

36  
24.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGÓN**

**“ESTUDIOS Y PROYECTOS PARA  
LA RECONSTRUCCION DE LOS  
ESPIGONES INTERIORES DEL  
PUERTO DE ALTAMIRA,  
TAMAULIPAS”**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO CIVIL**  
**P R E S E N T A**  
**SERGIO ORTIZ TAPIA**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MÉXICO

1997



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ARAGÓN  
D.F. MÉXICO

SERGIO ORTIZ TAPIA  
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 25 de marzo del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. JOSÉ MIGUEL MONTOYA RODRÍGUEZ pueda dirigite el trabajo de Tesis denominado, "ESTUDIOS Y PROYECTOS PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LOS ESPIGONES INTERIORES DEL PUERTO DE ALTAMIRA TAMAULIPAS", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México., 3 de abril de 1997  
EL DIRECTOR.

M en F CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO

c c p Jefe de la Unidad Académica.  
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil.  
c c p Asesor de Tesis.

CCMC/A/R/11a.

Cy2  
21

**A MIS PADRES:**

BRIGIDO ORTIZ MONTAÑO.  
OBDULIA TAPIA MARTINEZ. ( D. E. P. )

Por haberme engendrado y brindarme la oportunidad de conocer este mundo, en especial a mi madre, por que sé, que nunca me ha dejado sólo.

**A DIOS:**

Por haberme dado lo mas valioso; la vida.

**A MIS HERMANOS:**

JORGE.  
GAUDENCIO.  
EUSEBIO.  
OBDULIA.

Por ser la fuente de inspiración.

**A MIS FAMILIARES:**

A todos y a cada uno de ellos, por que de una u otra manera, contribuyeron en mi formación, tanto profesional como humana.

**A MI MEJOR AMIGO:**

Gracias por tus sabios consejos, que supo despertar en mí, el deseo de superación, te agradezco de antemano el gran apoyo moral y economico que me has brindado, hoy con orgullo te puedo decir " MEJIA este titulo es para ti ".

**A LOS INGENIEROS:**

JOSE MIGUEL MONTOYA RODRIGUEZ.  
ENRIQUE ORTA SALINAS.  
VALENTE TORRES ORTIZ.  
JESUS IGNACIO HEREDIA DOMINGUEZ.  
DORA LUZ AVILA ARZANI.  
ROLANDO MADRID MONTES DE OCA.

Por su amistad, y apoyo para la elaboración de este trabajo.

## INTRODUCCIÓN.

Las obras exteriores de un puerto se pueden clasificar en escolleras, rompeolas y espigones. La función de los rompeolas como su nombre lo indica, es disipar la energía del oleaje para crear zonas de aguas tranquilas donde los barcos pueden efectuar maniobras diversas para la carga y/o descarga de mercancías.

Adicionalmente a esta función básica el rompeolas puede desempeñar otras complementarias que condicionan, en buena medida, el diseño de estas obras. Este tipo de obras también dan protección en contra del transporte litoral de canales de navegación, al mismo tiempo que encauzan corrientes fluviales, de mareas o arroyos. Esta función establece una diferencia conceptual entre un rompeolas propiamente dicho y una escollera, que es el caso de las obras para este tipo de protección.

Los espigones son estructuras cuya función es dar protección a zonas costeras contra la erosión y/o azolvamiento. El proyecto de las obras exteriores de un puerto, requiere de la consideración de las características del oleaje, de las de las corrientes y de las características del subsuelo en donde se construyen las obras exteriores en cuestión.

El objeto de esta tesis es presentar el proceso metodológico para realizar el diseño de la sección transversal de espigones de protección contra el azolvamiento, aplicando dicho proceso a la reconstrucción de los espigones interiores del puerto de Altamira.

Para tal efecto, el desarrollo de este trabajo se ha integrado en seis capítulos como sigue:

En el capítulo I, se presentan los antecedentes y localización de la zona de estudio.

En el capítulo II, se enlistan las fuentes de información recopiladas y se presenta el procesamiento y análisis de dicha información.

En el capítulo III, se presenta la metodología utilizada para pronosticar las características del oleaje ciclónico y de la marea de tormenta, y se aplica dicha metodología para algunos ciclones que han afectado a la zona de estudio.

En el capítulo IV, se presenta la metodología utilizada para calcular la retracción del oleaje mediante el uso de un modelo numérico. Dicha metodología se aplica para propagar el oleaje ciclónico de la zona de aguas profundas a la zona frente a los morros de las escolleras del puerto en estudio.

En el capítulo V, se presenta la metodología para calcular la agitación del oleaje mediante el uso de un modelo numérico. Dicha metodología se aplica para propagar el oleaje de la zona frente a los morros de las escolleras a la zona interior del puerto donde se localizan los espigones interiores.

En el capítulo VI, se definen los oleajes de diseño para la reconstrucción de los espigones interiores, y se define el proyecto ejecutivo correspondiente.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones resultantes del desarrollo del presente trabajo.

# C O N T E N I D O

Pág.

	INTRODUCCION.	I
I	ANTECEDENTES.	1
II	RECOPIACION DE INFORMACION.	3
	2.1. Fuentes de información consultadas.	3
	2.2 Analisis de la información recopilada.	5
	2.1.1 Estudios en modelos y proyecto de obras exteriores Puerto Industrial Altamira Tamaulipas.	5
III	ESTUDIOS DE PREDICION DE OLEAJE CICLONICO Y DE MAREA DE TORRENTA.	8
	3.1. Información del medio físico.	8
	3.1.1. Marea astronómica.	
	3.1.2. Batimetría.	8
	3.1.3. Ciclones.	9
	3.2. Predicción del Oleaje ciclónico.	15
	3.2.1. Oleaje producido por ciclones.	15
	3.2.1.2. Método de predicción de oleaje.	15
	3.2.2. Altura de ola de diseño.	20
	3.2.3. Altura y período de ola de diseño.	23
	3.2.4. Direcciones del oleaje en la zona de aguas profundas.	25
	3.2.5. Sobreelevación por marea de tormenta.	28
IV	ESTUDIOS DE REFRACCION Y AGITACION DE OLEAJE.	31
	4.1. Modelación numérica de la refracción del oleaje.	31
	4.1.1 Método de cálculo.	31
	4.1.2 Modelación matemática.	40
	4.1.2.1 Mallas de discretización de profundidades.	40

4.1.2.2	Condiciones de la modelación.	40
4.1.2.3	Resultados.	41
4.2.	Modelación matemática de la agitación del oleaje.	53
4.2.1	Descripción del modelo matemático utilizado.	53
4.2.1.1	Consideraciones particulares para la condición de oleaje regular.	53
4.2.1.2	Coefficiente de difracción.	56
4.2.1.3	Consideraciones particulares para la condición de oleaje irregular.	57
4.2.1.3.1	Espectro frecuencial.	57
4.2.1.3.2	Espectro direccional.	61
V	DEFINICION DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO.	65
5.1	Condiciones de las simulaciones numéricas.	
5.1.1	Condiciones de oleaje.	65
5.1.2	Batimetría.	65
5.1.3	Resultados.	65
VI	PROYECTO DE RECONSTRUCCION DE LOS ESPIGONES INTERIORES DEL PUERTO DE ALTAMIRA TAMAULIPAS.	70
6.1	Cálculo teórico del peso de los elementos de la coraza en los morros de los espigones Norte y Sur.	70
6.2	Cálculo teórico del peso de los elementos del núcleo en los morros de los espigones Norte y Sur.	73
6.3	Cálculo teórico del peso de los elementos de la coraza en los cuerpos de los espigones Norte y Sur.	74
6.4	Cálculo teórico del peso de los elementos del núcleo en los cuerpos de los espigones Norte y Sur.	75



6.5	Geometría de los espigones	76
6.6	Cálculo de los anchos de corona	77
6.7	Niveles de corona en morro y cuerpo de los espigones Norte y Sur	77
6.8	Características de las secciones.	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		82
REFERENCIAS		88

## CAPITULO I. ANTECEDENTES.

La zona de estudio se localiza al norte del puerto de Tampico, Tamps., en la Latitud Norte 23° 30' y Longitud Oeste 97° 50' en el sitio conocido como Laguna de Altamira, quedando limitada al norte por la Boca de Chavarria y al sur por el Puerto de Tampico.

De conformidad con el proyecto ejecutivo de las obras exteriores de protección, de 1981 a 1985 se construyeron las escolleras Norte y Sur, con longitudes de 1,188 y 980 m respectivamente, no llegándose a construir las longitudes totales de dichas escolleras, contempladas en el proyecto original.

En virtud de lo anterior, con el objeto de estabilizar los márgenes norte y sur del canal de acceso, se construyeron de 1981 a 1982 los espigones norte y sur, con longitudes de 165 y 240 m respectivamente.

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 que han afectado a la zona de estudio, los resultados obtenidos de la sobrelevación del nivel del mar por marea de tormenta, la metodología y los resultados obtenidos al aplicar modelos matemáticos de refracción y agitación del oleaje para propagar de aguas profundas a la zona donde se pretenden reconstruir los espigones interiores de la zona de estudio, así como la metodología utilizada para la realización del proyecto ejecutivo de reconstrucción de dichos espigones.

En la Fig. 1.1 se indica la disposición del puerto de Altamira en la zona antes señalada.

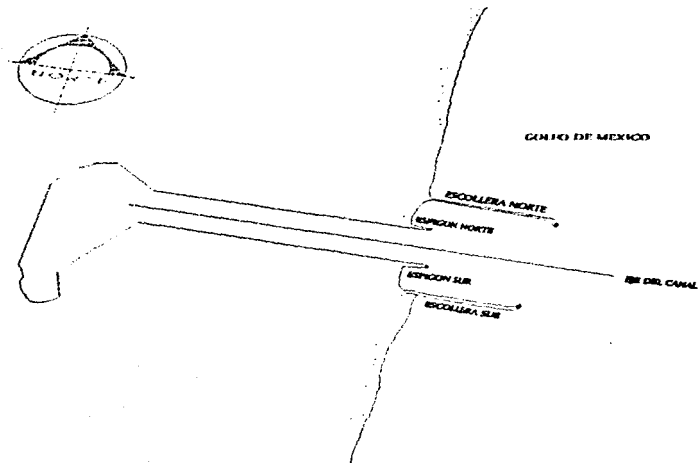


Fig. 1.1 Localización de la zona de estudio

## **CAPITULO II. RECOPIACION DE INFORMACION.**

### **2.1 FUENTES DE INFORMACION CONSULTADAS.**

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

- ESTUDIOS EN MODELOS Y PROYECTO DE OBRAS EXTERIORES; PUERTO INDUSTRIAL ALTAMIRA TAMAULIPAS. Elaborado en septiembre de 1982 por la empresa Consultores en Ingeniería FluvioMarítima "CIFSA", para la Dirección General de Obras Marítimas de la S.C.T.
- PRIMERA BATIMETRIA GENERAL PERIODICA Y CANAL DE ACCESO DEL PUERTO DE ALTAMIRA. Elaborada en septiembre de 1983 por la empresa " CIFSA " para la Dirección General de Obras Marítimas de la S.C.T.
- LEVANTAMIENTO BATIMETRICO DE RECONOCIMIENTO; CANAL DE NAVEGACION ENTRE ESCOLLERAS CADENAMIENTOS 0+000/-2-000 DEL PUERTO DE ALTAMIRA, TAMP. Elaborado en enero de 1996 por la empresa constructora " VINAROE, S.A. de C.V. " para la Administración Portuaria Integral de Altamira, S.A. de C.V.
- LEVANTAMIENTO BATIMETRICO PLANO PROTOTIPO CANAL DE ACCESO EXTERIOR, INTERIOR Y DARSENAS DEL PUERTO INDUSTRIAL DE ALTAMIRA, TAMP. Elaborado en marzo de 1996 por la empresa constructora " VINAROE, S.A. de C.V. " para la Administración Portuaria Integral de Altamira, S.A. de C.V.
- PORTULANO NORTH AMERICA, MEXICO-EAST COAST, TAMPICO TO PROGRESO. Elaborado en julio de 1975 por la Defense Mapping Hydrographic Center of the U.S.A
- PORTULANO MEXICO COSTA ESTE, PUNTA JEREZ A TAMPICO. Dirección General de Oceanografía Naval de la Secretaría de Marina.

- TABLAS DE PREDICCIÓN DE MAREAS PARA EL PUERTO DE ALTAMIRA, TAMPS. Editadas en 1992 por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.
- TRAYECTORIAS CICLONICAS Y CARTAS ISOBARICAS DE LOS CICLONES OCURRIDOS DE SEPTIEMBRE DE 1961 A OCTUBRE DE 1995 EN LA ZONA DEL PUERTO DE ALTAMIRA, TAMPS. Información recopilada en el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua.

La información listada con anterioridad 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.

## 2.2. ANALISIS DE LA INFORMACION RECOPILADA

### 2.2.1 ESTUDIOS EN MODELOS Y PROYECTO DE OBRAS EXTERIORES PUERTO INDUSTRIAL ALTAMIRA TAMAULIPAS.

Este trabajo consistió en la realización de los estudios en modelos hidráulicos, proyectos de obras exteriores y proyectos de obras de protección playera para el Puerto Industrial de Altamira, Tamp., [3].

Los objetivos definidos en la realización de los estudios y proyectos en este trabajo fueron los siguientes:

- 1) Analisis de diversas alternativas para la disposición final de obras exteriores, que tomando en cuenta los requerimientos planteados para la primera etapa de desarrollo portuario industrial y las condiciones físicas de la zona, permitiera obtener condiciones adecuadas para navegación, maniobrabilidad de embarcaciones y agitación en las dársenas portuarias, y al mismo tiempo que permitiera un mayor tiempo de operación del puerto.
- 2) Realización de estudios en modelo hidráulico en canal de olas, con la finalidad de estudiar la estabilidad de las secciones de los rompeolas.
- 3) Realización de estudios en modelo hidráulico en tanque de merros, con la finalidad de estudiar y visualizar en tres dimensiones, la estabilidad de los rompeolas en sus puntos críticos como son: los merros y los puntos de inflexión.
- 4) Realización de estudios en modelo hidráulico de fondo fijo, con la finalidad específica de determinar las características generales de las obras exteriores, que permitieran condiciones adecuadas de agitación en el antepuerto y canal de acceso a la dársena portuaria, en condiciones de oleaje normal y de oleaje producido por los nortes y ciclones que se presentan en la zona. Así como la revisión de las condiciones de agitación para las diferentes etapas de construcción de los rompeolas.
- 5) Realización de estudios cualitativos en modelo hidráulico de fondo móvil, con la finalidad específica de visualizar y determinar indicaciones de tipo general sobre la evolución playera y el efecto de las obras sobre la misma.
- 6) Tomando como base los estudios en modelos hidráulicos, definir el proyecto a detalle de las diferentes obras exteriores requeridas para dar protección al canal de acceso, y para evitar problemas de azolvamiento y erosiones que se pudieran presentar en el sitio de estudio.

Cabe mencionar que de todos los antecedentes recopilados en este trabajo, la información correspondiente al proyecto original de los espigones interiores servirá únicamente como base general para la realización del proyecto ejecutivo de reconstrucción de dichas estructuras, en virtud de lo siguiente:

1) Por lo que corresponde al tratamiento de los oleajes de diseño, en el trabajo de referencia se menciona que "los estudios realizados para proyectar las obras exteriores del puerto Industrial de Altamira, Tamaulipas, mostraron que a pesar de la falta de información suficiente sobre el oleaje que se tenía para la zona, estas podrían proyectarse con la base estadística existente y con el apoyo de los modelos reducidos", no indicándose en dicha referencia las características de los oleajes (altura, periodo y dirección) con los que se probaron en los modelos hidráulicos de estabilidad las secciones de los rompeolas y espigones interiores.

2) Por lo que corresponde específicamente a los espigones interiores, en el trabajo de referencia se menciona que "complementariamente a las obras exteriores, se consideró necesario el construir, para proteger el canal de acceso al interior de la dársena portuaria 2 espigones de 150 m cada uno, a 150 m del eje de los rompeolas norte y sur respectivamente, continuados por un pedraplen de protección del cordón litoral en 200 m a partir de los cuales se dejara una zona de 200 m; a fin de que se produzca la expansión lateral del oleaje a ambos lados de las obras citadas, constituyendo con esto los senos de escollera". Las características de las obras de disipación de energía en el canal de acceso de conformidad con el proyecto original se presentan en la Fig. 1.2.

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.

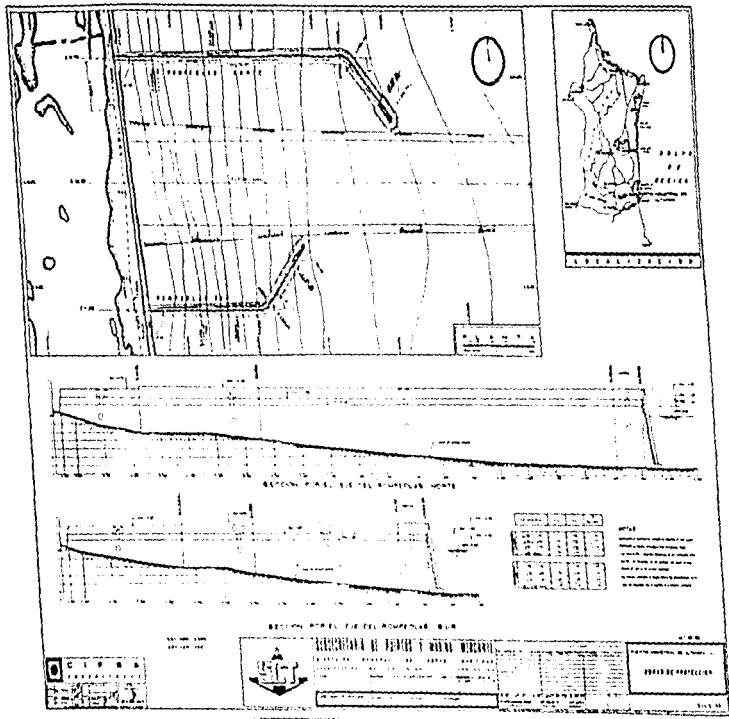


Fig. 1.2 Proyecto original de las obras de disipación de energía en el canal de acceso



**CAPITULO III. ESTUDIOS DE PREDICCION DE OLEAJE CICLONICO Y DE MAREA DE TORMENTA.**

**3.1. INFORMACION DEL MEDIO FISICO**

**3.1.1. Marea astronómica**

Con respecto a los niveles de marea astronómica, cabe mencionar que en la zona de estudio se cuenta con un periodo de observaciones del 8 abril al 31 de mayo de 1985, realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM, quien analizó dichos registros y publicó los siguientes niveles de marea representativos [6]:

NIVEL REPRESENTATIVO DEL MAR	ELEVACION RESPECTO AL N.M.M. (m)	ELEVACION RESPECTO AL N.B.M. (m)
Pleamar media superior	0.808	1.671
Pleamar media	0.712	1.575
Nivel medio del mar	0.000	0.863
Bajamar media	-0.863	0.000
Bajamar medio interior	-1.041	-0.178

\* Nivel medio del mar

\*\* Nivel de bajamar media

**3.1.2. Batimetría**

En lo referente a la información batimétrica, se recopiló el plano denominado "LEVANTAMIENTO DE RECONOCIMIENTO, CANAL DE NAVEGACION ENTRE ESCOLLERAS, CADENAMIENTOS 0+000/-2-000, ALTAMIRA, TAM." [1], dicho levantamiento cubre un frente marítimo de aproximadamente 2.0 Km, abarcando las profundidades comprendidas entre la 0.00 y - 13.00 m.

En relación a la batimetría interior (zona entre escolleras), se utilizó la información contenida en el plano denominado "PLANO PROTOTIPO, CANAL DE ACCESO EXTERIOR, INTERIOR Y DARSENAS, PUERTO INDUSTRIAL DE ALTAMIRA, TAMP", así mismo se utilizó la información batimétrica contenida en el plano denominado " PRIMERA BATIMETRIA GENERAL PERIODICA Y CANAL ACTUAL " con numero E y L 3.171, dicho levantamiento batimétrico cubre un frente marítimo de aproximadamente 10 Km. y abarca profundidades comprendidas entre la 0.00 y -17.0 m.

Para complementar la información batimétrica de la zona de estudio, se utilizó la información contenida en el portulano "MEXICO-COSTA ESTE, TAMPICO A PROGRESO", publicado en 1977 por la Dirección General de Oceanografía Naval de la Secretaría de Marina [4] y el portulano "MEXICO COSTA ESTE, PUNTA JEREZ A TAMPICO", publicado en mayo de 1994 por la Dirección General de Oceanografía Naval de la Secretaría de Marina. [5].

### 3.1.3. Ciclones

Para contar con información oceanográfica y meteorológica, misma que rige en el diseño de las obras de protección en cuestión, se efectuó una recopilación de información de los datos meteorológicos de los ciclones que han ocurrido en la zona de estudio [9].

Dicha información se utilizó para determinar los valores extremos de las alturas y periodos de ola significantes en aguas profundas, así como para determinar los niveles de sobre elevación del mar por marea de tormenta. Para tal efecto, se recopiló la información de 9 ciclones ocurridos del 8 de septiembre de 1961 al 9 de octubre de 1995, la cual cubre las trayectorias ciclónicas indicadas en las Fig. 3.1 a Fig. 3.9 y las cartas isobáricas correspondientes a las fechas indicadas en la Tabla 3.1.

NOMBRE DEL CICLON	FECHA
CAPLA	05-SEP/61
INES	07-NOV/66
FERN	03-OCT/67
CAPOLINE	29-AGO/75
ELOISE	20-SEP/75
ALLEN	04-AGO/80
GILBERT	10-SEP/86
OPAL	30-SEP/95
ROXANNA	09-OCT/95

Tabla 3.1 Ciclones seleccionados para analizar el oleaje de tormenta de la zona de estudio

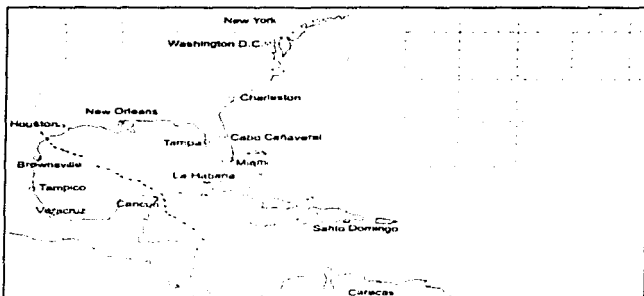


Fig. 3.1 Trayectoria del ciclón Carla que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 8 al 10 de septiembre de 1961.

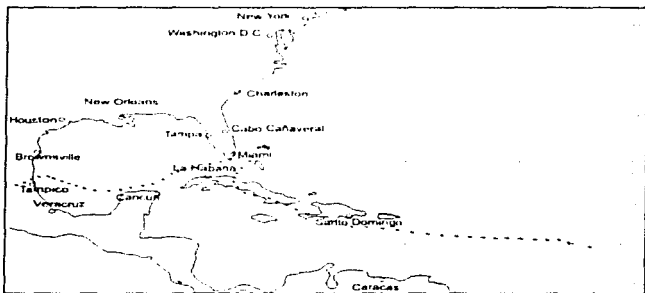


Fig. 3.2 Trayectoria del ciclón Inés que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 7 al 8 de noviembre de 1966.

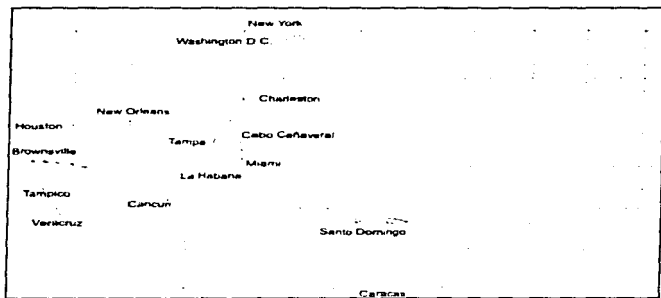


Fig. 3.3 Trayectoria del ciclón Fern que afectó a la zona de estudio el 3 de octubre de 1967.

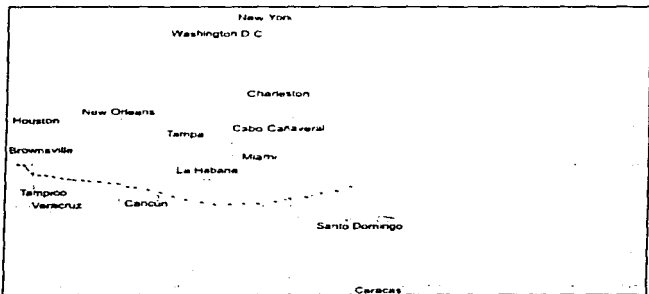


Fig. 3.4 Trayectoria del ciclón Caroline que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 29 al 31 de agosto de 1975.

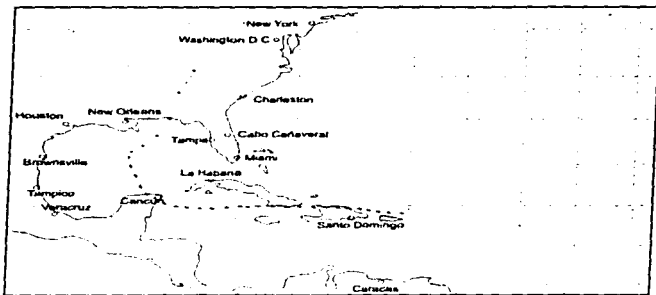


Fig. 3.5 Trayectoria del ciclón Eloise que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 20 al 23 de septiembre de 1975.

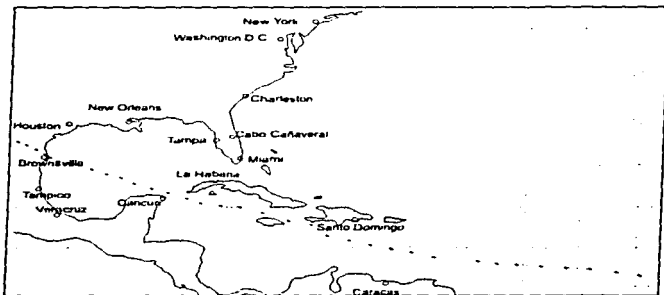


Fig. 3.6 Trayectoria del ciclón Allen que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 4 al 10 de agosto de 1980.

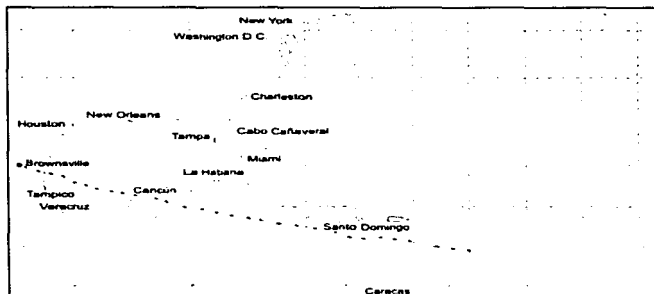


Fig. 3.7 Trayectoria del ciclón Gilbert que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 10 al 16 de septiembre de 1988.

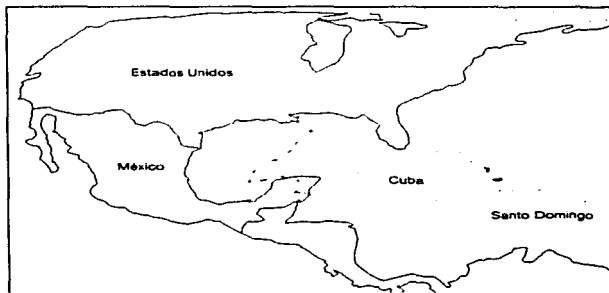


Fig. 3.8 Trayectoria del ciclón Opal que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 30 de septiembre al 3 de octubre de 1995.

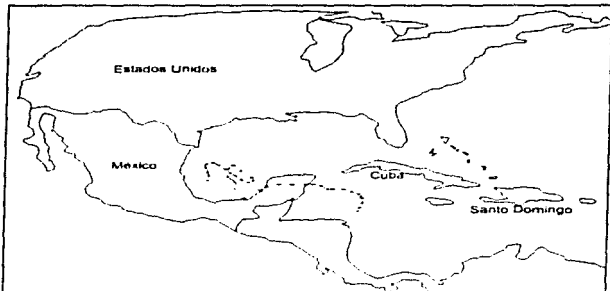


Fig. 3.9 Trayectoria del ciclón Roxanna que afectó a la zona de estudio durante el periodo del 9 al 20 de octubre de 1995.

### 3.2. PREDICCIÓN DEL OLEAJE CICLÓNICO.

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 este capítulo con 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 isobáricas (cartas sinópticas del tiempo). Cabe mencionar que los oleajes de tormenta producidos por los nortes, no fue posible obtenerlos por no disponer de información meteorológica (velocidades y duraciones) de dichas perturbaciones.

#### 3.2.1. Oleaje producido por ciclones

##### 3.2.1.1 Método de predicción de oleaje

La determinación de los oleajes producidos por ciclones se realizó utilizando el método reportado por Goto y Aono [8], 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 periodos 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:

$$A(\omega, D) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{3.54 \times 10^{-11} \cdot \omega^{3.25} \cdot D^{2.25}}{\left[ \frac{1}{4} \left( \frac{\omega}{D} \right)^2 - (K \sin \theta)^2 \right] \left[ \frac{1}{9} \left( \frac{\omega}{D} \right)^{2.5} + (k \cdot \cos \theta - \frac{\omega}{U})^2 \right]} d\theta$$



**B** : Es un coeficiente expresado como sigue:

$$B(\omega, U) = \left[ 5 \cdot \exp \left\{ -7000 \left[ \left( \frac{U^*}{C} \right) - 0.031 \right]^2 \right\} \right. \\ \left. + 2612 \left( \frac{U^*}{C} \right) \exp \left\{ -0.0004 \left( \frac{U^*}{C} \right)^3 \right\} \right] \frac{\omega}{2\pi}$$

- $\omega$**  : 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** : Numero 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:

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

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

$\omega$  y K se relacionan por las siguientes ecuaciones:

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

$$S_{pm}(f, U) = \alpha g^3 (2\pi)^{-4} f^{-3} \exp \left\{ -\beta \left( \frac{g}{2\pi U f} \right)^4 \right\}$$

Donde :

- $S_{pm}(f, U)$  : Espectro frecuencial de Pierson y Moskowitz  
 $g$  : Aceleración de la gravedad  
 $f$  : Frecuencia de la componente del oleaje  
 $U$  : Velocidad del viento  
 $\alpha$  : Coeficiente  
 $\beta$  : Coeficiente

En este trabajo, a los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  se les asignaron los valores de 0.0081 y 0.74 respectivamente.

$$V = \sqrt{(rf_c \operatorname{sen}\phi)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{dp}{dx}} = rf_c \operatorname{sen}\phi$$

Donde:

- $r$  : Radio de curvatura de la isobara, medido desde el centro del ciclón.  
 $f_c$  : Velocidad angular de la rotación de la tierra, igual a  $7.29 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$   
 $\phi$  : Latitud del centro del ciclón  
 $dp/dr$  : Pendiente de la presión atmosférica

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

Donde :

- P** : Distribución de presión dentro del ciclón  
 **$\Delta p$**  : Diferencia de presión atmosférica entre el centro y exterior del ciclón  
 **$r_c$**  : Distancia entre el punto del máximo viento y el centro del ciclón  
 **$P_c$**  : Presión del centro del ciclón

$$H_{1/3} = 2.83 \cdot \sqrt{2 \cdot \bar{m}_0} = 4.0 \sqrt{\bar{m}_0}$$

$$\bar{m}_0 = \int_0^{\infty} S(f) df = \int_{0.04}^{0.33} S(f) df + \int_{0.33}^{\infty} S(f) df$$

El periodo del oleaje significativo ( $T_{1/3}$ ), se calcula con el periodo promedio del oleaje ( $T$ ) con las siguientes ecuaciones:

$$T = \frac{\bar{m}_0}{\bar{m}_1} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} S(f) df}{\int_0^{\infty} f^2 S(f) df}}$$

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

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.

A continuación se presenta en la tabla 3.1. las características del oleaje, provocado por el ciclón CARLA; donde así como está se tienen que resumir para cada uno de los ciclones analizados.

AÑO	MES	DIA	HORA	H <sub>10</sub> (m)	T <sub>10</sub> (°C)	DIRECCION DEL OLEAJE (grados)	CARACTERISTICAS DEL VIENTO	
							VEL. (Km/hr)	DIR. (grados)
1961	9	8	6	0.03	0.00	70.0	9.1	122.9
1961	9	8	8	0.05	0.00	69.0	9.8	122.1
1961	9	8	10	0.09	0.00	69.0	10.6	121.3
1961	9	8	12	0.12	0.40	66.0	10.4	101.2
1961	9	8	14	0.21	6.92	63.0	12.8	100.1
1961	9	8	16	0.32	7.62	60.0	15.4	99.0
1961	9	8	18	0.51	8.55	55.0	14.8	85.6
1961	9	8	20	0.76	9.64	49.0	16.8	88.6
1961	9	8	22	1.11	10.97	44.0	16.8	90.8
1961	9	9	0	1.56	12.61	37.0	17.0	114.0
1961	9	9	2	2.16	14.47	34.0	19.2	118.0
1961	9	9	4	2.78	16.00	32.0	20.0	123.6
1961	9	9	6	3.25	16.70	31.0	14.1	110.4
1961	9	9	8	3.50	16.67	30.0	17.1	110.7
1961	9	9	10	3.56	16.07	31.0	19.8	111.4
1961	9	9	12	3.47	15.06	32.0	22.4	111.9
1961	9	9	14	3.43	14.20	35.0	24.6	112.7
1961	9	9	16	3.61	14.03	38.0	26.4	113.7
1961	9	9	18	4.01	14.58	41.0	25.6	119.1
1961	9	9	20	4.44	15.20	43.0	28.2	123.7
1961	9	9	22	4.76	15.46	45.0	28.8	128.4
1961	9	10	0	4.94	15.62	46.0	28.3	133.9
1961	9	10	2	5.03	12.82	47.0	22.0	137.6
1961	9	10	4	4.83	15.06	48.0	17.2	141.2
1961	9	10	6	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0

Tabla 3.1 Historia en el tiempo de las características del oleaje significativo en aguas profundas generado por el ciclón CARLA

Tomando en consideración los resultados de las Tablas como la 3.1 para cada uno de los ciclones se seleccionaron los valores mínimos, medios y máximos de las alturas y periodos del oleaje significativo, los resultados obtenidos se indican en la Tabla 3.2

Nombre del ciclón	Altura de ola Significante $H_s$ (m)			Período de ola Significante $T_p$ (seg)		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
CARLA	0.12	2.78	5.03	6.40	13.08	16.70
INES	0.05	1.08	3.02	6.14	10.91	14.10
FERN	0.25	1.58	3.72	5.75	12.08	13.23
CAROLINE	0.10	1.77	3.26	5.90	11.84	15.62
ELOISE	0.11	2.75	4.26	6.63	14.15	20.64
ALLEN	0.31	1.93	2.51	12.93	17.99	26.51
GILBERT	0.10	2.70	6.24	2.62	15.08	20.10
OPAL	0.11	2.32	5.35	5.64	9.66	15.28
ROXANNA	0.14	1.70	4.92	5.94	8.55	13.82

Tabla 3.2 Valores mínimos, medios y máximos de las alturas y periodos de ola significantes en aguas profundas producidas por los ciclones analizados

### 3.2.2 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 periodo de retorno ( $T_r$ )  
 $a$  : Media ( $\mu$ ) de la función de densidad de Weibull, calculada con la siguiente ecuación:

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

- $\beta$  : Parámetro de la función de densidad de Weibull, el cual se obtiene a partir del coeficiente de variación "cv" expresado como sigue:

$$CV = a / X$$

- $\Gamma$  : Función gamma expresada por  $\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$

- $\sigma$  : 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 analizados, se agruparon conforme a lo indicado en la Tabla 3.2 a fin de aplicar la metodología antes descrita en el método de Weibull.

Con los datos de los valores medios y máximos de las alturas de ola significantes presentadas en la Tabla 3.2, se calculó el valor de las variables y parámetros utilizados en la distribución de Weibull, los resultados obtenidos se indican en la Tabla 3.3

Concepto	Valores estadísticos de las alturas de ola medias	Valores estadísticos de las alturas de ola máximas
Media	2.160 m	4.256 m
Desviación estandar	0.605 m	1.228 m
Coefficiente de variación	Cv=0.280	Cv=0.288
Parámetro	$\beta=4.00$	$\beta=3.90$
Parámetro	$\alpha=2.38$	$\alpha=4.70$

Tabla 3.3 Resumen de las variables y parámetros utilizados en la distribución de Weibull

Los resultados del cálculo de los periodos de retorno asociados a las alturas de olas consideradas conforme a la distribución de weibull se presentan en la Tabla 3.4.

Periodo de retorno	Variable aleatoria media	Variable aleatoria máxima	Pobabilidad de no excedencia
$T=1/(1-F(x))$	$X_1(m)$	$X_2(m)$	$F(x) \geq 1-1/T$
100	3.49	6.96	0.99
50	3.25	6.67	0.98
20	3.13	6.23	0.95
15	3.06	6.07	0.93
10	2.93	5.82	0.90
5	2.68	5.31	0.80

Tabla 3.4 Alturas de ola significantes probables de ocurrir en la zona de generación asociadas a diferentes periodos de retorno

En la Fig 3.1 se presenta la relación de las alturas de ola contra los periodos de retorno calculados con el metodo de Weibull.

### 3.2.3. ALTURA Y PERIODO DE OLA DE DISEÑO

Considerando la importancia de los espigones interiores de protección que se pretenden reconstruir en la zona de estudio, para dichas estructuras se selecciono un periodo 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 periodo de retorno, puede ser igualada o excedida.

Al relacionar el periodo de retorno seleccionado ( $T_r = 50$  años) con la altura de ola de diseño en aguas profundas para los espigones interiores de proyecto, con ayuda de las distribución de weibull para los valores máximos de alturas de ola significante indicadas en la Fig. 3.1, se determinó una altura de ola significante de diseño de 6.66 m en aguas profundas para la distribución de valores máximos.

Al comparar la altura de ola significante de diseño en aguas profundas de 6.66 m, con las alturas de ola significantes máximas determinadas con el método de predicción de oleaje ciclónico, se observa que la altura de ola de diseño seleccionada es del orden de la altura de ola máxima originada por el ciclón Gilbert, la cual resultó de 6.24 m. Esta situación verifica la validez de la altura de diseño seleccionada, toda vez que los daños ocurridos en los espigones interiores se presentaron con los oleajes producidos por dicho ciclón.

Tomando en cuenta lo anterior y considerando la acción de los ciclones GILBERT, OPAL y ROXANNA se observa que los periodos máximos del oleaje originados por dichas perturbaciones son de 20.1, 15.28 y 13.82 seg., y el promedio de los mismos resulta de 16.4 seg.

Tomando en cuenta que el periodo significante promedio de los ciclones señalados anteriormente, es un valor cercano al periodo significante máximo del oleaje generado por el ciclón OPAL ( $T = 15.28$  seg  $\approx 15.3$  seg.), para realizar el cálculo de la refracción y agitación del oleaje, así como para diseñar las obras de protección en cuestión, la altura y el periodo del oleaje de diseño seleccionado (en aguas profundas) fue  $H = 6.66$  m. y  $T = 15.3$  seg.



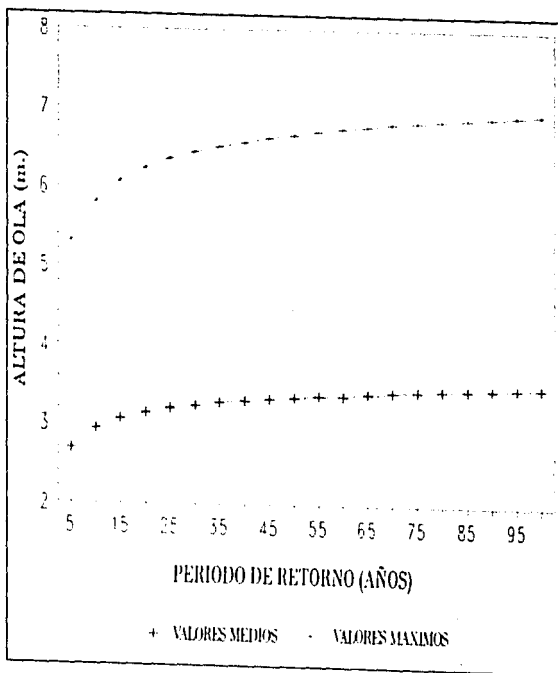


Fig. 3.1 Distribución de los valores medios y máximos de las alturas de ola significantes contra el periodo de retorno en aguas profundas, calculadas con el método de Weibull.

### 3.2.4. Direcciones del oleaje en la zona de aguas profundas.

De conformidad con los resultados obtenidos en el inciso 3.2.1, se procedió a determinar las direcciones representativas del oleaje, producidas por los ciclones que han afectado a la zona de estudio.

Las direcciones representativas del oleaje se determinaron tomando en consideración los valores mínimos, medios y máximos de las direcciones del oleaje correspondientes a cada uno de los ciclones ocurridos en la zona de estudio. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 3.5.**

NOMBRE DEL CICLON	DIRECCION DEL OLAJE (GRADOS)		
	MINIMA	MEDIA	MAXIMA
INES	10.0	20.700	52.000
GILBERT	11.0	26.743	50.000
FERN	59.0	61.833	67.000
ELOISE	2.00	182.086	359.00
CAROLINE	27.00	41.050	63.00
CARLA	30.00	43.143	66.00
ALLEN	1.00	18.111	46.00
JANET	109.00	113.944	118.00
OPAL	35.00	44.708	58.00
ROXANA	23.00	36.641	51.00

**Tabla 3.5** Direcciones representativas del oleaje.

Tomando en consideración que los resultados de las direcciones del oleaje ciclónico determinados con el modelo matemático de predicción de oleaje utilizado, se miden a partir del Este y en el sentido contrario de las manecillas del reloj, con objeto de analizar la dirección del oleaje más frecuente para cada ciclón en particular tomando en cuenta la historia en el tiempo de las características del oleaje producidas por el mismo, se realizó un análisis de frecuencias cuyos resultados se presentan en las **Tablas 3.6. a 3.8** para los ciclones INES, GILBERT Y FERN.

RANGO DE DIRECCIONES DEL OLEAJE (GRADOS)	FRECUENCIA
0-10	0
10-20	6
20-30	2
30-40	1
40-50	0
50-60	1

Tabla 3.6. Analisis de frecuencias de las direcciones del oleaje producidas por el ciclon Ines.

RANGO DE DIRECCIONES DEL OLEAJE (GRADOS)	FRECUENCIA
0-10	0
10-20	9
20-30	5
30-40	4
40-50	3
50-60	

Tabla 3.7. Analisis de frecuencias de las direcciones del oleaje producidas por el ciclon Gilbert.

RANGO DE DIRECCIONES DEL OLEAJE (GRADOS)	FRECUENCIA
0-10	0
10-20	0
20-30	0
30-40	0
40-50	0
50-60	2
60-70	4

Tabla 3.8. Analisis de frecuencias de las direcciones del oleaje producidas por el ciclon Fern.

Los resultados presentados en las tablas anteriores, se graficaron tomando en cuenta las frecuencias máximas de ocurrencia de las direcciones señaladas en dichas tablas, los resultados obtenidos se indican en la Fig. 3.2.

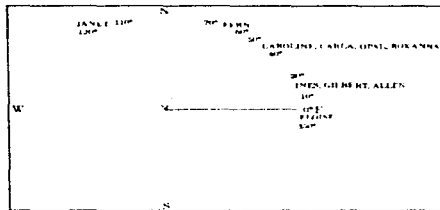


Fig. 3.2 Direcciones representativas del oleaje producidas por los ciclones analizados.

Al analizar la figura anterior y los resultados presentados en las Tablas 3.5 a 3.8 se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Las direcciones (promedios) definidas por la bisectriz indicada en la Fig. 3.2 corresponde con las direcciones N 25° E y N 45° E y N 75° E.

El máximo valor del ángulo de incidencia del oleaje para el primer cuadrante es 67°, que corresponde con la dirección N 23° E (ver Tabla No 3.5).

- El valor promedio de las direcciones máximas del oleaje que actúan en el primer cuadrante es de 56.63°, que corresponde con la dirección N 33.17° E.

- Tomando en consideración la orientación del puerto respecto al Norte, se establece que las direcciones del oleaje provenientes del 2° y 3°. cuadrante no son factibles de que incidan en la bocana del puerto.

- Por lo que corresponde al 4° cuadrante, el oleaje incide en la dirección S 85° E.

- De conformidad con lo antes señalado, las direcciones del oleaje representativas de la zona de estudio en aguas profundas (en condiciones ciclónicas) corresponden con N 25° E, N 75° E y S 85° E.

### 3.2.5. Sobreelevación 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 [2], el cual considera el siguiente proceso de cálculo:

#### (1) Ascenso de la ola Sw

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

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

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/seg<sup>2</sup>.

$T$  = Periodo 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:

$$S_p = S_t * F_{vt}$$

#### (3) Cálculo de $S_{total}$

El factor  $F_N$ , se debe seleccionar de tal modo que resulte máximo, es decir con un ángulo  $\psi$  próximo a  $90^\circ$ , obteniéndose con dicho valor en la ecuación anterior el valor de  $S_{\text{max}}$ .

#### (4) Máximo nivel

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

$$\Delta Z_T = Z_{NA} \cdot (S_F + S_W)$$

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

$$\Delta Z_T = Z_{NA} + S_{\text{max}}$$

Donde:

- $\psi$  : Ángulo de incidencia del oleaje en la costa
- $H_{3/3}$  : Altura de ola significativa
- $T_{3/3}$  : Período del oleaje significativo
- $H_D$  : Profundidad de desplante de la obra
- $Z_{NA}$  : Máxima semiamplitud de la marea astronómica
- $\phi$  : Latitud de la zona de estudio
- $S_T$  : Valor determinado de la grafica 3-57 del "Shore Protection Manual"
- $F_N$  : Valor determinado de la grafica 3-60 "Shore Protection Manual"
- $S_F$  : Ascenso producido por la marea de viento
- $F_{\text{max}}$  : Valor determinado de la grafica 3-60 "Shore Protection Manual"
- $S_{\text{max}}$  : Valor calculado con la fórmula expresada por,  
 $S_{\text{max}} = 0.3048 \cdot F_{\text{max}} \cdot S_T$
- $\Delta Z_1$  : Nivel de ascenso del mar, en m
- $\Delta Z_2$  : Nivel de ascenso del mar, en m

$\Delta Z_p$  : Máximo nivel de ascenso del mar, en m

Al aplicar la metodología presentada con anterioridad, con el valor de las alturas de ola de diseño en aguas profundas determinadas con ayuda de la Fig. 3.1 y tomando en cuenta las direcciones del oleaje determinadas al final del inciso anterior, se calculó la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta obteniendo un valor promedio de +3.16 m. respecto al N.B.M., los resultados de dicho cálculo se presentan en la Tabla 3.9.

DIR.	H <sub>o</sub> (m)	T <sub>o</sub> (Seg)	d <sub>o</sub> (m)	H <sub>o</sub> (m)	$\psi$ (°)	Lat. (°)	P <sub>o</sub> (mb)	U M.N/h	$\Delta P$ (mb)
N25E	6.66	15.3	11.32	6.95	25	22.5	996.6	15.49	23.25
N45E	6.66	15.3	11.32	6.95	45	22.5	996.6	15.49	23.25
N75E	6.66	15.3	11.32	6.95	75	22.5	996.6	15.49	23.25
S85E	6.66	15.3	11.32	6.95	95	22.5	996.6	15.49	23.25

R (M.N.)	SI (Ft)	F <sub>01</sub>	S <sub>01</sub> (m)	F <sub>02</sub>	S <sub>02</sub> (m)	$\Delta Z_1$ (m)	$\Delta Z_2$ (m)	$\Delta Z_3$ (m)
56.42	4.4	1.09	1.36	1.03	1.40	2.68	0.24	3.12
56.42	4.4	1.04	1.41	1.03	1.40	2.93	0.24	3.17
56.42	4.4	1.02	1.39	1.03	1.40	2.91	0.24	3.15
56.42	4.4	1.07	1.45	1.03	1.40	2.97	0.24	3.21

Tabla 3.9. Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta en la zona de estudio

## CAPITULO IV. ESTUDIOS DE REFRACCION Y DE AGITACION DE OLEAJE.

### 4.1 MODELACION NUMERICA DE LA REFRACCION DEL OLEAJE

#### 4.1.1. Método de cálculo

El cálculo de la distribución espacial de las alturas y direcciones del oleaje, se realizó mediante la técnica numérica desarrollada por Takayama [10] para oleaje irregular, que utiliza la ecuación de equilibrio energético expresada como sigue:

$$\frac{\partial(S C_g \cos \theta)}{\partial x} + \frac{\partial(S C_g \sin \theta)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial t} \left[ S \left( \frac{C_g}{C} \right) (\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y}) \right] = -(e'_b + e'_f) S \quad (4.1)$$

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  $D_s$ , la ec. (4.1) cambia como sigue:



$$\frac{\partial(D_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(D_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(D_z V_z)}{\partial z} = -(c'_b + c'_r) D_x \quad (4.2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D_x &= S \delta f \delta \theta \\ V_x &= C_v \cos \theta \\ V_y &= C_v \sin \theta \\ V_z &= \left(\frac{C_v}{C}\right) \left( \sin \theta \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right) - \cos \theta \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right) \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Donde  $\delta f$  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:

$$S = \sum_{f=0}^{f_{max}} \sum_{\theta=0}^{\theta_{max}} S(f) \cdot G(\theta; f) \delta \theta \delta f \quad (4.4)$$

La energía total del oleaje expresada en la ecuación anterior, se calcula con los espectros frecuencial y direccional de Bretschneider-Mitsuyatsu [7] respectivamente, expresados mediante las siguientes ecuaciones:

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 (T_{1/3} f)^{-5} \exp(-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}) \quad (4.5)$$

$$G(\theta; f) = \left[ \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{A\theta}{2} \cos^2 \theta \left(\frac{\theta}{2}\right) d\theta \right]^{-1} \quad (4.6)$$

Donde:

$S(f)$	=	Función de densidad del espectro frecuencial.
$G(0, f)$	=	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 del oleaje en $\text{seg}^{-1}$ .
$S$	=	$S_{\text{max.}} (f/f_p)^5$ ; cuando $f < f_p$
$s$	=	$S_{\text{max.}} (f/f_p)^{-2.5}$ ; cuando $f > f_p$
$f_p$	=	$1/(1.05 T_{1/3})$
$f_p$	=	Frecuencia pico del espectro frecuencial

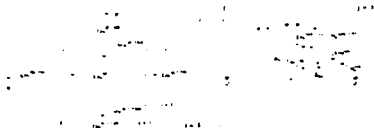


Fig. 4.1 Sistema coordenado y arreglo de variables.

Si se define el sistema coordenado indicado en la Fig. 4.1, y se consideran las variables indicadas en la misma figura, la ec. (4.2) se expresa como sigue:

$$\frac{D_x^{ijk} V_x^{(i+1)jk} - D_x^{(i-1)jk} V_x^{ijk}}{\Delta x} + \frac{D_y^{ijk} V_y^{(j+1)k} - D_y^{(j-1)k} V_y^{ijk}}{\Delta y} + \frac{D_z^{ijk} V_z^{(k+1)} - D_z^{(k-1)} V_z^{ijk}}{\Delta z} = -(\epsilon_b + \epsilon_t) D_x^{ijk}$$

Al hacer operaciones y simplificando la ecuación anterior resulta:

$$\Delta A_1 D_0^{j,k} + A_2 D_0^{(j-1),k} + A_3 D_0^{(j+1),k} + A_4 D_0^{j,(k-1)} + A_5 D_0^{j,(k+1)} = -B D_0^{(j-1),k} \quad (4.8)$$

Si el oleaje se dirige siempre hacia la costa,  $V_x$  es siempre mayor que cero, y los coeficientes de la ec. (4.5) se expresan como sigue:

$$A_1 = \frac{V_0^{(j+1),k}}{\delta x} + c_k^{j,j} \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_y^{j,(j+1),k}}{\delta y} \dots \dots \dots (\text{cuando } V_y, S > 0) \\ - \frac{V_y^{j,j,k}}{\delta y} \dots \dots \dots (\text{cuando } V_y < 0) \end{array} \right\}$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_0^{j,(k+1)}}{\delta \theta_k} \quad ; \text{ cuando } (V_0^{j,k} \geq 0) \\ 0 \quad ; \text{ cuando } (V_0^{j,k} \geq 0, V_0^{j,(k+1)} < 0) \\ \frac{(V_0^{j,(k+1)} - V_0^{j,k})}{\delta \theta_k} \quad ; \text{ cuando } (V_0^{j,k} < 0, V_0^{j,(k+1)} \geq 0) \\ - \frac{V_0^{j,k}}{\delta \theta_k} \quad ; \text{ cuando } (V_0^{j,k} < 0, V_0^{j,(k+1)} < 0) \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

$$B = - \frac{V_x^{j,k}}{\delta x} \quad (4.14)$$

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.

$$A_2 = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{V_y^{ijk}}{\delta y} \\ 0 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} (V_y \geq 0) \\ (V_y < 0) \end{array} \right\} \quad (4.10)$$

$$A_3 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \frac{V_y^{i(j+1)k}}{\delta y} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} (V_y \geq 0) \\ (V_y < 0) \end{array} \right\} \quad (4.11)$$

$$A_4 = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{V_0^{ijk}}{\delta U_x} \\ 0 \\ 0 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} (V_0^{ijk} \geq 0) \\ (V_0^{ijk} < 0, V_0^{ij(k-1)} \geq 0) \\ (V_0^{ijk} < 0, V_0^{ij(k-1)} < 0) \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

$$A_5 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ -\frac{V_0^{ij(k+1)}}{\delta U_x} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} (V_0^{ijk} > 0) \\ (V_0^{ijk} < 0, V_0^{ij(k+1)} > 0) \\ (V_0^{ijk} < 0, V_0^{ij(k+1)} < 0) \end{array} \right\} \quad (4.13)$$

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 [7].

Si las alturas de ola rompientes en la entrada y en la salida de cada cuadro de la malla de discretización se definen por  $H_m$  y  $H_{im}$  respectivamente, de conformidad con la Fig. 4.2, 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:

$$E_b = 1 - \frac{1 - 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{im}/H_{1/3})^2 \exp - \frac{\pi}{4} (\alpha H_{im}/H_{1/3})^2}{1 - 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{e1}/H_{1/3})^2 \exp - \frac{\pi}{4} (\alpha H_{e0}/H_{1/3})^2} \quad (4.15)$$

Donde  $\alpha = H_{1/3}/H$ ,  $H_{1/3}$  es la altura de ola significativa en m,  $H$  es la altura de ola media en m.

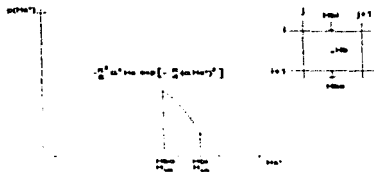


Fig. 4.2 Distribución de Rayleigh en la rompiente y su relación con las alturas de olas que entran y salen en un cuadro de la malla de discretización.

El cálculo de  $H_{m+1}$  y  $H_m$  se realiza con la fórmula de Goda expresada como sigue:

$$H_{m+1} = A L_o \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \frac{\pi \bar{H}}{L_o} (1 + 15 \beta^{2/3}) \right] \right\} ; \text{ cuando } \beta \geq 0 \quad (4.16)$$

$$H_m = A L_o \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \frac{\pi \bar{H}}{L_o} \right] \right\} ; \text{ cuando } \beta < 0 \quad (4.17)$$

Donde  $L_o$  es la longitud del oleaje en aguas profundas,  $\bar{H}$  la Profundidad promedio,  $A$  es un Coeficiente igual a 0.17 según Goda y  $\beta$  es la pendiente del fondo del mar que se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde  $\beta_x$  es la pendiente del fondo del mar en la dirección  $x$ ,  $\beta_y$  es la pendiente del fondo del mar en la dirección  $y$ ,  $\theta$  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:

$$c_b' = E_b C / \sqrt{\Delta X \Delta Y} \quad (4.18)$$

Donde:

- C** = Celeridad del oleaje, en m/s.  
 **$\Delta X$**  = Abertura de la malla en la dirección x, en m.  
 **$\Delta Y$**  = 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  $\Delta X$ , y considerando una profundidad uniforme (ver Fig. 4.3) encontro la siguiente ecuación para calcular la pérdida de energía del oleaje por la fricción del fondo :

$$K_f = \frac{1}{PFR} = \frac{H_2}{H_1} = \left[ 1 + \frac{64}{2} \frac{\pi^3}{g^2} \frac{f H_1 \Delta X}{h^2} \left( \frac{h}{T^2} \right) \frac{Ks^2}{\text{senh}^3(2\pi h/L)} \right]^{-1} \quad (4.19)$$

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<sup>2</sup>.  
 **$\Delta X$**  = 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 varia 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).

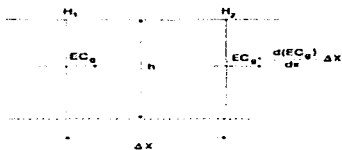


Fig. 4.3 Disipación de la energía del oleaje por la fricción del fondo.

En la Fig. 4.3,  $E$  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. (4.19) se escribe como sigue:

$$H_2 = \frac{H_1}{PFR} \quad (4.20)$$

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:

$$E_f = \frac{H_1^2 - H_2^2}{H_1^2} = \frac{(H_1)^2 - \left(\frac{H_1}{PFR}\right)^2}{(H_1)^2} = 1 - \frac{1}{(PFR)^2} \quad (4.21)$$

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:

$$E_f' = \frac{E_f C}{\sqrt{\Delta X \Delta Y}} \quad (4.22)$$

Después de haberse calculado los valores de  $D_{ab}^{ijk}$ ,  $H_{10}$ ,  $H_{max}$ ,  $T_{10}$  y de la dirección del oleaje  $\theta$ , 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:

$$\begin{aligned}
 H_{1,3} &= 4.0 \sqrt{M_o} \\
 H_{max} &= \min (h_p, 1.8 H_{1,3}) \\
 T_{1,3} &= T_{o,1,3} \cdot (T/T_o) ; \text{ con } T = \sqrt{H_o/N_2} \\
 0 &= \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \theta_k D_{nk}^{1,3} / M_o
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 M_o &= \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N D_{nk}^{1,3} \\
 T_{o,1,3} &= \text{Periodo significativo del oleaje en aguas profundas.} \\
 M_2 &= \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N f n^2 D_{nk}^{1,3} \\
 T_o &= \text{Periodo del oleaje en aguas profundas.} \\
 \min(a,b) &: a ; \text{ cuando } \leq b \\
 &: b ; \text{ cuando } \geq b
 \end{aligned}$$

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

- Para el cálculo de la distribución espacial de las alturas y direcciones del oleaje en cada nodo se utiliza la ec. (4.1).
- La energía de cada componente del oleaje (D.) se obtiene con la ec. (4.2).
- La energía total del oleaje se calcula con la ec. (4.4).
- El cálculo de los espectros frecuencial y direccional se calculan con las ecs. (4.5) y (4.6), respectivamente.
- Al considerar las variables indicadas en la Fig. 4.1, de la ec. (4.2) se obtiene la ec. (4.8), que es con la que se realiza el cálculo de la energía del oleaje.



- f) El coeficiente de pérdida de energía por rompiente ( $E_n$ ), se calcula suponiendo que la distribución de las alturas de ola corresponden con la distribución de Rayleigh y por la ec. (4.15).
- g) El cálculo numérico del coeficiente de pérdida de energía del oleaje debido al efecto de fricción se realiza con la ec. (4.21).
- h) Con los valores de  $D_{50}^{2.5}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{max}$ ,  $T_p$  y  $\theta$ , las características del oleaje en el centro de cada celda de la malla, se calculan las ecuaciones presentadas en este capítulo.
- i) Cabe mencionar que, si las coordenadas en la dirección Y y del ángulo  $\theta$  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.

#### 4.1.2. Modelación Matemática

##### 4.1.2.1. 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 5 mallas de discretización de profundidades, la primera malla con una abertura de 1600 m por lado, iniciándose desde la profundidad de 550 m, la segunda malla con una abertura de 800 m por lado, la tercer malla con una abertura de 400 m por lado, la cuarta malla con una abertura de 200 m por lado y la quinta malla con una abertura de 100 m por lado.

##### 4.1.2.2. Condiciones de la modelación

Tomando en consideración la importancia de la reconstrucción de los espigones interiores del puerto, para realizar la refracción de oleaje, se seleccionó la sobreelevación del nivel del mar por marca de tormenta de + 3.16 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 nivel del mar indicado en la Tabla 4.1

DIRECCIONES DEL OLAJE	ALTURA DE OLA EN AGUAS PROFUNDAS. (m)	PERIODO DE OLA EN AGUAS PROFUNDAS. (seg)	NIVEL DEL MAR RESPECTO AL N.B.M. (m)
N25°E	6.66	15.30	+3.16
N45°E	6.66	15.30	+3.16
N 75° E	6.66	15.30	+3.16
S 85° E	6.66	15.30	+3.16

Tabla 4.1 Condiciones para la modelación matemática de la refracción en aguas profundas.

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 analizada en el inciso 3.2.4.

Tomando en consideración las condiciones del oleaje y nivel del mar señalado en la **Tabla 4.1**, así como las profundidades de las cinco mallas de discretización de profundidades, el cálculo numérico de la refracción del oleaje se realizó desde la zona de aguas profundas y hasta la zona de estudio, obteniéndose los siguientes resultados.

#### 4.1.2.3 Resultados

Los resultados abarcan las alturas y direcciones del oleaje en el centro de los cuadros de las cinco 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. 4.4 a 4.8** se muestran las distribuciones espaciales del oleaje representados con los vectores oleaje obtenidos en las cinco mallas de cálculo con las condiciones de oleaje y nivel de mar señalado en la **Tabla 4.1**. (Únicamente se presentan los resultados para la dirección N25°E)

En la **Fig. 4.8**, se indican las distribuciones espaciales del oleaje de la quinta malla de cálculo, obtenidas para las condiciones del oleaje incidente señalada 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. 4.9 a 4.13 se muestran los resultados obtenidos al interpolar los valores de las alturas de ola refractadas.

En la Fig. 4.13 se indican las distribuciones en planta de las alturas de ola de la quinta malla de cálculo, obtenidas para las condiciones del oleaje incidente señaladas con anticipación.

Con el fin de determinar los oleajes incidentes en los morros de las escolleras de la quinta malla se determinó el promedio de las alturas y direcciones del oleaje. En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de las alturas de ola y direcciones del oleaje frente a los morros de las escolleras, así como los valores promedio de las alturas de ola en cada una de las direcciones analizadas.

DIRECCION DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS	DIRECCION REFRACTADA DEL OLAJE	ALTURAS DE OLA FRENTE A LOS MORROS DE LAS ESCOLLERAS	PROMEDIOS DE ALTURAS DE OLA	PERIODOS DE OLA FRENTE AL MORRO DE LA ESCOLLERA NORTE	PROMEDIOS DE PERIODOS DE OLA
		(m)	(m)	(seg)	(seg)
N 25° E	N 57.3° E	4.80 5.48 4.68 4.83 4.90 4.72	4.90	16.57 16.88	16.72
N 45° E	N 61.1° E	5.07 6.82 5.25 5.39 5.45 5.29	5.54	17.11 16.98	17.04
N 75° E	N 67.7° E	5.29 6.45 5.88 5.93 6.03 5.97	5.92	17.43 17.36	17.39
S 85° E	N 71.8° E	5.30 6.29 6.25 5.96 6.12 6.16	6.01	17.45 17.39	17.42

Tabla 4.2 Valores de direcciones, períodos y alturas de ola resultantes de la refracción del oleaje frente a los morros de las escolleras.

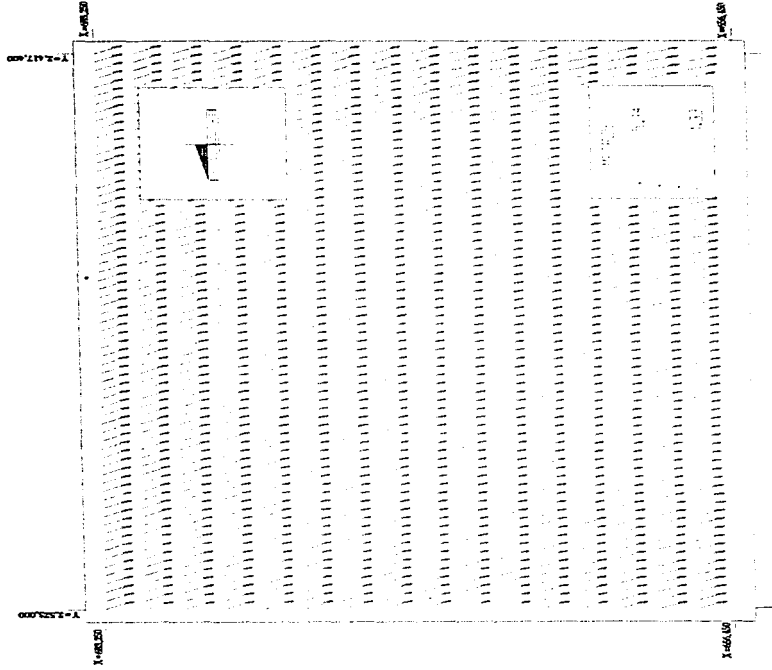


Fig. 11 Distribuzione punti del reticolo iper-cubo per la soluzione di un problema di coltura per la direzione X, Y. E.T. 133, p. 11. 600 m

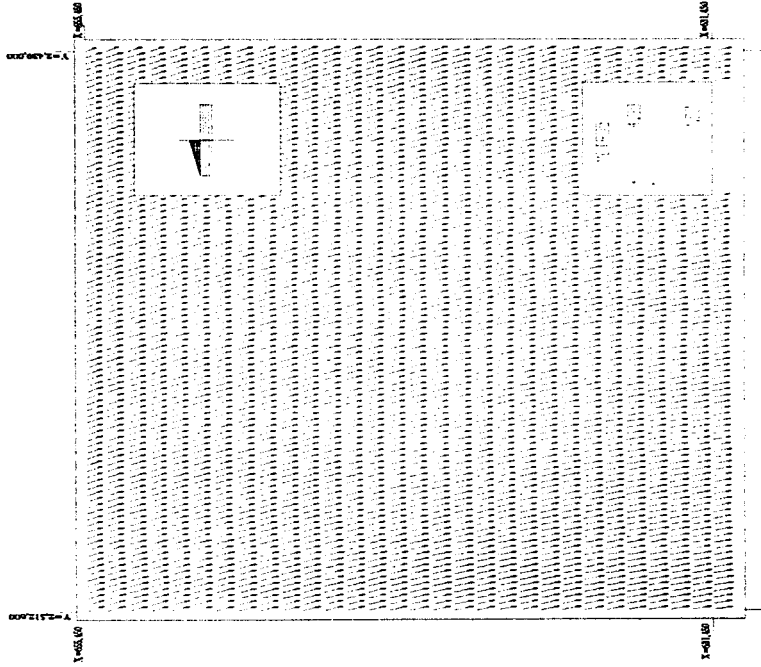


Fig. 15. Distribution of the variable represented by the values along the horizontal axis,  $x$ ,  $t = 15.3$  sec.  $H = 0.00$  m.

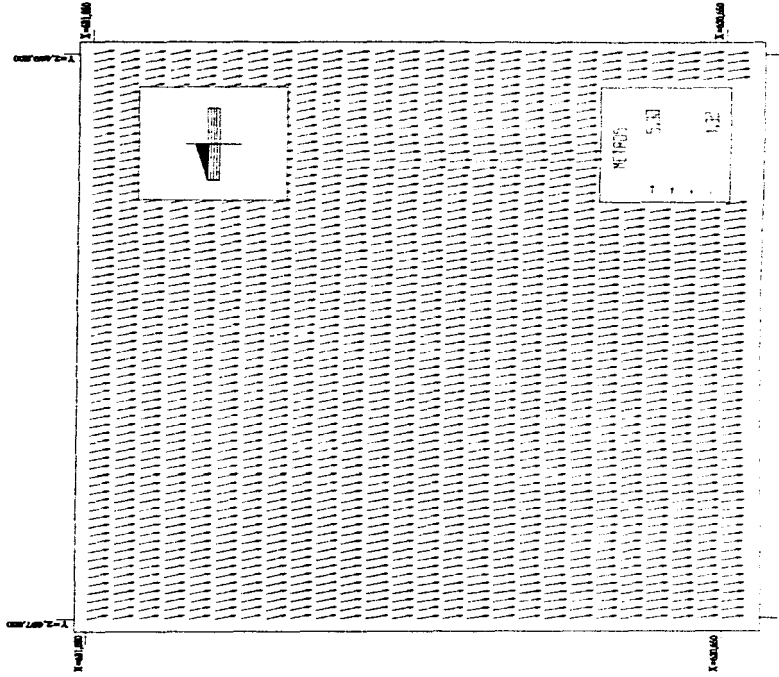


Fig. 16 Distribución espacial del índice representada por los valores de los factores de ajuste en la factorización de los datos para la dirección N. N. E. (153) N. E. - 0.00 m

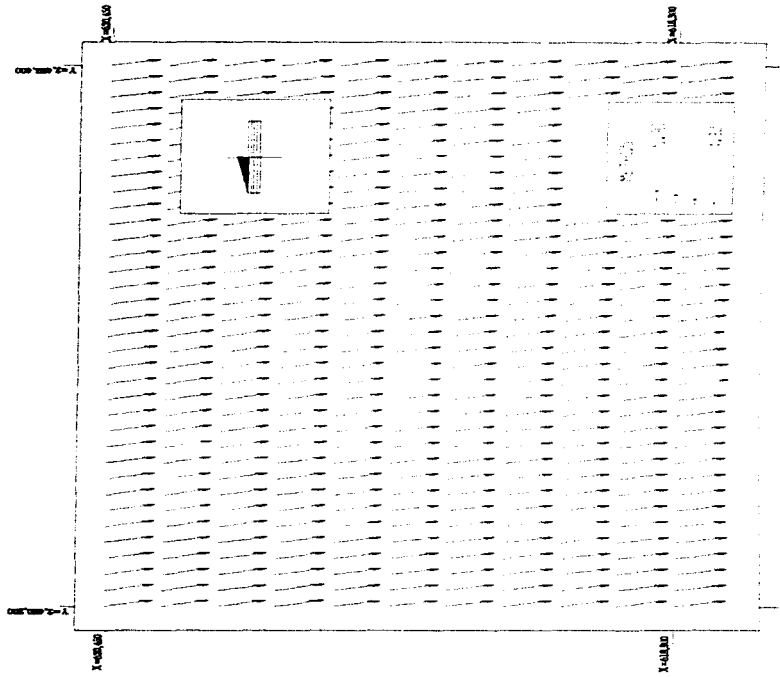


Fig. 1 - Distribución espacial del obstruente en la malla de cálculo para la dirección N. E. E. (V. 3.º sg. H. 0.º cm)





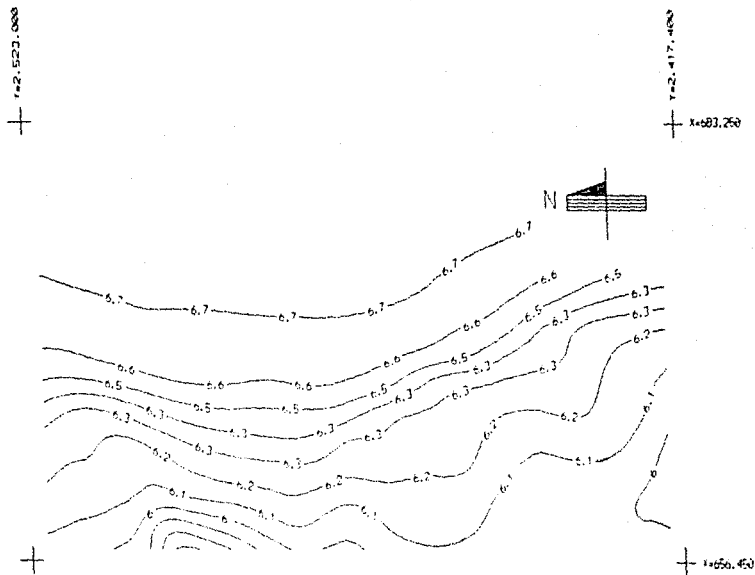
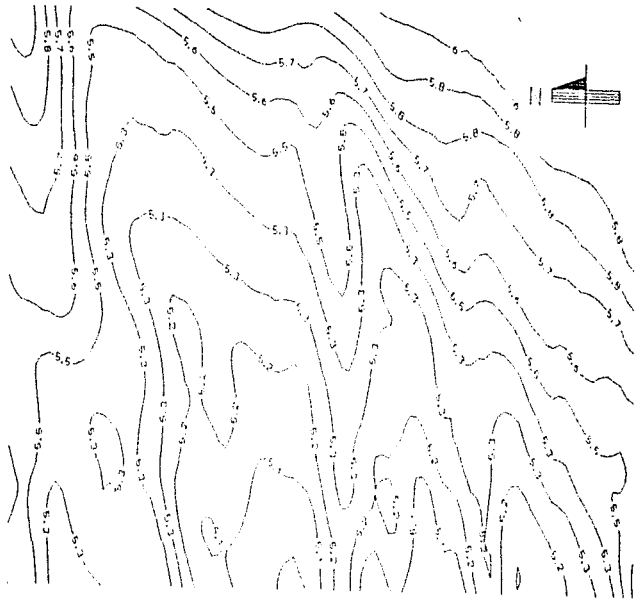


Fig. 10 Distribución en planta de Isobatas de olas, fiactas hasta la primera malla  
 Pu. N. 35 1, 1-15 35, 36 - 600 m

+ Y=2,512,000

+



+ Y=2,439,000  
+ X=656,450

+ X=631,450

Fig. 119 Distribucion en planta de las alturas de ola refractadas hasta la segunda molla  
Del 21.5 E. T. 1878 H. 1000m



Fig. 111. Distribucion en planta de las almasas, de refugio a la tercer malla.  
 Par. 225. E. T. 1838. H. 0156 m

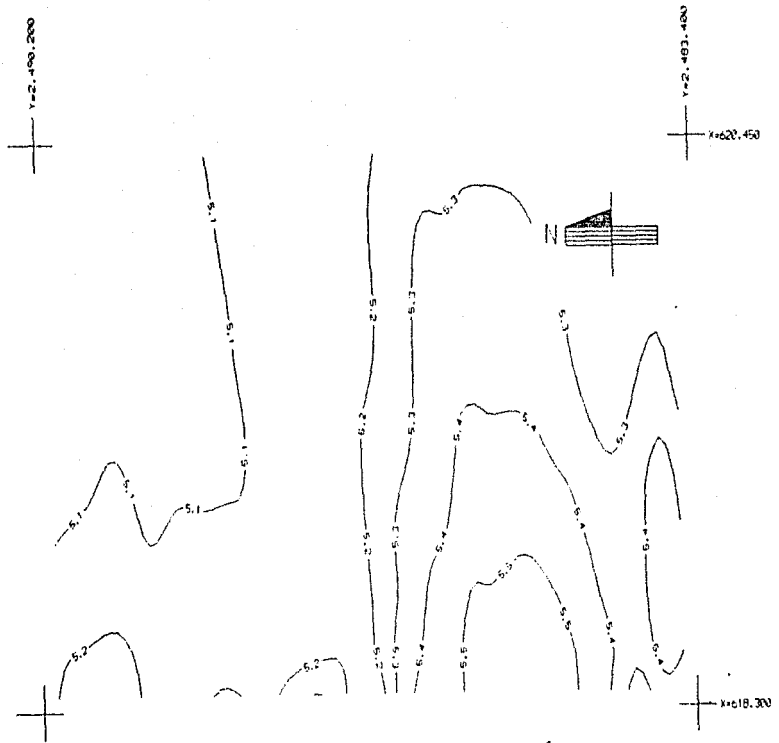


Fig. 112 Distribución en planta de las alturas de ola refractadas hasta la cruenta mede  
 (De 178 E. J. 453, H. 100 cm)



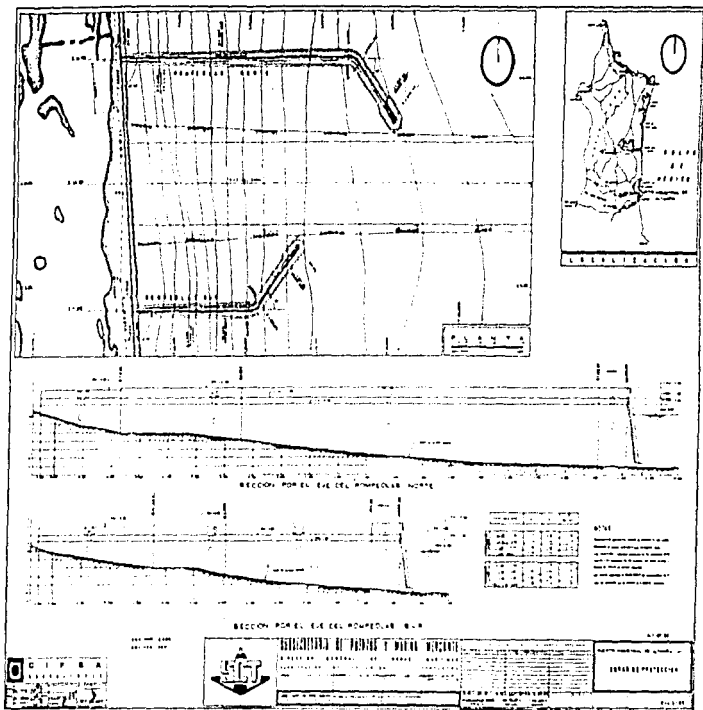


Fig. 1.2 Proyecto original de las obras de disipación de energía en el canal de acceso

## 4.2. MODELACION MATEMATICA DE LA AGITACION DEL OLEAJE.

### 4.2.1 Descripción del modelo matemático utilizado.

En este capítulo se presenta en forma sucinta el desarrollo de las ecuaciones aplicadas en el modelo matemático de agitación de oleaje, desarrollado por el Laboratorio de Hidráulica Marítima de la S.C.T. y utilizado en el presente estudio.

#### 4.2.1.1 Consideraciones particulares para la condición de oleaje regular.



Fig. 4.14 Posición de dos rompeolas semi-infinitos.

La Fig. 4.14 muestra la definición del problema para dos rompeolas semi-infinitos.

Donde:

- $\alpha$  ; Angulo del oleaje incidente
- $B$  ; Distancia entre los rompeolas
- $\beta$  ; Angulo entre el rompeolas I y el rompeolas II
- $\alpha_1$  ; Angulo de  $B$  respecto al rompeolas I
- $P$  ; Punto en el que se calcula  $K_p$
- $r_1$  ,  $\theta_1$  ; Coordenadas polares del punto P con respecto al rompeolas I
- $r_2$  ,  $\theta_2$  ; Coordenadas polares del punto P con respecto al rompeolas II

El algoritmo desarrollado considera que la variación de la



altura del oleaje  $\phi$  del punto P está dada por la siguiente ecuación:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \phi_r \quad (4.23)$$

Donde :

- $\phi_1$  ;  $\phi$  sin el rompeolas II
- $\phi_2$  ;  $\phi$  sin el rompeolas I
- $\phi_r$  ;  $\phi$  del oleaje incidente

Estas variaciones debidas al oleaje incidente y a los rompeolas se definen como sigue:

$$\phi_r(x, 0) = \exp[i k x \cos(\theta - \alpha)] \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \phi_1(x_1, 0) = & \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[i\{k x_1 \cos(\theta_1 - \alpha) + \frac{\pi}{4}\}] \left\{ \left[ C(\gamma_{11}) + \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{11}) + \frac{1}{2} \right] \right\} \\ & + \frac{k x_1}{\sqrt{2}} \exp[i\{k x_1 \cos(\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4}\}] \left\{ \left[ C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Donde :

$$\gamma_{11} = \sqrt{4 \frac{k x_1}{\pi}} \cos\left(\frac{\theta_1 - \alpha}{2}\right)$$

$$\gamma_{12} = \sqrt{4 \frac{k x_1}{\pi}} \cos\left(\frac{\theta_1 + \alpha}{2}\right)$$

$S(X)$  y  $C(X)$  = Valores de la integral de Fresnel.

Para obtener  $\phi_2$  se deberá tomar en cuenta la diferencia de la fase del oleaje, esta diferencia se define como sigue:

$$z = k B \cos(\alpha_2 - \alpha)$$

De esta forma,  $\phi_2$  está dado como sigue:

$$\begin{aligned} \phi_2(x_2, 0_2) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(k r_2 \cos(0_2 - \alpha + \beta) + \frac{\pi}{4} + \varepsilon\right)\right] \left\{ \left[ C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right] \right\} \\ &+ \frac{K_{R2}}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(k r_2 \cos(0_2 + \alpha - \beta) + \frac{\pi}{4} + \varepsilon\right)\right] \left\{ \left[ C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Donde :

$$\gamma_{21} = \sqrt{4 \frac{k r_2}{\pi}} \cos\left(\frac{0_2 - \alpha + \beta}{2}\right)$$

$$\gamma_{22} = \sqrt{4 \frac{k r_2}{\pi}} \cos\left(\frac{0_2 + \alpha - \beta}{2}\right)$$

Sustituyendo las ecs. (4.24), (4.25) y (4.26) en la ec. (4.23). Se obtiene:

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_1 + \phi_2 - \phi_I \\ &= \phi_1 + \phi_2 - \exp[i(k r \cos(0 - \alpha))] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(k r_1 \cos(0_1 - \alpha) + \frac{\pi}{4}\right)\right] \left\{ \left[ C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right] \right\} \\ &+ \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(k r_1 \cos(0_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4}\right)\right] \left\{ \left[ C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right] \right\} \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(k r_2 \cos(0_2 - \alpha + \beta) + \frac{\pi}{4} + \varepsilon\right)\right] \left\{ \left[ C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right] \right\} \\ &+ \frac{K_{R2}}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(k r_2 \cos(0_2 + \alpha - \beta) + \frac{\pi}{4} + \varepsilon\right)\right] \left\{ \left[ C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right] - i \left[ S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right] \right\} \end{aligned}$$

(4.27)

#### 4.2.1.2 Coeficiente de difracción.

El coeficiente de difracción  $K_D$  se define como el valor absoluto de  $\phi$ , y se expresa como sigue:

$$K_D = | \phi(X, Y) | \quad (4.28)$$

El coeficiente de difracción tiene una parte real y una parte imaginaria, las cuales se expresan como sigue:

$$\begin{aligned} \phi_{REAL} = & \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \cos \left[ kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ C(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right] \right. \\ & + \operatorname{sen} \left[ kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ S(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right] \\ & + K_R \cos \left[ kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ C(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right] \\ & \left. + K_R \operatorname{sen} \left[ kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ S(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right] \right) \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \phi_{IMAG} = & \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \operatorname{sen} \left[ kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ C(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right] \right. \\ & - \cos \left[ kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ S(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right] \\ & + K_R \operatorname{sen} \left[ kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ C(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right] \\ & \left. - K_R \cos \left[ kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right] \left[ S(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right] \right) \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\therefore \phi = \phi_{REAL} + i\phi_{IMAG}$$

De conformidad con lo anterior el coeficiente de difracción se expresa como sigue:

$$K_D = \sqrt{\phi_{REAL}^2 + \phi_{IMAG}^2} \quad (4.31)$$

#### 4.2.1.3 Consideraciones particulares para la condición de oleaje irregular.

Para tomar en cuenta la irregularidad del oleaje en el algoritmo desarrollado, a continuación se da una breve explicación de los aspectos considerados en el presente estudio.

##### 4.2.1.3.1 Espectro frecuencial.

El oleaje irregular puede expresarse como la suma de varias componentes de oleaje regular, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\eta(n) = \sum_{m=1}^M \alpha_m \cos(n\sigma_m \Delta t + \epsilon_m) \quad (4.32)$$

Donde:

$\eta(n)$  = Nivel del agua.

$M$  = Número de componentes.

$\alpha_m$  = Amplitud de cada componente.

$\epsilon_m$  = Fase (de 0 a  $2\pi$ ) de cada componente.

$\sigma_m$  = Frecuencia angular de cada componente.

El número de componentes de oleaje regular a considerar depende de la aproximación que se requiera para calcular el coeficiente de agitación. El análisis de cada componente de oleaje regular se realiza por medio de las series de Fourier.

Para determinar los valores de la amplitud y frecuencia angular de cada componente, se hace uso del espectro frecuencial del oleaje irregular.

En el espectro frecuencial,  $S(f)$  se define como la densidad de la energía de la frecuencia  $f$ .

Entre la frecuencia angular, el periodo y la frecuencia existen las siguientes relaciones:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\sigma} ; f = \frac{\sigma}{2\pi} = \frac{1}{T}$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (4.33)$$

Para determinar la altura de cada componente de oleaje regular se divide el espectro frecuencial en pequeñas áreas de igual valor como se indica en la Fig. 4.15, cada altura de oleaje puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{H_i^2}{8} = \int S(f) df \quad (4.34)$$

Donde:

$\int S(f) df$  = Pequeñas áreas de igual valor.

$H$  = Altura del oleaje irregular de cada componente.

$f$  = Frecuencia en (1/seg).

La frecuencia de cada componente se calculará como el segundo momento con respecto al origen. En decir, para cada pequeña área, la frecuencia representativa se calcula según la siguiente ecuación:

$$\int_{f_{e,i}-\Delta f}^{f_{e,i}+\Delta f} S(f) f^2 df = f^2 \int_{f_{e,i}-\Delta f}^{f_{e,i}+\Delta f} S(f) df \quad (4.35)$$

Donde:

$f_{e,i}$  = Frecuencia representativa para cada pequeña área

$$\int_{f_{e,i}-\Delta f}^{f_{e,i}+\Delta f} S(f) df, \text{ mostrada en la Fig. 4.16.}$$

Al utilizar la distribución frecuencial del oleaje irregular desarrollada por Bretschneider-Mitsuyasu, la cual se expresa como sigue:

$$S(f) = 0.257 \frac{H_{\frac{1}{3}}^2}{T_{\frac{1}{3}}} (T_{\frac{1}{3}} f)^{-5} \exp[-1.03 (T_{\frac{1}{3}}^{-4})] \quad (4.36)$$

Donde:

$H_{\frac{1}{3}}$  = Altura de ola significativa en metros.

$T_{\frac{1}{3}}$  = Periodo de ola significativa en segundos.

Y sustituyendo la ec. (4.31), se puede obtener la frecuencia representativa de cada componente como sigue:

$$f_{ci} = \frac{1.986 \sqrt{M}}{T_1} \sqrt{\phi \left( \sqrt{2 \ln \left( \frac{M}{I} \right)} \right) \cdot \phi \left( \sqrt{2 \ln \left( \frac{M}{I} \right)} \right)} \quad (4.37)$$

Donde:

$\phi$  = Función de error, que se expresa a continuación.

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (4.38)$$

En la ec. (4.32)  $\alpha_n$  se puede calcular con la ec. (4.34), y  $T_n$  puede calcularse con las ecs. (4.33) y (4.37), no obstante  $\epsilon_n$  no se puede calcular con ayuda del espectro. Para el cálculo de  $\epsilon_n$  se usan números aleatorios definidos entre 0 y  $2\pi$ .

Para cada frecuencia del espectro frecuencial corresponde un espectro direccional, el cual se representa por la siguiente ecuación:

$$\sum_{f_n} f_n \delta f_n \sum_{0_n}^{0_n + \delta 0_n} \frac{1}{2} a_n^2 = S(f_n, 0_n) \delta f_n \delta 0_n$$

Donde:

$f_n$  = Frecuencia

$a_n$  = Amplitud

$0_n$  = Dirección de la propagación de la ola

$S(f_n, 0_n)$  = Espectro direccional

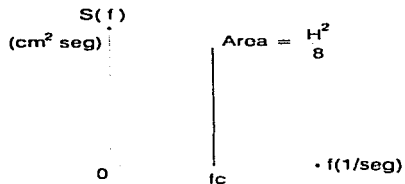


Fig. 4.15 Espectro frecuencial del oleaje regular.

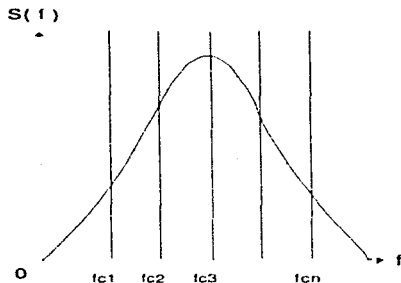


Fig. 4.16 División de los componentes.

El espectro direccional obtenido de cada frecuencia, también se divide en pequeñas áreas iguales. A continuación se mencionan las características de dicho espectro.

#### 4.2.1.3.2 Espectro direccional.

El oleaje en el campo tiene componentes direccionales además de componentes frecuenciales, por lo que se considera la componente de la ola con frecuencia  $f_n = f_n + \delta f_n$  y dirección  $\theta_n = \theta_n + \delta \theta_n$ , como sigue:

$$\sum_{f_n}^{f_n + \delta f_n} \sum_{\theta_n}^{\theta_n + \delta \theta_n} \frac{1}{2} a_n^2 = S(f_n, \theta_n) \delta f_n \delta \theta_n \quad (4.39)$$

El espectro direccional generalmente se expresa por el producto del espectro frecuencial  $S(f)$  y la función direccional  $G(f, \theta)$  que se define por MITSUYASU como sigue:

$$S(f_n, \theta_n) = S(f_n) \cdot G(f_n, \theta_n)$$

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2N} \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

Donde:

$$G_0 = \left[ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2N} \left( \frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (4.40)$$

En la ec. (4.40)  $S$  tiene los siguientes valores dependiendo de  $f$ :

$$S = \begin{cases} S_{\max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^3 & ; f \leq f_p \\ S_{\max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-2.5} & ; f > f_p \end{cases} \quad (4.41)$$

donde;  $f_p$  es la frecuencia pico del espectro frecuencial y se estima como sigue:

$$f_p = \frac{1}{1.05 T_{1/3}}$$

El parámetro  $S_{\max}$  se cambió por la relación de esbeltez  $\left( \frac{H_0}{L_0} \right)$  y entonces  $S_{\max}$  para  $\left( \frac{H_0}{L_0} \right) = 0.03$  es igual a 20.



Por ejemplo, calculando la función direccional  $G(f_N, \theta)$  para cada frecuencia dimensional  $(f_N = \frac{f}{f_p})$  en el caso de  $S_{MAX} = 20$ , el resultado está graficado en la Fig. 4.17, donde el rango de la distribución direccional del oleaje se consideró como:  $(-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2})$



Fig. 4.17 Función de distribución tipo Mitsuyasu.

La Fig. 4.18 muestra la gráfica de donde se obtiene el valor del parámetro  $S_{MAX}$  con la relación  $(\frac{H_0}{L_0})$ , donde  $H_0$  es la altura de ola y  $L_0$  es la longitud de la ola en aguas profundas.



Fig. 4.18 Relación de  $S_{MAX}$  y  $(\frac{H_0}{L_0})$

La obtención del coeficiente de difracción  $K_D$  para la condición de oleaje irregular se obtiene de la ec. (4.31).

Por ejemplo si se tienen ocho divisiones en el espectro frecuencial o unidimensional y seis divisiones en el espectro direccional, entonces el valor de  $K_D$  será:

$$K_D = \sqrt{K_{D1} \cdot K_{D2} \cdot K_{D3} \cdot \dots \cdot K_{Dn}}$$

Donde:

$n$  = Es el número de divisiones en el espectro frecuencial por el número de divisiones en el espectro direccional (en el caso supuesto de  $n=48$ ).

Además de la obtención de la difracción del oleaje, para el cálculo de la agitación dentro del puerto, se toma en cuenta el efecto debido a la reflexión y a la profundidad.

El coeficiente de reflexión que se toma en cuenta, es preferible estimarlo de acuerdo con la observación el campo. Sin embargo, normalmente este coeficiente se estima con base en resultados obtenidos de ensayos en modelos hidráulicos.

Los valores de los coeficientes de reflexión en el presente estudio se estimaron conforme a la **Tabla 4.3**.

El efecto de fondo de profundidad, fue tomado en cuenta con el coeficiente de fondo  $K_s$  que se define en la siguiente ecuación:

$$K_s = \sqrt{\frac{1}{2} n \frac{C_0}{C}} = \frac{H}{H_0} \quad (4.42)$$

Donde:

- $H$  = Altura de ola en la profundidad  $h$
- $H_0$  = Altura de ola equivalente en aguas profundas
- $C_0$  = Celeridad de la ola en agua profundas
- $C$  = Factor de grupo

con:

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{4\pi h/L}{\operatorname{senh}(4\pi h/L)} \right) \quad (4.43)$$

Donde:

- $h$  = Profundidad
- $L$  = Longitud de ola a la profundidad  $h$

Coefficientes de reflexión para zonas fuertemente expuestas\*

Naturaleza del Paramento		TALUD								
		Vert.	1/2	1/1	3/2	2/1	5/2	3/1	5/1	10/1
L I S O	Cemento. Mampostería. Arena.	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.65	0.40	0.15	0.05
	Calizas.			0.70	0.60		0.45			
	100 - 500 Kg.			0.70	0.50		0.30	<0.40	<0.15	<0.05
	1 - 2 Ton.			0.50	0.40		0.25			
> 2 Ton.			0.45	0.35		0.20				

Coefficientes de reflexión para zonas poco expuestas\*

Naturaleza del Paramento		TALUD								
		Vert.	1/2	1/1	3/2	2/1	5/2	3/1	5/1	10/1
L I S O	Cemento. Mampostería. Arena.	1.00	0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.40	0.15	0.05
	Calizas.			0.80	0.70		0.60			
	100 - 500 Kg.			0.75	0.60		0.40	<0.80	<0.35	<0.05
	1 - 2 Ton.			0.70	0.50		0.30			
> 2 Ton.			0.65	0.45		0.25				

\* FUENTE: Resultados experimentales del Laboratorio de Sogreah, Francia.

Tabla 4.3 Valores estándar de los coeficientes de reflexión.

## CAPITULO V DEFINICION DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO.

### 5.1 Condiciones de las simulaciones numéricas.

#### 5.1.1 Condiciones de oleaje.

Las condiciones de oleaje consideradas para realizar la simulación numérica de agitación del oleaje fueron las siguientes:

DIRECCION DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS	DIRECCION REFRACTADA DEL OLAJE FRENTE A LOS MORROS DE ESCOLLERAS	ALTURA DE OLA FRENTE A LOS MORROS DE ESCOLLERAS (m.)	PERIODO DE OLA FRENTE A LOS MORROS DE ESCOLLERAS (seg.)
N 25°E	N 57.3°E	3.90	16.72
N 45°E	N 61.1°E	5.54	17.04
N 75°E	N 67.7°E	5.92	17.19
S 85°E	N 71.8°E	6.01	17.42

Tabla 5.1 Condiciones de oleaje de las simulaciones numéricas de agitación de oleaje realizadas

#### 5.1.2 Batimetría.

La geometría del puerto y las condiciones batimétricas que se tomaron en cuenta para el estudio de agitación, fueron las que se presentan en el plano denominado "PLANO PROTOTIPO (PUERTO INDUSTRIAL DE ALTAMIRA, TAMIS.), CANAL DE ACCESO EXTERIOR, INTERIOR Y DARSENAS" sin número de fecha marzo de 1996, proporcionado por la Administración Portuaria Integral de Altamira S.A. (API).

#### 5.1.3 Resultados.

En las Figs. 5.1 a 5.4 se muestran los resultados obtenidos de la agitación numérica realizada, para cada una de las condiciones de oleaje señaladas en el inciso 5.1.1

De conformidad con los resultados de la agitación del oleaje, se observa que para la dirección N 75° E (en aguas profundas) y T=15.30 seg., se presentan las condiciones más desfavorables, teniendo en promedio alturas de ola de 6.0 m, 5.0 m y 4.0 m para el espigón Sur y de 5.0 m y 4.0 m para el espigón Norte.

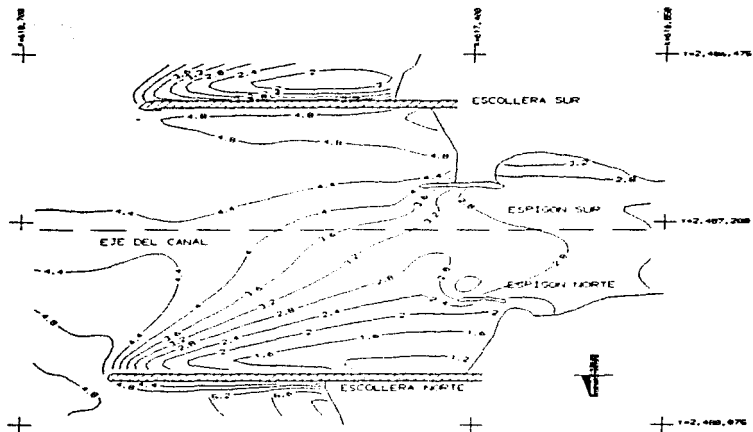


Fig. 5.1 Alturas de ola obtenidas de la agitación numérica para la dirección  $N 57.3^{\circ} E$ ,  $T= 16.72$  seg., y  $H= 4.90$  m.

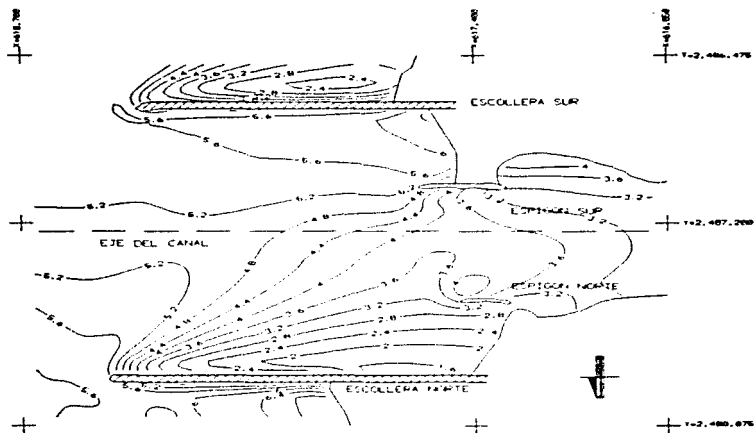


Fig. 5.2 Alturas de Ola obtenidas de la agitación numérica para la dirección  $N 61.1^{\circ} E$ ,  $T= 17.04$  seg., y  $H= 5.54$  m.

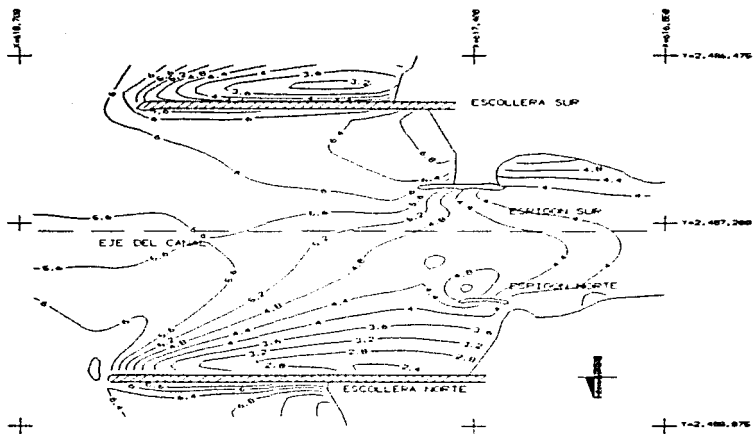


Fig. 5.3 Alturas de ola obtenidas de la agitación numérica para la dirección  $N 67.7^{\circ} E$ ,  $T= 17.39$  seg., y  $H= 5.92$  m.

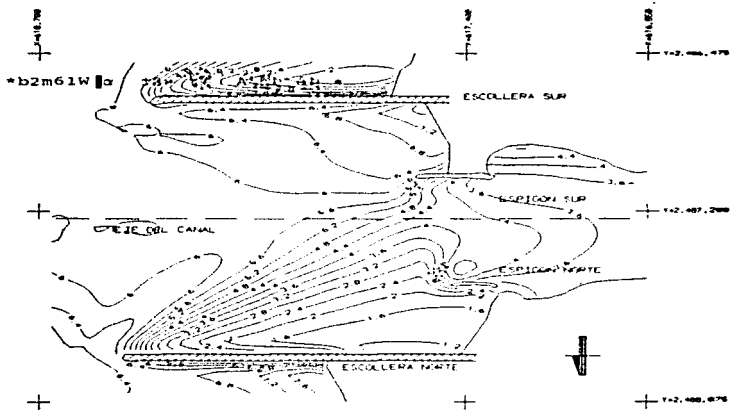


Fig. 5.4 Alturas de ola obtenidas de la agitación numérica para la dirección  $N 71.8^\circ E$ ,  $T = 17.42$  seg., y  $H = 6.01$  m.



**6. PROYECTO DE RECONSTRUCCION DE LOS ESPIGONES INTERIORES DEL PUERTO DE ALTAMIRA, TAMAULIPAS.**

**6.1. Cálculo teórico del peso de los elementos de la coraza en los morros de los espigones norte y sur**

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

$$W = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\cos \alpha \cdot K_d \cdot (S_r - 1)^2}$$

Donde:

$\gamma_s$  = Peso específico del material ( $t/m^3$ )

H = Altura de ola de diseño (m)

$\alpha$  = 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

$\gamma_w$  = Peso específico del agua de mar ( $\gamma_w = 1.03 t/m^3$ )

Tomando como base los resultados de los estudios de refracción y agitación del oleaje, los cuales se presentaron en el capítulo 4, la altura de ola de diseño para la reconstrucción de los espigones interiores es de 5.0 m. para el morro y 4.0 m. para el cuerpo.

La densidad de los elementos (piedra) que constituirán la coraza se consideró con un valor de  $\gamma_s = 2.71 t/m^3$ , de conformidad con los análisis del laboratorio de la piedra del banco El Abra.

El coeficiente de estabilidad de los elementos de protección (piedra colocada al azar) a utilizar en el diseño será de  $K_p = 2.5$  ( para ola rompiente y morro ), y  $K_p = 3.5$  (para ola rompiente y cuerpo)

El coeficiente de estabilidad para los elementos prefabricados (cubos colocados al azar) será de  $K_p = 5.0$  y la densidad considerada es de  $\gamma_s = 2.2 \text{ t/m}^3$

El talud considerado en el proyecto de reconstrucción del morro de los espigones norte y sur fue de 2:1

La longitud considerada de morro corresponde a la comprendida de los cadenamientos 0+050 a 0+090 para el espigón norte y de los cadenamientos 0+040 al 0+000 para el espigón sur.

Para el diseño de la reconstrucción de los morros de los espigones interiores se consideró una estructura formada por núcleo y coraza exterior de protección.

Tomando en cuenta que se dispone de cubos ranurados de concreto con las siguientes características:

260 cubos ranurados de concreto de 34 ton., con dimensiones de 2.52x2.52x2.44 m.

139 cubos ranurados de concreto de 23.65 ton., con dimensiones de 1.70x2.52x2.53 m.

6 Cubos ranurados de concreto de 16 ton., con dimensiones de 1.94x1.94x1.95 m.

El diseño de los morros de los espigones norte y sur, se procedió a calcular el peso requerido para los elementos de la coraza, considerando cubos ranurados y piedra. El resultado del cálculo teórico del peso de los elementos de protección de la coraza en morros se realizó como sigue:

(1) Cubos Ranurados de Concreto

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

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_p (\gamma_s - 1) \cos^2 \alpha} = \frac{(2.2) (5.0)^3}{5.0 (2.14 - 1)^{1/2}} = 19.00 \text{ ton}$$

Donde:

$$Y_r = \frac{Y_g}{Y_w} = \frac{2.20}{1.03} = 2.14 \text{ ton/m}^3$$

(2) Piedra

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

$$W = \frac{Y_w H^3}{K_d (Y_r - 1)^{1/2} \text{cota}} = \frac{(2.71) (5.0)^3}{2.5 (2.63-1)^{1/2}} = 15.61 \text{ ton}$$

Donde:

$$Y_r = \frac{Y_g}{Y_w} = \frac{2.71}{1.03} = 2.63 \text{ ton/m}^3$$

Por recomendación del Shore Protection Manual [2], el rango de pesos de los elementos para la coraza se calcula como sigue:

$0.75 \times 15.61 \text{ ton} = 11.71 \text{ ton} - 12.00 \text{ ton}$  ; Para el límite inferior

$1.25 \times 9.11 \text{ ton} = 19.52 \text{ ton} > 20.00 \text{ ton}$  ; Para el límite superior

(3) Selección de los elementos de protección para la coraza

Tomando en cuenta el peso de los elementos de la coraza determinados en los puntos anteriores y considerando el peso de los cubos de concreto disponibles, para la reconstrucción de los morros de los espigones interiores, se determinó utilizar los bloques de concreto ranurados de 23.65 y de 34 ton.

Cabe mencionar que el peso de los cubos de concreto a utilizar es superior al peso calculado en el punto (1), situación que favorecerá la estabilidad de los morros de los espigones interiores.

El semicono truncado del morro del espigón norte se construirá en su totalidad con cubos ranurados de 23.65 ton. En la Fig. 6.1 se muestra el detalle de la forma en que se deberán colocar los cubos de concreto antes señalados.

El semicono truncado del morro del espigón sur se construirá parcialmente con cubos ranurados de 34 ton., los cuales se colocarán en la zona comprendida entre la profundidad de desplante de la estructura y hasta la elevación +2.00; de la elevación +2.00 a la elevación +5.90 m. se colocarán cubos ranurados de 23.65 ton. En la Fig. 6.2, se muestra el detalle de la forma en que se deberán colocar los cubos de concreto antes señalados.

Para complementar la construcción de los morros, se utilizarán elementos de piedra en núcleo y coraza. En la Fig. 6.3 se muestra el detalle de la forma en que se deberán colocar los diferentes elementos antes señalados.

## 6.2. Cálculo teórico del peso de los elementos de protección del núcleo en morros de espigones Norte y Sur

Tomando como base el peso de los cubos de concreto disponibles, a continuación se determina el peso de los elementos del núcleo.

### (1) Espigón Norte

Peso de los elementos de la coraza en el semicono truncado = 23.65 ton

aplicando la siguiente relación:

$$\frac{W'}{10} = \frac{W''}{15} \quad \text{Resultado:}$$

$$\frac{23.65}{10} = 2400\text{Kg.} \quad ; \quad \frac{23.65}{15} = 1500\text{kg}$$

De conformidad con los resultados anteriores y con la finalidad de aprovechar la explotación del banco de material, así como para evitar el contenido de material fino (tierra), el peso de los elementos de piedra en el núcleo del morro, deberán estar comprendidos en el rango de 5 kg. (como mínimo) a 1500 kg. (como máximo)

## (2) Espigón Sur

De manera similar el peso de los elementos del núcleo en el morro del espigón sur se calculan a continuación.

Peso de los elementos de la coraza en el semicono truncado = 34 ton. hasta la elevación + 2.0 referida al Nivel de Bajamar Media (N.B.M.)

$$\frac{34}{10} = 3400\text{kg} \quad ; \quad \frac{34}{15} = 2300\text{kg}$$

Para evitar el contenido de material fino (tierra), el peso de los elementos de piedra en el núcleo del morro, deberán estar comprendidos en el rango de 5 kg. (como mínimo) a 2300 kg. (como máximo)

## 6.3. Cálculo teórico del peso de los elementos de la coraza en cuerpos de espigones Norte y Sur

Tomando como base que los estudios de refracción y agitación del oleaje, cuyos resultados se presentaron en el capítulo 4, la altura de ola de diseño es de 4.0 m. para el cuerpo de los espigones.

La densidad de los elementos ( piedra ) que constituirán la coraza se consideró con un valor de  $\gamma_s = 2.71 \text{ Ton/m}^3$

El coeficiente de estabilidad de los elementos de protección ( piedra ) a utilizar en el diseño será de  $F_s = 3.5$  ( para ola rompiente )

El talud considerado en el proyecto de reconstrucción del cuerpo de la estructura es de 2:1

La longitud considerada de cuerpo corresponde a la comprendida de los cadenamientos 0+090 a 0+270 para el espigón norte y 0+000 a 0+240 para el espigón sur.

Para el diseño de la reconstrucción del cuerpo de los espigones, se considero una estructura formada por núcleo y coraza exterior de protección.

- (1) Peso de los elementos de coraza en cuerpos de los espigones Norte y Sur

$$W_{cc} = \frac{2.71 \times 4.00'}{3.5 (2.00 + 1.00) (2.00)} = 5.71 \text{ ton.}$$

Rango de pesos para la coraza en cuerpos

$$1.25 \times 5.71 = 7.14 \text{ ton.} \quad = 7.5 \text{ ton.}$$

$$0.75 \times 5.71 = 4.28 \text{ ton} \quad = 4.5 \text{ ton.}$$

#### 6.4. Cálculo teórico del peso de los elementos de protección del núcleo en cuerpos de espigones Norte y Sur

Tomando como base el peso de los elementos de piedra de la coraza de los cuerpos de los espigones norte y sur, a continuación se determina el peso de los elementos del núcleo a utilizar en los morros de los espigones.

Tomando en cuenta que el peso de los elementos de la coraza de los espigones norte y sur es de 4.5 a 7.5 ton., el peso teórico de los elementos del núcleo resulta:

$$\frac{6}{10} = 600\text{kg} \quad ; \quad \frac{6}{15} = 400\text{kg}$$

De conformidad con los resultados anteriores y con la finalidad de aprovechar la explotación del banco de material, así como para evitar el contenido de material fino (tierra), el peso de los elementos de piedra en el núcleo del morro, deberán estar comprendidos en el rango de 5 kg. (como mínimo) a 500 kg. (como máximo)

#### 6.5. Geometría de los espigones

- (1) Cálculo del espesor de coraza para los cubos de 23.65 ton. en punta del morro del espigón Norte.

$$e = K_A \cdot n \left( \frac{H'}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ donde:}$$

$K_A$  = Coeficiente de capa = 1.10

$n$  = Número de capas = 2

$$e = 1.10 (2) \left( \frac{23.65}{2.2} \right)^{\frac{1}{3}} = 4.90 \text{ m.}$$

- (2) Cálculo del espesor de coraza para los cubos de 34 ton. en punta del morro del espigón Sur.

$$e = 1.10 (2) \left( \frac{34}{2.2} \right)^{\frac{1}{3}} = 5.50 \text{ m.}$$

- (3) Cálculo del espesor de coraza para la piedra de 15.61 Ton en morros de espigones Norte y Sur.

$$e = K_A \cdot n \left( \frac{K'}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ donde:}$$

$K_A$  = Coeficiente de capa = 1.15

$n$  = Número de capas = 2

$$e = 1.15 (2) \left( \frac{15.61}{2.71} \right)^{\frac{1}{3}} = 4.12 \text{ m.}$$

- (4) Cálculo del espesor de coraza en cuerpos de espigones Norte y Sur.

$$e = 1.15 (2) \left( \frac{5.71}{2.71} \right)^{\frac{1}{3}} = 2.95 \text{ m.}$$

#### 6.6. Cálculo de los anchos de corona

- (1) Punta del morro de espigones norte y sur)

$$S = 4.90 \times 2(0.236) + 4.00 = 6.31 \text{ m.}$$

- (2) Morro

$$S = 4.12 \times 2(0.236) + 4.00 = 5.95 \text{ m.}$$

- (3) Cuerpo

$$S = 2.95 \times 2(0.236) + 4.00 = 5.40 \text{ m.}$$

#### 6.7. Niveles de corona en morro y cuerpo de espigones Norte y Sur

Para los niveles de corona de morros y cuerpos de los espigones norte y sur se considero que el nivel de corona para el núcleo es de +1.00 m. referido al Nivel de Bajamar Media con elevación 0.00 m. la cual sumada al espesor de la coraza del morro ( 4.12 m.) y del cuerpo ( 2.95 m.), resulta finalmente que las elevaciones de las coronas del morro y cuerpo tienen un valor de +5.12 m. y +3.95 m. respectivamente referidas al Nivel de Bajamar Media. Asimismo, la elevación del semicono truncado de los espigones norte y sur es de +5.90 m.



### 6.8. Características de las secciones

En las Tablas 9.1 a 9.2 se presentan las características de las secciones que se utilizarán en la reconstrucción de los espigones norte y sur.

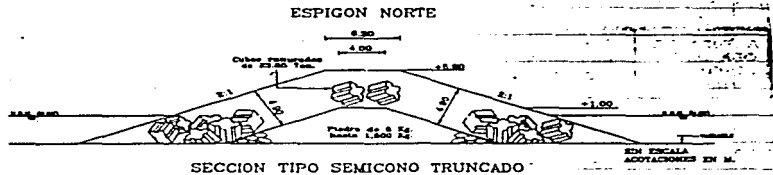
ALTURA DE OLA DE DISEÑO (n)	PESO DE LOS ELEMENTOS			ESPEORES		ELEVACIONES (n)		
	COPAZA MORRO	CORAZA CUERFO	NUCLEO	COPAZA MORRO	COPAZA CUERFO	CORAZA MORRO	CORAZA CUERFO	NUCLEO
5.0 (MORRO)	Cubos ranurados de 21.65 ton. y piedra de 17 a 20 ton.		Piedra de 5 kg a 1500 kg	4.90 (senicono)	2.95	5.90 (senicono)	3.95	1.0
4.0 (CUERFO)				4.12 (morro)		5.12 (morro)		
		Piedra de 4.5 a 7.5 ton.	Piedra de 5 kg. a 500 kg.					

Tabla 6.1 Características de las secciones del espigón norte

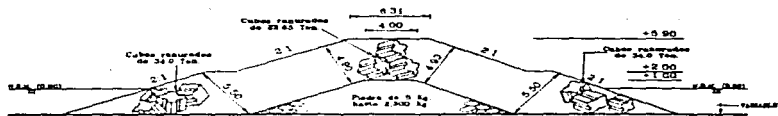
ALTURA DE OLA DE DISEÑO (m)	PESO DE LOS ELEMENTOS			ESPESORES		ELEVACIONES (m)		
	CORAZA MORRO	CORAZA CUERPO	NUCLEO	CORAZA MORRO	CORAZA CUERPO	CORAZA MORRO	CORAZA CUERPO	NUCLEO
5.0 (MORRO)	Cubos ranurados de 34.0 ton. y de 23.65 ton. (senicono) y Piedra de 12.0 a 20.0 ton.		Piedra de 5 kg a 2400 kg (senicono) y Piedra de 5 a 1500 kg.	4.90 y 5.50 (senicono)	2.95	5.9 (senicono)	3.95	1.0
4.0 (CUERPO)				4.12 (norro)		5.12 (norro)		
		Piedra de 4.5 a 7.5 ton.	Piedra de 5 kg. a 500 kg.					

Tabla 6.2 Características de las secciones del espigón sur

ESTA TESIS NO PUEDE SALIR DE LA BIBLIOTECA



# ESPIGON SUR



SECCION TIPO SEMICONO TRUNCADO

SIN ESCALA  
ACOTACIONES EN M

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones más relevantes obtenidas en el desarrollo del presente estudio, se resumen a continuación:

### CONCLUSIONES:

- Los valores extremos de las alturas y períodos significantes en aguas profundas se pronosticaron con la información meteorológica de los ciclones Carla, Inés, Fern, Caroline, Eloise, Allen, Gilbert, Opal y Roxana, ocurridos del 8 de septiembre de 1961 al 9 de octubre de 1966.
- No fue posible pronosticar los oleajes de tormenta producidos por los nortes, por no disponer de información meteorológica (velocidades y duraciones) de dichas perturbaciones. Esta situación no limita los alcances del estudio realizado, toda vez que de conformidad con el comportamiento de las obras de protección existentes, se ha observado que los oleajes generados por la acción de los ciclones han sido más severos que los oleajes generados por la acción de los nortes.
- Las alturas y períodos del oleaje mínimos, medios y máximos en aguas profundas determinadas con el método de predicción de oleaje utilizado, fueron los siguientes:

Nombre del ciclón	Altura de ola Significante $H_s$ (m)			Período de ola Significante $T_p$ (seg)		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
CARLA	0.12	2.72	5.01	6.40	13.08	16.70
INÉS	0.05	1.08	3.02	6.13	10.91	14.10
FERN	0.25	1.58	2.72	5.75	12.08	13.23
CAROLINE	0.10	1.77	3.26	5.90	11.84	15.62
ELOISE	0.11	2.75	4.26	6.63	14.15	20.64
ALLEN	0.31	1.93	2.51	12.93	17.99	26.51
GILBERT	0.10	2.70	6.24	2.62	15.08	20.10
OPAL	0.11	2.32	5.15	5.64	9.66	15.28
ROXANNA	0.14	1.70	4.92	5.94	8.55	13.82

- Al utilizar la distribución de Weibull en los resultados de predicción de oleaje ciclónico realizado, y al considerar un período de retorno de 50 años para el diseño de la reconstrucción de los espigones interiores y para el diseño de las protecciones marginales, se determinó una altura de ola significativa de diseño en aguas profundas de 6.66 m (para la distribución de valores de

alturas de ola máximas).

• Al comparar la altura de ola significativa de diseño en aguas profundas de 6.66 m (correspondiente a un período de retorno de 50 años), con las alturas de ola significativas máximas determinadas con el método de predicción de oleaje ciclónico, se observa que la altura de ola de diseño seleccionada es del orden de la altura de ola máxima originada por el ciclón Gilbert, la cual resultó de 6.24 m. Esta situación verifica la validez de la altura de diseño seleccionada, toda vez que los daños ocurridos en los espigones interiores se presentaron con los oleajes producidos por el ciclón Gilbert.

• De conformidad con los resultados del análisis de predicción de oleaje ciclónico, las direcciones representativas del oleaje en aguas profundas fueron las siguientes:

- (1) Las direcciones (promedios) corresponden con las direcciones N 25° E, N 45° E y N 75° E.
- (2) El máximo valor del ángulo de incidencia del oleaje para el primer cuadrante corresponde con la dirección N 23° E.
- (3) El valor promedio de las direcciones máximas del oleaje que actúan en el primer cuadrante corresponde con la dirección N 33.37° E.
- (4) Tomando en consideración la orientación del puerto respecto al Norte, se establece que las direcciones del oleaje provenientes del 2° y 3° cuadrante no son factibles de que incidan en la boca del puerto.
- (5) Por lo que corresponde al 4° cuadrante, el oleaje incide en la dirección S 85° E.

• De conformidad con lo antes señalado, las direcciones del oleaje representativas de la zona de estudio en aguas profundas (en condiciones ciclónicas) corresponden con N 25° E, N 75° E y S 85° E.

• La sobreelevación promedio del nivel del mar por marea de tormenta calculada con las direcciones del oleaje antes señaladas, con la altura de 6.66 m y con un período 15.30 seg. (valor de las características del oleaje de diseño), resultó de + 3.16 m respecto al Nivel de Bajamar Media (N.B.M.).

• El cálculo numérico de la refracción de oleaje se realizó con la sobreelevación promedio del nivel del mar de +3.16 m., para las direcciones N 25° E, N 45° E, N 75° W y S 85° E, con altura de ola en aguas profundas de 6.66 m. y período de 15.30 seg.

• De los resultados de la refracción de oleaje, se obtuvo que en la zona frente a los morros de las escolleras se presentan las siguientes características promedio del oleaje refractado:

DIRECCION DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS	CARACTERISTICAS DEL OLAJE REFRACTADO		
	DIRECCIONES	ALTURAS DE OLA (m)	PERIODOS DE OLA (seg)
N 25" E	N 57.3" E	4.90	16.72
N 45" E	N 61.1" E	5.54	17.04
N 75" E	N 67.7" E	5.92	17.39
S 85" E	N 71.8" E	6.01	17.42

• El calculo numerico de la agitacion de oleaje se realizo con la sobreelevacion promedio del nivel del mar de +3.16 m. y con las caracteristicas promedio del oleaje refractado frente a los morros de las escolleras:

• De conformidad con los resultados de la agitacion de oleaje, las alturas de ola de diseño consideradas para las obras en cuestion fueron las siguientes:

ESTRUCTURA	ALTURA DE OLA DE DISEÑO ( m )	
	MORRO	CUERPO
ESPIGON NORTE	5.00	4.00
ESPIGON SUR	5.00	4.00
PROTECCION MARGINAL EN PLAYA NORTE		
TRAMO 1	-	4.00
TRAMO 2	-	3.00
PROTECCION MARGINAL EN PLAYA SUR		
EN SEÑO DEL ESPIGON SUR	-	3.00

• La información proporcionada por la Administración Portuaria Integral de Altamira, S.A. de C.V., en lo referente a la posibilidad de utilizar la piedra del Banco el Abra, así como a la disponibilidad de utilizar los cubos de concreto ranurados existentes en la API Altamira para la reconstrucción de los espigones interiores y la construcción de las protecciones marginales en las playas norte y sur interiores, conduce a que en el diseño se considerara para la roca una densidad de 2.71, y para los cubos una densidad de 2.3, resultando con las alturas de ola de diseño antes señaladas, las secciones transversales de dichas estructuras como sigue:

**ESPIGON NORTE:**

- (1) Sección cuerpo compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 500 kg. en el núcleo y con piedras de 4.5 a 7.5 ton. en la coraza.
- (2) Sección punta del morro compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 1500 kg en el núcleo y con cubos ranurados de concreto de 23.65 ton. en la coraza.
- (3) Sección morro compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 1500 kg en el núcleo y con piedras de 12 a 20 ton. en la coraza.

**ESPIGON SUR:**

- (1) Sección cuerpo compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 500 kg. en el núcleo y con piedras de 4.5 a 7.5 ton. en la coraza.
- (2) Sección punta del morro compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 2360 kg en el núcleo y con cubos ranurados de concreto de 24.00 y 23.65 ton. en la coraza.
- (3) Sección morro compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 1500 kg en el núcleo y con piedras de 12 a 20 ton. en la coraza.

**PROTECCION MARGINAL PLAYA NORTE:**

- (1) Sección cuerpo TRAMO 1 compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 500 kg. en el núcleo y con piedras de 4.5 a 7.5 ton. en la coraza.
- (2) Sección cuerpo TRAMO 2 compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 300 kg en el núcleo y con piedras de 2 a 3 ton. en la coraza.



## PROTECCION MARGINAL PLAYA SUR:

- (1) Sección cuerpo compuesta por núcleo y coraza, formada con piedras de 5 a 500 kg. en el núcleo y con piedras de 2 a 3 ton. en la coraza.

### RECOMENDACIONES:

• Con la finalidad de contar con información para programar las reparaciones y/o reconstrucciones que se llegaran a requerir en las escolleras, espigones interiores y protecciones marginales, así como para disponer de información para analizar la influencia que estas estructuras puedan tener en los cambios morfológicos de la costa y del fondo del mar en la zona del canal de acceso, se recomienda:

- (1) Realizar controles periódicos del comportamiento de dichas estructuras, incluyendo los que deberán realizarse después del paso de los ciclones y nortes.
- (2) Realizar monitoreos sistemáticos, mediante la ejecución de seccionamientos del cuerpo de dichas estructuras en toda la longitud, a fin de compararlos con las secciones de proyecto para decidir los recargos o reconstrucciones necesarias si las degradaciones que se llegasen a presentar así lo que requieran.
- (3) Realizar levantamientos batimétricos trimestrales en las zonas interior y exterior del puerto, abarcando 2 Km. en las playas norte y sur de las escolleras (zona exterior de escolleras) y llegando hasta la profundidad de 15 m.
- (4) Realizar estudios para describir la naturaleza y características del material del fondo (roca, arena, etc.) en la zona comprendida entre los senos interiores de expansión del oleaje y la profundidad de 15 m; en el caso de arena, se deberán realizar análisis del tamaño de las partículas (análisis granulométrico) de la capa superficial.
- (5) Realizar mediciones continuas y sistemáticas de la altura, período y dirección del oleaje, cuando menos durante un año, preferentemente con un olografo que se instale en la zona de estudio a una profundidad entre 15 y 20 m.
- (6) Realizar mediciones trimestrales de corrientes en la zona comprendida entre las playas norte y sur interiores y los morros de las escolleras, a fin de correlacionar la velocidad y dirección de las mismas, con el movimiento de la arena en dicha zona.
- (7) Realizar estudios del movimiento de la arena con

trazadores fluorescentes con objeto de realizar el planteamiento de las estructuras de protección necesarias, que sumadas a los espigones interiores y escolleras existentes, permitan reducir los volúmenes de dragado de mantenimiento del puerto.

• Se recomienda realizar un estudio de Factibilidad Técnica-Económica en el que se analicen las alternativas de prolongación de escolleras existentes y la de continuación con los trabajos de dragado de mantenimiento incluyendo los dragados de construcción necesarios, con objeto de contar con elementos para la toma de decisiones en lo referente a los gastos de inversión para el mantenimiento del canal de acceso, espigones interiores y protecciones marginales de protección, toda vez que dichas estructuras se encuentran sujetas a la acción franca del oleaje, requiriéndose de mantenimientos continuos si las condiciones del oleaje que se presenten llegan a ser mayores a las consideradas en su diseño, pues no hay que perder de vista que dichas estructuras fueron concebidas como estructuras interiores de protección contra la sedimentación del canal de acceso y no como estructuras de protección contra el oleaje, cuya función esta última es de las escolleras.

## REFERENCIAS

- 1.- Administración Portuaria Integral de Altamira  
"LEVANTAMIENTO DE RECONOCIMIENTO CANAL DE NAVEGACION  
ENTRE ESCOLLERAS, CADENAMIENTOS 0-000/-2-000, ALTAMIRA,  
TAM.
- 2.- C.E.R.C. (1985) : "SHORE PROTECTION MANUAL". VOLS. I  
Y II. Department of The Army Corps of Engineers, Third  
Edition.
- 3.- Consultores en Ingeniería Fluvio-marítima (1982):  
"ESTUDIOS EN MODELOS Y PROYECTO DE OBRAS EXTERIORES;  
PUERTO INDUSTRIAL ALTAMIRA TAMAULIPAS".
- 4.- Defense Mapping Hydrographic Center of the U.S.A.  
(1975) : "PORTULANO NORTH AMERICA, MEXICO-EAST COAST,  
TAMPICO TO PROGRESO.".
- 5.- Dirección General de Oceanografía Naval de la  
Secretaría de Marina (1977): "PORTULANO MEXICO COSTA  
ESTE, PUERTA JEREN A TAMPICO".
- 6.- Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. (1993) : "TABLAS  
DE PREDICCIÓN DE MAREAS DEL GOLFO DE MEXICO Y MAR  
CARIBE.".
- 7.- Montoya R. J. M., et. al. (1996) "ESTUDIOS EN  
MODELOS MATEMÁTICOS DE REFRACCIÓN Y AGITACIÓN DE OLEAJE  
PARA REALIZAR EL PROYECTO EJECUTIVO DE RECONSTRUCCIÓN  
DE LOS ESPIGONES INTERIORES DEL PUERTO DE ALTAMIRA,  
TAMPS." Reporte Técnico No. L.H.M. 96.2. Elaborado por  
el LABORATORIO DE HIDRAULICA MARITIMA.
- 8.- 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 Ingeniería Hidráulica Portuaria -  
Segunda Etapa; Curso organizado por Puertos Mexicanos  
y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón  
(JICA).

- 9.- Sato S. y Heredia D. J. I. (1994) : "PRONOSTICO DEL OLAJE CAUSADO POR CICLON SOBRE ALGUN PUNTO DE LA COSTA.". Segundo Curso Internacional de Capacitación en Ingeniería Hidráulica Portuaria - Segunda Etapa; Curso organizado por Puertos Mexicanos y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).
  
- 10.- 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 ALTAMIRA, TAMPS."
  
- 11.- 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.