
FACULTAD DE INGENIERIA

4556

- DISEÑO DE OBRAS DE
TOMA Y DESCARGA
MARITIMAS

T E S I S
Que para obtener el título de:
INGENIERO CIVIL
p r e s e n t a:
JAME F. DE LA MORA GOMEZ

U N I C O



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 esta 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.



EACULTAD DE INGENIERIA
Exámenes Profesionales
Núm.40-
Exp.Núm.40/204.2/

Universidad Nacional
Autónoma de
México

Al Pasante señor Jaime Federico de la Mora Gómez
P r e s e n t e

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el profesor Ing. Rolando Springall G., para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero CIVIL.


DISEÑO DE OBRAS DE TOMA Y DESCARGA
MARITIMAS

"Este tema deberá desarrollarse como sigue:

1. Generalidades
2. Modelos marítimos
3. Predicción de oleaje
4. Dimensionamiento de escolleras
5. Conclusiones."

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar examen profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D.F. 26 de Junio de 1970
EL DIRECTOR


Ing. Manuel Paulín Ortiz


MPO' MMO' eag

1.	GENERALIDADES	1
2.	MODELOS MARITIMO	4
2.1	Generalidades	4
2.2	Características de los modelos	4
2.3	Similitud dinámica	5
2.4	Determinación de las escalas	8
2.5	Direcciones del oleaje	10
2.5.1	Análisis de los registros de vientos	10
2.5.2	Planos de olas. Método de Irribarren	12
2.6	Construcción del modelo	16
3.	PREDICCIÓN DEL OLEAJE	20
3.1	Generalidades	20
3.2	Determinación del fetch, y su duración	20
3.3	Velocidad del viento en la superficie del mar. Teoría del viento geostrofico	27
3.4	Teoría de Sverdrup y Munk	32
3.5	Características del oleaje en la zona de generación	34
3.6	Características del oleaje en la zona de decaimiento	38
3.7	Características del oleaje en el sitio	39
4.	DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESCOLLERAS	45
4.1	Selección de la alternativa preliminar	45
4.2	Geometría de la escollera	45
4.3	Peso de los elementos	48
4.4	Tipos de escollera	55
5.	CONCLUSIONES	59
	RECONOCIMIENTO	61
	BIBLIOGRAFIA	62
	LISTA DE FIGURAS	
fig 1	Diagrama de Lenz para ocho direcciones de viento	13
fig 2	Diagrama de Lenz para cuatro direcciones de viento	13
fig 3	Plano de oleaje. Dirección Este	17

fig 4	Plano de oleaje. Dirección Norte	18
fig 5	Modelo Marítimo de la zona de Laguna Verde, Veracruz	19
fig 6	Predicción del oleaje debido al ciclón Carla	21 a 24
fig 7	Predicción del oleaje debido al ciclón Inés	25 y 26
fig 8	Determinación de la velocidad del viento geostrofico	30
fig 9	Determinación del viento superficial	31
fig 10	Relaciones entre el fetch, velocidad del viento y características del oleaje significativo	36
fig 11	Relaciones entre la duración y velocidad del viento y las características del oleaje significativo	37
fig 12	Obtención del periodo de la ola T_D , en la zona de decaimiento	40
fig 13	Obtención de la altura de la ola H_D , en la zona de decaimiento	41
fig 14	Variación de la altura de olas respecto a profundidad	44
fig 15	Alternativa propuesta	46
fig 16	Alternativa propuesta	47
fig 17	Alcance del oleaje	49
fig 18	Relaciones geométricas de la escollera en función de la profundidad del mar	50
fig 19	Relaciones de peso de los elementos de piedra y tetrápodos para la coraza de las escolleras, con respecto a la profundidad de esta	52
fig 20	Relación de los espesores de la coraza y el filtro en función de la profundidad del mar	57
fig 21	Secciones de escollera tipos I y II	58

DISEÑO DE OBRAS DE TOMA Y DESCARGA MARÍTIMAS

1. GENERALIDADES

Las obras de toma y descarga marítimas tienen en general dos grandes aplicaciones en obras de Ingeniería Civil. Una de ellas es para aprovechar el agua de mar dentro del sistema de enfriamiento de plantas termoeléctricas o nucleares, la otra es el aprovechamiento del agua de mar para convertirla, mediante una planta desaladora, en agua potable.

Debido a que el problema del diseño de las obras de toma y descarga marítimas para plantas termoeléctricas ó nucleares es mucho más complejo que para plantas desaladoras, y debido a que los resultados obtenidos son fácilmente generalizables a este último problema, se hará en este trabajo un análisis de como llevar a cabo un diseño de estas obras.

Son dos los principales problemas a los que un ingeniero se enfrenta al tratar de diseñar las obras de toma y descarga marítimas para plantas nucleares. El primero de ellos es la localización de las obras de toma y descarga de tal manera que se evite la recirculación del agua en el sistema de enfriamiento de la planta. Si ocurriera la recirculación del agua, la eficiencia de la planta puede bajar un 30 o 40 por ciento. Los principales factores que influyen en la recirculación son:

- a) Localización y distancia entre las obras de toma y descarga.
- b) Distribución de temperaturas en la superficie del mar cuando este funcionando la descarga
- c) La acción de la marea
- d) La acción del viento y su dirección
- e) Profundidad y configuración de la zona en estudio.

Para este primer problema una herramienta de gran utilidad es el uso de modelos marítimos donde se pueden estudiar los fenómenos de difusión y de transporte playero que intervienen decisivamente en el diseño de la localización de las obras de toma y descarga.

El segundo problema que se nos presenta es el dimensionamiento de los elementos de que constan las obras de toma y descarga desde el punto de vista de la acción del mar. El método de solución mas adecuado y dependiendo de los datos disponibles es haciendo estudios teóricos de las características del oleaje en la zona, basados en la teoría de Sverdrup y Munk, a partir de los datos de ciclones registrados, duración de los mismos y fetch generados. Las características que se llegarán a obtener son el período, la altura y la longitud de la onda. Estas características que corresponden a oleajes máximos y que tienen un mayor poder destructivo, servirán para el diseño de los elementos constitutivos de todas las obras que se tengan que realizar en el mar. Una vez que el oleaje sea conocido podemos ahora analizar la interacción que tiene la energía del oleaje con el material que se vayan a construir las obras.

En este trabajo se plantea un enfoque de análisis preliminar del problema, utilizando los únicos datos que en general se tienen, son:

- a) Corrientes y rosas de los vientos mensuales durante un cierto lapso de tiempo
- b) Esquemas sobre sistemas de agua de circulación
- c) Plano topográfico y batimétrico del sitio
- d) Datos sobre los ciclones que con mas fuerza han incidido sobre el sitio.

Debido a la escasez de grandes ríos en el país, al alto costo del agua, a los problemas de transportación en el altiplano, a la baja densidad de población y actividad sísmica en regiones de la costa este de la República, se ha

visto que, resulta muy conveniente la instalación de plantas con enfriamiento por agua de mar en las costas del Golfo de México.

Condiciones como las de Laguna Verde, a 70 km al norte del puerto de Veracruz, hacen factible pensar en la instalación de plantas para generación de energía eléctrica en un período de 10 a 15 años.

Se hace en este trabajo, aparte de una descripción del método para el diseño de obras de toma y descarga, una aplicación práctica para el caso de Laguna Verde, Ver., donde se ha pensado en la instalación de una planta para generación de energía eléctrica enfriada por agua de mar.

2. MODELO MARITIMO

2.1 Generalidades

Antes de que un proyecto de alto costo sea ejecutado, es conveniente algunas veces estudiar el desempeño de una replica a pequeña escala del sistema que va a ser construido. Estudios en modelos son realizados para prevenir errores costosos y para obtener información que nos ayude en el diseño del prototipo.

Sin embargo un estudio en modelo no nos da, por lo general, las respuestas a todas nuestras dudas. Como regla general se puede afirmar que si uno no ha comprendido la teoría básica del fenómeno que esta estudiando no puede diseñar un modelo adecuado ni interpretar de una forma correcta los resultados de las pruebas realizadas en el modelo.

En el caso del estudio de Laguna Verde, debido al alto costo del proyecto, se decidió que la construcción de un modelo marítimo sería muy adecuado para estudiar los fenómenos de arrastre playero y comprobar la localización y diseño de las obras de toma y descarga. Así mismo es muy importante hacer un estudio de la efectividad de las escolleras diseñadas contra la acción del oleaje, ya que, en algunas ocasiones las escolleras han fallado en su propósito inicial y han tenido efectos adversos.

2.2 Características de los modelos

Si las partes de un modelo tienen la misma forma que las partes del prototipo ambos sistemas serán geoméricamente similares. Esta similaridad geométrica se mantiene usualmente en todo tipo de modelos. Sin embargo, en modelos marinos y fluviales, donde las distancias horizontales son grandes comparadas con las distancias verticales, no es posible conservar esta similitud geométrica debido a que se presentaría un flujo fuertemente influen-

ciando por tensión superficial. Así mismo los modelos de fondo móvil no funcionarían satisfactoriamente ya que las corrientes no tendrían la fuerza suficiente para realizar el transporte de sedimentos o arrastre playero. En consecuencia los modelos fluviales y marítimos son frecuentemente distorsionados; o sea la escala de longitudes horizontales va a ser diferente de la escala de longitudes verticales si definimos como escala a la relación que existe a una característica en el prototipo con la misma característica en el modelo.

2.3 Similitud dinámica

Para que exista similitud dinámica entre dos sistemas geoméricamente semejantes es necesario que tengan redes de flujo geoméricamente semejantes en tiempos correspondientes. Así todas las fuerzas individuales que actúan sobre los elementos de masa de fluido pueden ser debidas a una fuerza de cuerpo, tal como el peso, o a fuerzas superficiales, tales como la presión, esfuerzos viscosos o la tensión superficial. Por lo tanto entre los sistemas de fuerzas del modelo y del prototipo debe existir una misma relación que es la llamada escala de fuerzas. El requisito para una sola escala de fuerzas es que los polígonos de fuerzas de ambos sistemas sean geoméricamente semejantes.

Para todos los casos en que el flujo es a superficie libre la condición necesaria para la similitud dinámica es que en ambos sistemas se conserve el número de Froude dado por la relación

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g L}} \quad (1)$$

ya que este número nos da una relación entre las fuerzas de gravedad con las de inercia. Debido a que en los flujos a superficie libre las fuerzas viscosas tienen poca influencia, el número de Reynolds, que es una relación entre las fuerzas viscosas y las de inercia, generalmente es de segunda importancia.

En modelos distorsionados el problema estriba en cual de las escalas de longitudes debemos usar para guardar condición de Froude. Según Reynolds se debe usar la escala vertical ya que esta determina las velocidades relativas de las ondas. La equivalencia del número de Froude de un modelo distorsionado y el prototipo esta dado por

$$\frac{(V_m)^2}{g_m h_m} = \frac{(V_p)^2}{g_p h_p}$$

$$V_e = \sqrt{g_e h_e}$$

pero como $g_m = g_p$ o $g_e = 1$

$$\therefore V_e = \sqrt{h_e} \quad (2)$$

Por otra parte sabemos que: $\frac{L_p}{L_m} = L_e$

Por lo tanto la relación entre velocidades de sistemas con flujos semejantes es:

$$V_e = \frac{L_e}{t_e} = \frac{V_p}{V_m} ;$$

de donde

$$\begin{aligned} \frac{L_e}{t_e} &= \sqrt{h_e} \\ t_e &= \frac{L_e}{\sqrt{h_e}} \end{aligned} \quad (3)$$

Para definir la escala de tiempo podemos recurrir a la teoría

lineal del oleaje. Esta nos dice que:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \tanh kd \quad (4)$$

ahora bien cuando d tiende a cero el término $\tanh kd$ tiende al valor de kd pero

$$kd = \frac{2\pi d}{L}$$

por lo tanto

$$C = \sqrt{gd}$$

y la escala de celeridades para aguas bajas cumple con la condición de Froude ya que

$$C_e = \sqrt{H_e} \quad (5)$$

Ahora bien en aguas profundas se tiene la condición de que $d > L/2$ y por lo tanto el término $\tanh kd$ se convierte en

$$\tanh kd = \tanh \frac{2\pi}{L} \cdot \frac{L}{2} = 1$$

y por tanto de la ec 4 obtenemos que para aguas profundas

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$$

siendo por lo tanto la escala de celeridades en este caso

$$C_e = \sqrt{L_e} \quad (6)$$

por lo tanto si $C = \frac{L}{T}$

$$\text{y para } d > \frac{L}{2} \quad T_e = \frac{L_e}{\sqrt{L_e}} \quad (7)$$

$$\text{y para } d \rightarrow 0 \quad T_e = \frac{L_e}{\sqrt{L_e}} \quad (8)$$

Unas características muy notables en un modelo distorsionado son las pendientes del fondo y lo escarpado de las orillas. Obviamente el factor de escala para cualquier pendiente es el factor de distorsión.

2.4 Determinación de las escalas

La escala horizontal del modelo queda fija por el espacio disponible en el laboratorio y lo que se quiere representar de la zona.

Para saber que escala vertical se debe usar hay necesidad de hacer un estudio, de hasta que altura de olas, en el modelo, se pueden tolerar antes de que estas se conviertan en ondas de tensión superficial.

A partir de la teoría lineal del oleaje sabemos que:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (9)$$

en el caso de ondas de gravedad.

La celeridad mínima permitida antes de que las olas de gravedad se transformen en ondas de tensión superficial para las condiciones de una superficie de agua bajo aire que se pueden considerar $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ $\gamma = 980.7 \text{ g/cm}^3$. seg^2 y $\sigma = 75 \text{ g/seg}^2$, esta dada por el valor de 23.2 cm/seg.

$$\text{Si } \frac{d}{L} \geq 0.7 \text{ entonces } \tanh \frac{2\pi d}{L} = 1$$

y por lo tanto
$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (10)$$

de aquí y despejando L tenemos

$$L = \frac{2\pi C^2}{g} \quad (11)$$

donde sustituyendo el valor de la celeridad mínima tenemos

$$L = \frac{6.28 \times (0.232)^2}{9.8} = 0.0342 \text{ m} = 3.42 \text{ cm.}$$

y si
$$T = \frac{L}{C} = \frac{3.42}{23.2} = 0.147 \text{ seg.}$$

Esta longitud de ola se originaría hasta profundidades próximas

a

$$\frac{d}{L} = 0.5 \quad \text{o sea } d = 1.7 \text{ cm.}$$

Para el estudio de Laguna Verde, Ver. se decidió construir un modelo con escala horizontal de 1:150 lo que permitió representar 4.5 km de costa y un área de 13 km².

Para cumplir con la condición de que las olas que se generarán no se transformaran en ondas de tensión superficial hubo necesidad de distorsionar el modelo. Con datos que se contaban de un lugar cercano a Laguna Verde, Ver., se sabe que el 65 por ciento del oleaje registrado en un año fluctúa hasta 92 cm y que el oleaje significativo tiene una altura de 1.20 m. Si consideramos una escala vertical de 1:150 la altura de una ola media de 1 m sería de 0.67 cm, con una distorsión de 2, o sea la escala vertical sería de 1:75, tendríamos para esta misma condición, una altura de ola en el modelo de 1.33 cm. O sea, la ola sería de tensión superficial en esta última escala, aproximadamente en la zona de la rompiente lo cual ya no tendría efectos de consideración en el estudio. Por

lo tanto y como conclusión se llega a que con una escala vertical de 1:75 los efectos de tensión superficial pueden considerarse despreciables.

TABLA 1. TABLA DE ESCALAS PARA EL MODELO MARITIMO DE LAGUNA VERDE, VER.

Escala	Símbolo	Valor
Longitudes	L_e	150
Alturas	h_e	75
Velocidades	$V_e = \sqrt{h_e}$	8.65
Areas	$A_e = L_e h_e$	11250
Gastos	$Q_e = L_e h_e$	97312
Tiempos:		
en aguas bajas	$T_e = \frac{L_e}{\sqrt{h_e}}$	17.30
en aguas prof	$T_e = \frac{L_e}{\sqrt{L_e}}$	12.25

2.5 Direcciones del oleaje

2.5.1 Análisis de los registros de vientos

Para hacer estudios en modelos marítimos se requiere conocer las direcciones del oleaje, con el fin de representarlos por medio de batidores o paletas. En este caso, para obtener las direcciones de oleaje se analizan los registros de viento que es la única información que se tiene al respecto.

El análisis de viento se hace utilizando diagramas de Lenz, de los registros de viento. Estos diagramas se construyen, ligando puntos que representan en cada una de las direcciones principales de la rosa de los vientos,

el producto de la frecuencia con que se presenta el viento en esa dirección, por la velocidad de este.

Para el estudio en el sitio de Laguna Verda, Ver., se disponían de diversos sitios de registro, el análisis se hizo considerando tres casos:

- a) Usando todas las estaciones del Golfo de México
- b) Las cuatro estaciones más próximas al sitio
- c) La estación más próxima

A partir de este estudio se llegó a la conclusión que las direcciones del oleaje que se deben representar para el caso de Laguna Verde en el modelo son norte y este.

El resultado de este análisis, el cual se hizo para un año de registro, se muestra en la tabla 2. En la fig 1 se tiene el diagrama de Lenz promedio para los tres casos.

TABLA 2. ANALISIS DE VIENTO EN OCHO DIRECCIONES

Casos	Cálculo	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Todas	Frec. al año %	14.00	25.00	33.33	25.00	0	0	0	2.77
	Porcentaje (Lenz)	15.41	21.48	27.63	18.46	2.06	1.27	2.69	11.00
Cuatro	Frec. al año	25.00	22.22	16.66	13.88	0	0	0	22.22
	Porcentaje (Lenz)	18.98	15.94	18.66	14.86	2.23	2.23	5.28	21.80
Uno	Frec. al año	27.27	12.12	21.12	12.12	0	0	3.03	24.24
	Porcentaje (Lenz)	22.99	14.86	12.79	11.15	2.48	3.10	5.61	27.02

De acuerdo con el estudio anterior, tabla 1, existen cinco direcciones posibles de incidencia del oleaje, lo cual es demasiado para repre-

sentar en el modelo. Con el objeto de tener un análisis de las direcciones principales, se procedió a construir histogramas dando peso primero a las cuatro direcciones principales de viento y posteriormente a las cuatro direcciones secundarias, tabla 3. En la fig 2 se indican los diagramas de Lenz correspondientes.

TABLA 3. ANALISIS DEL VIENTO EN CUATRO DIRECCIONES

Casos	Cálculo	N	E	S	O	NE	SE	SO	NO
Todas	Porcentaje (Lenz)	31.65	47.60	12.12	8.82	42.99	33.30	3.64	19.55
Cuatro	Porcentaje (Lenz)	37.85	34.06	10.77	17.29	34.76	25.30	5.98	33.93
Local	Porcentaje (Lenz)	43.93	25.79	9.60	20.67	32.74	18.78	7.14	41.31

2.5.2 Planos de olas. Método de Irribarren

Al acercarse el oleaje a la playa la presencia del fondo induce cambios en las características de la ola, la cual tiende a tomar otra forma según sea la topografía del fondo. Este es el fenómeno llamado refracción del oleaje.

Si definimos como aguas bajas para cuando se cumpla la relación de $\frac{d}{L_0} \leq 0.5$, donde d es la profundidad y L_0 es la longitud de la ola en aguas profundas, la ola va a ir decreciendo desde que $d = \frac{L_0}{2}$ hasta que rompe. Un método para ir calculando las alturas de olas en aguas bajas, es el de Irribarren, que parte de la teoría lineal del oleaje la cual nos dice que para aguas profundas:

$$C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}}$$

$$T_0 = \sqrt{\frac{2\pi L_0}{g}} \quad (12)$$

$$L_0 = C_0 T_0$$

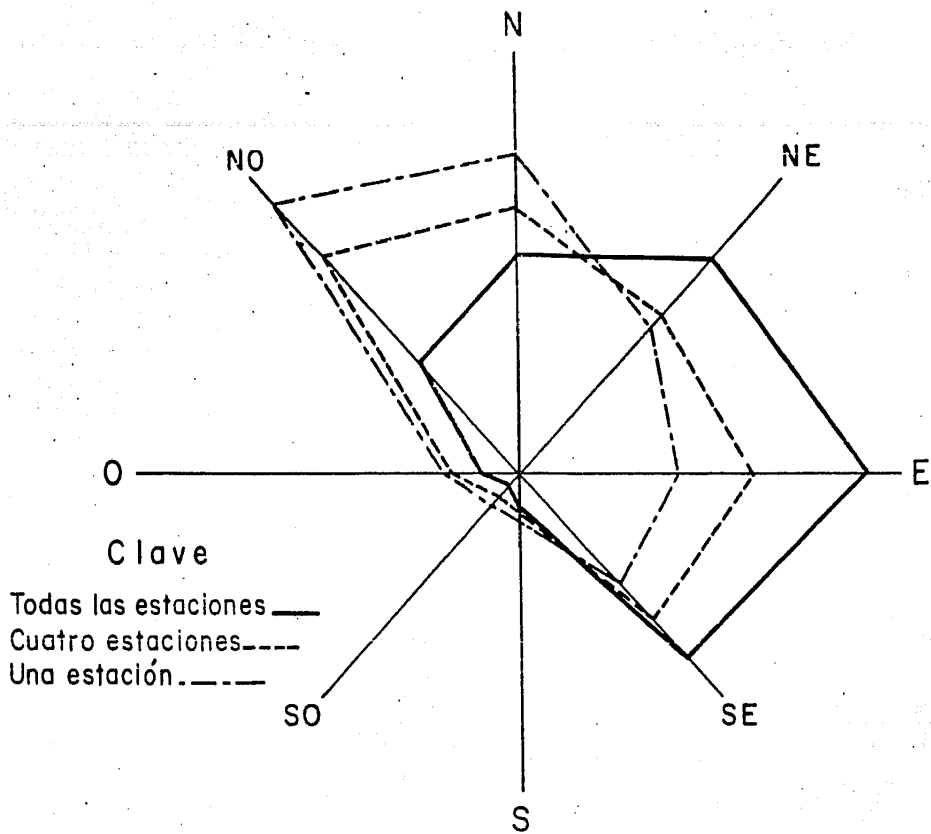


Fig 1 Diagrama de Lenz para ocho direcciones de viento

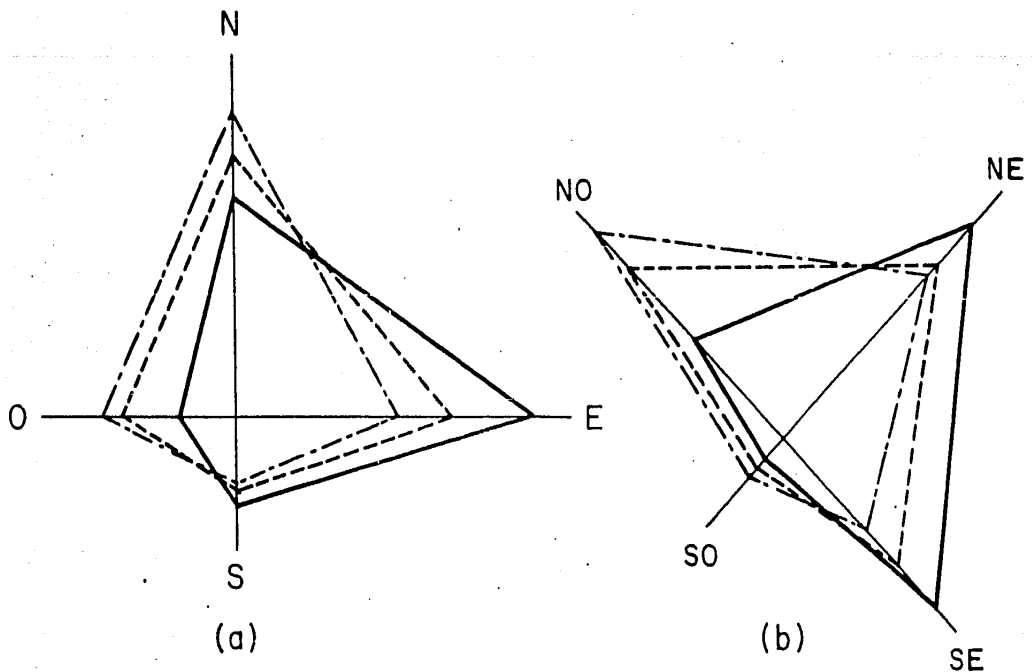


Fig 2 Diagrama de Lenz para cuatro direcciones de viento

para aguas bajas:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}}$$

$$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g} \coth \frac{2\pi d}{L}} \quad (13)$$

$$L = CT$$

En el límite de aguas profundas y aguas bajas puede aceptarse que $T_0 = T$ entonces

$$\frac{L}{L_0} = \frac{C}{C_0} = \sqrt{\frac{L}{L_0} \tanh \frac{2\pi d}{L}}$$

$$\frac{L}{L_0} = \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (14)$$

Multiplicando ambos miembros por $\frac{d}{L}$

$$\frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (15)$$

Se conocen las características de la zona de decaimiento, H_0 , L_0 y T_0 de las cuales podemos partir para construir el llamado plano de olas, que nos da en cualquier punto que queramos las variaciones del oleaje debido al cambio en la profundidad.

Este plano, rigurosamente, se debería empezar desde el límite de aguas profundas y aguas bajas, o sea para $d = L_0/2$. En nuestro caso se conocía batimetría hasta aproximadamente una profundidad de 18 m y como las curvas batimétricas iban variando ya muy uniformemente no tenía caso empezar

el plano mas alla de esta cota.

Lo que esencialmente importaba para hacer el plano de olas era la planta, ya que el oleaje podría tener una refracción muy fuerte y se necesitaría un modelo muy largo para poder representar con la aproximación necesaria el oleaje en las dos direcciones ya antes definidas. Para las alteraciones de la altura debido a la profundidad se hará un análisis posterior con el criterio de Danel. Debido a esto lo interesante del plano de olas en nuestro estudio va a ser exclusivamente la planta.

Para construir la planta, el método a seguir es el siguiente:

a) Se construye una tabla comenzando con valores de d/L menores a 0.5. A partir de este valor podemos tabular los valores de $\frac{2\pi d}{L}$ y con este podemos conocer el valor de $\tanh 2\pi d/L$, que de acuerdo con la ec 14, es igual a la relación de L/L_0 . Tomando en cuenta la ec 15 sabemos que

$$\frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} \times \frac{L}{L_0}$$

y como estas relaciones ya las tenemos calculadas anteriormente la relación d/L_0 esta perfectamente definida.

b) Hecho esto se procede a calcular la tabla de avances, que consiste en dar los valores de la profundidad que a nosotros nos interesen. Con L_0 como dato inicial, para cada valor de d dado podemos conocer la relación d/L_0 . Usando los valores de la tabla anterior e interpolando valores, a partir de la relación d/L_0 podemos calcular una relación L/L_0 correspondiente. Para hacer esto se procede en manera inversa en la tabla calculada en el inciso a.

Ahora si ya estamos en posibilidad de conocer el avance L de la ola para la profundidad d correspondiente ya que $L = \frac{L}{L_0} \times L_0$ en la

que la relación $\frac{L}{L_0}$ la conocemos del paso anterior y L_0 es dato.

Para determinar el avance de las olas se puede proceder de la siguiente manera:

Se dibujan las ortogonales trazando la mitad del avance correspondiente a cada punto según el procedimiento de cálculo visto anteriormente, y con un radio de igual longitud se dibujan arcos de círculo, de tal manera que la nueva cresta se forma uniendo las tangentes de los círculos.

En la fig 3 y 4 se muestran los planos de oleaje para las direcciones este y norte, en la zona de Laguna Verde, Ver. Esto permitió limitar el modelo, ya que como puede observarse el oleaje norte sufre una deflexión hacia el noreste en la zona en estudio.

2.6 Construcción del modelo

Para construir el modelo, conviene escoger secciones principales a cada metro, en las cuales las variaciones de las curvas batimétricas y topografía en general, se representan con varillas, a partir de una superficie horizontal que sirve de base. Cuando hay variaciones grandes en las curvas de nivel, se llevan secciones adicionales. Una vez levantada la topografía y la batimetría, el modelo se cubre con una capa de cemento si es de fondo fijo y si no con arena, si es de fondo móvil.

Para generar el oleaje se utilizan batidores que generalmente son de lámina. Estos batidores, se mueven con un motor, el cual está ligado a una flecha, la que está conectada a tramos de 6 m o menos de batidor por una biela y un excéntrico. El sistema permite generar oleaje con amplitudes y periodos variables.

En la fig 5 se muestra el plano del modelo de la zona de Laguna Verde, Ver.

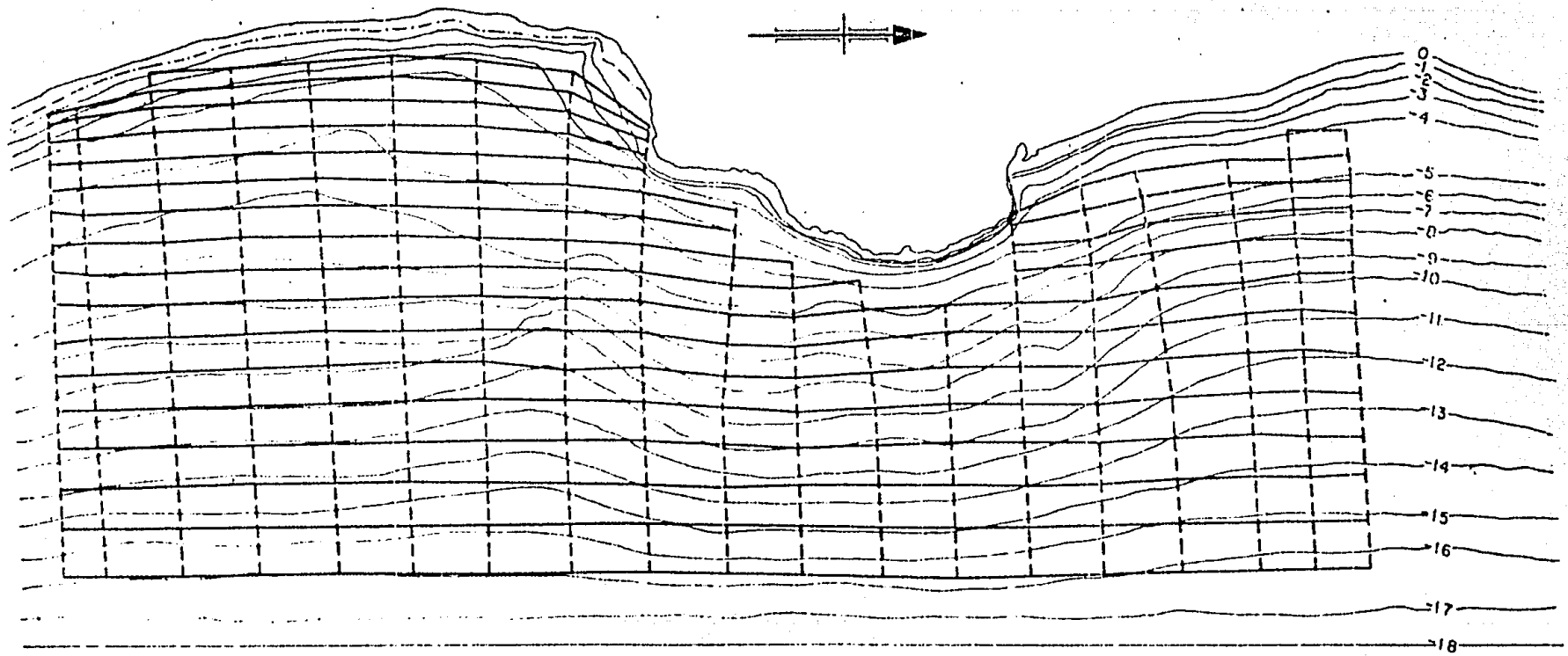


Fig 3 Plano de oleaje. Dirección este

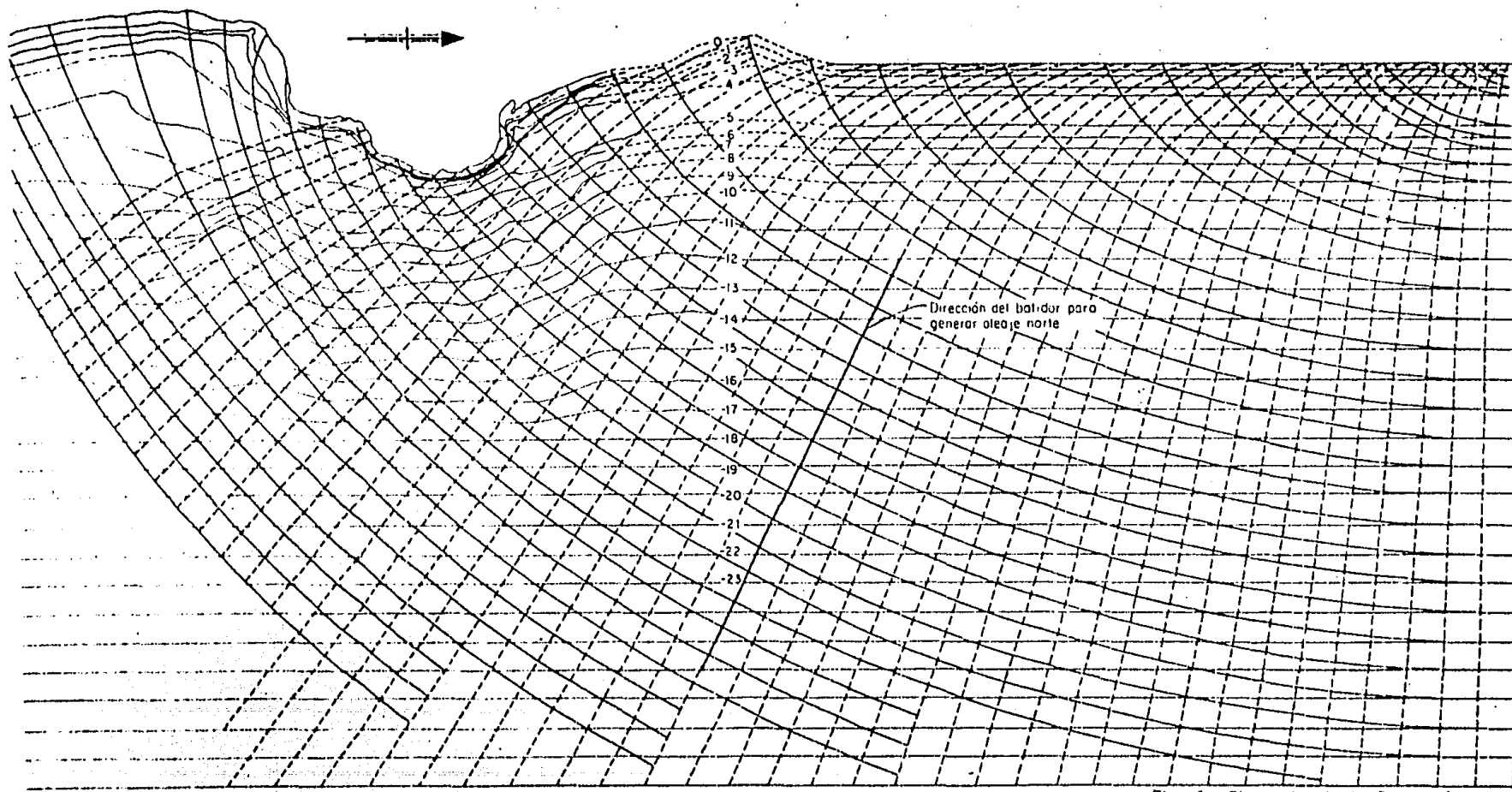


Fig 4 Plano de oleaje. Dirección norte

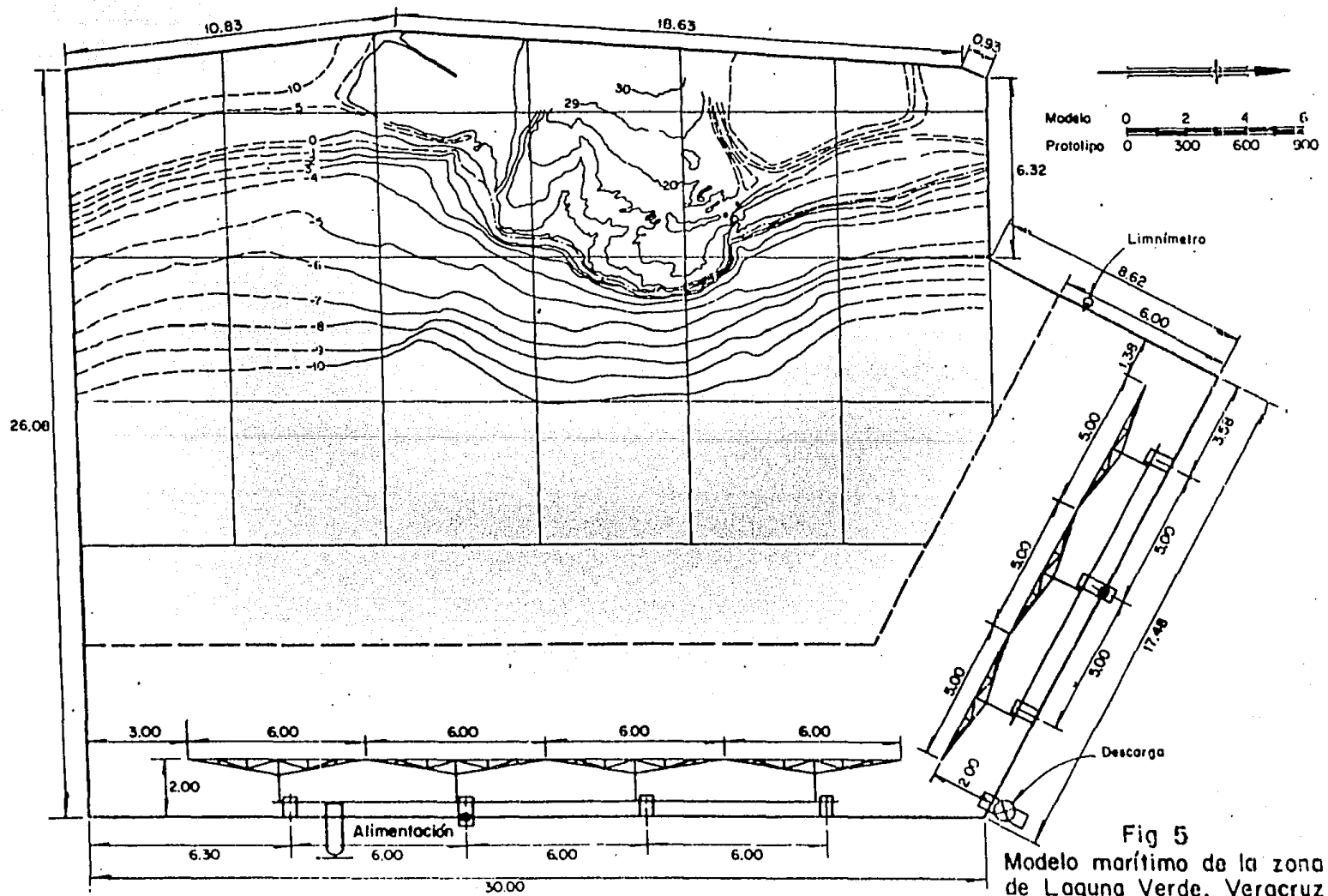


Fig 5
Modelo marítimo de la zona
de Laguna Verde, Veracruz

3. PREDICCIÓN DEL OLEAJE

3.1 Generalidades

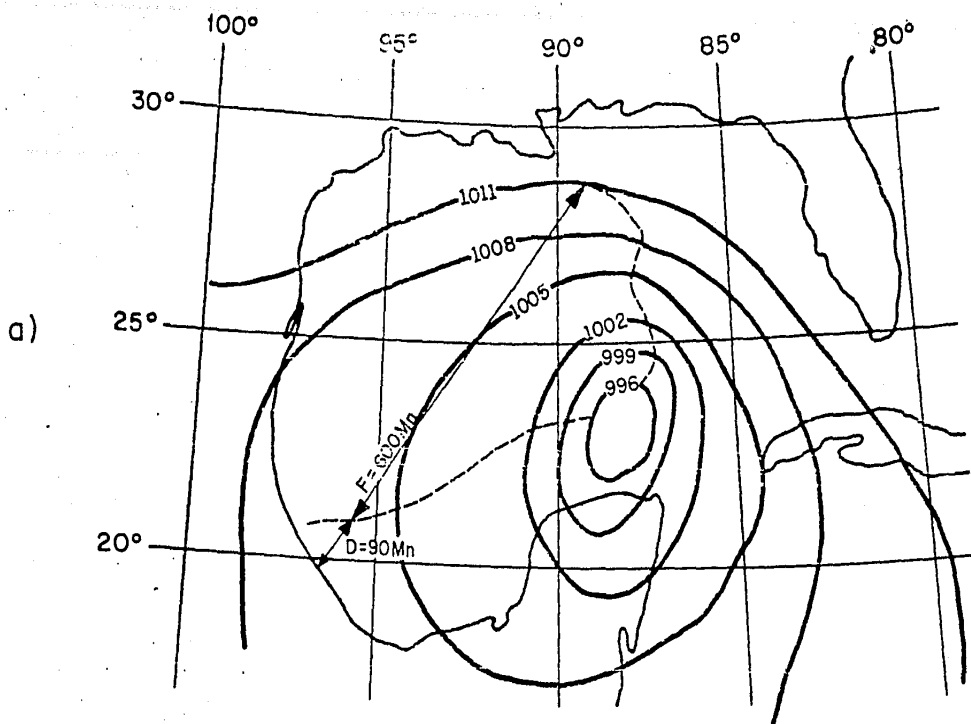
Con el objeto de conocer las características del oleaje con el cual diseñar las escolleras, en el caso de usar estas para la obra de toma y descarga, se procede a analizar los ciclones que se han presentado en la zona, o bien las perturbaciones meteorológicas más frecuentes. Para esto, se disponen de planos de isobaras (curvas de igual presión) para cada ciclón y a intervalos regulares de tiempo. Un análisis previo de esto, permite seleccionar las perturbaciones más desfavorables, con las cuales se procede a predecir el oleaje.

3.2 Determinación del fetch, y su duración

Para poder predecir las características del oleaje en la zona de estudio debido al paso de los ciclones, se necesita conocer las características de los elementos que las generaron. En este tipo de estudios se considera que el oleaje pasa por dos zonas, la primera se conoce como "zona de generación" y es un donde el oleaje se forma por la acción del viento. Esta zona está acotada por el fetch F , que implica el área del agua, sobre la cual el viento sopla. La otra zona se conoce con el nombre de "zona de decaimiento" y está acotada desde donde termina el fetch hasta el sitio en estudio.

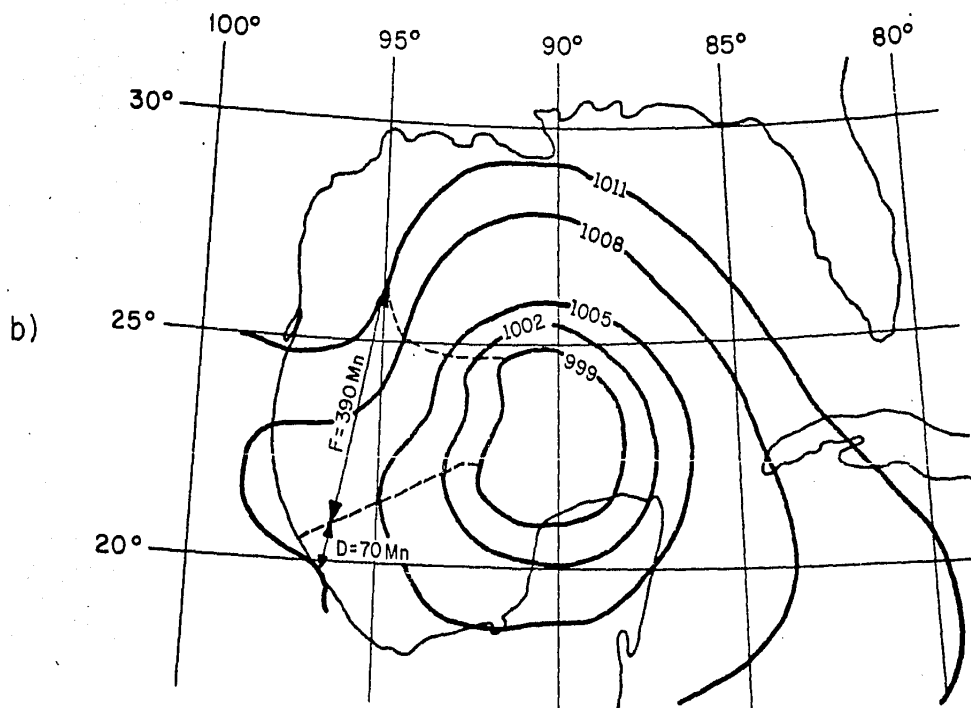
Las características del oleaje en la zona de generación dependen de la longitud del fetch F , de la duración del viento y de la velocidad del viento U , sobre la superficie del mar.

Para determinar la longitud del fetch se utilizan las isobaras del ciclón, considerando que la acción del viento tiene una amplitud de 45° , teniendo como media la tangente a cada isobara. En las figs 6 y 7 se marcan



(a)

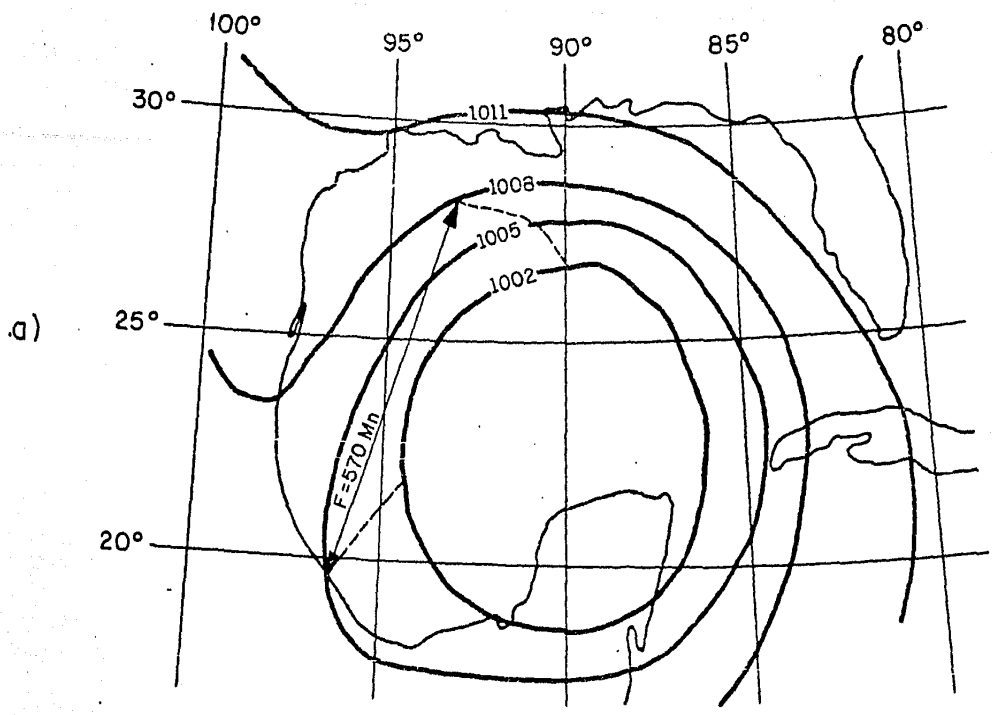
Fecha : 8 de sept. de 1961 Hora : 6.00



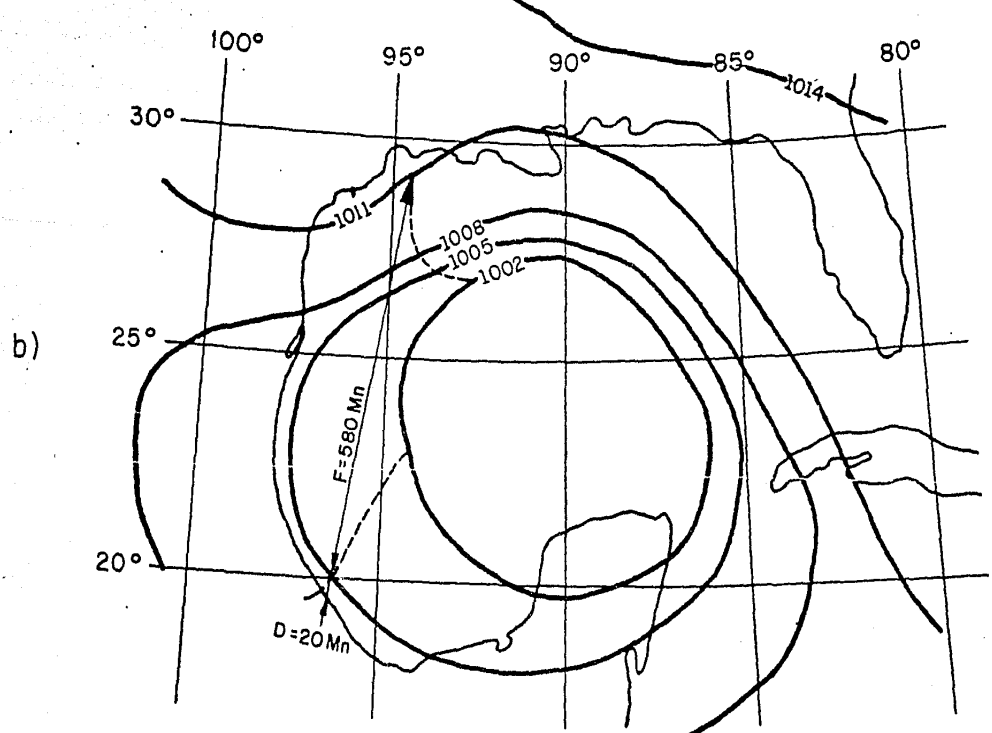
(b)

Fecha : 8 de sept. de 1961 Hora : 12.00

Fig 6 Predicción de oleaje debido al ciclón Carla

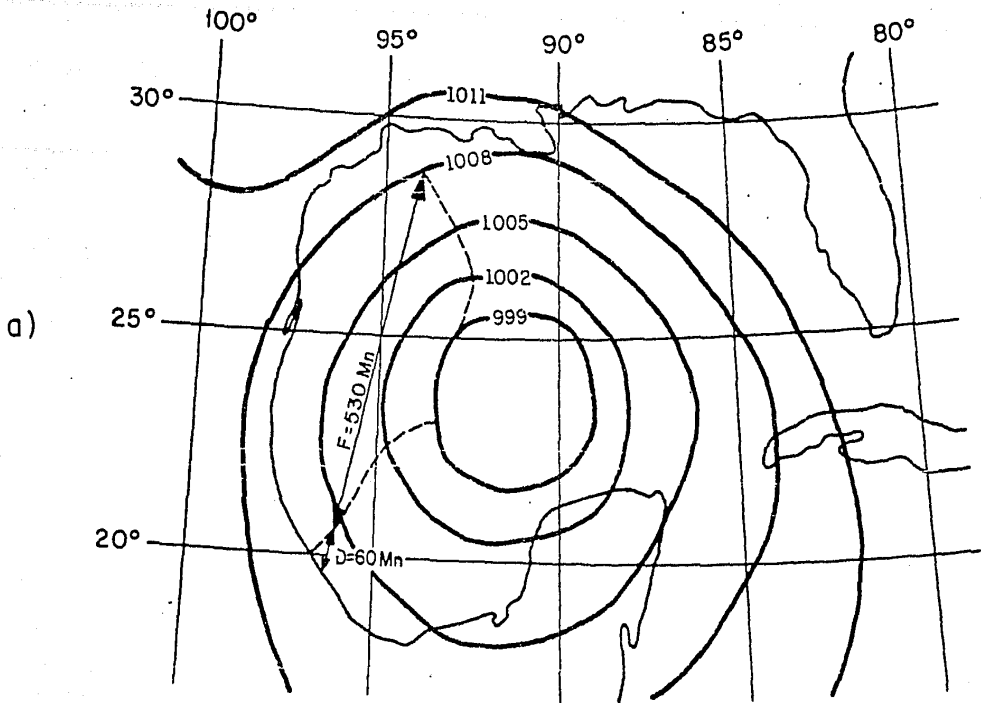


(c) Fecha : 8 de sept. de 1961 Hora : 18.00



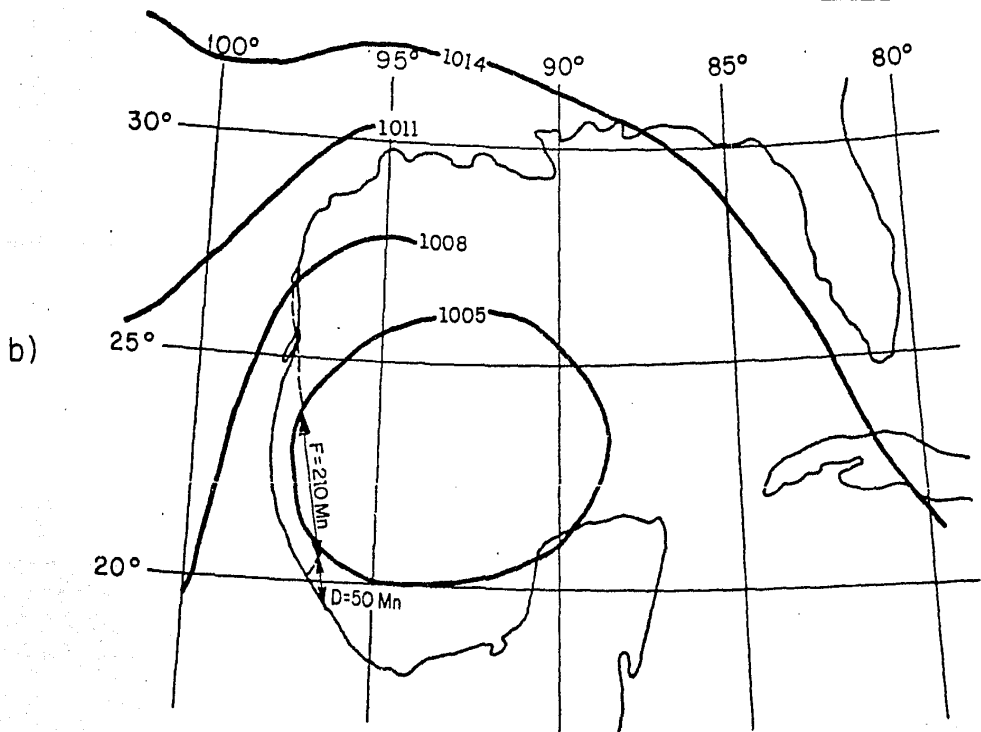
(d) Fecha : 9 de sept. de 1961 Hora : 0.00

Fig 6 Predicción de oleaje debido al ciclón Carla



(e)

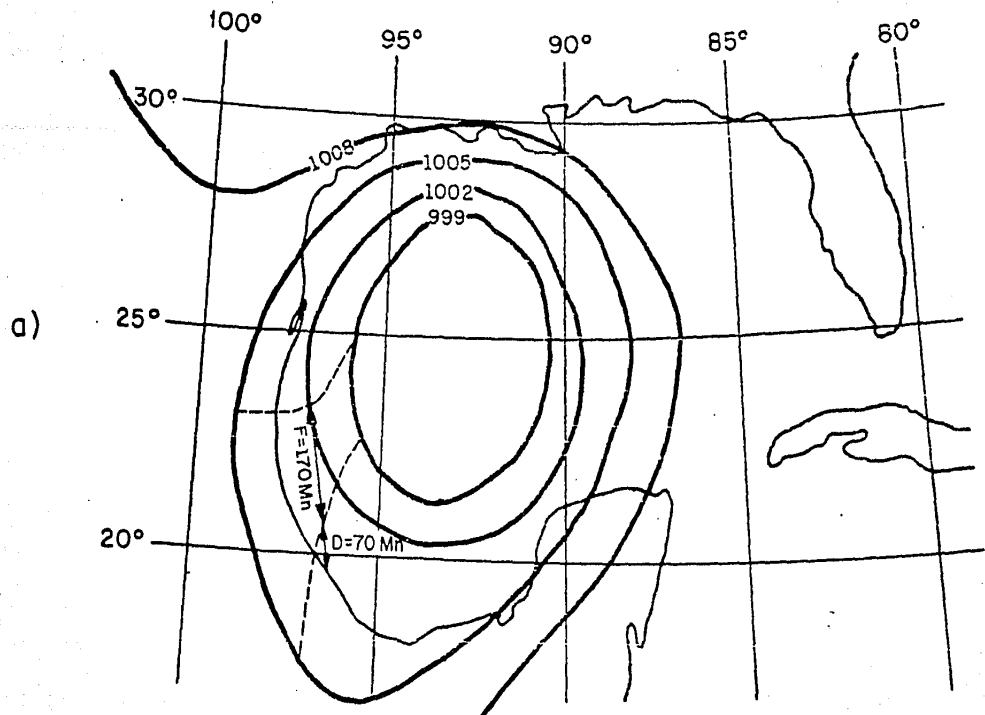
Fecha : 9 de sept. de 1961 Hora : 6.00



(f)

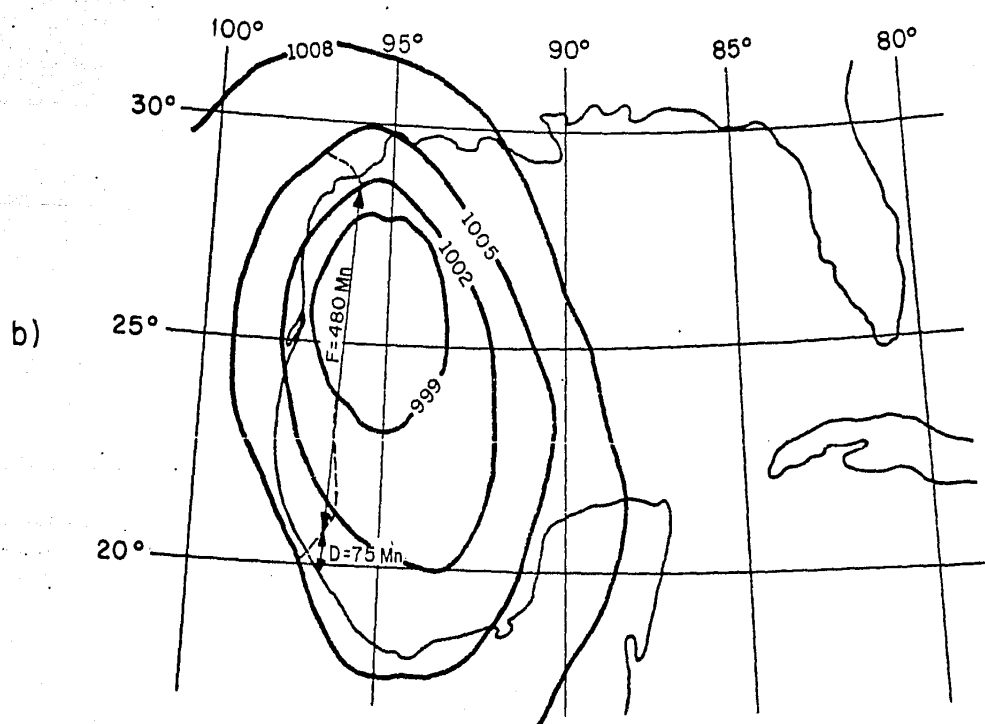
Fecha : 9 de sept. de 1961 Hora : 12.00

Fig 6 Predicción de oleaje debido al ciclón Carla



(g)

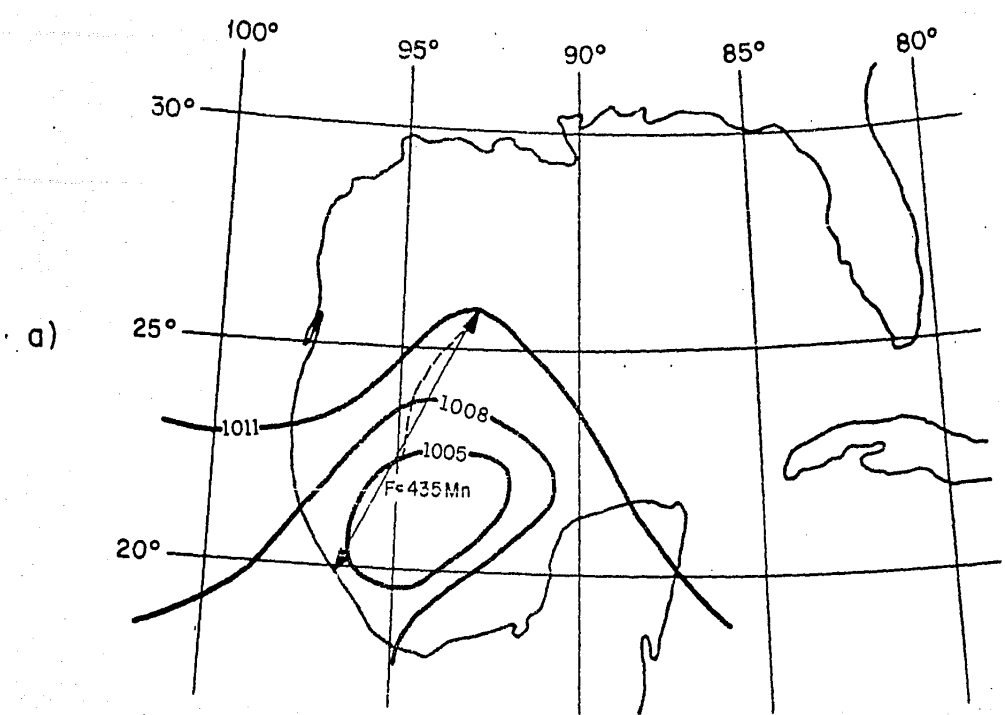
Fecha : 9 de sept. de 1961 Hora : 18.00



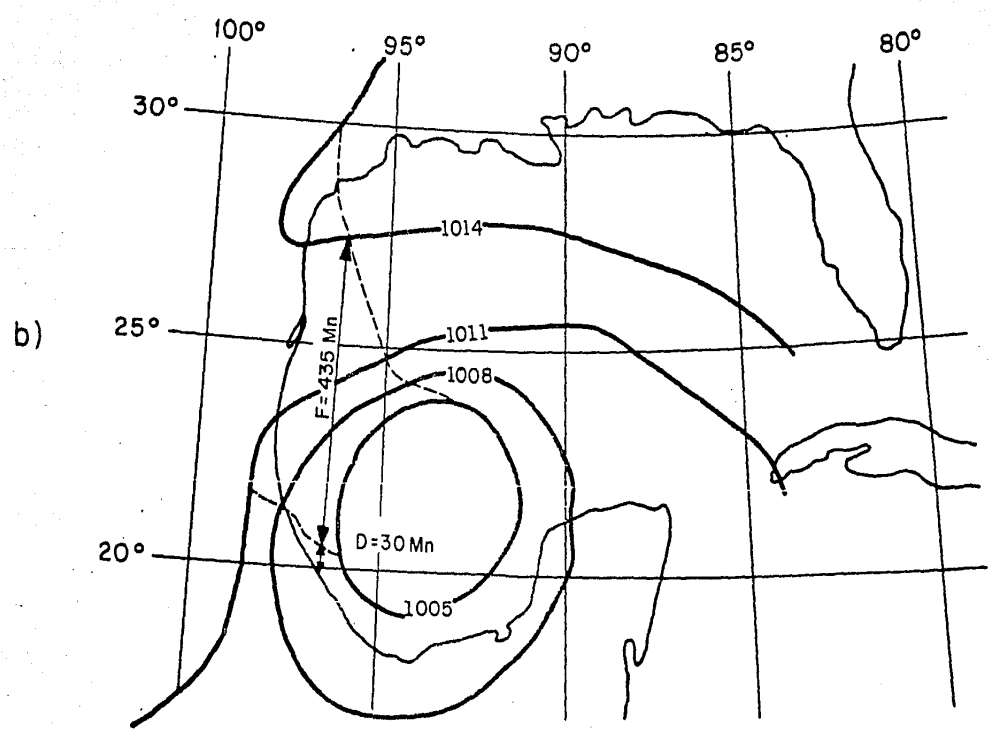
(h)

Fecha : 10 sept. de 1961 Hora : 6.00

Fig 6 Predicción de oleaje debido al ciclón Carla



(a) Fecha : 8 de oct. de 1966 Hora : 6.00



(b) Fecha : 8 de oct. de 1966 Hora : 12.00

Fig 7 Predicción de oleaje debido al ciclón Inés

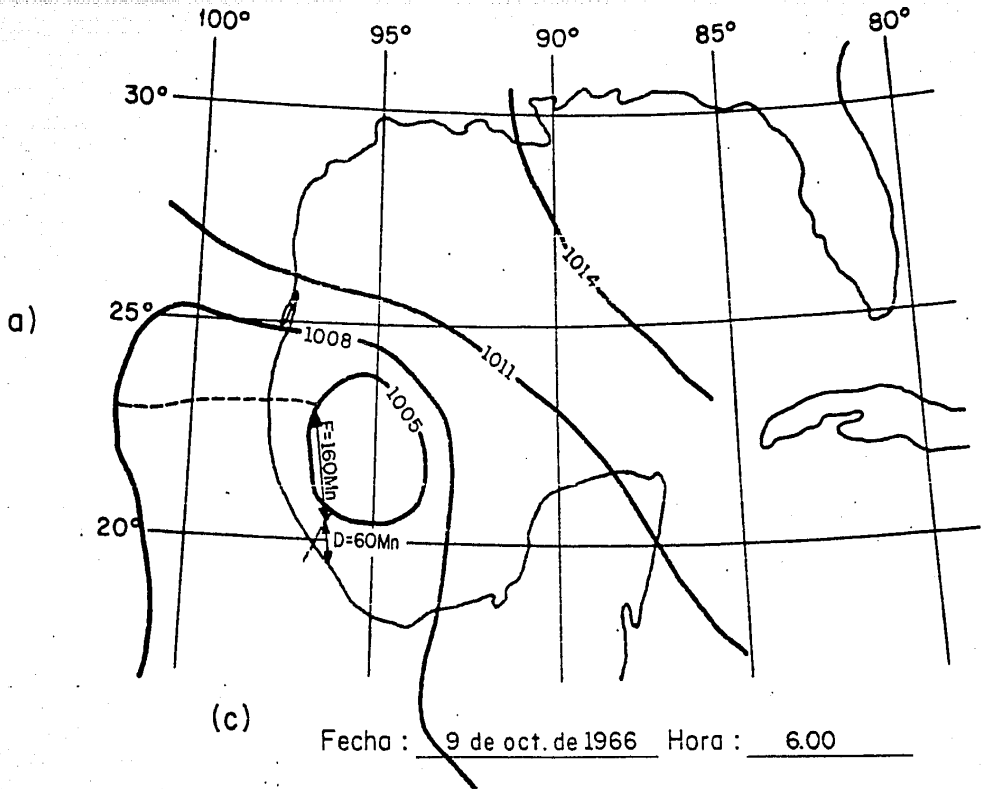


Fig 7 Predicción de oleaje debido al ciclón Inés

con línea punteada las fronteras del fetch. A continuación, a partir del punto en estudio, se traza una recta que tenga la mayor longitud de fetch F , entre las fronteras de este. La distancia restante al sitio de estudio será la longitud del decaimiento D .

En la tabla 4 se tienen las longitudes del fetch F y del decaimiento D , así como la separación entre isobaras y localización del centro de estas, para las diversas etapas de los ciclones Carla e Inés, de acuerdo con las figs 6 y 7.

La duración del viento t , se considera igual al tiempo durante el cual no cambia la configuración de las isobaras. Debido a la poca información que se tiene, se consideró que en todos los casos la duración del viento t es de 6 horas.

Una vez deducidas las características anteriores, se puede calcular la velocidad del viento sobre la superficie del mar para cada caso, si se supone que el viento generado por los ciclones es geostrofico.

3.3 Velocidad del viento en la superficie del mar. Teoría del viento geostrofico

El viento geostrofico ocurre solamente cuando se tiene isobaras paralelas arriba de la capa de aire en la superficie. La velocidad del viento arriba de esta capa es el llamado viento geostrofico y está dado por la ecuación

$$2 V_g \Omega \sin \phi - \frac{1}{\rho_a} \Delta_p / \Delta_n = 0 \quad (16)$$

donde Ω es la velocidad angular de la tierra (0.729×10^{-4} rad/s), ϕ es la latitud en grados, ρ_a es la densidad del aire y Δ_p / Δ_n es el valor absoluto del gradiente de presión. La solución de esta ecuación para espaciamiento de isobaras de 3 mb y 5 mb esta dado en la fig 8. En la tabla 4, cols 7 y 8 se tienen

TABLE 4. CARACTERISTICAS GENERADORAS DEL OLEAJE
DEBIDO A LOS CICLONES INES Y CARLA

1	2	3	4	5	6	7	8
Caso	Ciclón	Fecha	Hora	Longitud del fetch F en Mn	Longitud de decaimiento D en Mn	Separación isobaras de 3 m b ° latitud	Centro del ciclón ° latitud
1	Carla	8 IX 61	6	600	90	1	23.00
2			12	390	70	1	22.50
3			18	570	0	1.1	22.50
4		9 IX 61	0	580	20	0.8	22.55
5			6	530	60	1.1	23.70
6			12	210	50	2	23.00
7			18	170	70	0.8	24.50
8			6	480	75	1.4	25.00
9	Inés	8 X 66	6	435	0	1.5	21.50
10			12	435	30	1.3	22.00
11			6	160	60	1	22.00

los parámetros necesarios para cada caso. En la tabla 5 col 2 se encuentran los valores de V_g .

Para ajustar estos valores de V_g , a los valores de la velocidad en la superficie del mar U , necesitamos conocer la diferencia de temperaturas entre mar y aire; siendo lo mas usual que cuando este dato no se conoce se acepte un valor de 5° F. Además este ajuste esta en función del radio de curvatura de las isobaras de la perturbación, y si ésta, es un ciclón o un anticiclón. Los ciclones se distinguen porque el flujo de aire va hacia el interior de su núcleo que es una centro de baja presión y debido a esto el aire asciende adoptando la forma de una hélice ascendente. En un anticiclón tenemos condiciones

TABLA 4. CARACTERISTICAS GENERADORAS DEL OLEAJE
DEBIDO A LOS CICLONES INES Y CARLA

1	2	3	4	5	6	7	8
Caso	Ciclón	Fecha	Hora	Longitud del fetch F en Mn	Longitud de decaimiento D en Mn	Separación isobaras de 3 m b ° latitud	Centro del ciclón ° latitud
1	Carla	8 IX 61	6	600	90	1	23.00
2			12	390	70	1	22.50
3			18	570	0	1.1	22.50
4			0	580	20	0.8	22.55
5			6	530	60	1.1	23.70
6			12	210	50	2	23.00
7			18	170	70	0.8	24.50
8			6	480	75	1.4	25.00
9	Inés	8 X 66	6	435	0	1.5	21.50
10			12	435	30	1.3	22.00
11			6	160	60	1	22.00

los parámetros necesarios para cada caso. En la tabla 5 col 2 se encuentran los valores de V_g .

Para ajustar estos valores de V_g , a los valores de la velocidad en la superficie del mar U , necesitamos conocer la diferencia de temperaturas entre mar y aire; siendo lo mas usual que cuando este dato no se conoce se acepte un valor de 5° F. Además este ajuste esta en función del radio de curvatura de las isobaras de la perturbación, y si ésta, es un ciclón o un anticiclón.

Los ciclones se distinguen porque el flujo de aire va hacia el interior de su núcleo que es una centro de baja presión y debido a esto el aire asciende adoptando la forma de una hélice ascendente. En un anticiclón tenemos condiciones

inversas o sea, el núcleo de la perturbación es un centro de alta presión y el flujo de aire va dirigido del núcleo hacia el exterior. En el caso de Carla e Inés, se puede observar que se trata claramente de dos ciclones.

Los datos y cálculos en nuestro caso se tienen en la tabla 5 y la corrección de V_g a U se obtiene de la fig 9. Los valores de U se encuentran tabulados en la col 4 de la tabla 5.

TABLA 5. CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LA SUPERFICIE DEL AGUA

Caso	Velocidad geostrófica V_g en nudos	Radio de curvatura del ciclón R en ° latitud	Relación $\frac{U}{V_g}$	Velocidad superficial U , en nudos
1	75	6	0.625	47
2	78	7	0.635	49.5
3	70	7	0.635	44.5
4	95	6.5	0.625	59.3
5	65	6.2	0.620	40.3
6	38	6.0	0.625	23.8
7	89	6.3	0.621	55.3
8	47	7.8	0.630	29.7
9	55	4.5	0.620	34.2
10	60	6.0	0.625	37.5
11	80	4.0	0.610	48.8

Conocidos los datos de longitud de fetch F , velocidad del viento superficial U , duración del viento t y longitud del decaimiento D , para cada caso

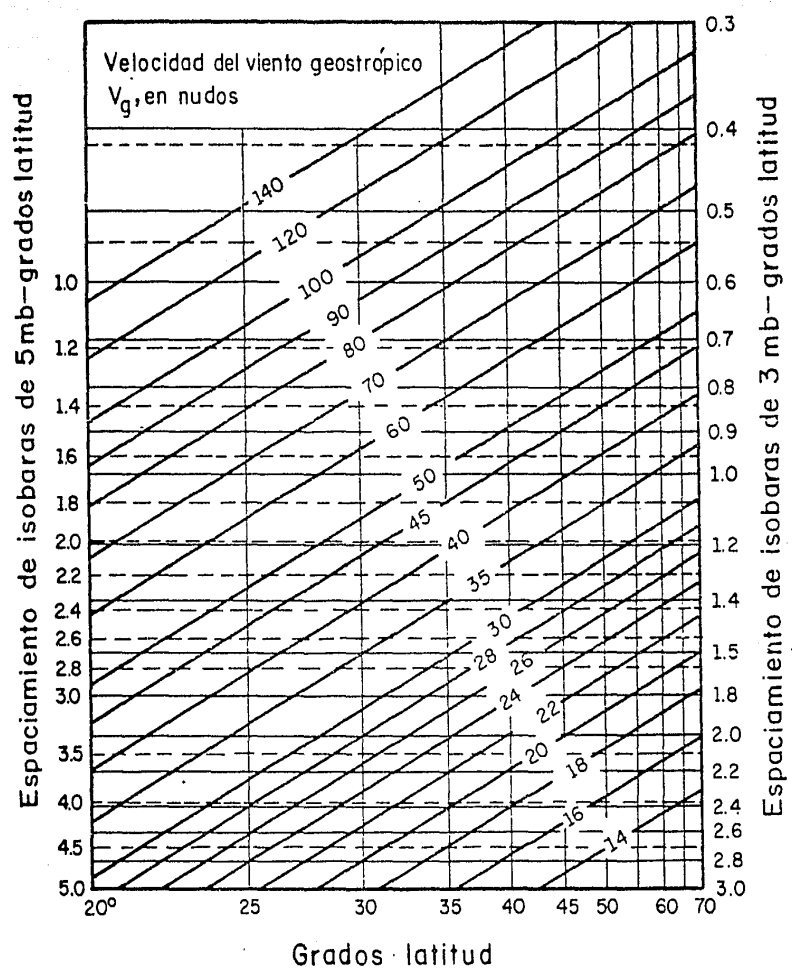


Fig 8 Determinación de la velocidad del viento geostrópico

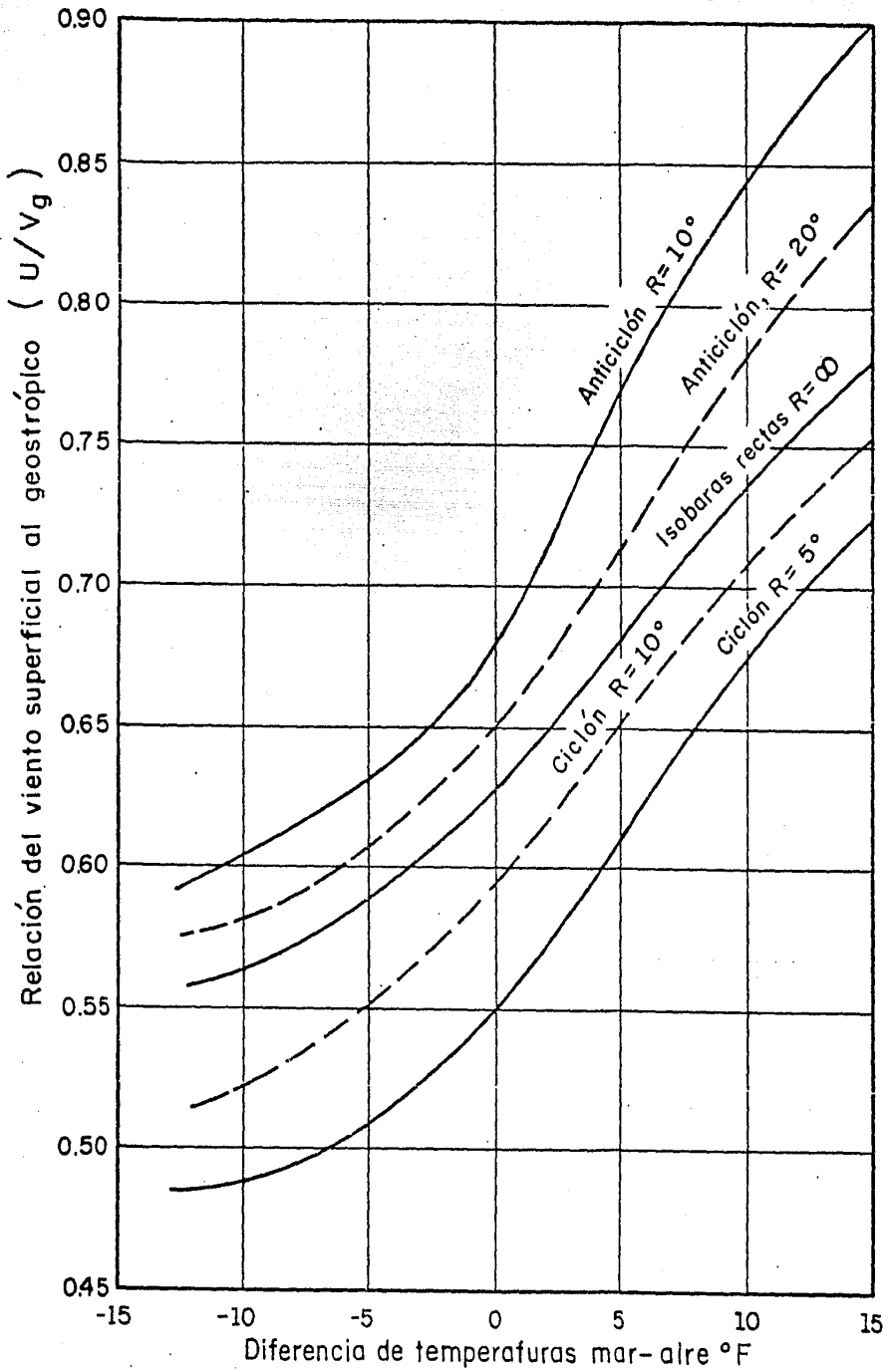


Fig 9 Determinación del viento superficial

de los ciclones Carla e Inés, (tablas 4 y 5) es posible predecir las características del oleaje para cada uno de ellos.

3.4 Teoría de Sverdrup y Munk

Para predecir el oleaje que un ciclón produce, Sverdrup y Munk elaboraron una teoría que comprobaron con mediciones en el mar. Reunidos estos resultados nos dan la solución de las ecuaciones teóricas en unas gráficas. Para la elaboración de su teoría consideraron que los principales factores que intervienen en el fenómeno son: la longitud del fetch (F); la velocidad del viento en la superficie del mar (U), la duración de estas condiciones (t), la altura de la ola H y la acción de la gravedad (g); donde los tres primeros son los parámetros de generación.

De aquí se puede tratar de encontrar una ecuación del tipo:

$$\phi (F, U, t, H, g) = 0 \quad (17)$$

La cual se puede analizar a partir del teorema de Buckingham o mejor conocido como teorema Π . Este teorema dice que:

“ Si una ecuación es homogénea dimensionalmente, se puede reducir a una relación entre un conjunto completo de productos adimensionales.”

$$\text{Entonces: } \Pi = H^{\alpha} F^{\beta} t^{\gamma} u^{\delta} g^{\epsilon} \quad (18)$$

que tienen las siguientes dimensiones

$$L^{\alpha} L^{\beta} T^{\gamma} \frac{L}{T}^{\delta} \frac{L}{T^2}^{\epsilon}$$

entonces podemos establecer las siguientes ecuaciones

$$\text{para L} \quad a + \beta + \delta + \epsilon = 0 \quad (19)$$

$$\text{para T} \quad \gamma - \delta - 2\epsilon = 0 \quad (20)$$

Se pueden formar los tres siguientes casos

1. Si aceptamos que $a = 1$ $\beta = 0$ $\gamma = 0$ o sea H dependiendo solo de U

$$\text{de (19)} \quad 1 + 0 + \delta + \epsilon = 0$$

$$\text{de (20)} \quad 0 - \delta - 2\epsilon = 0$$

de donde

$$\delta = -2\epsilon$$

y por lo tanto

$$1 - 2\epsilon + \epsilon = 0$$

$$\epsilon = 1$$

$$\text{y llegamos a que} \quad \Pi_1 = \frac{Hg}{U^2} \quad (21)$$

2. Si aceptamos ahora que $a = 0$ $\beta = 1$ y $\gamma = 0$

$$\text{de (19)} \quad 0 + 1 + \delta + \epsilon = 0$$

$$\text{de (20)} \quad 0 - \delta - 2\epsilon = 0$$

de donde

$$\epsilon = 1$$

$$\delta = -2$$

y se llega a

$$\Pi_2 = \frac{Fg}{U^2} \quad (22)$$

3. Si hacemos que $\alpha = 0$ $\beta = 0$ y $\gamma = 1$

$$\text{de (19)} \quad \alpha + \epsilon = 0$$

$$\text{de (20)} \quad 1 - \delta - 2\epsilon = 0$$

$$1 - \delta + 2\delta = 0$$

$$\delta = -1$$

$$\text{y} \quad \epsilon = 1$$

llegamos a
$$\Pi_3 = \frac{tg}{U} \quad (23)$$

Relacionando el segundo y tercer caso con el primero Wiegel realizó unas experiencias y las reunió en las gráficas que se muestran en las figs 10 y 11,

3.5 Características del oleaje en la zona de generación

Para predecir el oleaje en la zona de generación, de los casos en estudio, se usarán las gráficas propuestas por Wiegel las cuales incluyen una serie de experiencias al respecto. Estas gráficas consideran que la generación del oleaje es función de dos condiciones fundamentales, una es la velocidad del viento y longitud de fetch, y la otra, la velocidad y duración del viento. Esto implica que de las características del oleaje deducidas para las dos condiciones, se escojan las que porporcionen valores menores.

En la fig 10 se muestran las relaciones que aguardan las características del oleaje significante que son la altura de la ola H, el periodo T y la celeridad C, respecto a la velocidad del viento U y longitud de fetch F. En la fig 11 se muestran las relaciones que guardan las características del oleaje pero

ahora respecto a la velocidad del viento U y duración del viento t .

Como puede observarse, la dispersión de los valores en las figs 10 y 11 implica un criterio de selección. Dependiendo del problema, se puede considerar valores referentes al rango superior, inferior, o al valor medio. En el caso de este estudio se consideraron valores medios.

En las tablas 6 y 7 se muestran los valores de las características del oleaje obtenidos para el sitio de Laguna Verde, Ver., debido a los ciclones Carla e Inés.

Una vez obtenidas las características del oleaje en la zona de generación se pueden calcular las características del oleaje en la zona de decaimiento.

TABLA 6. CARACTERISTICAS DEL OLAJE A PARTIR DE LA LONGITUD DEL FETCH F y DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO U

1	2	3	4	5	6	7	8
Caso	$\frac{gF}{U^2}$	$\frac{gH}{U^2}$	$\frac{C}{U}$	$\frac{gT}{U}$	H en m	C en m/seg	T en seg
1	18800	0.28	0.90	6.25	16.40	21.50	15.20
2	11000	0.25	0.85	6.00	16.30	21.60	15.40
3	20200	0.325	1.075	7.00	17.15	24.20	16.00
4	11040	0.245	0.865	6.00	22.55	26.10	18.50
5	22500	0.320	1.110	7.00	16.80	23.00	14.60
6	25600	0.385	1.150	7.00	5.77	13.60	8.40
7	3830	0.147	0.39	3.00	10.76	11.00	28.70
8	38000	0.355	1.40	9.00	9.40	21.20	13.90
9	25750	0.380	1.125	7.50	11.79	19.40	13.30
10	21700	0.355	1.110	7.00	13.10	21.40	13.60
11	4700	0.161	0.600	3.2	10.12	14.90	8.05

ahora respecto a la velocidad del viento U y duración del viento t .

Como puede observarse, la dispersión de los valores en las figs 10 y 11 implica un criterio de selección. Dependiendo del problema, se puede considerar valores referentes al rango superior, inferior, o al valor medio. En el caso de este estudio se consideraron valores medios.

En las tablas 6 y 7 se muestran los valores de las características del oleaje obtenidos para el sitio de Laguna Verde, Ver., debido a los ciclones Carla e Inés.

Una vez obtenidas las características del oleaje en la zona de generación se pueden calcular las características del oleaje en la zona de decaimiento.

TABLA 6. CARACTERISTICAS DEL OLAJE A PARTIR DE LA LONGITUD DEL FETCH F y DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO U

1	2	3	4	5	6	7	8
Caso	$\frac{gF}{U^2}$	$\frac{gH}{U^2}$	$\frac{C}{U}$	$\frac{gT}{U}$	H en m	C en m/seg	T en seg
1	18800	0.28	0.90	6.25	16.40	21.50	15.20
2	11000	0.25	0.85	6.00	16.30	21.60	15.40
3	20200	0.325	1.075	7.00	17.15	24.20	16.00
4	11040	0.245	0.865	6.00	22.55	26.10	18.50
5	22500	0.320	1.110	7.00	16.80	23.00	14.60
6	25600	0.385	1.150	7.00	5.77	13.60	8.40
7	3830	0.147	0.39	3.00	10.76	11.00	28.70
8	38000	0.355	1.40	9.00	9.40	21.20	13.90
9	25750	0.380	1.125	7.50	11.79	19.40	13.30
10	21700	0.355	1.110	7.00	13.10	21.40	13.60
11	4700	0.161	0.600	3.2	10.12	14.90	8.05

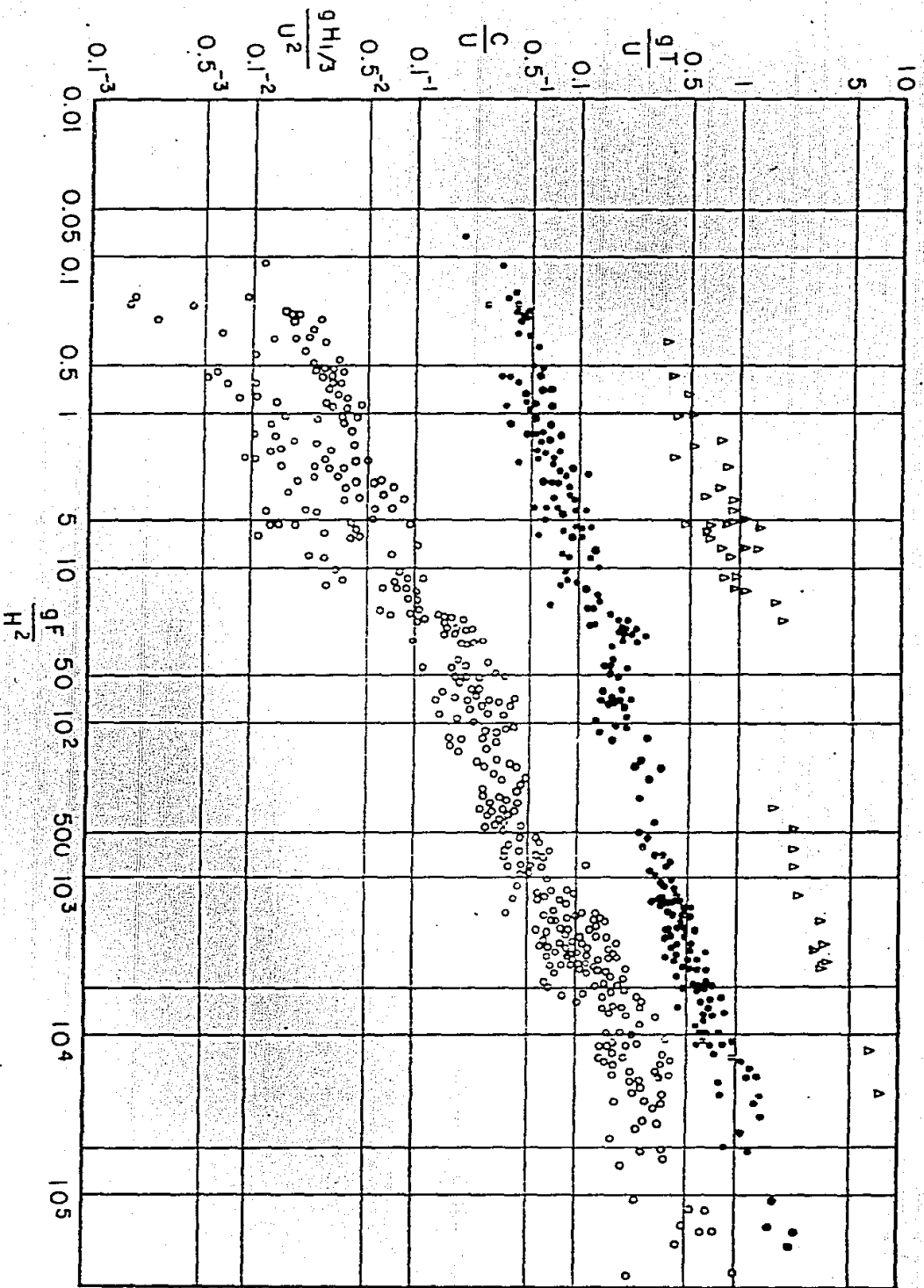


Fig 10 Relaciones entre el fetch, velocidad del viento y características del oleaje significativo

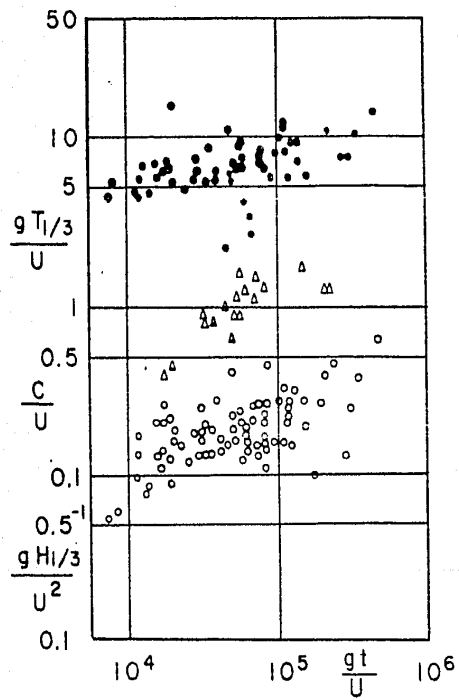


Fig II Relaciones entre la duración y velocidad del viento, y las características del oleaje significativo

TABLA 7. CARACTERISTICAS DEL OLEAJE A PARTIR DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO U y LA DURACION DEL VIENTO t , EN LA ZONA DE GENERACION

1	2	3	4	5	6	7	8
Caso	$\frac{g t}{U}$	$\frac{g H}{U^2}$	$\frac{C}{U}$	$\frac{g T}{U}$	H en m	C en m/seg	T en seg
1	8900	0.075	0.40	5.00	4.42	9.6	12.10
2	8400	0.075	0.30	5.50	4.93	7.6	14.10
3	9350	0.075	0.29	5.00	3.91	6.55	11.50
4	7000	0.070	0.27	5.00	6.59	8.18	15.40
5	10300	0.080	0.50	5.00	3.46	10.30	10.42
6	17700	0.110	0.35	5.65	1.70	4.11	1.75
7	7500	0.070	0.28	5.00	5.67	7.95	14.50
8	14100	0.109	0.33	6.00	2.51	5.00	9.22
9	12200	0.085	0.32	5.45	2.60	5.55	8.65
10	11500	0.082	0.32	5.35	3.06	6.10	10.50
11	8510	0.075	0.29	5.80	4.70	7.20	14.50

3.6 Características del oleaje en la zona de decaimiento

Una vez que el oleaje deja la zona de generación, sus características cambian ya que la energía adquirida tiene a disiparse, dispersarse, etc. Si solo se considera que el decaimiento del oleaje se debe a la dispersión, que en este caso es la condición más desfavorable, la determinación de sus características es relativamente sencillo. El criterio que se considera para esto es el debido a Bretschneider, el cual está basado en mediciones de campo.

En las figs 12 y 13 se muestran las relaciones que existen,

en función de las características en la zona de generación, para la zona de decaimiento. Usando la fig 12 es posible obtener el periodo de la ola T_D en la zona de decaimiento, y con la fig 13, la altura de la ola H_D para esta misma zona.

En la tabla 8 se muestran los cálculos efectuados para obtener las características del oleaje en la zona de decaimiento, a partir de las características del oleaje mínimas obtenidas en la zona de generación (tabla 7 cols 6 y 8).

De la tabla 8 se observa que las características del oleaje mas desfavorables en la zona de decaimiento, para el sitio de Laguna Verde, Ver., corresponden a una altura de la ola $H_D = 5.55$ m, con un periodo de $T_D = 13$ seg.

3.7 Características del oleaje en el sitio

Como las características del oleaje así deducido corresponden a la zona de decaimiento, no se está considerando los cambios que sufren estas características al acercarse a la costa, o sea, el efecto de difracción.

Suponiendo que se está en aguas profundas ($d/L > 1/2$), la longitud del oleaje L se calcula como

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi} \quad (24)$$

En el caso de aguas bajas, la longitud del oleaje L se obtiene considerando que

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} = L_0 \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (25)$$

lo que implica que L es una función de la profundidad d . Por otra parte, como la altura de la ola H es función de su longitud L , también dependerá de

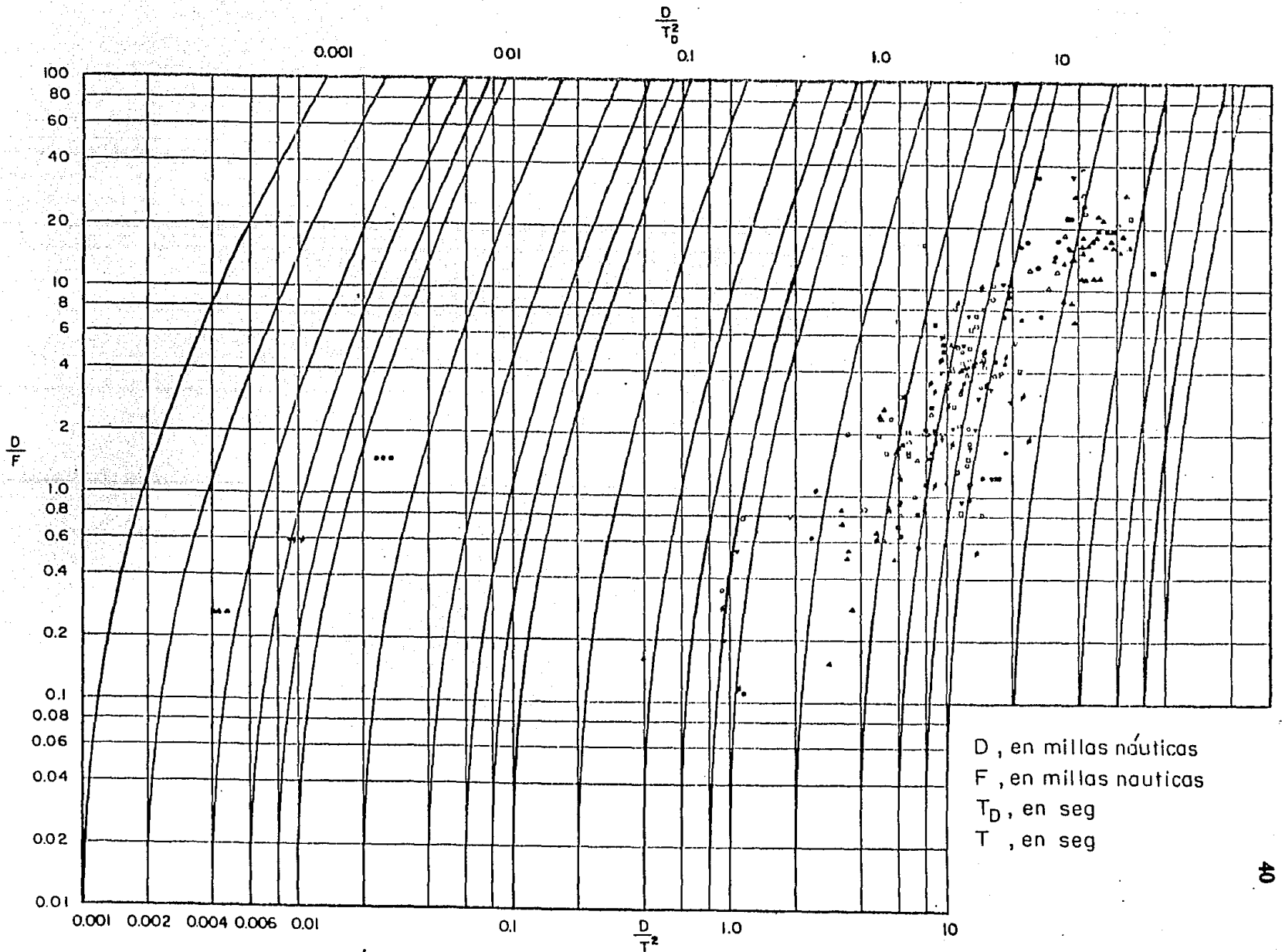


Fig 12 Obtención del periodo de la ola T_D , en la zona de decaimiento

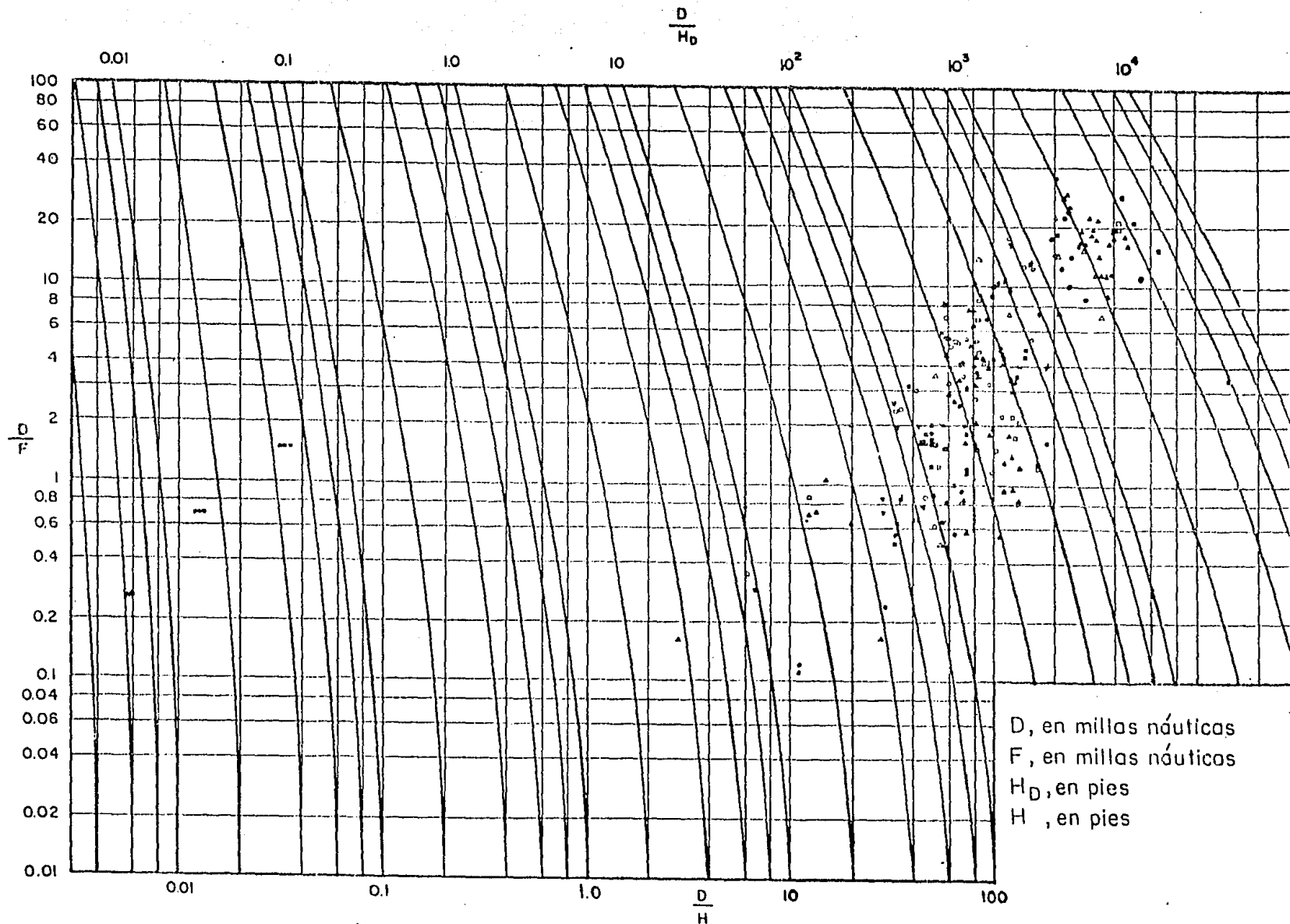


Fig 13 Obtención de la altura de la ola H_D , en la zona de decaimiento

TABLA 8. CARACTERISTICAS DEL OLAJE EN LA ZONA DE DECAIMIENTO

1	2	3	4	5	6	7	8
Caso	$\frac{D}{F}$	$\frac{D}{T^2}$	$\frac{D}{T^2 D}$	T_D	$\frac{D}{H}$	$\frac{D}{H_D}$	H_D
1	0.15	0.615	0.58	12.40	6.20	8.00	3.43
2	0.18	0.35	0.336	14.40	4.32	5.50	3.88
3	0	0	0	11.50	0	0	3.91
4	0.0345	0.085	0.118	13.0	1.00	1.10	5.55
5	0.133	0.555	0.530	10.6	5.65	6.3	3.12
6	0.247	1.10	1.00	7.1	8.95	13.0	1.17
7	0.413	0.330	0.249	16.8	3.78	6.0	3.56
8	0.157	0.89	0.80	9.7	9.10	12.0	1.88
9	0	0	0	9.65	0	0	2.60
10	0.059	0.272	0.252	10.90	3.0	3.2	2.85
11	0.375	0.285	0.240	15.8	3.9	6.0	3.05

la profundidad d . Estudios hechos por Danel, respecto al máximo alcance de la ola antes de que esta rompa, proporcionan la condición más desfavorable de alturas de ola conforme disminuye la profundidad. Danel encontró que

$$\frac{H}{L} = 0.142 \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (26)$$

De aquí se deduce que, usando las ecs 25 y 26 se pueden conocer las características del oleaje una vez que se está en aguas bajas. En la tabla 9 se muestra el cálculo de L y H para diferentes profundidades d , en la zona de Laguna Verde, Ver., considerando $T_D = 13$ seg. Como puede observarse

en esta tabla, para profundidades mayores de 7 m, la altura de la ola H es mayor de 5.5 m, lo que indica que a partir de ahí se conserva la altura de ola de 5.5 m, fig 14.

Las alturas de ola mostrada en la fig 14 para diferentes profundidades, permitirán diseñar las alternativas preliminares de escolleras.

TABLA 9. DETERMINACION DEL ALCANCE DE LA OLA
EN LA ZONA DE ROMPIENTE

Profundidad d en m	Longitud de la ola L en m	d/L	H/L	Altura de la ola H en m
9	118	0.0763	0.062	7.32
8	113	0.0707	0.058	6.55
7	104	0.0673	0.056	5.82
6	97	0.0618	0.052	5.04
5	89	0.0562	0.046	4.09
4	80	0.0500	0.044	3.52
3	70	0.0429	0.035	2.45
2	57	0.0351	0.030	1.71
1	40	0.0250	0.025	1.00

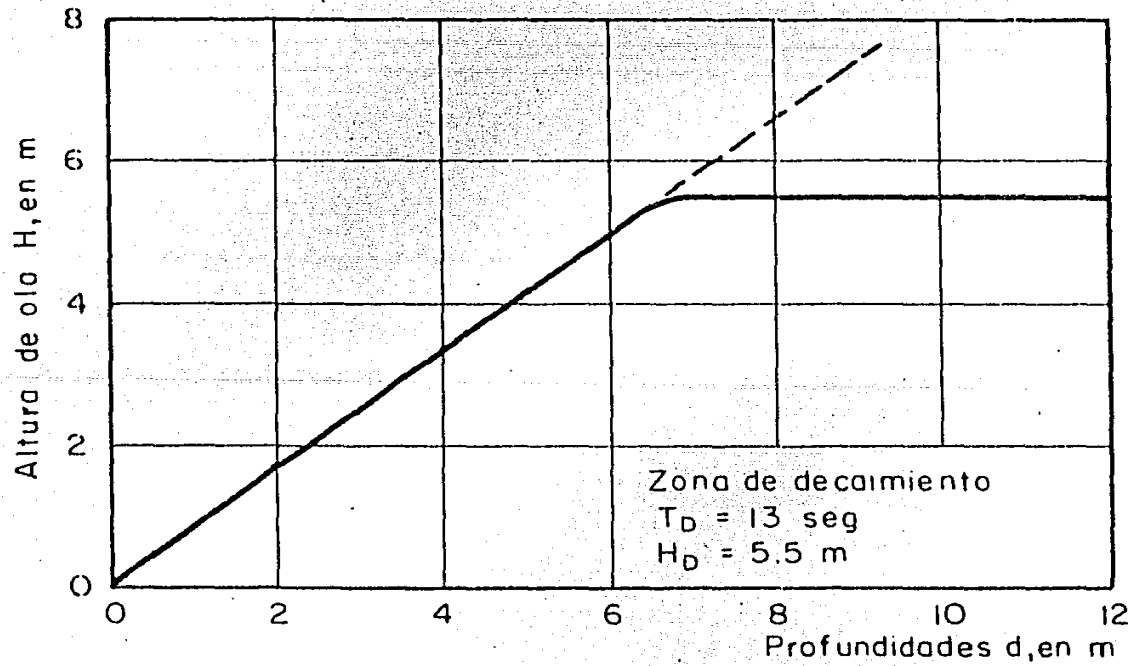


Fig 14 Variación de las alturas de olas respecto a la profundidad

4. DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESCOLLERAS

4.1 Selección de la alternativa preliminar

Debido a la falta de datos, en una primera solución, la posición de la toma y descarga debe hacerse tomando en cuenta el aspecto económico, la configuración del sitio y las direcciones predominantes del oleaje.

Así en el caso de Laguna Verde, Ver., parece conveniente tomar el agua de mar que va a servir para enfriamiento, al norte de donde se va a construir la planta y descargarla al sur. Se tiene la ventaja, de que la toma se puede hacer en donde varía más rápidamente la batimetría y la descarga, utilizando la laguna.

La alternativa preliminar que se seleccionó para el sitio en estudio se muestra en las figuras y cabe mencionar que la descarga se consideró libre y la toma en base a escolleras. Esto último se hizo así, pensando en futuras ampliaciones del gasto del agua de enfriamiento, ya que las escolleras se pueden construir desde un principio de un tamaño adecuado y la única ampliación consistiría en otra casa de bombas. Por otra parte se prefirió usar las escolleras ya que en nuestro país se tiene mas experiencia en su construcción que si hubiésemos considerado una solución en base a tubo por ejemplo.

4.2 Geometría de la escollera

Para definir la forma de escollera, en general se consideran trapecial con talud variable, cuyo valor medio es de 1:2. El ancho de la corona queda fija por los requerimientos de la obra y en general fluctúa entre 5 y 6.5 m.

La altura de la escollera depende del oleaje en el sitio y si se

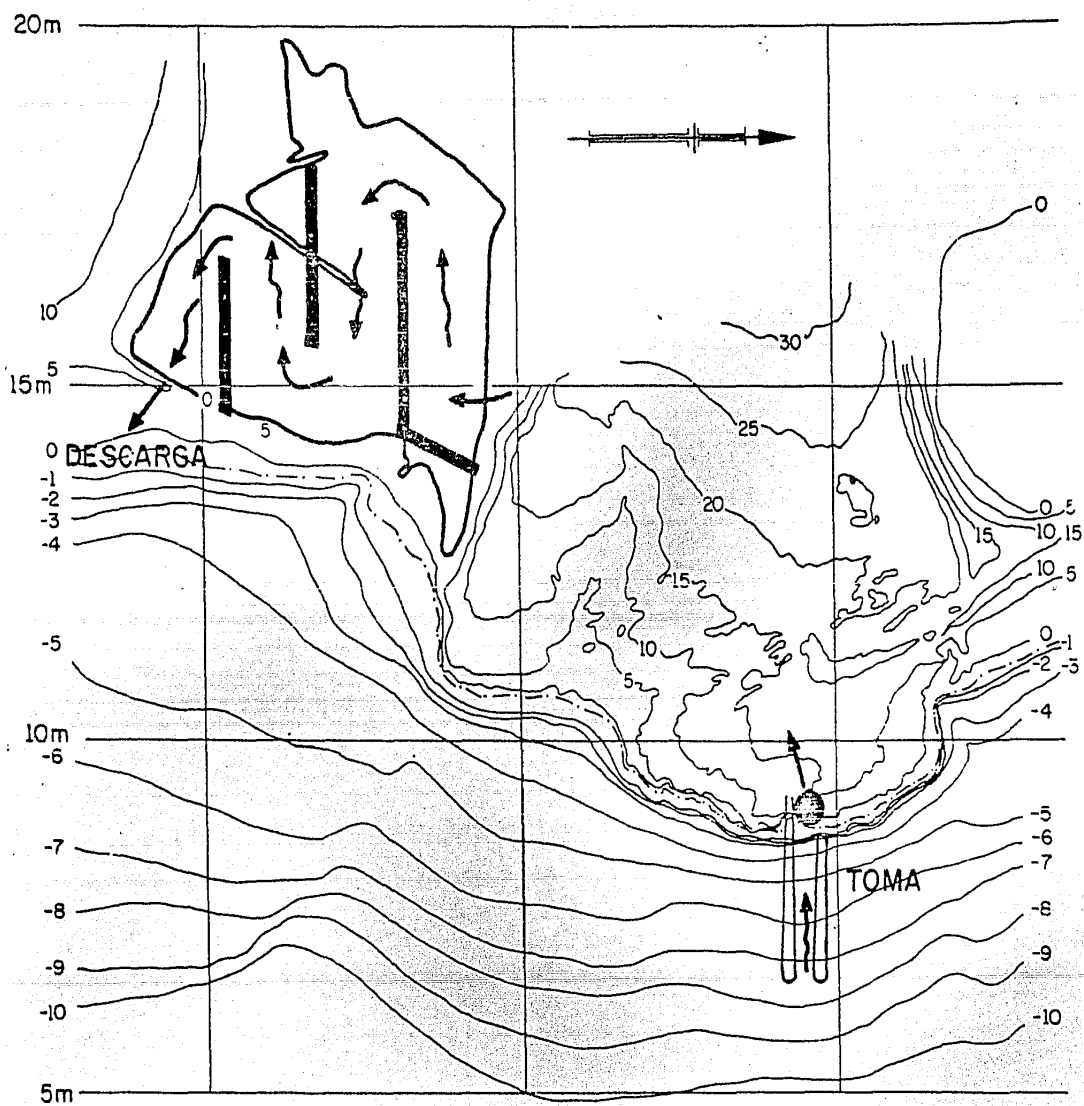


Fig 15 Alternativa propuesta

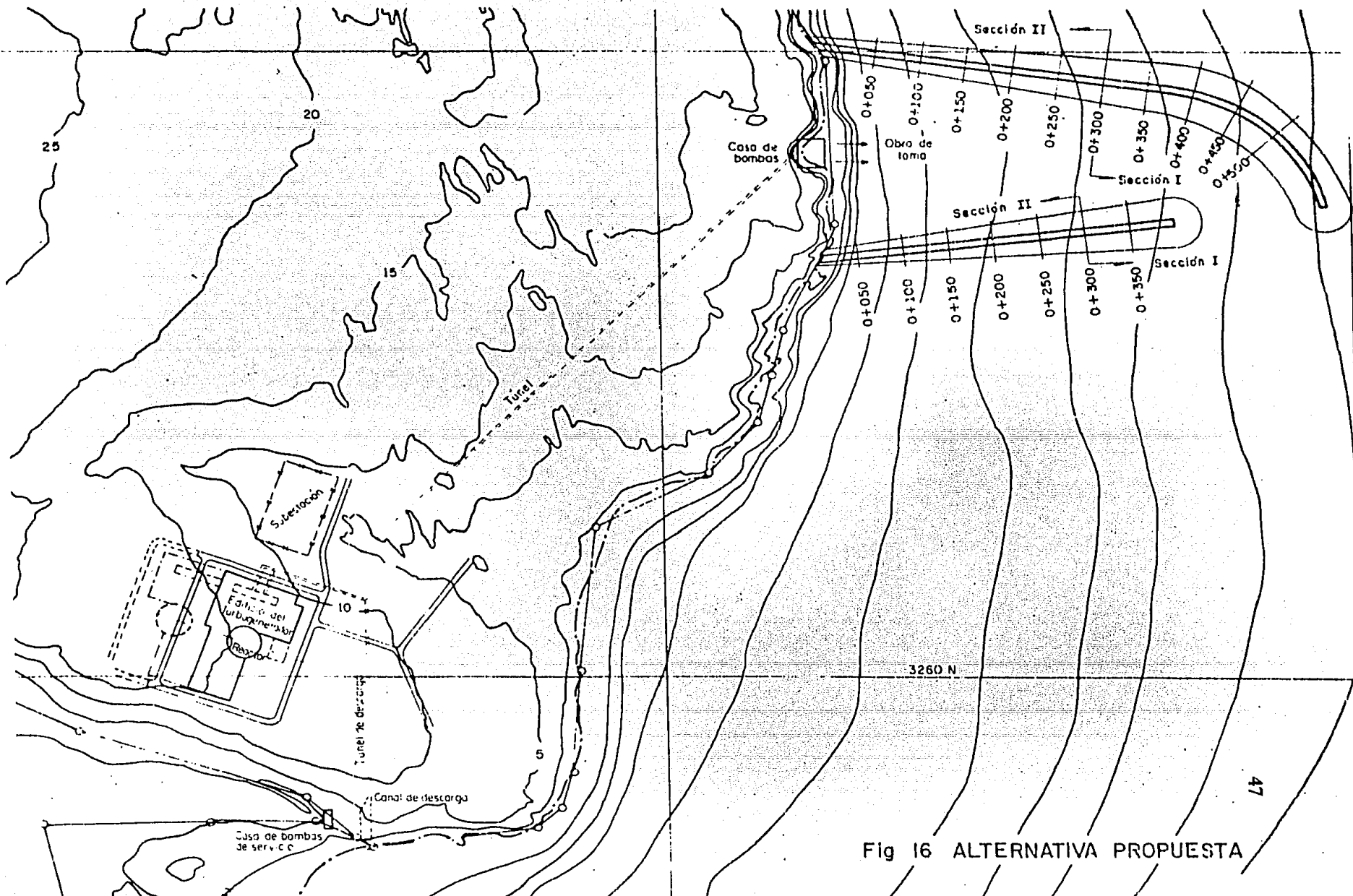


Fig 16 ALTERNATIVA PROPUESTA

desea que este brinque sobre ella o no. Considerando las características del oleaje predicho, es posible determinar el alcance que este oleaje tiene al chocar de frente contra la escollera.

De estudios hechos, se sabe que la altura del alcance de la ola R es función del ángulo del talud α , del material que está hecho la escollera y de la esbeltez de la ola H/L , fig 17.

De las características del oleaje deducidas para el sitio, (fig 14), se ve la esbeltez de la ola H/L varía de 0.05 a 0. De acuerdo con esto, considerando que $\cot \alpha = 2$ y que la escollera es de piedra, de la fig 17 se obtiene que R/H varía de 1.0 a 1.2 según que H/L sea 0.05 ó 0.01.

Lo anterior implica, que si la escollera, tiene una altura mayor de $1.2 H$ sobre el nivel del mar, estas olas no la brincan. Este razonamiento indicaría construir la escollera a profundidades mayores de 5m, de una altura sobre el nivel del mar, mayores de 6.6 m o sea del orden de 7m.

En la fig 18 se muestran las relaciones geométricas que tiene la escollera en función de su profundidad.

4.3 Peso de los elementos

Para el cálculo del peso de los elementos de la coraza, se usa la ecuación propuesta por Hudson, la cual se puede expresar como

$$P = \frac{\gamma_s H^3}{K_{\Delta} [(\gamma_s/\gamma) - 1]^3 \cot \alpha} \quad (27)$$

donde

H altura de la ola de diseño, en m
 \bar{K}_{Δ} coeficiente que vale 3.2 para piedra y 9.5 para tetrápodos

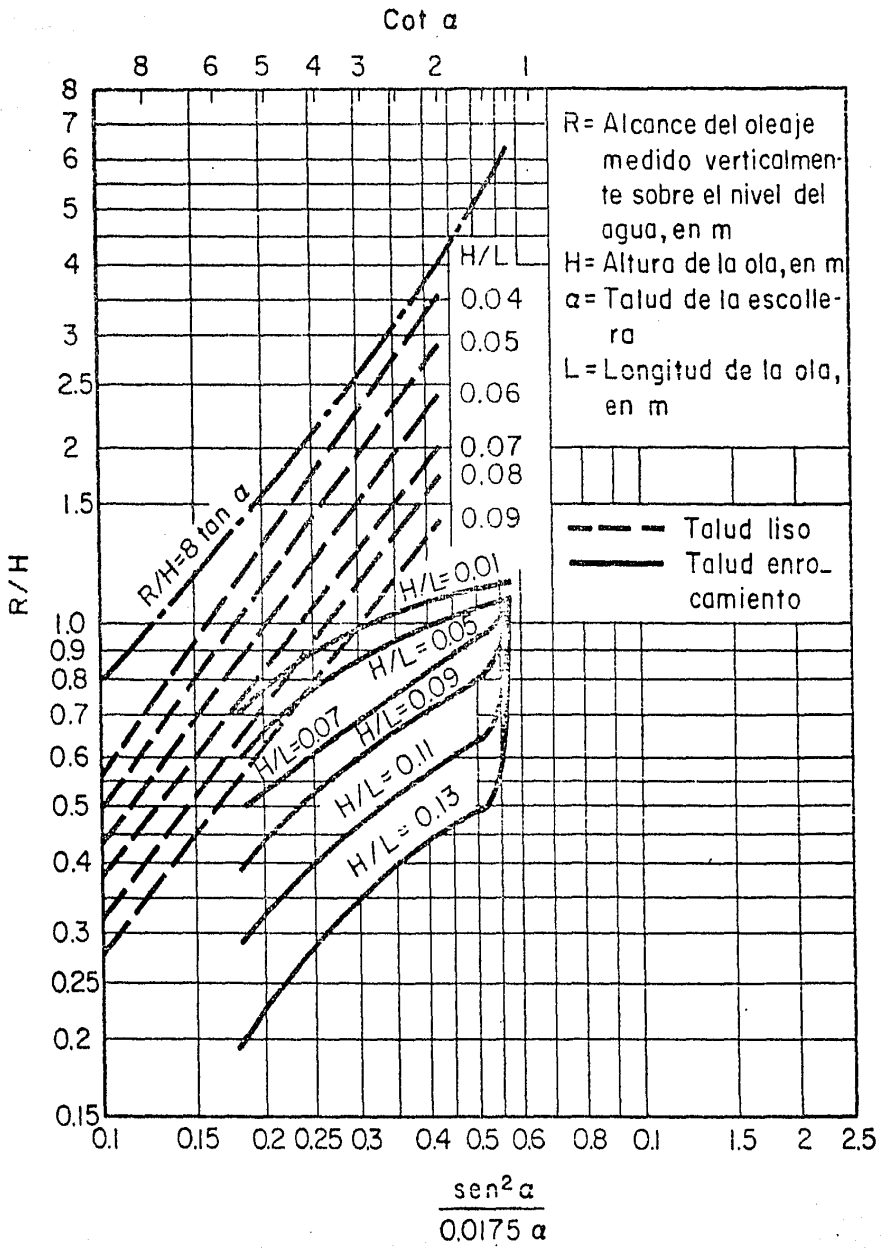


Fig 17 Alcance del oleaje

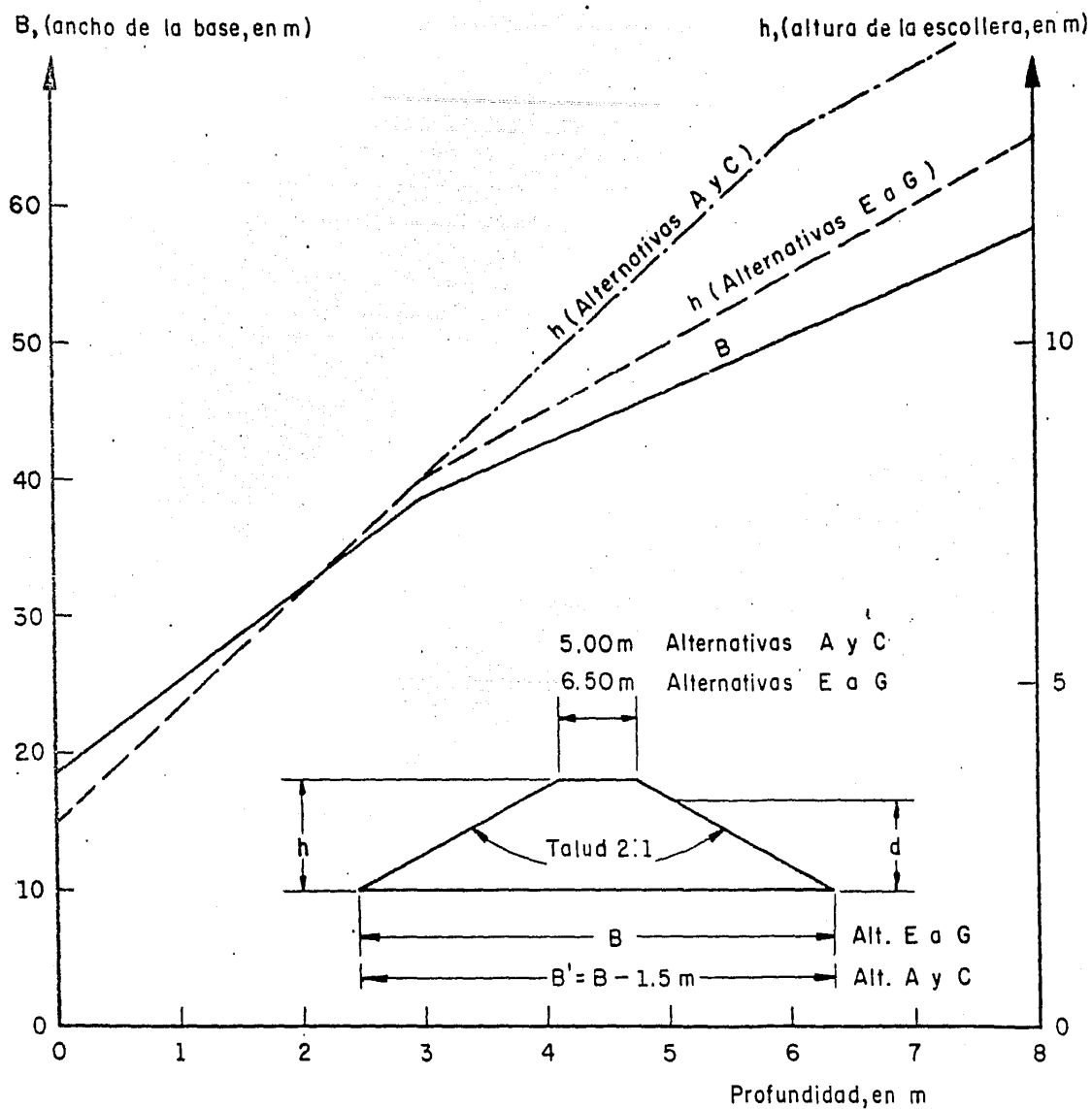


Fig 18 Relaciones geométricas de la escollera en función de la profundidad del mar

- P** peso de un elemento, en ton
 α ángulo del talud de la escollera
 γ peso específico del agua, en ton/m³
 γ_s peso específico del elemento, en ton/m³

Si se escoge un talud de escollera 2:1, y un $\gamma_s = 2.8$ ton/m³ para la piedra y un $\gamma_s = 2.4$ ton/m³ para el tetrápodo, la ec 27 se transforma en:

$$\text{a) Para la piedra} \quad P_p = \frac{H^3}{12.6} \quad (28)$$

$$\text{b) Para el tetrápodo} \quad P_t = \frac{H^3}{21.7} \quad (29)$$

A partir de estas ecuaciones es posible calcular el peso de los elementos de la coraza conociendo la altura del oleaje que incide a la escollera. Como ya se analizó anteriormente, para las profundidades donde se piensa construir la escollera, las alturas de olas dependen de la profundidad (fig 14).

Siguiendo este razonamiento, es posible construir dos gráficas que relacionen los pesos de piedras y tetrápodos con las diferentes profundidades (fig 19). Lo que permitirá su cálculo con más facilidades.

Como el diseño de las escolleras se basa en una altura máxima de oleaje de 5.5 m, llega a un momento en que el peso de los elementos es constante y ya no depende de la profundidad. En la fig 19 se ve que el peso de los elementos es constante, para profundidades mayores de 6.65 m.

Una vez definido el peso de los elementos que forman la coraza de la escollera, el cálculo de los pesos de las siguientes capas de elementos es una función directa de este peso.

Esta relación varía para las siguientes capas desde 1/10 hasta

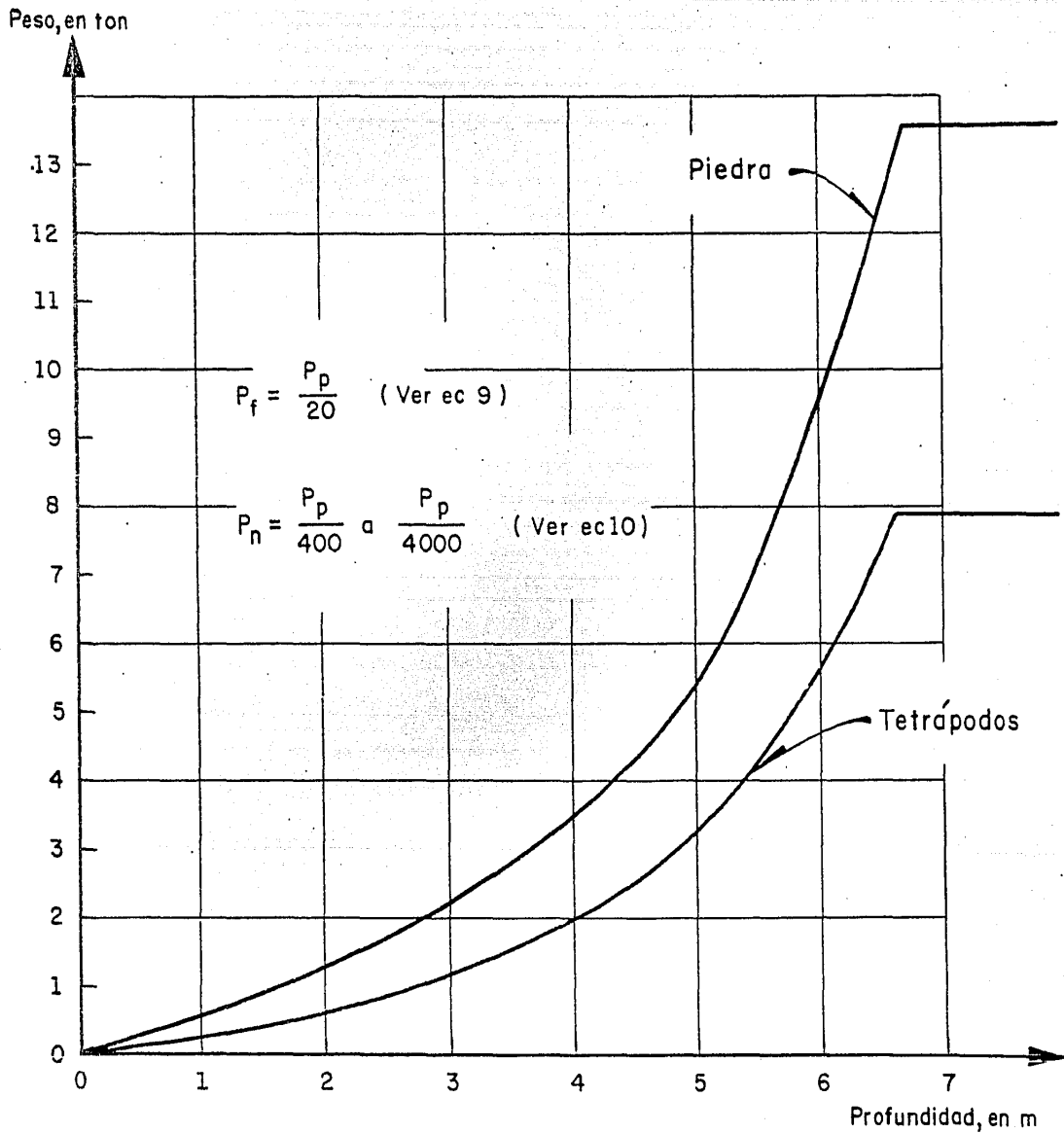


Fig 19 Relaciones de peso de los elementos de piedra y tetrápodos para la coraza de las escolleras, con respecto a la profundidad de esta

1/27 considerando un valor medio de 1/20, dependiendo del espesor de la coraza. Si se quisiera todavía considerar otro tipo de elemento, su peso es función de esa relación pero multiplicado por (1/20) y así sucesivamente, hasta llegar a un peso mínimo de P/4000.

En el caso de las escolleras, del sitio en estudio, se consideraron formadas por tres pesos diferentes de elementos, por lo que están constituidas por la coraza que puede ser de piedra o tetrápodos, un filtro de piedra y el núcleo del mismo material. Los pesos de estos elementos, en función del peso y elementos de la coraza, se consideraron en la forma siguiente:

- a) Si la coraza está formada por piedra de peso P_p (ec28), el peso de la piedra que se debe colocar en el filtro es

$$P_f = P_p/20 \quad (30)$$

y el peso de la piedra que se debe colocar en el núcleo es

$$P_n = P_p/400 \text{ a } P_p/4000 \quad (31)$$

- b) Si la coraza está formada por tetrápodos de peso P_t (ec29), el peso de la piedra que se debe colocar en el filtro es

$$P_f = P_t/10 \quad (32)$$

y el peso de la piedra que se debe colocar en el núcleo es

$$P_n = P_t/200 \text{ a } P_t/4000 \quad (33)$$

La diferencia de criterios que se usarán para seleccionar el peso del filtro y del núcleo, se debió al espesor de la coraza y a su porosidad.

Como puede observarse, usando la ec 30 ó ec 32 se obtiene prácticamente el mismo peso para los elementos del filtro. Lo mismo se puede decir para el peso de los elementos del núcleo (fig 19).

El espesor de las diferentes componentes de la escollera se puede calcular como

$$E = n k_{\Delta} \frac{P}{\gamma_s}^{1/3} \quad (34)$$

donde

- E espesor de las diversas componentes de la escollera, en m
- n número de capas que forman cada componente
- P peso de cada elemento, en ton
- k_{Δ} coeficiente de la capa
- γ_s peso específico del material de los elementos, en ton/m³

El espesor de la coraza depende del material que se quiera usar. Si es piedra, se acostumbra poner tres capas y si es tetrápodo, dos capas. En cualquiera de los dos casos $k_{\Delta} = 1$, por lo que la ec 34 se puede escribir como:

a) Coraza formada por piedra

$$E_p = 3 \frac{P_p}{2.8}^{1/3} = 2.13 P_p^{1/3} \quad (35)$$

b) Coraza formada por tetrápodos

$$E_t = 2 \frac{P_t}{2.4}^{1/3} = 1.49 P_t^{1/3} \quad (36)$$

Respecto al espesor del filtro, si se considera formada por tres capas de piedra, este se puede calcular como

$$E_f = 2.13 P_f^{1/3} \quad (37)$$

donde P_f esta definido por la ec 30 si la coraza es de piedra ó por la ec 32 si la coraza es de tetrápodos.

Siendo el espesor función directa del peso, en la fig 20 se muestra la relación de los espesores respecto a las profundidades de escolleras, con el objeto de simplificar los cálculos.

4.4 Tipos de escollera

Suponiendo que dentro de las escolleras, el mar estará en calma, se puede aceptar que la coraza solo exista en la parte exterior y en los extremos de la escollera. Por otra parte, no se puede pensar en terminar la coraza antes de llegar al fondo porque siempre la profundidad d es menor de $1.5 H$, que es hasta la profundidad donde se recomienda que se tenga coraza.

En las figs 21 se muestran los dos tipos de escolleras y en la fig 16, se indican en planta los cambios de los tipos de escolleras.

La presentación de los cálculos de la escollera en forma de gráfica, ha sido con la idea de facilitar la obtención de los diferentes tipos de escollera con solo conocer la profundidad de desplante d .

El ordenamiento del cálculo puede hacerse como se indica a continuación. Supongase que se desee analizar la alternativa escogida para Laguna Verde, Ver., y se quisiera conocer la forma de la escollera para diferentes profundidades d .

a) De la fig 18 se obtiene la geometría de la escollera

- b) De la fig 19 se determinan los diferentes pesos de las componentes
- c) De la fig 20 se obtienen los espesores de las componentes de las
 escolleras
- d) De la fig 16 se ve a qué tipo de escollera corresponde
- e) De la fig 21 se obtiene cómo deberá constituirse la escollera

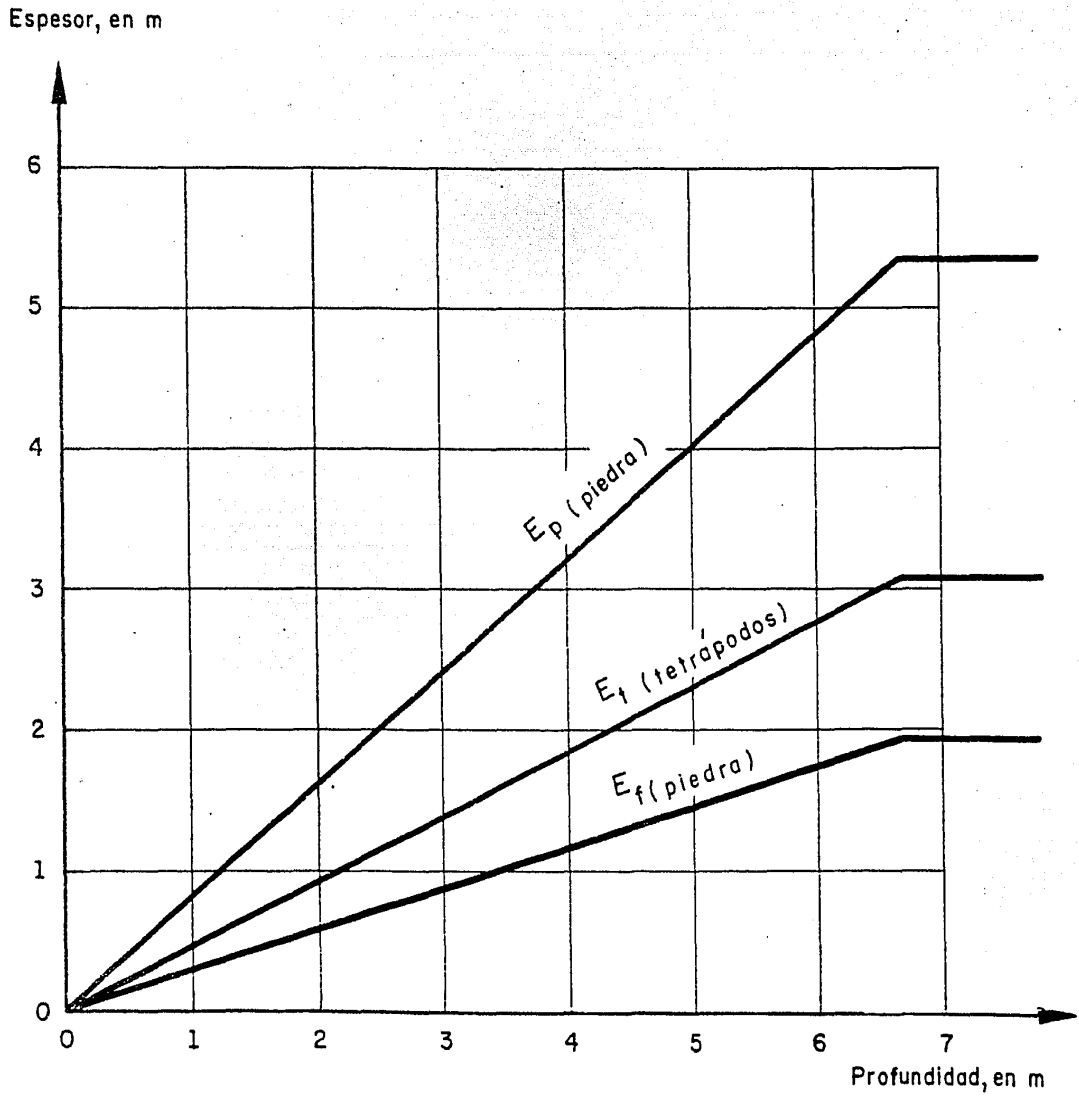
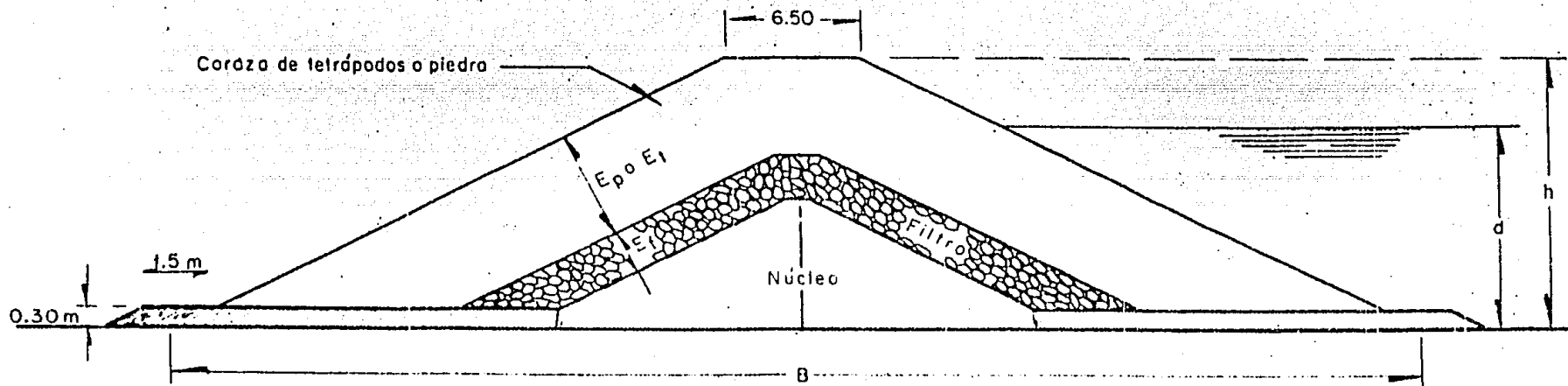
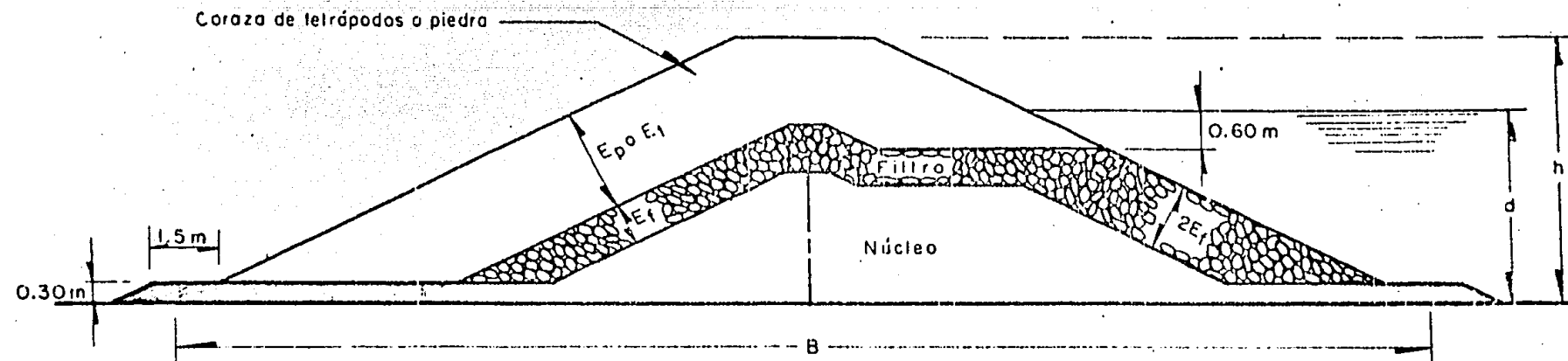


Fig 20 Relación de los espesores de la coraza y el filtro en función de la profundidad del mar



Sección tipo I



Sección tipo II

FIG. 2 | SECCIONES DE ESCOLLERA TIPOS I Y II

5. CONCLUSIONES

En este estudio se ha tratado de dar un método para atacar este tipo de problemas que en un futuro no muy lejano será de gran actualidad. Como se ha mencionado en el primer capítulo, este método puede ser aplicable, mediante las simplificaciones adecuadas a problemas como los de las plantas desaladoras.

Debido a que los métodos aquí expuestos para predecir el oleaje, están basados en experiencias y las fórmulas y relaciones son del tipo empírico es muy de recomendarse que se hagan estudios y mediciones en los sitios en estudio consistentes en conocer las características del oleaje que ocurre normalmente durante todo el año. El conocimiento de estas características servirá para valuar el arrastre litoral, poder diseñar la mejor ubicación y orientación de la obra de toma, estudiar y prever problemas de dragado y, por último, servirá de base para los estudios de difusión del agua caliente y estratificación de la misma. Asimismo se podrían hacer modificaciones en el modelo físico y estudiar en este, ya con mas datos, todos los problemas que se podrían presentar y ensayar las diferentes alternativas que fueran surgiendo, derivados de la campaña de mediciones en el campo.

Conviene hacer un estudio mas a fondo de las alteraciones que se producen en la zona en estudio debido al paso de los ciclones. De esta manera tendríamos datos mas reales que los calculados en este trabajo y poder ajustar nuestro diseño y dimensionamiento de las escolleras.

Por otra parte se podría pensar en realizar estudios en modelos físicos, con otras características que los de fondo fijo, ya que este estudio es en realidad reducido. Con un modelo de fondo móvil se estudiaría el arrastre litoral, las zonas de mayor depósito y la forma de acumulación de la arena

debido a las escolleras, también se observaría de una manera objetiva la forma de la barra en la boca de la obra de toma, en el caso en que esta suceda, los volúmenes de arena que pudieran entrar a la toma y quizás se podría determinar los tiempos en los que estos fenómenos ocurren.

Podría pensarse en estudiar la agitación debida al oleaje dentro de las escolleras en un modelo sin distorsión, lo que permitiría diseñar adecuadamente los lados interiores de las escolleras y a su vez impedir de una manera efectiva ondas que pudieran afectar la toma; ya que estas ondas pueden ocasionar que no se pueda dar un gasto constante y necesario.

Puede decirse como conclusión final que el método expuesto en este trabajo es bastante efectivo en caso de que no se puedan realizar los estudios complementarios arriba mencionados.

RECONOCIMIENTO

Al Sr. Ing. Rolando Springall G., por su desinteresada ayuda y estímulo para la elaboración de este trabajo.

Al Sr. Ing. José Luis Sánchez B., por sus valiosos consejos.

Al Instituto de Ingeniería y a la Comisión Federal de Electricidad quienes conjuntamente desarrollan el proyecto de Laguna Verde, Ver., por haberme facilitado toda la información necesaria para poder desarrollar este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. H. L. Langhaar, *Dimensional Analysis and Theory of Models*. John Wiley & Sons, Inc., New York (1951)
2. R. Irribarren C., C. Nogales., *Obras marítimas; oleajes y diques*. Dossat, S. A., Madrid (1954)
3. R. Bustamante, M. Coria, H. Paz, V. Figueroa, F. Berzunza y M. Bustamante, *Ingeniería marítima*, México (1959)
4. R. L. Wiegel, *Oceanographical Engineering*, Prentice Hall, London (1964)
5. *Department of the Army Corps of Engineers. Shore protection planning and Design. Third Edition*. Wáshington (1966)
6. J. W. Daily, D. R. F. Harleman, *Dinámica de los fluidos*. Trillas, México (1969)
7. R. Springall G., M. A. Flores L., *Estudio de la zona de Laguna Verde, Ver., Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM*. México (1970)