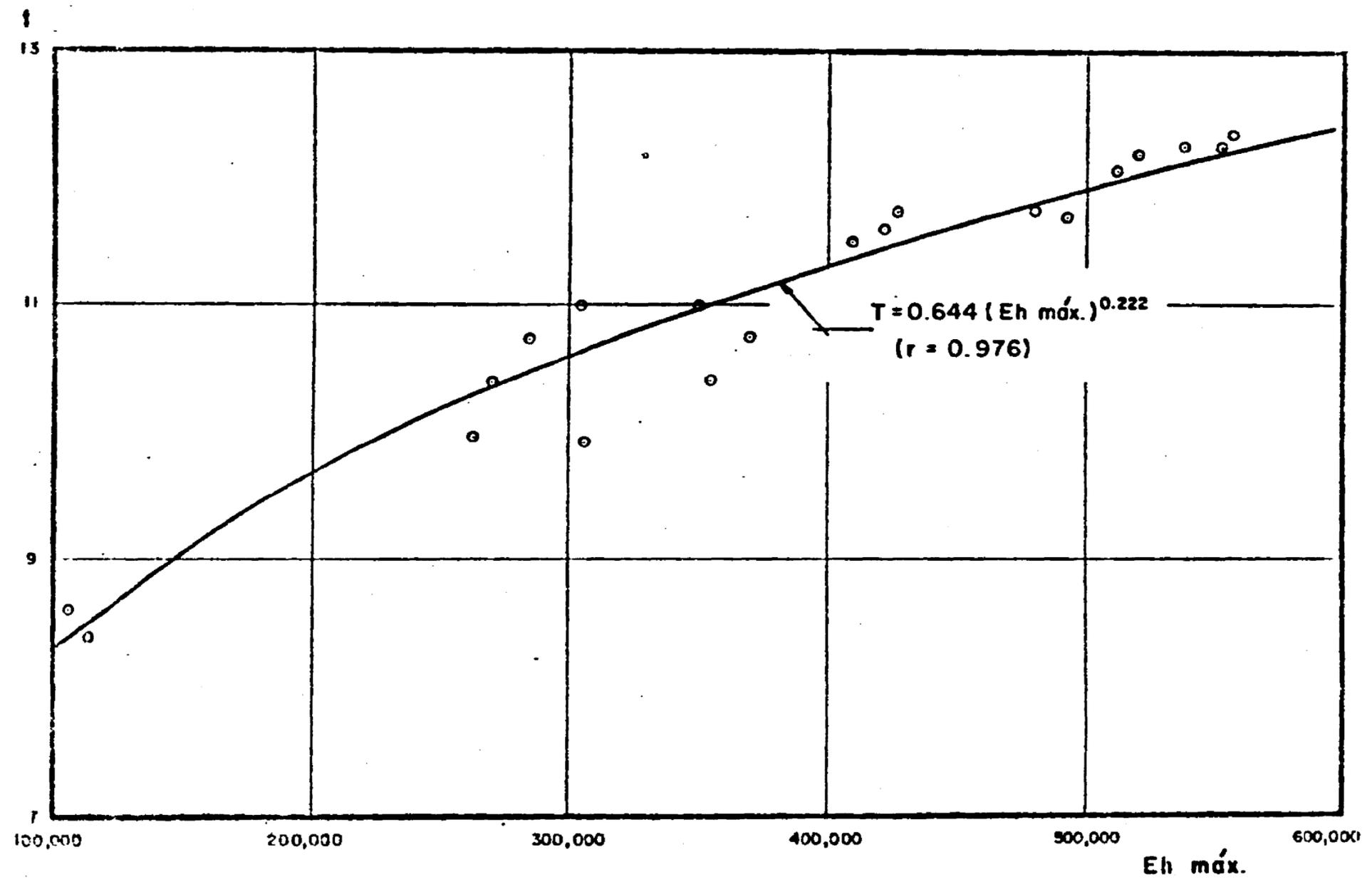


Fig 5.11 Relación entre el período de la ola significativa y el índice de la energía máxima.  
Huracanes estacionarios

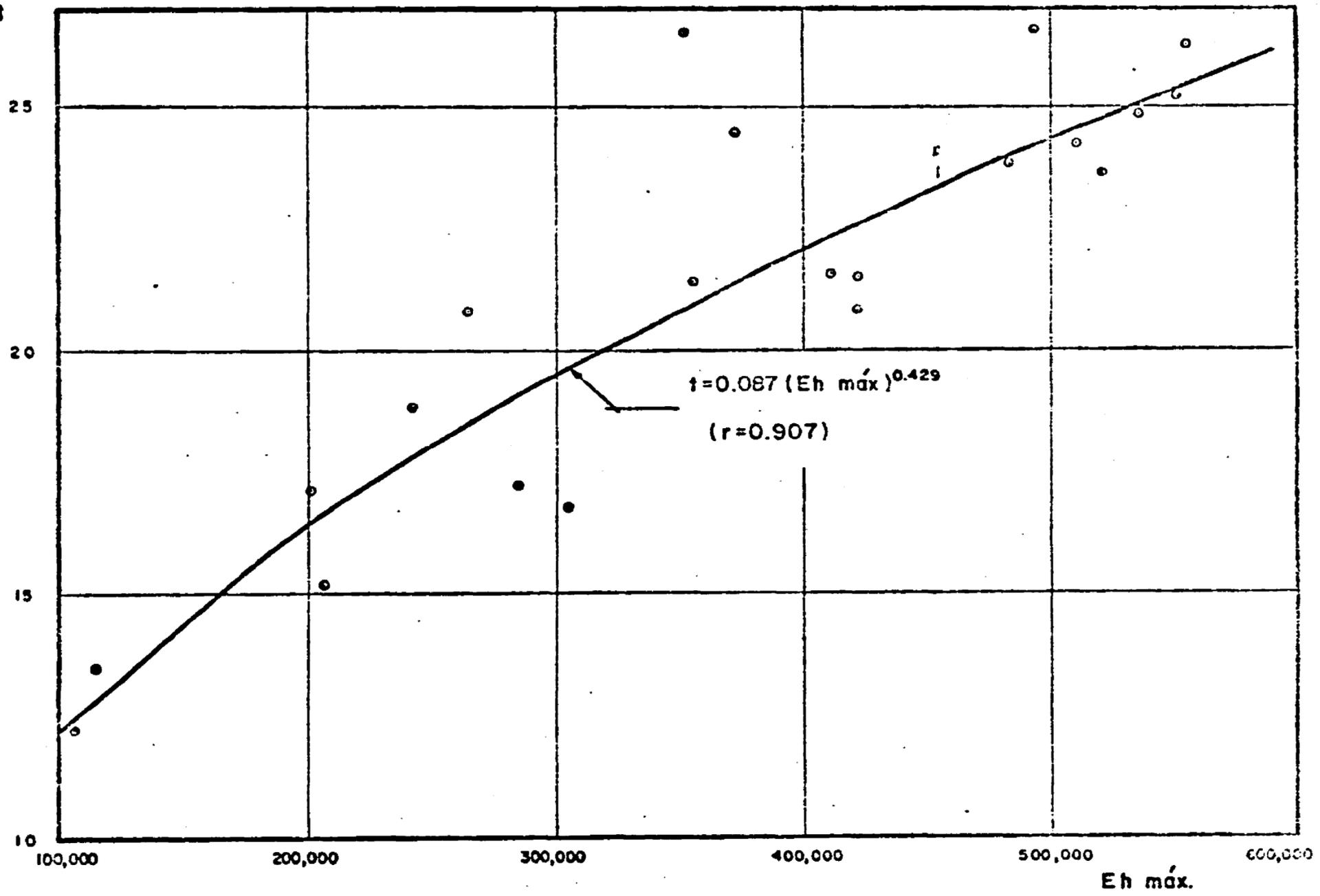


Fig 5.12 Relación entre el tiempo necesario para generaciones de oleaje máximo y el índice de la energía máxima. Huracanes estacionarios

TABLA 5.4 OLEAJE GENERADO POR HURACANES ESTACIONARIOS

Hur Est	$E_{h\text{m}\acute{a}x}$ (nudos <sup>2</sup> mn)	H (m)	C (nudos)	T (seg)	t (horas)
1	521262	9.342	36.896	12.153	23.587
2	512500	9.144	36.522	12.030	24.335
3	481170	8.620	35.531	11.704	23.783
4	370390	7.109	32.403	10.673	24.536
5	422650	8.503	35.159	11.581	20.881
6	410804	8.371	34.923	11.503	21.519
7	350588	7.577	33.331	10.979	21.461
8	263459	6.187	30.206	9.950	20.810
9	301589	7.618	33.217	10.942	17.084
10	427179	8.691	35.519	11.700	21.531
11	539123	9.469	37.142	12.234	24.833
12	271179	6.788	31.506	10.378	18.965
13	114048	4.416	25.575	8.424	13.500
14	305465	7.692	33.381	10.995	16.832
15	285172	7.309	32.581	10.732	17.285
16	206390	6.220	30.171	9.938	15.165
17	106860	4.631	26.139	8.610	12.644
18	557937	9.651	37.475	12.344	26.107
19	553159	9.455	37.149	12.237	25.199
20	493210	8.537	35.417	11.666	26.567
21	355502	6.741	31.590	10.405	26.534

Sustituyendo la ec 5.18 en las ecuaciones anteriores, es posible valuar las características del oleaje significativo máximo generados por un huracán estacionario, conocidas su latitud,  $\phi$ , su índice de presión central,  $p_0$ , y su radio de máximo viento,  $R$ .

Respecto al sitio que se esté estudiando, de las ecs 5.19 y 5.20 es factible acotar la distancia a la frontera de la zona de generación y la dirección de donde proviene el oleaje. De esta manera, a partir de las características principales del huracán se define y acotan el oleaje producido en la zona de generación de la perturbación. En la fig 5.13 se muestra la relación entre las diversas ecuaciones y en la tabla 5.5 el procedimiento de cálculo a seguir para obtener las características del oleaje.

### 5.3.3 Oleaje producido por huracanes con desplazamiento

Con un procedimiento similar al del subinciso anterior, a partir de los campos de vientos producidos por los huracanes en movimiento (tabla 5.3), se procedió a obtener las características del oleaje significativo máximo generado por dichas perturbaciones. Para ello se utilizó el programa del Apéndice C, considerando para cada condición diversas líneas de propagación del oleaje, hasta obtener la que proporcionaba las máximas características de este. En la fig 5.14 se muestra la manera como se realizó el cálculo.

Debido a la influencia que tiene en las características del oleaje la dirección del desplazamiento del huracán respecto a la línea de generación del

mismo, fue necesario considerar para cada uno diversas líneas de generación, encontrando que las máximas características del oleaje eran coincidentes con la línea de generación que proporciona el máximo índice de energía originado por el huracán.

### 5.3.3.1 Características del oleaje para $E_h^{\text{máx}}$

Con la metodología mencionada, se estudió el oleaje producido por los huracanes (tabla 5.3), y se obtuvieron como las mejores relaciones:

$$H = 0.0133 (E_h^{\text{máx}})^{0.518} \quad (5.31)$$

$$T = 0.4485 (E_h^{\text{máx}})^{0.261} \quad (5.32)$$

donde

$E_h^{\text{máx}}$  índice de energía máxima producido por los huracanes con desplazamiento, en nudos<sup>2</sup> millas náuticas

H altura de la ola significativa, en metros

T periodo de la ola significativa, en segundos

Recordando la expresión encontrada para  $E_h^{\text{máx}}$  (ec 5.22), se deduce que las ecs 5.31 y 5.32 permiten valuar las características del oleaje significativo máximo una vez conocidas las características del huracán que las produce y su zona de generación.

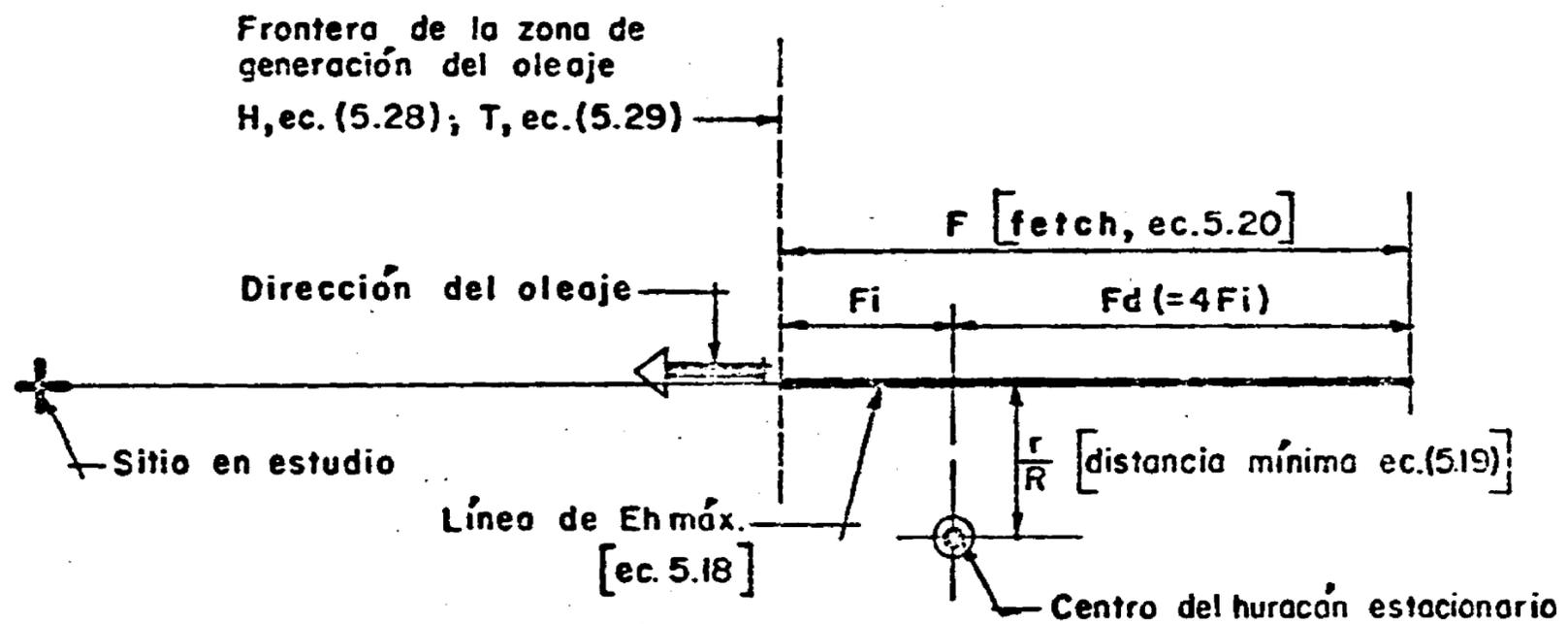


Fig 5.13 Relación entre las características del huracán, el oleaje y el sitio de interés en estudio

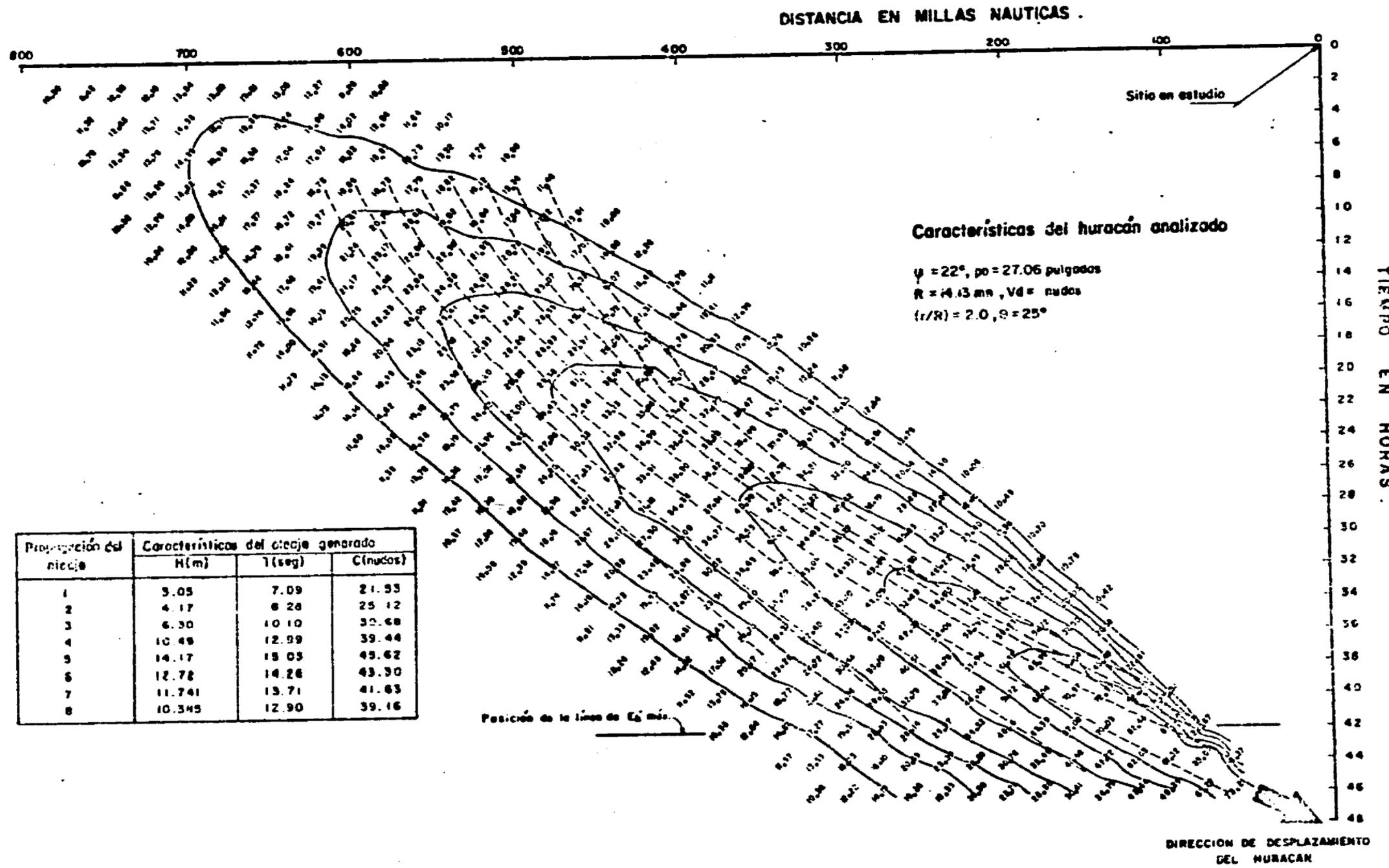
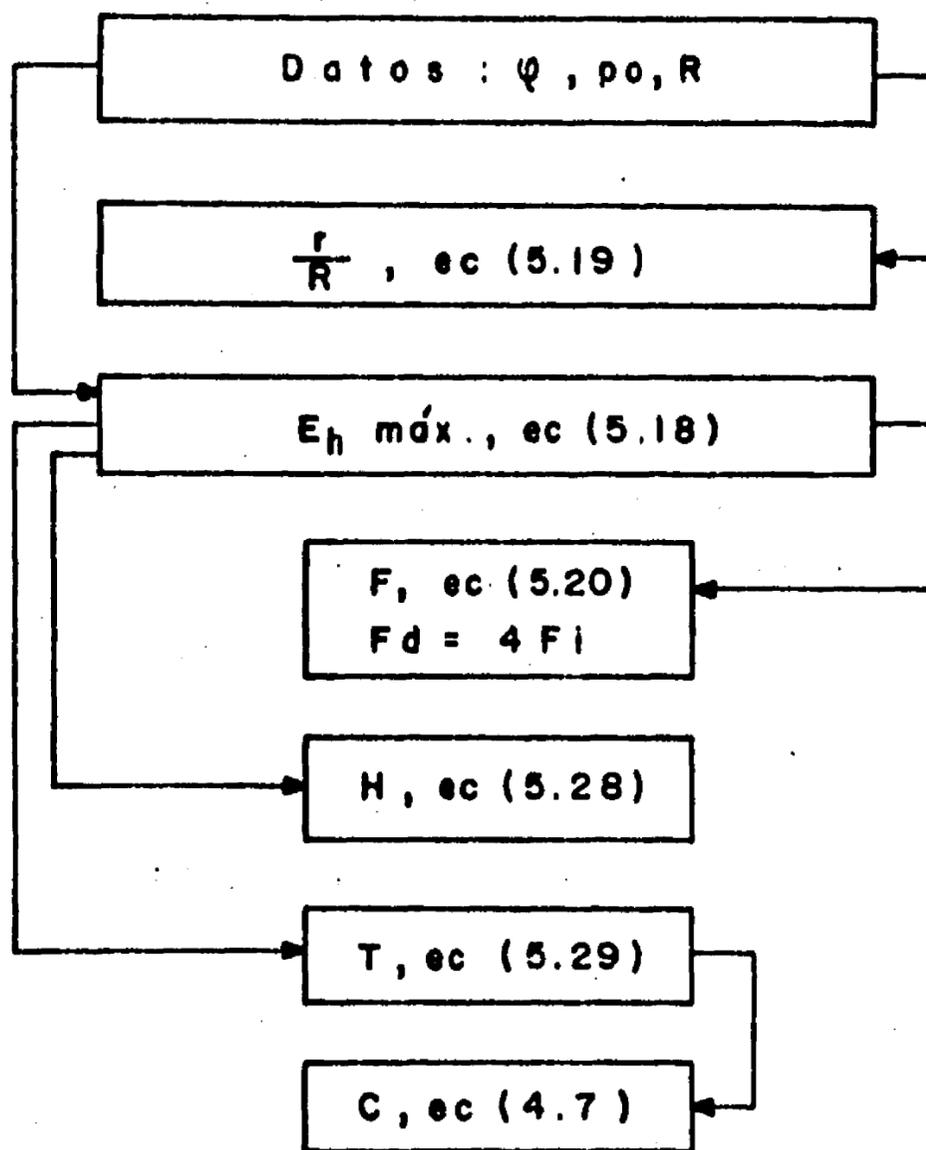


TABLA 5.5 DIAGRAMA DE CALCULO PARA DETERMINAR LAS CARACTERISTICAS DEL OLAJE SIGNIFICANTE MAXIMO PRODUCIDO POR UN HURACAN ESTACIONARIO



En la fig 5.15 se muestran en forma esquemática las relaciones existentes para llegar a valuar las características del oleaje, y en la tabla 5.6 el esquema de cálculo.

### 5.3.3.2 Características del oleaje para diferentes direcciones de desplazamiento

Como se indicó, para cada línea de generación de un campo de viento de un huracán con desplazamiento se tienen diversas condiciones de oleaje. Ya que es de importancia conocer las variaciones que sufren las características del oleaje, se estudiaron diferentes líneas de generación para diversos huracanes.

Se encontró que las características del oleaje siguen una variación similar a la de los índices de energía (ec 5.26), obteniéndose que las características del oleaje significante se pueden valuar como

$$H' = (\phi/100)H \quad (5.33)$$

y

$$T' = (\xi/100)T \quad (5.34)$$

siendo

$$\phi = (100 - 1.59 V_D) + 1.59 V_D \cos (\theta - \theta') \quad (5.35)$$

y

$$E_s = 0.32 V_d^3 + 0.92 V_d \cos(\theta' - \theta) \quad (5.36)$$

donde

$H'$  y  $T'$  son respectivamente la altura, en metros, y el periodo, en segundos, del oleaje significativo generado en una línea cuya distancia mínima al huracán tiene un ángulo  $\theta'$  respecto al eje perpendicular al movimiento del huracán

$H$  y  $T$  son la altura y el periodo del oleaje significativo máximo deducidos para el área de máxima energía (ecs 5.31 y 5.32), cuya línea de generación tiene una distancia mínima que forma un ángulo  $\theta$ , medido en la misma forma que  $\theta'$

$V_d$  es la velocidad de desplazamiento del huracán, en nudo (fig 5.16)

Con las ecuaciones dadas en este subinciso, se está finalmente en posibilidades de valuar las características del oleaje producido por huracanes tanto para efectos estadísticos del mismo, como para análisis de generación de oleaje en un huracán en particular.

#### 5.4 Análisis estadístico y predicción del oleaje debido a huracanes

Para realizar este estudio se requiere la existencia de la variación de las características del oleaje en un sitio determinado debido a huracanes con la información dis

ponible, se puede considerar que la frecuencia del oleaje es la misma con la cual varían los índices de presión central. Respecto al radio de máximo viento y a la velocidad de desplazamiento, se pueden aceptar en una primera instancia sus valores medios. Por otra parte, la incidencia respecto a la dirección de desplazamiento se valúa de acuerdo con lo indicado en la fig 2.15.

En el Apéndice D se muestra un estudio de las características del oleaje respecto a sus frecuencias de incidencia para la zona  $\alpha$ , la cual se encuentra a una latitud de 25°norte (fig 2.1).

Respecto al enfoque de utilizar las ecuaciones aquí deducidas para predecir oleaje conforme se conocen las características del huracán, se tienen todas las herramientas para hacerlo. Esto es de interés desde el punto de vista de las obras de ingeniería, ya que actualmente se rastrea y se toma información de las características de los huracanes durante su tránsito sobre el golfo. Así, no se tiene carencia de información y directamente es factible calcular los índices de máxima energía y las características de oleaje que se pueden esperar en un sitio determinado conforme el huracán se desplaza. Esto se halla íntimamente ligado con los modelos de alarma, de gran utilidad en los criterios de riesgo relacionados con las obras de ingeniería.

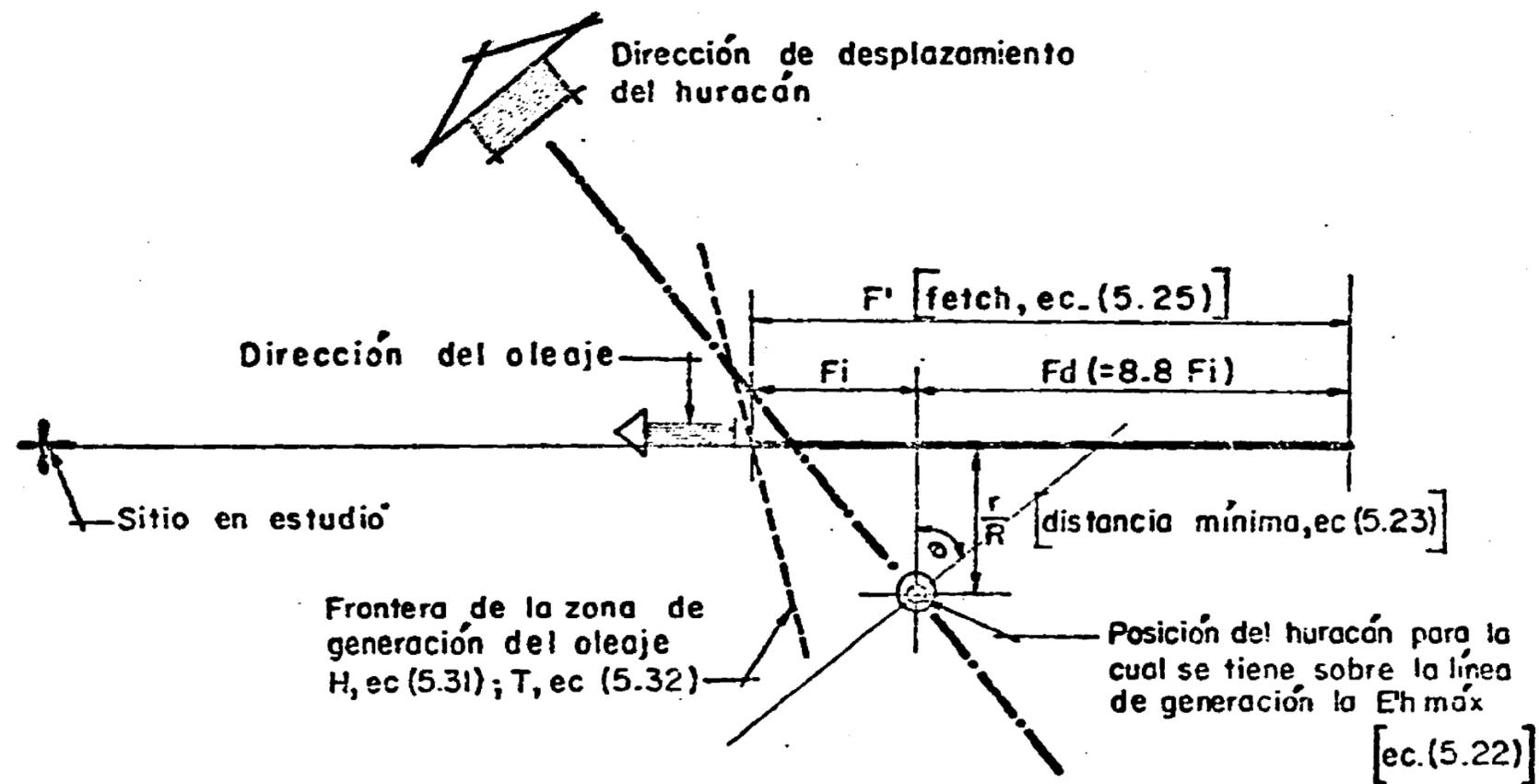


Fig 5.15 Relación entre las características de un huracán con desplazamiento, el máximo oleaje y el sitio de interés en estudio

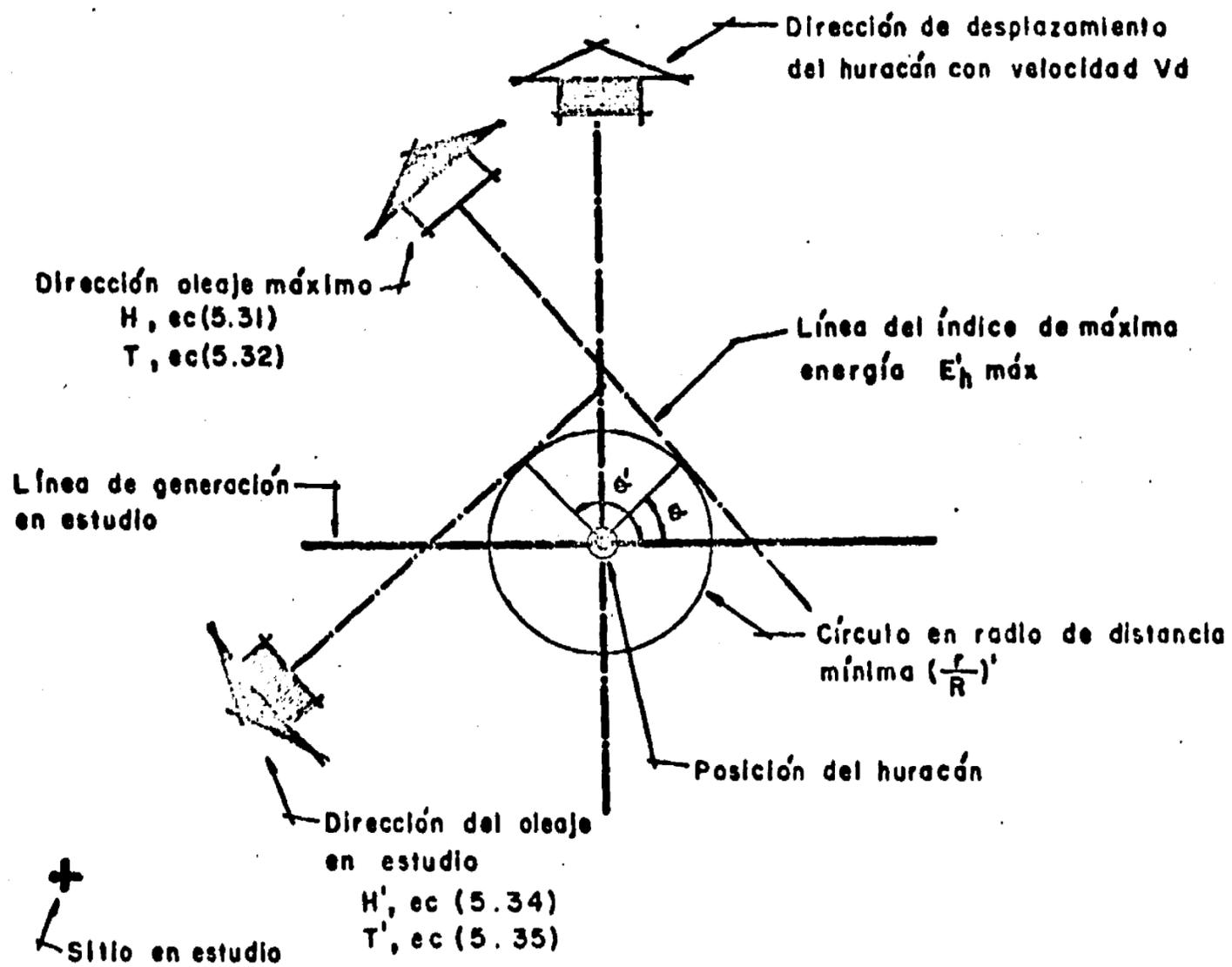
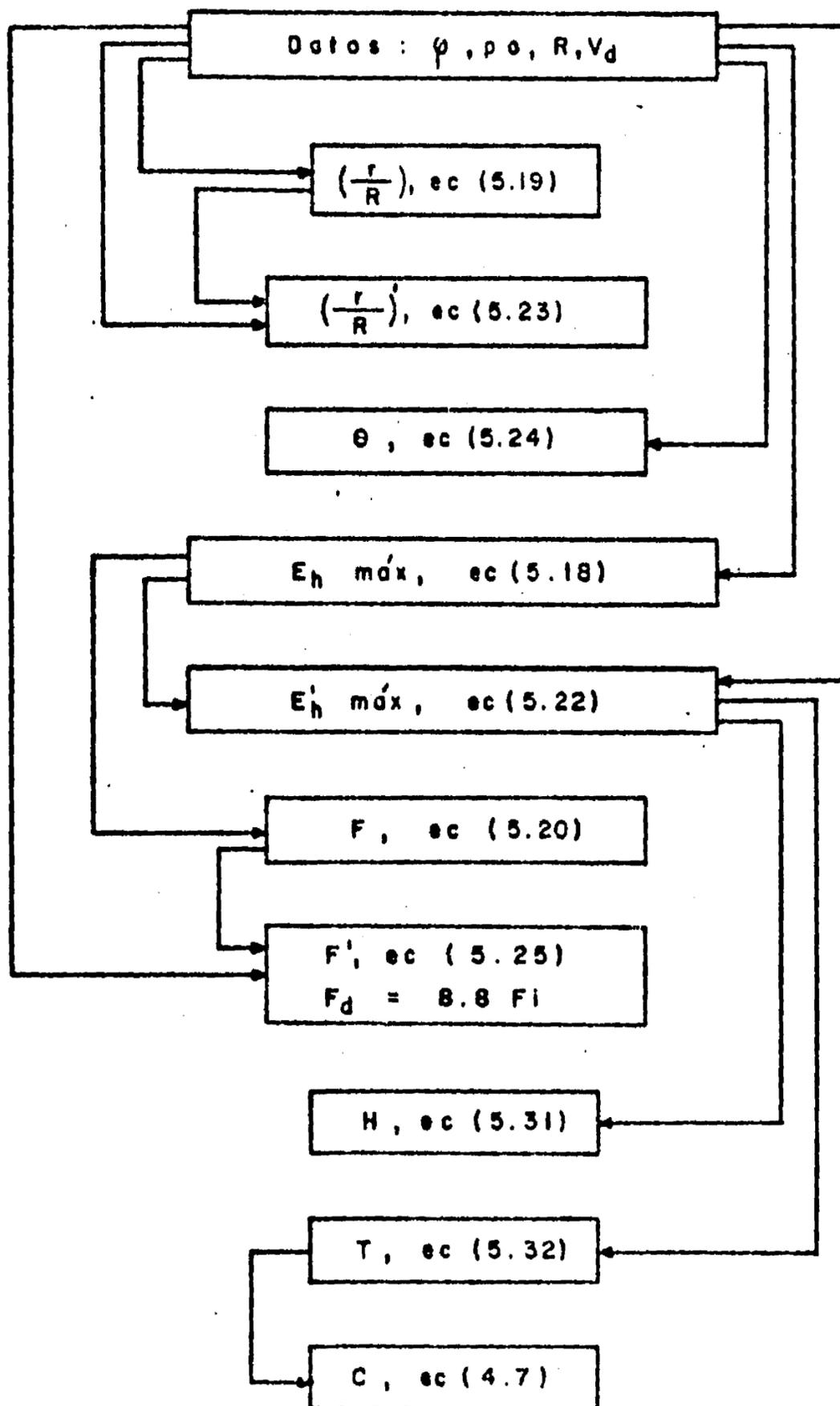


Fig 5.16 Relación entre las características del huracán con desplazamiento, el máximo oleaje y el oleaje sobre la línea de generación en estudio

TABLA 5.6 DIAGRAMA DE CALCULO PARA DETERMINAR LAS CARACTERISTICAS DEL OLAJE SIGNIFICANTE MAXIMO PRODUCIDO POR UN HURACAN CON DESPLAZAMIENTO



**FALTA PAGINA**

No. 172

## 6. CONCLUSIONES

Los objetivos que se plantearon al iniciar este estudio (inciso 1.3) se cumplieron ampliamente, se obtuvieron las variaciones de las características de los huracanes en el área en estudio y se encontraron ecuaciones que permiten lograrlas, conocida la posición de la perturbación; a partir de lo cual es factible estructurar los campos de viento generado por los huracanes, así como la velocidad y dirección del viento sobre la superficie del mar.

Posteriormente, con base en una revisión de las teorías de la dinámica del oleaje y de los criterios de generación del mismo, se dedujeron las ecuaciones que relacionan el oleaje significativo producido por un huracán y sus características.

Del trabajo en general se concluye que:

- a) Las ecuaciones propuestas se basan en un análisis detallado de toda la información disponible para la región que se seleccionó para estudiar, por lo cual es de esperarse que se obtengan resultados más acordes con la realidad que mediante otros criterios.

- b) Las bases de las expresiones se apoyan en una revisión bibliográfica exhaustiva en relación con trabajos afines con el tema. En algunos casos se hicieron los cambios que se juzgaron pertinentes.
- c) Para la deducción de las características del oleaje se utilizó el método SMB conforme el último ajuste realizado en 1970, que por disponer de mayor información se consideró representativa para la relación viento-oleaje.
- d) La metodología que se propone permite conocer las características del oleaje en cualquier dirección de la línea de generación, lo que ningún criterio existente tiene, pues todos se abocan a condiciones críticas de oleaje.
- e) La aplicación al análisis estadístico del oleaje para cualquier sitio de interés es directa y bastante rápida de realizar, contrastando con la forma tradicional de realizarlo.
- f) Es posible utilizar las ecuaciones en un modelo de alarma, de gran utilidad para las obras de ingeniería que se encuentran en la plataforma continental.

## 7. RECONOCIMIENTO

Agradezco al Instituto de Ingeniería las facilidades que me otorgó para realizar este trabajo.

Al Dr Blair Kinsman no solo sus valiosos comentarios, sino también su ayuda como director de la tesis original.

Al Dr Owen M. Phillips la oportunidad que me brindó para llevar a cabo la investigación y los estudios respectivos en el Chesapeake Bay Institute, de la John Hopkins University.

Al Dr Charlie L. Bretschneider la inquietud que despertó en mí, sus ideas y su desinteresada colaboración al proporcionarme bibliografía inédita.

Al Dr Robert E. Banks y al M en I Carlos Cruickshank su revisión y comentarios.

Al Dr Gabriel Echávez y al M en I Gilberto Sotelo, sus observaciones.

**FALTA PAGINA**

**No.**

176

## 8. REFERENCIAS

Benson, M A, "Spurious correlation in hydraulics and hydrology", *Journal Hydraulics Division ASCE*, HY 4 (jul 1965), pp 35-42

Bowman, Ch C y Hanse, V E, "Simplification of dimensional analysis", *Journal Engineering Mechanics Division ASCE*, EM 1 (ene 1959), pp 67-73

Bretschneider, C L, "The generation and decay of wind waves in deep water", *Trans., American Geophysics Un*, Vol 33, No 3 (jun 1952), pp 381-89

Bretschneider, C L, "Review of practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics", *Trans., American Geophysics Un*, Vol 38, No 2 (abr 1957 a), pp 264-66

Bretschneider, C L, "Hurricane design wave practices", *Procs, ASCE*, Vol 83, No WW 2 (may 1957 b), pp 1238-1-33

Bretschneider, C L, "Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves", *US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical memories No 118* (ago 1958 a)

Bretschneider, C L, "Revisions in wave forecasting: deep and shallow water", *Procs., VI Conference on Coastal Engineering, Cap 3*, pp 30-67

Bretschneider, C L, "Revisions in wave forecasting", *Look Laboratory Hawaii (quarterly of the University of Hawaii)*, Vol 1, No 3 (jul 1970), pp 31-34

Bretschneider, C L, "A Non-dimensional stationary hurricane wave model", *Procs., 1972 Offshore Technical Conference, Texas* (may 1972 a), Paper 1517

Bretschneider, C L, "Revisions to hurricane design wave practices, *University of Hawaii* (por publicarse)

Bretschneider, C L y Collins J D, "Design sea state study-project mohole", *National Engineering Science Co., Technical report SN-187* (1964)

Cartwright, D E y Longuet-Higgins M S, "The statistical distribution of the maxima of a random function", *Procs., Royal Society, A* 237 (1956), 1909:212-32

Cry, G E, Haggard H y White H S, "North Atlantic tropical cyclones", U S *Weather Bureau, Technical paper No 36* (1959)

Darbyshire, J, "The generation of waves by wind", *Procs., Royal Society, A* 215 (1952), 1122:299-328

Dunn, G E, Davis W R y Moore P L, "Hurricanes of 1955", *Monthly Weather Review*, Vol 83, No 12 (dic 1956), pp 315-26

Graham, H E y Nunn D E, "Meteorological considerations pertinent to standard project hurricane, Atlantic and Gulf Coast of the United States", *Natural Hurricanes Research Project, Report No 33* (nov 1959)

Holton, J R, "An introduction to dynamic meteorology", *Academic Press, Nueva York* (1972)

Kaplan, K, "Analysis of moving fetches for wave forecasting", U S *Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical memories No 35* (mar 1953)

Kinsman, B, "Surface waves at short fetches and low wind speed - a field study", *Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins University, Technical report No 19* (1960)

Kinsman, B, "Wind waves; their generation and propagation on the ocean surface", *Engelwood Cliffs, Prentice-Hall Inc., Nueva Jersey* (1965)

Longuet-Higgins, "On the statistical distribution of the heights of sea waves", *Journal Maritime Researchs*, Vol XI, No 3 (1952), pp 345-66

Longuet-Higgins, "The effect of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves", *Journal Fluid Mechanical*, Vol 17 (1963), pp 459-80

Myers, V A, "Characteristics of U S hurricanes pertinent to levee design for Lake Okcechobee, Florida", U S *Weather Bureau, Hydrometeorological report No 32* (mar 1954)

Neuman, G, "On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea", *U S Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical memory No 43* (1952)

Phillips, O M, "The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves", *Journal Fluid Mechanical*, Vol 4, No 4 (1958), pp 426-34

Pierson, W J, "A unified mathematical theory for the analysis, propagation and refraction of storm generated ocean surface waves", Parts I y II, *New York University, College of Engineering Division* (1952)

Pierson, W J, "Wind generated gravity waves", *Advances in Geophysics, Academic Press Inc., Nueva York*, Vol 2 (1955), pp 93-178

Pierson, W J, "The interpretation of wave spectrum in terms of the wind profile instead of the wind measured at a constant height", *Journal Geophysics Researchs*, Vol 69, No 24 (dic 1964), pp 5191-203

Pierson, W J y Moskowitz L, "A proposed spectra form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S A. Kitaigoroskii", *Journal Geophysics Researchs*, Vol 69, No 24 (dic 1964), pp 5181-90

Pierson, W J, Neumann G y James R W, "Practical methods for observing forecasting oceanwaves by means of wave spectra and statistics", *U S Navy Hydrographic Office*, 603 (1955)

Putz, R R, "Statistical distribution for ocean waves", *Trans., American Geophysics Un*, Vol 33, No 5 (1952), pp 685-92

Reid, R O, "On the classification of hurricanes by storm tide and wave energy indices", *Meteorological Monographs*, Vol 2, No 10 (jun 1957) pp 58-66

Schloemer, R W, "Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida", *U S Weather Bureau, Hydrometeorological report*, No 31 (mar 1954)

Sverdrup, H W y Munk W H, "Wind, sea and swell; theory of relations for forecasting", *U S Hydrographic Office*, 601 (1947)

Wiegel, R L, "Ocean dynamics", *Hydrodynamics, Cap III*, Academic Press Inc (1970)

Wilson, B W, "Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetches", *U S Army Corps of Engineers Beach Erosion Board, Technical memories No 73* (abr 1955)

Wilson, B W, "Hurricane wave statistics for the Gulf of Mexico", *U S Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical memories No 98* (jun 195?)

Wilson, B W, "Deep water generations by moving wind systems", *Procs ASCE, Vol 87, No WW 2* (may 1961), 1821:113-41

## A P E N D I C E A

### PROGRAMA PARA DEFINIR LAS CARACTERISTICAS DEL CAMPO DE VIENTO DE UN HURACAN SOBRE UNA LINEA DE GENERACION

Para analizar la variación del índice de energía producido por un huracán respecto a diversas líneas de generación, se elaboró un programa para computadora, el cual se dividió en dos partes. La primera involucra el análisis para una recta con distancia fija y ángulo variable, y la segunda considera simultáneamente distancias y ángulos variables. En la fig A.1 se describen esquemáticamente los parámetros y ecuaciones analizadas, y en las tablas A.1 y A.2 los listados de los programas y cómo se obtienen los resultados; la tabla A.3 proporciona la identificación de las variables que se utilizaron para la elaboración del programa.

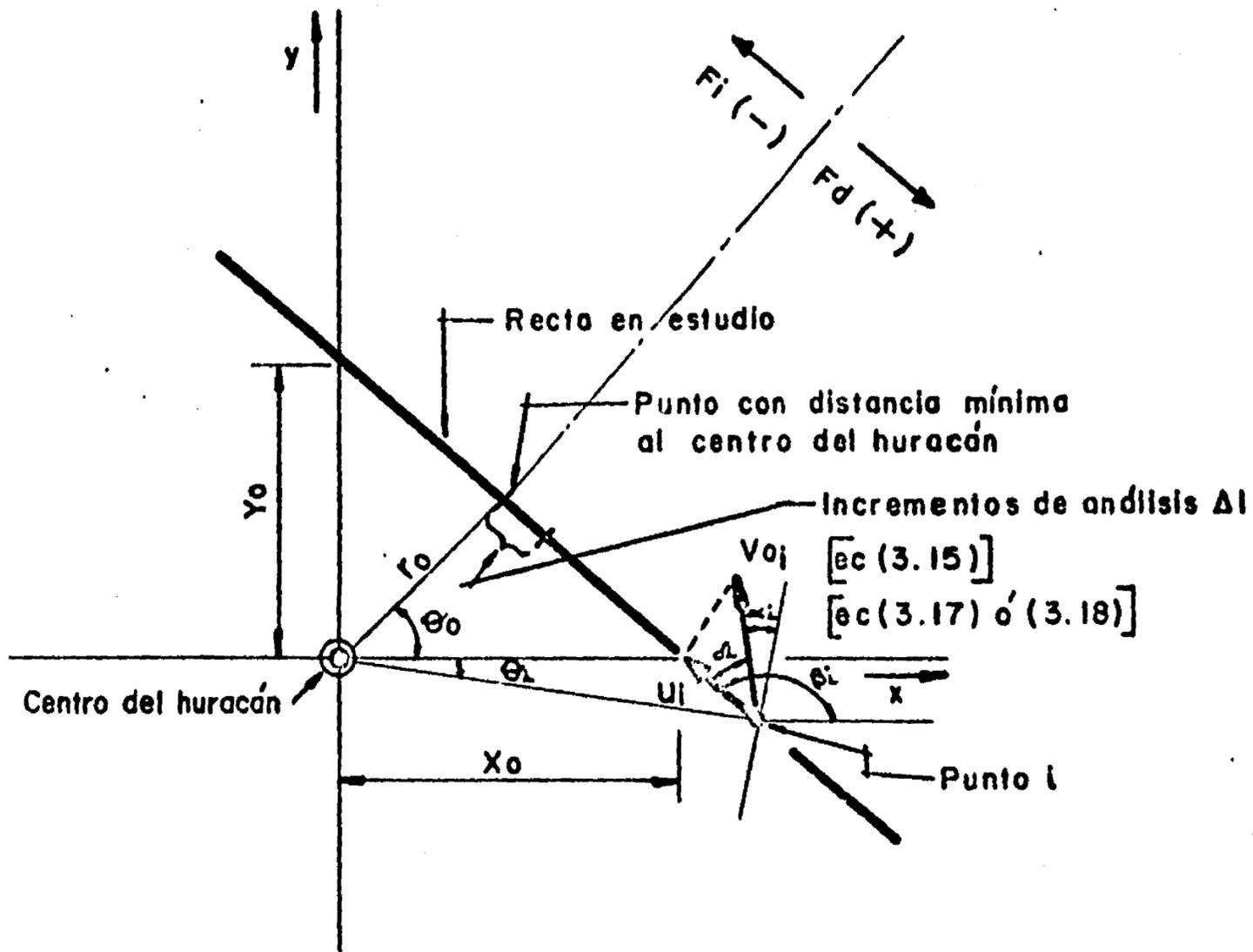


Fig A.1 Consideraciones para elaborar el programa de análisis de la velocidad del viento sobre una línea de generación

TABLA A.11  
 C. I. H. A. S. S. U. H. A. II

C ANALISIS DEL CAMPO DE VIENTO DE UN HUPACAN

C 00010000:5

START OF SEGMENT 002

FORMAT SEGMENT 002 IS 0072 LONG.

```
DIMENSION X(20),Y(20)
10 FORMAT(1F11.4,1F7.3,3F10.3,2I8)
20 FORMAT(2E12.4)
30 FORMAT(8H LATITUD,F10.3,1H PRESION CENTRAL,F10.3,1H RADIO MAX VI
1E7,F10.3,7H VEL DES,F10.3,7H INC ANAL,F10.3,12H RECTAS ANAL,I8
2,11H DIRAC ANAL,I0,///)
40 FORMAT(15H DATOS RECTA X= E12.4, 3H Y= E12.4)
50 FORMAT(14X,3H R=,F10.3,4H TH=,F10.3,7H DISTRIBUCION DE LAS VELOC
1IPARES SOBRE LA RECTA/3X,10H DISTA EJE,10H VELOCIDAD,10H ANG PROY
2,10H VEL PROY)
60 FORMAT (3X,F10.3)
70 FORMAT(35H CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION/11H FETCH DER=,F10.3
1,11H FETCH IZQ=,F10.3,11H FETCH INT=,F10.3/9H ENERGIA=,E12.4,9H IN
20 CAP=,E12.4,9H INC ENE=,E12.4,///)
80 READ 10,F,P,RH,VD,DL,N,H
```

```
C 002:0000:0
```

PRINT 30,F,P,RH,VD,DL,N,H

FIB IS 0005 LONG

C 002:0011:1

FIB IS 0005 LONG

C 002:0020:2

```
I=0
12 I=I+1
13 IF(I=N) 14,14,28
14 READ 20,X(I),Y(I)
PRINT 40,X(I),Y(I)
A=ATAN2(Y(I),X(I))
B=1.570796327-A
AC=B*10000.0
IC=AB
R=IC*10000.0
IF(R=1.5707)42,41,42
41 R=0.0
Z=Y(I)
GO TO 43
42 W=X(I)*(COS(R)+.2)
Z=Y(I)*(COS(R)+.2)
43 R=SQRT(W**2.+Z**2.)
TH=ATAN(Z/W)
IF(X(I)=0.0)34,37,37
34 IF(Y(I)=0.0)36,35,35
35 TH=3.1416+TH
GO TO 37
36 TH=-(3.1416-TH)
37 ATH=(TH+180.0)/3.1416
PRINT 50,P,ATH
DE=1.5708+TH
ENERT=0.
F=0.
22 F=F+1.
DL=C=F*DL-DL
24 RC=SQRT(P**2.+(DL**2.))
C=RC/RH
DTH=ATAN(DLC/R)
THC=TH-DTH
ALDE=(Y(I)+1.2*VD)/(80)*3.1416
```

```
C 002:0021:0
C 002:0022:2
C 002:0023:4
C 002:002E:1
C 002:0037:4
C 002:003B:1
C 002:003E:0
C 002:003F:1
C 002:003F:5
C 002:0041:0
C 002:0043:4
C 002:0044:2
C 002:0046:0
C 002:0046:3
C 002:004A:4
C 002:004E:5
C 002:0053:3
C 002:0055:3
C 002:0057:3
C 002:0059:3
C 002:005C:0
C 002:005C:3
C 002:005F:1
C 002:0062:4
C 002:006A:3
C 002:006D:0
C 002:006D:4
C 002:006E:2
C 002:006F:3
C 002:0071:0
C 002:0075:4
C 002:0076:4
C 002:007B:0
C 002:007F:0
```

TABLA A. 1b

ALD=((26.+0.8*VD)/180)*3.1416	C	002:007F:4	
IF(C=1.0)15,15,16	C	002:0085:4	
15 ALC=ALD	C	002:0086:5	184
GO TO 19	C	002:0087:4	
16 IF(C=1.5)17,18,18	C	002:0088:1	
17 ALC=((ALD-ALD)/0.5)*(C=1.0)+ALD	C	002:008A:4	
GO TO 19	C	002:008F:0	
18 ALC=ALD	C	002:008F:3	
19 GA=ALC+THC	C	002:0090:2	
CD=-0.23*RC*SIN(F)	C	002:0091:4	
CVD=0.5*VD+COS(GA)	C	002:0095:2	
VG=87.95*SQRT((27.92-P)*(1/C)*EXP((-1/C)))	C	002:0099:1	
V=VG+CD+CVD	C	002:00A0:5	
ANG=1.5708+GA+DE	C	002:00A2:2	
U=V*COS(ANG)	C	002:00A5:3	
PRINT 60,DLC,V,ANG,U	C	002:00A7:3	
ENER=U*U**2.	C	002:00B2:2	
ENERT=ENERT+ENER	C	002:00B5:0	
IF(DLC=0.)25,21,21	C	002:00B6:2	
21 IF(I=15.)23,23,22	C	002:00B7:3	
23 FETD=DLC	C	002:00B8:5	
E=0.	C	002:00B9:4	
27 E=F-1.	C	002:00BA:2	
DLC=C*DL	C	002:00BB:3	
GO TO 24	C	002:00BC:3	
25 IF(I=15.)26,26,27	C	002:00BD:0	
26 FETI=ABS(DLC)	C	002:00BE:2	
FETI=FETD+FETI	C	002:00BF:3	
VARP=12.862*((SQRT(27.92-P))/((SIN(F))*RII))	C	002:00C0:5	
VARE=FHEPT/(68670.*RII**2.)	C	002:00C7:0	
PRINT 70,FETD,FETI,FCTT,ENERT,VARP,VARE	C	002:00C9:3	
GO TO 12	C	002:00D9:2	
28 IF(C=1)29,29,31	C	002:00D9:5	
29 CONTINUE	C	002:00DB:0	
STOP	C	002:00DB:0	
END	C	002:00DB:5	
FORMAT SEGMENT 003 IS 000D LONG.			
002:00F8:4	IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT	002:00CB	
002:00FA:0	IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT	002:00A7	
002:00FB:2	IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT	002:0062	
002:00FC:4	IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT	002:002E	
002:00FE:0	IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT	002:0023	
002:00FF:2	IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT	002:0011	
002:0100:4	IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT	002:0000	
SEGMENT 002 IS 0101 LONG			

LATITUD 0.384 PRESIGN CENTRAL 27,060 RADIO MAX VIENTO 14,130  
 VEL DES 15,000  
 INC ANAL 10,000 RECTAS AIAL 12 HORAS ANAL 2

DATOS RECTA X= .1593E+02 Y= .2961E+02  
 R= 14.029 TH= 28.271

DISTRIBUCION DE LAS VELOCIDADES SOBRE LA RECTA

DISTA DE	VELOCIDAD	ANG	PROY	VEL	PROY
0.000	95.326	-0.471	84.253		
10.000	96.754	-0.064	76.556		
20.000	91.885	-0.206	67.693		
30.000	84.912	-0.470	57.795		
40.000	78.169	-0.670	46.500		
50.000	72.294	-0.834	33.174		
60.000	67.017	-0.978	17.200		
70.000	62.473	-1.110	7.386		
80.000	58.644	-1.234	0.399		
90.000	54.841	-1.353	0.018		
100.000	51.576	-1.468	37.892		
110.000	48.557	-1.581	34.516		
120.000	45.827	-1.691	32.216		
130.000	43.260	-1.800	30.137		
140.000	40.855	-1.908	28.237		
150.000	38.589	-2.014	26.486		
160.000	36.442	-2.120	24.858		
170.000	34.399	-2.225	23.335		
180.000	32.448	-2.330	21.902		
190.000	30.573	-2.434	20.545		
200.000	28.774	-2.538	19.256		
210.000	27.031	-2.641	18.025		
220.000	25.347	-2.744	16.845		
230.000	23.714	-2.847	15.710		
240.000	22.126	-2.949	14.617		
-10.000	89.268	1.125	34.417		
-20.000	80.641	1.622	4.155		

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DES= 240.000 FETCH LZ= 20.000 FETCH TOT= 260.000  
 ENERGIA= .5688E+06 IND CAT= .6349E+01 IND ENE= .4149E+01

DATOS RECTA X= .2961E+02 Y= .1593E+02  
 R= 14.029 TH= 61.718

DISTRIBUCION DE LAS VELOCIDADES SOBRE LA RECTA

DISTA DE	VELOCIDAD	ANG	PROY	VEL	PROY
0.000	91.223	0.471	51.280		
10.000	93.993	0.064	43.711		
20.000	89.858	0.206	35.952		
30.000	83.581	0.470	26.512		
40.000	77.213	0.670	15.025		
50.000	71.557	0.834	6.658		
60.000	66.256	0.978	0.639		
70.000	61.217	1.110	0.137		
80.000	56.251	1.234	0.399		

C ANALISIS DEL CAMPO DE VIENTO DE UN HURACAN SOBRE UNA RECTA

SEPTIEMBRE JUEVES/27/73 12:50 PM

C 002:0000:5

START OF SEGMENT 002

10 FORMAT(1F11.2,1F9.3,3F10.3,2I8)

C 002:0000:0

20 FORMAT(2I12,4)

C 002:0000:0

30 FORMAT(4H LATITUD,F10.3,4H PRESION CENTRAL,F10.3,17H RADIO MAX VI  
15HTO,F10.3,7H VEL RES,F10.3,7H INC ANAL,F10.3,11H HURAC ANAL,IS/  
2/)

C 002:0000:0

40 FORMAT(6I10)

50 FORMAT(30H CAPACT DECTA EN CORO POLARES/4X,3H R,F,3,6H R/RH,F6  
1,3,5H ANG,F6.2,5H RAD,F6.3)

70 FORMAT(35H CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION/11H FETCH DER,F10.3  
1,11H FETCH 170,F10.3,11H FETCH TOT,F10.3/9H ENERGIA,E12.6,9H IN  
2H CAP,E12.6,9H INC EUC,F12.4)

31 READ 10,F,P,RH,IS,1,2,3

PRINT 30,F,P,RH,VD,DL,H

C 002:0000:0

READ 40,URI,URF,URF,44,NAF,NAIF  
DO 32,IERI,IEF,IRIF

AI=I

R=(AI/10.0)\*RH

RI=AI/RI

DO 37,JAIF,NAIF,NAIF

AJ=J

TI=AJ\*3.1416/180.0

PRINT 50,F,P,RH,AI,TH

IE=1.5708\*TI

IEHT=0.

IE=0.

22 F=1.

RIE=RI\*DL=RI

24 GC=50\*(F+2.+DL,C\*\*2.)

GC=GC

BT=BTAN(PIE/R)

TI=TI+BT

AI=(GC\*(1.2\*30/180)+3.1416

GC\*(26.40/3+VD/180)+3.1416

IE=1.5708\*TI

15 AL=ALU

GO TO 19

16 TFC=1.5017\*10\*\*8

17 AL=((510-AI)/70.5)\*GC-1.0)\*ALU

GO TO 19

18 AL=ALU

19 G=ALC\*INC

CD=0.23\*P0\*G\*\*17)

CV=0.5\*VD\*CD\*\*18)

VD=0.25\*G\*\*18\*(0.90\*P)\*\*(1/0)\*EXP((-1/0))

V=VD\*CD\*CV

PRINT 70,AL,CD,VD,V

100 CONTINUE

27 F=1.

DL=DL

C 002:0084:5

```

E=C.
27 E=E-1.
   DLC=F*DL
   GO TO 24
25 IF(EH-15.)26,26,27
26 FETI=ARSC(DLC)
   FETI=FETD+FETI
   VARP=10.062*((SQRT(29.92-P))/((SIN(F)))*RH))
   VARE=ENERT/(08670,*RH**2.)
   PRINT 70,FETD,FETI,FETI,ENERT,VARP,VARE
33 CONTINUE
37 CONTINUE
28 IF(EH-1029,29,31)
29 CONTINUE
STOP
END

```

- C 002:0084:5
- C 002:0085:3
- C 002:0086:4
- C 002:0087:4
- C 002:0088:1
- C 002:0089:3
- C 002:008A:4
- C 002:008C:0
- C 002:0093:0
- C 002:0097:3
- C 002:00A5:0
- C 002:00A7:4
- C 002:00AA:0
- C 002:00AB:1
- C 002:00AB:1
- C 002:00AC:0

FORMAT SEGMENT 001 IS 0006 LONG.  
 FORMAT SEGMENT 002 IS 0058 LONG.

002:0001:4 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 002:0097  
 002:0003:0 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 002:0097  
 002:0004:2 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 002:0019  
 002:0005:4 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 002:0078  
 002:0007:0 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 002:0060

SEGMENT 002 IS 0007 LONG

LATITUD 0.332 PRESION CENTRAL 28.050 RADIO MAX VIENTO 31.460  
VEL RES 13.000  
INC ANAL 5.000 HURAC ANAL 2

188

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.460 R/RH= 1.000 ANG= 20.00 RAD= 0.349

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .650633E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9574E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.460 R/RH= 1.000 ANG= 21.00 RAD= 0.367

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .650693E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9574E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.460 R/RH= 1.000 ANG= 22.00 RAD= 0.384

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .650651E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9574E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.460 R/RH= 1.000 ANG= 23.00 RAD= 0.401

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .650600E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9573E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.460 R/RH= 1.000 ANG= 24.00 RAD= 0.419

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .650477E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9571E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.606 R/RH= 1.100 ANG= 20.00 RAD= 0.349

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .653066E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9609E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.606 R/RH= 1.100 ANG= 21.00 RAD= 0.367

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .653014E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9608E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.606 R/RH= 1.100 ANG= 22.00 RAD= 0.384

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .652923E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9607E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.606 R/RH= 1.100 ANG= 23.00 RAD= 0.401

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .652793E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9605E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.606 R/RH= 1.100 ANG= 24.00 RAD= 0.419

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

ENERGIA= .652625E+06 IND CAR= .2652E+01 IND ENE= .9602E-02

CARACT RECTA EN COORD POLARES

R= 31.750 R/RH= 1.200 ANG= 20.00 RAD= 0.349

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION

FETCH DER= 225.000 FETCH IZQ= 35.000 FETCH TOT= 330.000

TABLA A.5

## IDENTIFICACION DE VARIABLES

F	latitud, en grados
P	presión central, en pulg de mercurio
RM	radio de máximo viento, en mn
VD	velocidad de desplazamiento, en nudos
DL	incrementos de análisis, en mn
N	número de rectas por estudiar
M	número identificador del huracán
X(I)	ordenada al origen de la recta de análisis, en mn
Y(I)	abscisa al origen de la recta de análisis, en mn
MRI	valor inicial del ángulo
MRF	valor final del ángulo
MRIF	incremento angular
MAI	valor inicial de r/R
MAF	valor final de r/R
MAIF	incremento de r/R
R	distancia radial al punto de análisis, en mn
REL	$R/RM$
TH	ángulo en coordenadas polares de posición de puntos sobre la recta, en grados
FETD	fetch a la derecha del punto de distancia mínima, en mn
FETI	fetch a la izquierda del punto de distancia mínima, en mn
FETT	fetch total, en mn

ENERF energía, en nudos<sup>2</sup> mn

VARP parámetro de las características principales del huracán

VARE parámetro del índice de energía



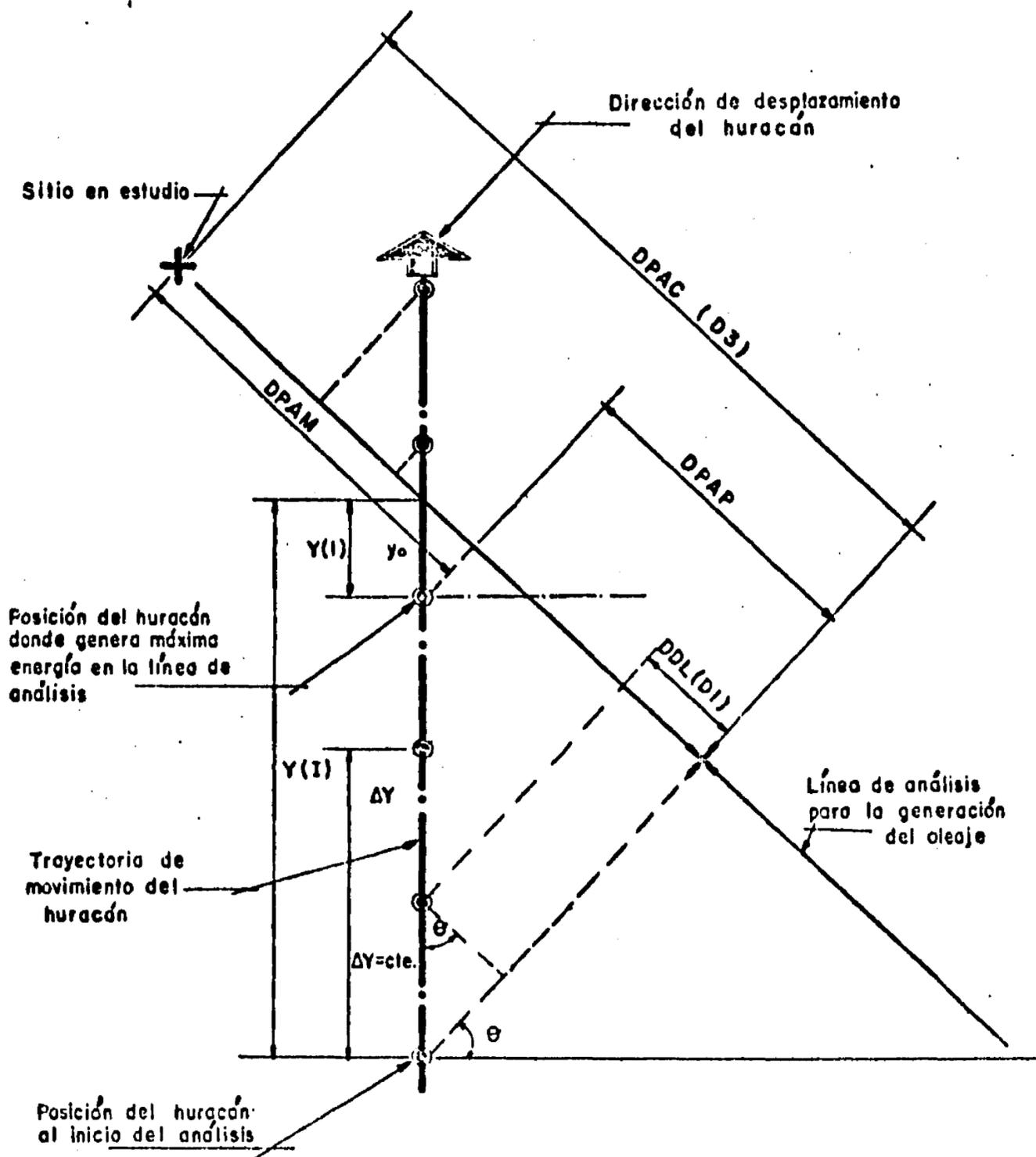


Fig B.1 Consideración para obtener el programa de análisis de variación en el tiempo de la distribución de velocidades de viento producido por un huracán sobre una línea de generación

COMPILACION EN FORTRAN  
OCTUBRE VIERNES/05/73 05154 PM

C ANALISIS DEL CAMPO DE VIENTO DE UN HURACAN SOBRE UNA AREA

C 0001000015  
START OF SEGMENT 002  
FORMAT SEGMENT 002 IS 0075 LONG,  
FORMAT SEGMENT 003 IS 0032 LONG.

```

DIMENSION X(100),Y(100)
1) FORMAT(1F11.3,1F9.3,3F10.3,1I8)
3) FORMAT(8H LATITUD,F10.3,16H PRESION CENTRAL,F10.3,17H RADIO MAX VI
TIENPO,F10.3,78H VEL DES,F10.3,79H INC ANAL,F10.3,11H HURAC ANAL,18/
2/)
4) FORMAT(15H DATOS RECTA X=,E12.4,3H Y=,E12.4)
5) FORMAT(12X,3H R=,F10.3,4H TH=,F10.3//60H DISTRIBUCION DE LAS VELOC
IIDADES SOBRE LA RECTA EN EL TIEMPO,13/6X,13H DIST PTO ANA,3X,10H V
ZELOCIDAD,4X,10H ANG PROY,4X,10H VEL PROY)
6) FORMAT(3X,4F14.3)
7) FORMAT(35H CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION/11H FETCH DER=,F10.3
1,11H FETCH 120=,F10.3,11H FETCH TOT=,F10.3,79H ENERGIA=,E12.4,9H IN
2D CAR=,E12.4,9H IND ENE=,E12.4//)
8) FORMAT(2F6.2,4I5)
9) FORMAT(96H CARACTERISTICAS DE LA RECTA DE MAXIMA ENERGIA/6H R/RH=,
1F5.2,4H TH=,F5.2//29H CARACTERISTICAS DEL ANALISIS/13H TIEMPO TOTA
2L,15,24H TIEMPO ANTES DEL MAXIMO,15,22H INCREMENTOS DE TIEMPO,15/2
34H DIST AL PTO DE ANALISIS,F10.3)
3) READ 10,F,P,RH,VD,DL,M

```

```

C 0021000010

```

PRINT 30,F,P,RH,VD,DL,M

C 0021000013  
FIB IS 0005 LONG  
C 0021000013  
FIB IS 0005 LONG

```

READ 80,DM,PD,K,L,KL,DPAH
PRINT 90,DM,PD,K,L,KL,DPAH
PD=(PD/180.0)+3.1416
XM=DM*RH/(COS(PD))
YM=DM*RH/(SIN(PD))
YA=YM*(L/KL)+VD
I=1

```

```

C 0021001011
C 0021002013
C 0021003011
C 0021003014
C 0021004011
C 0021004214
C 0021004418
C 0021004512
C 0021004811
C 0021004815
C 0021005512
C 0021005515
C 0021005711
C 0021005910
C 0021005A12
C 0021005B14
C 0021005F11
C 0021006215
C 0021006612
C 0021006910
C 0021006A11
C 0021006A15
C 0021006C10
C 0021006E14
C 0021006F12
C 0021007110
C 0021007113
C 0021007513
C 0021007915
C 0021007E13

```

```

Y(I)=YM*(L/KL)+VD
X(I)=Y(I)*(TAN(PD))
PRINT 90,X(I),Y(I)
GO TO 51

```

12 I=I+1

```

N=(K/KL)+1
IF(I=N)14,14,28

```

14 IJ=I-1

```

Y(I)=Y(IJ)+(VD/KL)
X(I)=Y(I)*(TAN(PD))

```

5 A=ATAN2(Y(I),X(I))

```

B=1.570796327-A
AR=0.10000.0
IB=AR
B=10/10000.0
IF(B=1.5707)42,41,42

```

41 W=0.0

```

Z=Y(I)
GO TO 43

```

43 W=X(I)\*(COS(B))+Z,

```

Z=Y(I)*(SIN(B))+Z

```

44 W=SQRT(W\*\*2.+Z\*\*2.)

```

TH=ATAN(Z/W)

```

```

C 0021007110
C 0021007113
C 0021007513
C 0021007915
C 0021007E13

```

```

IF(X(I)=0.0)34,37,37
34 IF(Y(I)=0.0)36,35,35
35 TH=).1416*TH
GO TO 37
36 TH=-(.3,1416-TH)
37 ATH=(TH*180.0)/3.1416
KA=K-(I-1)*KL
PRINT 50,R,ATH,KA
RE=1.5708*TH
ENERT=0.
E=0.
22 E=E+1.
DLC=E*DL-DL
24 RC=SQRT(R**2,+DLC**2.)
C=RC/RH
DTH=ATAN(DLC/R)
THC=TH-DTH
ALU=((9,+1.2*VD)/180)*3.1416
ALD=((26,+0.8*VD)/180)*3.1416
IF(C=1.0)15,15,16
15 ALC=ALU
GO TO 19
16 IF(C=1.5)17,18,18
17 ALC=((ALD-ALU)/0.5)*(C=1.0)+ALU
GO TO 19
18 ALC=ALD
19 GA=ALC+THC
COS=0.23*RC*SIN(F)
CVD=0.5*VD*COS(GA)
VG=0.95*SQRT((29.92-P)*(1/C)*EXP((-1/C)))
V=VG+CR+CVD
ANG=1.5708+GA-BE
U=V*COS(ANG)
DPA=DPA+(Y(I)-YH)*(COS(PO))+DLC
PRINT 60,DPA,V,ANG,U
ENERT=ENERT+2.
ENERT=ENERT+ENERT
IF(DLC=0.)25,21,21
21 IF(U=15.)23,23,22
23 FETD=DLC
F=0.
27 FET=1.
FET=E*DL
GO TO 24
25 IF(U=15.)26,26,27
26 FETI=ABS(FET)
FLTI=FETD+FETI
VARP=17.662*((SQRT(29.92-P))/((SIN(F))+RH))
VARE=ENERT/(68670.*RH**2.)
PRINT 70,FETD,FLTI,FETI,ENERT,VARP,VARE
GO TO 12
28 IF(U=1)29,29,31
29 CONTINUE
STOP
END

```

```

C 002100A0:3
C 002100A2:3
C 002100A4:3
C 002100A7:0
C 002100A8:3
C 002100AA:1
C 002100AD:4
C 002100B0:0
C 002100B2:2
C 002100B4:0
C 002100B6:2
C 002100B8:3
C 002100BA:0
C 002100BC:4
C 002100BE:4
C 002100C0:2
C 002100C2:4
C 002100C4:2
C 002100C6:1
C 002100C8:5
C 002100CA:2
C 002100CB:3
C 002100CD:5
C 002100CF:4
C 002100D0:5
C 002100D2:1
C 002100D4:10
C 002100D6:14
C 002100D8:15
C 002100DA:15
C 002100DC:12
C 002100DE:4
C 002100E0:5
C 002100E2:4
C 002100E4:5
C 002100E6:1
C 002100E8:0
C 002100EA:3
C 002100EC:12
C 002100EE:5
C 002100F0:10
C 002100F2:0
C 002100F4:5

```

194

FORMAT SEGMENT 003 IS 000E LONG.

```

00210131:4 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 00210100
00210133:0 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 002100DB
00210135:0 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 002100D0
00210137:4 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 00210048

```

TABLA B. 1c

LATITUD 0.384 PRESION CENTRAL 27.060 RADIO MAX VIENTO 14.130  
 VEL DES 20.000  
 INC ANAL 10.000 HURAC ANAL A

CARACTERISTICAS DE LA RECTA DE MAXIMA ENERGIA  
 R/RH= 1.10 TH=25.00

CARACTERISTICAS DEL ANALISIS  
 TIEMPO TOTAL 20 TIEMPO ANTES DEL MAXIMO 15 INCREMENTOS DE TIEMPO !  
 DIST AL PTO DE ANALISIS 100.000  
 DATOS RECTA Y= .1570E+03 X= .3368E+03  
 R= 147.929 TH= 24.996

DISTRIBUCION DE LAS VELOCIDADES SOBRE LA RECTA EN EL TIEMPO 20

DIST PTO ANA	VELOCIDAD	ANG DEG	VEL WIND
371.892	37.135	0.713	27.135
381.892	37.165	0.663	29.501
391.892	36.175	0.593	31.233
401.892	36.353	0.525	33.152
411.892	36.347	0.459	34.377
421.892	36.165	0.395	35.773
431.892	37.057	0.314	35.104
441.892	37.325	0.276	35.915
451.892	36.784	0.221	35.812
461.892	35.966	0.169	35.453
471.892	35.131	0.121	34.575
481.892	34.214	0.075	34.117
491.892	33.225	0.033	33.211
501.892	32.187	-0.007	32.176
511.892	31.101	-0.048	31.071
521.892	29.970	-0.079	29.857
531.892	28.830	-0.111	28.654
541.892	27.660	-0.141	27.377
551.892	26.475	-0.169	26.099
561.892	25.279	-0.195	24.800
571.892	24.075	-0.219	23.499
581.892	22.868	-0.242	22.201
591.892	21.659	-0.264	20.911
601.892	20.450	-0.284	19.633
611.892	19.244	-0.302	18.370
621.892	18.041	-0.320	17.124
631.892	16.841	-0.337	15.875
641.892	15.647	-0.353	14.685
361.892	36.518	0.803	25.359
351.892	35.613	0.873	22.892
341.892	34.556	0.941	20.359
331.892	33.366	1.007	17.830
321.892	32.063	1.071	15.370
311.892	30.669	1.132	13.030

CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION  
 FETCH DER= 270.000 FETCH IZD= 60.000 FETCH TOT= 330.000  
 ENERGIA= 2550E+00 INC CAR= .6345E+01 INC FNE= .11882E+01

R= 133.876 TH= 24.996

DISTRIBUCION DE LAS VELOCIDADES SOBRE LA RECTA EN EL TIEMPO 15

TABLA B. 1d

196

DIST. PTO ANA	VELOCIDAD	ANG. PROY	VEL. PRDY
353.766	39.252	0.733	29.170
363.766	39.836	0.658	31.507
373.766	40.210	0.585	33.529
383.766	40.373	0.513	35.104
393.766	40.330	0.443	36.442
403.766	40.073	0.376	37.278
413.766	39.680	0.312	37.768
423.766	39.168	0.251	37.800
433.766	38.398	0.194	37.675
443.766	37.571	0.141	37.197
453.766	36.645	0.091	36.491
463.766	35.638	0.045	35.601
473.766	34.565	0.002	34.565
483.766	33.441	-0.038	33.417
493.766	32.274	-0.075	32.156
503.766	31.080	-0.109	30.876
513.766	29.865	-0.141	29.566
523.766	28.623	-0.171	28.212
533.766	27.353	-0.198	26.827
543.766	26.132	-0.224	25.420
553.766	24.878	-0.246	24.118
563.766	23.623	-0.270	22.767
573.766	22.377	-0.291	21.431
583.766	21.124	-0.311	20.113
593.766	19.881	-0.329	18.815
603.766	18.644	-0.346	17.538
613.766	17.414	-0.362	16.283
623.766	16.191	-0.377	15.051
633.766	14.975	-0.392	13.841
643.766	13.865	0.408	26.588
653.766	12.760	0.424	23.848
663.766	11.660	0.440	21.039
673.766	10.565	0.454	18.248
683.766	9.475	0.467	15.549
693.766	8.390	0.479	13.005

CARACTERÍSTICAS DE LA DISTRIBUCION  
 PUNTO DE PARTIDA = 200,000 PUNTO DE FIN = 69,000 PUNTO TOTAL = 300,000  
 ENERGIA = .2630E+06 IND CAR = .6345E+01 IND ENE = .2064E-01

R = 125.424 IH = 24.996

DISTRIBUCION DE LAS VELOCIDADES SOBRE LA RECTA EN EL TIEMPO 16

DIST. PTO ANA	VELOCIDAD	ANG. PROY	VEL. PRDY
353.766	31.362	0.733	30.736
363.766	31.974	0.653	33.331
373.766	32.358	0.575	35.539
383.766	32.409	0.498	37.331
393.766	32.269	0.424	38.648
403.766	32.106	0.354	39.499
413.766	31.809	0.287	39.909
423.766	31.288	0.224	39.971
433.766	30.634	0.165	39.587
443.766	29.763	0.111	38.762
453.766	28.775	0.060	37.594
463.766	27.667	0.010	36.088
473.766	26.447	-0.037	34.259

TABLA B. 2a

```

10 REM "GENERACION DEL CAMPO DE VIENTO DE UN HURACAN"
11 FIXED 4
20 DIM A(300)
30 MAT A=ZER
40 DEG
50 INPUT P,P1,V1,D1,M,D2,P1,K,L,K1,D3
60 PRINT "LATITUD="P;"AFESION CENTRAL="P1;"RADIO MAX VIENTO="R1
70 PRINT "VEL DESP="V1;"INC ANALISIS="D1;"HURACAN NO."M
80 PRINT
90 PRINT "CARACTERISTICAS DE LA PECTA DE MAXIMA ENERGIA:"D2;P1
100 PRINT
110 PRINT "CARACTERISTICAS DEL ANALISIS"
120 PRINT
130 PRINT "TIEMPO TOTAL="K;"TIEMPO ANTES DEL MAXIMO="L;"INC DE TIEMPO="K1
140 PRINT "DISTANCIA AL PUNTO DE ANALISIS="D3
150 PRINT
160 PRINT
170 PRINT
180 Y1=D2+R1/SINP1
190 Y2=Y1+L+V1
200 I=1
210 Y=Y1+L+V1
220 X=Y*TANP1
230 PRINT
240 GOTO 300
250 I=I+1
260 N=K/K1+1
270 IF I>N THEN 1240
280 Y=Y-V1+K1
290 X=Y*TANP1
300 D4=(Y-Y1)*COSP1
310 D5=D3+D4
320 A=ATN(Y/X)
330 B=90-A
340 B=INT(B*10000)/10000
350 IF B#90 THEN 390
360 N=0
370 Z=Y
380 GOTO 410
390 W=X+COS(B)*Z
400 Z=Y+SIN(B)*Z
410 R=SQRT(W2+Z2)
420 T1=ATN(Z/W)
430 IF X >= 0 THEN 480
440 IF Y < 0 THEN 470
450 T1=180+T1
460 GOTO 430
470 T1=-180+T1
480 A2=T1
490 K2=K-(I-1)*K1
500 PRINT "DATOS DE LA PECTA:";"X="X;"Y="Y;"R="R;"TH="A2
505 PRINT "TIEMPO:"K2
510 D2=90+T1

```

TABLA B. 2b

```

520 E1=H=G=E=H1=0
530 E=E+1
540 D6=E+D1-B1
550 D7=D5-D6
560 IF D7<0 THEN 620
570 R2=SQR(R12+D712)
580 C=R2/R1
590 D8=ATN(D7/R)
600 T2=D8+T1
610 GOTO 670
620 D7=ABS(D7)
630 R2=SQR(R12+D712)
640 C=R2/R1
650 D8=ATN(D7/R)
660 T2=T1-D8
670 A3=9+1.2*V1
680 A4=26+0.8*V1
690 IF C>1 THEN 720
700 A5=A3
710 GOTO 760
720 IF C >= 1.5 THEN 750
730 A5=(A4-A3)*0.5*(C-1)+A3
740 GOTO 760
750 A5=A4
760 G1=A5+T2
770 C2=0-0.23*R2*SINF
780 C3=0.5*V1+COSG1
790 V2=69.95*SQR((29.92-P)*1/C*EXP(-1/C))
800 V=V2+C2+C3
810 A6=90+G1-B2
820 U=V*COS(A6)
830 IF D6>D5 THEN 990
840 IF U<10 THEN 530
850 PRINT D6,TAB18,V,TAB32,A6,TAB47,U
860 H=D6/D1
870 A(H)=U
880 J1=D6/D1
890 H1=H1+1
900 F1=H1*D1
910 E2=D1*U12
920 E1=E2+E1
930 IF K2#K THEN 530
940 IF H1#1 THEN 960
950 M1=D6
960 IF M1 >= 15 THEN 530
970 M1=D6
980 GOTO 530
990 IF U <= 10 THEN 1030
1000 PRINT D6,TAB12,V,TAB32,A6,TAB47,U
1010 H=D6/D1
1020 A(H)=U
1030 G=G+1

```

## TABLA B. 2c

```
1040 F2=C+D1
1050 L2=D1*512
1060 F1=E1+E2
1070 GOTO 930
1080 F3=F2+F1
1090 V3=17.823*50*(29.92-P)/SINF*PI
1100 V4=E1*58670*F1*2
1110 H=H+1
1120 IF H=80 THEN 1150
1130 RCHJ=0
1140 GOTO 1110
1150 PRINT
1160 PRINT "CARACTERISTICAS DE LA DISTRIBUCION:"
1170 PRINT "FETCH DER="F2:"FETCH 130="F1:"FETCH TOT="F3
1180 PRINT "ENERGIA="E1:"IND CAR="V3:"IND ENC="V4
1190 STORE DATA I+1,H
1200 PRINT
1210 PRINT
1220 PRINT
1230 GOTO 250
1240 LOAD 1
1250 END
```

TABLA B.3

## IDENTIFICACION DE VARIABLES

F	latitud, en grados
P	presión central, en pulg de mercurio
R1	radio de máximo viento, en mn
V1	velocidad de desplazamiento del huracán, en nudos
D1	incremento de análisis, en mn
M	número identificador del huracán
D2	relación entre $r/R1$ en coordenadas polares para la posición de la línea de máxima energía
P1= $\theta$	ángulo en coordenadas polares de la posición de la línea de máxima energía
K	tiempo total, en h
L	tiempo antes del máximo, en h
K1	incremento del tiempo, en h
D3	distancia al punto de análisis, en mn
X,Y	coordenadas de la posición del huracán donde genera máxima energía en la línea de análisis
R, $\theta$	posición en coordenadas polares de la posición de la línea de máxima energía
K2	tiempo en el que se imprime la distribución de velocidades sobre la recta
D6	distancia del punto de análisis al sitio en estudio
V	velocidad del viento

- A<sub>0</sub> ángulo formado por la dirección del vector de la velocidad del viento y la línea de análisis
- U velocidad del viento proyectada sobre la línea de análisis
- F2 fetch a la derecha del punto de intersección de la línea perpendicular que une al centro del huracán con la línea de análisis
- F1 fetch a la izquierda
- F3 fetch total
- E1 índice de la energía generada por el huracán sobre la línea de análisis
- V3 parámetro de las características principales de huracán
- V4 parámetro de índice de energía

**FALTA PAGINA**

**No.**

**202**

## A P E N D I C E C

### PROGRAMA PARA OBTENER LAS CARACTERISTICAS DEL OLEAJE EN LA ZONA DE GENERACION DE UN HURACAN CON EL METODO SMB

#### C.1 Bases teóricas

##### C.1.1 Antecedentes

Wilson (1962) propuso un criterio para ajustar su método gráfico de generación (subinciso 4.4.2) y utilizar una computadora digital de alta velocidad. Como las ecuaciones fueron las del método SMB con el ajuste hecho en 1955, a continuación se procede con el criterio propuesto por Wilson, al análisis de las ecuaciones del SMB considerando su último ajuste (Bretschneider, 1970), y su adaptación para deducir un programa para computadora que permita obtener las características del oleaje en la zona de generación de un huracán. Las expresiones del método de SMB que se usan para calcular las características del oleaje significativo en función de las del campo de viento que las genera, son las indicadas en las ecs 4.43 y 4.44. Conforme el subinciso 4.4.1,

estas relaciones se aplican para campos de viento con dirección y velocidad constantes. Para usarlas en vientos con dirección y velocidades variables, se consideran incrementos de fetch  $x$  dentro de los cuales se acepta que la velocidad es constante.

### C.1.2 Variación de las características del oleaje para un viento variable sobre un fetch

Para cada  $x$  distancia (a lo largo del fetch) se puede considerar que la velocidad del viento,  $U$ , es constante, con lo que, diferenciando las ecs 4.43 y 4.44 se llega a:

$$\frac{dH}{dx} = f_1 \left( \frac{gH}{U^2} \right) \quad (C.1)$$

$$\frac{dC}{dx} = f_2 \left( \frac{C}{U} \right) \quad (C.2)$$

Con  $X = gx/U^2$ ,  $Y = gH/U^2$  y  $Z = C/U$ , es factible escribir las ecs 4.43 y 4.44 como

$$Y = A_1 \tan h (B_1 X^{m_1}) \quad (C.3)$$

y

$$Z = A_2 \tan h (B_2 X^{m_2}) \quad (C.4)$$

Diferenciando la ec C.3 respecto a  $X$  se tiene que

$$Y' = \frac{dY}{dX} = \frac{dH}{dX} \quad (C.5)$$

con lo cual

$$Y' = \frac{m_1 (2 B_1)^{1/m_1}}{2 A_1} \frac{(A_1 - Y) (A_1 + Y)}{[\log (A_1 + Y) - \log (A_1 - Y)]^{(1 - m_1)/m_1}} \quad (C.6)$$

Si se acepta que  $m_1 = 0.42$ ,  $A_1 = 0.283$  y  $B_1 = 0.0125$  (tabla 4.4), la ec C.6 se transforma a

$$Y' = 0.211 \frac{(0.283 - Y) (0.283 + Y)}{[\log (0.283 + Y) - \log (0.283 - Y)]^{1.381}} \quad (C.7)$$

expresión que permite valuar la variación de  $dH/dx$ , en metros por millas náuticas para un valor dado de  $Y$ .

Análogamente, diferenciando la ec C.4 respecto a  $X$ , se deduce

$$Z' = \frac{dZ}{dX} = \frac{U}{g} \frac{dC}{dX} \quad (C.8)$$

siendo en este caso

$$Z' = \frac{m_2 (2 B_2)^{1/m_2}}{2 A_2} \frac{(A_2 - Z) (A_2 + Z)}{[\log (A_2 + Z) - \log (A_2 - Z)]^{(1 - m_2)/m_2}} \quad (C.9)$$

el cual se transforma con  $m_2 = 1/4$ ,  $A_2 = 1.20$  y  $B_2 = 0.077$  (tabla 4.4) en

$$Z' = \frac{5.859 \times 10^{-5} (1.2 - Z) (1.2 + Z)}{[\log (1.2 + Z) - \log (1.2 - Z)]} \quad (C.10)$$

### C.1.3 Características del oleaje en un fetch inicial, $\Delta X_0$

Para un  $\Delta X_0$  pequeño, la velocidad del viento,  $U$ , puede aceptarse constante y la ec 4.44 aproximarse a la 4.49, con lo cual

$$\frac{c}{U} = A_2 B_2 \left[ \frac{gx}{U^2} \right]^{m_2} \quad (C.11)$$

De la ec C.11 se puede deducir el valor de la celeridad del oleaje,  $C_a$ , al final del fetch  $\Delta X_0$ . Así, para  $x = \Delta X_0$ , de la ec C.11 se deduce

$$C_a = A_2 B_2 g^{m_2} U_0^{1 - 2m_2} \Delta X_0^{m_2}$$

por lo que

$$C_a = 1.496 U_0^{1/2} \Delta X_0^{1/4} \quad (C.12)$$

donde  $C_a$  está en nudos,  $U_0$  en nudos y  $\Delta X_0$  en millas náuticas.

El tiempo que transcurre para que el oleaje alcance el final del fetch, se calcula de acuerdo con la ec 4.45 como

$$\Delta t = \int_0^{\Delta X_0} \frac{2 dx}{c} \quad (C.13)$$

al sustituir la ec C.12 en C.13 e integrarla, se obtiene

$$\Delta t_0 = 1.783 U_0^{-1/2} \Delta X_0^{3/4} \quad (C.14)$$

donde  $\Delta t$  está en horas,  $U$  en nudos y  $\Delta X_0$  en millas náuticas. Si  $\Delta X_0$  se despeja de la ec C.14, se tiene:

$$\Delta X_0 = 0.463 (\Delta t_0)^{4/3} U^{2/3} \quad (C.15)$$

el cual al sustituirlo en la ec C.12, se infiere que

$$C_2 = 1.234 U_0^{2/3} (\Delta t_0)^{1/3} \quad (C.16)$$

Por otra parte, como para las condiciones de análisis la ec 4.43 tiende a la ec 4.48, resulta

$$\frac{gH}{U^2} = A_1 B_1 \left[ \frac{gX}{U^2} \right]^{m_1} \quad (C.17)$$

con lo que

$$\frac{gH}{U^2} = 0.00354 \left[ \frac{gX}{U^2} \right]^{0.42} \quad (C.18)$$

y

$$H_a = 0.0103 U_0^{1.16} \Delta X_0^{0.42} \quad (C.19)$$

donde  $H_a$  es la altura de la ola, en metros, al final del fetch inicial  $\Delta X_0$ , el cual está en millas náuticas, y  $U$  es la velocidad del viento, en nudos.

Mediante las ecs 4.7 y C.16, el periodo de la ola se calcula con la expresión

$$T_a = 0.406 U^{2/3} (\Delta t)^{1/3} \quad (C.20)$$

donde  $T_a$  es el periodo de la ola, en segundos,  $U$  la velocidad del viento, en nudos y  $\Delta t$  el tiempo de transito del oleaje en el fetch en estudio, en horas.

#### C.1.1.4 Integración numérica de los parámetros del oleaje en un campo variable tanto en el espacio como en el tiempo

En el campo de viento producido por un huracán, la velocidad es función tanto de su posición como del tiempo, esto es  $U(x, t)$ . Así, si se desea analizar el oleaje producido por un huracán sobre una cierta línea de generación, la distribución de la velocidad del viento actuante sobre esta variará de acuerdo con la posición del huracán que la provoca. De esta manera, el oleaje que se genera se puede deducir integrando las ecs C.7 y C.10 por un procedimiento numérico de incrementos de espacio-tiempo. En la fig C.1 se muestra el procedimiento a seguir y la malla utilizada considerando la variación de la velocidad en el tiempo, respecto a una línea de generación con origen en el punto en estudio donde se desean conocer las características del oleaje.

La distribución de la velocidad del viento producida por el huracán sobre la línea de generación en un tiempo cualquiera se determina con el programa del Apéndice B. De esta manera, en cada punto de la malla se conoce la velocidad del viento debido al huracán en la dirección de la línea de generación asignada. Así, el campo de viento del huracán es representado en una malla rectangular espacio-tiempo cuyos intervalos en distancia,  $\lambda$  y  $\zeta$ , son lo suficientemente pequeños para garantizar una buena aproximación en la integración. Definida la malla, cualquier punto de intersección puede seleccionarse arbitrariamente como punto de partida para la propagación del oleaje.

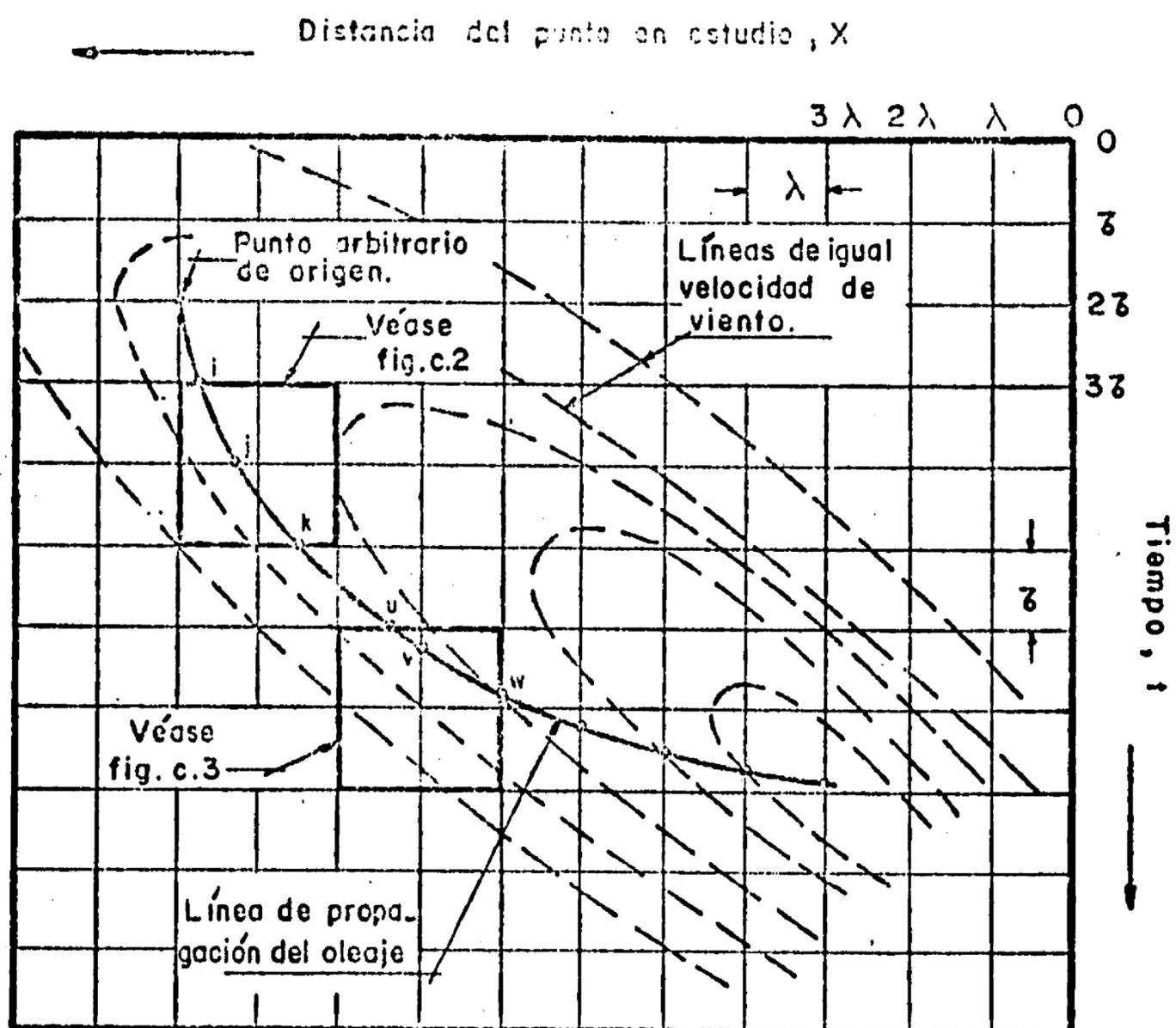


Fig C.1 Representación esquemática de la malla utilizada para relacionar el campo de viento de un huracán con la generación del oleaje

Los incrementos diferenciales de integración  $\lambda$  dependen esencialmente del valor de la velocidad de grupo  $C_g$  del oleaje para el caso de oleaje generado por viento en aguas profundas (ver 4.2.4) se calcula

$$C_g = C/2 \quad (C.21)$$

Debido a que el gradiente de la línea de propagación en la malla (fig C.1) es una medida de  $C_g$ , es claro que  $\lambda$  es el incremento diferencial de integración si

$$C/2 < \lambda/\zeta \quad (C.22)$$

y  $\zeta$  es el incremento diferencial de integración

$$C/2 > \lambda/\zeta \quad (C.23)$$

En el paso inicial de generación (punto 0)  $\zeta$  es el incremento diferencial de integración, por lo que  $\Delta t = \zeta$ , con lo cual las ecuaciones C.15, C.16, C.19 y C.20 se determinan respectivamente  $\Delta X_0$  y las características del oleaje al final de ese intervalo (punto a)  $C_a$ ,  $H_a$  y  $T_a$ .

El valor de  $U(x, t)$  usado en esas ecuaciones es el valor de  $U_0$  correspondiente al punto de inicio 0.

Integraciones futuras involucran el empleo de las ecuaciones C.7 y C.10.

Mientras  $C/2 < \lambda/\zeta$ , el intervalo de tiempo  $\zeta$  se usa en el cómputo. De esta manera, conocidas las características del oleaje en un punto cualquiera J (fig C.2), la velocidad del viento para el siguiente paso se calcula como

$$U_J = U_{m-1,n} + \frac{\Delta X^1}{\lambda} (U_{m,n} - U_{m-1,n}) \quad (C.24)$$

Por otra parte

$$\Delta X_j = \frac{C_j}{2} \zeta \quad (C.25)$$

establece el siguiente punto de cálculo k.

De la ec C.7 se deduce que de:

$$Y_j = \frac{gH_j}{U_j^2} \quad (C.26)$$

resulta

$$Y'_j = \left(\frac{dH}{dx}\right)_j \quad (C.27)$$

con lo cual

$$H_k = H_j + \left(\frac{dH}{dx}\right)_j \Delta X_j = H_j + Y'_j \Delta X_j \quad (C.28)$$

Similarmente, de la ec C.10, con

$$Z_j = \frac{C_j}{U_j} \quad (C.29)$$

se tiene que

$$Z'_j = \frac{U_j}{g} \left(\frac{dC}{dx}\right)_j \quad (C.30)$$

y que al deducir

$$C_k = C_j + \left(\frac{dC}{dx}\right)_j \Delta X_j = C_j + \frac{gZ'_j}{U_j} \Delta X_j \quad (C.31)$$

se obtiene

$$T_k = \frac{2\pi}{g} C_k \quad (C.32)$$

En el momento en que  $c/2 > \lambda/\zeta$ , se utilizará  $\lambda$  como incremento diferencial de integración. Si esto ocurre en el punto  $u$  (fig C.3), se tendrá que

$$\Delta t_u = \frac{2\Delta X''}{C_u} \quad (C.33)$$

El cálculo de  $H_v$ ,  $C_v$  y  $T_v$  se hace en forma análoga a lo señalado para el punto  $k$ , aunque la interpolación para obtener la velocidad del viento para el siguiente paso se hará de acuerdo con

$$U_v = U_{m,n-1} + \frac{\Delta t_u}{\zeta} (U_{m,n} - U_{m,n-1}) \quad (C.34)$$

y las características del oleaje para el punto  $w$  se calculan como

$$H_w = H_v + Y'_v \lambda \quad (C.35)$$

y

$$C_w = C_v + \frac{gZ'_v}{U_v} \lambda \quad (C.36)$$

siendo

$$T_w = \frac{2\pi}{g} C_w \quad (C.37)$$

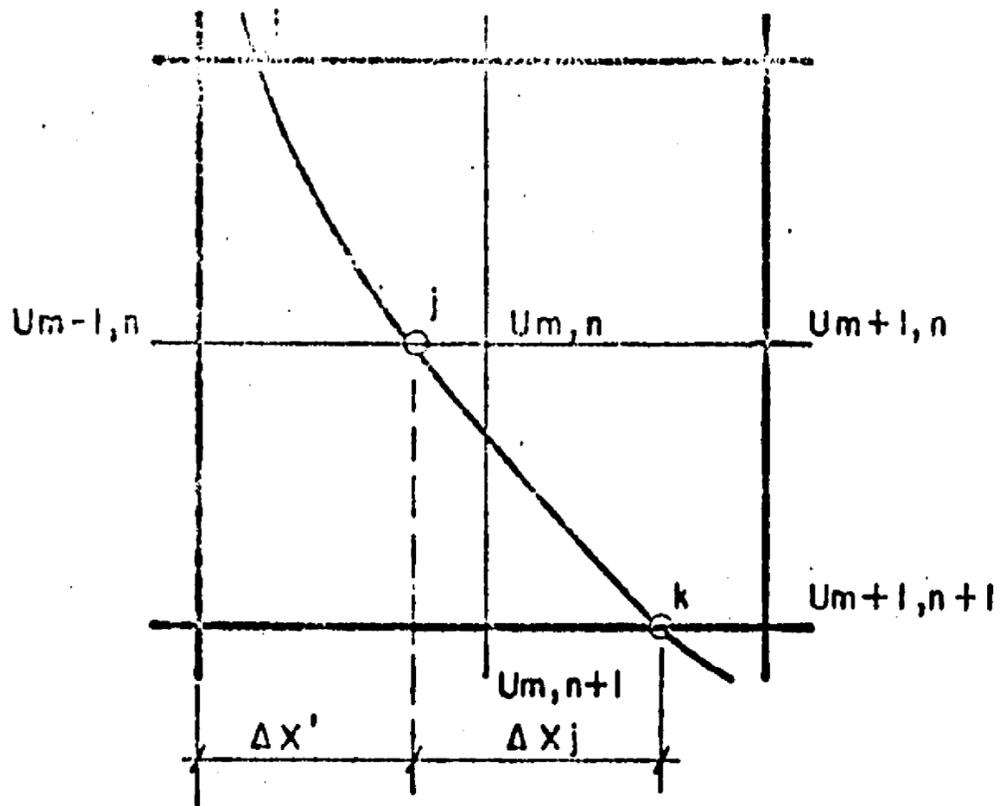


Fig C.2 Esquema de cálculo cuando se utiliza  $\tau$  como incremento diferencial de integración

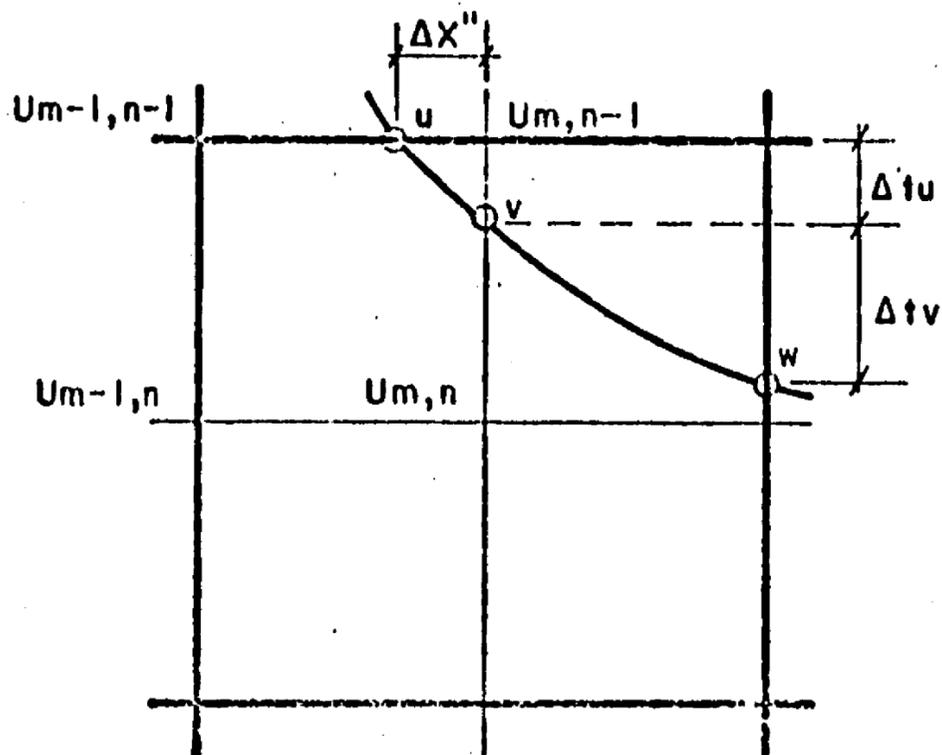


Fig C.3 Esquema de cálculo cuando se utiliza  $\lambda$  como incremento diferencial de integración

## Desarrollo del programa

La tabla C.1 se muestra el listado del programa para la computadora Packard 9830 A. a fin de obtener las características del oleaje en la zona de generación de un huracán, de acuerdo con las bases teóricas in dadas en el inciso anterior. Para determinar la información que requiere el programa, es necesario usar el de la tabla B.2.

Principales variables que se utilizaron en la elaboración del programa son:

contador

tiempo de inicio. Permite cargar en la memoria del programa la información del campo de viento deducida del programa B.2 para ese instante

incremento de distancia,  $\lambda$

incremento de tiempo,  $\zeta$

contador

contador

información almacenada del campo de viento generado sobre la línea en estudio

distancia inicial

tiempo

velocidad

distancia

celeridad

altura

periodo

tiempo

TABLA C. 1a

```

5 PRINT "GENERACION OLAJE HURACAN METODO SNS"
10 FIXED 3
20 DIM A$(80),B$(80)
30 INPUT M,J,D1,K1,E1
50 LOAD DATA J+1,A
55 IF E1=0 THEN 30
60 I=0
65 I=I+1
70 PRINT I,A(I)
75 IF I=80 THEN 30
78 GOTO 65
80 INPUT X
90 K=A0=0
110 PRINT "VALORES INICIALES: "I"X="D1*X;"T="(J-1)*K1;"U="A(I)
120 U=A(I)
130 A1=0.463*(A(I))^(2/3)*K1^(4/3)
140 A2=1.234*(A(I))^(2/3)*K1^(1/3)
150 A3=0.0103*((A(I))+1.16)*(A1+0.42)
160 A4=0.405*(A(I))^(2/3)*K1^(1/3)
170 Y=0
180 PRINT
190 PRINT TAB(23,"CARACTERISTICAS DEL OLAJE")
200 PRINT
210 PRINT "DISTANCIA TIEMPO VELOCIDAD ALTURA PERIODO CELERIDAD"
220 PRINT
230 Y=A1+Y
240 D=D1*X-Y
245 PRINT D;J*K1;U,A3,A4,A2
260 IF D >= 80*D1 THEN 310
290 IF A2/2 <= D1/K1 THEN 360
300 IF A2/2 > D1/K1 THEN 500
310 M=M-1
320 IF M > 0 THEN 30
330 END
360 C=INT(D/D1)
370 J=J+1
380 LOAD DATA J+1,A
390 U=A(C+1)+((C+1)*D1-D)/D1*(A(C)-A(C+1))
400 IF U=0 THEN 330
410 A1=A2/2*K1
420 A6=37.055*A3/U+2
430 A7=(0.211*(0.283-A6)*(0.283+A6))/((LOG(0.283+A6)-LOG(0.283-A6)))
440 A3=A3+A7*A1
450 A8=A2/U
460 A9=0.00005859*(1.2+A8)*(1.2-A8)/((LOG(1.2+A8)-LOG(1.2-A8)))
470 A2=A2+68670*A9*A1/U
480 A4=0.329393725*A2
483 Y=A1+Y
486 D=D1*X-Y
487 PRINT D;J*K1;U,A3,A4,A2
490 GOTO 230
500 C=INT(D/D1)
510 K=K+1
520 IF K#1 THEN 580

```

## TABLA C. 1b

```
530 A1=(D/D1-C)*D1
540 U=A[C+1]+((C+1)*D1-D)/D1*(A[C]-A[C+1])
550 A0=A0+2*A1/A2
560 T=K1*J+A0
570 GOTO 650
580 A0=A0+2*A1/A2
590 A1=D1
600 T=K1*J+A0
610 T1=INT(T/K1)
620 LOAD DATA T1+1,A
630 LOAD DATA T1+2,B
640 U=A[C]+2*A1/A2*(B[C]-A[C])
650 A6=37.055*A3/U+2
660 A7=(0.211*(0.283-A6)*(0.283+A6))/((LOG(0.283+A6)-LOG(0.283-A6))*1.381)
670 A3=A3+10*A7
680 A8=A2/U
690 A9=0.00005859*(1.2+A8)*(1.2-A8)/(LOG(1.2+A8)-LOG(1.2-A8))+3
700 A2=A2+686700*A9/U
710 A4=0.329393725*A2
713 Y=A1+Y
716 D=D1*X-Y
720 PRINT D;T;U;A3;A4;A2
730 GOTO 280
740 IF J=1 THEN 360
```

## A P E N D I C E D

### ANALISIS ESTADISTICO DEL OLEAJE GENERADO EN LA ZONA a DEBIDO A HURACANES, EN RELACION CON UN SITIO EN LA COSTA A 25° LATITUD NORTE

#### *D.1 Características de los huracanes*

De acuerdo con los incisos 2.7 y 5.4, en la tabla D.1 se muestran las ca racterísticas de los huracanes a estudiar para la generación del oleaje.

Para dicho caso, conforme las ecs 2.3 y 2.4, el índice de presión central tiene una media de 29.08 y una desviación estándar de 0.85. Con estos va lores se obtuvo el índice de presión central,  $p_o$ , para diferentes fre cuencias de ocurrencia, considerando que sigue una ley de distribución normal (tabla D.1, col 2).

De la ec 2.5 se obtuvo para los diferentes valores de  $p_o$  los radios medios de máximo viento, los cuales se muestran en la tabla D.1, col 3.

En relación con la velocidad de desplazamiento, se consideró para todos los casos una media de 9.20 nudos, como representativa de la zona, y para la dirección de incidencia se seleccionó la dirección SW, la cual es la pre do minante de acuerdo con la fig 2.15.

TABLA D.1 CARACTERISTICAS DE LOS HURACANES A ANALIZAR EN LA ZONA "a"  
(latitud  $\phi = 25^\circ$ )

Condición analizada	Frecuencia de ocurrencia en 100 años	Indice de presión - central $p_0$ (pulgadas)	Radio de máximo viento R (mn)	Velocidad de despla- zamiento $V_d$ (nudos)
1	1	27.15	14.64	9.20
2	2	27.38	16.02	9.20
3	10	28.02	20.58	9.20
4	20	28.38	23.69	9.20
5	30	28.64	26.23	9.20

### *D.2 Análisis de los índices de energía máximos; posiciones respectivas y zona de generación*

Considerando los esquemas de cálculo de las tablas 5.5 y 5.6 se procedió al estudio de los índices de energía máximos, sus posiciones y acotamiento de la zona de generación (tabla D.2).

### *D.3 Obtención del oleaje significativo máximo*

Con la información de la tabla D.2 y las ecs 5.31 y 5.32, se valuaron las características del oleaje significativo máximo, las que se muestran en la tabla D.3, cols 2 y 3. Como puede observarse, dado el rango de variación de los parámetros, las características del oleaje son muy similares entre sí.

Los valores del oleaje significativo corresponden a la línea de máxima energía, la cual de acuerdo con la ec 5.24 tiene una posición de  $19.17^\circ$  respecto a la dirección de desplazamiento del huracán. Si se considera que el punto de análisis se encuentra a los  $25^\circ$  norte y que el huracán al desplazarse por la zona a pase por el centro, se deduce que el oleaje más desfavorable proveniente de esta perturbación sobre el punto de interés dependerá de las características del huracán al abandonar la zona de generación y la distancia por recorrer desde la frontera de dicha zona hasta el sitio en estudio. En la fig D.1 se muestra la variación de la frontera de generación para diferentes direcciones, misma que se indica en la tabla D.4 junto con las características respectivas del oleaje para cada línea de generación, con una frecuencia de 1 en 100 años.

TABLA D.2 ANALISIS DE LOS INDICES DE ENERGIA, POSICION Y ZONA DE GENERACION

Condición Analizada	$r/R$ ec 5.19	$E_{hmax}$ ec 5.18	$F$ ec 5.20	$(r/R)'$ ec 5.23	$O$ ec 5.24	$E'_{hmax}$ ec 5.22	$F'$ ec 5.25
1	2.11	364216	218	1.75	19.17	438707	240
2	2.07	349558	213	1.70	19.17	424218	236
3	1.91	294407	194	1.54	19.17	367111	216
4	1.80	253079	178	1.43	19.17	322499	201
5	1.71	218297	164	1.35	19.17	283977	187

TABLA D.3 CARACTERISTICAS DEL OLEAJE SIGNIFICANTE

Condición Analizada	H (m)	Oleaje Máximo T (seg)
1	11.13	13.32
2	10.94	13.20
3	10.15	12.71
4	9.49	12.29
5	8.88	11.89

TABLA D.4 VARIACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL OLEAJE (Condición 1)

$\theta'$ (°)	$\theta' - \theta$ (°)	$\epsilon$ ec 5.27	$F_i$ (mn)	$h$ ec 5.35	$\zeta$ ec 5.36	$H'$ (m)	$T'$ (m)	$D$ (mn)
19.17	0	1	24.49	1	1	11.13	13.32	178.43
30	10.83	.9980	24.44	.9974	.9985	11.10	13.30	104.80
45	25.83	.9890	24.22	.9854	.9915	10.97	13.21	61.41
60	40.83	.9731	23.83	.9644	.9794	10.73	13.05	39.96
75	55.83	.9516	23.30	.9359	.9629	10.42	12.83	27.49
90	70.83	.9259	22.67	.9017	.9432	10.04	12.56	19.76
105	85.83	.8976	21.98	.8643	.9216	9.62	12.28	15.07
120	100.83	.8689	21.28	.8262	.8995	9.20	11.98	12.92
135	115.83	.8415	20.61	.7900	.8785	8.79	11.70	13.78
150	130.83	.8174	20.02	.7580	.8601	8.44	11.46	20.46

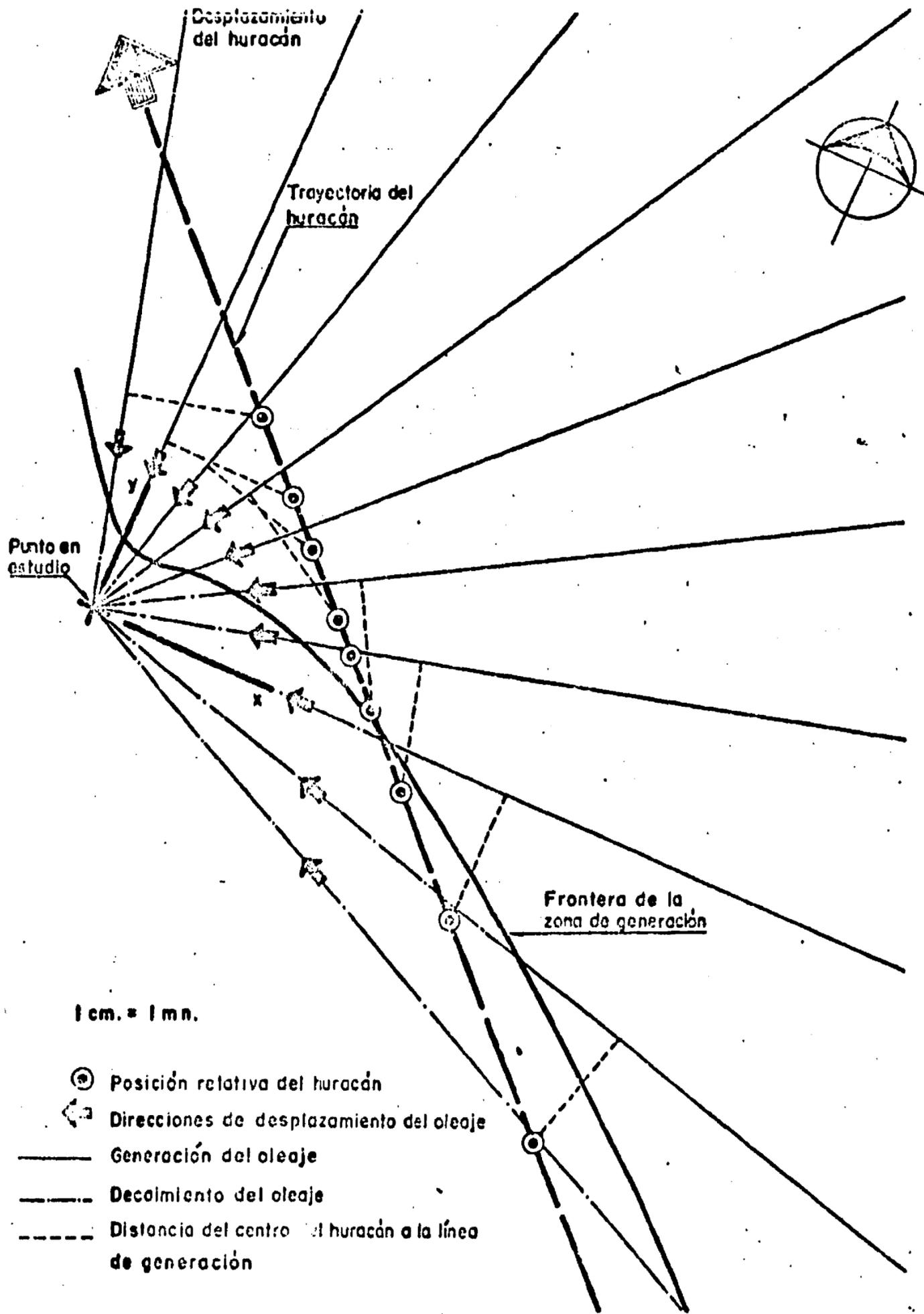


Fig D.1 Zonas de generación y decaimiento del oleaje producido por un huracán con desplazamiento

Si la distancia del punto en estudio al centro del huracán cuando cruza la latitud de  $25^{\circ}$  norte es de 60 mn, la distancia de decaimiento del oleaje para llegar a ese punto corresponde a la última columna de la tabla D.4.

Dicha tabla tiene la ventaja de proporcionar los elementos necesarios para conocer las características del oleaje en el sitio en estudio para diferentes direcciones de incidencia del mismo, con una frecuencia de 1 a 100 años. De esta manera, se puede hacer el análisis para el resto de las frecuencias de la tabla D.3.