



8
24

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ARAGON"

"ESTUDIOS EN MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO
Y PROYECTO DEL ROMPEOLAS DE
PROTECCIÓN DE LA ZONA NORTE DEL
PUERTO DE VERACRUZ, VER."

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
MARIA DE JESUS BELLO RODRIGUEZ

MEXICO, D. F.

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

A G R A D E C I M I E N T O S

PARA AQUELLAS PERSONAS QUE ME RINDIERON
SU APOYO INCONDICIONAL PARA IR EN POS
DE LA SUPERACION.

ESPECIALMENTE A MI MADRE Y HERMANOS.

CONTENIDO

	PAG.
1 INTRODUCCION	1
2 LOCALIZACION	2
3 RECOPIACION DE INFORMACION	3
4 ANALISIS DE LA INFORMACION RECOPIADA	5
4.1 Informe del proyecto del nuevo acceso carretero al área industrial de San Juan de Ulúa, Ver.	5
4.2 Plan de desarrollo del Puerto de la Antigua, Ver.; estudios físicos generales tomo 1	10
5 INFORMACION DEL MEDIO FISICO	12
5.1 Marea astronómica	12
5.2 Batimetría	12
5.3 Ciclones y nortes	14
6 OLEAJE DE TORMENTA	19
6.1 Oleaje producido por nortes	19
6.1.1 Método de predicción de oleaje	19
6.2 Oleaje producido por ciclones	20
6.2.1 Método de predicción de oleaje	20
6.3 Altura de ola de diseño	37
6.4 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta	42

7	MODELACION NUMERICA DE LA REFRACCION DEL OLEAJE	47
7.1	Método de cálculo	47
7.2	Modelación matemática	57
7.2.1	Mallas de discretización de profundidades	57
7.2.2	Condiciones de la modelación	59
7.2.3	Resultados	60
8	ALTERNATIVAS DE PROYECTOS DE PROTECCION PARA EL ROMPEOLAS NORTE	94
8.1	Criterio de diseño	94
8.2	Oleaje de diseño	94
8.3	Planteamiento de alternativas	95
9	ESTUDIOS EN MODELO HIDRAULICO	108
9.1	Organización experimental	108
9.2	Secciones ensayadas	108
10	ENSAYOS DE LAS SECCIONES DEL ROMPEOLAS	110
10.1	Selección de escalas	110
10.2	Selección de elementos de coraza y subcapas	111
10.3	Construcción de las secciones de prueba en el canal	113
10.4	Condiciones de los ensayos de las secciones del rompeolas	114
11	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	116
12	CONCLUSIONES	119
	REFERENCIAS.....	120

1. INTRODUCCION

La Administración Portuaria Integral del puerto de Veracruz, Ver., ha contemplado como parte de los proyectos de ampliación de la infraestructura del puerto, la habilitación de la zona norte, específicamente la zona aledaña a la bahía de Vergara. Para tal efecto, se ha contemplado la necesidad de un nuevo acceso carretero, cuyo trazo estudiado y definido como más adecuado es a través de la zona norte. Con el nuevo trazo además de restringir al mínimo el paso de vehículos de carga por la ciudad, se gana un área que se destinará para el almacenamiento de contenedores y para patios de maniobras.

Con la finalidad de proteger contra la acción del oleaje las obras de infraestructura portuaria arriba mencionadas, la Administración Portuaria Integral del Puerto de Veracruz, Ver., solicitó a la Vocalía Operativa de Puertos Mexicanos, la realización de los estudios teóricos y los estudios en modelos físicos y matemáticos necesarios, a fin de determinar los proyectos ejecutivos de protección para la zona antes mencionada.

Los estudios y los proyectos solicitados, se realizaron en la Subgerencia de Estudios Básicos e Investigación dependiente de la Vocalía Operativa de Puertos Mexicanos, habiéndose efectuado dichos estudios en dos etapas a saber:

La primera etapa contempla los estudios teóricos y en modelos físicos y matemáticos necesarios para la definición del proyecto ejecutivo de un rompeolas de protección contra el oleaje para la zona de estudio.

La segunda etapa contempla los estudios teóricos y en modelos matemáticos necesarios para realizar el análisis histórico de la línea de playa de la Bahía de Vergara, el pronóstico de la línea de playa en dicha zona una vez que se construya el rompeolas de protección, y los proyectos ejecutivos de las obras de protección contra el transporte litoral que resulten necesarias y que eviten que la arena se mueva hacia la boca del puerto provocando azolvamiento.

Considerando lo anterior, en este informe se presentan los resultados obtenidos del análisis y procesamiento de la información recopilada de estudios realizados con anterioridad para la zona de estudio, la metodología y los resultados obtenidos al aplicar un modelo matemático para predecir el oleaje de tormenta producido por ciclones y nortes que han afectado a la zona de estudio, los resultados obtenidos de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta, la metodología y los resultados obtenidos al aplicar un modelo matemático de refracción de oleaje para propagar de aguas profundas a la zona donde se pretende construir el rompeolas de protección, el oleaje ciclónico de diseño correspondiente a un período de retorno de 50 años, y los resultados obtenidos del estudio experimental de estabilidad, los cuales sirvieron para revisar los proyectos ejecutivos del rompeolas de protección contra el oleaje para la zona de estudio.

2. LOCALIZACION

La zona de estudio se localiza al norte del Puerto de Veracruz, Ver., en el sitio conocido como playa norte de la Bahía de Vergara, quedando limitada al este por el bajo de la Gallega y al oeste en la denominada playa norte, por la descarga de aguas negras existente en la zona. En la Fig. 2.1 se indica la localización de la zona de estudio.

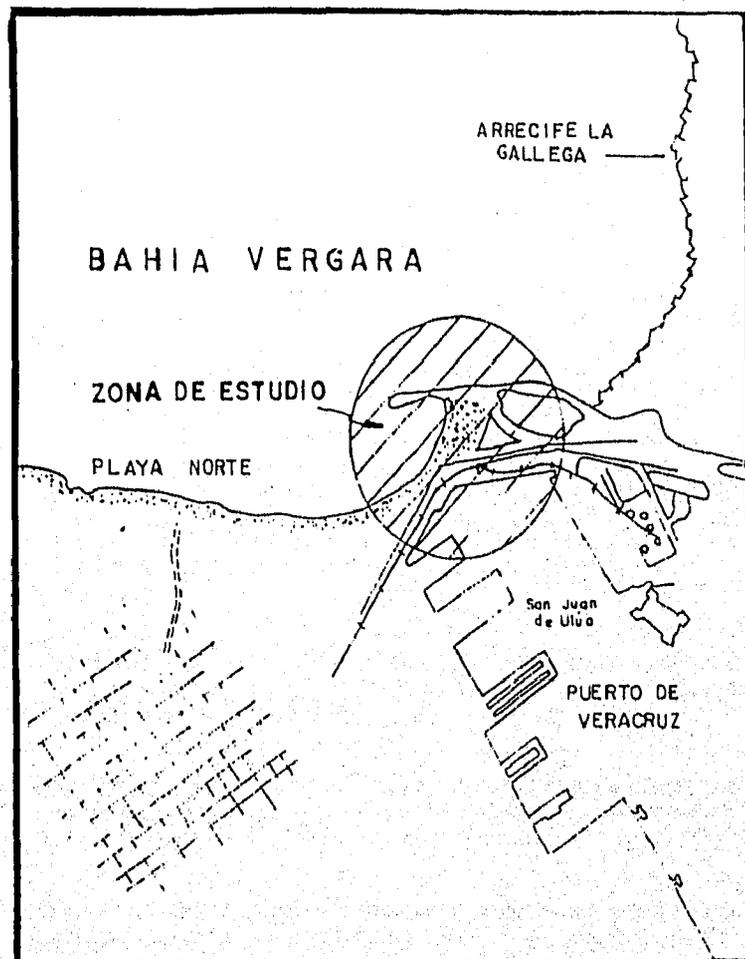


Fig. 2.1 Localización de la zona de estudio

3. RECOPIACION DE INFORMACION

Para llevar a cabo este trabajo, se realizó una recopilación de información en varios estudios efectuados con anterioridad para la zona, destacando la siguiente:

- **INFORME DEL PROYECTO DEL NUEVO ACCESO CARRETERO AL AREA INDUSTRIAL DE SAN JUAN DE ULUA, VER.** Realizado en septiembre de 1981 por la empresa Consultoría Técnica, S.C., para la Dirección General de Obras Marítimas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- **LEVANTAMIENTO BATIMETRICO DE LA BAHIA DE VERGARA; PUERTO DE VERACRUZ, VER.** Realizado en julio de 1994 por la empresa " SEAPROD S.A DE C.V " para la Administración Portuaria Intergral de Veracruz.
- **NUMERO ANUAL DE NORTES QUE AFECTAN AL PUERTO DE VERACRUZ, VER.** Información recopilada en el Centro de Previsión del Golfo de México de la Comisión Nacional del Agua.
- **PLAN DE DESARROLLO DEL PUERTO DE LA ANTIGUA, VER.; ESTUDIOS FISICOS GENERALES, TOMO 1.** Realizado en diciembre de 1990 por la empresa ALEPH Ingenieros Consultores, S.A. de C.V., para la Vocalía de Planeación de Puertos Mexicanos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- **PORTULANO NORTH AMERICA, MEXICO - EAST COAST, TAMPICO TO PROGRESO.** Publicado en julio de 1975 por la Defense Mapping Hydrographic Center of the U.S.A
- **PORTULANO MEXICO - COSTA ESTE, VERACRUZ Y PROXIMIDADES.** Publicado en mayo de 1983 por la Dirección General de Oceanografía de la Secretaría de Marina de México.
- **TABLAS DE PREDICION DE MAREAS DEL GOLFO DE MEXICO Y MAR CARIBE.** Editadas en 1993 por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.
- **TIEMPO DE ACCION ANUAL DE LOS NORTES QUE AFECTAN EL PUERTO DE VERACRUZ, VER.** Información recopilada en el Centro de Previsión del Golfo de México de la Comisión Nacional del Agua.

- **TRAYECTORIAS CICLONICAS Y CARTAS ISOBARICAS DE LOS
CICLONES OCURRIDOS DE SEPTIEMBRE DE 1955 A OCTUBRE DE 1985
EN LA ZONA DEL PUERTO DE VERACRUZ, VER.** Información
recopilada en el Servicio Meteorológico Nacional de la
Comisión Nacional del Agua.

Toda esta información recopilada no es la única que se
consultó para la elaboración del estudio, pero fue la que sirvió
de base para establecer los antecedentes del proyecto.

4. ANALISIS DE LA INFORMACION RECOPIlada

4.1 Informe del proyecto del nuevo acceso carretero al área industrial de San Juan de Ulúa, Ver.

Este trabajo consiste en la realización de los Estudios y Proyectos para diseñar la vialidad y un rompeolas de protección contemplados en los proyectos de ampliación del Puerto de Veracruz, que incluyen la habilitación y expansión de áreas industriales al Noreste del Puerto y en San Juan de Ulúa. Los objetivos definidos en la realización de los estudios y proyectos en este trabajo fueron los siguientes:

1) Definir la topografía y batimetría a lo largo del eje de los diferentes tramos de la vialidad en proyecto, así como de la zona terrestre que se habilitaría para alojar los diferentes servicios, áreas de almacenaje y ocupación industrial.

2) Realización de un estudio geotécnico de la sub-rasante y de los materiales de préstamo requeridos para la construcción de la vialidad.

3) Realización del proyecto geométrico y constructivo de la vialidad, de acuerdo con el proyecto de desarrollo del puerto preparado por la Subjefatura de Planificación de la Dirección General de Obras Marítimas de la S.C.T.

4) Realizar el proyecto geométrico y constructivo de las escolleras requeridas para proteger la vialidad de los agentes oceanográficos y procesos litorales.

5) Dar las recomendaciones necesarias para llevar a cabo los rellenos para habilitar el área terrestre que se ganaría para los usos requeridos por el crecimiento del puerto.

Cabe mencionar que de todos los antecedentes recopilados, este trabajo, es el que aporta la mayor información para la realización del presente estudio, y servirá únicamente como base general para la realización del proyecto del rompeolas en cuestión, toda vez que se observaron algunas incongruencias para la definición de la altura de ola de diseño del rompeolas que se proyectó en el trabajo de referencia. Dentro de las incongruencias observadas en dicho trabajo, se mencionan las siguientes:

1) Tomando como base la información del " régimen normal de oleaje " definido en el trabajo de referencia, la cual se publica en la fuente denominada " Oceanographic Atlas of the North Atlantic Ocean (SEA and SWELL) ", y considerando la dirección Norte del oleaje como la más desfavorable para la obra de protección proyectada, se elaboraron análisis estadísticos y probabilísticos aplicando la Distribución de Rayleigh, obteniendo las alturas de ola representativas en un período anual según se ilustra en la **Tabla. 4.1.** A partir de los datos de la tabla antes

mencionada, se estimaron las alturas de olas máximas y significantes para un grupo de 100 olas, asociadas a periodos de retorno, cuyos resultados se presentan en la Tabla. 4.2.

Las observaciones en la metodología antes mencionada, consisten fundamentalmente en que en el trabajo de referencia no se hace mención del tratamiento realizado al oleaje local y al oleaje distante para definir el régimen normal del oleaje utilizado en dicha metodología, además de que en la práctica ingenieril no se usa el régimen normal del oleaje para la determinación del oleaje de diseño de estructuras de protección contra el oleaje, pues el oleaje normal se utiliza para la estimación de la capacidad del transporte litoral y no para el diseño de rompeolas de protección en donde se utilizan los oleajes de tormenta originados por los Ciclones y los Nortes característicos de la zona de estudio.

2) Por lo que corresponde al tratamiento de los oleajes de Tormenta, en el trabajo de referencia se menciona que " se estableció un análisis de valores extremos a partir del régimen de temporal, aplicando el método de Gumbell, calculando las alturas de ola máxima y significativa para un grupo de 100 olas; cuyos resultados se ilustran en la Tabla.4.3 "

Las observaciones en el tratamiento antes mencionado, consisten fundamentalmente en que tomando en cuenta que los datos de la altura significativa determinadas con el análisis ciclónico en el trabajo de referencia, además de no indicar si corresponden a la zona de generación o a la zona de decaimiento, siendo un total de 15 datos (Tabla. 4.4) , no se explica la metodología utilizada para tomar en cuenta un grupo de 100 olas en el análisis de valores extremos realizado con el método de Gumbell, ni tampoco se indica el criterio utilizado para determinar los valores de las alturas de ola máximas presentados en la Tabla. 4.3.

3) Adicionalmente a los tratamientos antes descritos para definir la altura de ola de diseño, en el trabajo de referencia " se calculó la altura de ola de diseño a partir del testigo constituido por los elementos de coraza (tretápodos de 9.7 Ton.) del rompeolas Norte, con taludes de 1.5:1, para lo cual se encontró que la altura de ola que pueden resistir dichos elementos es de 4.35 m."

En el trabajo de referencia al considerar un período de retorno de 50 años y los resultados obtenidos en los análisis antes mencionados, se llegó a los siguientes valores comparativos de alturas de ola significativa de diseño:

$$H_s = 4.35 \text{ m (Testigo)}$$

$$H_s = 4.45 \text{ m (Sea and Swell)}$$

$$H_s = 5.50 \text{ m (Ciclón Allen)}$$

$$H_s = 6.36 \text{ m (Ciclónico)}$$

CARACTERISTICAS DE OLEAJE NORMAL QUE INCIDE EN LA DIRECCION NORTE		
Altura de ola máxima	(H _{máx})	6.00 m
Altura de ola centésima	(H ₁₀₀)	4.92 m
Altura de ola milésima	(H ₁₀₀₀)	4.28 m
Altura de ola de probabilidad de excedencia 0.01	(H _{1/100})	3.78 m
Altura de ola de probabilidad de excedencia 0.1	(H _{1/10})	2.88 m
Altura de ola significativa	(H _{1/3})	2.25 m
Altura de ola media cuadrática	(H _{rms})	1.60 m

Tabla 4.1 Alturas de ola representativas en un período anual para la dirección Norte

VALORES EXTREMOS DEL OLEAJE NORMAL		
PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	ALTURA DE OLA MAXIMA (m)	ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE (m)
1	6.00	3.94
2	6.14	4.03
5	6.33	4.15
10	6.47	4.25
50	6.78	4.45
100	6.91	4.54
1000	7.33	4.81

Tabla 4.2 Alturas de ola asociadas al período de retorno para oleaje Normal

VALORES EXTREMOS PARA OLAJE DE TEMPORAL		
PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	ALTURA DE OLA MAXIMA (m)	ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE (m)
1	1.60	2.37
2	4.68	3.08
5	6.10	4.01
10	7.17	4.72
20	8.25	5.43
50	9.67	6.36
100	10.74	7.07
500	13.24	8.71
1000	14.31	9.42

Tabla 4.3 Alturas de ola asociadas al período de retorno para oleaje de Temporal

ANÁLISIS CICLÓNICO			
CICLON	AÑO	ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE (m)	PERIODO SIGNIFICANTE (seg)
INES	1966	2.98	13
FERN	1967	4.34	15
GLADYS	1968	1.15	9
CAMILLO	1969	0.67	8
ELLA	1970	1.90	11
FERN	1971	0.47	8
AGNES	1972	0.90	9
BRENDA	1973	1.35	10
CARMEN	1974	3.60	14
CAROLINE	1975	1.90	11
S/N	1976	4.50	16
ANITA	1977	2.10	12
AMELIA	1978	0.38	8
ITERNI	1979	1.38	10
ALLEN	1980	5.50	17

Tabla 4.4 Resultados del análisis ciclónico

De los valores comparativos de altura de ola antes indicados, en el trabajo de referencia se adoptó para diseño la altura de ola de 4.35 m, considerando que dicha altura de ola es la que presenta el menor valor, y que corresponde con la altura de ola con la que a la fecha la estructura del rompeolas Norte ha operado satisfactoriamente.

Las observaciones en el análisis comparativo de las alturas de ola de diseño, consisten fundamentalmente en que no es procedente realizar una comparación entre la altura de ola de diseño calculada con el " Testigo " y las alturas de ola calculadas con el " Sea and Swell ", con el " Ciclón Allen ", y con los " Valores extremos del análisis Ciclónico ", ya que las alturas de ola de diseño calculadas con los últimos tres métodos no consideran los efectos de refracción de aguas profundas a aguas bajas, además de las incongruencias mencionadas con anterioridad.

Adicionalmente, cabe mencionar que en el trabajo de referencia no se consideró la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta en el diseño del rompeolas proyectado.

4.2 Plan de desarrollo del Puerto de la Antigua, Ver.; estudios físicos generales, tomo 1.

Este trabajo consiste principalmente en la descripción de los estudios físicos generales desarrollados para la planificación y evaluación de un desarrollo portuario en la Antigua, Ver., y consta de 8 capítulos.

En el primer capítulo llamado " **Introducción y objetivos** ", es donde se establece la necesidad de investigar los fenómenos meteorológicos y oceanográficos que se deberán tomar en cuenta para la correcta planificación del desarrollo portuario en la Antigua, Ver.

En el segundo capítulo llamado " **Alcance de los Estudios** ", es donde se definen de acuerdo con los términos de referencia elaborados por Puertos Mexicanos, los alcances del estudio.

En el tercer capítulo llamado " **Recopilación de información** ", es donde se citan las diversas fuentes de información recopilada para el desarrollo del estudio.

En el cuarto capítulo llamado " **Climatología** ", es donde se presenta el análisis de la de información recopilada de diversos fenómenos meteorológicos, considerando entre ellos a las temperaturas, precipitación, fenómenos especiales (días con lluvia apreciable, días despejados, y días con niebla), vientos, nortes y ciclones.

En el quinto capítulo llamado " Oceanografía ", es donde se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico del régimen normal del oleaje, y de los análisis estadísticos de probabilidad de excedencia de las alturas de olas significantes originadas por los ciclones y nortes, y el análisis de la información recopilada de corrientes (oceánicas, locales, inducidas por el viento, por el oleaje, y por la marea), y niveles de mareas (astronómica y tormenta).

En el sexto capítulo llamado " Régimen de Costas ", es donde se presentan los resultados del cálculo del transporte litoral en la zona de estudio.

En el séptimo capítulo llamado " Transporte Eólico ", es donde se analiza la formación de dunas en Veracruz, y se presentan los resultados del cálculo del transporte eólico en la zona de estudio.

En el octavo capítulo llamado " Geología y Suelos ", es donde se presentan los resultados de la Exploración Geofísica Terrestre, de la Exploración en el mar, y de la Exploración de Bancos de Materiales (bancos de roca y bancos para agregados de concreto), realizadas para la zona de estudio.

Cabe mencionar que de la información recopilada en este trabajo, la incluida en el quinto capítulo, específicamente la correspondiente a los ciclones y nortes será la que servirá para definir los meteoros que han afectado a la zona de estudio y cuyas características servirán para definir el oleaje de diseño.

De los demás documentos recopilados, se considera innecesario destacar su contenido, ya que en todos los casos, el nombre es suficientemente explícito del contenido del documento.

5. INFORMACION DEL MEDIO FISICO

5.1 Marea astronómica

Con respecto a los niveles de marea astronómica, cabe mencionar que en la zona de estudio se cuenta con una estación mareográfica operada por la Secretaría de Marina. El Instituto de Geofísica de la UNAM [8], es quién analiza los datos registrados en dicha estación y ha publicado que la marea para el puerto de Veracruz, Ver., tiene un rango promedio de 0.52 m y es del tipo mixta diurna con los siguientes niveles representativos:

NIVEL REPRESENTATIVO DEL MAR	ELEVACION RESPECTO AL N.M.M.* (m)	ELEVACION RESPECTO AL N.B.M.** (m)
Pleamar máxima registrada	0.929	0.628
Nivel de pleamar media	0.201	-0.080
Nivel medio del mar	0.000	-0.301
Nivel de media marea	0.040	-0.259
Nivel de bajamar media	0.301	0.000
Bajamar mínima registrada	0.778	0.477

* Nivel medio del mar

** Nivel de bajamar media

5.2 Batimetría

En lo referente a información batimétrica, se recopiló el levantamiento batimétrico de detalle indicado en la Fig. 5.1, el cual fue realizado en junio de 1994 por la empresa "SEAPROD S.A. DE C.V." para la Administración Portuaria Intergral (API) de Veracruz [11], dicho levantamiento batimétrico cubre un frente marítimo de aproximadamente 2.0 Km y abarca las profundidades comprendidas entre la 0.00 y - 13.00 m.

Para complementar la información batimétrica de la zona de estudio, se utilizó la información contenida en el portulano "NORTH AMERICA, MEXICO - EAST COAST, TAMPICO TO PROGRESO", publicado en julio de 1975 por la Defense Mapping Hydrographic Center of the U.S.A. [6], y en el portulano "MEXICO - COSTA ESTE, VERACRUZ Y PROXIMIDADES", publicado en mayo de 1983 por la Dirección General de Oceanografía de la Secretaría de Marina [7].

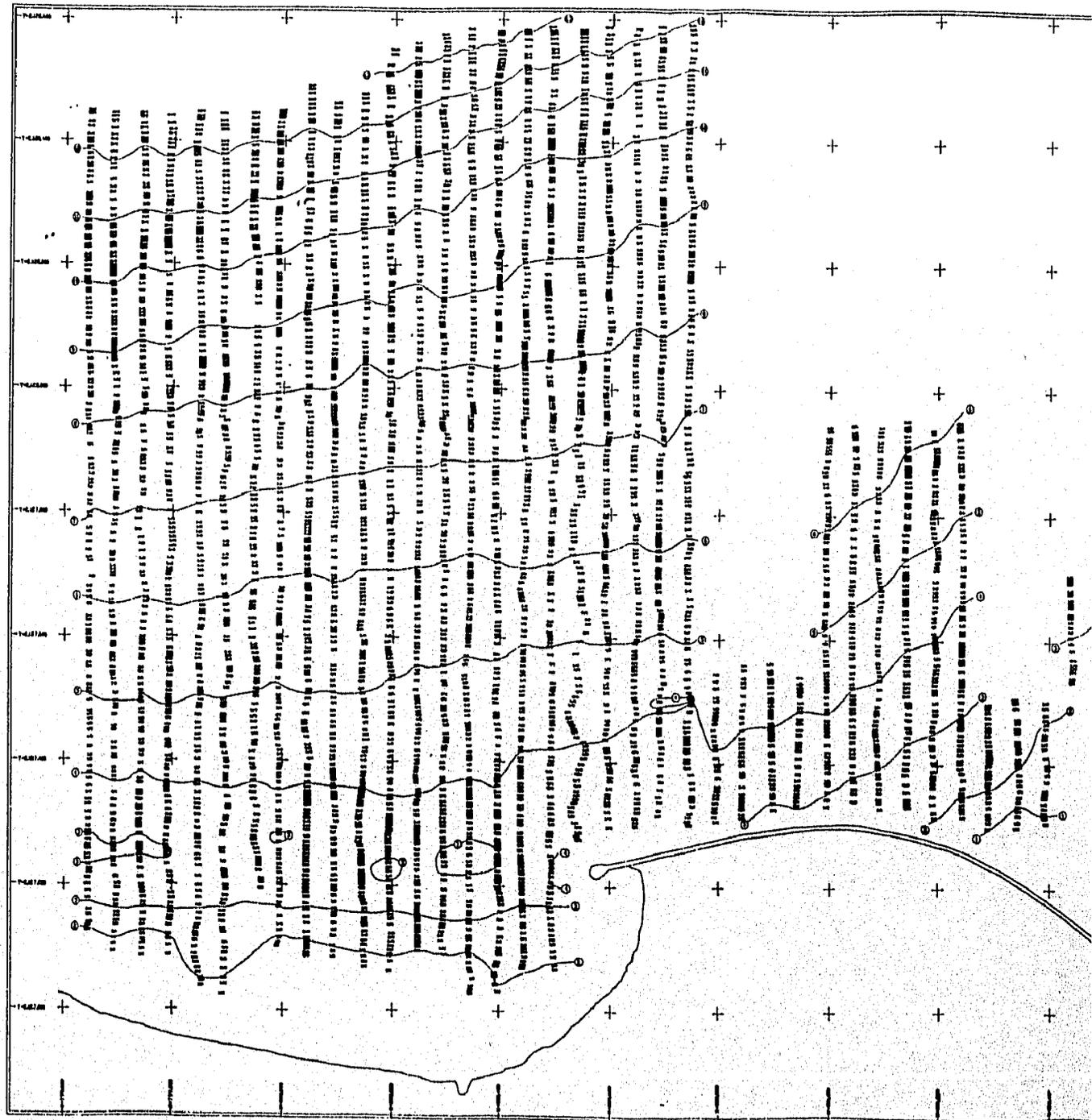
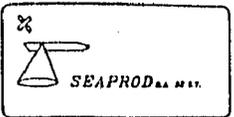
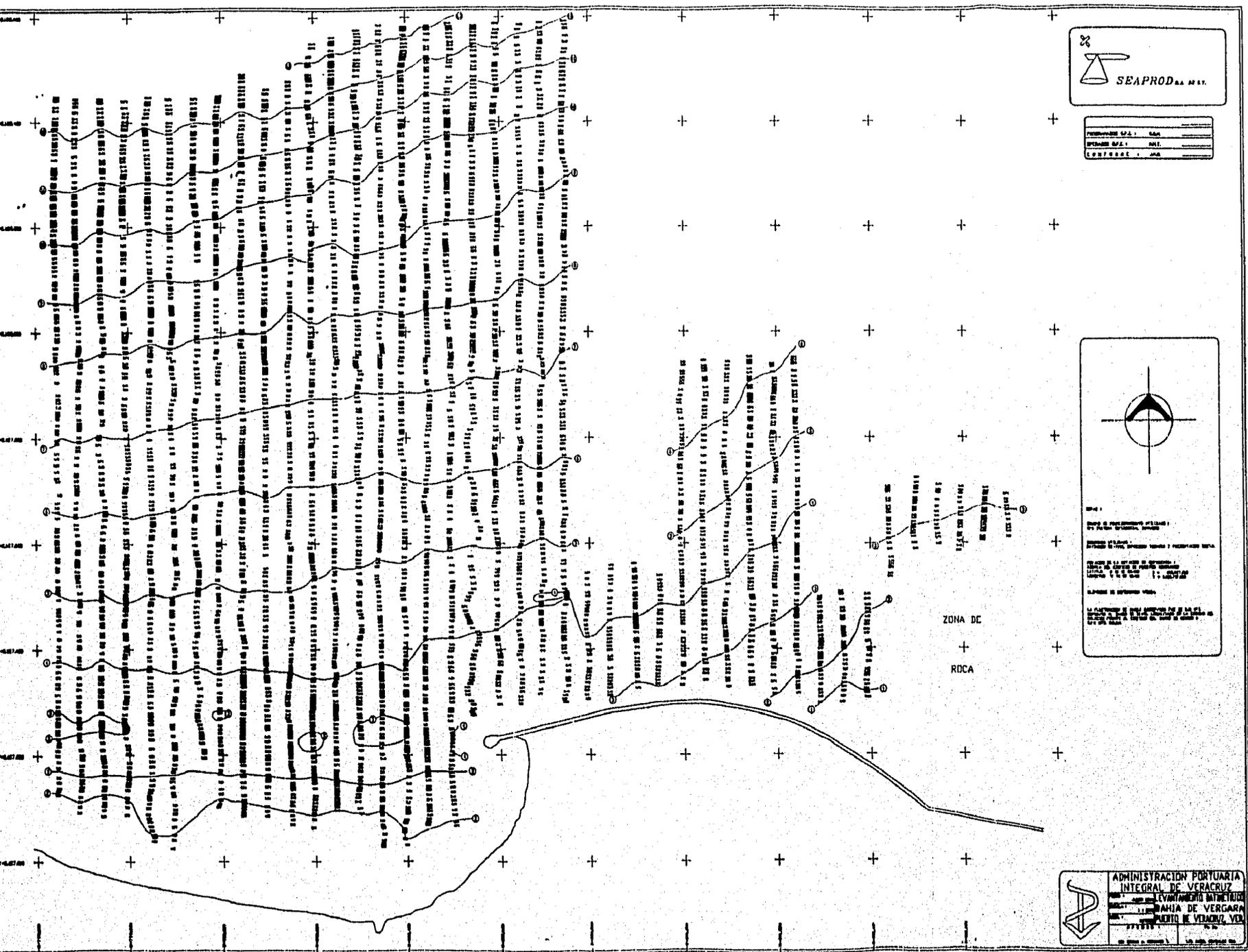
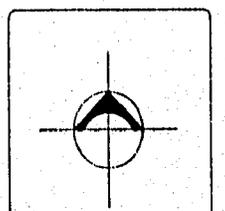


Fig. 5.1 Levantamiento batimétrico de detalle para la zona de estudio



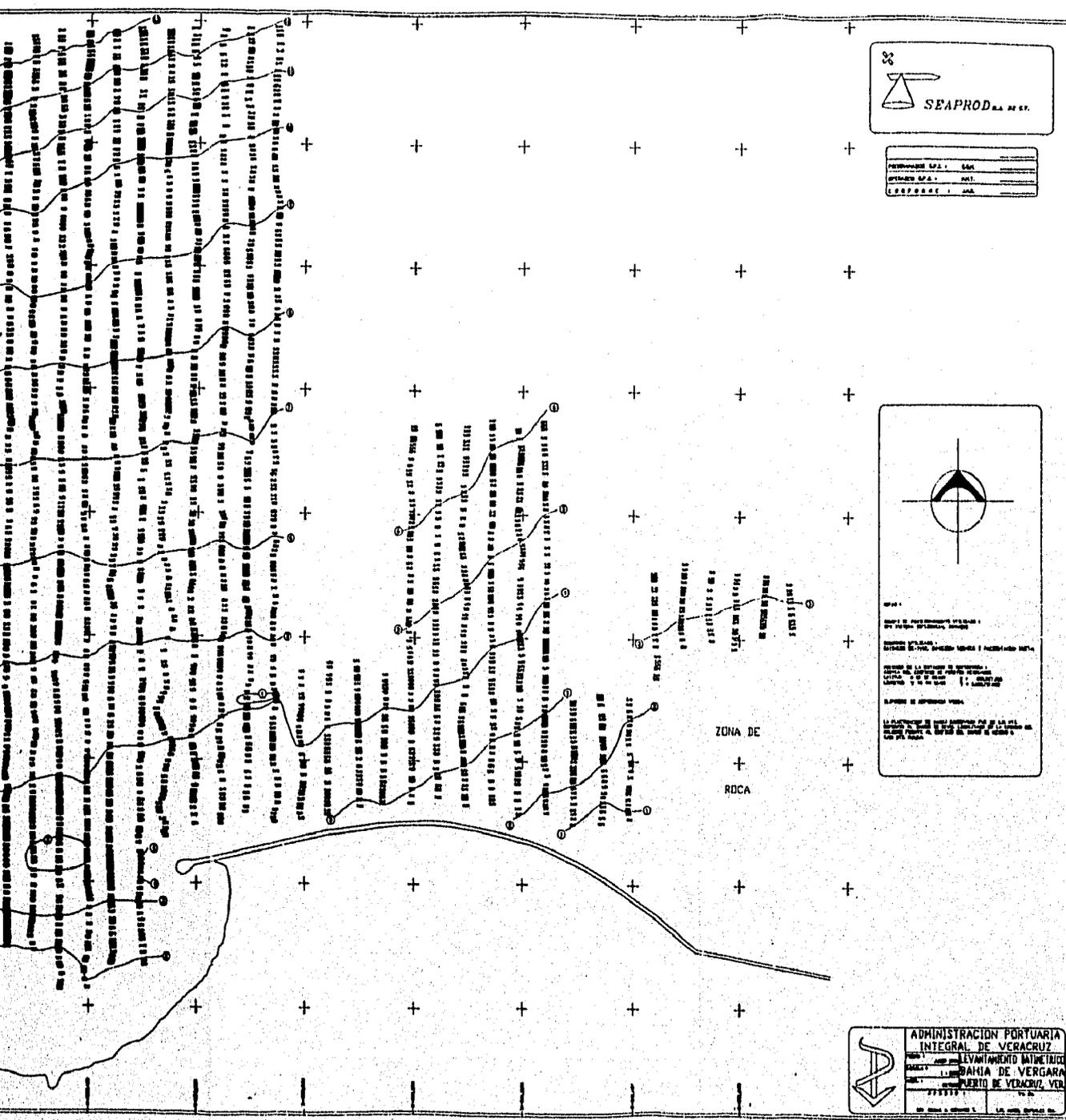
PROYECTO:	MAPA
FECHA:	1971
CONTRATO:	100



Escala: 1:50,000
 Datum: NAD 83
 Sistema de Coordenadas: UTM
 Zona: 18N
 Datum: NAD 83
 Fuente de Datos: Levantamiento Batimétrico
 Escala: 1:50,000
 Fecha: 1971
 Autor: SEAPRODA S.A.

ADMINISTRACION PORTUARIA
 INTEGRAL DE VERACRUZ
 LEVANTAMIENTO BATIMETRICO
 BAHIA DE VERGARA
 PUERTO DE VERACRUZ, VER.
 1971

Fig. 5.1 Levantamiento batimétrico de detalle para la zona de estudio



de detalle

5.3 Ciclones y Nortes

Para contar con información oceanográfica y meteorológica, misma que rige en el diseño de la obra de protección en cuestión, se efectuó una recopilación de información de los datos meteorológicos de los ciclones y nortes que han ocurrido en la zona de estudio.

Dicha información se utilizó para determinar los valores extremos de las alturas y períodos de ola significantes en aguas profundas, así como para determinar los niveles de sobreelevación del mar por marea de tormenta. Para tal efecto, se recopiló la información de 8 ciclones ocurridos del 9 de septiembre de 1955 al 9 de octubre de 1985, la cual cubre las trayectorias ciclónicas indicadas en la Fig. 5.2 y las cartas isobáricas correspondientes a las fechas indicadas en la Tabla 5.1, así como las características indicadas en la Fig. 5.3 y en la Tabla 5.2, las cuales corresponden a las de los nortes ocurridos anualmente en la zona de estudio.

NOMBRE DEL CICLON	FECHA
JANET	09-SEP/55
INES	07-OCT/66
FERN	03-OCT/67
CARLA	08-SEP/61
CAROLINE	29-AGO/75
ELOISE	20-SEP/75
ALLEN	04-AGO/80
GILBERT	09-OCT/85

Tabla 5.1 Ciclones seleccionados para analizar el oleaje de tormenta de la zona de estudio

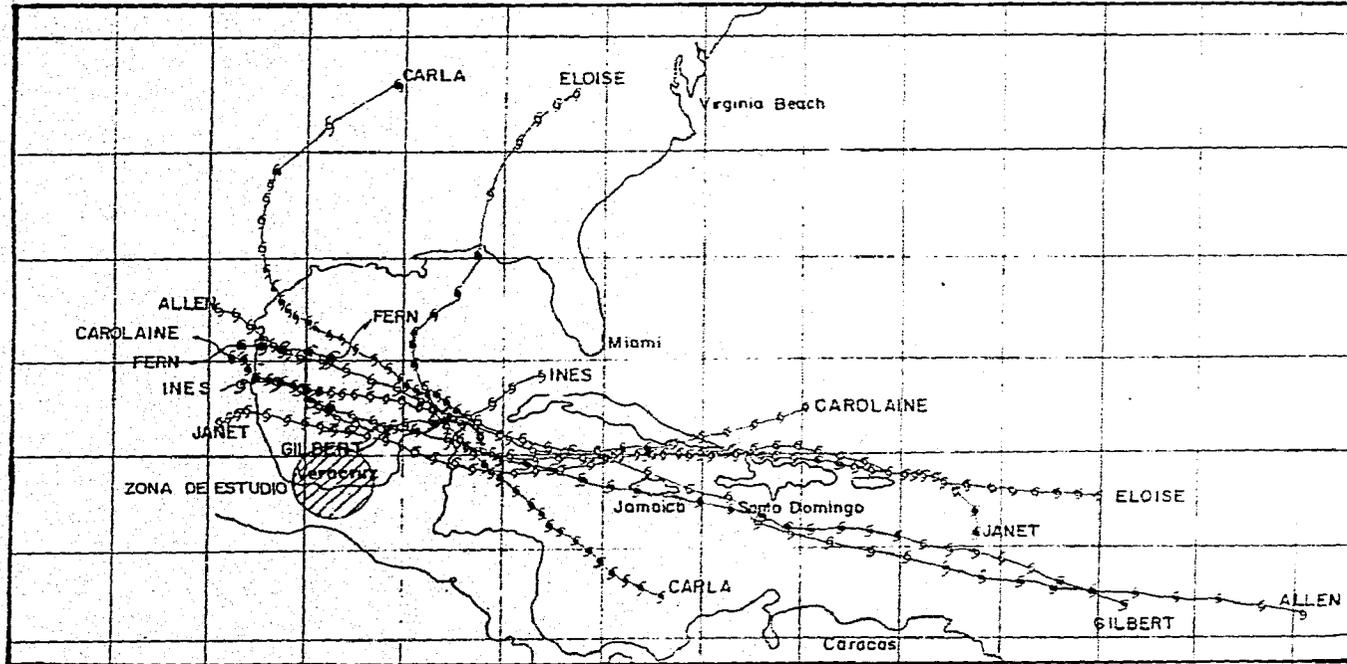
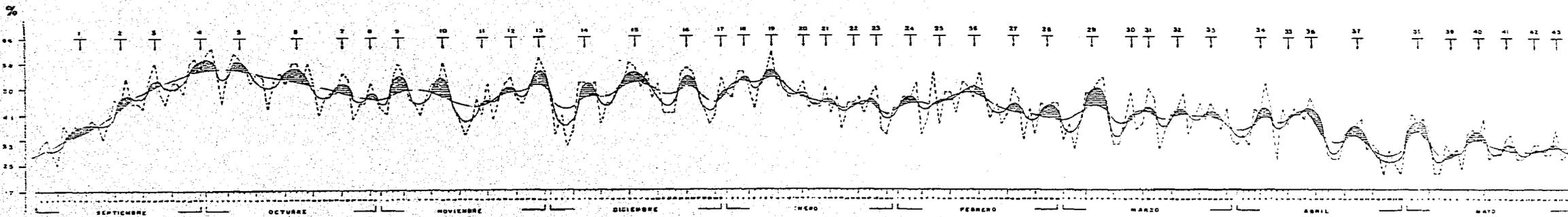


Fig. 5.2 Trayectorias de los ciclones que han afectado a la zona de estudio durante el periodo del 9 de septiembre de 1955 al 9 de octubre de 1985.

FRECUENCIA DE DIAS DE NORTES EN EL GOLFO DE MEXICO

SERIE 1925-1985

(MUESTRA VERACRUZ, VER.)



Centro de Estudios Científicos de Veracruz

T OLEADAS POLARES
 ■ Días de Nortés Marmoles
 □ Días Normales de Buen Tiempo

Resumen gráfico "Estudio Vientos del Norte con velocidades mayores de 33 km / hr Realizó: Ing. y Mar. Roberto Herrera Juárez. Sub-Jefe Centro Previsión del Golfo de México. FIG. 5.3

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA	
DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS MARÍTIMAS	
DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS MARÍTIMAS	
PERIODO DE 01/01/85	

CARACTERISTICAS DE LOS NORTES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Nortes con rachas de 4.1 a 12.0 m/s moderados a frescos con duración de 54 hrs.	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	2	3
Nortes con rachas de 12.1 a 18.0 m/s frescos a fuertes con duración de 48 a 54 hrs.	3	3	3	2	2	2	2	2	4	5	3	3
Nortes con vientos de 18.1 a 29.0 m/s fuertes a violentos con duración 36 a 48 hrs.	4	4	3	2	1	0.4	0.2	0.5	3	4	4	4
Nortes con vientos mayores de 29.0 m/s huracanados con duración 18 a 24 hrs.	1	1	1	0.5	1	0	0	0	0.2	0.3	1	1
Total de días en el mes con Nortes	11	11	9	6.5	6	4.4	4.4	4.5	10.2	12.3	10	11
Porcentaje de días en el mes con Nortes	35	38	29	19	15	14	15	15	34	39	33	35

FUENTE: Centro de Previsión del Golfo de México de la C.N.A.

Tabla 5.2 Número de Nortes que afectan mensualmente la zona de estudio.

Como información adicional a la presentada en la Fig. 5.3 y en la Tabla 5.2, en la zona de estudio los nortes se han presentado con las siguientes características:

- a) El Norte más fuerte fue registrado el 3 de marzo de 1971, presentando vientos en la dirección norte con velocidades de 70.2 m/s.
- b) Los vientos de las Tormentas conocidas como Nortes se presentan con mayor frecuencia del NW.
- c) El ciclón más fuerte registrado en el Puerto de Veracruz, Ver. es el "JANET", ocurrido el 29 de septiembre de 1955. Nacido en el caribe oriente, con gran recorrido y potencia; entró a tierra por Villa Rica y Palma Sola, presentando una presión mínima 991.1 mb y racha máxima en la dirección Oeste-Noroeste (WNW) con velocidad del viento de 49.8 m/s y precipitación de 148.5 mm.
- d) Por lo general de la segunda quincena de mayo a la primera quincena de septiembre de cada año, los vientos del Norte corresponden a actividad ciclónica tropical y no a oleadas polares como en el resto de los meses de cada año.

6. OLEAJE DE TORMENTA

En el Golfo de México se presentan esencialmente dos tipos de tormentas, los Nortes y los Ciclones. Los oleajes generados por estas perturbaciones meteorológicas, mejor conocidos como oleajes de tormenta, se determinarán en el desarrollo de éste capítulo, usando datos de los Nortes (velocidades de los vientos y duraciones) de acuerdo con la información recopilada al respecto, así como los datos de los ciclones que han pasado más cerca del sitio de estudio (trayectorias ciclónicas) y de los cuales se pudieron obtener cartas de las configuraciones isobaricas (cartas sinópticas del tiempo).

6.1 Oleaje producido por Nortes

Uno de los fenómenos que afectan periódicamente las costas de nuestro país, sobre todo en la región del Puerto de Veracruz, es el comúnmente conocido como " Norte " [1] .

Dado que este fenómeno tiene una frecuencia anual alta de ocurrencia, es imprescindible conocer las condiciones de oleaje que se originan durante la acción de dicho fenómeno.

Los vientos originados por los Nortes son de la misma intensidad a lo largo de su trayectoria, pero la fuerza con la que actúan varía de un lugar a otro considerablemente, debido en forma principal a la orografía, que determina el encañonamiento de aire [1].

6.1.1 Método de predicción de oleaje

Para la predicción del oleaje producido por los Nortes, se utilizó el método de Sverdrup-Munk-Bretschneider [4].

Para la aplicación del método antes mencionado, se utilizaron las duraciones y los valores mínimo, medio y máximo de las velocidades del viento de los Nortes, definidas en cada uno de los rangos indicados en la **Tabla 5.2**.

Los resultados obtenidos al aplicar el método de predicción de oleaje utilizado, se presentan en la **Tabla 6.1**

CONDICION	VELOCIDADES DEL VIENTO (m/s)	DURACION (hr)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (seg)
MINIMA	4.10	54	----	----
MEDIA	8.05	54	0.68	3.75
MAXIMA	12.00	54	1.30	4.70
MINIMA	12.10	48 A 54	0.68	4.70
MEDIA	15.05	48 A 54	1.60	5.50
MAXIMA	18.00	48 A 54	7.00	12.00
MINIMA	18.10	18 A 24	7.00	12.00
MEDIA	23.55	18 A 24	9.30	15.00
MAXIMA	> 29.00	18 A 24	13.20	17.50

Tabla 6.1 Alturas y períodos significantes del oleaje en aguas profundas originados por los nortes.

6.2 Oleaje producido por ciclones

6.2.1 Método de predicción de oleaje

La determinación de los oleajes producidos por ciclones se realizó utilizando el método reportado por Goto y Aono [10], el cual está basado en el modelo matemático para la distribución del campo de velocidades del viento en un huracán, elaborado por Meyer (1954).

El método utiliza las siguientes ecuaciones para la determinación de la historia en el tiempo de las alturas y períodos significantes del oleaje en aguas profundas.

$$F1 = A + B * S$$

Donde :

F1 ; Es la energía suministrada por el viento

A ; Es un coeficiente expresado como sigue:

$$A(\omega, U) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{3.54 \times 10^{-11} \cdot \omega^{5.25} \cdot U^{2.25}}{\left[\frac{1}{4} \left(\frac{\omega}{U} \right)^2 - (K \sin \theta)^2 \right] \left[\frac{1}{9} \left(\frac{\omega}{U} \right)^{2.5} + \left(k \cdot \cos \theta - \frac{\omega}{U} \right)^2 \right]} d\theta$$

B ; Es un coeficiente expresado como sigue:

$$B(\omega, U) = \left[5 + \exp \left\{ -7000 \left[\left(\frac{U^*}{C} \right) - 0.031 \right]^2 \right\} \right.$$

$$\left. + 2612 \left(\frac{U^*}{C} \right) \exp \left\{ -0.0004 \left(\frac{U^*}{C} \right)^2 \right\} \right] \frac{\omega}{2\pi}$$

ω ; Frecuencia angular definida como $\omega = 2\pi/f$
(f: frecuencia)

f ; Frecuencia definida como $f = 1/T$

U ; Velocidad del viento

T ; Periodo del oleaje

U* ; Velocidad friccional del viento

K ; Número de oleaje definido como $K = 2\pi/L$

L ; Longitud del oleaje

C ; Celeridad del oleaje definida como $C = gT/2\pi$;

Las velocidades U y U* del viento se relacionan como sigue:

$$U_* = 2.67 U + 3.15 \quad ; \text{ Cuando } U < 11.4 \text{ m/seg.}$$

$$U_* = 12.14 U - 105.9 \quad ; \text{ Cuando } U > 11.4 \text{ m/seg.}$$

ω y K se relacionan por las siguientes ecuaciones:

$$\omega^2 = gk \tanh kh$$

$$S_{pm}(f, U) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left\{ -\beta \left(\frac{g}{2\pi U f} \right)^4 \right\}$$

Donde :

$S_{pm}(f, U)$; Densidad de potencia del espectro frecuencial de Pierson - Moskowitz

g ; Aceleración de la gravedad

f ; Frecuencia de la componente del oleaje

U ; Velocidad del viento

α ; Coeficiente

β ; Coeficiente

En este trabajo, los coeficientes α y β tienen valores de 0.0081 y 0.74 respectivamente.

$$V = \sqrt{(rf_0 \operatorname{sen}\varphi)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{dp}{dx}} - rf_0 \operatorname{sen}\varphi$$

Donde:

r ; Radio de curvatura de la isobára, medido desde el centro del ciclón.

f_0 ; Velocidad angular de la rotación de la tierra, igual a $7.29 \times 10^{-5} \operatorname{seg}^{-1}$

φ ; Latitud del centro del ciclón

dp/dr ; Pendiente de la presión atmosférica

$$P = P_c + \Delta p e^{-r/r_0}$$

Donde :

- P ; Distribución de presión dentro del ciclón
- Δp ; Diferencia de presión atmosférica entre el centro y el exterior del ciclón
- r_0 ; Distancia entre el punto del viento máximo y el centro del ciclón
- P_c ; Presión del centro del ciclón

$$H_{1/3} = 2.83 \sqrt{2 + m_0} \approx 4.0 \sqrt{m_0}$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df = \int_{0.04}^{0.25} S(f) df + \int_{0.25}^{\infty} S(f) df$$

El período del oleaje significativo $T_{1/3}$, se calcula con el período promedio del oleaje \bar{T} , con las siguientes ecuaciones:

$$\bar{T} = \frac{m_0}{m_2} = \frac{\int_0^{\infty} S(f) df}{\int_0^{\infty} f^2 S(f) df}$$

$$T_{1/3} = 1.2 \bar{T}$$

Con el modelo de predicción de oleaje y con los datos de los ciclones ocurridos en el sitio de estudio, se obtuvieron las historias en el tiempo de las características del oleaje en la zona de aguas profundas que se presentan en las Tablas 6.2 a 6.9.

AÑO	MES	DIA	HORA	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (seg)	HD	WNS	WND
1955	9	28	6	0.16	7.28	83.0	12.8	105.9
1955	9	28	8	0.28	7.43	85.0	13.8	109.5
1955	9	28	10	0.40	7.69	82.0	14.7	114.1
1955	9	28	12	0.52	7.95	80.0	15.5	119.7
1955	9	28	14	0.69	8.44	81.0	18.8	121.1
1955	9	28	16	0.95	9.15	81.0	21.9	122.8
1955	9	28	18	1.31	9.93	82.0	24.8	124.7
1955	9	28	20	1.76	10.74	82.0	28.1	127.0
1955	9	28	22	2.29	11.59	81.0	31.2	129.6
1955	9	29	0	2.91	12.50	80.0	34.1	132.8
1955	9	29	2	3.54	13.17	79.0	36.5	137.3
1955	9	29	4	4.01	13.57	77.0	38.4	142.6
1955	9	29	6	4.35	13.75	75.0	39.7	148.7
1955	9	29	8	4.47	13.73	75.0	36.6	156.7
1955	9	29	10	4.35	13.32	75.0	20.3	176.0
1955	9	29	12	4.01	12.64	74.0	9.8	226.3
1955	9	29	14	3.58	11.89	73.0	8.6	209.3
1955	9	29	16	3.15	11.22	72.0	8.1	191.6
1955	9	29	18	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0

Tabla 6.2 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón JANET

AÑO	MES	DIA	HORA	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (seg)	HD	WNS	WND
1966	10	7	12	0.08	0.00	83.0	9.8	105.9
1966	10	7	14	0.15	6.31	85.0	10.6	109.5
1966	10	7	16	0.21	6.42	84.0	11.3	114.1
1966	10	7	18	0.28	6.66	82.0	11.9	119.1
1966	10	7	20	0.36	6.97	82.0	14.5	121.1
1966	10	7	22	0.51	7.64	84.0	16.8	122.8
1966	10	8	0	0.69	8.27	84.0	19.1	124.7
1966	10	8	2	0.95	9.00	84.0	21.6	127.0
1966	10	8	4	1.23	9.63	84.0	24.0	129.6
1966	10	8	6	1.55	10.29	83.0	26.2	132.8
1966	10	8	8	1.96	10.98	82.0	28.0	137.3
1966	10	8	10	2.36	11.60	80.0	29.6	142.6
1966	10	8	12	2.76	12.16	79.0	30.6	148.7
1966	10	8	14	3.00	12.44	77.0	28.1	156.7
1966	10	8	16	2.95	12.14	75.0	15.6	176.0
1966	10	8	18	2.74	11.54	74.0	7.5	226.3
1966	10	8	20	2.47	10.88	73.0	6.6	209.3
1966	10	8	22	2.20	10.36	72.0	6.3	191.6
1966	10	8	24	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0

Tabla 6.3 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón INES

AÑO	MES	DIA	HORA	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (seg)	HD	WNS	WND
1967	10	3	0	0.11	6.64	83.0	10.8	105.9
1967	10	3	2	0.19	6.69	85.0	11.7	109.5
1967	10	3	4	0.26	6.83	83.0	12.5	114.1
1967	10	3	6	0.34	7.08	81.0	13.1	119.7
1967	10	3	8	0.46	7.53	82.0	15.9	121.1
1967	10	3	10	0.64	8.20	83.0	18.5	122.8
1967	10	3	12	0.88	8.87	83.0	21.0	124.7
1967	10	3	14	1.19	9.59	83.0	23.8	127.0
1967	10	3	16	1.53	10.26	83.0	26.4	129.6
1967	10	3	18	1.96	11.05	82.0	28.8	132.8
1967	10	3	20	2.47	11.79	81.0	30.9	137.3
1967	10	3	22	2.96	12.46	79.0	32.5	142.6
1967	10	4	0	3.42	13.02	78.0	33.6	148.7
1967	10	4	2	3.65	13.21	77.0	31.0	156.7
1967	10	4	4	3.55	12.78	75.0	17.1	176.0
1967	10	4	6	3.25	12.07	74.0	8.3	226.3
1967	10	4	8	2.90	11.28	73.0	7.3	209.3
1967	10	4	10	2.56	10.67	72.0	6.9	191.6
1967	10	4	12	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0

Tabla 6.4 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón FERN

AÑO	MES	DIA	HORA	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (seg)	HD	WNS	WND
1961	9	8	6	0.00	0.00	97.0	4.9	138.0
1961	9	8	8	0.01	0.00	96.0	5.4	138.8
1961	9	8	10	0.02	0.00	96.0	5.8	139.8
1961	9	8	12	0.02	0.00	95.0	6.3	141.0
1961	9	8	14	0.04	0.00	96.0	7.9	141.0
1961	9	8	16	0.08	0.00	96.0	9.6	141.0
1961	9	8	18	0.13	6.49	91.0	11.5	141.1
1961	9	8	20	0.21	7.50	83.0	12.7	141.3
1961	9	8	22	0.32	8.66	72.0	12.4	141.6
1961	9	9	0	0.48	10.16	62.0	10.9	141.8
1961	9	9	2	0.70	11.87	55.0	11.6	144.6
1961	9	9	4	1.00	13.46	51.0	11.1	147.8
1961	9	9	6	1.34	14.71	48.0	8.8	151.8
1961	9	9	8	1.67	15.49	47.0	10.5	152.7
1961	9	9	10	1.95	15.81	46.0	11.9	153.8
1961	9	9	12	2.21	15.95	46.0	13.1	154.9
1961	9	9	14	2.45	16.00	46.0	14.1	156.0
1961	9	9	16	2.67	15.96	46.0	15.0	157.0
1961	9	9	18	2.87	15.85	47.0	15.6	158.0
1961	9	9	20	3.07	15.72	48.0	17.5	159.8
1961	9	9	22	3.28	15.64	49.0	18.0	161.5
1961	9	10	0	3.48	15.58	50.0	17.7	163.0
1961	9	10	2	3.66	15.58	52.0	13.3	164.6
1961	9	10	4	3.83	15.59	53.0	9.3	166.1
1961	9	10	6	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0

Tabla 6.5 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón CARLA

AÑO	MES	DIA	HORA	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (seg)	HD	WNS	WND
1975	8	29	0	0.49	13.81	107.0	42.7	166.6
1975	8	29	2	1.00	14.54	105.0	37.3	166.1
1975	8	29	4	1.41	15.00	104.0	32.5	165.1
1975	8	29	6	1.80	15.57	103.0	28.3	165.6
1975	8	29	8	2.19	16.07	101.0	24.9	165.1
1975	8	29	10	2.59	16.55	99.0	22.0	164.7
1975	8	29	12	2.98	16.90	96.0	19.4	164.3
1975	8	29	14	3.32	17.05	94.0	19.6	163.9
1975	8	29	16	3.59	16.98	92.0	19.7	164.0
1975	8	29	18	3.79	16.81	90.0	19.9	164.1
1975	8	29	20	3.94	16.57	89.0	20.5	164.3
1975	8	29	22	4.06	16.36	87.0	21.0	164.5
1975	8	30	0	4.17	16.19	86.0	21.6	164.8
1975	8	30	2	4.29	16.08	84.0	19.1	165.1
1975	8	30	4	4.43	16.04	83.0	16.8	165.4
1975	8	30	6	4.58	16.08	82.0	14.9	165.7
1975	8	30	8	4.72	16.13	80.0	13.6	166.0
1975	8	30	10	4.85	16.19	79.0	12.5	166.1
1975	8	30	12	4.95	16.24	78.0	11.4	166.2
1975	8	30	14	5.04	16.25	76.0	11.7	166.3
1975	8	30	16	5.09	16.24	75.0	11.9	168.3
1975	8	30	18	5.12	16.21	74.0	12.1	170.5
1975	8	30	20	5.15	16.23	73.0	12.1	172.9
1975	8	30	22	5.17	16.27	72.0	12.1	174.6
1975	8	31	0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0

Tabla 6.6 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón CAROLINE

AÑO	MES	DIA	HORA	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (seg)	HD	WNS	WND
1975	9	20	12	0.00	00.00	84.0	4.4	119.3
1975	9	20	14	0.09	00.00	81.0	10.7	117.0
1975	9	20	16	0.24	7.52	80.0	15.4	114.1
1975	9	20	18	0.43	8.38	78.0	17.1	110.4
1975	9	20	20	0.61	8.87	74.0	16.9	113.3
1975	9	20	22	0.76	9.53	65.0	13.0	115.9
1975	9	20	0	0.99	11.10	52.0	6.2	118.2
1975	9	21	2	1.28	12.70	42.0	7.3	117.8
1975	9	21	4	1.58	13.77	38.0	8.3	117.4
1975	9	21	6	1.82	14.24	35.0	9.2	116.9
1975	9	21	8	2.00	14.27	34.0	13.1	116.4
1975	9	21	10	2.12	14.03	34.0	15.9	115.7
1975	9	21	12	2.20	13.62	34.0	17.4	115.0
1975	9	21	14	2.28	13.34	35.0	16.3	119.7
1975	9	21	16	2.40	13.34	34.0	16.3	123.9
1975	9	21	18	2.59	13.55	34.0	15.1	127.8
1975	9	21	20	2.78	13.84	33.0	13.9	131.2
1975	9	21	22	2.93	13.96	33.0	12.6	134.3
1975	9	21	0	3.04	13.95	33.0	11.4	137.0
1975	9	22	2	3.11	13.99	33.0	10.2	141.1
1975	9	22	4	3.16	14.03	33.0	8.5	144.4
1975	9	22	6	3.19	14.07	32.0	7.0	147.1
1975	9	22	8	3.21	14.09	32.0	5.7	146.4
1975	9	22	10	3.22	14.07	32.0	5.2	145.8
1975	9	22	12	3.21	14.01	32.0	4.8	145.2
1975	9	22	14	3.19	13.91	32.0	4.4	145.6
1975	9	22	16	3.16	13.83	32.0	4.1	146.0
1975	9	22	18	3.14	13.77	32.0	3.9	146.3

1975	9	22	20	3.14	13.77	32.0	3.5	146.6
1975	9	22	22	3.16	13.84	33.0	3.2	146.6
1975	9	23	0	3.20	13.97	33.0	2.8	147.2
1975	9	23	2	3.25	14.13	33.0	2.5	147.8
1975	9	23	4	3.31	14.28	33.0	2.4	148.2
1975	9	23	6	3.36	14.42	33.0	2.4	148.2
1975	9	23	8	3.41	14.52	34.0	2.3	148.5
1975	9	23	10	3.45	14.62	34.0	2.1	148.5
1975	9	23	12	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0

Tabla 6.7 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón ELOISE

AÑO	MES	DIA	HORA	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (seg)	HD	WNS	WND
1980	8	4	12	0.00	0.00	0.0	0.90	104.8
1980	8	4	18	0.00	0.00	0.0	1.00	104.5
1980	8	4	20	0.00	0.00	0.0	0.90	104.9
1980	8	4	22	0.00	0.00	0.0	0.90	105.3
1980	8	5	00	0.00	0.00	0.0	0.80	105.8
1980	8	5	2	0.00	0.00	0.0	0.90	105.9
1980	8	5	4	0.00	0.00	0.0	1.00	106.0
1980	8	5	6	0.00	0.00	0.0	1.10	106.1
1980	8	5	8	0.00	0.00	0.0	1.20	106.2
1980	8	5	10	0.00	0.00	0.0	1.40	106.4
1980	8	5	12	0.00	0.00	0.0	1.50	106.5
1980	8	5	14	0.00	0.00	0.0	1.80	106.7
1980	8	5	16	0.00	0.00	0.0	1.80	107.0
1980	8	5	18	0.00	0.00	0.0	1.60	107.2
1980	8	5	20	0.00	0.00	23.0	1.20	108.5
1980	8	5	22	0.00	0.00	24.0	1.60	109.9
1980	8	6	00	0.00	0.00	26.0	2.20	111.3
1980	8	6	2	0.00	0.00	27.0	2.80	110.1
1980	8	6	4	0.00	0.00	25.0	2.80	108.7
1980	8	6	6	0.00	0.00	81.0	2.60	107.0
1980	8	6	8	0.00	0.00	80.0	2.40	109.5
1980	8	6	10	0.00	0.00	79.0	3.80	111.9
1980	8	6	12	0.00	0.00	72.0	4.70	114.3
1980	8	6	14	0.00	0.00	80.0	4.90	114.3
1980	8	6	16	0.00	0.00	80.0	10.20	114.7
1980	8	6	18	0.00	0.00	80.0	9.50	115.0
1980	8	6	20	0.00	0.00	80.0	3.20	116.1
1980	8	6	22	0.13	6.21	80.0	4.00	117.2

1980	8	7	00	0.13	6.31	78.0	4.90	118.3
1980	8	7	2	0.12	6.63	75.0	5.80	118.5
1980	8	7	4	0.13	7.03	69.0	11.50	118.7
1980	8	7	6	0.16	8.11	56.0	11.60	118.9
1980	8	7	8	0.27	9.80	46.0	5.90	119.8
1980	8	7	10	0.43	11.38	40.0	6.30	120.7
1980	8	7	12	0.58	12.96	35.0	6.50	121.7
1980	8	7	16	0.86	14.78	31.0	6.70	125.5
1980	8	7	18	1.01	15.19	30.0	6.50	127.5
1980	8	7	20	1.20	15.72	30.0	6.00	128.5
1980	8	7	22	1.41	16.28	30.0	7.10	129.5
1980	8	8	00	1.63	16.85	29.0	7.10	130.9
1980	8	8	2	1.84	17.05	29.0	7.10	131.4
1980	8	8	4	2.04	17.12	29.0	8.40	132.0
1980	8	8	6	2.23	17.11	28.0	9.90	132.6
1980	8	8	8	2.42	17.09	28.0	12.50	136.0
1980	8	8	10	2.63	17.10	29.0	14.20	136.0
1980	8	8	12	2.85	17.22	30.0	14.50	140.0
1980	8	8	14	3.11	17.33	31.0	14.00	144.6
1980	8	8	16	3.41	17.46	32.0	13.00	145.7
1980	8	8	18	3.74	17.62	33.0	11.60	146.7
1980	8	8	20	4.08	17.71	34.0	11.80	147.6
1980	8	8	22	4.36	17.77	34.0	11.70	150.9
1980	8	9	00	4.60	17.67	35.0	11.50	154.1
1980	8	9	2	4.76	17.50	35.0	12.40	157.0
1980	8	9	4	4.88	17.27	36.0	13.30	158.2
1980	8	9	6	4.99	17.02	36.0	14.20	159.4
1980	8	9	8	5.09	16.80	37.0	15.10	160.7
1980	8	9	10	5.19	16.62	38.0	16.00	162.2
1980	8	9	12	5.30	16.49	39.0	16.80	163.7
1980	8	9	14	5.41	16.40	40.0	15.60	165.3
1980	8	9	16	5.52	16.33	41.0	14.00	168.2
1980	8	9	18	5.63	16.33	42.0	12.10	171.0

1980	8	9	20	5.71	16.34	42.0	12.00	173.0
1980	8	9	22	5.76	16.32	42.0	11.80	174.5

Tabla 6.8 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón ALLEN

AÑO	MES	DIA	HORA	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (seg)	HD	WNS	WND
1985	10	9	12	0.00	0.00	0.0	0.90	104.8
1985	10	9	14	0.00	0.00	0.0	0.90	104.7
1985	10	9	16	0.00	0.00	0.0	1.00	104.6
1985	10	9	18	0.00	0.00	0.0	1.00	104.5
1985	10	9	20	0.00	0.00	0.0	0.90	104.9
1985	10	9	22	0.00	0.00	0.0	0.90	105.3
1985	10	10	00	0.00	0.00	0.0	0.80	105.8
1985	10	10	2	0.00	0.00	0.0	0.90	105.9
1985	10	10	4	0.00	0.00	0.0	1.00	106.0
1985	10	10	6	0.00	0.00	0.0	1.10	106.1
1985	10	10	8	0.00	0.00	0.0	1.20	106.2
1985	10	10	10	0.00	0.00	0.0	1.40	106.4
1985	10	10	12	0.00	0.00	0.0	1.50	106.5
1985	10	10	14	0.00	0.00	0.0	1.80	106.7
1985	10	10	16	0.00	0.00	0.0	1.80	107.0
1985	10	10	18	0.00	0.00	0.0	1.60	107.2
1985	10	10	20	0.00	0.00	23.0	1.20	108.5
1985	10	10	22	0.00	0.00	24.0	1.60	109.9
1985	10	11	00	0.00	0.00	26.0	2.20	111.3
1985	10	11	2	0.00	0.00	27.0	2.80	110.1
1985	10	11	4	0.00	0.00	25.0	2.80	108.7
1985	10	11	6	0.00	0.00	81.0	2.60	107.0
1985	10	11	8	0.00	0.00	80.0	2.40	109.5
1985	10	11	10	0.00	0.00	79.0	3.80	111.9
1985	10	11	12	0.00	0.00	72.0	4.70	114.3
1985	10	11	14	0.00	0.00	80.0	4.90	114.3
1985	10	11	16	0.00	0.00	80.0	10.20	114.7
1985	10	11	18	0.00	0.00	80.0	9.50	115.0
1985	10	11	20	0.00	0.00	80.0	3.20	116.1

1985	10	11	22	0.00	6.21	80.0	4.00	117.2
1985	10	12	00	0.00	6.31	78.0	4.90	118.3
1985	10	12	2	0.00	6.63	75.0	5.80	118.5
1985	10	12	4	0.00	7.03	69.0	11.50	118.7
1985	10	12	6	0.00	8.11	56.0	11.60	118.9
1985	10	12	8	0.00	9.80	46.0	5.90	119.8
1985	10	12	10	0.00	11.38	40.0	6.30	120.7
1985	10	12	12	0.00	12.96	35.0	6.50	121.7
1985	10	12	16	0.10	14.78	31.0	6.70	125.5
1985	10	12	18	0.19	15.19	30.0	6.50	127.5
1985	10	12	20	0.29	15.72	30.0	6.00	128.5
1985	10	12	22	0.44	16.28	30.0	7.10	129.5
1985	10	13	00	0.62	16.85	29.0	7.10	130.9
1985	10	13	2	0.89	17.05	29.0	7.10	131.4
1985	10	13	4	1.29	17.12	29.0	8.40	132.0
1985	10	13	6	1.69	17.11	28.0	9.90	132.6
1985	10	13	8	2.02	17.09	28.0	12.50	136.0
1985	10	13	10	2.27	17.10	29.0	14.20	136.0
1985	10	13	12	2.46	17.22	30.0	14.50	140.0
1985	10	13	14	2.62	17.33	31.0	14.00	144.6
1985	10	13	16	2.75	17.46	32.0	13.00	145.7
1985	10	13	18	2.86	17.62	33.0	11.60	146.7
1985	10	13	20	2.98	17.71	34.0	11.80	147.6
1985	10	13	22	3.11	17.77	34.0	11.70	150.9
1985	10	14	00	3.25	17.67	35.0	11.50	154.1
1985	10	14	2	3.41	17.50	35.0	12.40	157.0
1985	10	14	4	3.60	17.27	36.0	13.30	158.2
1985	10	14	6	3.82	17.02	36.0	14.20	159.4
1985	10	14	8	4.04	16.80	37.0	15.10	160.7
1985	10	14	10	4.28	16.62	38.0	16.00	162.2
1985	10	14	12	4.53	16.49	39.0	16.80	163.7
1985	10	14	14	4.78	16.40	40.0	15.60	165.3
1985	10	14	16	5.03	16.33	41.0	14.00	168.2

1985	10	14	18	5.31	16.33	42.0	12.10	171.0
1985	10	14	20	5.49	16.34	42.0	12.00	173.0
1985	10	14	22	5.68	13.32	43.0	22.90	143.1
1985	10	15	00	5.84	15.92	45.0	24.30	145.9
1985	10	15	2	5.94	15.83	48.0	25.70	148.8
1985	10	15	4	5.94	15.74	50.0	27.20	151.7
1985	10	15	6	0.00	15.70	52.0	28.50	154.7

Tabla 6.9 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón GILBERT

El significado de las variables incluidas en las tablas anteriores corresponden a lo siguiente:

HD : Dirección del oleaje (en grados)
WNS : Velocidad del viento (en kilómetros/Hora)
WND : Dirección del viento (en grados)

Tomando en consideración los resultados de las Tablas 6.2 a 6.9 ,para cada uno de los ciclones se seleccionaron los valores mínimos, medios y máximos de las alturas y períodos del oleaje significativo, los resultados obtenidos se indican en la Tabla 6.10.

Nombre del ciclón	Altura de ola Significante $H_{1/3}$ (m)			Período de ola Significante $T_{1/3}$ (seg)		
	Mínima	Media	Máxima	Mínimo	Medio	Máximo
JANET	0.16	2.25	4.47	7.28	11.59	13.75
INES	0.15	1.47	3.00	6.31	10.29	12.44
FERN	0.11	1.54	3.65	6.54	10.26	13.21
CARLA	0.13	1.80	3.83	6.49	15.49	15.59
CAROLINE	0.49	2.43	5.17	13.81	16.07	16.27
ELOISE	0.24	2.48	3.45	7.52	13.34	14.62
ALLEN	0.86	2.62	5.76	14.78	17.10	16.30
GILBERT	0.89	3.42	5.94	10.33	15.51	15.70

Tabla 6.10 Valores mínimos, medios y máximos de las alturas y períodos del oleaje significativo en aguas profundas producidos por los ciclones analizados

6.3 Altura de ola de diseño

Para normar el criterio de selección de la altura de ola de diseño en aguas profundas, resulta necesario construir una gráfica que represente la relación entre la altura de la ola probable de ocurrir y el período de retorno del evento. Para tal efecto, en este trabajo se utilizó el método desarrollado por Weibull, el cual se expresa con la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{1}{1-F(x)}$$

Donde:

$F(X)$; Función de distribución de la variable aleatoria X

En la Función de distribución de weibull, $F(X)$ se expresa como sigue:

$$F(X) = 1 - e^{-(x/a)^\beta}$$

X ; Altura de la ola para el período de retorno T_r

a ; Media μ de la función de densidad de Weibull, calculada con la siguiente ecuación:

$$\mu = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

β ; Parámetro de la función de densidad de Weibull, el cual se obtiene a partir del coeficiente de variación C_v expresado como sigue:

$$C_v = \sigma / \bar{X}$$

Γ ; Función gamma expresada por $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$

σ ; Desviación estándar expresada por $(s^2)^{1/2}$

s^2 ; Varianza expresada por $\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N-1}$

\bar{X} ; Media expresada por $\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$

Los valores medios y máximos de las alturas de ola en aguas profundas producidas por los ciclones y nortes analizados, se agruparon conforme a lo indicado en la Tabla 6.11 a fin de aplicar el método antes descrito.

Nombre de la perturbación	Altura de ola Significante $H_{1/3}$			Período de ola Significante $T_{1/3}$		
	Mínima	Media	Máxima	Mínimo	Medio	Máximo
JANET	0.16	2.25	4.47	7.28	11.59	13.75
INES	0.15	1.47	3.00	6.31	10.29	12.44
FERN	0.11	1.54	3.65	6.54	10.26	13.21
CARLA	0.13	1.80	3.83	6.49	15.49	15.59
CAROLINE	0.49	2.43	5.17	13.81	16.07	16.27
ELOISE	0.24	2.48	3.45	7.52	13.34	14.62
ALLEN	0.86	2.62	5.76	14.78	17.10	16.30
GILBERT	0.89	3.42	5.94	10.33	15.51	15.70
NORTE CON VELOCIDAD DE 15.05 m/s Y DURACION DE 48 A 54 hrs.	-	1.60	-	-	5.50	-
NORTE CON VELOCIDAD DE 18.0 m/s Y DURACION DE 48 A 54 hrs.	-	-	7.0	-	-	12.0
NORTE CON VELOCIDAD DE 23.55 m/s Y DURACION DE 18 A 24 hrs.	-	9.3	-	-	15.0	-
NORTE CON VELOCIDAD DE 29.0 m/s Y DURACION DE 18 A 24 hrs.	-	-	13.20	-	-	17.50

Tabla 6.11 Valores mínimos, medios y máximos de las alturas de ola significantes en aguas profundas, producidas por los ciclones y nortes analizados

Con los datos de los valores medios y máximos de las alturas de ola significativa presentados en la **Tabla 6.11**, se calculó el valor de las variables y parámetros utilizados en la distribución de weibull, los resultados obtenidos se indican en la **Tabla 6.12**

Concepto	Valores medios de las alturas de ola (m)	Valores máximos de las alturas de ola (m)
Media	3.03 m	5.53 m
Desviación estándar	2.28 m	2.82 m
Coefficiente de variación	Cv=0.750	Cv=0.509
Parámetro	$\beta=1.26$	$\beta=2.10$
Parámetro	$\alpha=3.26$	$\alpha=6.24$

Tabla 6.12 Resumen de las variables y parámetros utilizados en la distribución de Weibull

Los resultados del cálculo de los períodos de retorno asociados a las alturas de olas consideradas conforme a la distribución de weibull se presentan en la **Tabla 6.13**.

Período de retorno	Variable aleatoria media	Variable aleatoria máxima	Probabilidad de no excedencia
$T_r=1/1-F(x)$	$X_i(m)$	$X_i(m)$	$F(x)=1-1/T_r$
100	10.95	12.91	0.99
50	9.92	11.94	0.98
20	7.78	10.52	0.95
15	7.08	9.94	0.93
10	6.31	9.28	0.90
5	4.75	7.82	0.80

Tabla 6.13 Alturas de ola significantes probables de ocurrir en la zona de generación asociadas a diferentes períodos de retorno

En la **Fig. 6.1** se presenta la relación de las alturas de ola contra los períodos de retorno calculados con el método de Weibull.

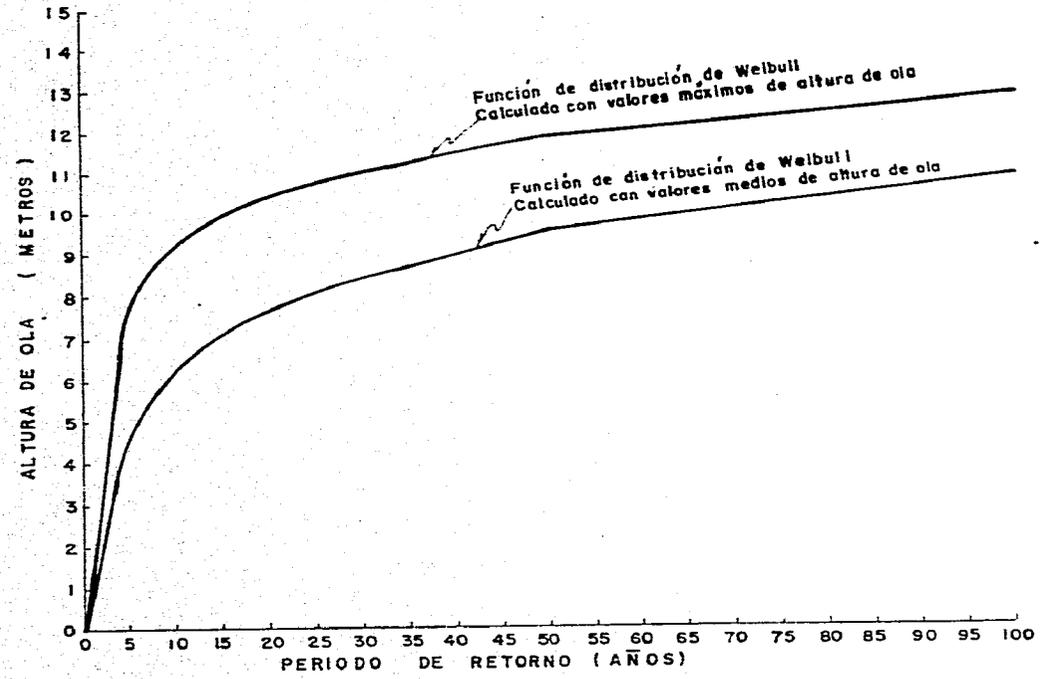


Fig. 6.1 Distribución de los valores medios y máximos de las alturas de ola significante contra el período de retorno en aguas profundas, calculadas con el método de weibull.

6.4 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta

La determinación del nivel máximo de ascenso del mar por marea de tormenta se realizó utilizando el criterio propuesto por Shore Protection Manual [4], el cual considera el siguiente proceso de cálculo:

(1) Ascenso de la ola S_w

El ascenso de la ola S_w , se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_w = 0.19 \left[1 - \left(H - \frac{b}{gT^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] H_b$$

Donde:

S_w ; Ascenso de la ola, en m.

H_b ; Altura de la ola rompiente, en m.

g ; Aceleración de la gravedad, en m/seg².

T ; Período del oleaje, en seg.

(2) Ascenso producido por la marea de viento

Al ascenso anterior se añade el ascenso producido por marea de viento, en la dirección del oleaje extraordinario.

El ascenso producido por marea de viento S_p , en pies, se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_p = S_1 * F_M$$

(3) Cálculo de $S_{pm\acute{a}x}$

El factor F_M se debe seleccionar de tal modo que resulte máximo, es decir con un ángulo ψ próximo a 90°, obteniéndose con dicho valor en la ecuación anterior el valor de $S_{pm\acute{a}x}$.

(4) Máximo nivel

Para determinar el máximo nivel de ascenso del mar, primeramente se compara el valor resultante de la suma de $S_p + S_w$ con $S_{pmá}$. Si el primero resulta mayor que el segundo, el máximo nivel de ascenso del mar se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta Z_T = Z_{MA} + (S_p + S_w)$$

En caso contrario, el máximo nivel de ascenso se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta Z_T = Z_{MA} + S_{pmáx}$$

Donde:

- Ψ ; Angulo de incidencia del oleaje en la costa
- $H_{1/3}$; Altura de ola significativa
- $T_{1/3}$; Periodo del oleaje significativo
- H_b ; Profundidad de desplante de la obra
- Z_{MA} ; Máxima semiamplitud de la marea astronómica
- ϕ ; Latitud de la zona de estudio
- S_T ; Valor determinado de la gráfica 3-57 del "Shore Protection Manual"
- F_H ; Valor determinado de la gráfica 3-60 del "Shore Protection Manual"
- S_p ; Ascenso producido por la marea de viento
- F_{MAX} ; Valor determinado de la gráfica 3-60 del "Shore Protection Manual"
- $S_{pmáx}$; Valor calculado con la fórmula expresada por:

$$S_{pmáx} = 0.3046 * F_{MAX} * S_T$$

- ΔZ_1 ; Nivel de ascenso del mar, en m
- ΔZ_2 ; Nivel de ascenso del mar, en m
- ΔZ_T ; Máximo nivel de ascenso del mar, en m

Considerando la importancia de la obra de protección que se pretende construir en la zona de estudio, para dicha estructura se seleccionó un período de retorno de 50 años, con lo cual se garantiza desde el punto de vista estadístico, que en 50 años en promedio, la ocurrencia de la altura de ola de diseño asociada con dicho período de retorno, puede ser igualada o excedida.

Para relacionar el período de retorno seleccionado ($T_r = 50$ años) con la altura de ola de diseño en aguas profundas para el rompeolas de proyecto, con ayuda de las distribuciones de weibull para los valores medios y máximos de alturas de ola significativa indicadas en la Fig. 6.1, se determinaron los valores de las alturas de ola significativa (media y máxima) para el período de retorno de 50 años, resultando alturas de ola de diseño en aguas profundas de 9.60 m (para la distribución de valores medios) y de 12.00 m (para la distribución de valores máximos).

Al aplicar la metodología presentada con anterioridad, con los valores de las alturas de ola de diseño en aguas profundas determinadas con ayuda de la Fig. 6.1, se calcularon las sobreelevaciones del nivel del mar por marea de tormenta, los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 6.14 y 6.15.

DIR.	H_o (m)	T_o (Seg)	d_o (m)	H_b (m)	ψ (°)	Lat. (°)	P_o (mb)	U M.N/h	ΔP (mb)	R M.N	SI ft.	F_w	S_p (m)
N	9.60	15	13	10.14	90	19	995.94	17.94	17.32	10.53	3.4	1.08	1.12
N30W	9.60	15	12.6	9.83	60	19	995.94	17.94	17.32	10.53	3.4	1.06	1.10
N45W	9.60	15	11.7	9.13	45	19	995.94	17.94	17.32	10.53	3.4	1.00	1.04

F_{MAX}	SP_{MAX}	ΔZ_1 (m)	ΔZ_2 (m)	ΔZ_c (m)
1.1	1.14	2.54	1.14	3.06
1.1	1.14	2.54	1.14	3.00
1.1	1.14	2.54	1.14	2.86

Sobreelevación total promedio $\overline{\Delta Z_c} = 2.97$

Tabla 6.14 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta en la zona de estudio, para la altura de ola en aguas profundas de 9.60 m (Tr=50 años)

DIR.	H _o (m)	T _o (Seg)	d _o (m)	H _b (m)	ψ (°)	Lat. (°)	P _o (mb)	U M.N/h	ΔP (mb)	R M.N	SI ft.	F _M	S _p (m)
N	12.0	17.5	16.70	13.03	90	19	995.94	19.62	17.32	10.53	3.4	1.11	1.14
N30W	12.0	17.5	15.90	12.40	60	19	995.94	19.62	17.32	10.53	3.4	1.11	1.14
N45W	12.0	17.5	12.90	10.06	45	19	995.94	19.62	17.32	10.53	3.4	1.07	1.11

F _{MAX}	SF _{MAX}	ΔZ ₁ (m)	ΔZ ₂ (m)	ΔZ _t (m)
1.12	1.16	2.93	1.16	3.45
1.12	1.16	2.86	1.16	3.38
1.12	1.16	2.56	1.16	3.08

Sobreelevación total promedio $\overline{\Delta Z_t} = 3.30m$

Fig. 6.15 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta en la zona de estudio, para la altura de ola en aguas profundas de 12.00 m (Tr=50 años)

7. MODELACION NUMERICA DE LA REFRACCION DEL OLEAJE

7.1 Método de cálculo

El cálculo de la distribución espacial de las alturas y direcciones del oleaje en cada nodo de la malla de discretización, se realizó mediante la técnica numérica desarrollada por Takayama para oleaje irregular, que utiliza la ecuación de equilibrio energético expresada como sigue [13]:

$$\frac{\partial(S C_g \cos \theta)}{\partial x} + \frac{\partial(S C_g \sin \theta)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial t} \left[S \left(\frac{C_g}{C} \right) \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] = -(e'_b + e'_f) S \quad (7.1)$$

Donde:

- S ; Energía del oleaje.
- C_g ; Celeridad de grupo.
- C ; Celeridad del oleaje.
- X ; Eje coordenado perpendicular a la línea de costa.
- Y ; Eje coordenado paralelo a la línea de costa.
- e'_b ; Coeficiente de pérdida de energía del oleaje por rompiente.
- e'_f ; Coeficiente de pérdida de energía del oleaje por fricción del fondo.

Si la energía de cada componente del oleaje se define como D_n ,

$$\frac{\partial(D_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(D_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(D_\theta V_\theta)}{\partial \theta} = -(\epsilon'_b + \epsilon'_t) D_s \quad (7.2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D_s &= S \delta f \delta \theta \\ V_x &= C_g \cos \theta \\ V_y &= C_g \sin \theta \\ V_\theta &= \left(\frac{C_g}{C}\right) \left\{ \sin \theta \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right) - \cos \theta \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right) \right\} \end{aligned} \quad (7.3)$$

Donde δf es el ancho del intervalo en el que se divide el eje de las frecuencias del espectro frecuencial y $\delta \theta$ es el ancho del intervalo en el que se divide el eje de las componentes de la dirección del oleaje del espectro direccional.

La energía total del oleaje "S" se expresa como sigue:

$$S = \sum_{f=f_{\min}}^{f_{\max}} \sum_{\theta=\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} S(f) \cdot G(\theta; f) \delta \theta \delta f \quad (7.4)$$

La energía total del oleaje expresada en la ecuación anterior, se calcula con los espectros frecuencial y direccional de Bretschneider-Mitsuyatsu respectivamente, expresados mediante las siguientes ecuaciones:

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 (T_{1/3} f)^{-5} \exp(-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}) \quad (7.5)$$

$$G(\theta; f) = \left[\int_{-\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \theta}{2}\right)}^{\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \theta}{2}\right)} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2}\right) d\theta \right]^{-1} \quad (7.6)$$

Donde:

- $S(f)$; Función de densidad del espectro frecuencial.
- $G(\theta; f)$; Función de distribución direccional de la energía del oleaje del espectro direccional.
- $H_{1/3}$; Altura de ola significativa en cm.
- $T_{1/3}$; Periodo de ola significativa en seg.
- f ; $\frac{1}{T}$; frecuencia de ola en seg^{-1} .
- S ; $S_{\text{max}} \cdot (f/f_p)^5$; cuando $f \leq f_p$
- S ; $S_{\text{max}} \cdot (f/f_p)^{-2.5}$; cuando $f > f_p$
- f_p ; $1/(1.05 T_{1/3})$
- f_p ; Frecuencia pico del espectro frecuencial
- T ; Periodo del oleaje

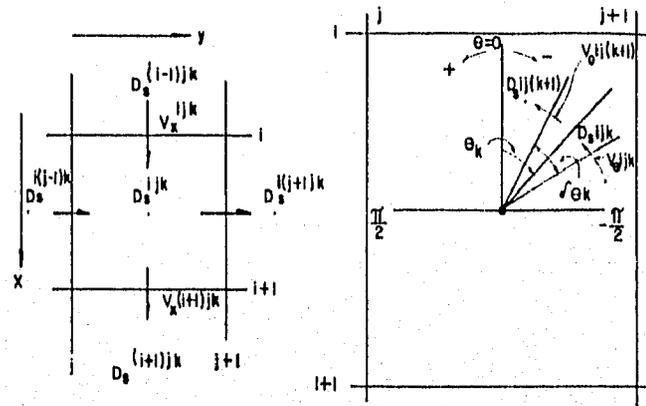


Fig. 7.1 Sistema coordinado y arreglo de variables

Si se define el sistema coordinado indicado en la Fig. 7.1, y se consideran las variables indicadas en la misma figura, la ec. (7.2) se expresa como sigue:

$$\frac{D_s^{ijk} V_x^{(i+1)jk} - D_s^{(i-1)jk} V_x^{ijk}}{\Delta x} + \frac{D_s^{ijk} V_y^{i(j+1)k} - D_s^{i(j-1)k} V_y^{ijk}}{\Delta y} + \frac{D_s^{ijk} V_0^{i(k+1)} - D_s^{i(k-1)} V_0^{ijk}}{\Delta \theta_k} = -(\epsilon'_1 + \epsilon'_2) D_s^{ijk}$$

Al hacer operaciones y simplificando la ecuación anterior resulta:

$$\therefore A_1 D_s^{ijk} + A_2 D_s^{i(j-1)k} + A_3 D_s^{i(j+1)k} + A_4 D_s^{ij(k-1)} + A_5 D_s^{ij(k+1)} = -B D_s^{i(j-1)jk} \quad (7.8)$$

Si el oleaje se dirige siempre hacia la costa, V_x es siempre mayor que cero, y los coeficientes de la ec. (7.5) se expresan como sigue:

$$A_1 = \frac{V_x^{i(j+1)jk}}{\delta x} + \epsilon_b^{ij} \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_y^{i(j+1)k}}{\delta y} \dots \dots \text{(cuando } V_y > 0) \\ -\frac{V_y^{ijk}}{\delta y} \dots \dots \text{(cuando } V_y < 0) \end{array} \right.$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_0^{ij(k+1)}}{\delta \theta_k} \quad ; \text{ cuando } (V_0^{ijk} \geq 0) \\ 0 \quad ; \text{ cuando } (V_0^{ijk} \geq 0, V_0^{ij(k+1)} < 0) \\ \frac{(V_0^{ij(k+1)} - V_0^{ijk})}{\delta \theta_k} \quad ; \text{ cuando } (V_0^{ijk} < 0, V_0^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -\frac{V_0^{ijk}}{\delta \theta_k} \quad ; \text{ cuando } (V_0^{ijk} < 0, V_0^{ij(k+1)} < 0) \end{array} \right. \quad (7.9)$$

$$A_2 = \begin{cases} -\frac{v_y^{ijk}}{\delta y} & (v_y \geq 0) \\ 0 & (v_y < 0) \end{cases} \quad (7.10)$$

$$A_3 = \begin{cases} 0 & (v_y \geq 0) \\ \frac{v_y^{i(j+1)k}}{\delta y} & (v_y < 0) \end{cases} \quad (7.11)$$

$$A_4 = \begin{cases} -\frac{v_0^{ijk}}{\delta \theta_k} & (v_0^{ijk} \geq 0) \\ 0 & (v_0^{ijk} < 0, v_0^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_0^{ijk} < 0, v_0^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (7.12)$$

$$A_5 = \begin{cases} 0 & (v_0^{ijk} \geq 0) \\ 0 & (v_0^{ijk} < 0, v_0^{ij(k+1)} \geq 0) \\ \frac{v_0^{ij(k+1)}}{\delta \theta_k} & (v_0^{ijk} < 0, v_0^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (7.13)$$

$$B = -\frac{v_x^{ijk}}{\delta x} \quad (7.14)$$

Si las coordenadas en la dirección y , γ del ángulo k varían de 1 a j y de 1 a k respectivamente, para calcular los espectros sobre alguna coordenada de x , para cada frecuencia habrá que resolver las ecuaciones resultantes con $j * k$ variables incógnitas. Por lo tanto, si el espectro frecuencial se divide en n frecuencias, γ las coordenadas en la dirección x , varían de 1 a i , dichas ecuaciones tendrán que resolverse $n * i$ veces.

El coeficiente de pérdida de energía por rompiente se calcula suponiendo que la distribución de las alturas de ola corresponde con la distribución de Rayleigh en la rompiente.

Si las alturas de ola rompientes en la entrada y en la salida de cada cuadro de la malla de discretización se definen por H_{o1} y H_{o2} respectivamente, de conformidad con la Fig. 7.2, la pérdida de energía en la rompiente E_b , expresada como la relación de la energía del oleaje que sale por un cuadro de la malla respecto a la energía del oleaje que entra por dicho cuadro se calcula con la siguiente ecuación:

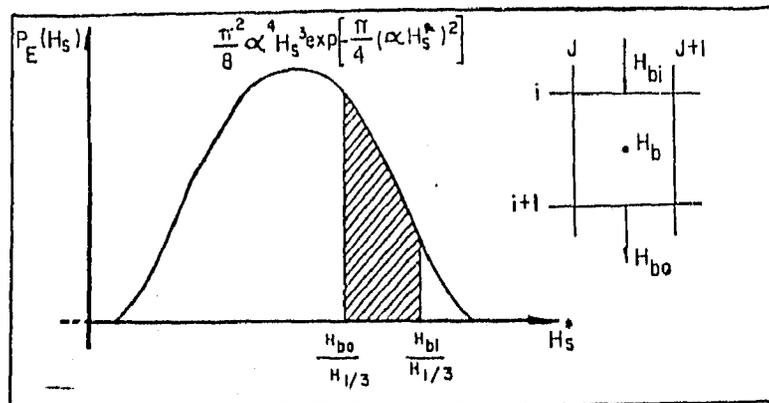


Fig. 7.2 Distribución de Rayleigh en la rompiente y su relación con las alturas de olas que entran y salen en un cuadro de la malla de discretización.

$$E_b = 1 - \frac{1 - \left[1 + \frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{bo}}{H_{1/3}}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{bo}}{H_{1/3}}\right)^2\right]}{1 - \left[1 + \frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{bi}}{H_{1/3}}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{bo}}{H_{1/3}}\right)^2\right]} \quad (7.15)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{H_{1/3}}{\bar{H}}$$

$H_{1/3}$; Altura de ola significativa, en m.

\bar{H} ; Altura de ola media, en m.

El cálculo de H_{bl} y H_{bo} se realiza con la fórmula de Goda expresada como sigue:

$$H_b = A L_o \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi H}{L_o} (1 + 15 \beta^{4/3}) \right] \right\}; \text{ cuando } \beta \geq 0 \quad (7.16)$$

$$H_b = A L_o \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi H}{L_o} \right] \right\}; \text{ cuando } \beta < 0 \quad (7.17)$$

Donde L_o es la longitud del oleaje en aguas profundas, H la Profundidad promedio, A es un coeficiente igual a 0.17 (según Goda) y β es la pendiente del fondo del mar que se calcula con la siguiente fórmula:

$$\beta = \beta_x \cos \bar{\theta} + \beta_y \operatorname{sen} \bar{\theta}$$

Donde β_x es la pendiente del fondo del mar en la dirección x , β_y es la pendiente del fondo del mar en la dirección y , $\bar{\theta}$ es la dirección promedio del oleaje.

En el cálculo numérico, el coeficiente de pérdida de energía del oleaje por rompiente (por unidad de tiempo) se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$e_b' = E_b C / \sqrt{\Delta X \Delta Y} \quad (7.18)$$

Donde:

- C ; Celeridad del oleaje, en m/s .
- ΔX ; Abertura de la malla en la dirección x , en m .
- ΔY ; Abertura de la malla en la dirección y , en m .

El efecto de la disipación gradual del oleaje debido a los efectos viscosos del fluido es despreciable en aguas profundas, no siendo así en la zona de aguas someras, donde una parte de la energía del oleaje se transforma en calor debido a la fricción del fondo, este efecto se considera en el modelo numérico mediante el tratamiento de Bretschneider quien definiendo dos secciones 1 y 2 separadas una distancia ΔX , y considerando una profundidad uniforme (ver Fig. 7.3) encontró la siguiente ecuación para calcular la pérdida de energía del oleaje por la fricción del fondo :

(7.19)

$$K_f = \frac{1}{PFR} = \frac{H_2}{H_1} = \left[1 + \frac{64}{2} \frac{\pi^3}{g^2} \frac{f H_1 \Delta X}{h^2} \left(\frac{h}{T^2} \right) \frac{\kappa g^2}{8 \sinh^3(2\pi h/L)} \right]^{-1}$$

Donde:

- K_f ; Pérdida de energía del oleaje por la fricción del fondo.
- H_2 ; Altura de ola en la sección 2, en m.
- H_1 ; Altura de ola en la sección 1, en m.
- g ; Aceleración de la gravedad, en m/s^2 .
- ΔX ; Distancia entre las secciones 1 y 2, en m.
- h ; Profundidad promedio entre las secciones 1 y 2, en m.
- L ; Longitud del oleaje, en m.
- T ; Período del oleaje, en seg.
- f ; Factor de fricción del fondo del mar, cuyo valor estándar varía de 0.01 a 0.02 para un fondo cubierto con una capa permeable de sedimentos con espesor mayor de 0.3 veces la longitud de la ola (Horikawa).

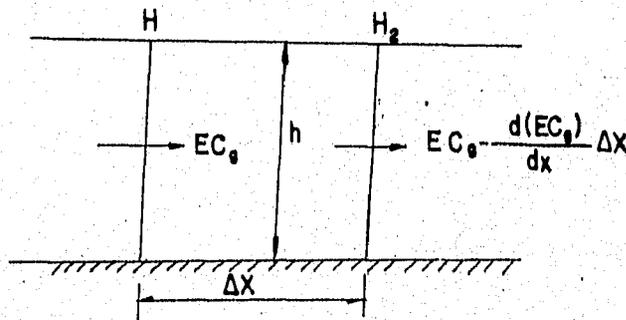


Fig. 7.3 Disipación de la energía del oleaje por la fricción del fondo.

En la figura anterior, E es la energía total del oleaje y C_g es la celeridad de grupo del oleaje, el resto de las variables indicadas ya fueron definidas con anterioridad.

Si la ec. (7.19) se escribe como sigue:

$$H_2 = \frac{H_1}{PFR} \quad (7.20)$$

La pérdida de energía por fricción del fondo, expresada como la relación de la diferencia de las energías del oleaje en las secciones 1 y 2 respecto a la energía de la sección 1, se expresa como sigue:

$$E_f = \frac{H_1^2 - H_2^2}{H_1^2} = \frac{(H_1)^2 - \left(\frac{H_1}{PFR}\right)^2}{(H_1)^2} = 1 - \frac{1}{(PFR)^2} \quad (7.21)$$

En el cálculo numérico, el coeficiente de pérdida de energía del oleaje debido al efecto de la fricción del fondo (por unidad de tiempo) se realiza con la siguiente ecuación:

$$E_f' = \frac{E_f C}{\sqrt{\Delta X \Delta Y}} \quad (7.22)$$

Después de haberse calculado los valores de D_{ca}^{ijk} , $H_{1/3}$, $H_{\text{máx}}$, $T_{1/3}$ y de la dirección del oleaje θ , las características del oleaje en el centro de cada cuadro de la malla, se calculan con las siguientes ecuaciones, utilizando los valores de la energía del oleaje previamente calculados:

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 4.0 \sqrt{M_0} \\ H_{\text{máx}} &= \min(h_D, 1.8 H_{1/3}) \\ T_{1/3} &= T_{0,1/3} \cdot (T/T_0) \quad ; \quad \text{con } T = \sqrt{M_0/M_2} \\ \theta &= \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \theta_k D_{\text{ca}}^{ijk} / M_0 \end{aligned}$$

Donde:

$$M_0 = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N D_{nn}^{ijk}$$

$T_{0,1/3}$; Período significativo del oleaje en aguas profundas.

$$M_2 = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N f n^2 D_{nn}^{ijk}$$

\bar{T}_0 ; Período del oleaje en aguas profundas.

$\min\{a,b\}$: a ; cuando $\leq b$
: b ; cuando $\geq b$

El cálculo numérico de la refracción se realizó utilizando las ecuaciones antes descritas como sigue:

- a) Para el cálculo de la distribución espacial de las alturas y direcciones del oleaje en cada nodo se utiliza la ec. (7.1).
- b) La energía de cada componente del oleaje D , se obtiene con la ec. (7.2).
- c) La energía total del oleaje se calcula con la ec. (7.4).
- d) El cálculo de los espectros frecuencial y direccional se calculan con las ecs. (7.5) y (7.6), respectivamente.
- e) Al considerar las variables indicadas en la Fig. (7.1), de la ec. (7.2) se obtiene la ec. (7.8), que es con la que se realiza el cálculo de la energía del oleaje.
- f) El coeficiente de pérdida de energía por rompiente E_0 , se calcula suponiendo que la distribución de las alturas de ola corresponden con la distribución de Rayleigh y por la ec. (7.15).
- g) El cálculo numérico del coeficiente de pérdida de energía del oleaje debido al efecto de fricción se realiza con la ec. (7.21).
- h) Con los valores de D_{nn}^{ijk} , $H_{1/3}$, $H_{máx}$, $T_{1/3}$ y θ , las características del oleaje en el centro de cada celda de la malla, se calculan las ecuaciones presentadas en la página 50 de este capítulo.

- i) Cabe mencionar que, si las coordenadas en la dirección Y y del ángulo K varían de 1 a J y de 1 a K respectivamente, para calcular los espectros sobre alguna coordenada de X , para cada frecuencia habrá que resolver las ecuaciones resultantes con $J * K$ variables incógnitas. Por lo tanto, si el espectro frecuencial se divide en N frecuencias, y las coordenadas en la dirección X , varían de 1 a I , dichas ecuaciones tendrán que resolverse $N * I$ veces.

7.2 Modelación Matemática

7.2.1 Mallas de discretización de profundidades

El cálculo numérico de la distribución espacial de las alturas y direcciones del oleaje (refracción de oleaje) para la zona de estudio, se realizó tomando en consideración 3 mallas de discretización de profundidades, la primera malla con una abertura de 5000 m por lado, iniciándose desde la profundidad de 1200 m, la segunda malla con una abertura de 2500 m por lado y la tercer malla con una abertura de 200 m por lado. La disposición de las mallas de discretización utilizadas en el modelo numérico de refracción de oleaje se muestran en la figs. 7.4 y 7.5.

Cabe mencionar que las profundidades de las primeras dos mallas de discretización se refirieron al Nivel de Bajamar Medio (N.B.M), toda vez que las profundidades de la tercer malla, estaban referidas a dicho nivel de acuerdo con la información batimétrica proporcionada por la A.P.I de Veracruz.

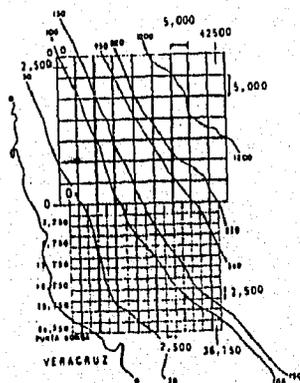
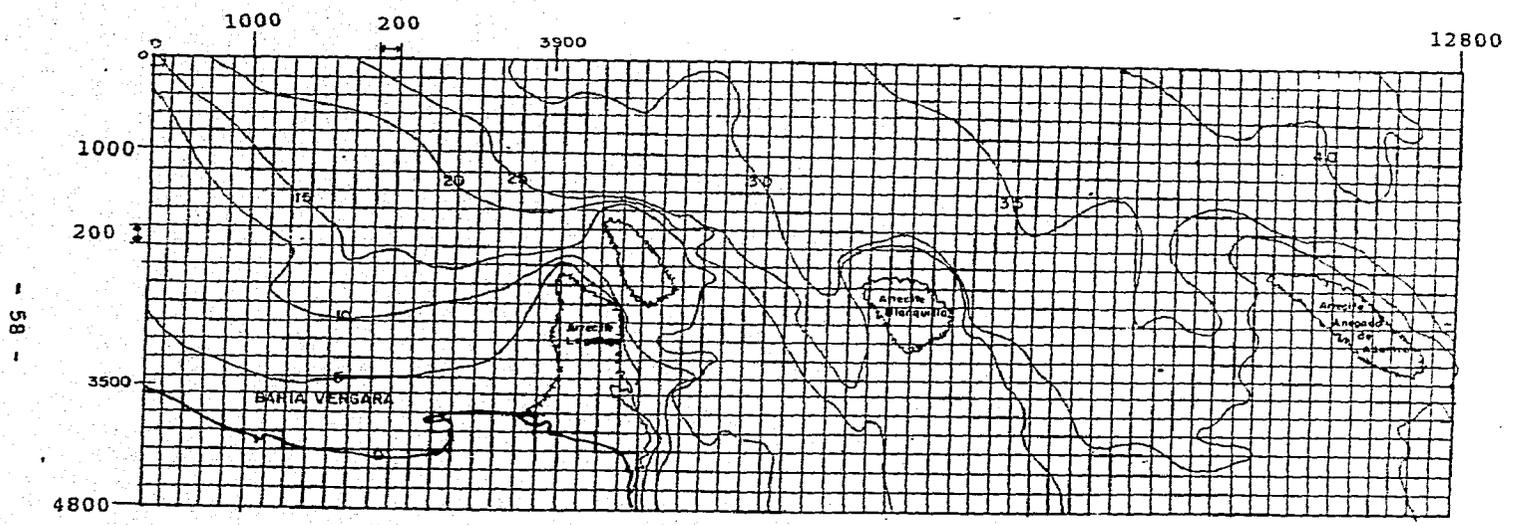


Fig. 7.4 Disposición de la primera y segunda malla de discretización para el cálculo de la refracción del oleaje.



- 58 -

Fig. 7.5 Disposición de la tercer malla de discretización para el cálculo de la refracción del oleaje

7.2.2 Condiciones de la modelación

Tomando en consideración la importancia del rompeolas de protección, para realizar la refracción de oleaje, se seleccionó la sobreelevación promedio total del nivel del mar por marea de tormenta de + 3.30 m referida al N.B.M., en estas circunstancias, la modelación matemática de la refracción del oleaje de la zona de aguas profundas a la zona de estudio, se realizó con las condiciones del oleaje ciclónico y niveles del mar indicados en la Tabla 7.1 y 7.2

DIRECCIONES DEL OLEAJE	ALTURA DE OLA EN AGUAS PROFUNDAS. (m)	PERIODO DE OLA EN AGUAS PROFUNDAS. (seg)	NIVEL DEL MAR RESPECTO AL N.B.M. (m)
NORTE	9.60	15.00	+3.30
NORTE	12.00	17.50	+3.30
N 30° W	9.60	15.00	+3.30
N 30° W	12.00	17.50	+3.30
N 45° W	9.60	15.00	+3.30
N 45° W	12.00	17.50	+3.30

Tabla 7.1 Condiciones para la modelación matemática de la refracción en aguas profundas

DIRECCIONES DEL OLEAJE	ALTURA DE OLA EN AGUAS REDUCIDAS. (m)	PERIODO DE OLA EN AGUAS REDUCIDAS. (seg)	NIVEL DEL MAR RESPECTO AL N.B.M. (m)
NORTE	7.16	15.00	+3.30
NORTE	8.57	17.50	+3.30
N 30° W	6.54	15.00	+3.30
N 30° W	7.70	17.50	+3.30
N 45° W	6.41	15.00	+3.30
N 45° W	7.55	17.50	+3.30

Tabla 7.2 Condiciones para la modelación matemática de la refracción en aguas reducidas

Cabe señalar que las direcciones del oleaje utilizadas para el cálculo numérico de la refracción del oleaje, las cuales se indicaron en las tablas anteriores, se definieron conforme a la información proporcionada por el Centro de Previsión del Golfo de México de la Comisión Nacional del Agua, en la cual se reporta que las perturbaciones meteorológicas conocidas como Nortes, inciden en la zona de estudio con mayor frecuencia en las direcciones de Norte a Noroeste.

Tomando en consideración las condiciones del oleaje y nivel del mar señalados en las **Tablas 7.1** y **Tabla 7.2**, así como las profundidades de las tres mallas de discretización señaladas en el inciso 7.2, se realizó desde la zona de aguas profundas y hasta la zona de estudio el cálculo numérico de la refracción del oleaje [9], obteniéndose los siguientes resultados.

7.2.3 Resultados

Los resultados abarcan las alturas y direcciones del oleaje en el centro de los cuadros de las tres mallas de cálculo definidas con anterioridad. Con la finalidad de visualizar los resultados obtenidos, la distribución espacial del oleaje se representó mediante los vectores oleaje, definiendo las magnitudes y las direcciones de dichos vectores, con los valores de las alturas y direcciones del oleaje obtenidas en la simulación numérica respectivamente.

Considerando lo anterior, en las **Figs. 7.6 a 7.11** se muestran las distribuciones espaciales del oleaje representados con los vectores oleaje obtenidos en las tres mallas de cálculo con las condiciones de oleaje y nivel de mar señalados en las **Tablas 7.1 y 7.2**

Para mayor claridad en la interpretación de los resultados obtenidos, se amplió la escala de la tercer malla de cálculo, la cual abarca la zona de estudio. En las **Figs. 7.12 a 7.17** se indican las distribuciones espaciales del oleaje de la tercer malla de cálculo obtenidas para las condiciones del oleaje incidente señaladas con anticipación.

En forma complementaria a lo antes señalado, se determinaron las distribuciones en planta de las alturas de ola refractadas en la zona de estudio. En las **Figs. 7.18 a 7.29** se muestran los resultados obtenidos al interpolar los valores de las alturas de ola de la tercer malla.

Con el fin de determinar los oleajes incidentes en la tercer malla, se seleccionaron a lo largo de la coordenada $X=28,750$ el valor de las alturas y direcciones del oleaje en las dos primeras mallas, los valores correspondientes se presentan en las tablas 7.3, 7.4 y 7.5

Para realizar el cálculo numérico de la Refracción del Oleaje de la tercer malla, se determinaron los promedios de las alturas y direcciones del oleaje para cada una de las condiciones de oleaje realizadas en las dos primeras mallas, los resultados obtenidos se indicaron en las tablas 7.3 a 7.5.

Por lo que corresponde a la Refracción del Oleaje para la tercer malla, en las tablas 7.6 a la 7.11, se presentan los resultados de las alturas de ola a lo largo de la coordenada $X=3,500$, así como los valores promedio de las alturas de ola en cada una de las direcciones analizadas.

De conformidad con los resultados, se observa que la zona en donde se tiene proyectado construir el rompeolas de protección, es factible dividirla en tres tramos, en los cuales se observa que en el segundo tramo, las condiciones de oleaje son más desfavorables que en los otros tramos.

Por lo que corresponde al valor de las alturas de ola, se observa que para la dirección Norte y $T = 17.50$ seg., se presentan las condiciones más desfavorables, teniéndose en promedio alturas de ola de 4.62 m, 5.00 m y 3.96 m para el primero, segundo y tercer tramo respectivamente.

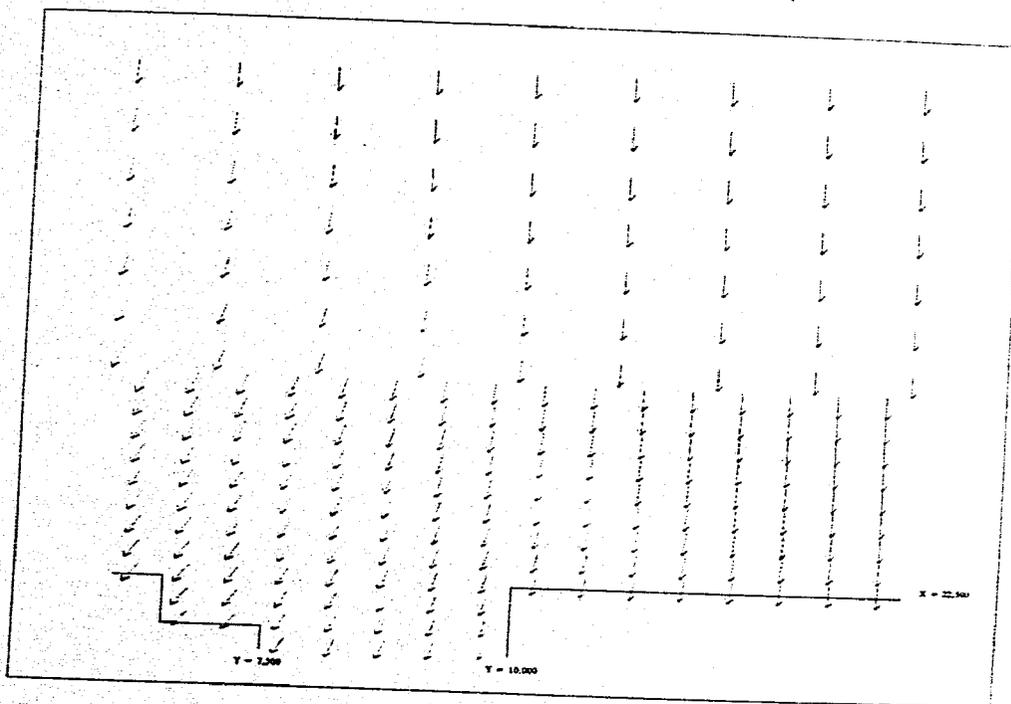


Fig. 7.6 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la primera y segunda malla de cálculo para la dirección NORTE , $T=15$ seg y $H_s=9.60$

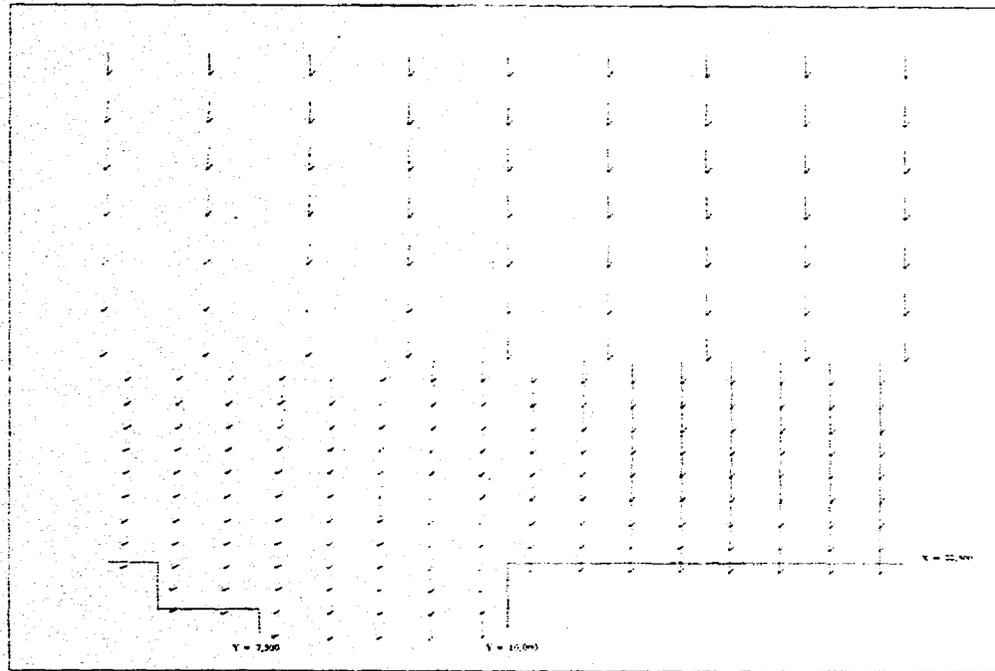


Fig. 7.7 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la primera y segunda malla de cálculo para la dirección NORTE, $T=17.5$ seg y $H_s=12.00$ m

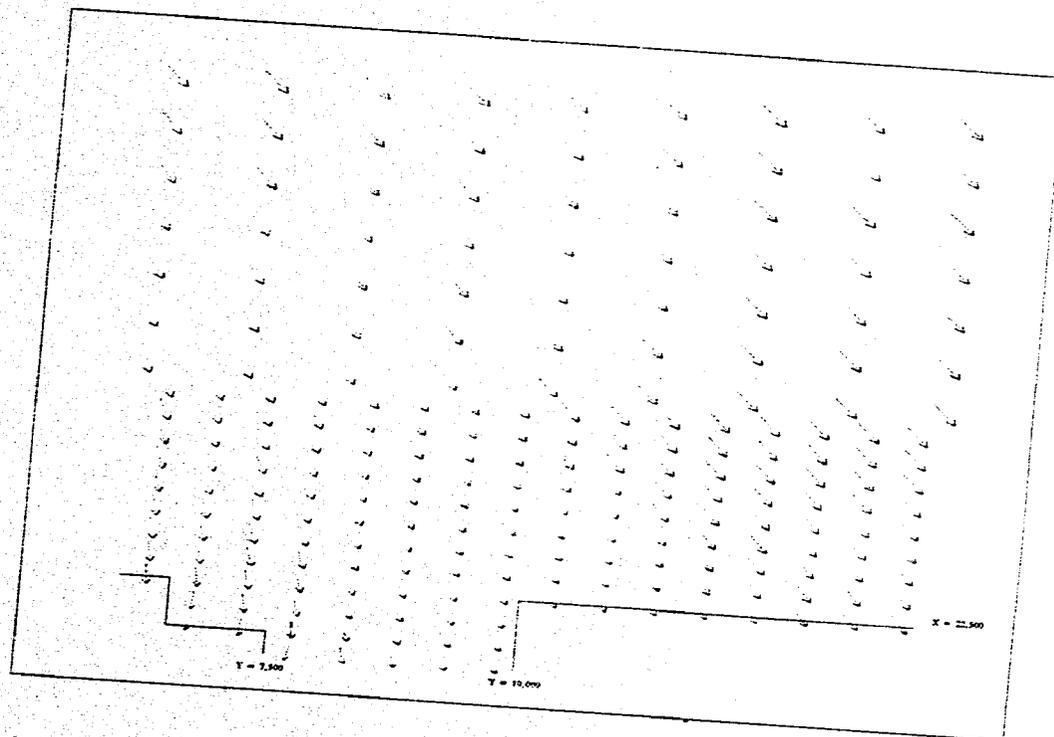


Fig. 7.8 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en las primera y segunda malla de cálculo para la dirección N 30° W, T=15 seg y H_s=9.60 m

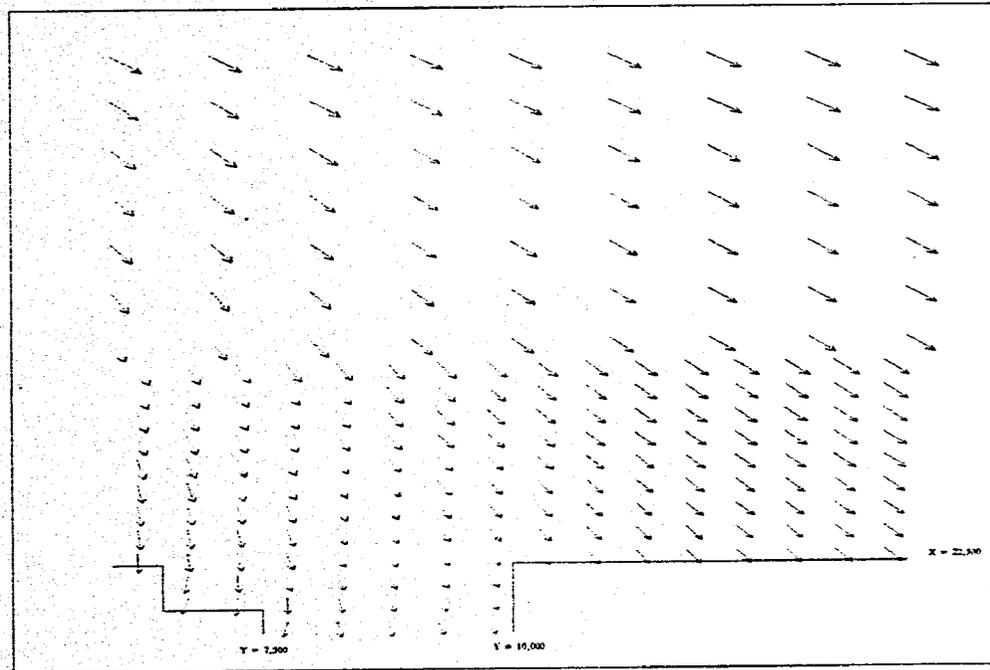


Fig. 7.9 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la primera y segunda malla de cálculo para la dirección N 30° W, T=17.5 seg y $H_s=12.00$ m

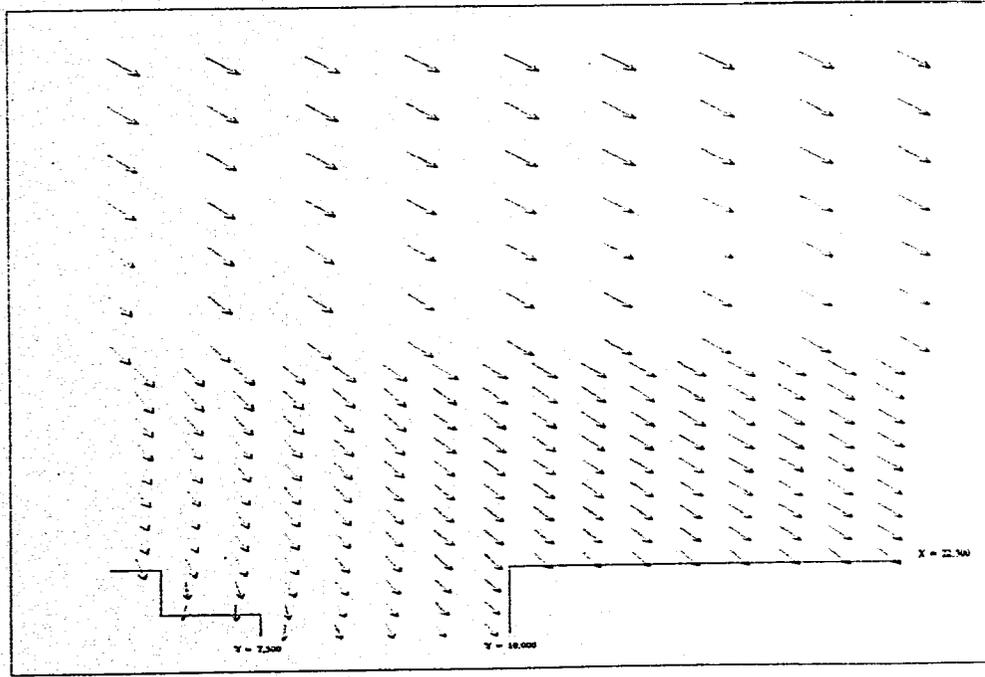


Fig. 7.10 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la primera y segunda malla de cálculo para la dirección N 45° W, T=15 seg y $H_s=9.60$ m

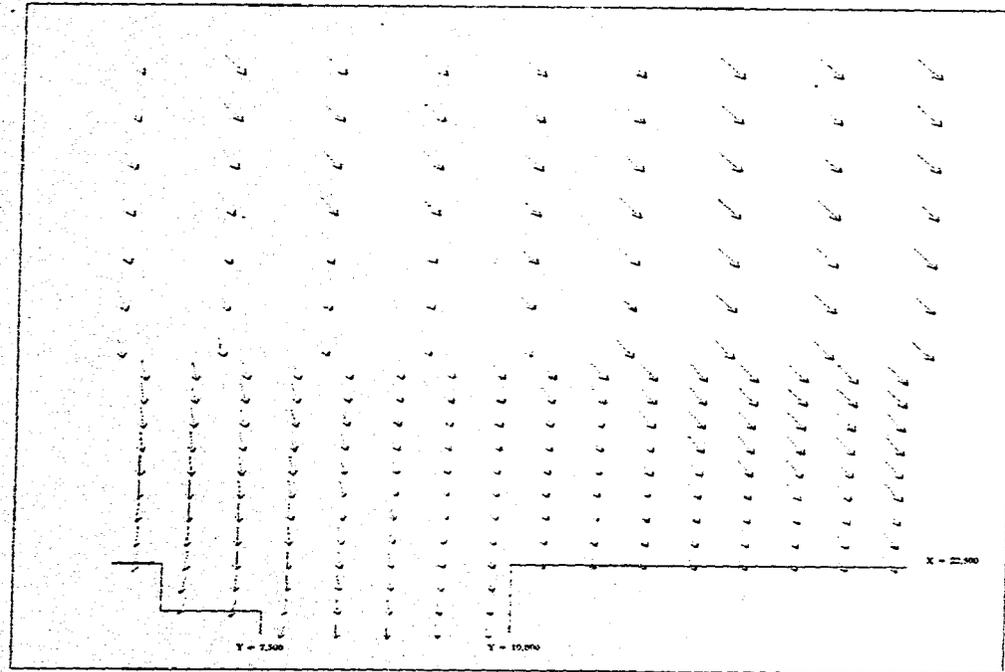


Fig. 7.11 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la primera y segunda malla de cálculo para la dirección N 45° W, T=17.5 seg y H_s=12.0 m

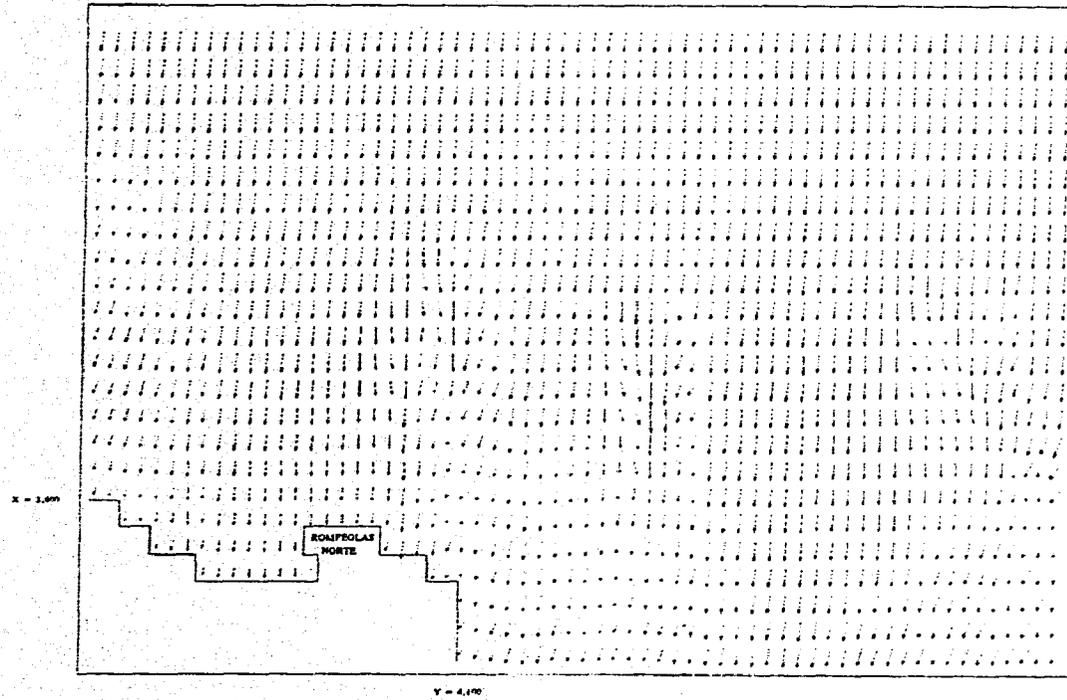


Fig. 7.12 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la tercera malla de cálculo para la dirección NORTE , T=15 seg y H=7.16 m

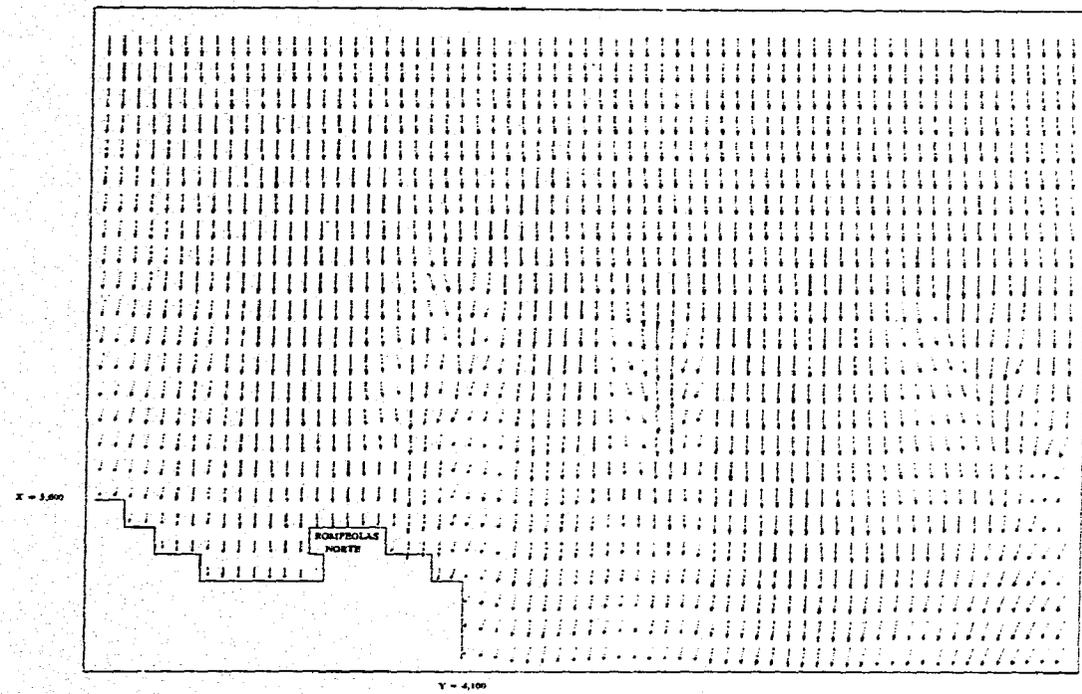


Fig. 7.13 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la tercera malla de cálculo para la dirección NORTE, T=17.5 seg y H=8.57 m

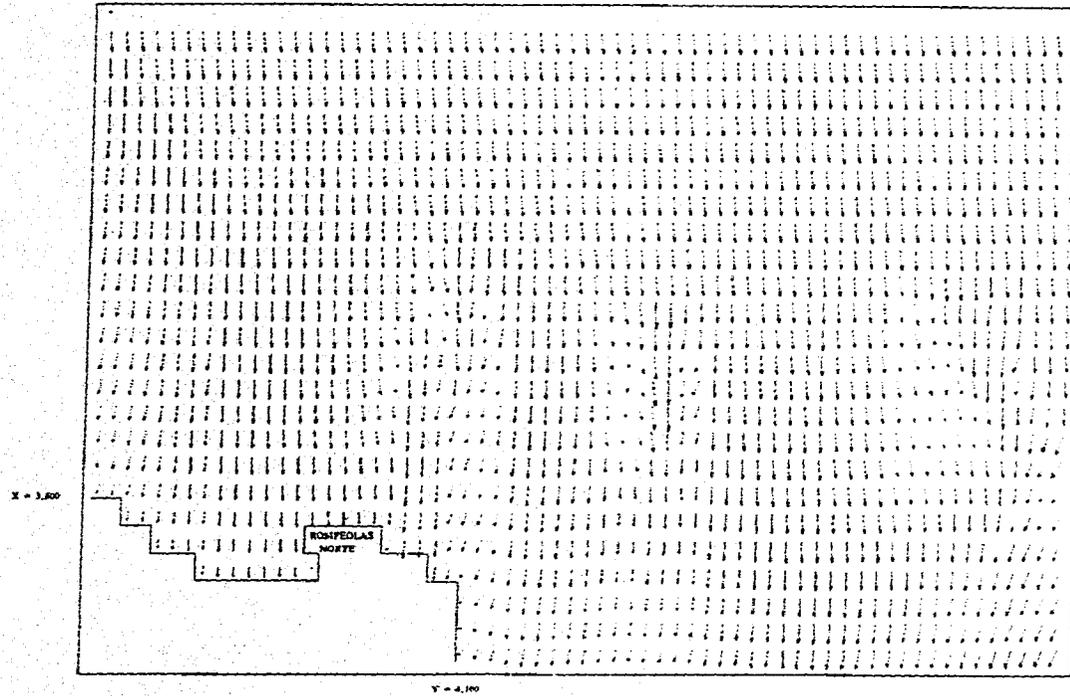


Fig. 7.14 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en las tercera malla de cálculo para la dirección $N 30^{\circ} W$, $T=15$ seg y $H=6.54$ m

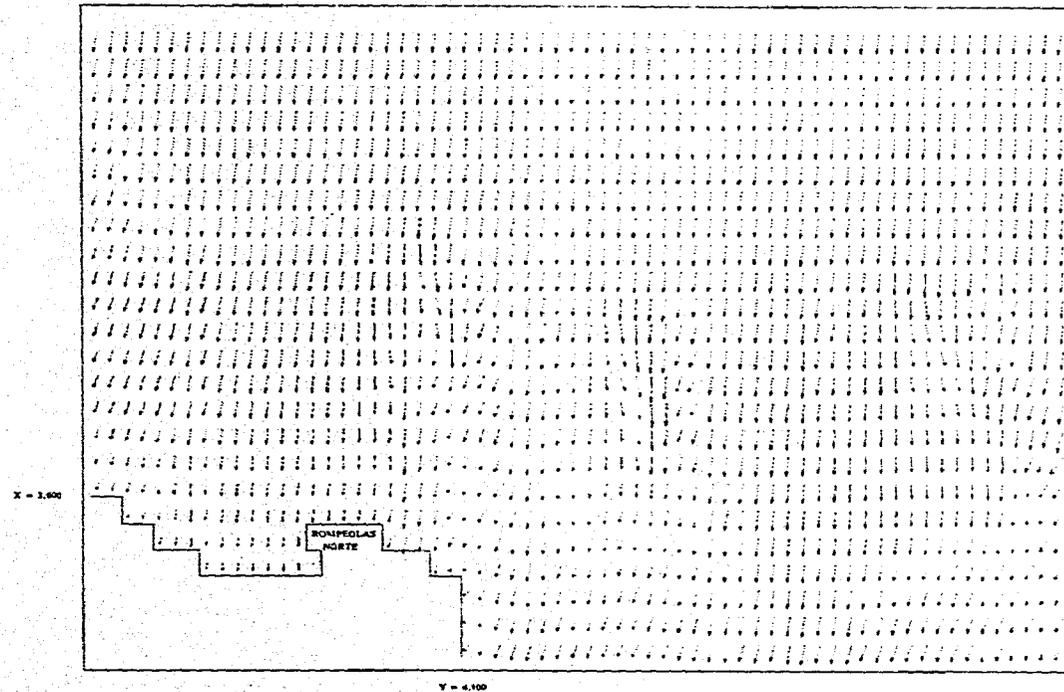


Fig. 7.15 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la tercera malla de cálculo para la dirección $N 30^{\circ} W$, $T=17.5$ seg y $H=7.70$ m

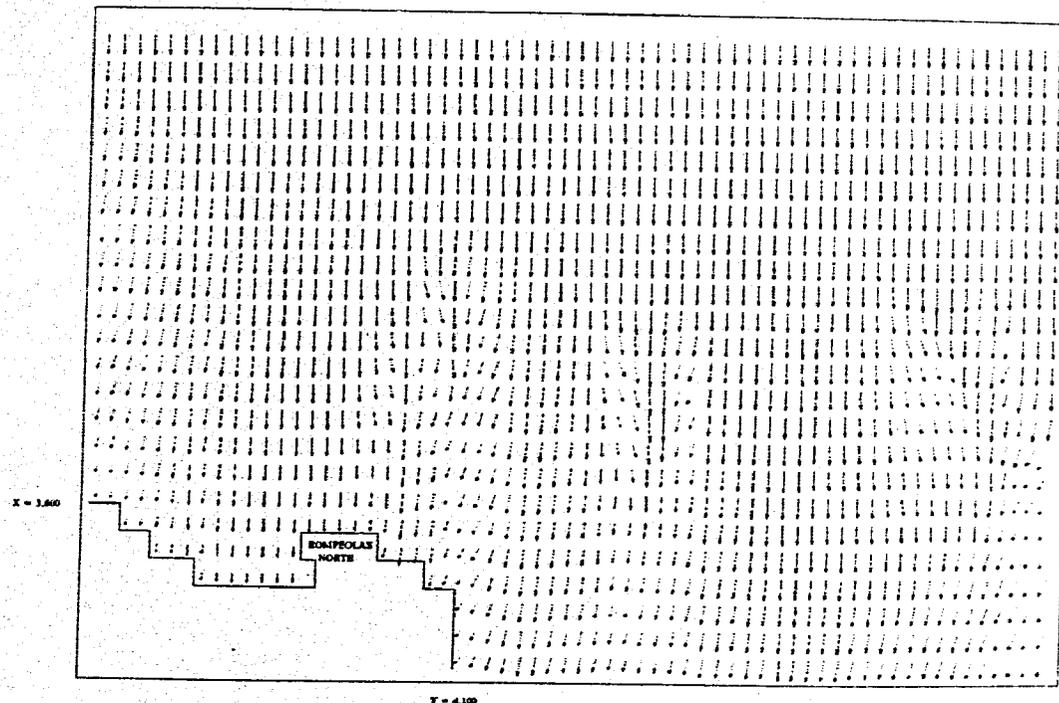


Fig. 7.16 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la tercera malla de cálculo para la dirección N 45° W, T=15 seg y H=6.41 m

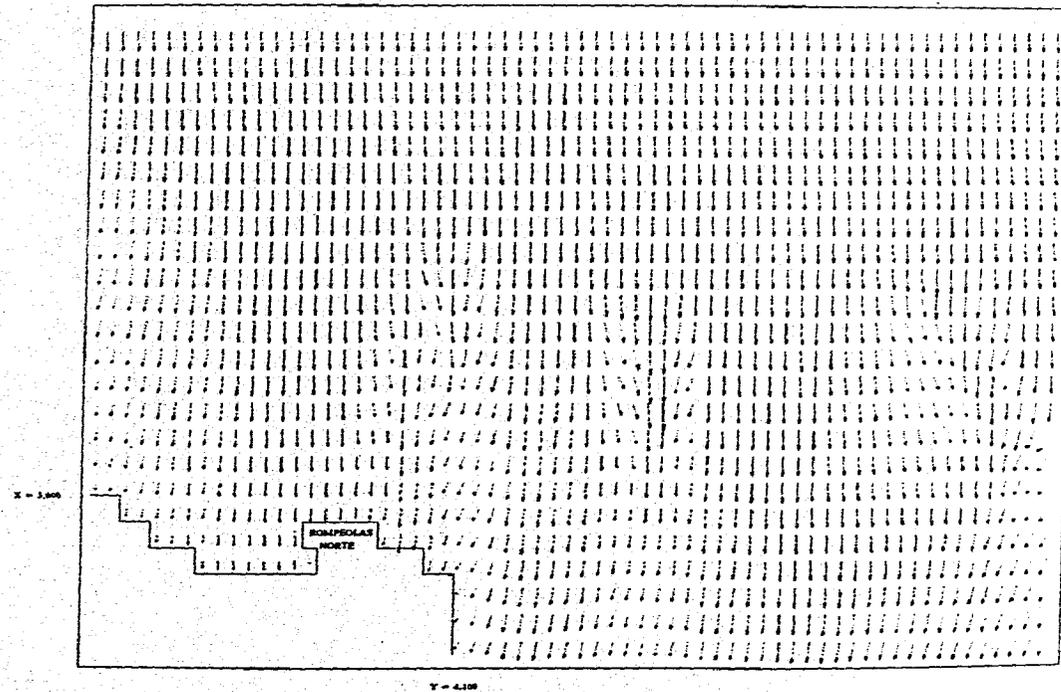


Fig. 7.17 Distribución espacial del oleaje representada por los vectores oleaje en la tercera malla de cálculo para la dirección $N 45^{\circ} W$, $T=17.5$ seg y $H=7.55$ m

- 73 BIS -

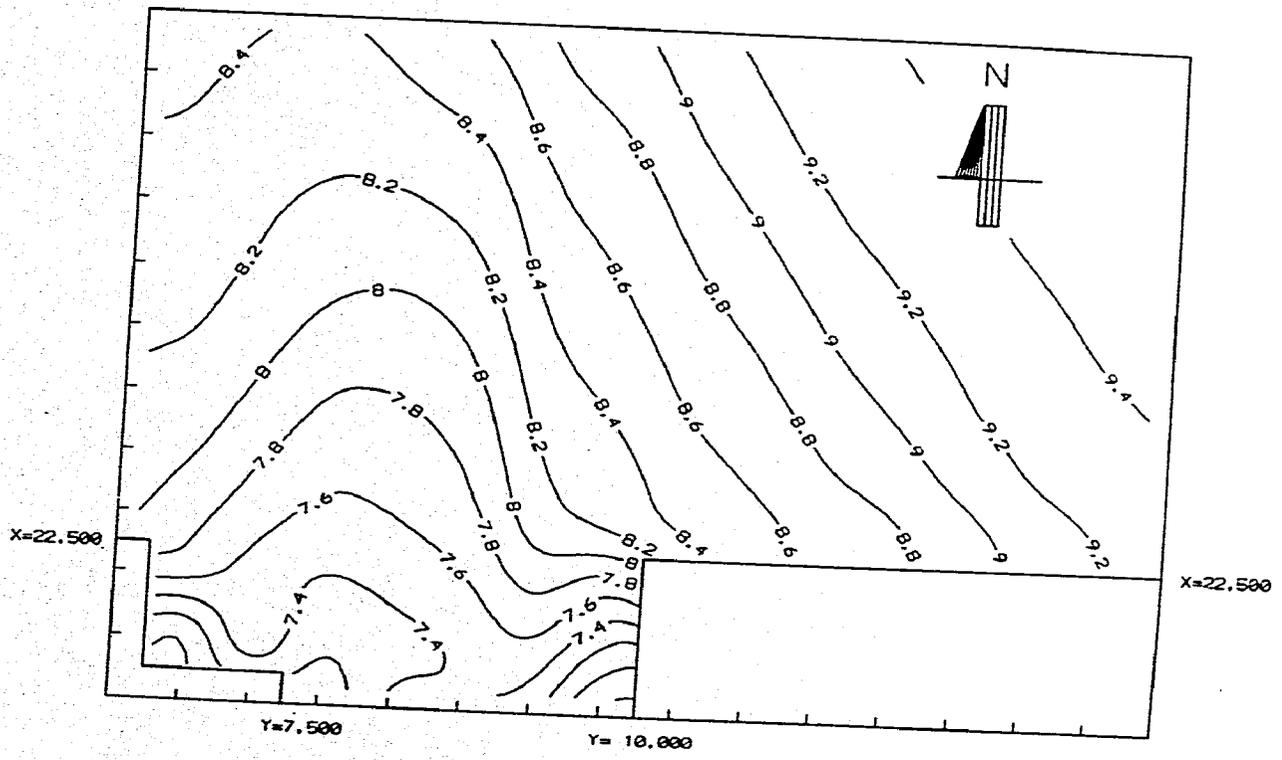


Fig. 7.18 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la segunda malla
Dir. = Norte, T=15 seg., H=9.60 m.

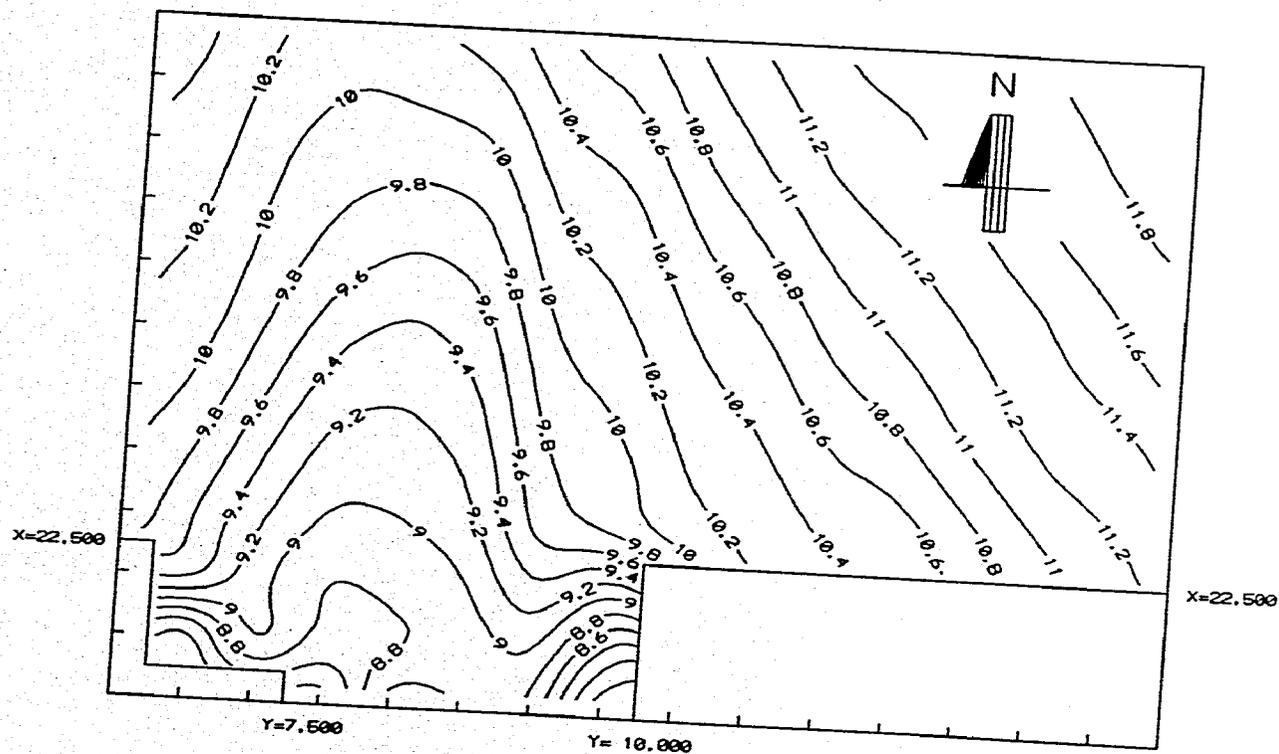


Fig. 7.19 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la segunda malla
Dir. = Norte, T=17.50 seg., H_w=12.0 m.

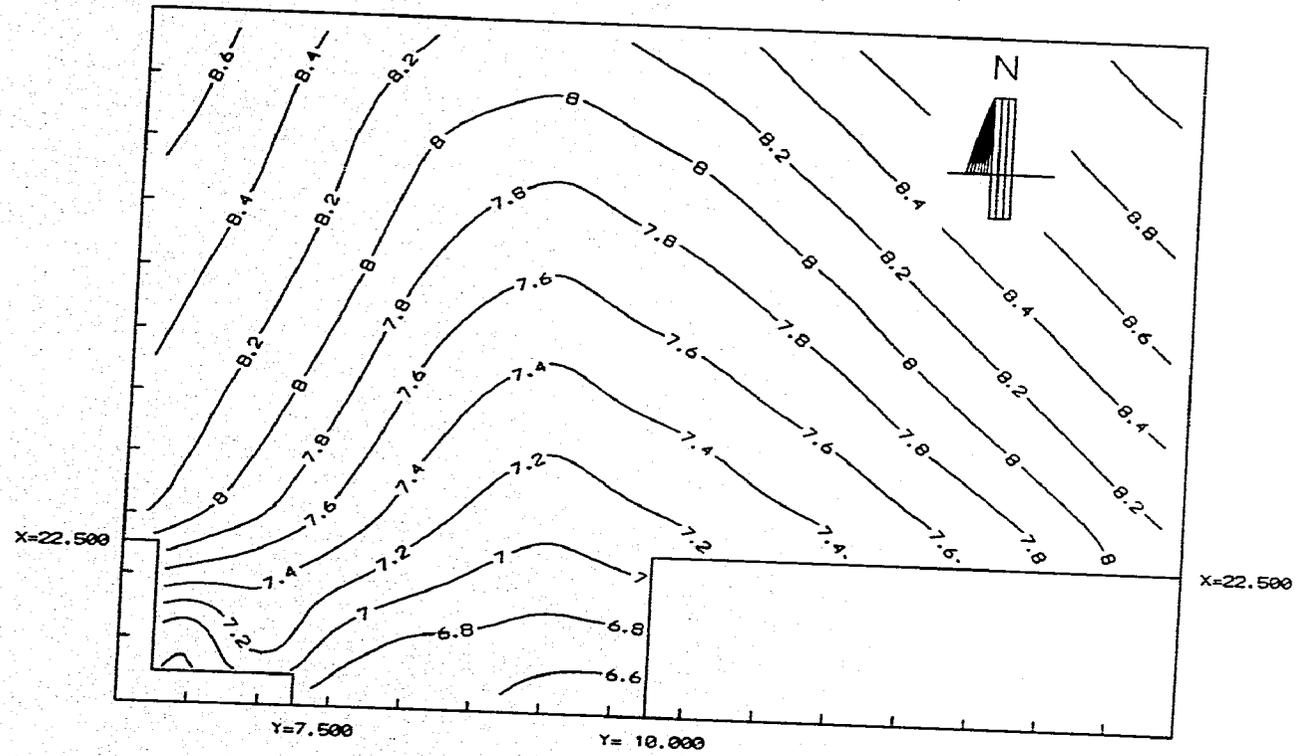


Fig. 7.20 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la segunda malla
Dir. = N30°W, T=15 seg., H_s=9.60 m.

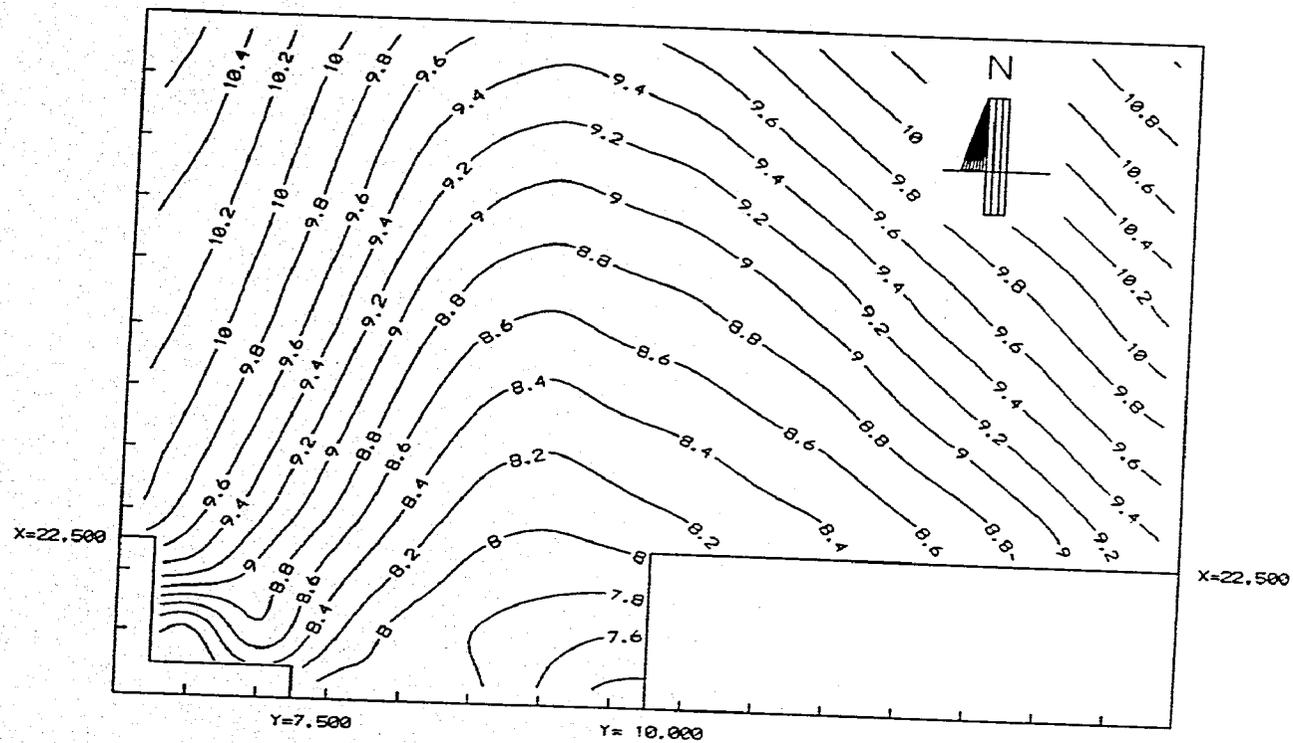


Fig. 7.21 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la segunda malla
Dir. = N30°W, T=17.50 seg., H_s=12.0 m.

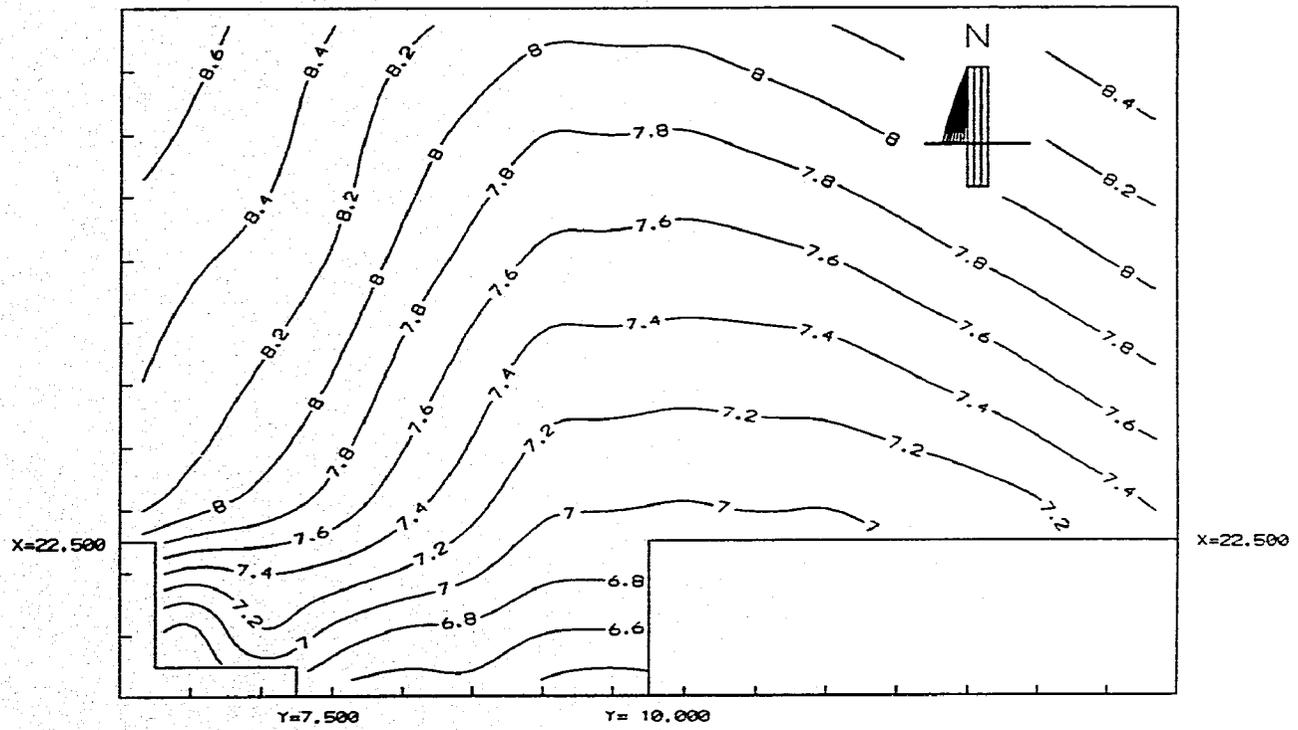


Fig. 7.22 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la segunda malla
Dir. = N45°W, T=15 seg., H₀=9.60 m.

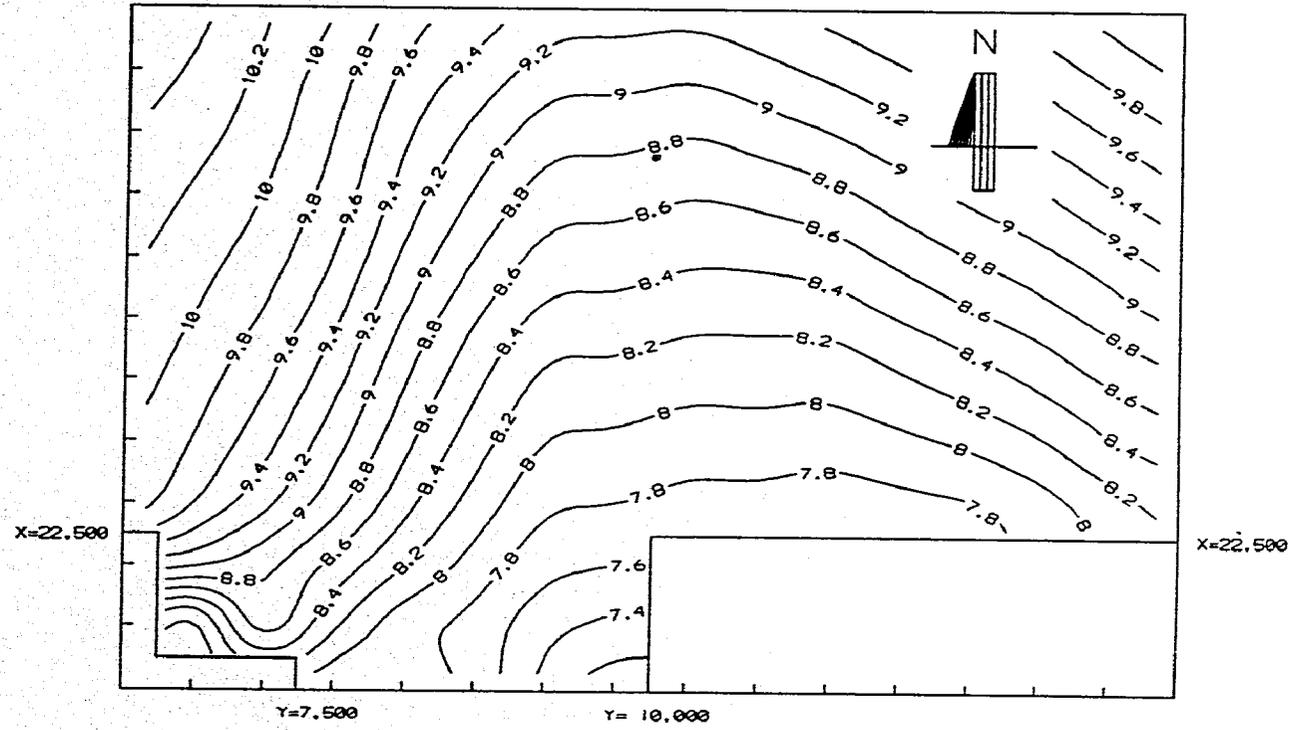


Fig. 7.23 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la segunda malla
Dir. = N45°W, T=17.50 seg., H_s=12.0 m.

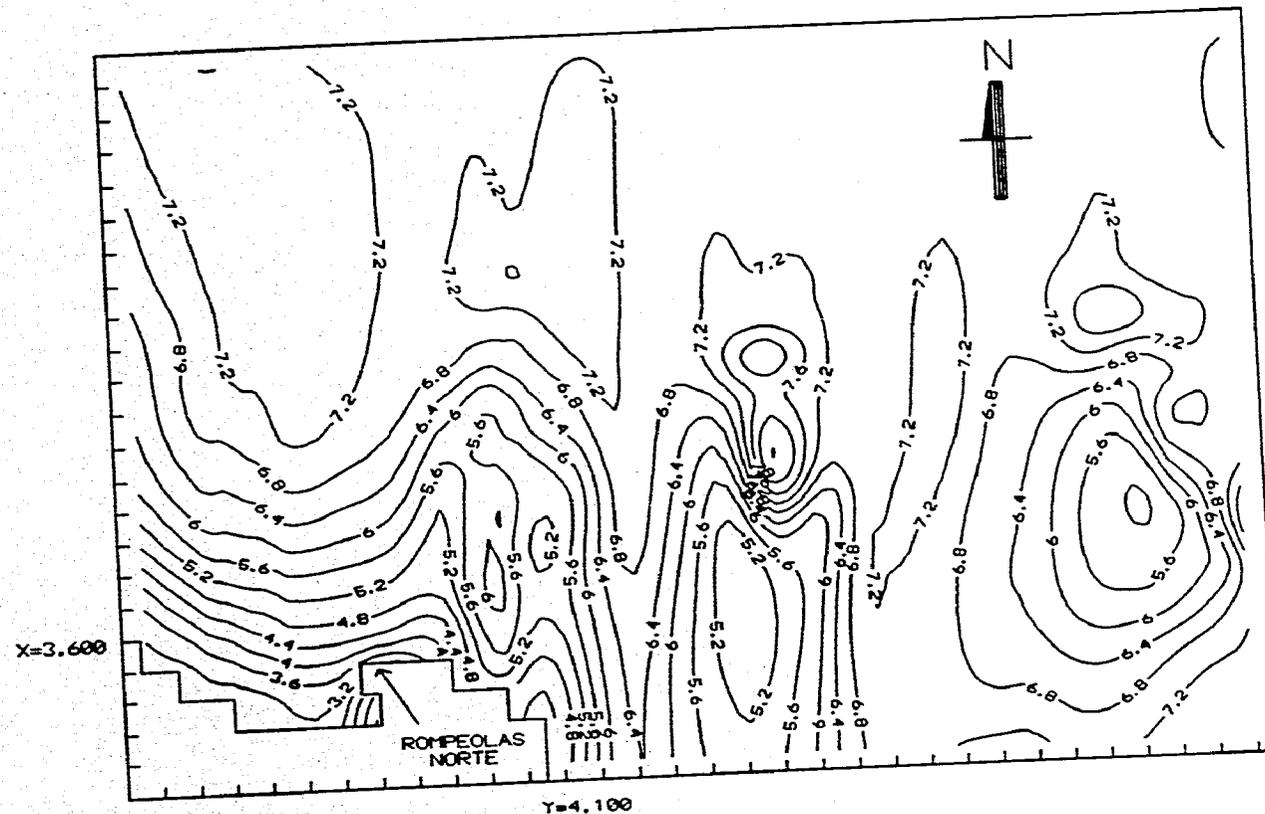


Fig. 7.24 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la zona de estudio
Dir. = NORTE, T=15.0 seg., H=7.16 m.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VALENCIA

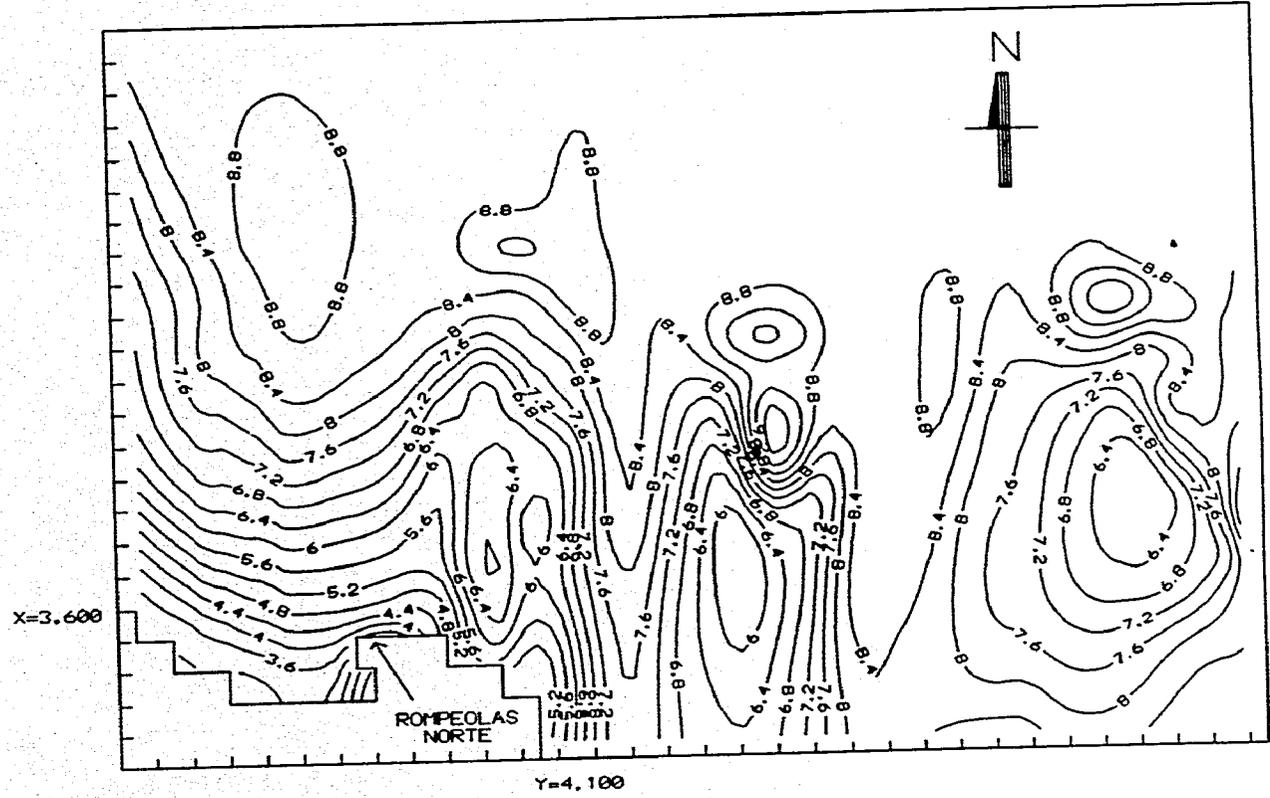


Fig. 7.25 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la zona de estudio
Dir. = NORTE, T=17.50 seg., H=8.57 m.

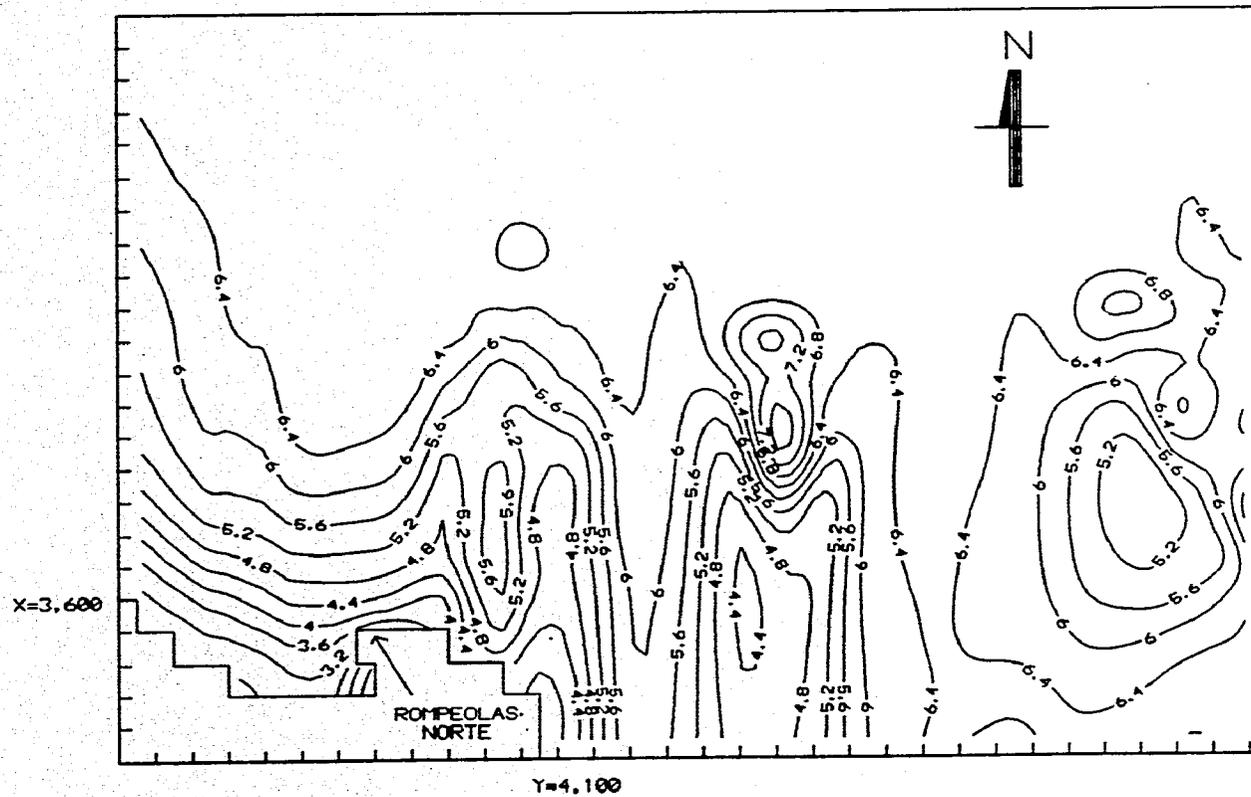


Fig. 7.26 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la zona de estudio
Dir. = N30°W, T=15.0 seg., H=6.54 m.

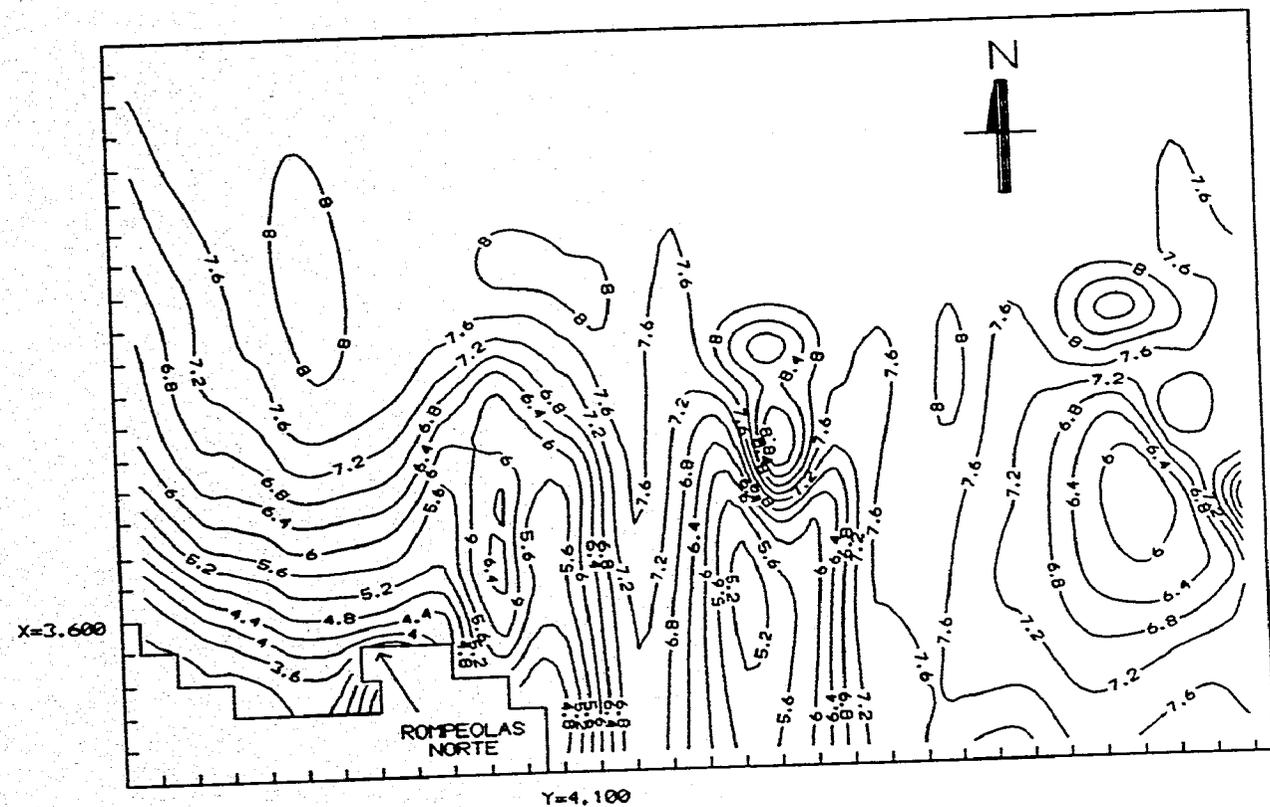


Fig. 7.27 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la zona de estudio
Dir. = N30°W, T=17.50 seg., H=7.70 m.

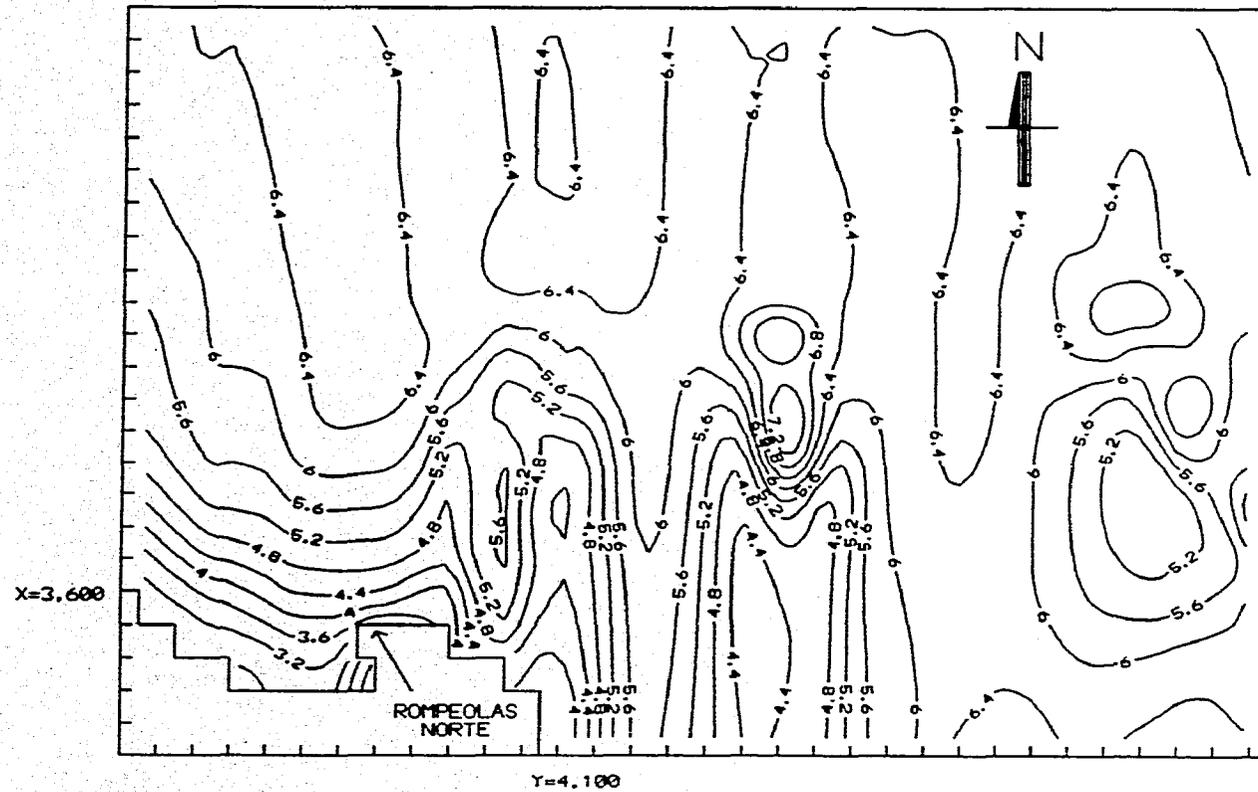


Fig. 7.28 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la zona de estudio
Dir. = N45°W, T=15.0 seg., H=6.41 m.

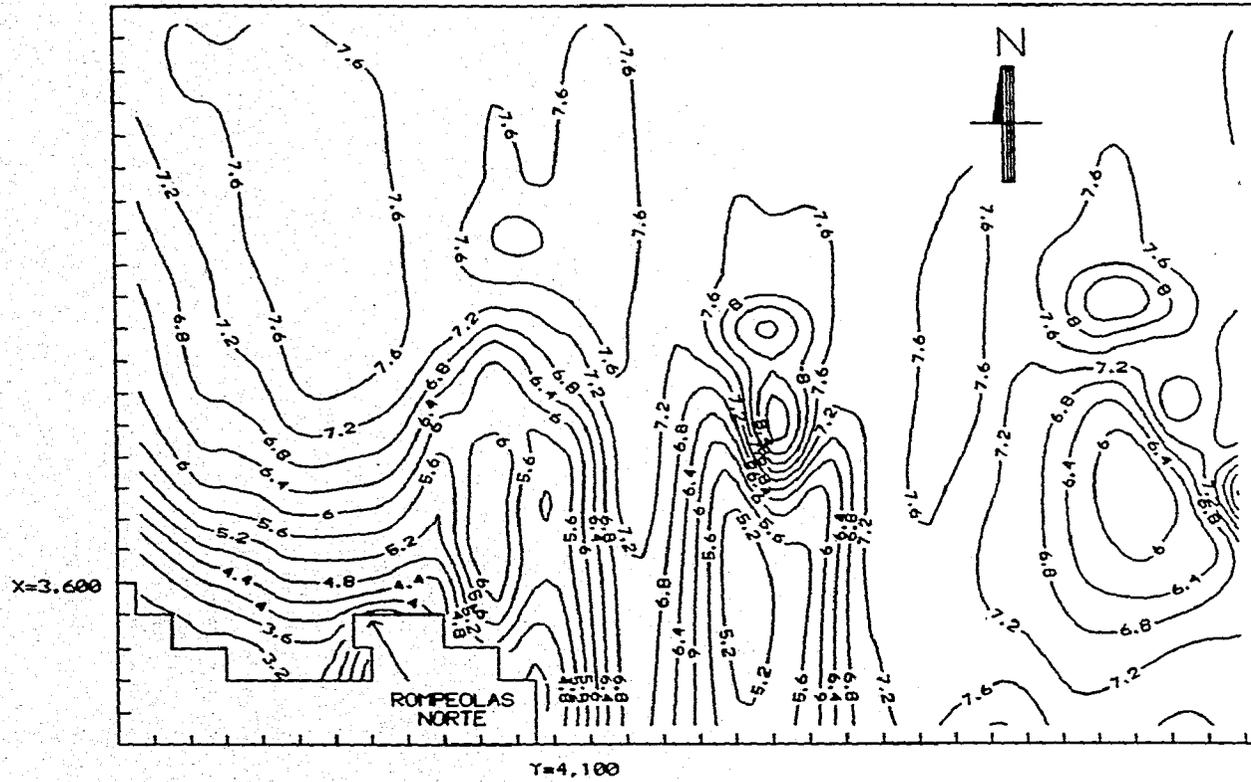


Fig. 7.29 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la zona de estudio
Dir. = N45°W, T=17.50 seg., H=7.55 m.

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA SEGUNDA MALLA (AGUAS PROFUNDAS)									
DIR.	H _o (m)	T _o (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	DIRECCION DEL OLEAJE	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)	PROMEDIO DE DIRECCIONES DEL OLEAJE
				X	Y				
NORTE	9.60	15.0	+ 3.30	28,750	18,750	6.66	- 2.95	7.16	-9.95
				28,750	16,250	7.31	- 7.96		
				28,750	13,750	7.40	- 9.87		
				28,750	11,250	7.49	-10.04		
				28,750	8,750	6.95	-18.95		
NORTE	9.60	17.50	+3.30	28,750	18,750	7.70	- 6.23	8.57	-13.24
				28,750	16,250	8.80	-11.43		
				28,750	13,750	9.02	-13.43		
				28,750	11,250	9.22	-12.95		
				28,750	8,750	8.09	-22.18		

TABLA 7.3 ALTURAS Y DIRECCIONES DEL OLEAJE A LO LARGO DE LA COORDENADA X=28,750 DE LA SEGUNDA MALLA DE CALCULO (INCIDENCIA DEL OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS EN LA DIRECCION NORTE).

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA SEGUNDA MALLA (AGUAS PROFUNDAS)									
DIR.	H _o (m)	T _o (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	DIRECCION DEL OLEAJE	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)	PROMEDIO DE DIRECCIONES DEL OLEAJE
				X	Y				
N 30° W	9.60	15.0	+ 3.30	28,750	18,750	6.39	13.69	6.54	5.61
				28,750	16,250	6.45	9.54		
				28,750	13,750	6.64	7.06		
				28,750	11,250	6.64	5.10		
				28,750	8,750	6.60	- 7.36		
N 30° W	12.00	17.50	+3.30	28,750	18,750	7.25	7.98	7.70	1.18
				28,750	16,250	7.56	3.27		
				28,750	13,750	7.89	1.45		
				28,750	11,250	8.08	0.27		
				28,750	8,750	7.74	-11.79		

TABLA 7.4 ALTURAS Y DIRECCIONES DEL OLEAJE A LO LARGO DE LA COORDENADA X=28,750 DE LA SEGUNDA MALLA DE CALCULO (INCIDENCIA DEL OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS EN LA DIRECCION N 30° W).

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA SEGUNDA MALLA (AGUAS PROFUNDAS)									
DIR.	H _o (m)	T _o (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M. (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	DIRECCION DEL OLEAJE	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)	PROMEDIO DE DIRECCIONES DEL OLEAJE
				X	Y				
N 45° W	9.60	15.0	+ 3.30	28,750	18,750	6.23	20.93	6.51	11.23
				28,750	16,250	6.30	16.38		
				28,750	13,750	6.53	12.75		
				28,750	11,250	6.47	10.02		
				28,750	8,750	6.51	- 3.93		
N 45° W	12.00	17.50	+3.30	28,750	18,750	7.04	13.97	7.55	5.11
				28,750	16,250	7.32	9.18		
				28,750	13,750	7.77	6.51		
				28,750	11,250	7.91	4.58		
				28,750	8,750	7.71	- 8.69		

TABLA 7.5 ALTURAS Y DIRECCIONES DEL OLEAJE A LO LARGO DE LA COORDENADA X=28,750 DE LA SEGUNDA MALLA DE CALCULO (INCIDENCIA DEL OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS EN LA DIRECCION N 45° W).

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA TERCER MALLA (AGUAS REDUCIDAS)							
DIR.	ALTURA DE OLA INCIDENTE (m)	T (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)
				X	Y		
NORTE	7.16	15.0	+3.30	3,500	3,300	4.61	4.24
				3,500	3,200	4.00	
				3,500	3,500	3.85	
				3,500	3,100	4.05	
				3,500	3,100	4.25	
				3,500	2,900	4.68	
				3,500	2,700	4.65	4.70
				3,500	2,500	4.67	
				3,500	2,300	4.68	
				3,500	2,100	4.72	
				3,500	1,900	4.69	
				3,500	1,700	4.72	
				3,500	1,500	3.83	3.73
				3,500	1,300	4.40	
				3,500	1,100	3.85	
				3,500	900	3.70	
				3,500	700	3.44	
				3,500	500	3.16	

TABLA 7.6 VALORES DE ALTURAS DE OLA RESULTANTES DE LA REFRACCION DEL OLEAJE EN LA TERCER MALLA A LO LARGO DE LA COORDENADA X=3,500 (DIRECCION NORTE)

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA TERCER MALLA (AGUAS REDUCIDAS)							
DIR.	ALTURA DE OLA INCIDENTE (m)	T (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)
				X	Y		
NORTE	8.57	17.5	+3.30	3,500	3,900	5.23	4.62
				3,500	3,700	4.45	
				3,500	3,500	4.21	
				3,500	3,300	4.35	
				3,500	3,100	4.52	
				3,500	2,900	4.98	
				3,500	2,700	4.95	5.00
				3,500	2,500	4.98	
				3,500	2,300	4.97	
				3,500	2,100	5.02	
				3,500	1,900	4.99	
				3,500	1,700	5.02	
				3,500	1,500	4.06	3.96
				3,500	1,300	4.74	
				3,500	1,100	4.06	
				3,500	900	3.91	
				3,500	700	3.63	
				3,500	500	3.34	

TABLA 7.7 VALORES DE ALTURAS DE OLA RESULTANTES DE LA REFRACCION DEL OLEAJE EN LA TERCER MALLA A LO LARGO DE LA COORDENADA X=3,500 (DIRECCION NORTE)

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA TERCER MALLA (AGUAS REDUCIDAS)							
DIR.	ALTURA DE OLA INCIDENTE (m)	T (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)
				X	Y		
N 30° W	6.54	15.0	+3.30	3,500	3,900	4.10	4.09
				3,500	3,700	3.76	
				3,500	3,500	3.74	
				3,500	3,300	4.06	
				3,500	3,100	4.23	
				3,500	2,900	4.64	
				3,500	2,700	4.58	4.56
				3,500	2,500	4.57	
				3,500	2,300	4.57	
				3,500	2,100	4.58	
				3,500	1,900	4.55	
				3,500	1,700	4.51	
				3,500	1,500	3.72	2.97
				3,500	1,300	4.07	
				3,500	1,100	3.61	
				3,500	900	3.33	
				3,500	700	3.07	
				3,500	500	3.04	

TABLA 7.8 VALORES DE ALTURAS DE OLA RESULTANTES DE LA REFRACCION DEL OLEAJE EN LA TERCER MALLA A LO LARGO DE LA COORDENADA X=3,500 (DIRECCION N 30° W)

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA TERCER MALLA (AGUAS REDUCIDAS)							
DIR.	ALTURA DE OLA INCIDENTE (m)	T (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)
				X	Y		
N 30° W	7.70	17.5	+3.30	3,500	3,900	4.69	4.45
				3,500	3,700	4.14	
				3,500	3,500	4.06	
				3,500	3,300	4.36	
				3,500	3,100	4.51	
				3,500	2,900	4.95	
				3,500	2,700	4.89	4.89
				3,500	2,500	4.89	
				3,500	2,300	4.90	
				3,500	2,100	5.92	
				3,500	1,900	4.88	
				3,500	1,700	4.86	
				3,500	1,500	3.92	3.83
				3,500	1,300	4.43	
				3,500	1,100	4.04	
				3,500	900	3.82	
				3,500	700	3.53	
				3,500	500	3.25	

TABLA 7.9 VALORES DE ALTURAS DE OLA RESULTANTES DE LA REFRACCION DEL OLEAJE EN LA TERCER MALLA A LO LARGO DE LA COORDENADA X=3,500 (DIRECCION N 30° W)

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA TERCER MALLA (AGUAS REDUCIDAS)							
DIR.	ALTURA DE OLA INCIDENTE (m)	T (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.M (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)
				X	Y		
N 45° W	6.41	15.0	+3.30	3,500	3,900	3.94	4.03
				3,500	3,700	3.70	
				3,500	3,500	3.71	
				3,500	3,300	4.04	
				3,500	3,100	4.20	
				3,500	2,900	4.60	
				3,500	2,700	4.55	4.49
				3,500	2,500	4.52	
				3,500	2,300	4.51	
				3,500	2,100	4.50	
				3,500	1,900	4.47	
				3,500	1,700	4.40	3.56
				3,500	1,500	3.70	
				3,500	1,300	3.95	
				3,500	1,100	3.80	
3,500	900	3.58					
3,500	700	3.29					
3,500	500	3.03					

TABLA 7.10 VALORES DE ALTURAS DE OLA RESULTANTES DE LA REFRACCION DEL OLEAJE EN LA TERCER MALLA A LO LARGO DE LA COORDENADA X=3,500 (DIRECCION N 45° W)

REFRACCION DE OLEAJE PARA LA TERCER MALLA (AGUAS REDUCIDAS)							
DIR.	ALTURA DE OLA INCIDENTE (m)	T (Seg.)	Nivel del mar referido al N.B.H (m)	COORDENADAS DE LA MALLA		ALTURA DE OLA (m)	PROMEDIO DE ALTURAS DE OLA (m)
				X	Y		
N 45° W	7.55	17.5	+3.30	3,500	3,900	4.56	4.40
				3,500	3,700	4.08	
				3,500	3,500	4.03	
				3,500	3,300	4.36	
				3,500	3,100	4.41	
				3,500	2,900	4.94	
				3,500	2,700	4.87	4.85
				3,500	2,500	4.86	
				3,500	2,300	4.86	
				3,500	2,100	4.87	
				3,500	1,900	4.84	
				3,500	1,700	4.80	
				3,500	1,500	3.90	3.80
				3,500	1,300	4.33	
				3,500	1,100	4.04	
				3,500	900	3.80	
				3,500	700	3.50	
				3,500	500	3.22	

TABLA 7.11 VALORES DE ALTURAS DE OLA RESULTANTES DE LA REFRACCION DEL OLEAJE EN LA TERCER MALLA A LO LARGO DE LA COORDENADA X=3,500 (DIRECCION N 45° W)

8. ALTERNATIVAS DE PROYECTOS DE PROTECCION PARA EL ROMPEOLAS NORTE

8.1 Criterio de diseño.

El criterio de diseño utilizado para evaluar el peso de los elementos individuales de la coraza, corresponde con el propuesto por Hudson, el cual se expresa como sigue:

$$P = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot \alpha}$$

Donde:

γ_s ; Peso específico del material (Ton/m³)

H ; Altura de ola de diseño (m)

α ; Angulo que forma el talud con la horizontal (grados)

K_d ; Coeficiente de estabilidad del elemento

$S_r = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$; Peso específico relativo al agua de mar

γ_w ; Peso específico del agua de mar ($\gamma_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$)

8.2 Oleaje de diseño.

Tomando como base los resultados de la refracción del oleaje indicadas en la **Tabla 7.7** y específicamente para la dirección Norte cuya altura de ola incidente es de 8.57 m y un período de 17.5 seg (caso más desfavorable), se determinó que el promedio de alturas de ola en aguas reducidas corresponde a los siguientes valores:

4.62 m
5.00 m
3.96 m

De lo anterior, y debido a la diferencia importante entre estos valores, para el diseño de rompeolas de protección, su longitud se dividió en dos tramos, denominandolos Tramo I y Tramo II, cuyos cadenamientos se pueden apreciar en la Fig 9.2 con fecha septiembre de 1994. Estos son del 1+790.59 al 1+871.0 y del 0+000.00 al 1+790.59, de los tres valores de altura de ola antes indicados, se tomo como altura de ola de diseño los valores de 4.62 m para el Tramo I y de 5.00 m para el Tramo II, la altura de ola de 3.96 m no se consideró en el diseño por que ésta puede actuar en una longitud muy pequeña del rompeolas.

8.3 Planteamiento de alternativas.

Las alternativas planteadas para el proyecto de protección en cuestión, fueron tres, las cuales se describen a continuación:

(1) Alternativa 1.

Esta alternativa contempla para el Tramo I la colocación de cubos de concreto con un peso de 11.40 Ton en la coraza exterior, y la colocación de piedra con un rango de peso de 4.5 a 7.2 Ton para la coraza interior. Para el Tramo II se contempla la colocación de cubos de concreto con un peso de 14.35 Ton en la coraza interior y exterior, como se muestra en las Figuras 8.3a y 8.3b respectivamente.

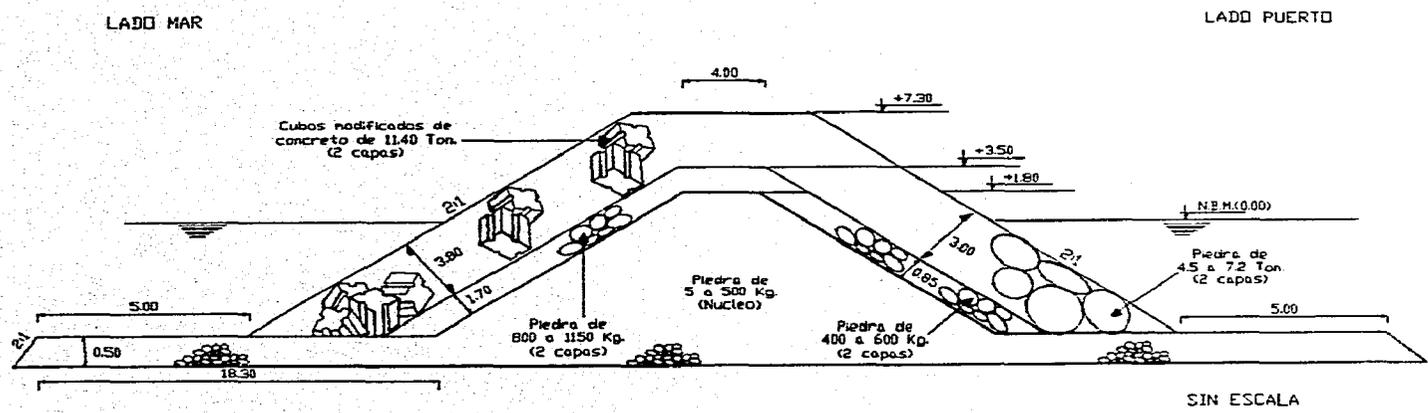


FIG. 8.3 a. Sección Tipo Tramo I Alternativa 1

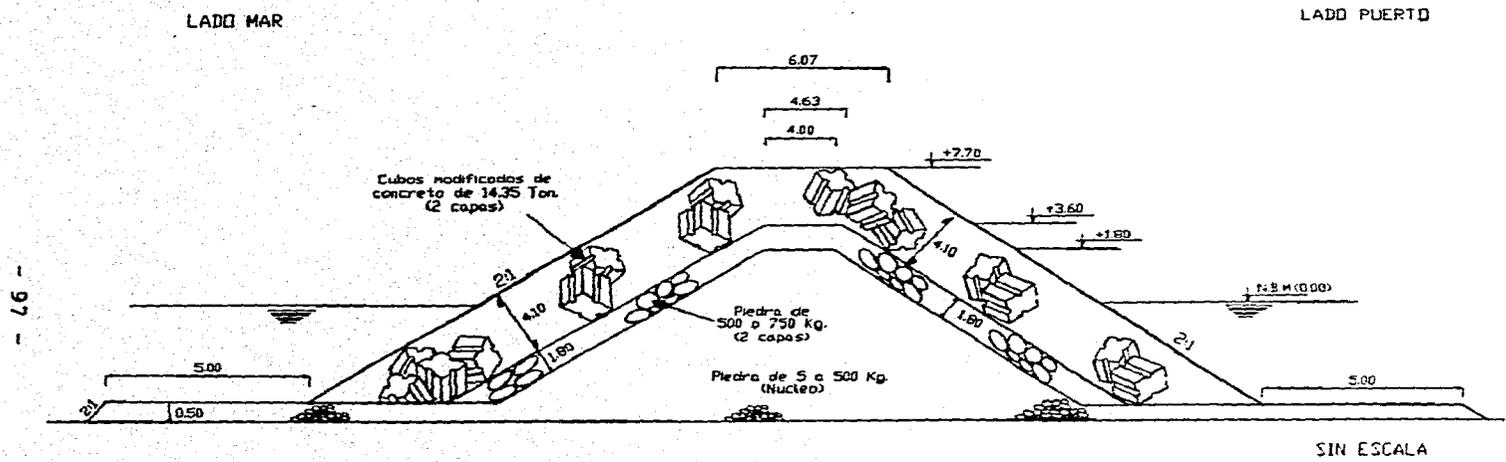


FIG. 8.3 b. Sección Tipo Tramo II Alternativa 1

8.3.1 Cálculo teórico del peso de los elementos de protección de la coraza en el talud exterior.

De acuerdo con los resultados de la refracción, se obtuvo que la altura de ola para el diseño del talud exterior de la estructura es de 4.62 y 5.00 m para los tramos I y II respectivamente.

La densidad de los elementos que constituirán la coraza se consideró con un valor de $\gamma_s = 2.2 \text{ Ton}/m^3$ para cubos modificados de concreto (tramo I y II).

El coeficiente de estabilidad de los cubos modificados a utilizar en el diseño fue de $K_d = 6.5$ para la coraza exterior.

Al sustituir en la fórmula de Hudson las condiciones de diseño indicadas anteriormente, se obtiene el siguiente peso para los elementos de la coraza:

Tramo I 11.40 Ton.
Tramo II 14.35 Ton.

Por lo tanto se proponen cubos de 11.40 Ton de peso en el tramo I y de 14.35 Ton para el tramo II, en la coraza exterior.

8.3.2 Cálculo teórico del peso de los elementos de la capa secundaria.

Por recomendación del "Shore Protection Manual", el rango de pesos para los elementos de la capa secundaria se calculó con las siguientes relaciones:

$$\frac{W}{10} \sim \frac{W}{15}$$

8.3.3 Cálculo teórico del peso de los elementos del núcleo.

Por recomendación del "Shore Protection Manual", el rango de pesos para los elementos del núcleo se calculó con las siguientes relaciones:

$$W_{ns} = \frac{W}{4000}; \text{ Para el límite inferior} = 5 \text{ kg a } 400 \text{ kg.}$$

$$W_{nl} = \frac{W}{200}; \text{ Para el límite superior} = 5 \text{ kg a } 500 \text{ kg.}$$

8.3.4 Cálculo teórico del peso de los elementos de protección de la coraza en el lado interior.

De acuerdo con los pesos de la coraza exterior, para el primer tramo, se consideró que el peso de los elementos (piedra) del talud interior quedaría definido por la mitad del peso de los cubos de la coraza exterior, resultando en estas circunstancias una altura de ola para el diseño de 3.42 m para el talud interior del tramo I y de 5.00 m para el talud interior del tramo II.

La densidad de los elementos que constituirán la coraza se consideró con un valor de $\gamma_s = 2.6 \text{ Ton/m}^3$ para piedra y de $\gamma_s = 2.2 \text{ Ton/m}^3$ para cubos de concreto.

El coeficiente de estabilidad de los elementos de protección a utilizar en el diseño fue para la coraza interior de $K_d = 6.5$ para cubos y de $K_d = 3.5$ para piedra.

Al sustituir en la fórmula de Hudson las condiciones de diseño indicadas en el punto anterior se obtienen los siguientes pesos para los elementos de la coraza:

Piedras de 5.85 Ton ; Para el tramo I.

Cubos modificados de concreto de 14.35 Ton ; Para el Tramo II.

Por lo tanto se propone utilizar en la coraza interior, piedra con rango de 4.5 a 7.2 Ton para el tramo I y cubos modificados de concreto de 14.35 Ton para el tramo II.

(2) Alternativa 2.

Esta alternativa considera para el tramo I, la colocación de cubos modificados de concreto de 11.40 Ton en la coraza exterior y talud 2:1, y para la coraza interior piedra con un rango de peso de 4.5 a 7.2 Ton con un talud 1.5:1. Para el tramo II se contempla colocar cubos modificados de concreto de 14.35 Ton y talud 2:1 en la coraza exterior, así como cubos modificados de concreto de 8.5 Ton de peso y talud 1.5:1 en la coraza interior, como se muestra en la Figs. 8.4 a y 8.4b respectivamente.

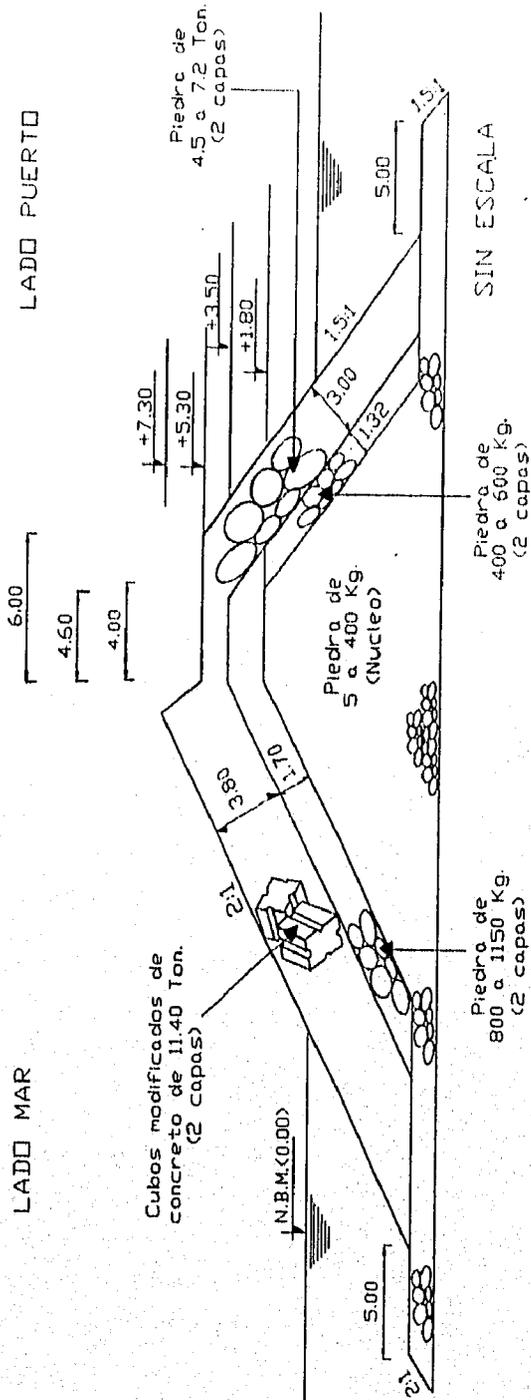


FIG. 8.4 a. Sección Tipo Tramo I Alternativa 2

8.3.5 Cálculo teórico del peso de los elementos de protección de la coraza en el talud exterior.

De acuerdo con los resultados de refracción de oleaje se obtuvo que la altura de ola para el diseño del talud exterior de la estructura es de 4.62 y 5.00 m para el tramo I y II respectivamente.

La densidad de los elementos que constituirán la coraza exterior se consideró con un valor de $\gamma_s = 2.2$ para cubos modificados de concreto (tramo I y II).

El coeficiente de estabilidad de los elementos de protección (cubos modificados) a utilizar en el diseño fue para la coraza exterior de $K_d = 6.5$.

Al sustituir en la fórmula de Hudson las condiciones de diseño indicadas en el punto anterior se obtiene el siguiente peso para los elementos de la coraza:

Cubos modificados de concreto de 11.40 Ton ; Para el Tramo I.

Cubos modificados de concreto de 14.35 Ton ; Para el Tramo II.

Por lo tanto se proponen cubos de 11.40 Ton y 14.35 Ton para la coraza exterior de los tramos I y II respectivamente.

8.3.6 Cálculo teórico del peso de los elementos de la capa secundaria.

Por recomendación del "Shore Protection Manual", el rango de pesos para los elementos de la capa secundaria se calculó con las siguientes relaciones:

$$\frac{W}{10} \sim \frac{W}{15}$$

8.3.7 Cálculo teórico del peso de los elementos del núcleo.

Por recomendación del "Shore Protection Manual", el rango de pesos para los elementos del núcleo se calculó con las siguientes relaciones:

$$W_{ns} = \frac{W}{4000} ; \text{ Para el límite inferior} = 5.0 \text{ kg a } 400 \text{ kg.}$$

$$W_{nl} = \frac{W}{200} ; \text{ Para el límite superior} = 5.0 \text{ Kg a } 400 \text{ Kg.}$$

8.3.8 Cálculo teórico del peso de los elementos de protección de la coraza del talud interior.

De acuerdo con los pesos de la coraza exterior, para el primero y segundo tramo, se consideró que el peso de los elementos del talud interior quedaría definido por la mitad del peso de los cubos de la coraza exterior, resultando en estas circunstancias una altura de ola para el diseño de 3.42 m para el talud interior del tramo I y de 4.00 m para el talud interior del tramo II.

La densidad de los elementos que constituirán la coraza se consideró con un valor de $\gamma_s = 2.6 \text{ Ton/m}^3$ para piedra y de $\gamma_s = 2.2 \text{ Ton/m}^3$ para los cubos modificados de concreto.

El coeficiente de estabilidad de los elementos de protección a utilizar en el diseño fue para la coraza interior de $K_d = 6.5$ para cubos modificados y de $K_d = 3.5$ para piedra.

Al sustituir en la fórmula de Hudson las condiciones de diseño indicadas en el punto anterior se obtiene el siguiente peso para los elementos de la coraza:

Piedras de 5.82 Ton ; Para el tramo I.

Cubos modificados de concreto de 8.5 Ton ; Para el Tramo II.

Por lo tanto se propone utilizar en la coraza interior, piedra con rango de 4.5 a 7.2 Ton para el Tramo I, y cubos modificados de concreto de 8.5 Ton para el Tramo II.

(3) Alternativa 3.

Para ésta alternativa se consideró, para las corazas exterior e interior, colocar en el tramo I piedra de 9 a 14 Ton y taludes de 2:1 y 1.5:1, respectivamente. Para el tramo II se consideró colocar piedra de 9 a 14 Ton en la coraza exterior y talud 2.25:1, para la coraza interior se consideró colocar piedra con un rango de peso de 9 a 14 Ton y un talud de 1.5:1, como se muestra en las Figs. 8.5 a y 8.5b respectivamente.

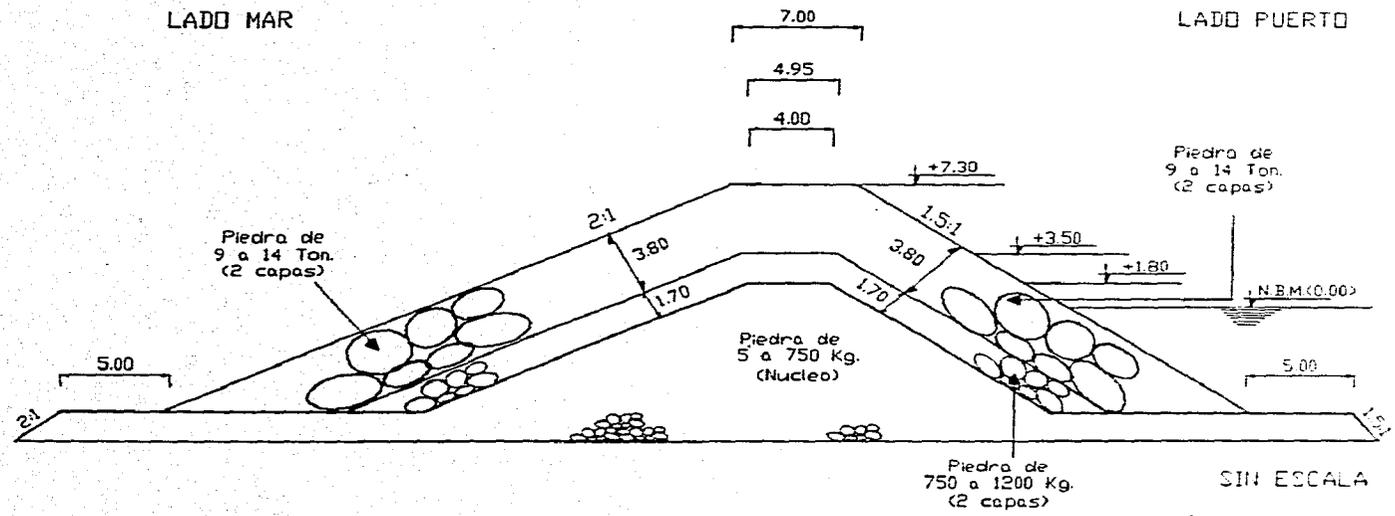


FIG. 8.5 a. Sección Tipo Tramo I Alternativa 3

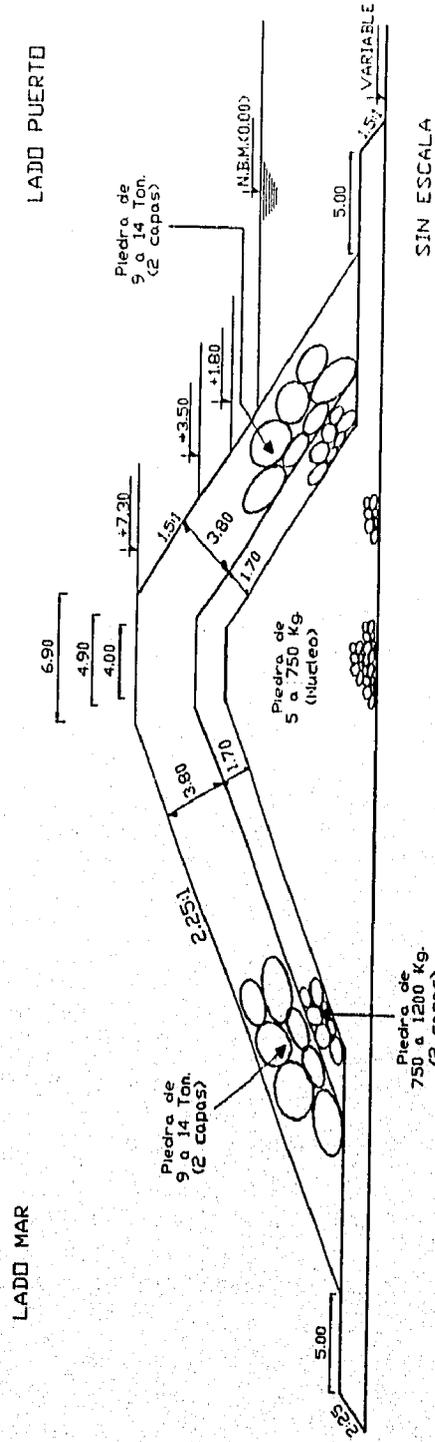


FIG. 8.5 b. Sección Tipo Tramo II Alternativa 3

8.3.9 Cálculo teórico del peso de los elementos de protección de la coraza en el talud exterior.

De acuerdo con los resultados de refracción, se obtuvo que la altura de ola para el diseño del talud exterior de la estructura es de 4.62 y 5.00 m para el tramo I y II respectivamente.

La densidad de los elementos que constituirán la coraza se consideró con un valor de $\gamma_s = 2.6 \text{ Ton}/\text{m}^3$ para piedra (tramo I y II).

El coeficiente de estabilidad de los elementos de protección a utilizar en el diseño fue para la coraza exterior de $K_d = 3.5$.

Al sustituir en la fórmula de Hudson las condiciones de diseño indicadas en el punto anterior se obtiene el siguiente peso para los elementos de la coraza:

Tramo I y Tramo II piedra de 11.5 Ton (en promedio).

Por lo tanto, se propone utilizar piedra con un rango de peso de 9 a 14 Ton en la coraza exterior para los tramos I y II.

8.3.10 Cálculo teórico del peso de los elementos de la capa secundaria.

Por recomendación del "Shore Protection Manual", el rango de pesos para los elementos de la capa secundaria se calculó con las siguientes relaciones:

$$\frac{W}{10} \sim \frac{W}{15}$$

8.3.11 Cálculo teórico del peso de los elementos del núcleo.

Por recomendación del "Shore Protection Manual" [1], el rango de pesos para los elementos del núcleo se calculó con las siguientes relaciones:

$$W_{ns} = \frac{W}{4000}; \text{ Para el límite inferior}$$

$$W_{ni} = \frac{W}{200}; \text{ Para el límite superior}$$

Resultando con las relaciones anteriores, un rango de piedras con peso de 5 Kg a 750 Kg.

8.3.12 Cálculo teórico del peso de los elementos de protección de la coraza en el lado interior.

De acuerdo con los resultados de refracción y los taludes propuestos, se obtuvo que la altura de ola para el diseño del talud interior de la estructura es de 4.28 m para los tramos I y II.

La densidad de los elementos que constituirán la coraza se consideró con un valor de $\gamma_s = 2.6 \text{ Ton/m}^3$ para piedra

El coeficiente de estabilidad de los elementos de protección a utilizar en el diseño para la coraza interior fue de $K_d = 3.5$ para piedra.

Al sustituir en la fórmula de Hudson las condiciones de diseño indicadas en el punto anterior, se obtiene el siguiente peso para los elementos de la coraza:

Piedras de 11.5 Ton ; Para los tramos I y II.

Por lo tanto, se propone utilizar para los tramos I y II, piedra con un rango de pesos de 9.0 a 14.0 Ton para la coraza interior.

9. ESTUDIOS EN MODELO HIDRAULICO

Con el objeto de revisar la estabilidad de los elementos de coraza propuestos para el rompeolas de protección en cuestión, se realizaron una serie de ensayos en modelo hidráulico, tomando en cuenta la altura y periodo del oleaje de diseño, forma de colocación de los elementos, profundidad al pie del rompeolas, número de capas en la coraza y talúd del rompeolas.

9.1 Organización Experimental

Los ensayos de estabilidad de los elementos se realizaron en un canal de olas de 50.00 m de largo, 0.60 m de ancho y 1.20 m de profundidad Fig.9.1. El canal está equipado con un generador de olas tipo paleta capaz de reproducir trenes de olas irregulares en base a espectros frecuenciales del oleaje. Las alturas de ola generadas fueron medidas por medio de dos sensores de oleaje tipo capacitivo, uno colocado a 10.00 m del generador y otro colocado a 1.35 m del pie de la obra.

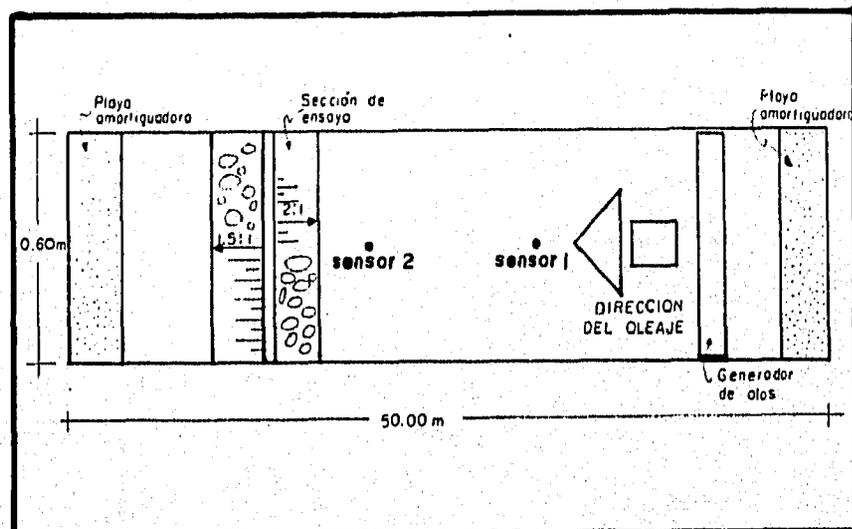


FIG. 9.1 Canal de Olas.

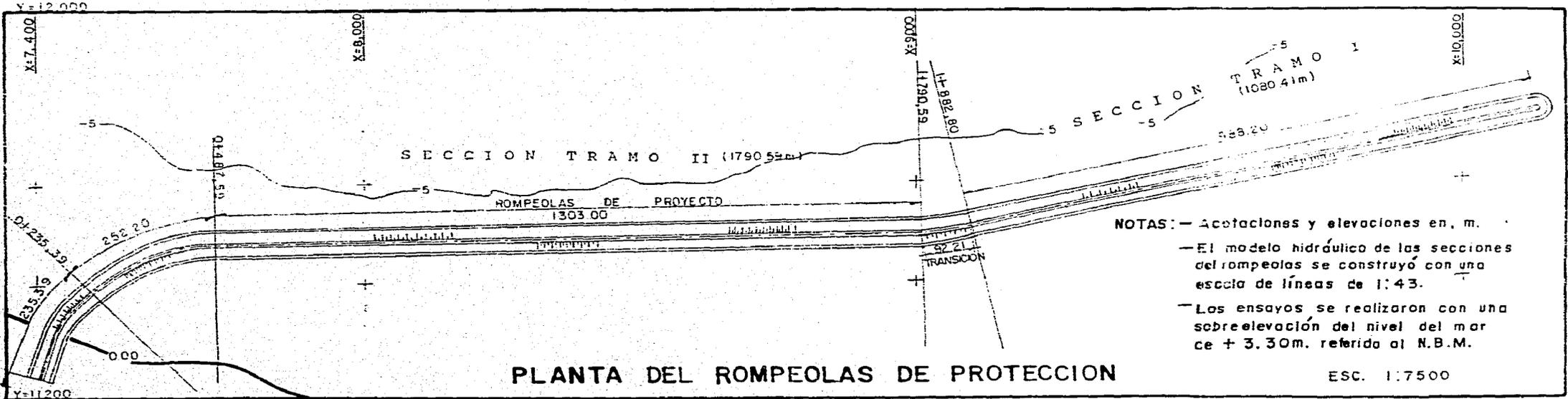
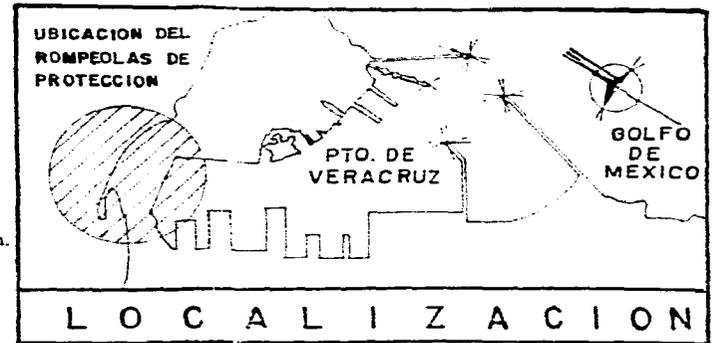
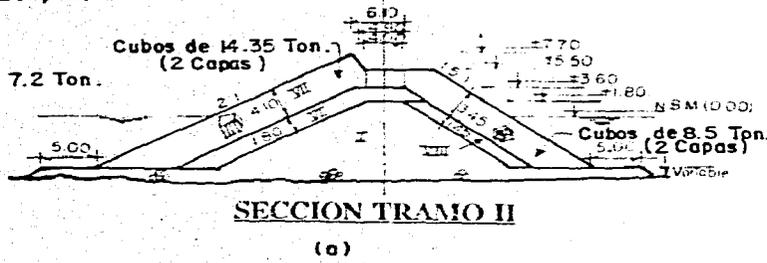
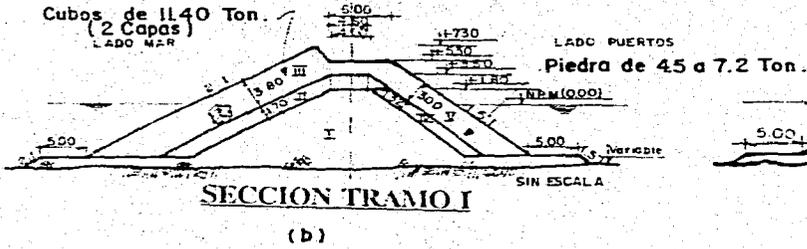
9.2. Secciones ensayadas

En la Fig. 9.2 se muestra la planta del rompeolas de protección, así como las diversas secciones transversales ensayadas.

ALTERNATIVA 2 CUBOS COMO ELEMENTOS DE CORAZA

- I Piedra de 5 a 500 Kg.
- II Piedra de 800 a 1150 Kg. (2 capas)
- III Piedra de 400 a 600 Kg. (2 capas)

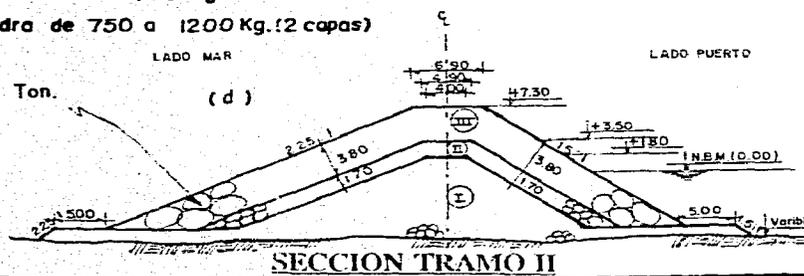
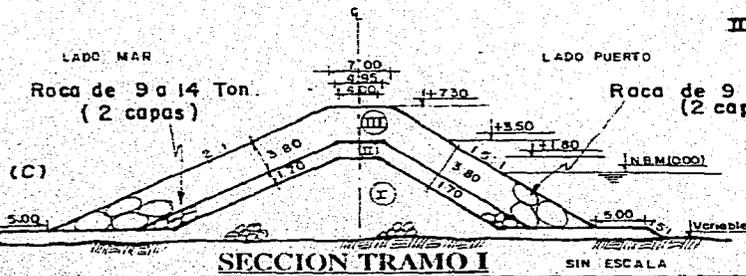
- I Piedra de 5 a 500 Kg.
- VI Piedra de 1 a 1.5 Ton. (2 capas)
- VIII Piedra de 500 a 750 Kg. (2 capas)



- NOTAS: - Acotaciones y elevaciones en m.
 - El modelo hidráulico de las secciones del rompeolas se construyó con una escala de líneas de 1:43.
 - Los ensayos se realizaron con una sobre elevación del nivel del mar de + 3.30m. referido al N.B.M.

ALTERNATIVA 3 ENROCAMIENTO COMO ELEMENTOS DE CORAZA

- I Piedra de 5 a 750 Kg.
- II Piedra de 750 a 1200 Kg. (2 capas)



ALTERNATIVAS ENSAYADAS PARA EL ROMPEOLAS DE PROTECCION DE LA ZONA NORTE DEL PUERTO DE VERACRUZ, VER.
 Fig. 9.2

10. ENSAYOS DE LAS SECCIONES DEL ROMPEOLAS

10.1. Selección de escalas

Para iniciar los ensayos, primeramente se tuvo que elegir una escala de líneas, la cual se determinó en función de las características del equipo de generación de oleaje y de los elementos de coraza (cubos existentes en el laboratorio utilizados en estudios anteriores). En base a estas condicionantes se adoptó una escala de líneas horizontales y verticales de 1/43.

Para representar las fuerzas de gravedad e inercia, que son las predominantes en este tipo de estudio, se utilizó el criterio de similitud de Froude para conseguir la igualdad entre modelo y prototipo.

Esta igualdad establece que la cantidad adimensional $V/(gL)^{1/2}$, llamada número de Froude debe ser igual en modelo y prototipo.

De acuerdo a lo anterior y utilizando un subíndice "r", para indicar la razón entre las magnitudes del modelo y prototipo, tendremos:

$$\frac{V_r}{(g_r L_r)^{1/2}} = 1 \quad (9.1)$$

Si se tiene en cuenta que la aceleración de la gravedad es la misma en modelo y en prototipo, entonces $g_m = g_p$, por lo tanto $g_r = 1$, de donde resulta la siguiente relación para la velocidad.

$$\frac{V_r}{L_r^{1/2}} = 1 \quad \therefore \quad V_r = L_r^{1/2} \quad (9.2)$$

Siendo L_r la escala geométrica.

La escala de periodos se obtiene con la siguiente relación:

$$T_r = \frac{L_r}{V_r} = \frac{L_r}{L_r^{1/2}} = L_r^{1/2} \quad (9.3)$$

La escala de fuerzas será:

$$F_r = L_r^3 \quad (9.4)$$

Resumiendo, las relaciones entre las magnitudes de modelo y prototipo, de acuerdo con la escala geométrica adoptada, son las siguientes:

Longitud: $L_m = L_p \left(\frac{1}{43} \right)$ (9.5)

Periodo: $T_m = T_p \left(\frac{1}{43^{1/2}} \right)$ (9.6)

Velocidad: $V_m = V_p \left(\frac{1}{43^{1/2}} \right)$ (9.7)

Fuerza: $F_m = F_p \left(\frac{1}{43} \right)^3$ (9.8)

10.2 Selección de elementos de coraza y subcapas

De acuerdo con la relación 9.8, determinada anteriormente, se procedió a seleccionar individualmente cada uno de los elementos de coraza, obteniéndose los rangos de pesos que se muestran en la Tabla 10.1.

SECCION TIPO	PROTOTIPO		MODELO	
	CUBOS	ROCA	CUBOS	ROCA
TRAMO II ALTERNATIVA 2	14.35 Ton 8.50 Ton		180.48 gr 106.91 gr	
TRAMO I ALTERNATIVA 2	11.40 Ton	4.5 a 7.2 Ton	143.38 gr	56.59 a 90.55 gr
TRAMO I ALTERNATIVA 3		9 a 14 Ton		113.19 a 176.08 gr

TABLA 10.1 Rango de pesos en prototipo y modelo de la coraza considerados para el estudio de estabilidad.

Para seleccionar los elementos de coraza, estos se pesaron pieza por pieza. Y para obtener los elementos de la capa secundaria, núcleo y plantilla, éstos se determinaron a partir del diámetro respectivo, el cual se definió en base a la aplicación de las fórmulas conocidas para determinar los volúmenes de esferas y cubos, así como a la relación del peso específico del material, el cual para el enrocamiento se consideró de 2.68 Ton/m³.

Con las condiciones anteriores se obtuvo lo siguiente:

Peso medio:

$$P = \frac{1}{2} [2.68 + 1.4] D^3 = 2D^3 \quad (9.9)$$

Diámetro medio:

$$D = (P/2)^{1/3} \quad (9.10)$$

Lo anterior debido a que resultaría demasiado laborioso pesar pieza por pieza la cantidad masiva de elementos de la subcapa y núcleo.

De acuerdo a lo anterior y tomando en cuenta la ecuación (9.10) se obtuvieron las siguientes relaciones de pesos y diámetros de la Tabla 10.2.

SECCION TIPO	PROTOTIPO (PESO)		MODELO (DIAMETRO) mm	
	CAPA SECUNDARIA	NUCLEO	CAPA SECUNDARIA	NUCLEO
TRAMO II ALTERNATIVA 2	1 a 1.5 Ton	5 a 400 Kg	18.45 a 21.11 mm	3.16 a 14.64 mm
TRAMO I ALTERNATIVA 2	800 a 1150 Kg	5 a 400 Kg	17.13 a 19.33 mm	3.16 a 14.64 mm
TRAMO I ALTERNATIVA 3	750 a 1200 Kg	5 a 750 Kg	16.77 a 19.61 mm	3.16 a 16.77 mm

TABLA 10.2 Rango de pesos y diámetros del enrocamiento de la capa secundaria y núcleo considerados para el estudio de estabilidad.

SENSOR	PROF. (m)	OLEAJE	STROKE	T _{1/3} (seg)	H' _n (m)
1 AGUAS INTERMEDIAS	27.09	1	100	17.5	3.83
		2	120	17.5	4.30
		3	140	17.5	5.03
		4	160	17.5	6.10
		5	180	17.5	6.53
		6	200	17.5	7.22
		7	220	17.5	7.91
		8	240	17.5	8.55
		9	260	17.5	9.37
2 FRENTE A ESTRUCTURAS	7.74	1	100	17.5	3.95
		2	120	17.5	4.13
		3	140	17.5	4.43
		4	160	17.5	4.47
		5	180	17.5	4.77
		6	200	17.5	4.81
		7	220	17.5	4.90
		8	240	17.5	4.90
		9	260	17.5	4.64

TABLA 10.3 Alturas de ola generadas en el modelo (valores de prototipo).

NOTA: T_{1/3} Período significativo del oleaje.
H' Altura de ola significativa equivalente en aguas profundas.

10.3 Construcción de las secciones de prueba en el canal.

Cada una de las secciones transversales del rompeolas fue construida sobre un fondo arenoso con pendiente de prototipo de 200:1 a una profundidad de desplante de 4.5 m (prototipo) referida al Nivel de Bajamar Media.

Dichas secciones se construyeron cuidadosamente tratando de respetar los rangos de pesos, espesores de las diferentes capas y elevaciones, utilizando las escalas de líneas y de pesos respectivamente.

En cada una de las secciones los elementos fueron colocados al azar, soltándolos manualmente uno a uno desde una altura de aproximadamente 10 cm., tratando de simular el trabajo de colocación de una grúa.

10.4 Condiciones de los ensayos de las secciones del rompeolas.

En todos los ensayos se tomaron en cuenta el nivel máximo del mar y las condiciones de oleaje extremo determinados en el capítulo 6.

Cada ensayo se sujetó al rango de alturas de ola de la Tabla 10.3, indicadas en valores de prototipo para periodos de ola de 2.67 seg (17.5 seg en prototipo).

El programa de ensayos y parámetros en términos de valores de prototipo se presentan en la Tabla 10.4.

Durante los ensayos, cada ola generada se dejó que atacara al rompeolas por un periodo de tiempo acumulativo de 20 min. El ángulo de ataque de la ola fue perpendicular al eje longitudinal del rompeolas.

Con el objeto de observar la disgregación de los elementos de coraza en caso de que ésta se produjera, la coraza del rompeolas se dividió en franjas, considerando para el caso de cubos 3 franjas; la primera comprendida entre el pie de la obra y el Nivel Medio del Mar, la segunda entre este nivel y el nivel de tormenta y la tercera entre el nivel de tormenta y la corona de la obra. En cada una de estas franjas se colocaron cubos pintados de diferentes colores. Para el caso de ensayos con enrocamiento, la coraza del rompeolas se dividió en 2 franjas, una entre el pie de la obra y el nivel de tormenta y otra entre éste nivel y la corona de la obra, colocando en cada franja rocas pintadas con colores diferentes.

En todos los ensayos se utilizó el espectro frecuencial de Bretschneider-Mitzuyatsu para calcular las señales de oleaje utilizadas. Las alturas de ola cerca de la estructura se midieron a una profundidad de 18.0 cm (7.74 m en prototipo).

TABLA 10.4

ENSAYOS DE ESTABILIDAD DE LOS ELEMENTOS DE CORAZA PARA EL ROMPEOLAS DE PROTECCION DE LA ZONA NORTE DEL PUERTO DE VERACRUZ, VER.

ENSAYO N°	SECCION TIPO PARA TRAMO II ⁽¹⁾		SECCION TIPO PARA TRAMO I		H' ⁽⁶⁾ (m) T (seg)	NIVEL DEL MAR ⁽²⁾ (m)	ELEVACION AL PIE (m)
	CORAZA EXTERIOR	CORAZA INTERIOR	CORAZA EXTERIOR	CORAZA INTERIOR			
1 (CUBOS)	P=14.35Ton ⁽³⁾ n=2 capas ⁽⁴⁾ t=2:1 ⁽⁵⁾	P= 8.50 Ton n=2 capas t=1.5:1			4 a 4.6 17.5	+3.30	-4.50
2 (CUBOS Y ROCA)			P=11.4 Ton (cubos) n=2 capas t=2:1	P = 4.5 a 7.2 Ton n=2 capas t=1.5:1	4 a 4.6 17.5	+3.30	-4.50
3 (ROCA)			P= 9-14 Ton n=2 capas t=2:1	P = 9 a 14 Ton n=2 capas t= 1.5:1	4 a 4.6 17.5	+3.30	-4.50
4 (ROCA)	P=9-14 Ton n=2 capas t=2.25:1	P=9-14 Ton n=2 capas t=1.5:1			4 a 4.6 17.5	+3.30	-4.50

NOTA: Todos los valores corresponden a prototipo.

- (1) Para ubicación de los tramos ver fig. 9.2.
- (2) El nivel de referencia fue el Nivel de Bajamar Media con elevación 0.00 m.
- (3) P = peso del elemento.
- (4) n = Número de capas de la coraza colocadas al azar.
- (5) t = Talud de la coraza.
- (6) Altura de ola frente a la obra.

11. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En la Tabla 10.4 se muestra el resumen de los ensayos realizados, donde se indican todos los valores a escala del prototipo. La descripción de las secciones ensayadas y resultados obtenidos se dan a continuación:

ENSAYO N° 1

Esta sección se construyó en el canal de oleaje de acuerdo con las dimensiones de la Fig. 9.2 (a), y que corresponde con el Tramo II de la Alternativa 2.

La sección se desplantó sobre el fondo arenoso del canal, colocando una plantilla de granzón de 1/4" de diámetro. Sobre esta plantilla se colocó el núcleo de la obra a base de roca con diámetro medio de 1/2". Sobre el núcleo se colocó la capa secundaria a base de roca de 1/2" a 3/4" de diámetro. Los diámetros anteriores se calcularon de acuerdo a la expresión dada en el inciso 10.2 y representan los rangos en peso del enrocamiento propuesto para la sección respectiva. Sobre la capa secundaria se colocaron al azar 2 capas de cubos de 180.48 gr (14.35 Ton prototipo) para la coraza exterior formando un talud de 2:1 y 2 capas al azar de cubos de 106.91 gr (8.5 Ton prototipo) para la coraza interior formando un talud de 1.5:1.

Terminada la sección, ésta se sometió al ataque de olas frontales, con alturas de ola de 9.30 a 10.69 cm (4.0 a 4.6 m prototipo) y periodo de 17.5 seg (prototipo). Cada altura de ola generada se dejó que atacara a la obra por un periodo de tiempo de 20 min, que representa un temporal de 2.19 hrs.

Durante el ensayo se observó lo siguiente:

- a) Para alturas de ola superiores a 4.0 m. el oleaje rebasó la corona de la obra.
- b) Los elementos de las corazas exterior e interior permanecieron estables.
- c) Por el rebasamiento del oleaje, únicamente se separaron las dos hileras de cubos colocados en la corona de la obra.

Cabe aclarar que esta sección permaneció estable durante todos los ensayos, por lo que se decidió comprobar su funcionamiento repitiendo el ensayo, cambiando la posición de los cubos, esto es, las hileras de cubos colocados en la parte superior de la coraza se colocaron al pie de la obra.

Con estas condiciones se probó la estructura y se observó lo mismo del ensayo anterior, como fue el rebasamiento del oleaje y la separación de las hileras de cubos en la corona.

La única diferencia de este ensayo fue que un solo cubo se movió de su sitio, el cual pasó del extremo superior de la coraza a la corona de la obra.

ENSAYO N° 2

Para este ensayo la sección se construyó de acuerdo con las dimensiones mostradas en la Fig. 9.2 (b), utilizando para la base, núcleo y capa secundaria de la obra, los mismos materiales del ensayo N°1, que corresponden con el Tramo I de la Alternativa 2.

En la coraza exterior se colocaron 2 capas al azar de cubos de 143.38 gr. (11.4 Ton en prototipo) formando un talúd de 2:1 y en la coraza interior se colocaron 2 capas al azar de rocas de 56.59 a 90.55 gr (4.5 a 7.2 Ton, prototipo) formando un talúd de 1.5:1.

La sección, así construida fue sometida a las mismas condiciones de oleaje del ensayo anterior, observándose lo siguiente:

- a) Durante los ensayos se presentó el rebase del oleaje sobre la corona de la obra, para alturas de ola superiores a 4.0 m.
- b) En todos los ensayos los elementos tanto de coraza exterior como interior permanecieron estables, no sufriendo ningún daño la estructura.

ENSAYO N° 3

Esta serie de ensayos fue realizada de acuerdo con las dimensiones indicadas en la Fig. 9.2 (c), Tramo I de la Alternativa 3, donde se utilizaron como elementos de coraza exterior rocas de 113.19 a 176.08 gr (9 a 14 Ton en prototipo). La coraza exterior se formó en 2 capas de elementos colocados al azar sobre un talúd de 2:1 y la interior con 2 capas de elementos colocados al azar sobre un talúd de 1.5:1.

El ensayo realizado con las mismas condiciones de oleaje de los ensayos N° 1 y 2 mostró lo siguiente:

- a) Con olas superiores 4.0 m de altura, la corona de la estructura es rebasada.
- b) Las rocas utilizadas en este ensayo fueron lo suficientemente pesadas para resistir el oleaje, por lo que no se presentó ningún daño sobre la estructura.

ENSAYO N° 4

Este ensayo se realizó construyendo la sección de acuerdo con las dimensiones de la Fig 9.2 (d), Tramo II Alternativa 3, utilizando como elementos de coraza exterior los mismos del ensayo N°3, cambiando únicamente el talúd exterior de la sección, de 2:1 a 2.25:1.

Esta sección presentó las mismas condiciones de estabilidad de la sección del ensayo 3, no fallando ningún elemento tanto de la coraza exterior como de la interior.

12. CONCLUSIONES

De los ensayos realizados en modelo hidráulico para el rompeolas de protección, se tienen las siguientes conclusiones:

- a) Para olas superiores a 4.0 m de altura medidas a una profundidad de 7.74 m frente a la obra, el coronamiento de la estructura es rebasado provocando con esto que las dos hileras de cubos colocados ordenadamente lado con lado sobre la corona de la obra sean desalineados, Alternativa N°2 Tramo II.
- b) Los cubos de concreto de 14.35 Ton y 11.40 Ton propuestos en la Alternativa N°2, para la coraza exterior del rompeolas, en los tramos I y II, son lo suficientemente pesados para resistir el ataque de olas de tormenta de hasta 4.60 m de altura frente a la estructura.
- c) Los cubos de concreto de 8.5 Ton propuestos en la Alternativa N°2 y Tramo II, para la coraza interior del rompeolas, no presentaron ninguna falla durante los ensayos.
- d) Las rocas de 4.5 a 7.2 Ton propuestas en la Alternativa N°2 y Tramo I, para la coraza interior del rompeolas no presentaron ninguna falla de estabilidad.
- e) Las rocas de 9 a 14 Ton propuestas en la alternativa N°3 para la coraza exterior e interior en toda la longitud del rompeolas, son estables al ataque del oleaje de tormenta de 4.60 m de altura y 17.5 seg. de período.

REFERENCIAS

- 1.- ALEPH S.A. DE C.V. (1990) : "PLAN DE DESARROLLO DEL PUERTO DE LA ANTIGUA, VER."; ESTUDIOS FISICOS GENERALES, TOMO 1, elaborado para Puertos Mexicanos.
- 2.- Centro de Previsión del Golfo de México de la Comisión Nacional del Agua : "NUMERO ANUAL DE NORTES QUE AFECTAN AL PUERTO DE VERACRUZ, VER."
- 3.- Centro de Previsión del Golfo de México de la Comisión Nacional del Agua : "TIEMPO DE ACCION ANUAL DE LOS NORTES QUE AFECTAN EL PUERTO DE VERACRUZ, VER."
- 4.- C.E.R.C. (1984) : "SHORE PROTECTION MANUAL". VOL. I Y II. Department of The Army Corps of Engineers, Third Edition.
- 5.- Consultoría Técnica. (1981) : "INFORME DEL PROYECTO DEL NUEVO ACCESO CARRETERO AL AREA INDUSTRIAL DE SAN JUAN DE ULUA, VER.", elaborado para la Dirección General de Obras Marítimas.
- 6.- Defense Mapping Hydrographic Center of the U.S.A. (1975) : "PORTULANO NORTH AMERICA, MEXICO-EAST COAST, TAMPICO TO PROGRESO."
- 7.- Dirección General de Oceanografía de la Secretaría de Marina de México. (1993) : "PORTULANO MEXICO-COSTA ESTE, VERACRUZ Y PROXIMIDADES."
- 8.- Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. (1993) : "TABLAS DE PREDICCIÓN DE MAREAS DEL GOLFO DE MEXICO Y MAR CARIBE."
- 9.- Sato S. y Guerrero M. J. E. (1994) : "SIMULACION NUMERICA DE LA TRANSFORMACION DEL OLEAJE IRREGULAR EN LA COSTA.". Segundo Curso Internacional de Capacitación en Hidráulica Portuaria - Segunda Etapa; Curso organizado por Puertos Mexicanos y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).

- 10.- Sato S. y Heredia D. J. I. (1994) : "PRONOSTICO DEL OLEAJE CAUSADO POR CICLON SOBRE ALGUN PUNTO DE LA COSTA.". Segundo Curso Internacional de Capacitación en Hidráulica Portuaria - Segunda Etapa; Curso organizado por Puertos Mexicanos y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).
- 11.- SEAPROD S.A. DE C.V. (1994) : "LEVANTAMIENTO BATIMETRICO DE LA BAHIA DE VERGARA; PUERTO DE VERACRUZ, VER.", elaborado para la API de Veracruz.
- 12.- Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua : "TRAYECTORIAS CICLONICAS Y CARTAS ISOBARICAS DE LOS CICLONES OCURRIDOS DE SEPTIEMBRE DE 1955 A OCTUBRE DE 1985 EN LA ZONA DEL PUERTO DE VERACRUZ, VER."
- 13.- Takayama, T. et. al. (1991) : "PRACTICAL COMPUTATION METHOD OF DIRECTIONAL RANDOM WAVE TRANSFORMATION". VOL. 30 No. 1. Report of Port and Harbour Reseach Institute, Ministry of Transport, Japan.