

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Modelo en dos dimensiones
Para el cálculo de la línea de costa

TESIS

Como requisito para obtener el título de
Ingeniero Civil

Presenta

MANTILLA TEMPAKU MEGUMI INGRID

DIRECTOR DE TESIS

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



MÉXICO, D.F.

FEBRERO 2002



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.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



**FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/001/02**

Señorita
MEGUMI INGRID MANTILLA TEMPAKU
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. RODOLFO SILVA CASARIN**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"MODELO EN DOS DIMENSIONES PARA EL CÁLCULO DE LA LÍNEA DE COSTA"

- I. INTRODUCCIÓN**
- II. OLEAJE**
- III. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DE UN ESTADO DE MAR**
- IV. MORFODINÁMICA DE PLAYAS**
- IV. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA**
- V. APLICACIÓN DEL MODELO EN DOS DIMENSIONES**
- VI. CONCLUSIONES**
- FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 10 de enero de 2002.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERNANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

*A mis padres, **Mitsuko y Guillermo**,
por ser la razón de que yo esté aquí*

*A mi abuela **Utako**,
por creer en mí hasta el final*

*A mi tío **Raúl**,
por tener ese gran corazón*

*A mi hermano **Mori**, por acompañarme
a través de todos estos años*

*A mis sobrinos, **Akira y Mitsuki**,
por la ternura y alegría que han traído a mi vida*

AGRADECIMIENTOS

Es grato recordar a todos aquellos que de una forma u otra han participado en la propia formación. Sirvan pues, estas líneas, como humilde homenaje a todos aquellos que tal vez la mente ha olvidado, pero el corazón no.

*Gracias a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, que siempre sigas viva brindado la oportunidad a todo aquél que la necesite*

*Gracias a la **Facultad de Ingeniería**, donde se sufre y se lucha, pero al final se aprende*

*Gracias a todos mis profesores, por compartir conmigo sus conocimientos y paciencia, en especial al **Ing. Manuel Vacío, Ing Rigel Gámez, Ing. Francisco Barrera, Ing. Carlos Crail, Ing. Elí Hernández, Ing. Miguel Ángel Rodríguez Vega, Ing. Marcos Trejo, Ing. Francisco Gorostiza, M. en I. Ricardo Padilla, M. en I. Gabriel Moreno Pecero, M. en I. Agustín Demeneghi y Dr. Gabriel Echávez.***

*Gracias al **Instituto de Ingeniería** y en especial al **M. en I. Víctor Franco**, por impulsar gente de ciencia*

*Gracias al **Dr. Rodolfo Silva**, por su gran disposición, atención y por instruirme a una nueva filosofía de trabajo*

*Gracias a mis amigos y compañeros de generación, **Blanca, Diana, Ema, Evelyn, Hilda, Adal, Atila, Capu, Chayo, Fabio, Huato, Mauricio, Panda, Reynita, Robert y Sergio**, por tolerar mi mal carácter y apoyarme en todos estos años*

*Gracias a mis compañeros del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, y del Instituto, **Ivetty, Marta, Adrián, Alberto, Edgar, Enedino, Gabo, Georges, Gregorio, Gustavo, Juan Ansberto, Juan Carlos, Martín, Paco, Paulo, Roberto y Rod***

*Gracias a la **Comisión Federal de Electricidad**, por facilitarme las mediciones de campo en la realización de este trabajo*

*Gracias a **Fundación ICA**, por promover y crear en la formación de jóvenes ingenieros*

*Gracias a mis amigos de la R-3 Norte y anexos, **Alejandra, Clara, Marta, Susana, Perla, Alexis, Armando, Felipe, Mike, Nieves y, Robert**, por brindarme su amistad a cada momento. En especial a ti **Alexis**, que has mostrado ser un gran compañero y has sufrido esta tesis tanto como yo*

*Un especial agradecimiento al **Lic. Martín Lovera, Arq. Alexandro Gaytán, Arq Iván Gaitán, Arq. Blanca, Arq. Linda Palau, y Arq. Francisco Saenz** por mostrarme que los trabajos multidisciplinarios fomentan la crítica y el mejoramiento de un proyecto*

*Gracias a la familia **Siqueiros Shimada** por dejarme ser parte de ustedes, en especial a ti **Kazumi**, que siempre me has demostrado ser mi mejor amiga y la hermana que hubiese querido tener. Gracias amiguita, por todos estos años*

*Gracias al **Liceo Mexicano Japonés**, tus valores aprendidos siempre me acompañarán*

*Gracias a los **Liceos**, en especial a **Chabela, Fabis, Ávila, Boa, Chema, Gabo, Nori, Pinzas, Roy y Santa**, ustedes han sido más que una familia para mí*

*Finalmente, un especial agradecimiento a todos los **médicos** del mundo que con su labor y virtud de salvar vidas humanas han dejado que mi familia aún esté hoy conmigo*

ÍNDICE

ÍNDICE	1
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE SÍMBOLOS	6
INTRODUCCIÓN	9
1. Introducción	9
2. Importancia	9
3. Objetivos	10
4. Alcances y limitaciones	10
5. Organización de la tesis	10
1. OLEAJE	13
1.1 Introducción	13
1.2 Parámetros característicos del oleaje	14
1.3 Mecanismos de generación	16
1.4 Tipos de oleaje	17
1.4.1 Oleaje SEA (Oleaje Local)	17
1.4.2 Oleaje SWELL (Oleaje Distante)	17
1.5 Transformación del oleaje	18
1.6 Definición de un estado de mar	20
1.7 Descripción estadística y espectral de un estado de mar	21
1.8 Análisis estadístico	21
1.8.1 Hipótesis básicas	21
1.8.1.1 Oleaje como proceso estocástico	21
1.8.1.2 Oleaje como proceso estacionario	24
1.8.1.3 Oleaje como proceso ergódico	24
1.8.2 Descripción estadística de un estado de mar	27
1.8.2.1 La muestra	27
1.8.3 Análisis temporal de la muestra	27
1.8.3.1 Corrección del nivel medio	28
1.8.3.2 Método de pasos ascendentes por el nivel medio, máximos y mínimos	29
1.8.4 Parámetros estadísticos	30
1.9 Análisis espectral	31
1.9.1 Intervalo de muestreo y longitud de registro	31
1.9.2 Corrección del nivel medio	32
1.9.3 Corrección de las discontinuidades	32
1.9.4 Evaluación de los coeficientes de Fourier	33
1.9.5 Suavizado espectral	33
1.9.6 Estimación de la precisión	34
1.10 Parámetros espectrales	35
1.11 Factor de agrupamiento	36
1.12 Relaciones entre el análisis temporal y espectral	38

2. DISTRIBUCIONES	41
2.1 Distribuciones estadísticas de un estado de mar.....	41
2.1.1 Distribución normal de la superficie libre	41
2.1.2 Distribución de alturas de ola	41
2.1.2.1 Distribución de Rayleigh para alturas de ola	41
2.1.2.2 Distribución de Longuet-Higgings (1983) de altura de ola	42
2.1.2.3 Distribución de alturas de ola de Tayfun	43
2.1.2.4 Distribución de alturas de ola de Carter	44
2.1.3 Distribución conjunta de periodo y altura de ola	44
2.1.3.1 Distribución de Longuet-Higgings (1975)	45
2.1.3.2 Distribución de Cavanié et al. (1976)	45
2.1.3.3 Distribución Longuet-Higgings (1983)	47
2.1.4 Distribución de periodos de olas.....	47
2.1.4.1 Distribución de Bretschneider (1959).....	48
2.1.4.2 Distribución de Longuet-Higgings (1975).....	48
2.1.4.3 Distribución de Cavanié et al. (1976).....	48
2.1.4.4 Distribución Longuet-Higgings (1983).....	48
2.2 Distribuciones espectrales de un estado de mar	48
2.2.1 Modelo de Phillips.....	49
2.2.2 Espectro de Neumann	50
2.2.3 Espectro de Pierson-Moskowitz	51
2.2.4 Espectro de Bretschneider	51
2.2.5 Espectro ISSC	52
2.2.6 Espectro TIC.....	52
2.2.7 Espectro de JONSWAP	52
2.2.8 Espectro TMA.....	55
2.2.9 Espectro de Ochi-Hubble	56
3. MORFODINÁMICA DE PLAYAS.....	59
3.1 Introducción	59
3.2 Morfodinámica de playas	59
3.3 Rotura del oleaje.....	61
3.4 Tipología de los estados morfodinámicos límites	65
3.4.1 Playa disipativa.....	66
3.4.2 Playa reflejante.....	68
3.4.3 Perfiles intermedios	70
3.4.4 Estado intermedio: Barra longitudinal y valle, y Barra y playa rítmica	71
3.4.5 Estado intermedio: Barra transversal y RIP.....	72
3.4.6 Estado terrazas mareales	73
3.5 Estado modal de una playa.....	74
3.6 Perfiles de playa	75
3.6.1 Perfil de equilibrio	75
3.6.2 Modelos cinemáticos	76
3.6.2.1 Perfil de equilibrio de Brunn.....	76
3.6.2.2 Perfil de Dean	77
3.6.2.3 Perfiles propuestos por Vellinga	77
3.6.2.4 Factores que afectan el parámetro A.....	77
3.6.2.5 Formulaciones para determinar el parámetro A	78

3.6.3	Modelos dinámicos	80
3.7	Profundidad de cierre.....	81
3.8	Barras.....	83
4.	EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	85
4.1	Introducción	85
4.2	Modelo de oleaje semi-empírico para difracción-refracción causado por estructuras costeras	86
4.3	Variación de la playa y su interacción con el oleaje.....	89
4.4	Modelo del transporte de sedimentos.....	91
4.4.1	Ecuación de continuidad del sedimento	91
4.5	Gasto de transporte longitudinal de sedimentos.....	92
4.5.1	Gasto de transporte longitudinal de sedimentos en función del flujo de energía del oleaje.....	92
4.5.2	Gasto de transporte longitudinal de sedimentos en función de la corriente longitudinal	94
4.5.3	Fórmulas para el transporte longitudinal en el caso de variaciones longitudinales de la altura de la ola en rotura.....	94
4.6	Valores numéricos de los coeficientes de transporte de sedimento K_1 y K_2	96
4.7	Criterios teóricos para K_1 y K_2	96
4.7.1	Cálculo del coeficiente de transporte de sedimento K_1	96
4.7.2	Cálculo del coeficiente de transporte de sedimento K_2	99
4.8	Soluciones numéricas a la ecuación de continuidad del sedimento	99
4.9	Condiciones de contorno y límites de movimiento de la línea de costa.....	101
4.10	Extensión del modelo OLT a dos líneas de costa.....	102
5.	APLICACIÓN DEL MODELO EN DOS DIMENSIONES	103
5.1	Introducción	103
5.2	Modelo de una línea de costa (One Line Theory)	104
5.3	Metodología a seguir para el cálculo	105
5.4	Caso de estudio Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos.....	107
5.5	Zona de estudio	109
5.6	Análisis de la problemática de la Central Termoeléctrica.....	110
5.7	Condiciones iniciales de la Central Termoeléctrica.....	111
5.8	Evolución de la línea de costa y el perfil de playa	114
5.9	Resultados.....	114
6.	CONCLUSIONES	119
7.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	121
8.	BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXO 1	A-1
ANEXO 2	A-37

LISTA DE FIGURAS

Tabla 1.1.-	Características del oleaje.....	14
Tabla 1.2.-	Ejemplo de un posible registro de oleaje.....	15
Tabla 1.3.-	Resultante compleja de la suma de dos ondas sinusoidales.....	16
Tabla 1.4.-	Oleaje SEA y Oleaje SWELL.....	18
Tabla 1.5.-	Esquematización de la obtención del valor de la raíz de la ecuación de la dispersión, Dean et al. 1991.....	19
Tabla 1.6.-	Descripción de los parámetros del oleaje.....	22
Tabla 1.7.-	Representación espectral de un estado de mar.....	35
Figura 2.1.-	Esquema de la distribución de la energía del oleaje en frecuencias.....	49
Figura 3.1.-	Esquema de las principales partes de la zona costera.....	60
Figura 3.2.-	Esquema de las principales partes de la zona costera.....	61
Figura 3.3.-	Rotura del oleaje en decrecimiento.....	62
Figura 3.4.-	Rotura del oleaje en voluta.....	62
Figura 3.5.-	Rotura del oleaje en colapso.....	63
Figura 3.6.-	Rotura del oleaje en oscilación.....	63
Figura 3.7.-	Valores de Iribarren para los cuatro tipos de rotura.....	64
Figura 3.8.-	Regiones en la zona de rotura, Losada, 1988.....	65
Figura 3.9.-	Estado morfodinámico límite – Playa disipativa.....	67
Figura 3.10.-	Estado morfodinámico límite – Playa reflejante.....	68
Figura 3.11.-	Estado intermedio: Barra Longitudinal y Valle.....	72
Figura 3.12.-	Estado intermedio: Barras y Playas Rítmicas.....	72
Figura 3.13.-	Estado intermedio: Barra Transversal y RIP.....	73
Figura 3.14.-	Estado intermedio: Terrazas Mareales.....	73
Figura 3.15.-	Variación del perfil de diversas playas en función de su estado modal.....	74
Figura 3.16.-	Perfil de equilibrio propuesto por Brunn, 1954.....	75
Figura 3.17.-	Variación del parámetro A con el tamaño del grano.....	78
Figura 3.18.-	Valores de A en función del tamaño del grano para playas de arena.....	78
Figura 3.19.-	Equilibrio de flujo de energía en un perfil de playa.....	80
Figura 3.20.-	Profundidad de cierre, Hallemeier, 1978.....	81
Figura 3.21.-	Variación temporal del perfil de playa en las cercanías de la planta Termoeléctrica Adolfo López Mateos, Silva et al. 1996.....	82
Figura 3.22.-	Definición de las características de una barra.....	83
Figura 4.1.-	Esquema para el cálculo del oleaje, Horikawa, 1988.....	87
Figura 4.2.-	Esquema para el cálculo del oleaje utilizando un contorno Modificado en su orientación, Horikawa, 1988.....	90
Figura 4.3.-	Esquema para la ecuación de continuidad del sedimento, Horikawa, 1988.....	91
Figura 4.4.-	Definición de los ángulos asociados a las olas en rompiente, Horikawa, 1988.....	93
Figura 4.5.-	Gráfica propuesta por Bruno et al. 1980. K_1 vs diámetro del sedimento, D_{50}	97
Figura 4.6.-	Gráfica propuesta por Dan et al. 1980. K_1 vs diámetro del sedimento, D_{50}	97
Figura 4.7.-	Dependencia de K_1 con el diámetro del sedimento, D_{50} , López de San Roman, 1996.....	98
Figura 4.8.-	Representación de la posición de la línea de playa y de los gastos en diferencias finitas, Horikawa, 1988.....	100
Figura 4.9.-	Representación gráfica de un muro costero, Horikawa, 1988.....	102
Figura 5.1.-	Molinos hidráulicos.....	103

Figura 5.2.-	Capacidad efectiva instalada de generación.....	103
Figura 5.3.-	Diagrama de flujo del modelo en dos dimensiones.....	106
Figura 5.4.-	Mapa de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos.....	107
Figura 5.5.-	Vista Este-Oeste de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, en donde se observa que no se ha iniciado la construcción de las escolleras, por lo que la línea de costa se encuentra en equilibrio dinámico. Octubre, 1986	108
Figura 5.6.-	Vista Sur-Norte de la zona de escolleras de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos. Marzo, 1988	108
Figura 5.7.-	Panorámica de la Central Adolfo López Mateos, vista de Norte-Sur. se observa la erosión en la línea de costa en la playa Sur, así como la acreción de la playa Norte. Abril, 1990.....	109
Figura 5.8.-	Croquis actual de las estructuras que define la zona de estudio de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos. Se observa las tres escolleras y el bastón que cubren la obra de toma, así como la zona de espigones al Sur de la línea de costa.....	109
Figura 5.9.-	Delimitación de la región de los datos disponibles de la batimetría enfrente de la Termoeléctrica Adolfo López Mateos.....	110
Figura 5.10.-	Línea de costa inicial medida por Comisión Federal de Electricidad en 1985.....	112
Figura 5.11.-	Línea de costa final medida por Comisión Federal de Electricidad en 1995 después de construídas las estructuras y los espigones para la protección de instalaciones de PEMEZ	112
Figura 5.12.-	Batimetría inicial medida por personal de Comisión Federal de Electricidad en 1985.....	113
Figura 5.13.-	Batimetría medida por personal de Comisión Federal de Electricidad en 1995 después de haber sido colocadas las tres escolleras.....	113
Figura 5.14.-	Resultado de la simulación de la línea de costa para el año de 1995	115
Figura 5.15.-	Comparación de las líneas de costa medida en 1995 por CFE y la calculada por la simulación del GÉNESIS	115
Figura 5.16.-	Líneas de costa inicial, final y la calculada por el modelo	116
Figura 5.17.-	Batimetría inicial (1985) calculada por el modelo.....	116
Figura 5.18.-	Batimetría final (1995), calculada por el modelo	116
Figura 5.19.-	Batimetría calculada por el modelo del perfil de playa a partir de los resultados obtenidos con la simulación	
Figura A-1.1.-	Gráfica de las posiciones de línea de costa inicial, final y calculada.....	A-36

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.-	Valores del factor de forma pico del espectro.....	55
Tabla 3.1.-	Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de roturas, Silva, 1997.....	64
Tabla 3.2.-	Tipología de los estados morfodinámicos.....	65
Tabla 3.3.-	Resumen de los valores recomendados para el parámetro A.....	79
Tabla 5.1.-	Datos de oleaje para cada estación del año con la altura de ola, periodo y la dirección del oleaje	111

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Longitud de onda
H	Altura de ola
h	Profundidad
C	Celeridad
T	Periodo
$\eta(t)$	Desplazamiento vertical de la superficie libre del agua
t	Tiempo
σ	Frecuencia angular
g	Aceleración de la gravedad
k	Número de onda
$\eta_{\text{máx}}$	Desplazamiento vertical máximo
$\eta_{\text{mín}}$	Desplazamiento vertical mínimo
a	Amplitud de la onda
T_c	Periodo entre dos crestas sucesivas
$\eta(x,y,z)$	Función que describe al oleaje en términos del tiempo
E	Esperanza matemática
$\Phi(\sigma)$	Función distribución espectral
N	Número de puntos de la muestra
r(H,T)	Correlación entre las alturas de ola y los periodos
$\bar{\eta}(t)$	Variación del nivel medio del mar
η_i	Elevación de la superficie libre del agua en el tiempo t_i
η^2_{rms}	Variación de la media cuadrática de la superficie del agua (varianza)
\bar{H}	Altura media de olas
T	Periodo medio de ola
H_{rms}	Altura cuadrática media
Skw	Asimetría o falta de oblicuidad
Δt	Intervalo de tiempo
f_c	Frecuencia de Nyquist
β	Factor de corrección
S(f)	Función de densidad espectral
S(f_n)	Transformada discreta
$\eta(t_k)$	Transformada inversa de Fourier
$\bar{S}(f)$	Suavizado espectral
m_n	Momento de orden n
ε	Anchura espectral
ν	Anchura espectral (Longuet-Higgings, 1983)
Q_p	Agudeza de pico
T₀₁	Periodo medio de la ola

E(t)	Función de densidad espectral del SIWEH
GF	Factor de agrupamiento
H_{1/n}	Altura promedio del 1/n grupo de olas más altas
P(η)	Función de densidad de la distribución normal de la superficie libre
p(ξ)	Distribución adimensional de alturas de ola
P(H)	Distribución de altura de ola
m_n	Momento de orden <i>n</i>
Erfc	Función de error complementaria
σ_A	Ancho de base del espectro de antes
σ_B	Ancho de base del espectro después
Ir	Número de Iribarren
tan β	Pendiente del fondo
a_b	Amplitud del oleaje incidente
ε	Escala de rompiente
ω	Velocidad de caída
D₅₀	Díámetro del tamaño medio del grano
E_i	Energía en la sección <i>i</i>
C_{gl}	Celeridad de grupo en la sección <i>i</i>
D_{c,t}	Profundidad de cierre en <i>t</i> años
H_{s,t}	Altura de ola significativa que es excedida 12 horas por año
T_{s,t}	Periodo asociado a H _{s,t}
h_T	Profundidad del valle de la barra
h_c	Profundidad sobre la cresta de la barra
h_D	Profundidad de la base de la barra
H_B	Altura de rotura del oleaje
K_d	Coefficiente de difracción
K_r	Coefficiente de refracción
K_s	Coefficiente de someramiento
H_{morro}	Altura de ola en el extremo de la estructura
α₁	Ángulo de salida del rayo desde el extremo de la estructura
α₂	Ángulo de llegada del rayo a P ₂
α_{morro}	Ángulo de llegada de las olas al morro de la estructura
γ	Índice de rotura
Q	Gasto del transporte longitudinal de sedimentos
q	Gasto de sedimento por unidad de longitud de playa
q_s	Gasto de sedimento por unidad de longitud que entra
q_o	Gasto de sedimento por unidad de longitud que sale
K	Coefficiente empírico
α_{Bs}	Ángulo de incidencia del oleaje con la batimetría de rotura

$(E_{c_0})_B$	Cantidad de flujo de energía del oleaje en rotura
ρ	Densidad del agua
I	Transporte longitudinal de sedimentos en peso sumergido
ρ_s	Densidad de los granos del sedimento
λ_s	Porosidad del sedimento
V	Valor representativo de la velocidad de la corriente longitudinal
u_m	Valor máximo de la velocidad orbital horizontal debido en la línea de rotura
K_1 y K_2	Coefficientes del transporte de sedimento
m_k	Pendiente móvil del lecho
x_{s1}	Distancia mar adentro de la línea de costa en la celda i

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Introducción

El ser humano desde su aparición ha aprovechado de una u otra forma los recursos naturales como una manera de subsistencia. Uno de ellos es el agua, el cual, ocupa las tres cuartas partes de la superficie del planeta, y es en los océanos donde se almacena el 97.26% del total de los recursos hidráulicos existentes. Es por ello que el estudio de las zonas costeras llega a ser de vital importancia para la humanidad.

La Ingeniería Marítima es una rama de la Hidráulica que tiene como objetivo analizar y cuantificar los fenómenos que se producen en las aguas oceánicas con el fin de estudiar sobre actividades como navegación, diseño y construcción de puertos, zonas turísticas, estructuras de protección, zonas industriales, explotación de recursos, de tal forma que se establezca la infraestructura adecuada que permita promover el desarrollo de un país. Sin embargo, ésta infraestructura puede ocasionar alteraciones en la zona litoral generando procesos erosivos o acumulativos del sedimento.

En México se ha estudiado poco sobre esta disciplina y mucha de la infraestructura creada dentro del litoral ha sido preestablecida por manuales extranjeros que no necesariamente consideran las limitaciones y capacidades nacionales. En la actualidad existen organismos que se encargan del estudio y experimentación de las zonas costeras como lo son el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Petróleos Mexicanos (PEMEX), la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), entre otros.

Importancia

México es un país con una topografía compleja con una superficie territorial de 1 959 248 km² y el cual tiene una biodiversidad en sus ecosistemas, terrestres y acuáticos, que alberga más del 60% del total del planeta. El territorio mexicano cuenta con un perímetro de 15 818 km de los cuales 11 208 km son litorales. Geográficamente, México se encuentra delimitado por el Océano Pacífico y el Golfo de México, los cuales tienen una superficie marítima de 209 000 km².

Uno de los fines más importantes de la Ingeniería Marítima es la predicción de la evolución de la línea de costa con o sin la presencia de estructuras costeras. Sin embargo, la realización de un modelo de predicción precisa del conocimiento de la interacción entre el oleaje y la batimetría, así como de los mecanismos que inducen el transporte de sedimentos fuera y en el interior de la zona de rompientes.

La finalidad de esta tesis es ejemplificar la evolución de la línea de costa y el perfil de playa aplicándolo a un caso real. Para ello se seleccionó la zona de influencia de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos que se ubica en Tuxpan, Veracruz. Debido a que se cuentan con datos de campo realizados por la Comisión Federal de Electricidad, hace que sea un caso de estudio conveniente para la simulación del modelo, de tal forma que los resultados obtenidos puedan ser comparados. Por tal motivo, se justifica el interés de llevar a cabo estudios enfocados a la estabilidad de playas profundizando así en el conocimiento del proceso evolutivo de las costas. Así

INTRODUCCIÓN

mismo se proporciona una herramienta que es práctica y útil, la cual permite al ingeniero tomar decisiones para la creación y diseño de estructuras costeras.

Objetivos

Los principales objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- Comprender las generalidades del oleaje, sus parámetros característicos, mecanismos de generación y la transformación del mismo
- Conocer y analizar los factores que afectan la evolución en las zonas costeras
- Describir la metodología del modelo propuesto para el cálculo de la evolución de la línea de costa
- Predecir el proceso de la evolución de la línea de costa y el perfil de playa bajo la influencia de los factores físicos y presencia de estructuras costeras que en su conjunto alteran el equilibrio litoral
- Comprender el concepto del perfil de equilibrio de la playa para aplicarlo en el caso de estudio
- Modelar la evolución de la línea de costa en un caso real para un determinado tiempo
- Comparar los resultados obtenidos con los medidos en campo de la zona de estudio

Alcances y limitaciones

Uno de los alcances primordiales de este trabajo es exponer en forma clara y sencilla el modelo en dos dimensiones para observar la evolución de la línea de costa y el fondo marino. En este trabajo se presenta los resultados al aplicar el modelo en una playa donde hubo problemas de erosión ocasionados por la presencia de estructuras costeras.

El análisis realizado contempla una simulación de 10 años en la evolución de la línea de costa, sin embargo, una de las limitantes del modelo es que el perfil de playa no puede describir las formaciones de barras y el perfil de Dean muestra discrepancias debido a que es un perfil de equilibrio. Otra de las limitantes es el cálculo de los coeficientes de transporte de sedimentos K_1 y K_2 , los cuales se tienen que ajustar, además de que el modelo estima la evolución de la línea de costa causado por el transporte litoral.

Organización de la tesis

El presente trabajo está dividido en los siguientes capítulos:

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Oleaje

Se presentan las generalidades del oleaje y su clasificación, así como sus parámetros característicos, mecanismos de generación y su transformación. También se define un estado de mar, su descripción estadística y espectral donde finalmente se muestran las ecuaciones necesarias para hacer los análisis estadísticos y espectrales.

Capítulo 2. Distribuciones estadísticas y espectrales de un estado de mar

Se muestran las distribuciones estadísticas para describir el oleaje a través de las distribuciones de altura de ola de Rayleigh, Longuet-Higgings, Tayfun, Carter y las distribuciones conjuntas de altura y periodo de ola de Longuet-Higgings. Así mismo se presentan distribuciones espectrales como Neumann, Pierson-Moskowitz, Bretschneider, ISSC, JONSWAP, y TMA.

Capítulo 3. Morfodinámica de playas

Se expone la clasificación de costas, las roturas del oleaje, la tipología de los estados morfodinámicos límite, el estado modal de una playa y los perfiles de playa. Se describe el concepto de profundidad de cierre, el perfil de equilibrio, así como los modelos cinemáticos y dinámicos del cálculo de los perfiles.

Capítulo 4. Evolución de la línea de costa

Se describe el modelo de predicción numérica que se basa en la ecuación de continuidad del sedimento y en la ecuación para el transporte longitudinal del sedimento. También se explica los valores numéricos de los coeficientes de transporte de sedimento, K_1 y K_2 . Finalmente, se presentan las soluciones numéricas de la ecuación de continuidad del sedimento por medio de diferencias finitas, condiciones de contorno y límites de movimiento de la línea de costa y la extensión del modelo de una línea de costa.

Capítulo 5. Aplicación del modelo en dos dimensiones

Se aplica el modelo a un caso real en la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, situada en Tuxpan, Veracruz. Se detalla la metodología utilizada para el caso de estudio, así como la problemática de la central termoeléctrica, los datos de campo disponibles para la realización del estudio y los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1. OLEAJE

1. OLEAJE

1.1 Introducción

En la naturaleza rara vez se puede hallar un cuerpo de agua abierto a la atmósfera donde no se presente oleaje sobre su superficie. Estas olas son el resultado de las fuerzas que actúan en el fluido tendiendo a deformarla con la acción de la gravedad y la tensión superficial. De este modo, actúan en forma conjunta para mantener un nivel de la superficie del fluido permitiendo así que el oleaje se propague.

Por lo tanto, para generarse el oleaje se requiere de una fuerza de algún tipo como la causada por el viento al interactuar con la superficie del fluido o por el impacto de algún cuerpo en la superficie. Una vez que éstas son generadas, las fuerzas gravitatorias y la tensión superficial permiten su propagación, de la misma manera que la tensión en una cuerda permite que ésta vibre.

El oleaje se manifiesta en diversos tamaños y formas, dependiendo de la magnitud de las fuerzas que actúan sobre el agua. Un ejemplo en donde se puede entender con más claridad estas manifestaciones del oleaje es cuando se arrojan dos rocas de diferentes tamaños al agua. Una de menor tamaño que la otra, de ésta forma se observa que la roca de mayor tamaño al impactarse con el agua, provoca una onda de mayor tamaño. Por otro lado, también se generan diferentes velocidades de impacto, las cuales indican que las fuerzas de presión que actúan sobre la superficie del fluido son importantes, así como la magnitud de desplazamiento del fluido.

La atracción gravitacional de la Luna, del Sol y de otros cuerpos astronómicos producen las ondas más largas, comúnmente conocidas como mareas. Estas ondas circulan la mitad de su camino alrededor de la Tierra de extremo a extremo viajando a gran velocidad. Las ondas más cortas pueden ser menores a un centímetro de longitud. La longitud de la onda da una idea de la magnitud de las fuerzas que actúan sobre el oleaje.

La importancia del oleaje no puede ser subestimada. Cualquier cuerpo que se encuentre cerca o en un cuerpo de agua está sujeto a la acción del oleaje. En la costa, esta acción puede dar como resultado el movimiento de la arena a lo largo de la playa, causando erosión o daños estructurales durante una tormenta. En el agua, las plataformas petroleras deben ser capaces de soportar severos huracanes sin ser destruidos. Actualmente las perforaciones que exceden 2000 m de profundidad, requieren enormes y muy costosas estructuras. Además todas las embarcaciones están sujetas a la acción del oleaje, innumerables barcos se han hundido a causa de las olas de más de 34 m de altura que han sido observadas. Por otro lado, cualquier barco que se mueva a través del oleaje ejerce presión en el agua, así como en el oleaje. Este oleaje crea una porción significativa de resistencia de movimiento encontrado por los barcos.

El oleaje es un factor importante en la determinación de la geometría y composición de las playas y tienen una influencia significativa en la planeación y el diseño de puertos, canales de navegación, rompeolas, estructuras costeras y otros trabajos costeros. Además, proporcionan un importante recurso de energía que conforman las playas.

El transporte de sedimentos es debido a la acción del oleaje y de las corrientes, las cuales, se definen en función de las características del viento y de las mareas. El adecuado entendimiento de los procesos físicos sobre la superficie en la generación y propagación del oleaje, así como los mecanismos de movimientos de éstos, son esenciales en la planeación y diseño de los trabajos costeros.

Es importante recalcar que el oleaje es el principal agente que provoca la evolución de las playas, es decir, el cambio que éstas presentan tanto en planta como en perfil a través del tiempo. El oleaje real que se produce en el área de generación donde la transferencia de energía del viento hacia la superficie del mar es un fenómeno extraordinariamente complicado.

En este oleaje no existe repetibilidad ni en el espacio ni en el tiempo. Dada la altura de una ola en un punto determinado, no es posible predecir la altura en ese punto de la siguiente ola. Estos fenómenos son irregulares y variables y no pueden ser representados por un modelo de onda sencillo, sino que es necesario abordarlo con métodos estadísticos, considerando así al oleaje como un fenómeno aleatorio.

1.2 Parámetros característicos del oleaje

Es imprescindible conocer las características físicas del oleaje y por ello es necesario clasificar los parámetros que se utilizan para describirlo. Los parámetros que son importantes en la descripción del oleaje son la longitud y la altura de la ola, así como la profundidad del agua en donde se propaga. Todos los demás parámetros, tales como las velocidades y aceleraciones inducidas por el oleaje, pueden ser determinadas teóricamente a través de sus formulaciones.

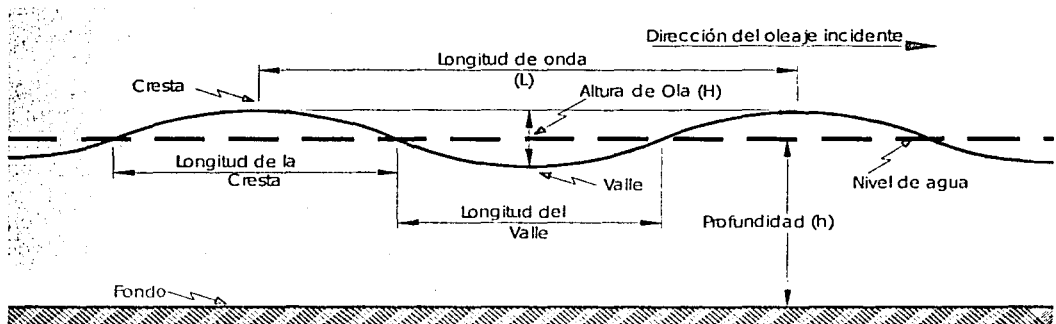


Figura 1.1. Características del Oleaje

En la **Figura 1.1** se muestra un esquema bidimensional de la propagación de una ola en dirección x . La diferencia de la cresta y el valle definen la altura de ola, H . La longitud de la ola, L , es la distancia horizontal entre dos crestas sucesivas de la ola, o la distancia

valles sucesivos de la ola. Además, la longitud de la ola es dependiente de la profundidad, h , donde se propaga y del período T , que es el tiempo que transcurre entre dos crestas al pasar por un punto fijo.

Debido a que el oleaje se mueve a una distancia L , en un tiempo T , la velocidad de la onda conocida como celeridad C , es definida como:

$$C = \frac{L}{T} \quad (1.1)$$

Mientras que la forma de la ola viaja con una celeridad, el agua que la comprende no se traslada en la dirección de propagación del oleaje.

Las coordenadas de los ejes que se usarán para describir el movimiento del oleaje, se localizarán en el nivel medio del mar, siendo $z = 0$. El fondo del cuerpo de agua estará localizado en la coordenada $z = -h$.

Las olas en la naturaleza rara vez se presentan exactamente igual y tampoco se propagan en la misma dirección. Si se colocara un instrumento de medición sobre la superficie libre del mar, η , en función del tiempo, probablemente se obtendría un registro tal como se muestra en la **Figura 1.2**.

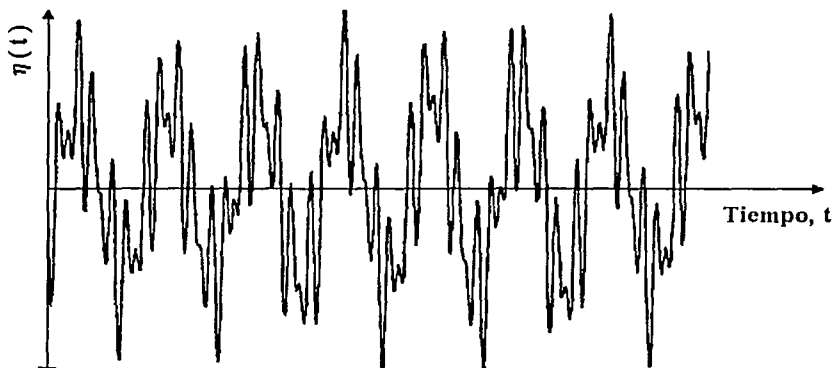


Figura 1.2. Ejemplo de un posible registro de oleaje

Este estado de mar puede ser visto como una superposición de un gran número de ondas sinusoidales viajando en diferentes direcciones. Esta superposición de componentes es la que permite hacer uso del análisis de Fourier y de las técnicas espectrales para describir el estado de mar. Desafortunadamente, la gran cantidad de aleatoriedad en los estados de mar, conlleva a la utilización de diversas técnicas estadísticas. Sin embargo, las ondas largas y aquellas que se propagan en aguas poco profundas aparentan ser más regulares y menos aleatorias que las ondas pequeñas y las que se propagan en aguas muy profundas.

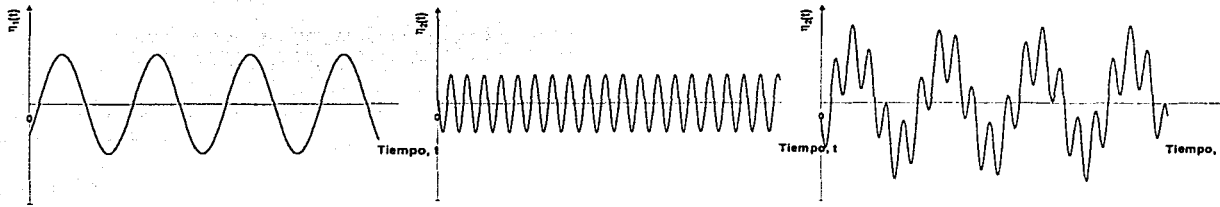


Figura 1.3. Resultante compleja de la suma de dos ondas sinusoidales

1.3 Mecanismos de generación

Muy a menudo el oleaje que se presenta en el océano suele ser confuso y de constantes cambios en las crestas y valles de la superficie del agua. Esto se debe a la irregularidad de la forma del oleaje así como su variabilidad en la dirección de propagación. Por otro lado, también se puede afirmar que las olas son ondulaciones que se presentan sobre la superficie libre del mar formando movimientos ascendentes y descendentes dando una secuencia de los movimientos que forman las crestas y los valles.

Esta particularidad que tiene el oleaje se produce por la influencia del viento. Al soplar el viento se generan ondas con diversos periodos, longitudes y alturas. Mientras que las ondas largas son lentas al formarse, las de periodos pequeños se generan rápidamente creando así un punto de inestabilidad.

Debido a que el oleaje se propaga en diferentes direcciones, la dirección dominante de propagación del oleaje puede ser considerada como el promedio de las direcciones de las olas individuales. La superficie del mar es difícil de describir debido a la interacción individual de las olas. Las olas algunas veces se fortalecen o contrarrestan una a la otra debida a esta interacción, muchas de las veces colisionan una con la otra y son transformadas en turbulencias.

Cuando las olas se mueven fuera del área de donde son afectadas directamente por el viento, éstas asumen un estado más organizado de propagación que definen crestas y valles con ascensos y descensos que suelen ser rítmicos. Estas olas pueden viajar cientos o miles de kilómetros después de haber dejado el área de donde fueron generadas. La energía del oleaje se disipa dentro del fluido por la interacción del viento, la turbulencia en rompiente y el fondo de aguas poco profundas.

El oleaje que se extiende hacia las regiones costeras disipa la mayor parte de su energía propagándolo hacia la costa. Cuando el oleaje se aproxima a la costa, se transforma en un oleaje con periodos casi uniformes y larga líneas de crestas.

Con todo lo anterior se puede concluir que el movimiento del agua en el mar puede ser iniciado por variaciones naturales o por variaciones que el ser humano causa. Tales como son el viento, la fricción, la transmisión de la energía del viento hacia las olas, la atracción gravitacional entre la Tierra, la Luna y el Sol, la erupción de volcanes submarinos, terremotos, derrumbes marinos, explosiones y el paso de las embarcaciones a través del océano. Aún así, la principal causa de generación del oleaje es el viento.

1.4 Tipos de oleaje

El oleaje puede tener diferentes características dependiendo de factores muy variados como la dirección y la velocidad del viento, que estén dentro del fetch o que no estén dentro del área de generación. Los tipos de oleaje suelen ubicarse entre dos extremos que se distinguen, entre otras características, por su posición respecto de la zona de generación. Esta zona se define como la región en la que la transferencia de energía del viento a la superficie del mar es el motor principal del movimiento. De esta forma, los extremos se denominan con las palabras inglesas SEA y SWELL.

1.4.1 Oleaje SEA (Oleaje Local)

Este tipo de oleaje se encuentra en la zona de generación de alta mar. Allí se aprecian muy pocas veces crestas de cierta longitud y no existen periodos bien definidos. Se caracteriza por su irregularidad, por la superficie líquida caótica, multitud de direcciones de avance que no producen crestas ni senos definidos, es un oleaje carente de periodicidad.

En el estado SEA se presentan dos características principales:

- Asimetría
- Apuntalamiento (oleaje con gran peralte)

Cuando se presenta viento de intensidad considerable pueden formarse verdaderas montañas de agua en cualquier punto, las cuales a su vez soportan miles de protuberancias menores. En este tipo de oleaje no pueden medirse periodos ni longitudes de onda. Las alturas de ola son impredecibles. Dada una ola con una altura determinada la siguiente puede ser más pequeña o mayor.

1.4.2 Oleaje SWELL (Oleaje Distante)

Este tipo de oleaje ocurre cuando las olas se propagan y abandonan el área de generación. Presenta tres fenómenos que la caracterizan:

- Pierde energía ya que las ondas viajan a expensas de su propia energía, a esto se le llama decaimiento.
- Sufren una doble dispersión:
 - ⊕ Dispersión angular, donde las olas se dispersan en todas direcciones
 - ⊕ Dispersión radial, debido a que las ondas más largas viajan más rápido que las cortas; por tanto, se produce un filtrado de las olas.

- A los fenómenos anteriores hay que adicionar el de soldadura. Las ondas de periodos cercanos se sueldan en largas crestas de onda lo que provoca que la superficie caótica del oleaje SEA se vaya simplificando.

En general, al envejecer el oleaje y sobre todo al alejarse del área de generación, tiende a un oleaje SWELL. Esto se va acentuando sobre la plataforma costera, en profundidades reducidas donde a los fenómenos ya citados se le agrega la refracción, que hace que las ondas tiendan a progresar en forma paralela a las líneas batimétricas.

El oleaje que se acerca a la costa es más regular, se forman frentes de crestas largas hasta de varios centenares de metros y el periodo y la longitud de ondas sucesivas difiere poco. Surge una periodicidad y las direcciones no son tan dispersas, sino que existen direcciones predominantes, y se puede decir entonces que el fenómeno presenta cierto orden.

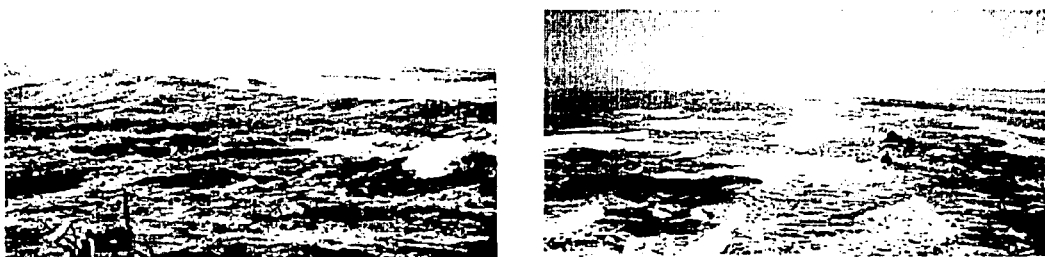


Figura 1.4. Oleaje SEA y Oleaje SWELL

1.5 Transformación del oleaje

Las transformaciones que sufre el oleaje son la refracción, el someramiento y la difracción, éste último sólo aparece con la presencia de algún tipo de estructuras. La refracción es consecuencia del cambio en la celeridad de onda como función de la profundidad, de las corrientes locales y del periodo de onda. Las olas refractadas cambian su dirección de propagación y las líneas que forman las crestas tienden a llegar paralelas a las líneas de contorno del fondo. El someramiento es consecuencia del cambio de la velocidad de propagación del flujo de energía de la ola.

Existen dos conceptos fundamentales para el estudio del oleaje:

- Frecuencia angular

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (1.2)$$

donde T es el periodo de la onda

• Número de onda

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (1.3)$$

donde L es la longitud de la onda

Una expresión indispensable para determinar la longitud de onda es la ecuación de la dispersión:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (1.4)$$

Esta ecuación relaciona el número de onda, la frecuencia angular y la profundidad, ya sea para aguas profundas, intermedias o muy pocas profundas.

La ecuación de la dispersión también se puede escribir con la siguiente relación:

$$\frac{\sigma^2 h}{g(kh)} = \tanh(kh) \quad (1.5)$$

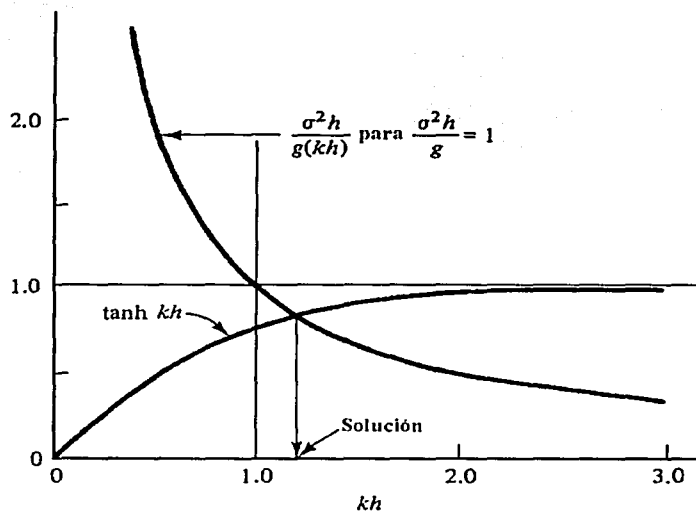


Figura 1.5. Esquemización de la obtención del valor de la raíz de la ecuación de la dispersión, Dean et al.1991

En la **Figura 1.5** se muestra la solución gráfica a la relación de la dispersión como la intersección de las curvas para cada valor de kh , de tal forma que se obtenga un valor equivalente de k para valores dados de σ y h .

Por otra parte, la velocidad de propagación de la onda o celeridad, C , puede expresarse a partir de la relación de la dispersión en función de la frecuencia angular, σ , y el número de onda, k :

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (1.6)$$

De una forma similar se puede obtener la longitud de onda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (1.7)$$

Analizando las ecuaciones anteriores, se determina que para:

◊ Aguas poco profundas $kh < \pi/10 \rightarrow L = T\sqrt{gh} \quad (1.8)$

$$C = \sqrt{gh} \quad (1.9)$$

◊ Aguas profundas $kh > \pi \rightarrow L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (1.10)$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \quad (1.11)$$

◊ Aguas intermedias $\pi/10 < kh < \pi \rightarrow L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (1.12)$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (1.13)$$

1.6 Definición de un estado de mar

Se define como estado de mar aquella situación o período de tiempo en el cual y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen. Esto produce que el fenómeno permanezca en un estado aproximadamente estacionario.

Otra forma de definir el estado de mar es que cada una de las posiciones de la dinámica del oleaje tienen una variación lo suficientemente lenta como para considerar que el proceso es estacionario.

En consecuencia, el oleaje puede considerarse formado por dos variaciones:

- ◊ Variación de periodo corto.- Es una variación muy rápida, de segundos, la cual se considera dentro del proceso estacionario.

- Variación de periodo largo.- Es una variación lenta, de horas, en la cual se evoluciona el estado de mar, es decir, la variación del estado.

La delimitación de estos períodos se fijará por una solución de compromiso, ya que un estado de mar, por un lado, debe ser suficientemente corto para poder admitir la hipótesis de estacionariedad, y por otro debe ser lo suficientemente largo como para que al tomar una muestra de él albergue el número necesario de olas que posibilite su tratamiento con cierto rigor.

Cuando se registran las variaciones de la superficie libre, el tiempo de muestreo debe ser lo suficientemente corto para cumplir con la estacionariedad, y a la vez, tan largo como para medir un número de olas adecuado. Se recomienda que este intervalo sea de 10 a 20 minutos por cada hora. Los parámetros estadísticos obtenidos de la muestra se extiende a toda la hora del intervalo, con lo que se admite que la duración del estado de mar es de esa hora.

1.7 Descripción estadística y espectral de un estado de mar

La línea a seguir en el tratamiento del oleaje puede contemplarse en una doble vertiente. Es decir, que un estado de mar puede estudiarse bajo dos puntos de vista:

- Propiedades estadísticas.- Parámetros y distribuciones de $\eta(t)$ y el resto de los parámetros que definen al oleaje, es decir, la descripción estadística del estado de mar.
- Estudio del espectro.- Descripción espectral del estado de mar, es decir, a partir del espectro se puede deducir los parámetros del oleaje y compararlos con los obtenidos a través de la descripción estadística.

1.8 Análisis estadístico

1.8.1 Hipótesis básicas

El análisis estadístico requiere de la aceptación de algunas hipótesis básicas que facilitan el desarrollo del modelo.

1.8.1.1 Oleaje como proceso estocástico

En general, las olas en el mar no son regulares, es decir, no tienen periodicidad con respecto al tiempo y al espacio. Es un proceso esencialmente aleatorio. Es por esta razón que se considera al oleaje como un conjunto de ondas viajando en diferentes direcciones θ_i , con diferentes amplitudes a_i , frecuencias σ_i y fases ε_i .

Una manera de describir un proceso estocástico es considerando al oleaje en un punto de la superficie libre del mar con respecto del nivel medio del mar (N.M.M) como se muestra en la Figura 1.6.

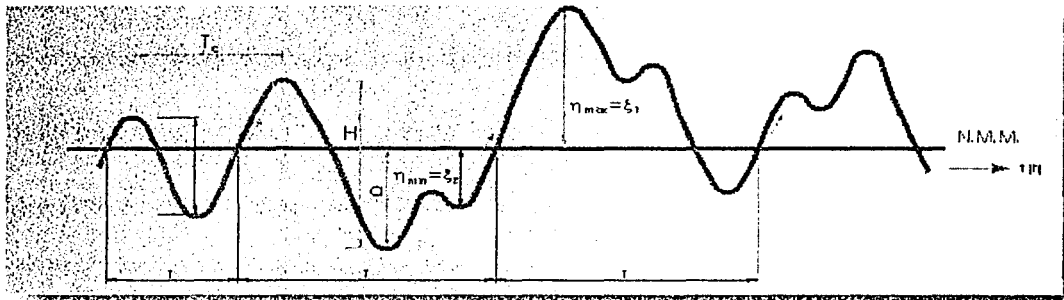


Figura 1.6. Descripción de los parámetros del oleaje

Donde se define como:

$\eta(t)$ = desplazamiento vertical de la superficie libre del agua con respecto del nivel medio del mar

$\eta_{m\acute{a}x}$ = desplazamiento vertical máximo, que pueden ser positivos (ξ_1) o negativos (ξ_2)

$\eta_{m\acute{i}n}$ = desplazamiento vertical mínimo

T = período entre pasos ascendentes

T_c = período entre dos crestas sucesivas

a = amplitud de onda

H = altura de ola

El fenómeno aleatorio está caracterizado por una función $\eta(t)$ de tal forma que puede ser estudiado como una superposición lineal de ondas armónicas simples de forma que el perfil de la superficie libre puede ser descrito por:

$$\eta(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[\frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i \right] \quad (1.14)$$

Bajo este punto de vista, el análisis del oleaje puede estudiarse por medio de la estadística. De lo anterior se deduce que el oleaje debe ser considerado como un proceso

estocástico en donde el resultado es una función. La muestra tomada de dicha realización es también una función que será denotada como $\eta_k(t)$.

Si se observa en un instante determinado, t_i , es claro que $\eta(t_i)$ es una variable aleatoria. Si se consideran n -instantes, t_1, t_2, \dots, t_n , se puede decir que es una variable n -dimensional $\eta(t_1, t_2, \dots, t_n) = (\eta(t_1), \eta(t_2), \dots, \eta(t_n))$. De tal forma que el proceso $\eta(t)$ puede considerarse definido para cualquier n -instantes, t_1, t_2, \dots, t_n como la función de distribución:

$$F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \Pr [\eta(t_1) \leq x_1, \eta(t_2) \leq x_2, \dots, \eta(t_n) \leq x_n] \quad (1.15)$$

de la variable aleatoria n -dimensional $\eta(t_1, t_2, \dots, t_n)$.

Estas distribuciones deben satisfacer las siguientes condiciones:

- ◆ Condición de simetría

$$F_{t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_n}}(x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_n}) = F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.16)$$

donde j_1, j_2, \dots, j_n es cualquier permutación de los índices $1, 2, \dots, n$.

- ◆ Condición de compatibilidad

$$F_{t_1, t_2, \dots, t_m, t_{m+1}, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, \infty) = F_{t_1, t_2, \dots, t_m}(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1.17)$$

para cualquier t_{m+1}, \dots, t_n si $n > m$.

Para tener definido el proceso $\eta(t)$, sería necesario conocer todas las posibles funciones de distribución dadas por la ecuación (1.15) para cualquier η . Sin embargo, el estudio de estos procesos suele simplificarse, mediante la llamada teoría de la correlación, que tiene en cuenta exclusivamente los dos primeros momentos del proceso:

El valor medio queda definido como

$$m(t) = E \eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x dF_t(x) \quad (1.18)$$

La función de correlación (o autocorrelación) se expresa por

$$B(t, s) = E \eta(t) \eta(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 dF_{t,s}(x_1, x_2) \quad (1.19)$$

donde E denota el operador "esperanza matemática".

El valor medio y la función de correlación no especifican el proceso $\eta(t)$. Sin embargo la teoría de correlación es, actualmente, la única teoría suficientemente desarrollada para

permitir aplicaciones prácticas. Además, su valor crece si se tiene en cuenta el hecho de que los procesos que se encuentran en la práctica, son comúnmente normales (Gaussianos), es decir que todas las distribuciones dadas por la ecuación (1.15) son normales. Para procesos $\eta(t)$ normales el valor medio y la función de correlación definen el proceso completamente.

No obstante haber restringido al uso de los dos primeros momentos, todavía resulta el problema prácticamente inabordable. Con el objeto de simplificar el proceso estocástico $\eta(t)$ que constituye el oleaje a un nivel de complejidad abordable técnicamente es necesario admitir dos hipótesis estadísticas: estacionario y ergódico.

1.8.1.2 Oleaje como un proceso estacionario

Un proceso $\eta(t)$ es estacionario si todas las funciones de distribución dadas por la ecuación (1.15) de dimensión finita, que definen el proceso, permanecen iguales al trasladar el grupo completo de puntos t_1, t_2, \dots, t_n a lo largo del eje de tiempos un intervalo cualquiera de tiempo τ . Es decir, si:

$$F_{t_1+\tau, t_2+\tau, \dots, t_n+\tau}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.20)$$

para cualquier n , τ , t_1, t_2, \dots, t_n .

Un fenómeno físico puede decirse estacionario si las condiciones externas que influyen en él permanecen constantes durante un cierto periodo de tiempo. En el caso del oleaje, a este periodo de tiempo, durante el cual y debido a la inercia del fenómeno, existe un cierto equilibrio entre las fuerzas que intervienen en el proceso, permaneciendo su manifestación aproximadamente estacionaria, se le llama **estado de mar**.

Admitido el carácter estacionario del proceso $\eta(t)$, se deduce que el valor medio es una constante:

$$m(t) = m \quad (1.21)$$

y la función de correlación depende sólo de la diferencia $\tau = t - s$.

$$B(t, s) = R(\tau) \quad (1.22)$$

1.8.1.3 Oleaje como un proceso ergódico

En general para estimar la media m y la función de correlación $R(\tau)$ de un proceso estocástico estacionario, se debería tomar un gran número de muestras, realizaciones, $\tau_1(t)$, $\tau_2(t)$, ..., $\tau_n(t)$ y a partir de ellas estimar m y $R(\tau)$. La hipótesis de ergodicidad, aplicable a la mayor parte de los procesos estacionarios que se encuentran en la práctica, permiten calcular m y $R(\tau)$ a partir de una sola realización. El teorema de ergodicidad puede enunciarse como sigue.

Si $\eta(t)$ es un proceso estocástico estacionario que satisface ciertas condiciones, entonces:

$$m = E \eta(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) dt \quad (1.23)$$

$$R(\tau) = E \eta(t) \eta(t+\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) \eta(t+\tau) dt \quad (1.24)$$

De esta forma, la hipótesis de ergodicidad permite sustituir los promedios espaciales de realizaciones por promedios temporales sobre una sola realización.

La descripción de un estado de mar a partir de un único registro, (realización temporal, $\eta_1(t)$), se basa en admitir que se trata de un proceso estacionario y ergódico. Puede demostrarse que todo proceso estocástico estacionario $\eta(t)$, puede ser aproximado de una forma arbitrariamente precisa por una combinación lineal de oscilaciones armónicas del tipo: $Ae^{i\sigma t}$, donde A es una variable aleatoria compleja y σ una constante real (frecuencia angular, $2\pi f$). Este hecho constituye la base de la llamada representación espectral de un proceso estacionario.

Se ha demostrado (Kinchin, 1934) que la función de correlación de cualquier proceso estocástico estacionario puede representarse por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) d\Phi(\sigma) \quad (1.25)$$

donde $\Phi(\sigma)$, llamada función de distribución espectral del proceso, es una función acotada, real y no decreciente.

Puede demostrarse que si se cumple la condición:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R(\tau)| d\tau < \infty \quad (1.26)$$

$R(\tau)$ puede representarse por la integral de Fourier tal que:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\sigma) e^{i\sigma\tau} d\sigma \quad (1.27)$$

entonces,

$$\Phi(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\sigma) d\sigma \quad (1.28)$$

$$\phi(\sigma) = \frac{d\Phi(\sigma)}{d\sigma} \quad (1.29)$$

La función $\phi(\sigma)$ se llama función de densidad espectral del proceso $\eta(t)$, y tiene la propiedad de ser no negativa.

$$\phi(\sigma) \geq 0 \quad \forall \sigma \quad (1.30)$$

De acuerdo con la ecuación (1.27) $R(\tau)$ es la transformada de Fourier de $\phi(\sigma)$, por tanto usando la fórmula para la inversión de una transformada de Fourier:

$$\phi(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\sigma\tau} d\tau \quad (1.31)$$

En el caso de que el proceso $\phi(\sigma)$ sea real, como lo es el del oleaje, la función $\Phi(\sigma)$ es una función par, entonces las expresiones dadas por las ecuaciones (1.27) y (1.31) se pueden escribir como:

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} S(\sigma) \cos \sigma\tau d\sigma \quad (1.32)$$

$$S(\sigma) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \sigma\tau d\tau \quad (1.33)$$

donde $S(\sigma)$ es la función de densidad espectral, la cual está definida solamente para $\sigma \geq 0$, y está relacionada con $\phi(\sigma)$ por.

$$S(\sigma) = 2\phi(\sigma) \quad (1.34)$$

Por tanto la ecuación (1.32), se puede escribir como:

$$R(0) = E\eta^2(t) = \int_0^{\infty} S(\sigma) d\sigma \quad (1.35)$$

es decir, que el área bajo la curva $S(\sigma)$ es igual al valor medio de los desplazamientos verticales, y admitiendo que $m = E\eta(t) = 0$ resulta que dicha área es igual a la varianza de los desplazamientos verticales.

Se define como momento de orden n del espectro:

$$m_n = \int_0^{\infty} \sigma^n S(\sigma) d\sigma \quad (1.36)$$

1.8.2 Descripción estadística de un estado de mar

1.8.2.1 La muestra

Es adecuado considerar como punto de partida que se tiene un registro temporal de la superficie del mar en un punto dado, en principio en profundidades indefinidas con el objeto de eliminar el efecto de contorno, mismo que se ha registrado durante un tiempo determinado de forma continua. Se tendrá, por tanto, una muestra del oleaje y se admitirá que este registro representa un estado de mar. Con carácter totalmente general se puede decir que el registro tomado tendrá un aspecto semejante al de la **Figura 1.6**, donde las variaciones en el tiempo con respecto a su nivel medio vienen dadas por $\eta(t)$.

Para definir el periodo y la altura de ola, se hace uso del criterio de pasos ascendentes por el nivel medio, "zero up-crossing". Este método consiste en identificar dos cortes sucesivos en forma ascendente de superficie libre con el nivel de referencia, con lo cual el máximo desplazamiento entre cresta y valle determinará la altura de ola H ; y el periodo de la ola T , quedará definido como el tiempo que transcurre entre corte y corte con dicho nivel.

1.8.3 Análisis temporal de la muestra

La duración estándar de un registro de oleaje es normalmente de alrededor de 20 minutos. Si el período medio es de 10 segundos, un registro de oleaje con dicha duración contendrá aproximadamente 120 olas. Este número de olas se considera suficiente para conocer las características de altura de ola y período a un nivel aceptable.

En un registro de oleaje, los cambios en el estado de mar pueden llegar a ser apreciables si la longitud temporal es mucho mayor. También, el tiempo de procesamiento de un registro aumenta a medida que su longitud es mayor.

La duración de 20 minutos es empleada como un compromiso entre los requisitos de tener un registro corto y a la vez de tener un estado de mar estacionario. Algunos aparatos de medición registran 17 minutos 04 segundos, con lo cual se tienen 2048 datos con una frecuencia de muestreo de dos datos por segundo. La razón de esto es economizar el tiempo de cálculo para el análisis espectral usando la transformada rápida de Fourier. Sin embargo, en ensayos típicos de laboratorio, casi siempre, los registros de oleaje contienen al menos 200 olas o más, con el objeto de reducir las variaciones estadísticas.

Por otro lado, el intervalo de muestreo debe ser tan pequeño como sea posible. Comúnmente es menor a una décima parte del periodo de ola significativa, y preferiblemente una vigésima parte. Un intervalo de muestreo más fino no es benéfico, dado que el volumen de datos a procesar sería muy grande sin producir un correspondiente incremento en la información resultante. Un intervalo de muestreo más burdo introducirá problemas dado que se perderían las olas más pequeñas, subestimando los máximos y mínimos de los perfiles de oleaje, y por lo tanto se pueden introducir errores a la hora de evaluar su estadística.

1.8.3.1 Corrección del nivel medio

Normalmente, los registros de oleaje contienen la influencia de la variación de la marea, por tanto, es mejor incorporar una corrección del nivel medio. Esto se puede hacer de tres formas:

- Media aritmética - Consiste en obtener la media aritmética de la superficie libre para todo el registro, para posteriormente restarla a cada dato.
- Corrección lineal - La ecuación para realizar esta corrección se obtiene por medio del método de mínimo cuadrados, tal que:

donde
$$\bar{\eta} = A_0 + A_1 n \Delta t \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1.37)$$

$$A_0 = \frac{N_2 Y_0 - N_1 Y_1}{N_0 N_2 - N_1^2}, \quad A_1 = \frac{N_0 Y_1 - N_1 Y_0}{N_0 N_2 - N_1^2}, \quad (1.38)$$

$$Y_r = \sum_{n=1}^N (n \Delta t)^r \eta_n, \quad N_r = \sum_{n=1}^N (n \Delta t)^r, \quad (1.39)$$

N denota el número de puntos de la muestra.

- Corrección parabólica - La ecuación para realizar esta corrección para un cambio parabólico se deduce, a partir del método de mínimos cuadrados, una ecuación de segundo grado.

$$\bar{\eta} = B_0 + B_1 (n \Delta t) + B_2 (n \Delta t)^2 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1.40)$$

donde

$$B_0 = \frac{1}{\Delta} [Y_0 (N_2 N_4 - N_3^2) + Y_1 (N_1^2 N_3 - N_1 N_4) + Y_2 (N_1 N_3 - N_2^2)] \quad (1.41)$$

$$B_1 = \frac{1}{\Delta} [Y_0 (N_2 N_3 - N_1 - N_4) + Y_1 (N_0 N_4 - N_2^2) + Y_2 (N_1 N_2 - N_0 N_3)] \quad (1.42)$$

$$B_2 = \frac{1}{\Delta} [Y_0 (N_1 N_3 - N_2^2) + Y_1 (N_1 N_2 - N_0 N_3) + Y_2 (N_0 N_2 - N_1^2)] \quad (1.43)$$

$$\Delta = N_0 N_2 N_4 + 2 N_1 N_2 N_4 - N_2^3 - N_0 N_2^3 - N_1^2 N_4 \quad (1.44)$$

Si un registro contiene la presencia de variaciones de largo periodo, del orden de minutos, en el nivel medio, se deberá aplicar un filtro numérico.

1.8.3.2 Método de pasos ascendentes por el nivel medio, máximos y mínimos

El método de pasos ascendentes por cero de un perfil de oleaje puede ser determinado a través del siguiente criterio:

$$\eta_i \cdot \eta_{i+1} < 0 \quad \text{y} \quad \eta_{i+1} > 0 \quad (1.45)$$

donde η_i denota el i ésimo dato de la elevación de la superficie después de la corrección del nivel medio. El tiempo en el cual cruza el nivel medio se determinará por medio de una interpolación lineal entre el tiempo de muestreo de η_i y η_{i+1} . La diferencia temporal de este punto al siguiente paso ascendente define el periodo.

La condición para definir un máximo en el perfil es:

$$\eta_{i-1} < \eta_i \quad \text{y} \quad \eta_i > \eta_{i+1} \quad (1.46)$$

Es conveniente considerar que el tiempo y la elevación máxima deben ser estimados después de ajustar una curva parabólica en función de los tres puntos η_{i-1} , η_i y η_{i+1} , para eliminar el problema de subestimación del máximo real entre dos puntos discretos. La ecuación para el ajuste parabólico se puede expresar como:

$$\eta_{\max} = C - \frac{B^2}{4A} \quad \text{y} \quad t_{\max} = t_i - \frac{\Delta t B}{2A} \quad (1.47)$$

donde

$$A = \frac{1}{2}(\eta_{i-1} - 2\eta_i + \eta_{i+1}), \quad B = \frac{1}{2}(\eta_{i+1} - \eta_{i-1}), \quad C = \eta_i \quad (1.48)$$

Para determinar la altura de ola, el punto más alto sobre la elevación de la superficie debe ser encontrada dentro del intervalo entre dos pasos ascendentes. Una vez que este punto es encontrado a lo largo del registro es identificado como η_i , y entonces η_{\max} es estimada por medio de las ecuaciones (1.47) y (1.48), haciendo uso de los puntos adyacentes η_{i-1} y η_{i+1} .

El punto más bajo, o máximo negativo, de la elevación η_{\min} es calculado por medio de un proceso similar, y la altura de ola es calculada como la suma del valor absoluto de η_{\max} y η_{\min} . No obstante que la técnica de ajuste parabólico es empleada, el intervalo de muestreo de los datos debe ser lo suficientemente estrecho con el fin de no introducir errores en la evaluación de la altura de ola.

La correlación entre las alturas de ola y los periodos individuales, $r(H, T)$, puede que no tengan una aplicación inmediata, sin embargo es un parámetro estadístico muy útil.

1.8.4 Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar a partir de una serie de tiempo son:

- Variación del nivel medio del mar – También es conocido como set-up o set-down y se calcula por medio de la siguiente expresión

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (1.49)$$

donde

η_i = elevación de la superficie libre del agua en el tiempo t_i

N = número de eventos o muestras

- Variación de la media cuadrática de la superficie del agua (varianza)

$$\eta_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \quad (1.50)$$

- Altura media de olas y periodo medio

$$\bar{H} = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} H_i \quad (1.51)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} T_i \quad (1.52)$$

donde

N_o = número de olas individuales de todo el registro

H_i = altura de ola

T_i = periodo de ola

- Altura cuadrática media

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} H_i^2} \quad (1.53)$$

- Asimetría o falta de oblicuidad

$$Skw = \frac{1}{N_0 \eta_{rms}^3} \sum_{i=1}^N \eta_i^3 \quad (1.54)$$

En algunos casos se utilizan alturas de ola distintas de la media, como son la altura de ola significativa, $H_s = H_{1/3}$, altura de ola "un décimo", $H_{1/10}$, $H_{1/100}$, $H_{1/1000}$, etc. Las cuales se definen como el promedio de la altura del $1/n$ grupo de olas más altas. También es conveniente identificar los valores máximos de la muestra como altura de la máxima, $H_{m\acute{a}x}$.

1.9 Análisis espectral

La precisión en el cálculo de la función de distribución espectral es muy importante para la validación del estudio a través de este tipo de análisis. Se han desarrollado diversas técnicas para mejorar la precisión con la que se estiman los valores espectrales. En muchos casos ésta mejora en el cálculo significa una pérdida de resolución espectral. La elección del tratamiento al que va a ser sometida la serie es, en consecuencia, bastante subjetiva y en cada caso debe estudiarse la resolución espectral y el nivel de confianza que se desea tener en la estimación de los parámetros.

El modo más común para la evaluación de los valores del espectro es mediante el cálculo de los coeficientes de la serie de Fourier. Para simplificar este procedimiento se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual reduce considerablemente el número de operaciones que son necesarias para obtenerlos. Este algoritmo tiene como base la propiedad de la transformada discreta de Fourier (DFT) que permite calcular la transformada rápida de Fourier de una sucesión a partir de la transformada discreta de Fourier de subsucesiones más cortas.

1.9.1 Intervalo de muestreo y longitud de registro

Debido a que la longitud del registro determina la resolución del espectro, se debe procurar que esta sea tan grande como sea posible. Se recomienda que el intervalo de muestreo para un análisis de oleaje sea de una décima parte a una vigésima parte del periodo significativo. Una vez que es seleccionado el intervalo de tiempo, Δt , la máxima frecuencia, conocida como frecuencia de Nyquist, para la cual el espectro es estimado, se determina fácilmente con la expresión:

$$f_c = \frac{1}{2 \Delta t} \quad (1.55)$$

El intervalo de muestreo determina la máxima frecuencia para la que pueden calcularse los valores espectrales, esto es, la frecuencia de Nyquist. Para un Δt fijo la duración del registro queda determinada por el número de puntos de la serie, N . Este número de puntos debe elegirse de forma que durante el registro, la muestra sea representativa de un estado de mar y, por tanto, la hipótesis de estacionariedad sea aceptable. También deberá tenerse en cuenta

que el tiempo de registro determina la resolución espectral. Es deseable que Δf sea suficientemente pequeño para poder distinguir los picos adyacentes del espectro.

1.9.2 Corrección del nivel medio

Al igual que para el análisis temporal se debe realizar la corrección del nivel medio. Si el valor medio de la elevación de la superficie libre no se ajusta adecuadamente, o una posible tendencia gradual en el cambio del nivel medio no es corregida, se introducirá en el espectro una distorsión que se denomina solapamiento o aliasing.

1.9.3 Corrección de las discontinuidades

Debido a la dificultad que se tiene para calcular de forma exacta la función de densidad espectral para muestras de duración finita, es común aplicar a la serie una ventana que elimine las discontinuidades al principio y final del registro. Esta operación consiste en multiplicar la muestra por una profundidad de peso, $b(t)$, de forma que se atenúen las oscilaciones de los extremos de la serie. Existen varios tipos de ventanas, de los cuales los más importantes son la trapezoidal y la cosenoidal, los cuales se pueden expresar de la siguiente forma:

- Ventana tipo trapezoide

$$b_1(t) = \begin{cases} \frac{t}{l} & 0 \leq t \leq l \\ 1 & l \leq t \leq N-l \\ \frac{N-t}{l} & N-l < t \leq N \end{cases} \quad (1.56)$$

- Ventana tipo trapezoide

$$b_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \cos \pi t}{l} \right] & 0 < t < l \\ 1 & l \leq t \leq N-l \\ \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \cos(N-t)}{l} \right] & N-l < t \leq N \end{cases} \quad (1.57)$$

De las ecuaciones anteriores, se acepta que $l = 0.1N$.

Si se aplica una ventana al registro, la energía total decrece y los valores espectrales estimados son menores que los reales, por lo que deben multiplicarse por un factor de corrección β , al evaluar la función de densidad espectral. Dicho factor está dado por:

$$\beta = \frac{N}{\sum_{n=1}^N [b(t_n)]^2} \quad (1.58)$$

1.9.4 Evaluación de los coeficientes de Fourier

La técnica de la transformada rápida de Fourier es ampliamente utilizada, sin embargo, los algoritmos convencionales presentan una limitación en cuanto a que la longitud del registro debe ser una potencia de 2, esto es $N = 2^m$. De lo anterior, se procura que la serie de datos de oleaje cumpla con dicha condición, o el número de datos es ajustado, después eliminando el exceso de datos de la parte inicial o final del registro o añadiendo un cierto número de ceros en los datos.

La adición de ceros es normalmente realizada en la parte final del registro, después de la aplicación de una ventana, en el caso que esta sea aplicada. El problema fundamental de la adición de ceros es que reduce el nivel de la energía total. La corrección a este problema se puede tratar de forma análoga al de la función ventana.

La transformada discreta de Fourier se puede expresar como:

$$S(f_n) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} \eta(t_k) e^{-2\pi i k n / N} \quad (1.59)$$

mientras que la transformada inversa de Fourier:

$$\eta(t_k) = \frac{1}{\Delta f} \sum_{n=0}^{N-1} S(f_n) e^{-2\pi i k n / N} \quad (1.60)$$

Existen diversos algoritmos de la transformada rápida de Fourier, entre los cuales se puede consultar Newland (1975) o Bendat et al. (1986).

1.9.5 Suavizado espectral

Los valores espectrales estimados fluctúan entorno a los valores del espectro real. Para atenuar estas oscilaciones es posible suavizar el espectro con una función de peso $W(f)$ de la siguiente forma:

$$S(f) = \int_0^{\infty} S(f_0) W(f_0 - f) df_0 \quad (1.61)$$

$W(f)$ debe estar normalizada, esto es:

$$\int_0^{\infty} W(f) df = 1 \quad (1.62)$$

En la práctica, para cada frecuencia, el espectro alisado se calcula como un promedio ponderado de los valores espectrales de las frecuencias próximas a ella:

$$\hat{S}(f) = \sum_{j=k-m}^{j=k+m} W(f_k - f_j) S(f_j) \quad (1.63)$$

Cuando el registro es suficientemente largo algunos tramos del mismo pueden considerarse representativos del estado de mar que se está estudiando. Es posible, entonces, elegir varios segmentos de la misma longitud y promediar las estimaciones obtenidas para cada uno de ellos:

$$\hat{S}(f_j) = \frac{1}{n_s} \sum_{n=1}^{n_s} S_n(f_j) \quad (1.64)$$

siendo n_s el número de segmentos tomados.

1.9.6 Estimación de la precisión

Los valores espectrales obtenidos sometiendo la muestra $\{\eta(t_i)\}_{i=1}^W$ al proceso descrito anteriormente, son variables aleatorias que siguen una distribución "chi cuadrada" con $\nu=2n_s$ grados de libertad, χ_{ν}^2 siendo $1 = [B_e N \Delta t]$ denota la parte entera de un número real y B_e es el ancho de banda efectiva del filtro $W(f)$:

$$B_e = \frac{1}{\int_b^{\infty} W(f)^2 df} \quad (1.65)$$

Aún en el supuesto de que el proceso estocástico fuera ergódico, en cuyo caso cualquier muestra representaría perfectamente las infinitas funciones del conjunto, el cálculo de $S(f)$ se ha hecho a partir de una muestra finita, por tanto, los valores obtenidos sólo pueden considerarse como estimaciones de los valores reales.

El estudio de la estimación de la precisión de los valores obtenidos, se hace en términos de los intervalos de confianza de la variable aleatoria χ_{ν}^2 . Esto es, se considera un intervalo $(m-\varepsilon, m+\varepsilon)$, siendo $m = \nu$ la media de la distribución χ_{ν}^2 y ε una cantidad positiva.

A partir de la función de densidad de probabilidad χ_v^2 es posible determinar el valor de ϵ para la cual puede afirmarse que el valor real del espectro, se encuentra entre esos límites con una probabilidad dada.

La relación existente entre la varianza, σ^2 y el valor medio, m , de una variable aleatoria que sigue la distribución es χ_v^2 :

$$\frac{\sigma}{m} = \sqrt{\frac{2}{v}} \quad (1.66)$$

Si el cociente σ/m es pequeño se puede confiar en que el cálculo realizado sea preciso, por tanto, cuanto mayor sea el número de grados de libertad, mayor será la confianza que se tenga en los valores espectrales estimados se aproximen al valor real.

Se ha visto que la precisión de los cálculos está dada por el número de grados de libertad y la resolución espectral. Los cuales dependen, aunque de diferente forma, de los siguientes parámetros:

- Longitud de la muestra, N
- Número de segmentos, n_s
- Número de puntos de cada segmento, n_p
- Anchura de la banda efectiva del filtro, B_e
- Intervalo de muestreo, Δt

Deberá, por tanto, elegirse el proceso de análisis óptimo para cada caso en particular.

1.10. Parámetros espectrales.

Los parámetros comúnmente utilizados para definir un espectro dado están representados en la Figura 1.7

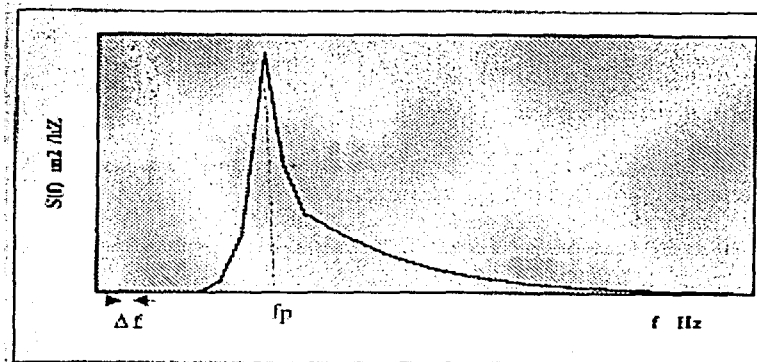


Figura 1.7. Representación espectral de un estado de mar

- Momento de orden "n" respecto al origen

$$m_n = \int_b^{\infty} f^n S(f) df \quad (1.67)$$

donde $S(f)$ es la función de densidad espectral y f es la frecuencia.

- Anchura espectral

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad \text{Lounguet-Higgins (1956)} \quad (1.68)$$

Si el espectro es de banda angosta ε tiende a 0; si por el contrario, el espectro es de banda ancha ε tiende a 1.

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2} \quad \text{Lounguet-Higgins (1983)} \quad (1.69)$$

- Agudeza de pico

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \int_0^{\infty} f (S(f)^2) df \quad \text{Goda (1970)} \quad (1.70)$$

- Periodo medio de la ola

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (1.71)$$

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (1.72)$$

1.11. Factor de agrupamiento

Se creía hasta hace poco tiempo que la mejor descripción de un estado de mar que podía darse era a través del conocimiento de su espectro. Sin embargo, se ha notado que para un mismo espectro se pueden tener estados de mar bastantes diferentes: el oleaje puede ser bastante "uniforme" o existen diferentes tipos de oleaje de manera simultánea.

Para poder tener una mejor descripción del estado de mar, se debe utilizar un parámetro adicional, que tome en cuenta este agrupamiento de olas. Este parámetro es el conocido como factor de agrupamiento (GF: grouping factor).

En 1987, Jhonson et al. hicieron referencia a la importancia de este fenómeno. Haciendo notar que ciertas ondas pueden causar mucho más daño en una estructura si se presentan agrupadas que si se presentan distribuidas a lo largo del registro.

Inicialmente, para poder determinar la presencia de grupos de olas en un registro, se rectificaba el registro (todos los puntos negativos se transforman en positivos) y se interconectan los picos de ondas adyacentes. Este procedimiento es bastante burdo, y no siempre permite identificar la presencia de un grupo de olas.

En 1982, Funke y Mansard proponen un método que permite detectar la presencia de grupos de ondas, basándose en la historia de la energía del oleaje a lo largo de un registro. Plantearon una función envolvente llamada SIWEH (Smoothed Instantaneous Wave Energy History).

El nombre de "Historia de energía de ondas instantánea suavizada" fue escogido para evitar confusión con otras energías del oleaje. El término "Historia" implica que se trata de una función del tiempo; la palabra "instantánea" describe que la energía está dada por un instante determinado y la palabra "suavizado" se incluye para describir una operación de suavizado, por medio de un filtro digital de paso estrecho.

El SIWEH en el caso de registros de oleaje de longitud finita es:

$$E(t) = \frac{1}{T} \int_{\tau=T_p}^{T_p} \eta^2(t+\tau) Q_1(\tau) \partial\tau \quad \text{para} \quad T_p \leq t \leq T_n - T_p \quad (1.73)$$

donde T_n es el tiempo total de registro. Para el inicio y el final se tiene:

$$E(t) = \frac{2}{T_p + t} \int_{\tau=-t}^{T_p} \eta^2(t+\tau) Q_1(\tau) \partial\tau \quad \text{para} \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1.74)$$

$$E(t) = \frac{2}{T_p + t} \int_{\tau=-T_p}^{T_n-t} \eta^2(t+\tau) Q_1(\tau) \partial\tau \quad \text{para} \quad T_n - T_p \leq t \leq T_n \quad (1.75)$$

Utilizando para estos dos casos:

$$Q_1(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{T_p} \quad \text{para} \quad -T_p \leq \tau \leq T_p \quad (1.76)$$

$$Q_1(\tau) = 0 \quad \text{para los demás valores}$$

Esta ecuación puede describir con bastante detalle la actividad de grupos de onda, dando una indicación sobre que tan uniforme o que tan agrupada está la distribución de energía de las ondas a lo largo del eje temporal.

El factor de agrupamiento se obtiene a partir del SIWEH por medio de la siguiente ecuación:

$$GF = \frac{\sqrt{m_{\epsilon 0}}}{m_0} \quad (1.77)$$

$$GF = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (E(t) - E)^2 dt}}{E} \quad (1.78)$$

donde $m_{\epsilon 0}$ y m_0 son los momentos de orden cero de la función de densidad espectral del SIWEH y del registro del oleaje original, respectivamente. Se puede decir que el factor de agrupamiento es la desviación estándar del SIWEH alrededor de su media y normalizada con respecto a su media.

1.12. Relaciones entre el análisis temporal y espectral

Es posible determinar algunos parámetros de las series temporales dado un espectro y viceversa. Algunas de estas relaciones son:

- Ancho espectral

$$\epsilon^2 = 4r(1-r) \quad \text{Cartwright y Longuet-Higgins (1956)} \quad (1.79)$$

donde

$$r = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{N_0^*}{N_c} \right] \quad (1.80)$$

N_0^* es el número de cruces ascendentes de la superficie libre del agua con el nivel medio

N_c es el número total de crestas del registro

- Alturas de ola

Si la distribución de las alturas de ola se aproxima a la de Rayleigh se tiene:

$$H_{m_0} = 4.004 \sqrt{m_0} = \sqrt{2} H_{ms} \quad (1.81)$$

$$H_{ms} = \sqrt{8 m_0} \quad (1.82)$$

Otras alturas de olas características del oleaje pueden ser estimadas a partir de H_{rms} , manteniendo la suposición de tener una distribución de Rayleigh

$$H_{1/10} = 1.8H_{rms} \quad (1.83)$$

$$H_{1/100} = 2.359H_{rms} \quad (1.84)$$

CAPÍTULO 2. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS Y ESPECTRALES DE UN ESTADO DE MAR

2. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS Y ESPECTRALES DE UN ESTADO MAR

2.1 Distribuciones estadísticas de un estado de mar

2.1.1 Distribución normal de la superficie libre

Generalmente se acepta que la variación de la superficie del agua en el mar sigue una distribución de probabilidad gaussiana, bajo la suposición que las componentes de las fases son arbitrarias pero uniformemente distribuidas en el intervalo $(\pi, -\pi)$. El modelo gaussiano considera implícitamente que existe una simetría alrededor del nivel medio del agua, por lo que se asume que la media es igual a cero y, por tanto, su función de densidad estará dada por:

$$P(\eta) = \frac{1}{\eta_{rms} \sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{\eta^2}{2\eta_{rms}^2}\right)} \quad (2.1)$$

donde $P(\eta)$ = la función de densidad

La función de densidad de probabilidad de la elevación de la superficie libre es simétrica alrededor de la elevación media, donde la función es máxima. Por tanto, la probabilidad de tener una elevación positiva en particular es la misma que para la elevación negativa.

2.1.2 Distribuciones de alturas de ola

El poder estimar la altura de ola es de gran importancia para todas las obras costeras y para la navegación marítima en general. La altura de las olas es uno de los parámetros de mayor importancia para el diseño de estructuras y para evaluar el grado de seguridad que presentan estructuras fijas y móviles.

En un registro de oleaje irregular, las alturas de la ola se pueden determinar separando el registro en olas individuales por medio del método de pasos ascendentes por cero. Este método indica que una ola inicia cuando la superficie libre del agua cruza el nivel medio del mar de la misma manera. El periodo de la onda es el tiempo transcurrido entre dos cruces ascendentes sucesivos y la altura de onda es la diferencia entre el nivel máximo y el mínimo que alcanzó la superficie libre en ese intervalo. A continuación se mostrarán las distribuciones de alturas de ola más utilizadas.

2.1.2.1 Distribución de Rayleigh para alturas de ola

En 1944 y 1945, Rice encontró una función de distribución de la altura de las crestas para señales aleatorias de origen electromagnético. Cartwright y Longuet-Higgins (1983) ampliaron los estudios de Rice y demostraron que la distribución de Rayleigh,

desarrollada para fenómenos eléctricos, podía ser utilizada para describir la distribución de alturas de olas.

Si se tiene un estado de mar tipo SWELL puro, con un ancho de espectro $\varepsilon = 0$, la descripción de la altura de olas dada por Rayleigh es exacta. Como consecuencia, esta distribución supone que hay una correlación perfecta entre una cresta y el siguiente valle. Es decir, si se tiene una cresta grande, el siguiente valle será también grande.

Por lo anterior, la distribución de Rayleigh supone que hay una correlación perfecta entre una cresta y el siguiente valle. Es decir si se tiene una cresta grande, el siguiente valle también va a ser grande. La distribución adimensional de alturas de ola, $p(\xi)$, está dada por:

$$p(\xi) = 2\xi e^{-\xi^2} \quad (2.2)$$

donde

$$\xi = \frac{H}{H_{rms}} \quad (2.3)$$

En forma adimensional se puede expresar como:

$$P(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-\frac{H^2}{H_{rms}^2}} = \frac{H}{4m_0} e^{-\frac{H^2}{8m_0}} \quad (2.4)$$

2.1.2.2 Distribución de Longuet-Higgins (1983) de altura de ola

En 1983 Longuet-Higgins propone una distribución de crestas de ola que es posible aplicar cuando el ancho de banda espectral, ν , es diferente de cero. Para el caso $\nu = 0$ se tiene una distribución Rayleigh mientras que en el extremo opuesto con un espectro de banda ancha se tiene una distribución normal truncada en cero.

$$p(H) = \frac{L(\nu)H \operatorname{Erfc} \left[-\frac{H}{2\sqrt{2m_0\nu}} \right]}{8m_0\nu \cdot e^{\frac{H^2}{8m_0}}} \quad (2.5)$$

donde

m_0 = momento de orden cero

Erfc = función de error complementaria, la cual queda definida de la siguiente forma:

$$\operatorname{Erfc} \left(-\frac{H}{2\sqrt{2}m_0v} \right) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{H}{2\sqrt{2}m_0v}\right)^2} dH \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{L(v)} = \frac{1}{2} \left[1 + (1+v^2)^{-1/2} \right] \quad (2.7)$$

2.1.2.3 Distribución de alturas de ola de Tayfun

En 1981 Tayfun propone una ecuación para alturas de olas que está limitada por la rotura de la misma y un parámetro N que combina el estado de mar con la profundidad.

Esta distribución supone que existe una mediana correlación entre la cresta y el siguiente valle. Es decir, si se tiene una cresta grande, el próximo valle tiene alta probabilidad de ser grande y existe una pequeña probabilidad de que el valle pueda ser mediano o pequeño.

El parámetro N está relacionado, como se dijo anteriormente, con el estado de mar y es función del período de onda y de la profundidad. Si el parámetro N tiende a infinito, entonces se tiene un estado de mar SWELL y la distribución de Tayfun se iguala a la de Rayleigh. La distribución propuesta por Tayfun está expresada de la siguiente manera:

$$p(\xi, N) = \xi \int_0^{\infty} \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{1/2}} \right) J_0(\xi u) \right] du \quad 0 \leq \xi \leq N^{1/2} \quad (2.8)$$

$$p(\xi, N) = \xi \left[1 - \frac{4}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{N^{1/2}}{\xi} \right) \right] \int_0^{\infty} \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{1/2}} \right) J_0(\xi u) \right] du \quad N^{1/2} \leq \xi \leq (2N)^{1/2} \quad (2.9)$$

donde N = parámetro de Tayfun que se define como:

$$N = \left(\frac{\pi \tanh(k_0 h)}{7\sqrt{2} k_0 \sqrt{2} m_0} \right) \quad (2.10)$$

y

$$\xi = \frac{H}{H_{rms}} \quad (2.11)$$

J_0 = función de Bessel de orden cero

k_0 = número de onda asociado a la frecuencia media, el cual se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma^2 h}{g} = k_0 h \cdot \tanh(k_0 h) \quad (2.12)$$

2.1.2.4 Distribución de alturas de ola de Carter

En 1981 Carter propuso una ecuación para la distribución de alturas de ola, en la cual, se asume que no existe ninguna correlación entre crestas y valles consecutivos. Es decir, dada una cresta grande, el siguiente valle tiene iguales probabilidades de ser grande, pequeño o mediano.

La probabilidad de excedencia propuesta por Carter es la siguiente:

$$P(H \geq H_0) = 1 - \left[e^{-8 \left(\frac{H_0}{H_s} \right)^2} + 2 \sqrt{\pi} \frac{H_0}{H_s} e^{-4 \left(\frac{H_0}{H_s} \right)^2} \operatorname{Erfc} \left[\frac{2 H_0}{H_s} \right] \right] \quad (2.13)$$

donde la función error, *Erfc*, se expresa como:

$$\operatorname{Erfc}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-u^2} du \quad (2.14)$$

Finalmente la ecuación (2.13) se puede expresar en forma adimensional como sigue:

$$P(H \geq H_0) = 1 - \left[e^{-8 \left(\frac{H_0}{H_s} \right)^2} + 2 \frac{H_0}{H_s} e^{-4 \left(\frac{H_0}{H_s} \right)^2} \int_0^{\frac{H_0}{H_s}} e^{-\frac{u^2}{4}} du \right] \quad (2.15)$$

Diversos análisis se han realizado con el fin de hallar las distribuciones que mejor describan el fenómeno del oleaje. En 1994, Green llegó a la conclusión de que para un estado de mar SEA (muy desordenado) la mejor representación está dada por la distribución de Carter, en cuanto para un estado de mar un poco más ordenado (al salir del área de generación y propagarse el oleaje), la distribución de Tayfun es la que mejor se ajusta. Finalmente, en un estado de mar SWELL (muy ordenado) la distribución de Rayleigh es la que más adecuada para utilizarse.

2.1.3 Distribuciones conjunta de periodo y altura de ola

Durante mucho tiempo no se tomó en cuenta el periodo de las olas para el diseño de estructuras marítimas. En estudios recientes se ha demostrado la importancia del periodo de las olas en fenómenos tales como el run-up (ascenso máximo) o la estabilidad de

piezas en un rompeolas, lo que ha generado un interés muy grande sobre el conocimiento de las distribuciones de probabilidad conjuntas de período y de ola.

A continuación se presentan las distribuciones más utilizadas. Vale la pena considerarlas de forma adimensional y dimensional; la forma adimensional permite comparar las diferentes fórmulas y la forma adimensional es de mucho mayor utilidad para cálculos prácticos.

2.1.3.1 Distribución de Longuet-Higgins (1975)

En 1975, Longuet-Higgins propuso una función de densidad conjunta de alturas de ola y periodos. Esta fórmula se basa en un modelo del oleaje estacionario y gaussiano con espectro de banda estrecha.

Un inconveniente que presenta esta fórmula es precisamente que se basa en un espectro de banda estrecha (oleaje SWELL), y no toma en cuenta la asimetría en la distribución de los periodos de ola que se tiene cuando el espectro es de banda ancha.

La fórmula Longuet-Higgins (1975) en forma adimensional es:

$$\rho(\theta, \eta) = \frac{\theta^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta^2(1+\eta^2)}{2}} \quad (2.16)$$

donde

$$\theta = \frac{H}{2\sqrt{m_0}} \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{T - T_{01}}{\sqrt{T_{01}}} \quad (2.18)$$

donde T_{01} = período medio.

En forma dimensional se tiene:

$$\rho(H, T) = \left(\frac{H^2}{8\sqrt{2\pi} \sqrt{T_{01}} m_0^{3/2}} \right) e^{-\frac{H^2}{8m_0} \left(1 + \left(\frac{T - T_{01}}{\sqrt{T_{01}}} \right)^2 \right)} \quad (2.19)$$

2.1.3.2 Distribución de Cavanié et al. (1976)

En 1976 Cavanié, Arhan y Ezraty propusieron otra distribución teórica basada en un modelo gaussiano de banda estrecha, pero con la diferencia de que ésta sí toma en cuenta la asimetría en la distribución de los periodos.

Esta fórmula presenta una buena concordancia con los datos observados, pero tiene el defecto de utilizar el parámetro de anchura espectral ε , el cual, depende del cuarto momento de la función de densidad espectral. Este momento tiene el inconveniente de estar asociado a la cuarta potencia de la función de densidad espectral, por lo que cualquier pequeño error en la distribución resulta muy amplificado, sobre todo para las altas frecuencias.

La distribución de Cavanié, Arhan y Ezraty (1976) en forma adimensional es:

$$p(h, \tau) = \frac{\alpha^3 h^2}{4\sqrt{2\pi}\varepsilon(1-\varepsilon^2)\tau^{-4}\tau^5} e^{-\frac{h^2(\tau\tau)^{-4}((\tau^{-2}\tau^2-\alpha^2)^2+\beta^2\alpha^4)}{8\varepsilon^2}} \quad (2.20)$$

donde

$$h = \frac{H}{\sqrt{m_0}} \quad (2.21)$$

$$\tau = \frac{T}{\tau T_c} \quad (2.22)$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\alpha} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (2.23)$$

$$\tau = \left(\frac{T}{T_c}\right) \quad \text{Si } \varepsilon \leq 0.95 \rightarrow \tau = 1 \quad (2.24)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \varepsilon^2}\right) \quad (2.25)$$

$$\beta^2 = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} \quad (2.26)$$

La ecuación (2.20) fue obtenida midiendo el periodo de ola entre cresta y cresta, T_c , por lo que no sería correcto aplicarla a olas definidas por el método de pasos ascendentes por cero (Battjes 1977). Sin embargo Goda (1978) señala que aún en este caso la distribución da buenos resultados.

Al utilizar en forma dimensional se tiene que:

$$T_c = T, \quad \tau = \frac{T}{T} \quad \text{y} \quad h = \frac{H}{\sqrt{m_0}} \quad (2.27)$$

se obtiene

$$p(H, T) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \frac{\alpha^3 T^4}{m_0^{3/2} \varepsilon (1 - \varepsilon^2) \tau^{-4} T_z^5} e^{-\frac{T_z^4}{8m_0 \varepsilon^2 \tau^{-4}} \frac{H^2}{T_z^4} \left[\left(\tau^{-2} \frac{T_z^2}{T_z^4} - \alpha^2 \right)^2 + \alpha^4 \beta^2 \right]} \quad (2.28)$$

2.1.3.3 Distribución Longuet-Higgins (1983)

En 1983, Longuet-Higgins propuso otra ecuación también basada en un espectro de banda estrecha, la cual, tiene los mismos méritos que la de Cavanié et al. al tomar en cuenta la asimetría de la distribución de periodos. Por otro lado, esta ecuación tiene la gran ventaja de utilizar un parámetro de ancho espectral de orden menor, v , dependiente del segundo y no del cuarto momento.

La ecuación adimensional propuesta por Longuet-Higgins (1983) es:

$$p(R, \tau) = \left(\frac{2}{v\pi^{1/2}} \right) \left(\frac{R^2}{\tau^2} \right) e^{-R^2 \left[1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^2 \right]} L(v) \quad (2.29)$$

donde

$$\tau = \frac{T}{T_z} \quad (2.30)$$

$$R = \frac{H/2}{\sqrt{2m_0}} \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{2} \left[1 + (1 + v^2)^{1/2} \right] \quad (2.32)$$

$$T = \frac{m_0}{m_1} = T_{01} \quad (2.33)$$

y la ecuación dimensional de Longuet-Higgins (1983) es:

$$p(H, T) = \left(\frac{H^2 T}{8v\sqrt{2\pi} m_0^{2/3} T^2} \right) e^{-\frac{H^2}{8m_0} \left[1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \frac{T}{T_z} \right)^2 \right]} L(v) \quad (2.34)$$

2.1.4 Distribuciones de periodos de olas

Las distribuciones de periodos de olas se derivan a partir de las distribuciones conjuntas de periodo y altura de ola, por lo que se hace referencia a las anteriores distribuciones y

sus parámetros descritos, ya que para cada una de ellas es igualmente válida en las siguientes ecuaciones.

2.1.4.1 Distribución de Bretschneider (1959)

En 1959, Bretschneider encontró que la distribución de Rayleigh se puede aplicar al cuadrado de los periodos y propuso la siguiente ecuación:

$$\rho(T) = 2.7 \frac{T^3}{T^4} e^{-0.675 \left(\frac{T}{T_0}\right)^4} \quad (2.35)$$

2.1.4.2 Distribución de Longuet-Higgins (1975)

$$\rho(T) = \frac{v^2 T_{01}^2}{2 \left[v^2 T_{01}^2 + (T - T_{01})^2 \right]^{3/2}} \quad (2.36)$$

2.1.4.3 Distribución de Cavanié et al. (1976)

$$\rho(T) = \frac{\alpha^3 \beta^2 \delta^2 T}{T^2 \left[\left(\frac{\delta^2 T^2}{T^2} - \alpha^2 \right)^2 + \alpha^4 \beta^2 \right]^{3/2}} \quad (2.37)$$

2.1.4.4 Distribución de Longuet-Higgins (1983)

$$\rho(T) = \frac{L(v)T}{2vT^2} \left[1 + \left(1 - \frac{T}{T} \right)^2 \frac{1}{v^2} \right]^{-3/2} \quad (2.38)$$

2.2 Distribuciones espectrales de un estado de mar

Al analizar una gran cantidad de espectros de oleaje, se ha podido encontrar que presentan características similares que pueden ser relacionadas con parámetros físicos, tales como la velocidad del viento y el fetch. Gracias a estas relaciones se puede generar numéricamente el espectro de oleaje que se esperaría para algunas condiciones dadas.

Las formas de un espectro de un estado de mar varían considerablemente, dependiendo de muchos factores tales como intensidad y velocidad del viento, magnitud del fetch, entre otros. Sin embargo, la forma de un espectro no es arbitraria ya que existen muchas propiedades físicas del oleaje que están representadas en él.

En la **Figura 2.1**, propuesta por Le Mehauté (1976), se puede observar que a través de un análisis en el dominio de la frecuencia pueden ser identificados todos los tipos de olas que se generan en el océano, debido a que el rango de la frecuencia esta íntimamente relacionado con las fuerzas generadoras exteriores. También se pueden identificar un enorme rango de longitudes y periodos de ola asociados a distintos tipos de oleaje, desde olas capilares con periodos menores a un segundo, hasta variaciones de marea con periodos del orden de horas e incluso días.

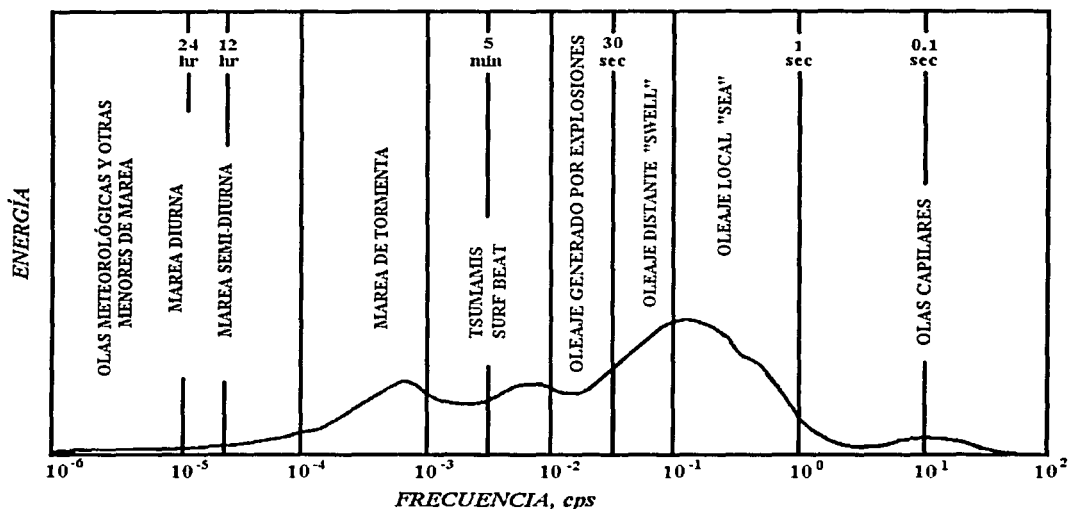


Figura 2.1. Esquema de la distribución de la energía del oleaje en frecuencias

Los modelos espectrales están basados generalmente en uno o más parámetros. El modelo espectral más común de un solo parámetro es el de Pierson-Moskowitz (1964), que hace uso de la altura de ola significativa o de la velocidad del viento. Existen varios modelos espectrales basados en dos parámetros, entre los cuales destacan el de Bretschneider (1969), Scott (1965), ISSC (1964) y ITCC (1966). El espectro JONSWAP (Hasselmann, 1973) y el espectro TMA dependen de cinco parámetros, pero usualmente tres de ellos son considerados constantes. Un modelo espectral más complejo es el presentado por Ochi y Hubble (1976), el cual depende de seis parámetros, y es capaz de describir dos picos en el espectro de energía.

2.2.1 Modelo de Phillips

Un punto importante es la presencia de un límite superior para la densidad de energía espectral. Cuando el espectro alcanza esta condición de saturación, la energía adicional aportada por el viento en el oleaje se pierde por la rotura de las olas, la formación de olas

capilares (de muy alta frecuencia) y la transferencia de energía a otras olas de diferentes frecuencias.

Para encontrar este estado de saturación, Phillips (1959) asumió que dependía de dos parámetros: la velocidad al cortante del viento y el fetch. Al estudiar la variación de la velocidad del viento según la altura sobre la superficie del mar, determinó que el espectro se puede definir con los siguientes parámetros: la frecuencia, la gravedad, la velocidad del viento y el fetch.

Al hacer un análisis dimensional de varios espectros de oleaje y considerando un límite para la configuración de las olas, se encontró que existe un rango en que se satura el espectro. Para frecuencias superiores a la frecuencia pico, la función de densidad espectral puede ser expresada como:

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} \tag{2.39}$$

donde

g = aceleración de la gravedad

f = frecuencia

α = parámetro que depende del fetch y del viento

2.2.2 Espectro de Neumann

El primer modelo espectral analítico que fue usado con fines de diseño ingenieril lo desarrolló Neumann en 1953. Este modelo es función de la velocidad del viento medida a diez metros sobre el nivel medio del mar, U_{10} y queda expresado como:

$$S(f) = 1.466 H_{m_0}^2 \frac{f_p^5}{f^6} \exp \left[-3 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2} \right] \tag{2.40}$$

donde

H_{m_0} = la altura de ola del momento de orden cero, la cual es aproximadamente igual a la altura de ola significativa:

$$H_s \approx H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \tag{2.41}$$

f_p = frecuencia de pico, la cual puede ser determinada de la siguiente forma:

$$f_p = \sqrt{\frac{1}{6} \frac{g}{\pi U_{10}}} \tag{2.42}$$

2.2.3 Espectro de Pierson-Moskowitz

En 1964, Pierson y Moskowitz estudiaron los espectros de oleaje del Atlántico Norte y desarrollaron una fórmula para representar estados de mar completamente desarrollados generados por el viento. Es decir, el espectro no depende del fetch, sino únicamente de la velocidad del viento.

Propusieron la siguiente expresión para generar el espectro:

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} e^{-0.24(2\pi U_{19.5} / f)^4} \quad (2.43)$$

donde $U_{19.5}$ es la velocidad del viento a 19.5 metros sobre la superficie del mar, o representado de otra manera, utilizando la frecuencia pico se tiene que:

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4} \quad (2.44)$$

donde, la parte fuera del exponente es la fórmula desarrollada por Phillips; tal exponente se le conoce como "función de forma de Pierson-Moskowitz".

2.2.4 Espectro Bretschneider

Bajo la suposición de que el espectro es de banda estrecha y que las alturas de ola individuales y periodos siguen una distribución tipo Rayleigh, En 1959 y 1969, Bretschneider obtuvo la siguiente forma para su modelo espectral:

$$S(f) = 0.128 H_s^2 \frac{f_s^4}{f^5} \exp\left[-0.675 (f_s / f)^4\right] \quad (2.45)$$

donde

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (2.46)$$

Del modelo de Bretschneider puede deducirse que:

$$T_s = 0.946 T_p \quad (2.47)$$

$$f_p = 0.00408 \frac{g}{H_s} \quad (2.48)$$

donde T_p = el período de pico espectral. Esta relación hace que el modelo sea igual al presentado por Pierson y Moskowitz

2.2.5 Espectro ISSC

En el Congreso del ISSC (International Ship Structures Congress) de 1964 se sugirió una ligera modificación a la forma del espectro propuesto por Bretchneider:

$$S(f) = 0.1107 H_s^2 \frac{f^4}{f_p^5} \exp[-0.4427 (f_s / f)^4] \quad (2.49)$$

La relación entre la frecuencia de pico, f_p , y la frecuencia media, f , para el espectro ISSC es:

$$\bar{f} = 1.296 f_p \quad (2.50)$$

2.2.6 Espectro ITTC

En el Congreso ITTC (International Towing Tank Conference, 1966, 1969 y 1972) se propusieron modificaciones al espectro sugerido por Pierson y Moskowitz en términos de la altura de ola significativa y la frecuencia media, $f_z = 1 / T_{02}$.

$$S(f) = 1.272 m_0 f_z^4 f^{-5} \exp[-0.138 (f_z / f)^4] \quad (2.51)$$

2.2.7 Espectro de JONSWAP

En 1973, Hasselman y otros proponen el conocido espectro JONSWAP. Este espectro fue generado con datos tomados a finales de la década de los sesenta. Se realizó un amplio proyecto de medición de oleaje sobre una línea de 160 km en el Mar del Norte, a partir de la Isla Sylt. Este proyecto se conoce como JONSWAP por sus siglas en inglés (Joint North Sea Wave Project).

Este espectro está formulado para estados de mar generados por el viento, con fetch limitado y para profundidad de agua indefinida. El espectro JONSWAP está expresado por la siguiente fórmula:

$$S_J(f) = S_P(f) \phi_{PM}(f/f_p) \phi_J(f, f_p, \gamma, \sigma) \quad (2.52)$$

donde

$S_P(f)$ es la fórmula de Phillips

$$S_P(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^5 \quad (2.53)$$

$\phi_{PM}(f/f_p)$ es la función de forma de Pierson-Moskowitz

$$\phi_{PM}(f/f_p) = e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^4} \quad (2.54)$$

ϕ_J es el factor de forma del espectro JONSWAP

$$\phi_J = \gamma e^{\left(\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right)} \quad (2.55)$$

donde

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_A & f_p \leq f \\ \sigma_B & f_p > f \end{cases} \quad (2.56)$$

Los valores medios de los parámetros que se utilizan para generar el espectro JONSWAP son los siguientes:

γ es conocido como el factor de forma de pico del espectro:

$$\gamma = 3.30 \quad (2.57)$$

σ representa el ancho de la base del espectro antes (σ_A) y después (σ_B) de la frecuencia pico:

$$\begin{aligned} \sigma_A &= 0.07 \\ \sigma_B &= 0.09 \end{aligned} \quad (2.58)$$

α se conoce como el factor de escala y está asociado con la energía total del espectro. Como puede verse en las siguientes expresiones es función directa del fetch y de la velocidad del viento.

$$\alpha = 0.0076 (x)^{-0.22} \quad (2.59)$$

De igual forma se ha observado que la frecuencia pico, f_p , del espectro está relacionada también con el fetch y la velocidad del viento

$$f_p = 3.5 \left(\frac{g}{U_{10}}\right) (x)^{-0.33} \quad (2.60)$$

donde

$$x = \frac{g x}{U_{10}^2} \text{ es el fetch adimensional} \quad (2.61)$$

x = fetch

U_{10} = velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie

Como se puede observar de estas fórmulas, este espectro tiene un fetch limitado, por lo que el estado de mar no se encuentra todavía completamente desarrollado.

Utilizando la información recopilada en las dos décadas siguientes, Mitsuyasu propone, en 1980, las siguientes relaciones para mejorar la estimación de los parámetros α , γ y f_p del factor de forma de JONSWAP.

$$\alpha = \frac{3.26}{10^2} f_p^{0.857} \quad (2.62)$$

$$\gamma = 4.42 f_p^{0.429} \quad (2.63)$$

donde

$$f_p = U \frac{f_P}{g} \quad (2.64)$$

Utilizando la relación

$$f_p = 2.92 \bar{x}^{-1/3} \quad (2.65)$$

Se obtiene

$$\alpha = \frac{8.17}{10^2} \bar{x}^{-2/7} \quad (2.66)$$

$$\gamma = 7.0 \bar{x}^{-1/7} \quad (2.67)$$

En 1982, Ochi señala a partir de las ecuaciones anteriores, que si el fetch adimensional es superior a 1×10^6 , el factor de forma de pico se aproxima a 1 y se tiene un estado de mar completamente desarrollado.

En 1979, Ross, después de estudiar los espectros del oleaje producido por huracanes, propone los siguientes parámetros para calcular los espectros en estas condiciones:

$$\gamma = 4.7 \bar{x}_r^{-0.13} \quad (2.68)$$

$$\alpha = 0.035 f_p^{0.82} \quad (2.69)$$

$$f_p = 0.97 \bar{x}_r^{-0.21} \quad (2.70)$$

$$\bar{m}_0 = \frac{2.25}{10^5} \bar{x}_r^{0.45} \quad (2.71)$$

$$\bar{x}_r = x_r g / U^2 \quad (2.72)$$

donde \bar{x}_r es el fetch radial adimensional y x_r es la distancia radial al ojo del huracán (en unidades congruentes), m_0 se conoce como el parámetro espectral de escala.

Aunque γ tiene un valor promedio de 3.3, su valor puede variar desde 1 hasta 7, siguiendo una distribución gaussiana normal con una desviación estándar de 0.79

Ochi (1979) propone un método para generar una familia de espectros para diferentes velocidades de viento, para un fetch y H_s determinados.

$$U_{10} = k x^{-0.615} H_s^{1.08} \quad (2.73)$$

De esta ecuación, para un x y H_s determinados y para varios valores de U se despeja k y se encuentra γ de la siguiente tabla

γ	k	
	x en NM U en nudos	x en km. U en m/s
1.75	128.1	96.2
2.64	117.6	88.3
3.30	111.4	83.7
3.96	106.6	80.1
4.85	101.7	76.4

Tabla 2.1. Valores del factor de forma pico del espectro

2.2.8 Espectro TMA

En 1985, Bows Gunther, Rosenthal y Vicent presentaron el espectro TMA, el cual está relacionado directamente con la profundidad del agua. El espectro TMA puede ser utilizado para determinar los cambios que sufre un espectro al propagarse en aguas someras.

El estudio se realizó analizando cerca de 2800 espectros de oleaje producidos en aguas de poca profundidad. Se tuvieron tres fuentes de información: TEXEL, MARSEN y ARSLOE. De sus iniciales se eligió el nombre de TMA.

Los datos de TEXEL fueron obtenidos cerca de Holanda por el barco-faro Texel (30 m de profundidad) y la estación Euro-5 (20 m de profundidad). Los datos de MARSEN fueron obtenidos de dos estaciones entre los 10 y 50 metros de profundidad, sobre la costa norte de Alemania. Estas estaciones estaban directamente expuestas al oleaje del Mar del Norte. Los datos ARSLOE provienen de las costas de Carolina del Norte, con profundidades variables con un máximo de 40 metros.

El espectro TMA se define a partir del espectro JONSWAP como se muestra en la siguiente ecuación.

$$S_{TMA} = S_J(f) \phi_k(\omega_H) \quad (2.74)$$

$$\phi_k(\omega_H) = \tan h^2(kh) \left[1 + \frac{2kh}{\sin h(2kh)} \right] \quad (2.75)$$

k se evalúa a partir de la ecuación de dispersión.

$$(2\pi f) = g k \tan h(kh) \quad (2.76)$$

Se supone que dentro de ϕ_k se encuentran implícitos varios efectos de aguas someras tales como la fricción con el fondo, rompiente y refracción. Goda advierte que el espectro TMA debe utilizarse con reservas, ya que está formulado para oleaje en crecimiento en el área de generación.

En 1983, Goda propone que un oleaje SWELL que haya viajado cientos o miles de kilómetros en aguas profundas se pueden representar por medio de un espectro JONSWAP con un factor de forma de pico γ que varíe de 7 a 10.

2.2.9 Espectro de Ochi-Hubble

En 1976, Ochi y Hubble desarrollaron un modelo espectral de seis parámetros que consiste esencialmente en dos partes:

- Para componentes de energía de baja frecuencia
- Para componentes de alta frecuencia

Cada componente es expresada en términos de tres parámetros y el espectro total es expresado como una combinación lineal de las dos componentes. Por tanto, un doble pico espectral puede ser modelado con esta formulación, por ejemplo (baja frecuencia) oleaje distante, SWELL, y (alta frecuencia) oleaje local, SEA. Con lo cual es posible, aparentemente, representar casi todos los estados de mar desarrollados en un estado de mar de una tormenta.

$$S(f) = \frac{\pi}{2} \sum_{j=1}^2 \frac{\left(\frac{4\lambda_j + 1}{4} (2\pi f_{0j})^4 \right)^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \frac{H_{sj}^2}{(2\pi f)^{4\lambda_j + 1}} \exp \left[- \left(\frac{4\lambda_j + 1}{4} \right) \left(\frac{f_{0j}}{f} \right)^4 \right] \quad (2.77)$$

donde H_{s1} , f_{01} y λ_1 son la altura de ola significativa, la frecuencia modal y el factor de forma para las componentes de baja frecuencia, mientras que H_{s2} , f_{02} y λ_2 corresponden a las componentes de alta frecuencia. En la ecuación (2.77) si cualquiera de los valores de las

componentes de los parámetros H_{sj} , f_{oj} son tomados como constantes, el parámetro λ_j controla la forma, o en particular, la agudeza del pico espectral.

Por tanto, λ_j es llamado parámetro de forma espectral. Si $\lambda_1 = 1$ y $\lambda_2 = 0$, se obtiene un espectro tipo Pierson-Moskowitz. En la ecuación (2.77), la altura de ola significativa equivalente H_s se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$H_s = \sqrt{H_{s1}^2 + H_{s2}^2} \quad (2.78)$$

Bajo la suposición de espectro de banda estrecha, generalmente, el valor de λ_1 es mucho mayor que el valor de λ_2 . El valor más común de λ_1 es:

$$\lambda_1 = 2.72 \quad (2.79)$$

mientras que el valor para λ_2 es función de la altura de ola significativa:

$$\lambda_2 = 1.82e^{-H_s/121.5} \quad (2.80)$$

donde H_s está dada en metros.

CAPÍTULO 3. MORFODINÁMICA DE PLAYAS

3. MORFODINÁMICA DE PLAYAS

3.1 Introducción

En la ingeniería de costas existen diversos casos de estudio como lo son la evolución costera y el clima marítimo. Para poder comprender la evolución que se presenta en las playas, es preciso entender qué sucede en estas zonas.

Las playas son zonas muy dinámicas, es en estos lugares donde el oleaje transmite toda su energía al lecho de la playa ocasionando una rápida transformación. En la escala de tiempo geológico, una transformación importante puede llevar horas, días, semanas o meses, en función del clima marítimo y los materiales que conforman la playa.

La línea de costa se define como el límite entre tierra y mar, ésta se encuentra en constante movimiento debido a la dinámica de las olas y se presentan cambios de forma y de posición. La costa puede clasificarse en tres tipos:

- ◆ Costas rocosas.- Son costas casi inalterables, al menos durante gran parte de su vida.
- ◆ Costas de arena.- (Material granular no cohesivo). Son costas donde la playa se deforma fácilmente con la acción del agua. En este tipo de playas, la posición de la línea de costa se encuentra en constante movimiento y, sujeta a las propiedades del oleaje incidente.
- ◆ Costas de material cohesivo.- Estas costas de sedimento cohesivo involucran interacciones eléctrica y químicas ya sea en partículas individuales o en grupo.

El cambio en la playa se manifiesta tanto en sentido longitudinal como transversal a la línea de costa, cuando no se presenta ningún cambio en la morfología de la playa, se dice que ésta se encuentra en equilibrio. En otras palabras, el equilibrio dinámico es cuando la playa adquiere una forma invariable bajo la presencia de transporte longitudinal de arena sin cambio en el volumen global de arena dentro de la unidad fisiográfica.

3.2 Morfodinámica de playas

La estabilidad de las playas, que se define como el estudio y diseño de la playa formada de material granular no cohesivo, donde el oleaje causa en la playa una rápida y profunda transformación al interactuar con el lecho de los granos.

Rara vez se presentan playas rectilíneas o con curvaturas continuas, generalmente contienen formas de media luna de mayor o menor dimensión, con salientes o puntas de arena o entrantes moderadamente profundas y alargadas.

En 1988, Losada indica que estas formas son conocidas con diversos nombres, tales como: formas arenadas (beach-cusps), ondas de arena (sand waves), playas rítmicas (shoreline rhythms), arcos gigantes (giant cusps), barras crecientes (crescentic bars), etc.

El estado morfodinámico de una playa es la descripción de la forma que el perfil de playa adquiere como consecuencia de la interacción agua-sedimento. Cada estado de playa viene caracterizado por su forma geométrica, el oleaje incidente, el sistema circulatorio inducido y las oscilaciones de baja frecuencia, los cuales a su vez inciden sobre la forma geométrica y el oleaje incidente en las condiciones de equilibrio dinámico.

La evolución de un estado morfodinámico de la playa está gobernada por la morfología existente y la evolución de la dinámica marina, mientras que los límites topográficos de la playa y las características de los materiales imponen las condiciones de contorno. Cada forma tiene una de evolución o cambio. Estos cambios pueden ser de corto plazo, del orden de horas y de largo plazo, del orden de meses o años.

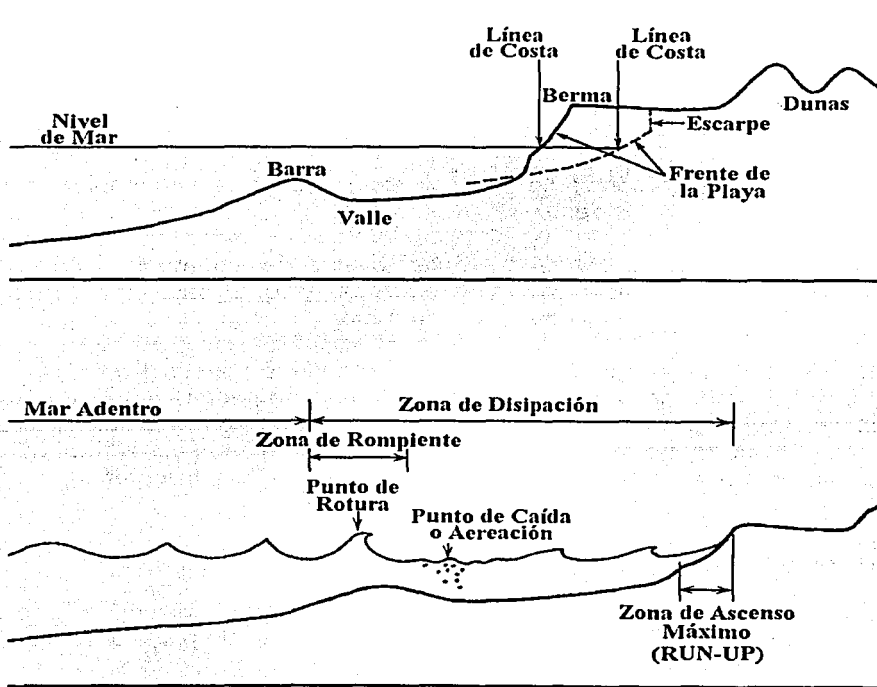


Figura 3.1. Esquema de las principales partes de la zona costera

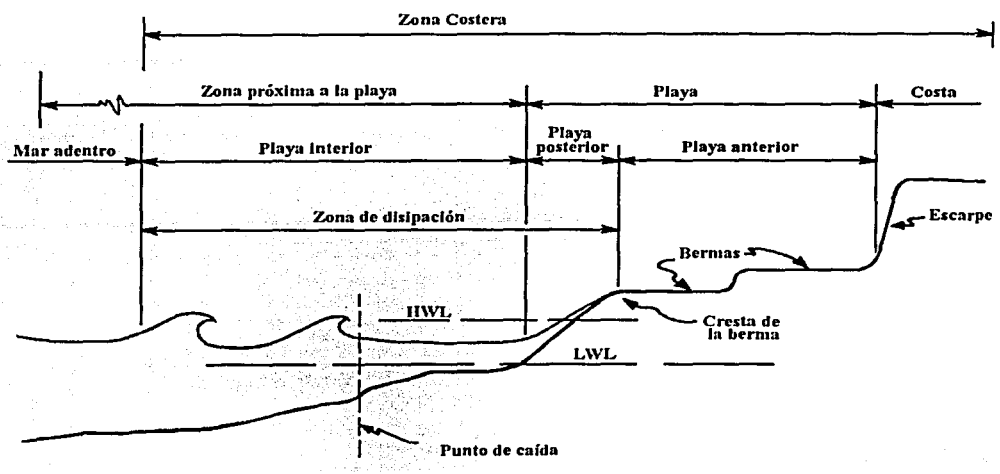


Figura 3.2. Esquema de las principales partes de la zona costera

3.3 Rotura del oleaje

La rotura del oleaje se presenta como una transformación de la energía incidente eventualmente en una disipación, en otras palabras, es una forma de modificación con la que se manifiesta la energía.

Hasta fechas recientes se suponía que el proceso de rotura era originado exclusivamente por la reducción de la profundidad, es decir, un fenómeno circunscrito a profundidades reducidas.

Se ha comprobado que el proceso de rotura, tal como se produce en aguas reducidas, puede ocurrir, al menos de forma similar en profundidades indefinidas. Para fines de este trabajo, la principal concepción de rotura está íntimamente ligada a la línea de costa y a la dramática transformación de las olas desde el momento en que se pueden observar hasta que alcanzan la orilla de la playa.

Iversen (1952), Patrik y Wiegel (1954) y Galvin (1968), propusieron cuatro tipos de rotura:

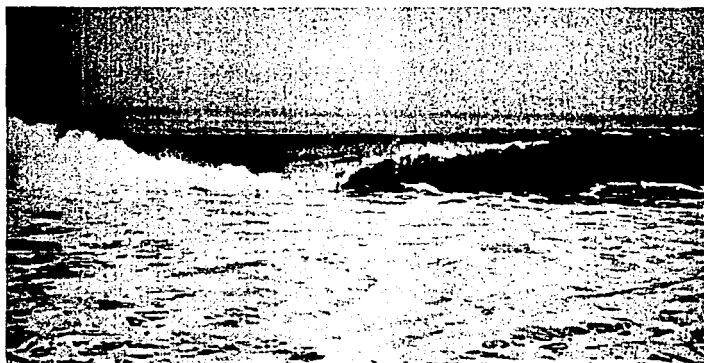
- **Decrestamiento (Spilling).**- En este tipo de rotura se presenta espuma, burbujas y turbulencia en la cresta de la ola y eventualmente cubre parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la cresta, la cual, se decresta formando un pequeño chorro en algunos casos imperceptible que resbala por el frente de la onda.



DECRESTAMIENTO

Figura 3.3. Rotura del oleaje en decrestamiento

- Voluta (Plunging).- Aquí la mayor parte del frente de la onda adquiere la posición vertical, formando una voluta, con un chorro en la parte superior que envolviendo una masa de aire se precipita contra la base de la onda originando un salpicón de agua.



VOLUTA

Figura 3.4. Rotura del oleaje en voluta

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- ◆ Colapso (Collapsing).- En esta rotura, la parte inferior del frente de la onda se peralta y voltea, comportándose como una rotura en voluta pero truncada, ya que el punto de enfrente, desde donde la ola se voltea o se desmorona, está adelante y por debajo de la cresta de la ola.



Figura 3.5. Rotura del oleaje en colapso

- ◆ Oscilación (Surging).- El frente de la onda y la cresta que se presenta en esta rotura, permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorono con pequeña producción de espuma, burbujas y turbulencia.



Figura 3.6. Rotura del oleaje en oscilación

La descripción anterior indica cuatro puntos de referencia de un proceso que, en principio, parece continuo con diferentes niveles de intensidad. Existe un parámetro único, que combinando las características de la ola incidente y las de contorno (en este caso la playa), describe numéricamente las diferentes formas de rotura.

A través de los años, se ha experimentado en este sentido, y en 1949 Iribarren y Nogales, propusieron como parámetro para distinguir la rotura franca de la no rotura el cociente del peralte de la onda y la pendiente de la playa. Este parámetro es comúnmente conocido como el número de Iribarren:

$$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \tag{3.1}$$

donde

$\tan \beta$ = pendiente del fondo

H_0 = altura de la ola

L_0 = longitud de la onda

En 1988, Horikawa, presentó una tabla de rangos de valores del número de Iribarren para cada tipo de rotura:

$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$	0.1	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Tipo de Rotura	Decrestamiento		Voluta			Colapso		Oscilación		No existe rotura		

Figura 3.7. Valores de Iribarren para los cuatro tipos de rotura

En 1997, Silva propuso los siguientes rangos de rotura para valores del número de Iribarren:

Tipo de Rotura	Número de Iribarren $Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$
Decrestamiento	$Ir < 1.0$
Voluta	$1.0 < Ir < 2.6$
Colapso	$2.6 < Ir < 3.1$
Oscilación	$3.1 < Ir$

Tabla 3.1. Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de roturas, Silva, 1997.

En la Figura 3.8 se distinguen tres regiones en la zona de rotura de la onda: región de transformación o deformación, región exterior y región interior.

La primera región es la zona donde la ola sufre la deformación—peraltamiento que lleva a la rotura del perfil. En la región exterior se produce una rápida transformación del perfil, decreciendo su altura y generando turbulencia. Y la región interior se caracteriza por una variación lenta y gradual del perfil superficial con extensión de la turbulencia a toda la masa del fluido.

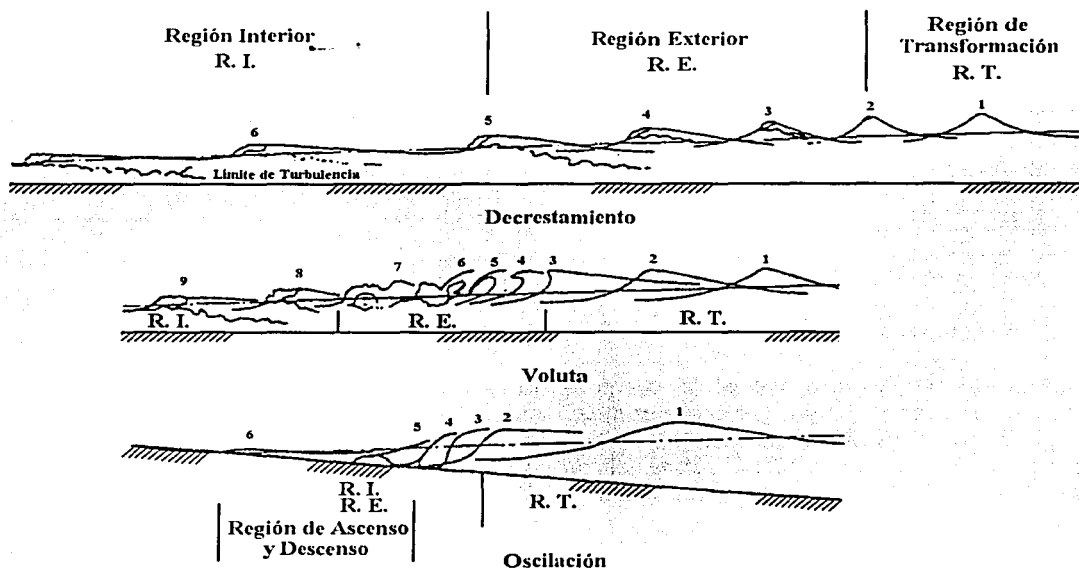


Figura 3.8. Regiones en la zona de rotura, Losada, 1988.

3.4 Tipología de los estados morfodinámicos límites

Se distinguen dos estados morfodinámicos límites: las playas reflejantes y las playas disipativas que tienen su correspondencia con los perfiles de playa propuestos por Johnson (1952). Posteriormente en 1984, Wright & Short definieron seis estados morfodinámicos de playa, cuatro de ellos intermedios y dos estados límite. Estos estados tienen la siguiente nomenclatura:

Estado	Nomenclatura
Disipativo	D
Barra longitudinal y valle	LBT
Barra y playa rítmica	RBB
Barra transversal y corriente de retorno	TBR
Terrazas Mareales	RR o LTT
Reflejante	R

Tabla 3.2. Tipología de los estados morfodinámicos

Para describir y definir los estados morfodinámicos de las playas se usa el parámetro de escala de rompiente, ε , (Huntley 1978) con la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{a_b \sigma^2}{g \tan^2 \beta} = \frac{\pi}{l_r^2} \quad (3.2)$$

donde

a_b = amplitud del oleaje incidente

σ = frecuencia angular del oleaje incidente

g = aceleración de la gravedad

$\tan \beta$ = pendiente del fondo

l_r = número de Iribarren

Aunque el oleaje generado por el viento es la fuente principal de la energía que moviliza los cambios en la playa, los procesos de disipación y reflexión que tienen lugar en ésta, originan transferencias de energía a otros modos de movimiento, pudiendo, en algunos casos llegar a dominantes sobre el propio oleaje. Estos modos de movimiento se clasifican en cuatro grandes categorías:

- ◊ Flujo oscilatorio del oleaje.- Corresponde al oleaje incidente, que puede estar o no en un proceso de rotura que comprende periodos entre uno y treinta segundos.
- ◊ Flujo oscilatorio o cuasi oscilatorios subarmónicos e infragravitatorios.- Son en general, ondas estacionarias, libres o atrapadas de frecuencia superiores a los treinta segundos. También corresponden a esta categoría las oscilaciones subarmónicas del oleaje, de periodo doble del oleaje, alrededor de los treinta segundos generadas por las playas reflejantes; las ondas infragravitatorias de periodo largo "surf beat" con periodos entre uno y tres minutos forzadas en general por las componentes infragravitatorias del oleaje incidente y componentes infragravitatorias de alta frecuencia con periodos entre treinta y cincuenta segundos.
- ◊ Corrientes longitudinales y de retorno generadas por la rotura del oleaje
- ◊ Corrientes de marea y viento

3.4.1 Playa Disipativa

La playa disipativa tiene una morfología prácticamente bidimensional con un perfil muy tendido ($\tan \beta \approx 0.01 - 0.02$). Esta playa representa un estado limite de la morfodinámica como se puede observar en la **Figura 3.9**.

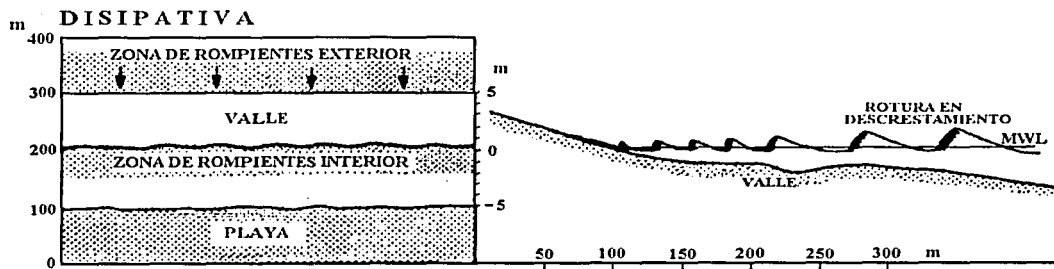


Figura 3.9. Estado morfodinámico limite. - Playa disipativa

En este perfil existen una o varias barras longitudinales paralelas a la línea de costa y separaciones de valles poco marcados. Dada la geometría de este tipo de playas, las corrientes de retorno son casi nulas, y únicamente se presentan cuando existen discontinuidades marcadas por la propia playa, un ejemplo puede ser los arrecifes rocosos.

En las playas disipativas se presentan valores del parámetro de escala de rompiente superiores a veinte, $\varepsilon > 20$, lo que implica las olas rompen en descrestamiento y en voluta, además de una disipación de la energía del oleaje progresiva a lo largo del perfil.

La playa disipativa se caracteriza por un perfil con los siguientes factores:

- Disipación progresiva de la energía del oleaje a lo largo del perfil
- Pendiente cóncava, relativamente suave, donde las olas inician su asimetría
- Pendiente muy suave y muy ancha con una o varias barras longitudinales donde las olas rompen en descrestamiento y en voluta, reorganizándose en nuevas ondas de periodo mayor
- Talud de perfil cóncavo, coronado por una berma por donde las olas, tras su paso por la zona de disipación de rompientes, ascienden y descienden un poco
- Salvo la presencia de barras cortadas, o no, por canales no existen formas asociadas de playa
- Predominio de las roturas en descrestamiento y voluta, con elevación máxima de flujo, relativamente pequeña pero con una elevación del nivel medio del mar importante. La zona de rompientes es muy ancha y en ella se desarrolla una importante disipación turbulenta.
- Bajo estas condiciones, dentro de la zona de rotura la energía dominante se encuentra en los periodos de surf-beat (80-150 s y más) que condicionan la situación de las corrientes de rotura, estableciéndose éstas por puntos de corte de las barras. No obstante, cuando estas playas son suficientemente largas, tienden a

separarse en función de accidentes topográficos, hidrodinámicos (acción de la desembucadura de un río y mareas) u otra causa.

Este perfil tiende a prevalecer en playas bajo la acción del oleaje con gran energía, con material fino y abundante, siendo en consecuencia su estado morfodinámico modal. Despreciando la sobre elevación del nivel medio del mar por marea meteorológica, la erosión de las playas disipativas se produce por la elevación del nivel medio del mar que, a consecuencia de la variación espacial y temporal de la rotura en descrestamiento, puede oscilar con periodos infragravitorios (80-150 s) permitiendo al flujo, debido a la ola, alcanzar los niveles más altos de la berma y más profundos de la barra. La playa seca es erosionada produciendo escarpes y haciendo retroceder la duna. Con la progresión de la ola por la zona de rotura, se produce una alteración de las oscilaciones con el periodo incidente y crecen las oscilaciones con periodos infragravitorios.

El transporte de sedimentos en estas playas es el resultado de la segregación vertical de los flujos hacia el mar y hacia tierra más que por las corrientes de retorno, siendo el flujo hacia tierra superficial e interno, mientras que el flujo hacia el mar es más débil y se realiza por los niveles inferiores (resaca). En condiciones de equilibrio de la playa, la resultante de ambos flujos es cero.

3.4.2 Playa Reflejante

La playa reflejante, se encuentra en el otro extremo límite de la escala de estados morfodinámicos, como se puede observar en la Figura 3.10. En éstas se producen roturas en colapso o en oscilación sobre el frente de la playa, que tienen pendientes elevadas ($\tan \beta \approx 0.01 - 0.02$).

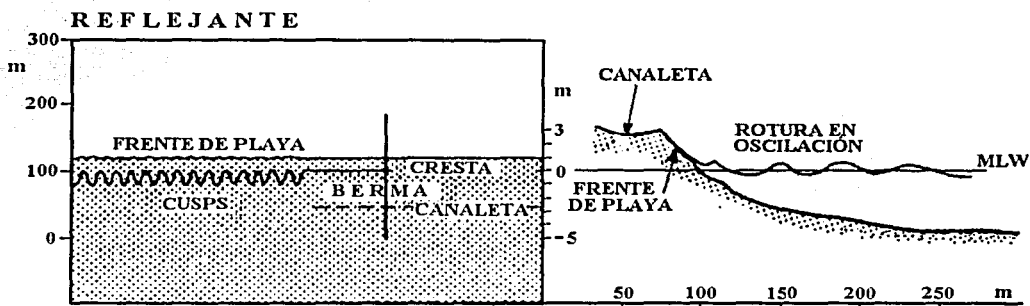


Figura 3.10. Estado morfodinámico límite.- Playa reflejante

En las playas reflejantes se presentan valores del parámetro de escala de rompiente menores a tres, $\varepsilon < 3$. La turbulencia relacionada con el proceso de rotura se ve confinada a la zona de ascenso y descenso sobre el frente de la playa. Bajo condiciones de baja energía el talud de la playa finaliza por la parte superior de una berma alta y recta, tras la

cual puede aparecer un canal como resultado de la incorporación de la berma al talud más tendido que corresponde a las condiciones de mayor energía.

Inmediatamente debajo del talud de la playa se puede encontrar un escalón pronunciado compuesto de material grueso, la profundidad se incrementa con la altura de ola. En playas con marea, el barrido del oleaje sobre el escalón se destruye por lo cual no aparece en el pie del frente de playa en bajamar. Hacia el lado del mar del frente de la playa, la pendiente disminuye notablemente, dando al perfil una forma cóncava bien marcada.

En contraste con la playa disipativa, en la playa reflejante la mayoría de la energía en las proximidades del frente de la playa se encuentra contenida en las frecuencias del oleaje incidente y del primer subarmónico del mismo (doble del periodo incidente). Las oscilaciones infragravitatorias son débiles y despreciables; las oscilaciones subarmónicas son invariablemente ondas estacionarias atrapadas. Cuando aparecen los beach cusps, estos se encuentran separados entre sí por una distancia equivalente a la mitad de la longitud de onda correspondiente a la onda de borde subarmónica de orden cero (primer subarmónico).

En condiciones de baja energía, las oscilaciones subarmónicas tienden a ser de menor amplitud que las oscilaciones en la frecuencia incidente. Cuando las condiciones de energía aumentan, la proporción de energía subarmónica también, llegando a ser mayor que la energía del oleaje incidente, esto provoca acentuados ascensos-descensos sobre el frente de la playa y donde se puede rebasar la berma e iniciar cortes en la playa.

La playa reflejante se caracteriza por un perfil con los siguientes factores:

- Pendiente suave y material fino desde el punto de rotura hacia el mar
- Talud muy rígido con los materiales más gruesos de la playa en el punto de colisión del reflujó de la onda incidente
- Talud rígido, constituyendo el talud de la playa propiamente dicho y coronado en una berma
- No existen formas asociadas de playa, excepto formas arenadas en algunos casos
- Predominan las roturas de oscilación y colapso, en consecuencia la elevación y descenso del agua por el talud con el periodo incidente son importantes, pero el nivel medio del mar varía poco. La zona de rompientes es pequeña (máximo una cuarta parte de la longitud de onda) y sólo existe una ola sobre el talud
- No es habitual encontrar bajo estas condiciones sistemas celulares de corrientes y solamente en el caso de desarrollarse formas arenosas se producen flujos de retorno localizados en los valles del arco. También, pueden producirse corrientes de retorno fuertes asociadas a los límites de las playas por cabos y espigones, presentando en esas condiciones fuertes erosiones en esos puntos.

Este perfil tiende a prevalecer en playas compartimentadas, a sotavento de cabos, espigones, etc., con material grueso o en zonas de prolongado depósito, en estas situaciones el perfil reflejante es el estado morfodinámico modal.

Con roturas claras en oscilación y con baja energía, el flujo y reflujo de agua sobre el talud se realiza con periodo igual al incidente, sin embargo, al crecer la energía estas playas presentan la propiedad de desarrollar lo que se conoce como resonancia subarmónica, es decir, se generan ondas de borde principalmente de periodo doble al periodo incidente, de tal manera que al crecer la energía también crece la amplitud del subarmónico hasta un límite a partir del cual el desarrollo de la turbulencia provocada por el cambio de rotura de colapso a volteo, reduce y llega a anular el desarrollo de la resonancia.

Bajo estas condiciones, la elevación máxima sobre el talud está controlada por el movimiento del subarmónico, produciéndose alternativas elevaciones máximas y mínimas. Bajo las máximas, el agua alcanza los niveles más altos de la berma, rebasándola; mientras que el flujo de descenso gobernado por la oscilación de periodo doble, penetra cargado del material erosionado bajo la siguiente ola, aún después de llegar ésta. Debido al fuerte gradiente hidráulico que soporta la arena situada en las partes intermedias e inferior de la playa, se licua y se desliza fácilmente hasta profundidades donde la arena deja de estar soportada, provocándose su sedimentación. De esta forma se desarrollan formas arenadas de playa cuyas dimensiones están asociadas a la longitud de la onda de borde y, por ende, a la longitud del oleaje incidente.

3.4.3 Perfiles intermedios

Los cuatro estados intermedios poseen elementos de los estados disipativo y reflejante, a su vez, el parámetro de escala de rompiente, ε , varía notablemente tanto transversal como longitudinalmente.

Cada uno de estos estados presenta una morfología muy compleja, que están sujetas a diferentes estados de condiciones del oleaje, y por tanto, la variabilidad total de estas playas es muy elevada.

Los estados intermedios presentan las siguientes características:

- Formas de playa muy variadas en tipos y tamaños, tales como sistemas de barras, barra creciendo, sistema rítmico de barras cruzadas por corrientes de retorno.
- Las barras que se presentan protegen la cara interior de la playa de la acción de las grandes olas, por lo que ésta presenta dos dinámicas diferenciadas, una externa disipativa (asociada, en general, a la bajamar) y otra interna reflejante (correspondiente a condiciones de pleamar). Debido a la forma de las barras, una sección completa de la playa puede ser disipativa, mientras que otra, por ejemplo protegida por las corrientes de retorno, actúa como reflejante.
- La playa puede verse afectada por una combinación de ondas, incidente de periodo T , reflejada de periodo T , ondas subarmónicas de periodo $2T$ y $4T$ y

oscilaciones infragravatorias de periodos 10 a 20T, prevaleciendo cada una de ellas sobre las otras en función del perfil analizado.

- Las olas rompen bajo la acción de las diversas formas de barra, y se reorganizan en nuevas olas con periodos del orden de la mitad del original, las cuales al alcanzar el talud interno de la playa, se reflejan produciendo una onda estacionaria. Este fenómeno trae consigo la creación de formas arqueadas en el talud interior, algunas veces de dimensiones muy pequeñas, como respuesta al oleaje incidente de corto periodo.
- Una característica fundamental de las playas intermedias es la existencia de un canal paralelo a la playa y que al separar la playa interior de la barra, encauza el flujo de retorno hacia los puntos de salida donde se establecen las corrientes de retorno.
- La presencia del oleaje incidiendo oblicuamente y la soldadura de parte de la barra con la playa interior origina sistemas circulatorios sumamente complicados donde coexisten corrientes de retorno en respuesta al oleaje incidente y una onda subarmónica 2T, en los puntos de soldadura, con corrientes de retorno con pulsaciones asociadas a oscilaciones infragravatorias originadas por las roturas en descrestamiento sobre la barra no soldada.

3.4.4 Estado intermedio: Barra Longitudinal y Valle y Barra y Playa Rítmica

Estos estado están próximos a la playa disipativa, a partir de ésta pueden evolucionar a través de una secuencia acumulativa. El relieve de la barra y del valle es mucho más pronunciado que en caso de la playa disipativa, la barra es considerablemente más asimétrica transversalmente con mayor pendiente en el lado de tierra que en el lado del mar. La barra provoca la rotura del oleaje y es moderadamente disipativa.

En contraste con el caso de la playa disipativa, el oleaje se transforma sobre el valle a través del cual se propaga hasta romper sobre el frente de la playa, sobre un talud similar al de una playa reflejante.

Las ondas de menor peralte rompen en oscilación sobre el frente de la playa, en cuanto que las de mayor peralte colapsan sobre la base. En ambos casos el ascenso - descenso tiene gran amplitud, y con frecuencia aparecen beach-cusps en el frente de la playa. Cuando se producen oscilaciones longitudinales de la barra creciente y en el frente de la playa subaérea, el estado de Barra Longitudinal y Valle evoluciona hacia el de Barra y Playa Rítmicas.

La longitud de onda de las oscilaciones longitudinales es del orden de 100 a 300 m y no deben confundirse con las más cortas correspondientes a los beach-cusps. Simultáneamente a la aparición de las ondulaciones longitudinales de la barra, surgen sistemas circulatorios rítmicos, débiles o moderados, con entrada preferente de agua sobre los avances de la barra y salida de aguas en la zona de retroceso de la misma. Las ondulaciones de la barra son persistentes en su ubicación.

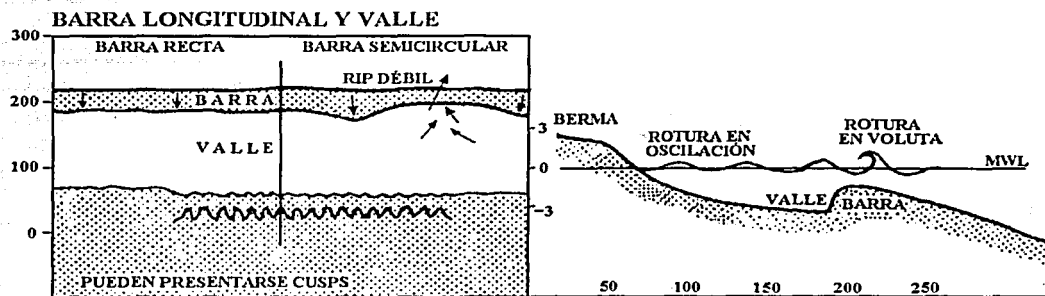


Figura 3.11. Estado intermedio: Barra Longitudinal y Valle

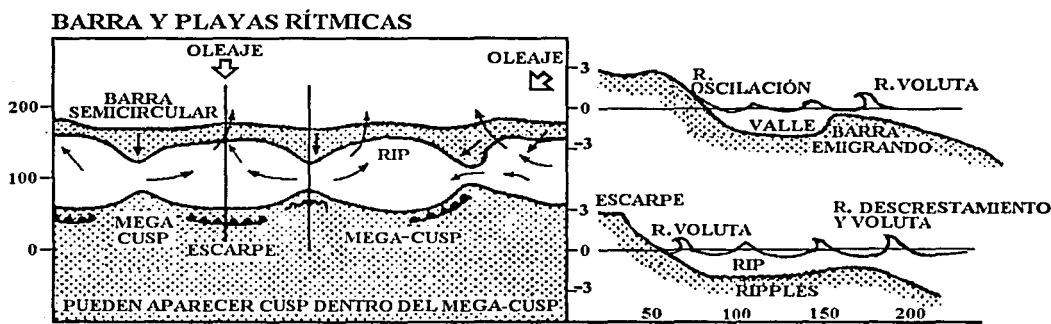


Figura 3.12. Estado intermedio: Barras y Playas Rítmicas

3.4.5 Estado intermedio: Barra Transversal y RIP

La playa alcanza este estado cuando siguiendo la secuencia de acumulación, los salientes de las barras crecientes alcanzan el frente de playa. En el proceso forman barras transversales altamente disipativas, alternando longitudinalmente con zonas de mayor profundidad, altamente reflejantes y con fuertes corrientes de retorno.

La característica dominante en este estado modal es la fuerte circulación cíclica. En este tipo de playa, las velocidades de las corrientes de retorno son del mismo orden que las velocidades de las oscilaciones incidentes en rotura.

Estas playas experimentan corrientes de retorno de gran magnitud. Las fuertes corrientes de retorno pueden provocar erosiones de fondo y del talud aún cuando la barra siga avanzando en las zonas de entrada del flujo.

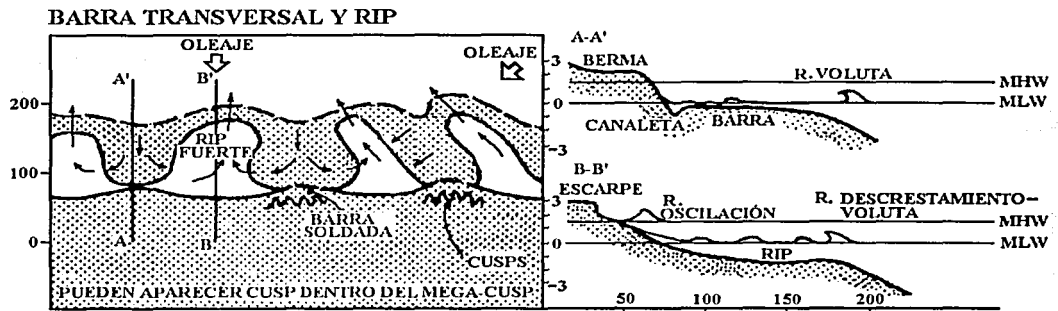


Figura 3.13. Estado intermedio: Barra Transversal y RIP

3.4.6 Estado Terrazas Mareales

Cuando la playa continúa con la secuencia acumulativa, la barra creciente continúa su avance y se une casi totalmente al frente de la playa, formando una terraza casi-horizontal que puede emerger ligeramente en bajamar.

En algunos puntos, la unión no es completa y la barra queda separada del frente de la playa por una pequeña canaleta. La terraza es moderadamente disipativa, mientras que el talud de la playa es claramente reflejante. Pueden estar presentes pequeños canales debidos a las corrientes de retorno.

Las variaciones en la reflectividad de la playa están muy relacionadas con el estado de la marea, esto es, en bajamar la playa es disipativa mientras que en pleamar es claramente reflejante.

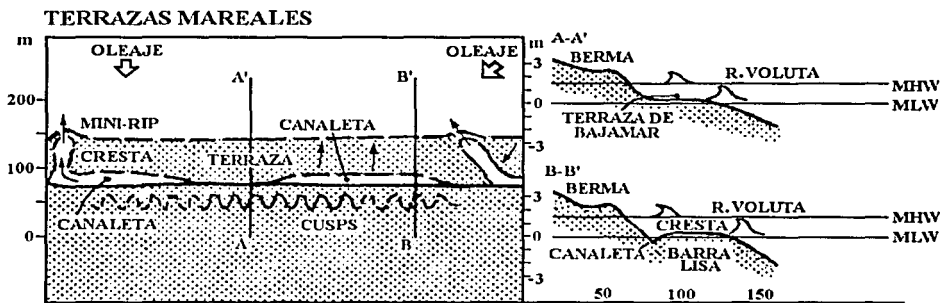


Figura 3.14. Estado intermedio: Terrazas Mareales

3.5 Estado Modal de una playa

El estado modal se define como aquel estado en el que una playa se encuentra con mayor frecuencia, sabiendo que la morfología de una playa en un instante dado es función de las características del sedimento y del clima marítimo. La movilidad de una playa se define como el rango de variación alrededor del estado modal.

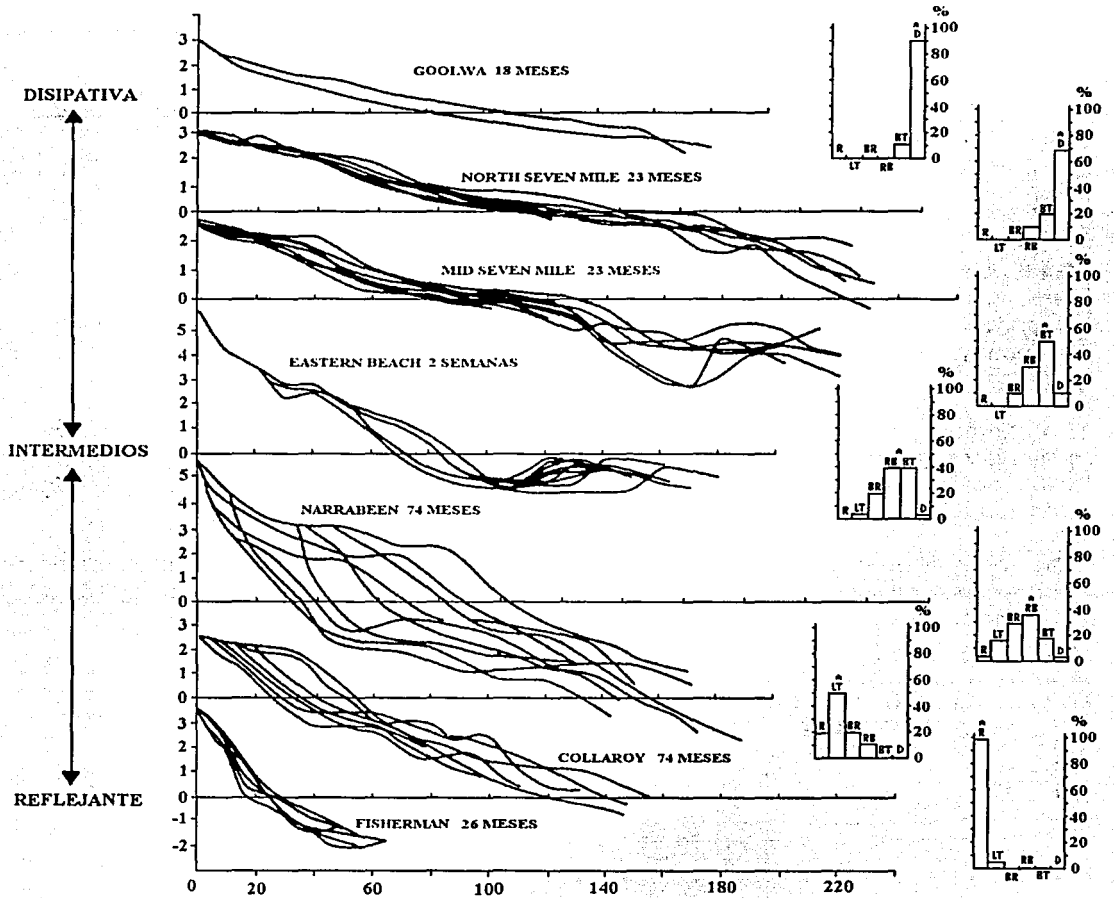


Figura 3.15. Variación del perfil de diversas playas en función de su estado modal

3.6 Perfiles de playa

Tradicionalmente se ha dividido el transporte de sedimentos en dos modos ortogonales independientes: el transporte longitudinal y el transporte transversal o en perfil. Dicha separación sirve para caracterizar ciertos elementos fundamentales y su influencia en los mecanismos de transporte, sin embargo, en la realidad no necesariamente se presentan separados ya que las variaciones de un perfil pueden ser generadas por ambos.

En lo que se refiere al transporte transversal, éste ha sido estudiado por diversos autores como, por ejemplo, Shepard y Lafond (1949), Inman y Rusnak (1956), Gorsline (1966), Bowen (1980), Dally y Dean (1984), Wrigth y Short (1984). La mayor parte de estos trabajos explican los mecanismos del transporte transversal y la magnitud de los cambios a los que está sometido un perfil de playa, pero distan de ser modelos cuantitativos o predictivos.

3.6.1 Perfil de equilibrio

Un concepto fundamental en el análisis de las variaciones de los perfiles de playa es la idea del perfil de equilibrio. Este concepto fue introducido por Bruun (1954) y se define como el perfil que se mantendría constante cuando una determinada zona de la costa cuando sus características físicas (tamaño de arena, etc.) permanezcan fijas y sean solicitadas por una serie de fuerzas actuantes (olas, corrientes y marea), es decir, el perfil no varía en el tiempo si las fuerzas actuantes permanecen constantes.

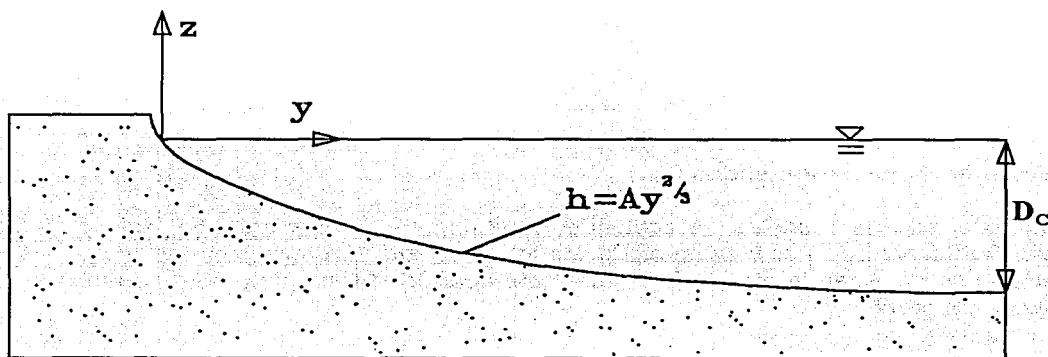


Figura 3.16. Perfil de Equilibrio propuesto por Bruun, 1954

Aunque el concepto de perfil de equilibrio ha sido duramente criticado, debido a que las fuerzas que afectan el equilibrio están siempre variando con las mareas, las olas, las corrientes y los vientos, el perfil de equilibrio constituye una herramienta eficaz para predecir el comportamiento de una playa y así diseñar y analizar proyectos de regeneración de playas.

Es por esta razón por la cual el perfil de equilibrio por sí mismo se encuentra limitado en su aplicación. De acuerdo a sus hipótesis, numerosos autores han planteado modificaciones del perfil de equilibrio con el objeto de poder estudiar casos más específicos.

El perfil de playa se define como la variación de la profundidad del agua, h , con la distancia desde la línea de costa, x , en dirección normal a la misma, es decir:

$$h = f(x) \quad (3.3)$$

Las particularidades que debe cumplir todo perfil de equilibrio son las siguientes:

- Usualmente son cóncavos hacia arriba
- Un menor tamaño de arena, origina un perfil con pendiente más suave
- El frente de playa es generalmente lineal
- Las olas peraltadas dan lugar a pendientes más suaves y con tendencia a la formación de barras
- Los sedimentos gruesos y finos tienen a organizarse en las zonas más someras y más profundas, respectivamente.

Para poder estimar el perfil de equilibrio de una playa, existen dos tipos de modelos:

- Modelos cinemáticos
- Modelos dinámicos

3.6.2 Modelos cinemáticos

En este tipo de modelos se pretende determinar el movimiento de las partículas de sedimento (ya sea por suspensión o fondo), mediante la descripción de las fuerzas que actúan sobre estas, el equilibrio se obtendrá cuando el transporte neto se anula en cada punto del perfil.

3.6.2.1 Perfil de equilibrio de Bruun

Con el objeto de analizar y cuantificar el concepto de perfil de equilibrio se han realizado numerosos trabajos tanto en laboratorio como en el campo. En 1954, Bruun analizó perfiles de playas de la costa danesa del Mar del Norte y de Mission Bay, California y encontró que la media de los perfiles podía ser ajustada mediante la relación:

$$h = Ax^{\frac{2}{3}} \quad (3.4)$$

3.6.2.2 Perfil de Dean

En 1977, Dean analizó más de quinientos perfiles a lo largo de la costa Atlántica de los Estados Unidos tomados por Hayden et al. (1975) desde Long Island hasta México. Dean ajustó los perfiles por medio de mínimos cuadrados a la expresión:

$$h = A x^n \quad (3.5)$$

donde los parámetros A y n varían en los siguientes rangos:

$$0.1 < n < 1.4$$

$$0.0025 < A < 6.31$$

Con un error cuadrático medio del 16% y un valor medio del parámetro $n = 0.67$, análogo al propuesto por Bruun. Dean rehizo el análisis del ajuste dejando el parámetro n fijo a $2/3$ y encontró que la dispersión de los valores del parámetro A se redujo considerablemente.

3.6.2.3 Perfil propuesto por Vellinga

En 1983, Vellinga realizó una serie de ensayos bidimensionales y tridimensionales de erosión en dunas con oleaje irregular, proponiendo como mejor ajuste de sus ensayos la siguiente expresión:

$$\left(\frac{7.6}{H_s}\right) y = 0.47 \left[\left(\frac{7.6}{H_s}\right)^{1.28} \left(\frac{\omega}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18 \right]^{0.5} - 2 \quad (3.6)$$

donde

H_s = altura de ola significativa

ω = velocidad de caída del grano

Para determinar el ajuste, Vellinga fijó arbitrariamente el valor del exponente $n = 0.5$. En 1984, realizó un nuevo análisis de los resultados de sus ensayos y concluyó que los perfiles de erosión pueden ser descritos por una ecuación similar a ecuación (3.5), en donde el valor del exponente fue de $n = 0.78$.

3.6.2.4 Factores que afectan al parámetro A

El valor del parámetro A es función del tamaño del sedimento, como se ilustra en la **Figura 3.17**, en donde se observa que a mayor diámetro, mayor es el valor de A y por tanto la pendiente de la playa es mayor, la relación aproximada siendo D el diámetro representativo del material, es:

$$A \approx D^{1/3} \quad (3.7)$$

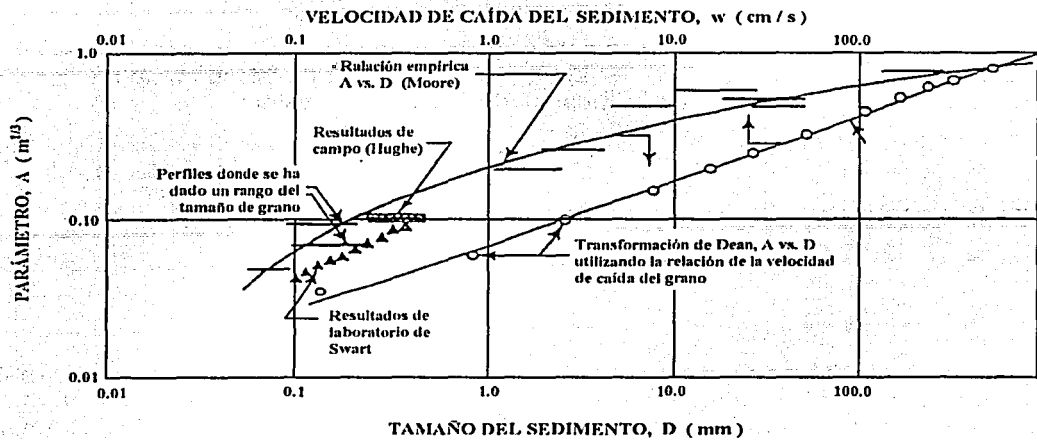


Figura 3.17. Variación del parámetro A con el tamaño del grano

3.6.2.5 Formulaciones para determinar el parámetro A

Para playas conformadas solo con arena, se puede utilizar la siguiente gráfica:

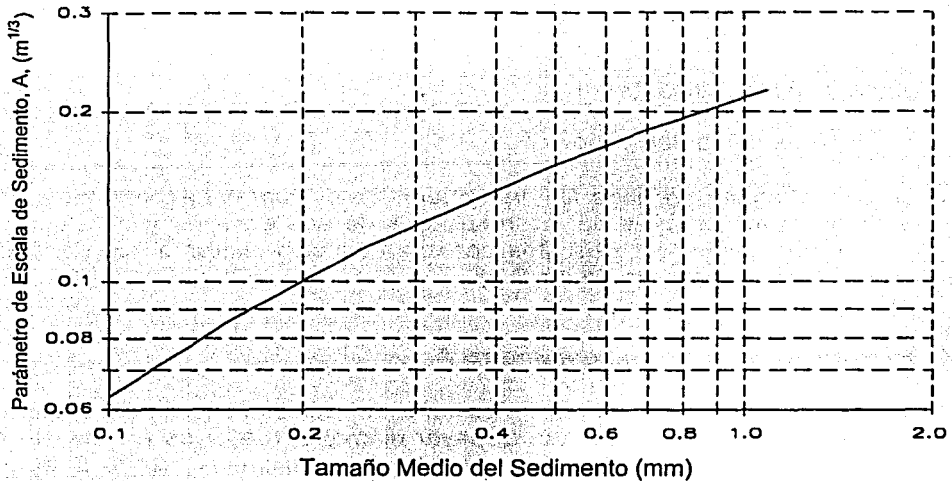


Figura 3.18. Valores de A en función del tamaño del grano para playas de arena

En 1987, Dean propuso la siguiente expresión para el cálculo del parámetro A en función de la velocidad de caída, ω , y donde $K = 0.51$:

$$A = K \omega^{0.44} \tag{3.9}$$

En 1986, Hanson propuso para diferentes tamaños de D_{50} los siguientes rangos para calcular A :

$$\begin{aligned} A &= 0.41D_{50}^{0.94} && \Rightarrow && D_{50} < 0.4 \\ A &= 0.23D_{50}^{0.32} && \Rightarrow && 0.4 < D_{50} < 10 \\ A &= 0.23D_{50}^{0.28} && \Rightarrow && 10 < D_{50} < 40 \\ A &= 0.46D_{50}^{0.11} && \Rightarrow && D_{50} > 40 \end{aligned}$$

donde D_{50} = diámetro del tamaño medio del grano, (mm)

A partir de la **Figura 3.17**, en 1991, Kriebel, Kraus y Larson desarrollaron una correlación similar, considerando tamaños de sedimento de 0.1 mm a 0.4 mm:

$$A = 2.25 \left(\frac{\omega^2}{g} \right)^{1/3} \tag{3.10}$$

En particular Kriebel et al. (1991) propusieron:

$$A = 1.05\omega^{2/3} \tag{3.11}$$

Es importante señalar que en el rango de arenas $0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$, las diferencias entre la aplicación de la propuesta por Kriebel y la propuesta por Dean, no alcanzan el 20%.

D (mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.063	0.067	0.071	0.076	0.080	0.084	0.087	0.090	0.094	0.097
0.2	0.100	0.103	0.106	0.109	0.112	0.115	0.117	0.119	0.121	0.123
0.3	0.125	0.127	0.129	0.131	0.133	0.135	0.137	0.139	0.141	0.143
0.4	0.145	0.147	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.156	0.158	0.159
0.5	0.161	0.162	0.163	0.165	0.166	0.167	0.168	0.169	0.171	0.172
0.6	0.173	0.174	0.175	0.177	0.178	0.179	0.180	0.181	0.183	0.184
0.7	0.185	0.186	0.187	0.188	0.189	0.190	0.190	0.191	0.192	0.193
0.8	0.194	0.195	0.196	0.196	0.197	0.198	0.199	0.200	0.200	0.201
0.9	0.202	0.203	0.204	0.204	0.205	0.206	0.207	0.208	0.208	0.209
1.00	0.210	0.211	0.212	0.212	0.213	0.214	0.215	0.216	0.216	0.217

Tabla 3.3. Resumen de los valores recomendados para el parámetro A

En la **Tabla 3.3** se muestran los valores del parámetro A para un diámetro del tamaño medio del grano. En la columna los valores del diámetro son en décimas, mientras que en la fila son en centésimas. Es decir, si tenemos un diámetro medio igual a 0.42 mm el valor que se obtendrá para el parámetro A es de $0.148 \text{ m}^{1/3}$.

3.6.3 Modelos dinámicos

En 1977, Dean propuso una aproximación sencilla que se funda en las siguientes hipótesis:

- En una playa en equilibrio, el transporte neto longitudinal se considera nulo y es independiente del transporte transversal, por lo que el perfil es un fenómeno bidimensional en el que no existe transferencia general de energía
- La disipación de energía por unidad de volumen, D^* , es constante en la zona de rotura.
- La evolución de la altura de la ola en la zona de rotura es gradual (en descrestamiento), y sigue una ley lineal
- No hay variación en el nivel del mar.

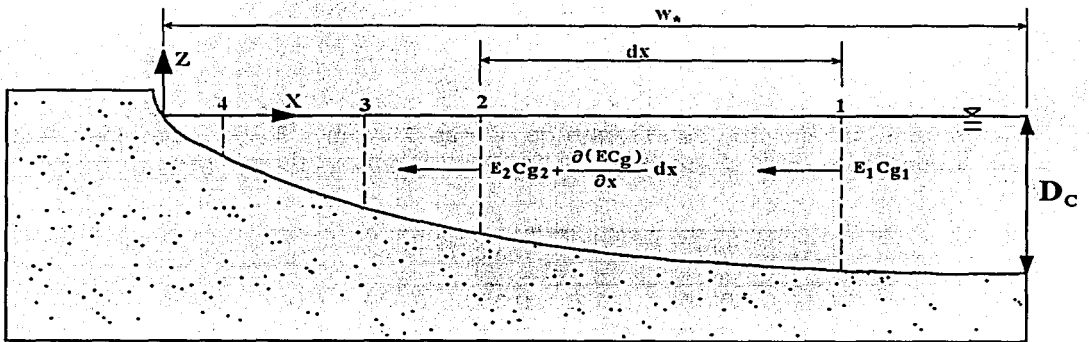


Figura 3.19. Equilibrio de flujo de energía en un perfil de playa

De acuerdo con la **Figura 3.19**, el flujo de energía que atraviesa las secciones 1 y 2 de un perfil de playa como el mostrado, y separados una distancia, dx , se obtiene que la siguiente expresión:

$$E_1 C_{g1} = E_2 C_{g2} + \frac{\partial(E C_g)}{\partial x} dx \tag{3.12}$$

donde

E_i = energía en la sección i

$C_{g,i}$ = celeridad de grupo en la sección i

3.7 Profundidad de cierre

La profundidad de cierre se encuentra ubicada en el punto del perfil de playa a partir del cual no se presentan cambios apreciables, es utilizada para estimar el límite mar adentro hasta el que el transporte de sedimentos transversal es considerable y en las siguientes aplicaciones:

- ◆ Estimación del transporte de sedimentos
- ◆ En los modelos numéricos de evolución costera
- ◆ En el diseño de playas

En 1978, Hallermieier propuso la siguiente expresión para determinar la profundidad de cierre utilizando condiciones extremas.

$$D_{c,t} = 2.28 H_{e,t} - 68.5 \left(\frac{H_{e,t}^2}{g T_{e,t}^2} \right) \quad (3.13)$$

donde

$D_{c,t}$ = profundidad de cierre en t años

$H_{e,t}$ = altura de ola significativa que es excedida 12 horas por año

$T_{e,t}$ = periodo asociado a $H_{e,t}$

g = aceleración de la gravedad

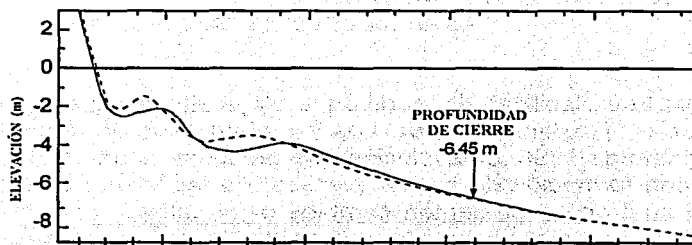


Figura 3.20. Profundidad de cierre, Hallermieier, 1978.

En 1985, Birkmeier evaluó la expresión propuesta por Halleimeier y, utilizando perfiles medidos, encontró la siguiente expresión para determinar la profundidad de cierre:

$$D_c = 1.57H_e \quad (3.14)$$

La pendiente media hasta la profundidad en la que no se produce transporte transversal de sedimentos, se obtiene en función del parámetro A , con la siguiente expresión:

$$\tan \beta = \sqrt{\frac{A^3}{D_c}} \quad (3.14)$$

En la **Figura 3.21**, se presentan datos medidos en campo, proporcionados por Comisión Federal de Electricidad, Silva et. al (1996).

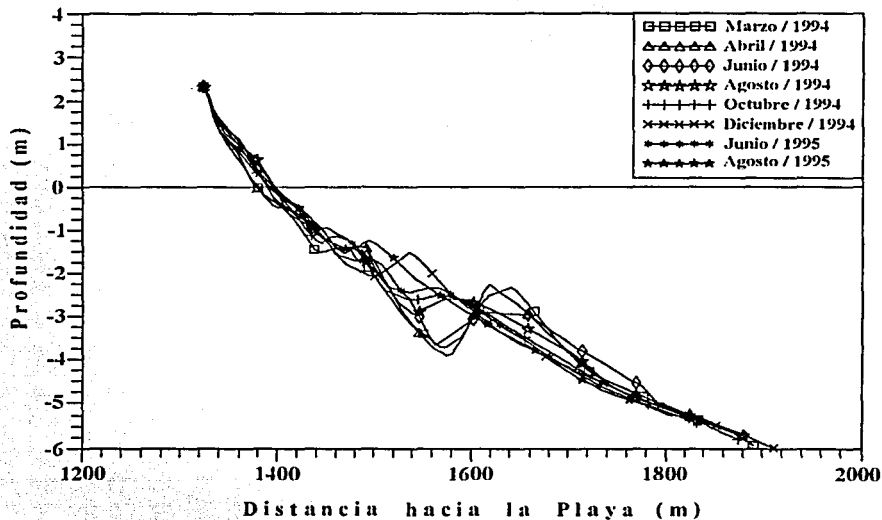


Figura 3.21. Variabilidad temporal del perfil de playa en las cercanías de la planta Termoeléctrica Adolfo López Mateos, Silva et al., 1996

Se puede observar la variabilidad del perfil en la playa aledaña a la planta termoeléctrica Adolfo Lopez Mateos, Tuxpan, Veracruz. Los levantamientos de realizaron desde marzo de 1994 hasta agosto de 1995. La evolución que presenta es un perfil de playa disipativo a uno reflejante con formación de barras y valles. Es fácilmente apreciable la parte del perfil a partir del cual no se presentan cambios significativos, aproximadamente a una distancia de 1830 m. Esto significa que la profundidad de cierre es de -5.25 m.

3.8 Barras

Uno de los principales inconvenientes que tienen los perfiles de equilibrio, es el no poder determinar las características geométricas de las barras de arena.

En 1948, Keulegan realizó estudios tanto en laboratorio como en campo. En éstos, determinó las relaciones necesarias para la formación de barras.

La geometría de una barra se define en términos de la profundidad sobre la cresta de la barra, h_C , La profundidad del valle de la barra, h_T , y la profundidad de la base de la barra, en el mismo lugar donde se mide la cresta, h_D , como se indica en la Figura 3.22.

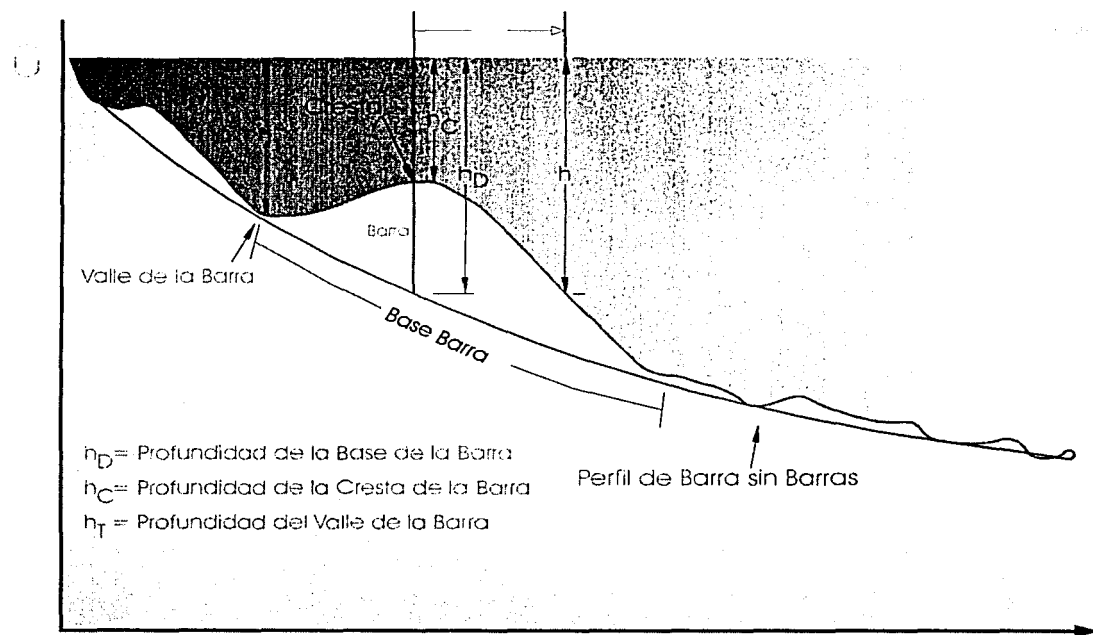


Figura 3.22. Definición de las características de una barra

Keulegan encontró que la relación entre la profundidad de la cresta y la base (h_C / h_D) es aproximadamente igual a 0.58, tanto para datos de laboratorio como de campo.

La relación entre las profundidades del valle y la cresta (h_T / h_C) se encuentra entre 1.6 y 1.8, además encontró que las barras en la naturaleza son más anchas, generalmente del doble que en las de laboratorio, esto probablemente debido a la variación de alturas de ola en el campo y en menor medida debido a la variación en los niveles del agua.

CAPÍTULO 4. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

4. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

4.1 Introducción

El modelo de línea de costa es un modelo numérico de predicción basado en la ecuación de continuidad para el transporte de sedimentos o arenas y en la ecuación para transportar cantidades de arena a lo largo de la línea de costa. Este modelo también es conocido como "One Line Theory" (OLT) y referido como teoría de la línea de costa.

El movimiento de sedimentos es causado por las olas y se clasifica en dos tipos según su dirección:

- Transporte transversal o movimiento de sedimentos a través de la línea de costa
- Transporte longitudinal o movimiento de sedimentos a lo largo de la línea de costa

Para el primer caso, el movimiento es confinado en una región desde el límite donde llega el agua en la costa hasta la parte profunda crítica del movimiento de los sedimentos causados por las olas en la costa. Exceptuando los sedimentos que caen en cañones submarinos como arenas que son transportadas tanto lejos como cerca de la costa. Para el segundo, se considera que el movimiento del transporte de sedimentos no es significativo. Se ha encontrado que para predicciones a largo plazo, la playa cambia principalmente por la transportación de sedimentos a lo largo de la línea de costa.

Hay muchas causas por las cuales la costa puede cambiar. El modelo de línea de costa puede ser usado solamente para estimar la evolución de las playas causada por el transporte litoral en una escala de tiempo y una escala espacial. También es adecuado para describir la acreción y la erosión alrededor de los embarcaderos, malecones, espigones y rompeolas. Sin embargo, este modelo no puede describir la formación del perfil de playa, barras, ni determinar los cambios estacionales del perfil, erosiones por muros de protección y otros cambios que involucren transporte transversal de sedimentos.

El primer trabajo que se tiene registrado sobre este modelo fue desarrollado por Pelnard-Considere (1956), quién lo aplicó para examinar los cambios causados en espigones. Asumió que el gasto del transporte longitudinal es proporcional al ángulo de incidencia del oleaje. De igual forma, Grijim (1960, 1964) usó el modelo de línea de costa para estimar la formación de los deltas de los ríos. Para este caso asumió que la cantidad de transporte litoral es proporcional al $\sin \alpha$, donde α es el ángulo de incidencia del oleaje.

La variación en la línea de costa producida por estructuras costeras ha sido analizada usando el modelo de línea de costa por diversos investigadores. Bakker (1968) y Bakker, Breteler y Roos (1970) ampliaron el modelo a dos líneas "Two Line Theory" (TLT), para describir los movimientos transversales de la batimetría. El cambio de playa se expresa en el TLT mediante dos líneas; una de ellas representa el movimiento de las batimétricas en la zona de rompientes y la otra el cambio de las mismas mar adentro de la zona de rotura. El transporte transversal de sedimentos se da como una función de la distancia entre las dos líneas, de manera que el sedimento se mueve hacia el mar en una playa de talud muy pendiente y hacia tierra en playas de taludes suaves.

Así mismo, Perlin y Dean (1983) extendieron el modelo de dos-líneas a un modelo multilineal. Hashimoto y Uda (1980) aplicaron empíricamente autofunciones de predicción para el cambio del perfil en la playa. En el modelo de autofunciones, la continuidad del material de fondo es calculado por el modelo de línea de costa y el perfil es descrito por autofunciones.

Una de las ecuaciones básicas para el modelo es el de la conservación de sedimentos que puede ser aplicada para describir la variación de la línea de costa. El procedimiento para calcular los cambios en la línea de costa empieza por recolectar y analizar los datos de olas y perfiles de playa. Después de calculadas las condiciones, se determinan las condiciones iniciales y de frontera. La altura de la ola y la dirección de la ola en el punto de rotura son calculadas a lo largo de la línea de costa. La cantidad de arrastre litoral, así como el cambio de la línea de costa son estimados.

Para el cálculo de olas se debe de tomar en cuenta el someramiento, la refracción, la difracción, y la reflexión. La cantidad de arrastre litoral está principalmente en función de la altura y la dirección de la ola, así como de diversas ecuaciones que han sido propuestas para predecir a lo largo de la costa para la cantidad de transporte de sedimentos.

Resumiendo lo anterior:

1. Recopilación y análisis de los datos disponibles de oleaje y perfil de playa.
2. Cálculo de las condiciones de contorno iniciales: altura de la ola y dirección en el punto de rotura a lo largo de la línea de costa utilizando un modelo de difracción-refracción.
3. Cálculo del gasto del transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa, utilizando alguna de las formulaciones existentes.
4. Cálculo del cambio de la línea de costa mediante la ecuación de la conservación del sedimento.

Una vez calculada la nueva línea de costa, se vuelve a empezar en el segundo paso, dándose por terminada la iteración cuando se alcanza el equilibrio o una determinada posición de la línea de costa.

4.2 Modelo de oleaje semi-empírico para difracción-refracción causado por estructuras costeras

Para empezar a calcular la altura de rotura del oleaje detrás de una estructura es necesario dividir el área de interés en la zona de sombra donde los efectos de difracción son dominantes y en la zona iluminada donde la difracción es más importante.

En la **Figura 4.1** se presenta de forma esquemática el modelo para el cálculo del oleaje. En este modelo, el ángulo en los rayos dentro de la zona de sombra de la refracción se

asume que son radiales y se toman a partir del extremo de la estructura P_1 con un ángulo α_1 hasta alcanzar el punto de rotura P_2 con un ángulo α_2 .

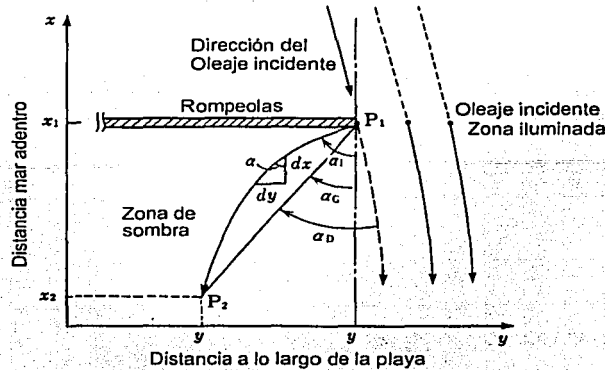


Figura 4.1. Esquema para el cálculo del oleaje, Horikawa, 1988

Se asume que en la zona iluminada el oleaje empieza con el mismo ángulo con que llega el ángulo de incidencia en el extremo de la estructura.

De esto se determina que la altura de rotura del oleaje puede ser calculado con la siguiente ecuación, en donde el punto P_2 se determina tomando en cuenta la refracción, la difracción, el someramiento y un criterio de rotura:

$$H_B = K_d(\alpha_D, \alpha_2, h_B) K_r(\alpha_1, h_B) K_S(h_B) H_{morro} \quad (4.1)$$

donde

H_B = Altura de rotura del oleaje

K_d = Coeficiente de difracción en el punto P_2 que estará en función del ángulo de rotura α_2 , la profundidad de rotura h_B

K_r = Coeficiente de refracción del rayo que está desde el extremo de la estructura, P_1 , y pasa por el punto P_2

K_S = Coeficiente de someramiento entre la punta de la estructura P_1 y el punto P_2 , y está en función de la profundidad de rotura h_B

H_{morro} : Altura de la ola en el extremo de la estructura.

Por otro lado, se tiene la ecuación empírica para calcular la altura de rotura de la ola:

$$H_B = \gamma h_B \quad (4.2)$$

El coeficiente de difracción, K_d , puede calcularse con el método de Penney (1952) el cual es aplicable al oleaje monocromático (tipo SWELL) o por el método simplificado de Goda (1985), el cual es aplicable tanto a oleaje tipo SEA como SWELL. Otra forma alternativa es el método presentado por Silva (1995).

El coeficiente de refracción, K_r , está en función del ángulo de partida del rayo y del ángulo de llegada al punto P_2 , el cual es determinado por la profundidad de rotura. Se puede calcular con las siguientes expresiones:

- Para la zona de sombra

$$K_r = \left(\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

- Para la zona iluminada

$$K_r = \left(\frac{\cos \alpha_{\text{morro}}}{\cos \alpha_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

donde

α_1 = ángulo de salida del rayo desde el extremo de la estructura

α_2 = ángulo de llegada del rayo a P_2

α_{morro} = ángulo de llegada de las olas al morro de la estructura

El coeficiente de someramiento K_s es función de la profundidad en el morro y la profundidad de rotura, este coeficiente se calcula con las velocidades de grupo en los puntos P_1 y P_2 .

$$K_s = \left(\frac{C_{g1}}{C_{g2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

El parámetro de rotura en aguas someras depende del peralte de la ola en aguas profundas H_0/L_0 , y la pendiente de la playa. Este parámetro puede calcularse a partir de alguna de las siguientes expresiones (Horikawa, 1988):

$$\gamma = 1.1(\tan \beta)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{12}} \quad (4.6)$$

$$\gamma = 1.16 \left[\frac{\tan \beta}{(H_0/L_0)^{1/2}} \right]^{0.22} \quad (4.7)$$

$$\gamma = 0.78 \quad (4.8)$$

Un rayo de oleaje no sigue una línea recta definida por el ángulo α_0 , sino que sale desde el punto P_1 con un ángulo mayor, α_1 , al punto P_2 , que se traslada debido a la refracción. Este ángulo se determina por medio de la ecuación de onda:

$$y_1 - y_2 = \int_{x_2}^{x_1} \tan \alpha dx \quad (4.9)$$

Donde si se integra ($dy/dx = \tan \alpha$) entre P_1 y P_2 , el valor de $\tan \alpha$ se puede obtener de la ley de Snell

$$\frac{\text{sen } \alpha_1}{c_1} = \frac{\text{sen } \alpha_2}{c_2} \quad (4.10)$$

donde

α = ángulo que toma el rayo del oleaje

c = celeridad

4.3 Variación de la playa y su interacción con el oleaje

Debido a la acción del oleaje, tanto la forma en planta de la playa como la batimetría cambian a lo largo de la misma. El cambio de la playa modifica a su vez el oleaje. La interacción entre la playa y el oleaje pueden ser representadas en dos formas.

La primera es cuando la posición de la línea de costa cambia, la distancia en el punto de inicio de la refracción, P_1 , también cambia y por tanto el ángulo de inicio del rayo. La segunda, y la más importante, es cuando la forma de planta sufre una gran deformación cerca de la estructura, así como la batimetría cerca de la costa tiende a alinearse a la forma de la planta.

Para el cálculo del efecto de la refracción se asume que la orientación de la línea de costa en algún punto se extiende hasta donde el efecto de la difracción en su inicio es localizado. De esta manera la orientación cambia en función de la posición a lo largo de la playa para conformarlo junto con la forma de planta.

En un sistema local (x' , y') de coordenadas que se encuentra alineado junto con las batimetrías locales, como se muestran en la **Figura 4.2**, puede observarse que forma un ángulo con respecto al sistema general (x , y) igual al de la orientación local de la línea de costa α_s , evaluado en el punto P_3 :

$$\alpha_s = \tan^{-1} \left(\frac{\partial x_s}{\partial y} \right) \quad (4.11)$$

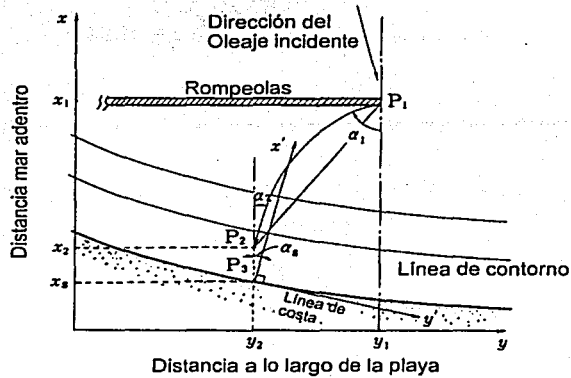


Figura 4.2. Esquema para el cálculo del oleaje utilizando un contorno modificado en su orientación, Horikawa, 1988

En el sistema local de coordenadas, el ángulo de inicio α_1' está relacionado con α_1 por:

$$\alpha_1' = \alpha_1 + \alpha_s = \alpha_1 + \tan^{-1} \left(\frac{\partial x_s}{\partial y} \right) \quad (4.12)$$

Los puntos P_1 y P_2 pueden ser relacionados utilizando la ley de Snell (4.10) en el sistema local de coordenadas:

$$\frac{\text{sen} \alpha_1'}{c_1} = \frac{\text{sen} \alpha_2'}{c_2} \quad (4.13)$$

De la misma manera, el coeficiente de refracción (4.3), se modifica resultando:

$$K_r = \left(\frac{\cos \alpha_1'}{\cos \alpha_2'} \right)^2 \quad (4.14)$$

El ángulo α_2' está relacionado con el α_2 mediante una transformación similar a la ecuación (4.12). Con el avance o retroceso de la línea de costa, avanzan o retroceden las líneas batimétricas de manera que la profundidad en un punto sólo es función de la distancia a la línea de costa y de la pendiente media de la playa.

4.4 Modelo de transporte de sedimentos

4.4.1 Ecuación de continuidad del sedimento

El modelo de cambio en la línea de costa es un método para calcular el balance de sedimentos. Está basado en la ecuación de continuidad de sedimentos, el cuál, considera un cambio diferencial de volumen, ΔV , en un tiempo, Δt , en una sección del perfil de playa.

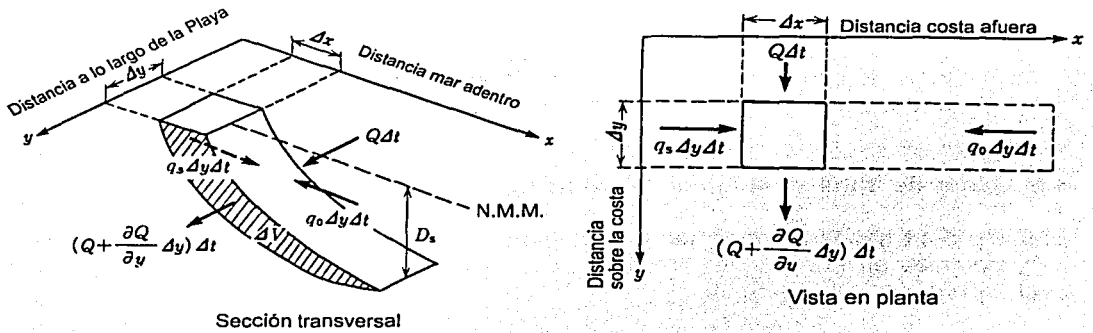


Figura 4.3. Esquema para la ecuación de continuidad del sedimento, Horikawa, 1988

Como se muestra en la **Figura 4.3**, el eje y es paralelo a la línea de costa y el eje x es la distancia a lo lejos de la costa (mar adentro). El perfil de la sección tiene un incremento Δy a lo largo de la línea de la costa, y Δx_s por los cambios de la posición de la línea de costa. Una suposición básica es que el perfil de la playa se mueve en paralelo por sí misma hasta una profundidad de cierre, D_s , hasta que el perfil ya no cambie.

Por tanto, la cantidad de variación del volumen es

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = D_s \Delta x_s \frac{\Delta y}{\Delta t} \tag{4.15}$$

y esta variación es controlada por una malla que contiene cantidades de arena que entran y salen de la sección por los cuatro lados, como se muestra en la **Figura 4.3**.

La ecuación de continuidad del sedimento es:

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0 \tag{4.16}$$

donde

Q = Gasto del transporte longitudinal de sedimentos

q = Gasto de sedimento, por unidad de longitud de playa, que entran (+) y salen (-) por los contornos de los lados del mar y tierra, es decir:

$$q = q_s + q_o \quad (4.17)$$

q_s = Gasto de sedimentos por unidad de longitud que entra o sale en el área de control de tierra

q_o = Gasto de sedimentos por unidad de longitud que entra o sale en el área de control de mar

4.5 Gasto de transporte longitudinal de sedimentos

El gasto del transporte longitudinal de sedimentos Q , que es generado por las corrientes longitudinales en la zona de rompiente, es el principal factor de control a largo plazo la evolución de la línea de costa.

Las expresiones predictivas para Q usualmente son expresadas en términos de las condiciones del oleaje en la línea de rotura.

4.5.1 Gasto de transporte longitudinal de sedimentos en función del flujo de energía del oleaje

Numerosas fórmulas han sido propuestas para la evaluación total del gasto del transporte longitudinal de sedimentos. La más usada es la expresión predictiva (Shore Protection Manual, 1984; Komar and Inman, 1970) que relaciona el flujo de energía del oleaje en rotura con el gasto del transporte longitudinal de sedimentos en peso sumergido, I :

$$I = K(Ec_g)_B \text{ sen} \alpha_{Bs} \text{ cos} \alpha_{Bs} \quad (4.18)$$

donde

K = Coeficiente empírico

α_{Bs} = Angulo de incidencia del oleaje con la batimetría de rotura

$(Ec_g)_B$ = Cantidad del flujo de energía del oleaje en rotura, y consiste del producto de la energía total del oleaje en la rotura, E_B , y de la celeridad de grupo en rotura, c_{gB}

$$E_B = \frac{1}{8} \rho g H_B^2 \quad (4.19)$$

$$c_{gB} = \sqrt{gh_B} \quad (4.20)$$

donde

H_B = Altura de la ola en rotura

h_B = Profundidad del agua en el punto de rotura

ρ = Densidad del agua

g = Aceleración de la gravedad

Tal y como se indica en la **Figura 4.4**, el ángulo de incidencia del oleaje con la batimetría de rotura α_{Bs} puede ser expresado como la diferencia entre el ángulo de cresta de la ola α_B y el ángulo de la línea de costa en el eje y α_s .

$$\alpha_{Bs} = \alpha_B - \alpha_s = \alpha_B - \tan^{-1} \left(\frac{\partial x_s}{\partial y} \right) \quad (4.21)$$

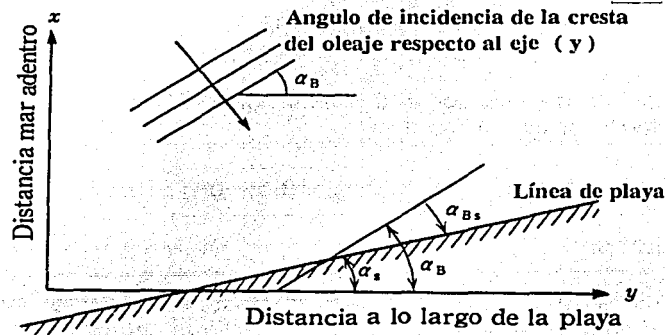


Figura 4.4. Definición de los ángulos asociados a las olas en rompente, Horikawa, 1988

El gasto del transporte longitudinal de sedimentos en peso sumergido, I , es utilizado teóricamente con el flujo incidente de la ola. Esto es debido a que el gasto del transporte longitudinal de sedimentos en peso sumergido tiene las mismas unidades (Newton/Segundo) al igual que el flujo de energía. Sin embargo, para aplicaciones ingenieriles relacionadas con el balance de sedimentos, como en el modelo de línea de costa (one line theory), el volumen de transporte longitudinal de sedimentos, Q , es requerido.

Las cantidades I y Q están relacionadas de la siguiente forma:

$$I = (\rho_s - \rho)g(1 - \lambda_v)Q \quad (4.22)$$

donde ρ_s es la densidad de los granos del sedimento y λ_v es porosidad (Vol. Sólidos/Vol. Huecos) del sedimento.

4.5.2 Gasto del transporte longitudinal de sedimentos en función de la corriente longitudinal

La relación entre el transporte de sedimentos y la velocidad de la corriente se puede encontrar en el modelo de Bagnold (1963), aplicado al transporte de sedimentos en playa. El modelo de Bagnold es:

$$I = \frac{K'(Ec_g)_B V}{u_m} \quad (4.23)$$

donde

K' = Coeficiente adimensional empírico. Korman & Inman (1970) propusieron un valor de 0.28 y Kraus et. al (1982) propusieron un valor de 0.21

V = Valor representativo de la velocidad de la corriente longitudinal en la zona de rompiente

u_m = Valor máximo de la velocidad orbital horizontal debida a oleaje en la línea de rotura; dado por teoría lineal:

$$u_m = 0.5\gamma\sqrt{gh_B} \quad (4.24)$$

γ = Índice de rotura

Así mismo, Kraus et al, (1982) también demostraron que el gasto del transporte longitudinal de sedimentos en volumen se puede estimar como:

$$Q = 0.024H_B^2 V \quad (4.25)$$

4.5.3 Fórmulas para el transporte longitudinal en el caso de variaciones longitudinales de la altura de la ola en rotura

Ozasa & Brampton (1980) combinaron la ecuación (4.23) con el modelo de corriente longitudinal de Bakker (1971) para obtener una expresión predictiva para el gasto del transporte longitudinal de sedimento que incluía la incidencia oblicua como la variación

longitudinal de la altura de la ola. Esta última contribución es importante para zonas de difracción.

Kraus & Harikai (1983) parametrizaron la fórmula transporte de Ozasa & Brampton (1980) y la aplicaron exitosamente en el modelo de cambio de línea de costa detrás del rompeolas en Oarai, Japón. La expresión predictiva de Ozasa & Brampton para el gasto del transporte longitudinal

$$I = (E_{cg})_B \left(K_1 \operatorname{sen} \alpha_{Bs} \cos \alpha_{Bs} - \frac{K_2}{\tan \beta} \cos \alpha_{Bs} \frac{\partial H_B}{\partial y} \right) \quad (4.26)$$

donde

K_1 y K_2 = coeficientes empíricos (parámetros de transporte de sedimento)

$\tan \beta$ = promedio de la pendiente de la playa en la zona de rompiente

Posteriormente, relacionaron las ecuaciones (4.23) y (4.26) obteniendo como resultado la siguiente expresión:

$$Q = (H^2 c_g)_B \left(\overline{K}_1 \operatorname{sen} 2\alpha_{Bs} - \overline{K}_2 \cos \alpha_{Bs} \frac{\partial H_B}{\partial y} \right) \quad (4.27)$$

donde los coeficientes adimensionales K_1 y K_2 son:

$$\overline{K}_1 = \frac{0.0262 K_1}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \lambda_v)} \quad (4.28)$$

$$\overline{K}_2 = \frac{0.0524 K_2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \lambda_v) \tan \beta} \quad (4.29)$$

K_1 puede tomar el valor propuesto en la ecuación (4.23), $K_1' = 0.28$ ó el de 0.58 de CERC, fórmula basada en el Shore Protection Manual (1984). Mientras que para K_2 Kraus & Harikai (1983) proponen rangos para la siguiente relación:

$$0.5 < \frac{K_1}{K_2} < 1.5$$

4.6 Valores numéricos de los coeficientes de transporte de sedimento K_1 y K_2

Como se mencionó anteriormente, el modelo numérico "one line theory", está fundamentado en la ecuación de continuidad del sedimento y en la ecuación para el transporte longitudinal de sedimentos. Así mismo, la ecuación de transporte longitudinal, ecuación (4.27), es dependiente de los parámetros de transporte de sedimento, K_1 y K_2 , la practicidad del modelo estriba en la correcta elección de estos parámetros.

Para simular, y posteriormente predecir la evolución con un buen grado de precisión de cualquier zona, es indispensable ajustar estos parámetros, es decir, cada playa tiene inherentes los parámetros y por tanto, es responsabilidad del usuario la elección de los parámetros, esto conlleva a obtener resultados fiables.

Existen formulaciones del parámetro K_1 donde se propone como constante, como función de la pendiente de la playa y/o del tamaño del sedimento. Por otro lado, para el parámetro K_2 existen expresiones que son funciones de la pendiente de la playa, del tamaño del grano y/o de la altura de la ola.

Debido a la magnitud de las suposiciones que se utilizan en los modelos de oleaje y de línea de costa y a la poca exactitud de las actuales formulaciones predictivas del transporte longitudinal de sedimentos (± 50 % de error), es aconsejable tratar a K_1 y K_2 como parámetros específicos de cada prototipo, que deben ser determinados para la calibración del modelo de línea de costa.

El parámetro de transporte K_1 se ajusta normalmente primero, para obtener la escala apropiada de tiempos, ajustándose posteriormente el parámetro K_2 de manera que se acuerden las líneas de costa calculadas con las observadas en las áreas de difracción predominante.

4.7 Criterios teóricos para K_1 y K_2

A continuación se exponen algunos de los principales criterios teóricos para determinar los valores de los coeficientes de transporte de sedimento K_1 y K_2 . Estos criterios proponen a los parámetros como constantes o como función del tamaño del sedimento, de la pendiente de la playa y/o del peralte de la ola.

Se consideran como una aproximación, sin embargo, no se recomienda tomar estos valores como definitivos en el modelo para predecir la evolución de la línea de costa.

4.7.1 Cálculo del coeficiente de transporte de sedimento K_1

Se tiene por un lado la propuesta de Komar & Inman, (1970), que dan un valor constante $K_1 = 0.77$. Por otro lado, Longuett Higgins, (1970), lo propone en función de la pendiente de la playa β y del coeficiente de fricción, C_f , con la siguiente ecuación:

$$K_1 = 0.55 \frac{\tan \beta}{C_f} \quad (4.30)$$

Algunos autores como Bruno (1980), Dean (1982) y San Roman (1996), han desarrollado sus propias curvas de calibración para estos valores en función del diámetro del sedimento de la arena de playa, D_{50} , tal como se muestra en las siguientes gráficas:

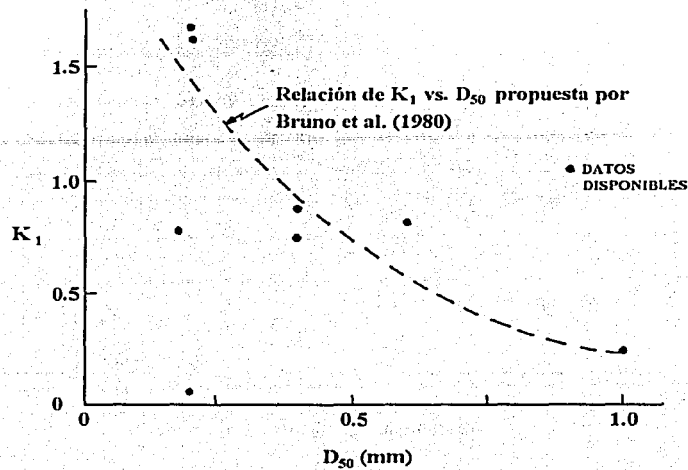


Figura 4.5. Gráfica propuesta por Bruno et al, 1980. K_1 vs. diámetro del sedimento, D_{50}

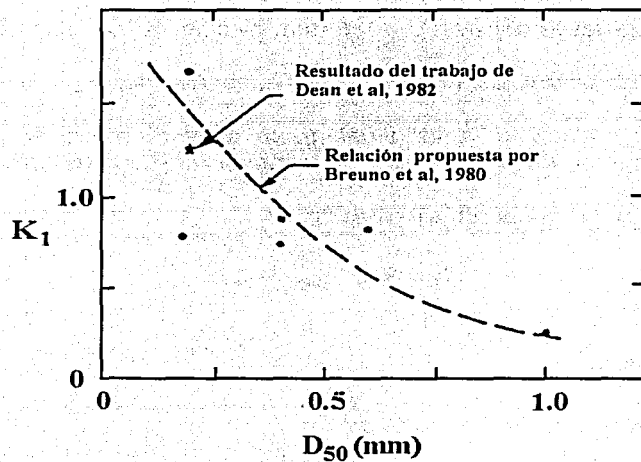


Figura 4.6. Gráfica propuesta por Dan et al, 1982. K_1 vs. diámetro del sedimento, D_{50}

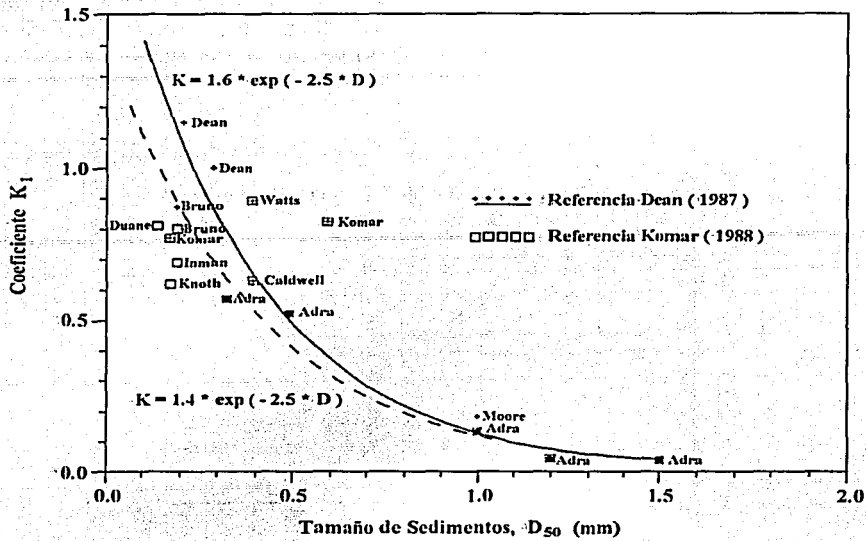


Figura 4.7. Dependencia de K_1 con el diámetro del sedimento, D_{50} , López de San Roman,1996 Valle, Medina y Losada (1993), tras estudiar el delta del Adra en España, donde se tienen diferentes tamaños de grano, llegan a las siguientes conclusiones:

- Para granos gruesos o grava, $D_{50} > 0.5$ mm, K_1 disminuye al aumentar el D_{50}
- Para granos no cohesivos, $D_{50} > 0.6$ mm, K_1 depende del D_{50} .

La dependencia de K_1 con el tamaño del grano es evidente si se plantea que dicho parámetro es una medida de la capacidad de transporte de una determinada corriente.

Kamphuis et al (1982), propusieron la expresión:

$$K_1 = 2m_K \sqrt{\gamma_B} \tag{4.31}$$

donde

γ_B = índice de rotura

m_K = pendiente móvil del lecho, dada por

$$m_K = 1.5 \sqrt{D_{50} / H_B} \tag{4.32}$$

H_B = altura de ola en rotura

El mismo Kamphuis et al, 1986, después de realizar un análisis dimensional, presenta la siguiente expresión:

$$K_1 = 0.004 \left(\frac{H_{BS} m_K}{D_{50}} \right) \quad (4.33)$$

donde H_{BS} es la altura de ola en rotura con la batimetría.

Se puede concluir que el parámetro K_1 es función tanto del tamaño del sedimento como de la pendiente de la playa, ya que en realidad la altura de la ola, pendiente y tamaño del grano están relacionados por la ecuación (4.32).

4.7.2 Cálculo del coeficiente de transporte de sedimento K_2

López de San Román (1996), propone la siguiente expresión, como una función de la ecuación (4.33). Esta expresión es función de la pendiente de la playa y del tamaño del grano:

$$K_2 = \beta \frac{m_K^2}{D_{50}} \quad (4.34)$$

donde β es una constante.

López de San Román (1996), también propone una expresión inversamente proporcional a la altura de la ola:

$$K_2 = \frac{\delta}{H} \quad (4.35)$$

donde δ es una constante.

4.8 Soluciones numéricas a la ecuación de continuidad del sedimento

La ecuación de conservación del sedimento (4.16) es una ecuación no lineal en la coordenada x_s debido al ángulo α_{BS} . Por tanto, Q_s es dependiente de x_s . Si se hacen simplificaciones en las condiciones de oleaje, ángulos de incidencias y condiciones de contorno, es probable que el uso de un modelo no sea necesario para la solución numérica de la línea de costa.

Estas soluciones "cerradas" aportan un mejor conocimiento del problema general de la evolución en planta de las playas. Sin embargo, para aplicaciones ingenieriles, las aplicaciones numéricas permiten soluciones que incluyen condiciones reales de oleaje, de contorno e interacción entre la playa y el oleaje.

La ecuación (4.16), se presenta en forma de diferencias utilizando una malla en escalones en la que las variables (x_s ; q) y Q , se definen alternativamente en celdas de la malla, tal como se indica en la Figura 4.8. El número de celda se denota por i .

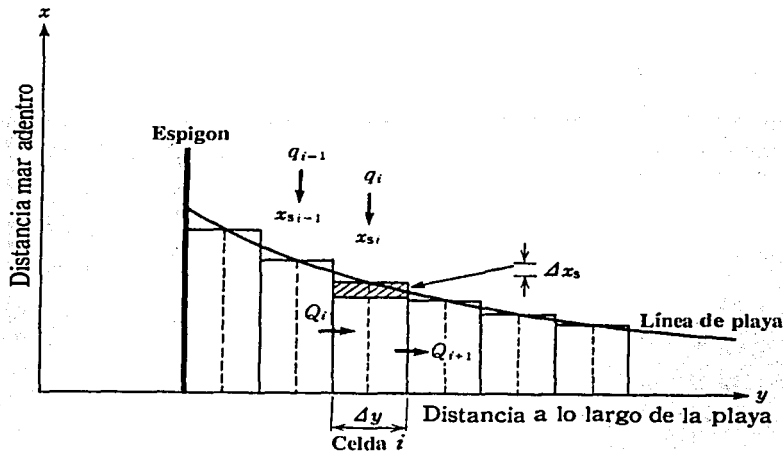


Figura 4.8. Representación de la posición de la línea de playa y de los gastos en diferencias finitas, Horikawa, 1988

El gasto longitudinal de sedimento en volumen, Q , se define por rectángulos de ancho constante, Δy , en donde la línea de costa queda definida en el centro de cada rectángulo o celda, $\Delta y/2$.

Una cantidad en el siguiente paso, queda denotado por ($'$), de tal forma que una cantidad sin ($'$), expresa la etapa en tiempo presente. De esta forma, integrando la ecuación (4.16) desde el intervalo t a $t + \Delta t$, se tiene la siguiente expresión:

$$x'_{si} = x_{si} + \Delta t \left[\lambda \left(\frac{\partial x_s}{\partial t} \right)_i + (1 - \lambda) \left(\frac{\partial x_s}{\partial t} \right)_i \right] \quad (4.36)$$

donde

x_{si} = distancia mar adentro de la línea de costa en la celda i

Δt = paso del tiempo

λ = parámetro relacionado con el esquema de solución numérico ($0 \leq \lambda \leq 1$)

Las derivadas con respecto al tiempo en la ecuación anterior se obtienen de la siguiente forma:

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t}\right)_i = -\frac{1}{D_s} \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta y} - q_i \right) \quad (4.37)$$

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t}\right)_i' = -\frac{1}{D_s} \left(\frac{Q_{i+1}' - Q_i'}{\Delta y} - q_i' \right) \quad (4.38)$$

Si en la ecuación (4.36) se propone un valor de $\lambda = 1$, la posición de la línea de costa en el siguiente paso de tiempo, x_s' , se plantea sólo en función de la situación anterior, expresándose en forma de diferencias finitas:

$$x_{si}' = x_{si} + \frac{\Delta t}{D_s \Delta y} (Q_i - Q_{i+1} + \Delta y Q_i) \quad (4.39)$$

Es decir, esta ecuación se utiliza una vez que se han obtenidos los gastos por celdas para calcular la nueva posición de la línea de costa. En el modelo, las posiciones en las que se evalúa la línea de costa son fijas, una vez que se ha dispuesto la malla; esto fija la anchura de cada celda de la malla, Δy . El paso de tiempo, Δt , queda a la libre decisión del modelador. Un paso de tiempo grande reduce el número de iteraciones y por ello el tiempo de cálculo, a costa de la precisión del modelo. Normalmente se utilizan pasos de tiempo de 6 a 24 horas. Este método explícito es sencillo de programar, más rápido y más simple en la imposición de condiciones de contorno.

4.9 Condiciones de contorno y límites de movimiento de la línea de costa

Después de iniciar el cálculo de la línea de costa, se deben especificar las condiciones de contorno, tanto para el gasto del transporte de sedimentos en ambos extremos de la malla de cálculo como para la posición de la línea de costa.

Estas condiciones pueden ser constantes o pueden variar con el tiempo, esto es, las condiciones de contorno pueden estar en función de las condiciones del oleaje y de la posición de la línea de costa. Adicionalmente, algunas veces es necesario imponer limitantes al cálculo del transporte de sedimentos. Un ejemplo importante de límite son los muros de defensa, la línea de costa no puede moverse hacia tierra más allá de la posición del muro como se puede observar en la **Figura 4.9**.

Ejemplos de condiciones de contorno:

- ◆ Espigón impermeable sin trasvase (paso de sedimento por su extremo).- En este caso, la estructura evita el transporte longitudinal a través y por su extremo, por tanto, el gasto de transporte en el espigón, Q_e , es cero.

- Espigón impermeable con trasvase.- Una cierta cantidad de sedimentos pasa por el extremo del espigón. La cantidad que pasa depende de la distribución del gasto del transporte de sedimentos a lo ancho de la zona de rompientes y de otros factores complejos, como pueden ser la distribución horizontal de las corrientes en las proximidades de la estructura y la pendiente de la playa.
- Playa fija (línea de costa fija).- La posición de la línea de costa no se mueve al transcurrir el tiempo. A esta condición en ocasiones se le denomina "playa natural" ya que las playas naturales lejos de estructuras permanecen equilibrio a largo plazo.
- Playa libre.- Esta condición especifica la posición del punto de contorno mediante valores en los puntos internos de la malla

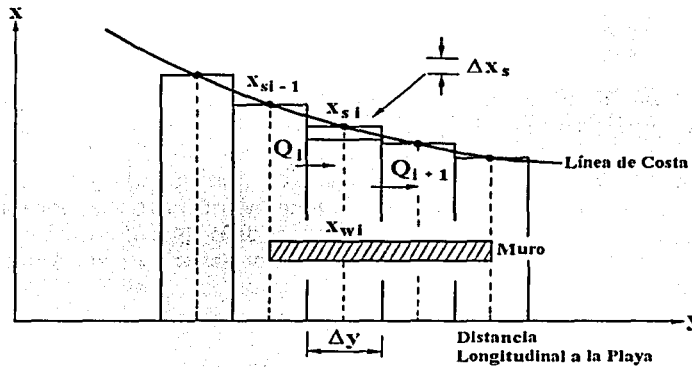


Figura 4.9. Representación de un muro costero, Horikawa, 1988

4.10 Extensión del modelo OLT a dos líneas de costa

El modelo de dos líneas de costa es un modelo que se basa en el one line theory (modelo de una línea de costa) más el cálculo de la batimetría del perfil de la playa. El cálculo de la configuración del fondo marino se realiza por medio del perfil de Dean (1977) como se explicó en el capítulo 3 del presente trabajo. Dean después de realizar diversos análisis en diferentes perfiles de playa ajustó la expresión en mínimos cuadrados para el cálculo de perfiles con la siguiente ecuación:

$$h = A x^{2/3} \quad (4.40)$$

donde A está entre el rango de $0.0025 < A < 6.31$

De esta forma es posible estimar la evolución del fondo marino para una línea de costa dada.

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DEL MODELO EN DOS DIMENSIONES

5. APLICACIÓN DEL MODELO EN DOS DIMENSIONES

5.1 Introducción

La fuerza del agua ha tenido desde tiempos antiguos una aplicación energética. Testigo de ello son los innumerables molinos que se fueron construyendo a orillas de los ríos a lo largo de la historia. Más tarde, se empezó a utilizar la energía del agua para generar electricidad.



Figura 5.1. Molinos hidráulicos

La generación de energía eléctrica en México se inició a finales del siglo XIX. En un principio la energía eléctrica se usó en la producción, esencialmente de las industrias textil, minera y, marginalmente, en la iluminación. Las plantas generadoras que servían a las fábricas y minas en las que fueron instaladas extendieron sus redes de distribución donde encontraron mercados laterales atractivos como el comercio, el alumbrado público y los servicios residenciales de las familias con mayor capacidad económica.

Actualmente, la capacidad instalada en el país es de 36 659.34 Mw, de los cuales 61.28% corresponde a generación termoeléctrica, 25.61% a hidroeléctrica, 7.09% a centrales carboeléctricas, 2.29% a geotérmica, 3.72% a nucleoeeléctrica y 0.01% a eoloeléctrica.

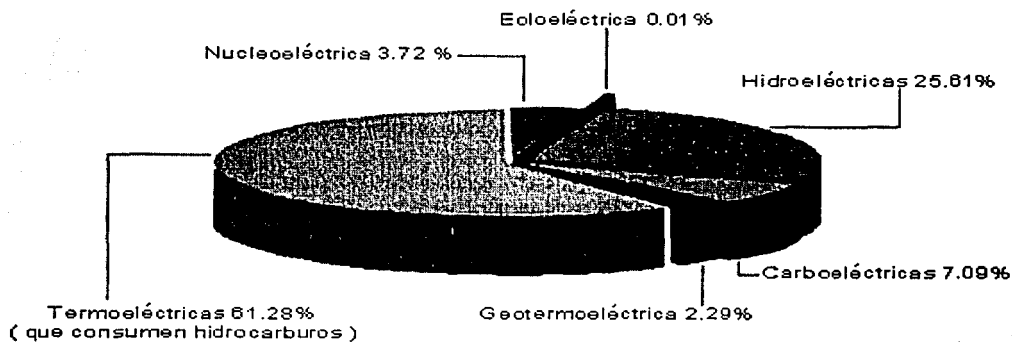


Figura 5.2. Capacidad efectiva instalada de generación

En la **Figura 5.2** se puede observar que las principales formas de generación de energía eléctrica son por plantas hidroeléctricas y termoeléctricas. Debido a sus principios y funcionamientos, las centrales termoeléctricas requieren de sistemas especiales de enfriamiento de los condensadores. Este proceso se lleva a cabo con grandes volúmenes de agua y es por esta razón que el lugar más adecuado para ubicar la construcción de una planta termoeléctrica es la zona costera.

El agua que se ingresa y utiliza en una central termoeléctrica debe contener la menor cantidad de sedimentos, para lo cual normalmente se construyen obras de toma. Éstas consisten en estructuras marítimas como escolleras y rompeolas que permiten que exista una zona en donde los efectos del oleaje disminuyan y donde la velocidad del agua permita una decantación del sedimento en el canal de llamada.

No obstante, las estructuras marítimas que se construyen para tomas de agua alteran significativamente el equilibrio dinámico de la playa, de tal forma que la línea de costa situada inmediatamente, se ve afectada de un lado debido a la acumulación de material y por el otro a un retroceso del mismo dando lugar a un proceso erosivo.

Es por esta razón que uno de los aspectos principales en las zonas de litoral es el cambio en la línea de costa causado por la presencia de estructuras.

5.2 Modelo de una línea de costa (One Line Theory)

Como se mencionó en el capítulo anterior, el modelo de una línea de costa es un modelo numérico de predicción. Diversos equipos y centros de investigación se han dado a la tarea de representar en forma matemática este problema, y con ayuda de las computadoras, modelarlo.

Para la realización del presente trabajo se utilizó el modelo GENESIS (por su siglas en inglés: Generalized Model for Simulating Shoreline Change; Hanson, 1987) fue desarrollado por la armada de Estados Unidos para simular el cambio de la línea de costa.

La principal utilidad del GENESIS es que tiene la capacidad de simular la respuesta de una playa ante la presencia de estructuras y cambios en las condiciones oceanográficas. Combinaciones y configuraciones arbitrarias de estructuras (espigones, rompeolas y muros), extracciones y aportaciones de arena pueden ser representadas en un tramo modelado de costa.

Este modelo ha sido diseñado para describir tendencias a largo plazo en la forma en planta de la playa en un tramo, hasta llegar a un equilibrio bajo las condiciones de oleaje imperantes, configuración de estructuras costeras y otros parámetros de entrada.

El GENESIS no es aplicable para calcular la evolución de la línea de costa en las siguientes situaciones:

- Cambio en la playa dentro de un estuario o en áreas dominadas por el flujo de marea
- Cambios en la playa ocasionados por corrientes producidas por el viento
- Erosión en la playa ocasionado por tormentas, en las cuales, el proceso de cruzado de transporte de sedimento es dominante
- Socavación en estructuras

5.3 Metodología a seguir para el cálculo

El modelo en dos dimensiones es un modelo que describe por un lado el cambio de la línea de costa y por el otro lado, la configuración del fondo marino o perfil de la playa. La metodología que sigue el modelo para calcular la nueva posición de la línea de costa y la estimación del perfil de playa son:

- Recolectar y analizar los datos de olas y perfiles de playa
- Establecer las condiciones iniciales y de frontera como lo son la línea de costa, la batimetría, la altura de la ola incidente y la dirección del oleaje de la zona de donde se vaya a realizar el estudio
- Estimar la reflexión, la refracción y el someramiento
- Una vez calculados los coeficientes de reflexión, refracción y someramiento, determinar la altura y dirección de la ola en el punto de rotura a lo largo de la línea de costa la cual se compara con la ecuación empírica para el cálculo de la altura de rompiente
- Calcular el gasto del transporte longitudinal del sedimento por celdas donde se utiliza la posición precedente de línea de costa para calcular la nueva posición
- Evaluar la nueva posición de la línea de costa por diferencias finitas
- Finalmente se estima la configuración del fondo marino

En la **Figura 5.3** se muestra un diagrama de flujo en donde se resume de forma gráfica la metodología previamente descrita.

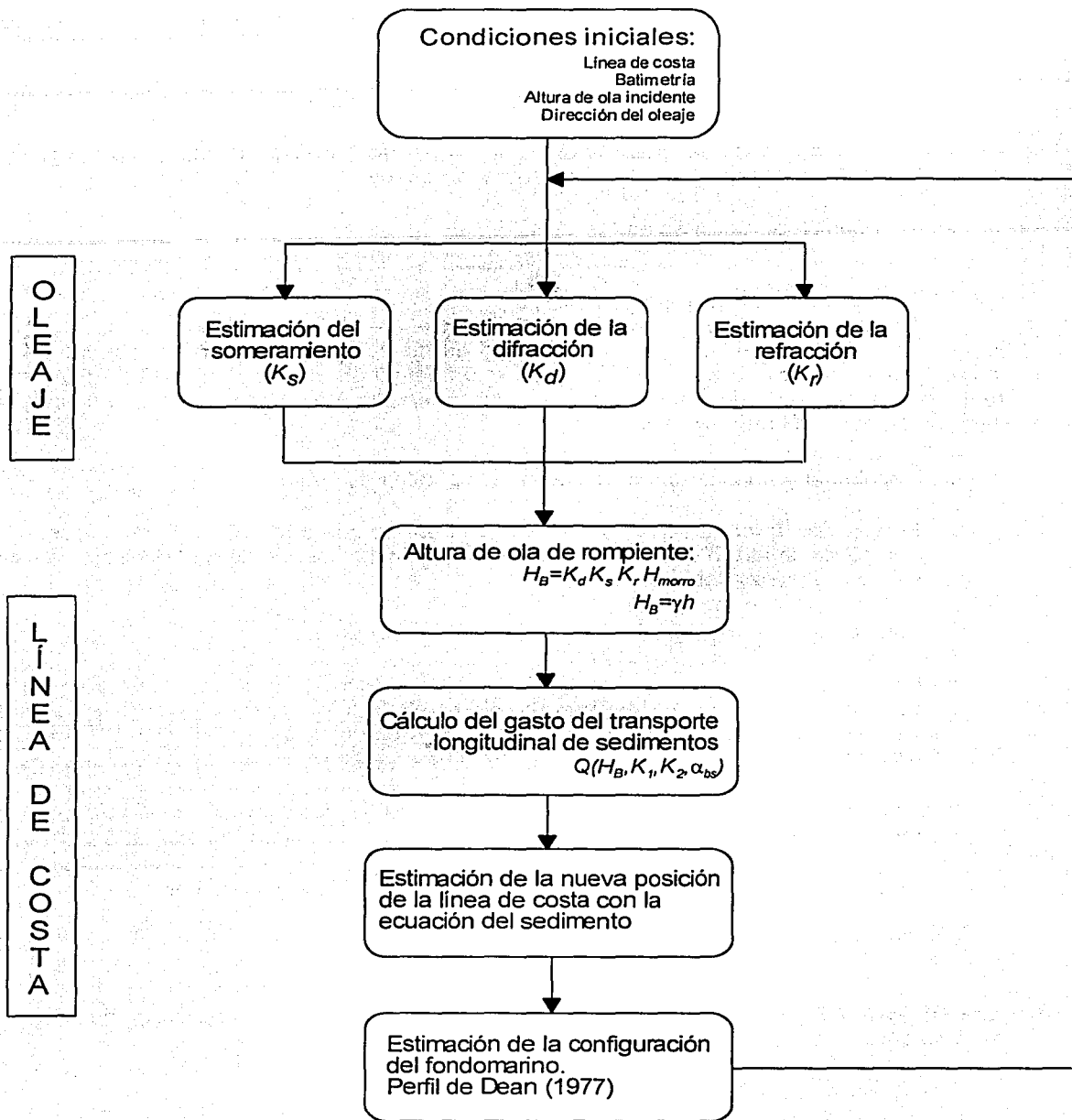


Figura 5.3. Diagrama de flujo del modelo en dos dimensiones

5.4 Caso de Estudio Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos

El caso de estudio donde se realizó la aplicación del modelo en dos dimensiones fue la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, ubicada en la ciudad de Tuxpan, Veracruz. Ésta se localiza a 5 km al Norte de la desembocadura del río Tuxpan, en los 21°03' de latitud Norte y en los 97°24' de longitud Oeste. La central termoeléctrica inició sus actividades de generación de energía eléctrica en septiembre de 1989, con cuatro unidades de 350 Mw de capacidad y con un gasto total de 60 m³/s para el sistema de enfriamiento.

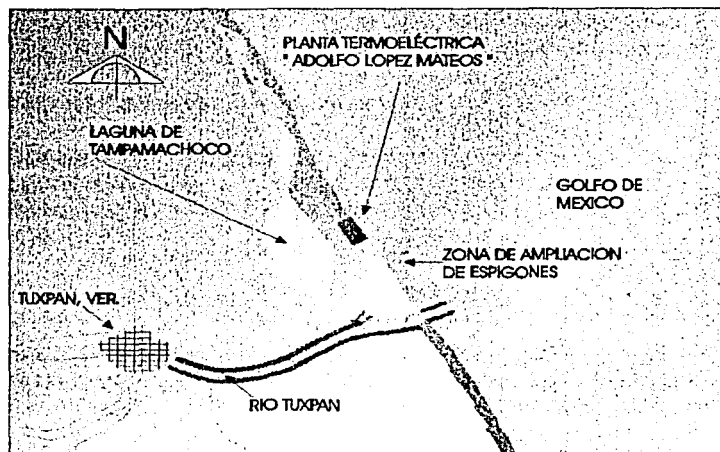


Figura 5.4. Mapa de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos

A la fecha, su capacidad de generación se incrementó a 2 100 Mw, con lo cual el volumen de agua requerido en el proceso de enfriamiento de los condensadores aumentó a 120 m³/s. El agua para el sistema de enfriamiento se deriva directamente del Golfo de México, a través de una obra de toma superficial constituida originalmente de dos escolleras perpendiculares a la costa; la norte, con 615 m de longitud, con el cuerpo de Oeste a Este y el bastón orientado hacia el SSE, y la Sur, paralela a la Norte con 440 m de longitud, el ancho del canal de llamada mide aproximadamente 120 m y tiene una cota de desplante de 4.5 m. En el año de 1995 se construyó una tercera escollera con la finalidad de incrementar la capacidad total instalada, la cual está ubicada paralela a las otras escolleras al Sur de las mismas. A este se le llamó la escollera Sur - Sur con 440 m de longitud.

La presencia de estas escolleras ha alterado sensiblemente el equilibrio dinámico en que se encontraba la playa antes de 1989, de tal manera que al Norte de la obra de toma se presenta un azolvamiento progresivo, en tanto que la playa ubicada al Sur ha sufrido un proceso erosivo desde diciembre de 1989. Adicionalmente, dentro de la obra de toma de las unidades, se han llegado a depositar 70 000 m³ de arena por el proceso combinado del transporte de sedimentos por oleaje y corrientes, y el transporte eólico. Es por ello, que para garantizar el correcto funcionamiento de la obra, es necesario dragar aproximadamente 40 000 m³ de arena anuales, teniendo como consecuencia incrementos en los costos por mantenimiento.

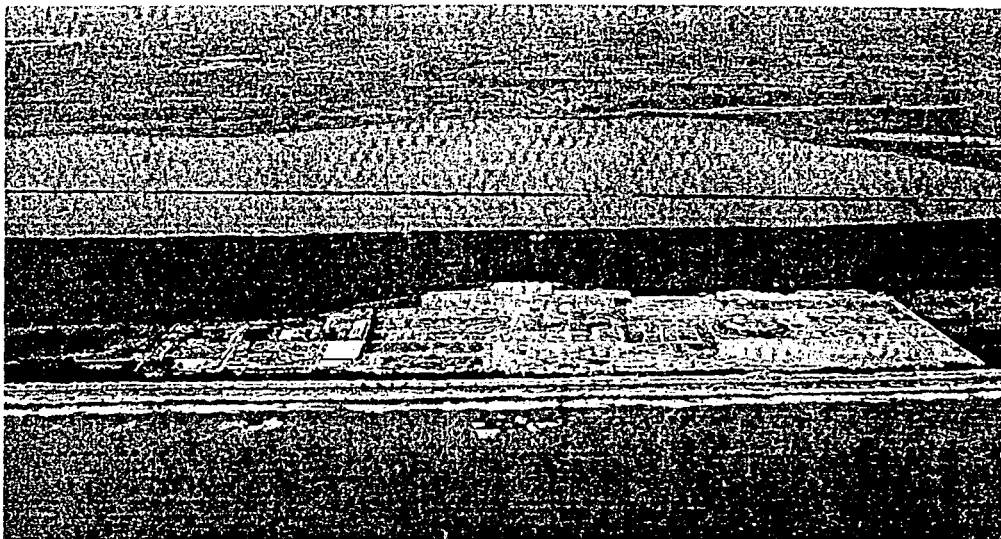


Figura 5.5. Vista Este-Oeste de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, en donde se observa que no se ha iniciado la construcción de las escolleras, por lo que la línea de costa se encuentra en equilibrio dinámico. Octubre, 1986.



Figura 5.6. Vista Sur-Norte de la zona de escolleras de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos. Marzo, 1988.

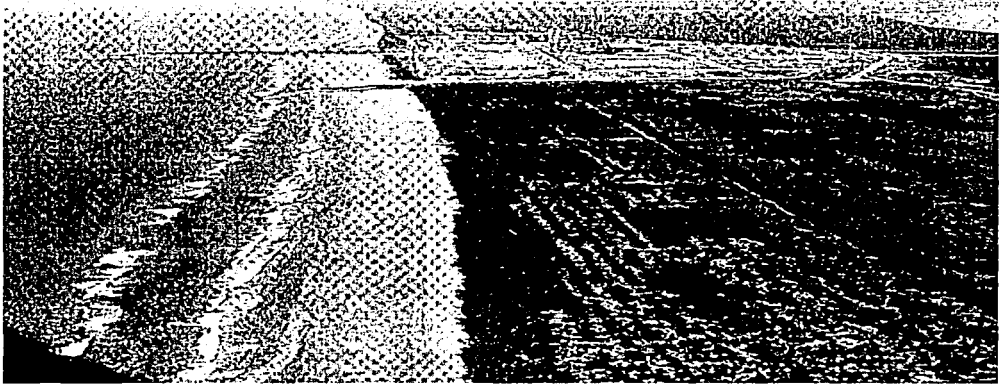


Figura 5.7. Panorámica de la Central Adolfo López Mateos, vista de Norte-Sur. Se observa la erosión en la línea de costa en la playa Sur, así como la acreción de la playa Norte. Abril, 1990.

5.5 Zona de estudio

La zona de estudio comprende una longitud de 6 500 m, medidos a partir de la escollera en la desembocadura del río Tuxpan hasta 1 100 m al Norte de la escollera Norte. Estos límites se impusieron ya que en esta zona se cuenta con datos completos de la línea de costa proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad.

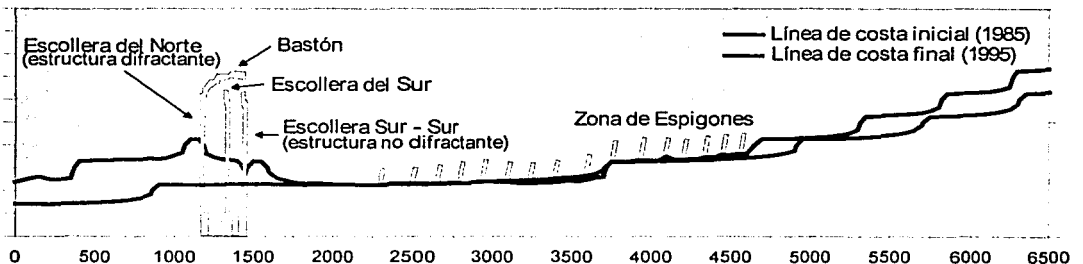


Figura 5.8. Croquis actual de las estructuras que define la zona de estudio de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos. Se observa las tres escolleras y el bastón que cubren la obra de toma, así como la zona de espigones al Sur de la línea de costa.

Dado que los datos que se tienen registrados para el fondo marino sólo comprende una región delimitada por 3000 m a lo largo de la línea de costa, 1500 m hacia el Norte de la Escollera del Norte y a 1500 m al Sur de la Escollera Sur – Sur, y 1500 m mar adentro, la comparación que se realizará entre la modelación con los datos obtenidos del modelo sólo serán para esta zona en particular.

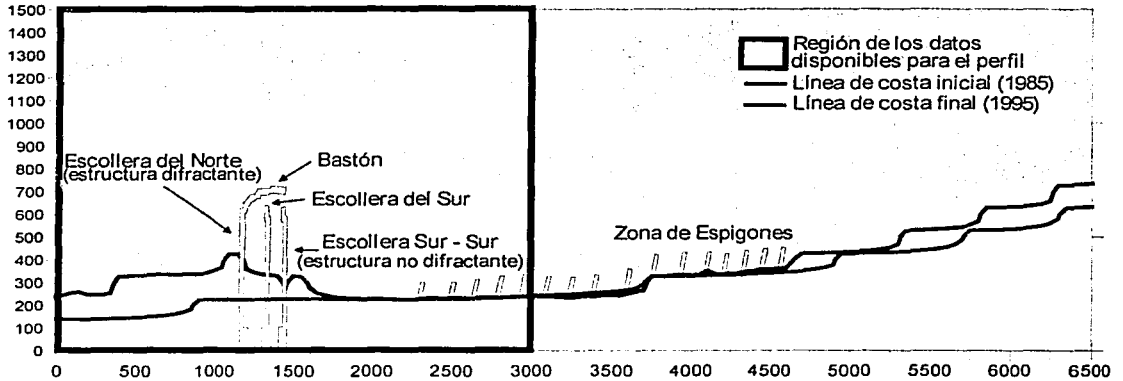


Figura 5.9. Delimitación de la región de los datos disponibles de la batimetría enfrente de la Termoeléctrica Adolfo López Mateos

5.6 Análisis de la problemática de la Central Termoeléctrica

En el Golfo de México la magnitud del transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa puede ocasionar que tanto puertos como otras obras marítimas provoquen erosión o acreción modificando la morfología del litoral mexicano en zonas de interés.

Consecuentemente, cuando se construyen obras de protección en la costa, como lo son las escolleras de las obras de toma de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, éstas interrumpen el transporte litoral modificando el equilibrio de las playas adyacentes a las estructuras. El porcentaje de litoral atrapado por estas estructuras depende de la longitud de las mismas. Entre más largas éstas sean, como en el caso de los accesos a puertos o de canales de navegación, mayor es el porcentaje atrapado. Esto se debe a que la distancia de penetración de un rompeolas y sus extremos alcanzan mayores profundidades.

La evolución costera en el entorno de la Central Termoeléctrica es muy compleja, ya que el frente playero se ha visto alterado por la construcción de las escolleras de la toma y la descarga en su primera y segunda fase, y el tendido de las monoboyas por parte de PEMEX han ocasionado el avance de la playa al Norte y un retroceso en la playa al Sur de la termoeléctrica

En cuanto a los problemas de sedimentación en la termoeléctrica, ésta se ve perturbada por el efecto combinado del transporte de sedimentos por oleaje y corrientes, la succión del gasto de enfriamiento, el transporte eólico y las aportaciones de material muy fino proveniente de la descarga del río Tuxpan, ubicado a 4 500 m al Sur de la central.

Por otra parte, como se ha mencionado anteriormente, el mantenimiento de la central tiende a ser costoso debido a la cantidad de material que se debe dragar anualmente. Sin embargo, para asegurar un óptimo funcionamiento de la central, es necesario tener un eficiente sistema de enfriamiento. Es por esta razón que los trabajos de dragados de las obras de toma deben ser programados de tal forma que la sedimentación del canal de llamada sea fácil de controlar a lo largo y a lo ancho de ellos.

Con la finalidad de disminuir el proceso erosivo en la parte Sur de la playa, así como salva guardar una serie de instalaciones de PEMEX, la protección playera está constituida por una batería de 16 espigones esviados 70° con respecto a la línea de costa y separados 100 m entre sí, con una longitud promedio de 50 m. Para acelerar el proceso de recuperación de la franja playera, se depositó en la zona de espigones el material dragado en la obra de toma.

5.7 Condiciones iniciales de la Central Termoeléctrica

Para poder realizar la simulación, como primer paso se hizo la recopilación y análisis de los datos disponibles tanto para la línea de costa como para el perfil de playa de la zona de estudio.

Se encontraron datos de línea de costas que Comisión Federal de Electricidad realiza anualmente y estudios previos hechos por Silva et. al. (1997) de todos los perfiles de la zona.

De los datos se encontró que la profundidad de cierre del perfil de playa es de -5.25 m y se ubica a 1830 m mar adentro. También existen diversas variaciones de los perfiles debido a que la incidencia del oleaje y la dirección del viento cambian según las estaciones del año. Los datos del oleaje que se obtuvieron fueron los siguientes:

Estación	Altura de la ola H (m)	Periodo T (s)	Dirección de oleaje α ($^\circ$)
Primavera	0.5527	6.5	5
Verano	0.5772	5.5	5
Otoño	0.4595	6.5	5
Invierno	0.6336	6.5	28

Tabla 5.1. Datos de oleaje para cada estación del año con la altura de la ola, el periodo y la dirección del oleaje

Por otra parte, se halló que el diámetro representativo del sedimento en la zona, D_{50} , está del orden de 0.2 mm. Así mismo se obtuvieron los datos de la línea de costa y perfil de playa de 1985 y 1995 para poder realizar las simulaciones.

En la **Figura 5.10** se puede observar la línea de costa inicial medida antes de colocar las estructuras de protección para la obra de toma de la Central Termoeléctrica.

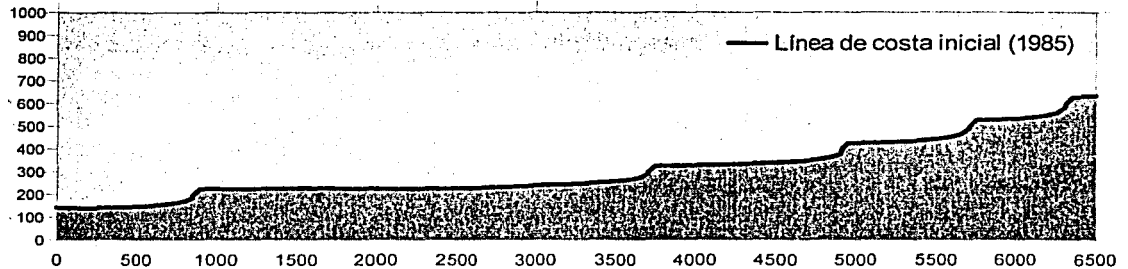


Figura 5.10. Línea de costa inicial medida por Comisión Federal de Electricidad en 1985

De igual forma, en la **Figura 5.11** se observan las estructuras para abrigo de las obras de toma después de haber sido colocados, así como los espigones que resguardan las instalaciones de PEMEX en esa zona. Estos datos son importantes para poder hacer la comparación con los que se obtengan una vez que se hallan hecho las corridas con el GENESIS y con el modelo para el cálculo del perfil.

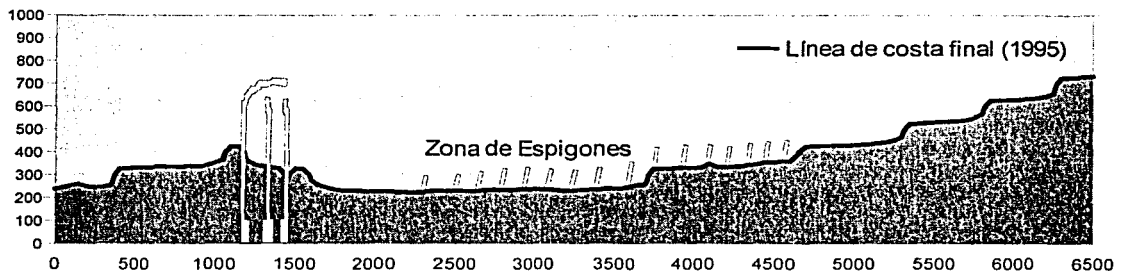


Figura 5.11. Línea de costa final medida por Comisión Federal de Electricidad en 1995 después de construidas las estructuras y los espigones para la protección de instalaciones de PEMEX

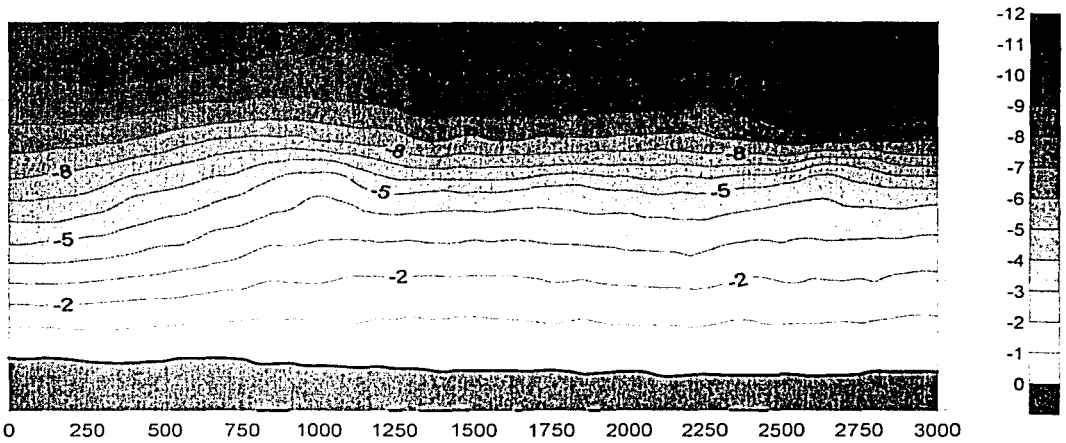


Figura 5.12. Batimetría inicial medida por personal de Comisión Federal de Electricidad en 1985

En la **Figura 5.12** anterior se aprecia tanto la línea de costa medida en 1985 como el perfil que determina la topografía del fondo marino antes de que ser construidas las obras de protección.

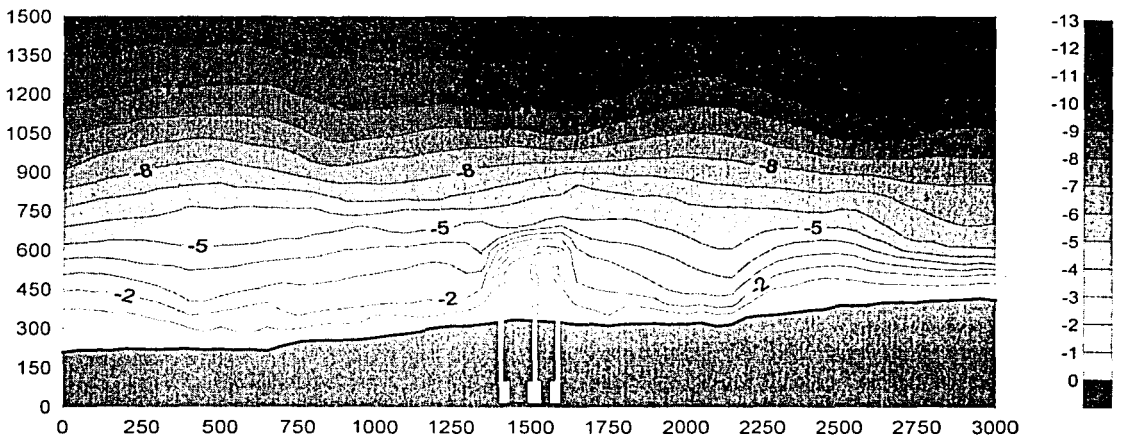


Figura 5.13. Batimetría medida por personal de Comisión Federal de Electricidad en 1995 después de haber sido colocadas las tres escolleras

La **Figura 5.13** muestra la batimetría del perfil de playa después de que fueron colocadas las estructuras de protección.

5.8 Evolución de la línea de costa y del perfil de playa

Después de realizada la recopilación de la información, se utilizó el GENESIS para estimar la evolución de la línea de costa de 1985 a 1995. Para efectuar las corridas se tuvieron que considerar los siguientes datos:

- Altura, periodo y dirección del oleaje
- La línea de costa inicial y final medidas
- El número de celdas que se obtuvieron después de dividir la línea de costa con un $\Delta x = 50$ m
- El periodo de la simulación que comprenden del 1° de enero de 1985 al 1° de junio de 1995
- Los coeficientes de calibración K_1 y K_2 , siendo estos igual a 0.45 y 0.25 respectivamente
- El valor del diámetro representativo de la arena de la zona, $D_{50} = 0.2$ mm
- El número de las estructuras no difractantes y en dónde estas se ubican tanto longitudinalmente como tranveralmente. Para este caso existen 19 estructuras no difractantes: la escollera Sur y la Sur – Sur que tienen una longitud de 660 m, así como los espigones que se encuentran al Sur de la termoeléctrica
- La estructura difractante y la profundidad en que se encuentra. En este caso se halló solo una estructura difractante: la escollera del Norte, la cual tiene una longitud de 690 m
- La permeabilidad de las estructuras que es de 0.15
- El bastón que se encuentra ubicado entre 690 y 730 m con una profundidad de 4 a 4.5 m respectivamente

En cuanto a la estimación del perfil de playa sólo se necesitan los datos iniciales y finales de la línea de costa, así como los obtenidos en la corrida del GENESIS

5.9 Resultados

De los datos obtenidos de la simulación para la evolución en la línea de costa se puede observar en la **Figura 5.14** que si se colocan tres escolleras como protección de la obra de toma de la central termoeléctrica y se modela la línea de costa durante 10 años, dicha

línea sufre una acreción o acumulación de sedimento en el lado izquierdo de la escollera del Norte y se genera una decreción en la parte derecha de la escollera Sur - Sur, este resultado muestra gran coincidencia con respecto a la línea de costa que se midió para 1995 por personal de CFE, como se muestra en la **Figura 5.15**.

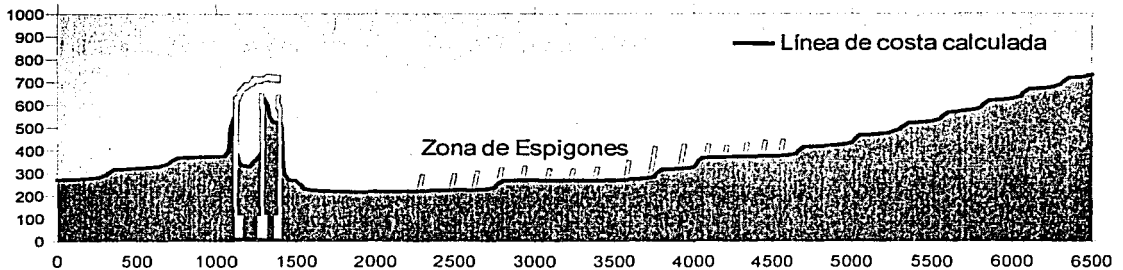


Figura 5.14. Resultado de la simulación de la línea de costa para el año de 1995

En la **Figura 5.15** se describen la línea de costa medida en 1995 por elementos de la Comisión Federal de Electricidad y la línea de costa evaluada después de realizada las corridas en el modelo. Se puede observar que ésta se ajusta muy bien a la medida y la estimación de la línea tiende a tener un error bastante pequeño. Debido a que en la simulación no se tomaron en cuenta los datos dentro del canal, el error que se presenta en la corrida es del 16.46%. Sin embargo, al realizar el cálculo del error sin considerar éstos puntos, el porcentaje de error disminuye considerablemente de tal forma que el porcentaje de error para esta simulación es del 4.13%.

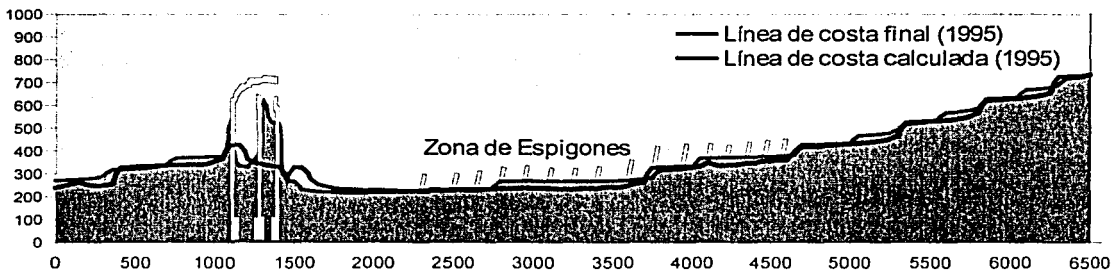


Figura 5.15. Comparación de las líneas de costa medida en 1995 por CFE y la calculada por la simulación del GENESIS

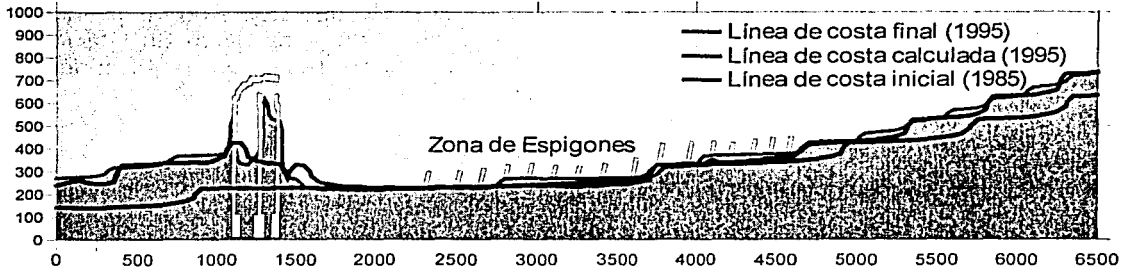


Figura 5.16. Líneas de costa inicial, final y la calculada por el modelo

En cuanto al perfil de la playa, se calcularon las batimetrías de la línea de costa inicial y final medidos por personal de CFE como se puede observar en las siguientes figuras: Figura 5.17 y Figura 5.18.

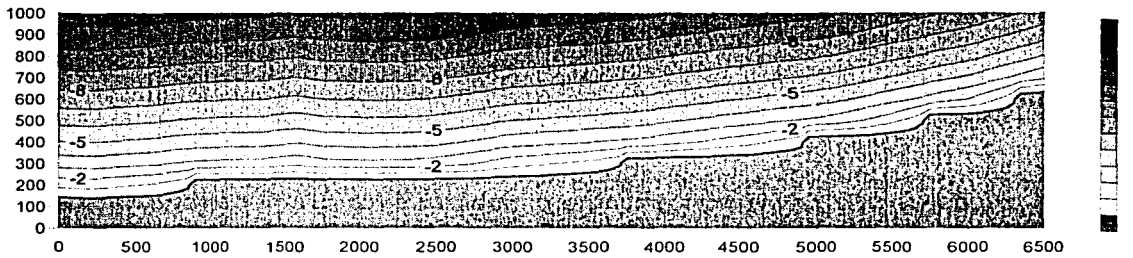


Figura 5.17. Batimetría inicial (1985) calculada por el modelo

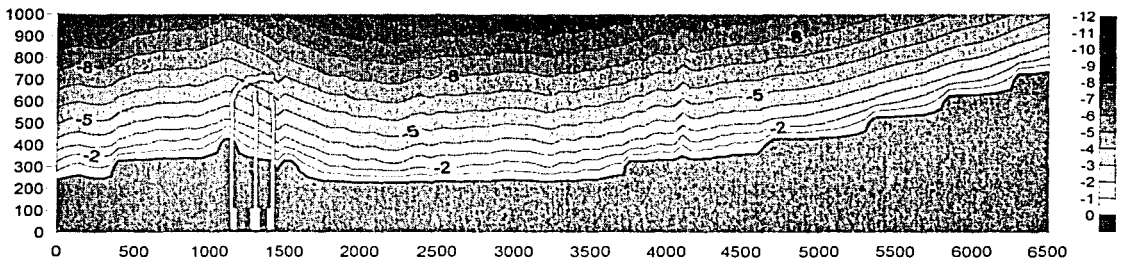


Figura 5.18. Batimetría final (1995), calculada por el modelo

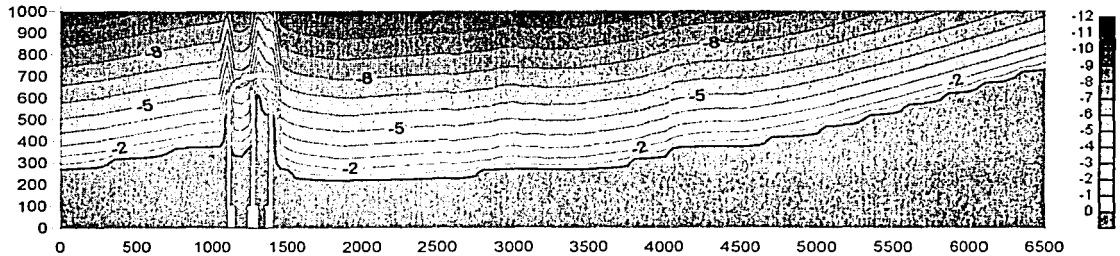


Figura 5.19. Batimetría calculada por el modelo a partir de los resultados obtenidos con la simulación del GENESIS

Al comparar las batimetrías obtenidas con las medidas por el personal de CFE (Figura 5.12 y Figura 5.13) se puede observar que el porcentaje de error que se obtiene para las condiciones iniciales no es significativo y éste se presenta dado a que en la batimetría real existe una pendiente de gran importancia que se presenta en dirección perpendicular a la línea de costa.

Cabe señalar que este error se genera directamente por las limitaciones del concepto de perfil de equilibrio, debido a que este considera dicha configuración como una condición media, es decir no toma en cuenta factores como la hidrodinámica y el transporte litoral de la zona de estudio.

En cuanto a la configuración del fondo marino se observan los siguientes aspectos, en primer término, debido a que la batimetría se genera por medio del perfil de Dean, se presenta un decaimiento acelerado de la profundidad en la zona que se ubica frente a la estructura, lo cual no sucede en la realidad, ver Figura 5.13, esto es consecuencia, como ya se ha dicho, de las limitaciones del concepto del perfil de equilibrio, dado que no se considera la hidrodinámica en esta zona.

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

- ◊ La erosión es un problema común que se presenta en las playas, ya sea debido a un proceso natural o por presencia de estructuras marítimas que interfieren en la estabilidad de las mismas. Es por esta razón que la construcción de estas estructuras originan erosión convirtiendolo en algunas ocasiones en un serio problema.
- ◊ La aplicación del modelo para la predicción del cambio en la línea de costa es práctico para evaluar la respuesta de la playa a una perturbación ingenieril o natural, como la colocación de rellenos, la construcción de un rompeolas o cualquier otro tipo de estructura. Por tanto es importante evaluar las afectaciones que este tipo de elementos producen en el movimiento y el transporte de los sedimentos a lo largo de la playa.
- ◊ El modelo propuesto estima de forma satisfactoria la evolución de la línea de costa por presencia de estructuras de protección, el error que se obtiene es muy pequeño, sin embargo cabe decir que una de las complicaciones que se tiene para su empleo es la determinación de los coeficientes de transporte de sedimento K_1 y K_2 , dado que a ecuación de continuidad es muy sensible al valor de estos coeficientes.
- ◊ Con respecto al caso de erosión en la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, durante el período de simulación se observó que la playa se está erosionando al Sur de la escollera Sur-Sur y sedimentando al Norte a la izquierda de la escollera Norte.
- ◊ Para la configuración del fondo marino, el concepto de perfil de equilibrio debe ser utilizado con reservas, dado que es muy susceptible a generar errores, consecuencia de que no incluye en el modelado del perfil de una playa la hidrodinámica de la zona y las corrientes, ambos factores son de suma importancia en la evolución de la batimetría en un sitio dado.
- ◊ Debido a que este modelo se basa en el perfil de equilibrio de Dean, éste es incapaz de describir barras y/o valles, sin embargo la obtención del perfil de la línea de costa es representativo y útil para proporcionar una buena aproximación.

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

- La erosión es un problema común que se presenta en las playas, ya sea debido a un proceso natural o por presencia de estructuras marítimas que interfieren en la estabilidad de las mismas. Es por esta razón que la construcción de estas estructuras originan erosión convirtiendolo en algunas ocasiones en un serio problema.
- La aplicación del modelo para la predicción del cambio en la línea de costa es práctico para evaluar la respuesta de la playa a una perturbación ingenieril o natural, como la colocación de rellenos, la construcción de un rompeolas o cualquier otro tipo de estructura. Por tanto es importante evaluar las afectaciones que este tipo de elementos producen en el movimiento y el transporte de los sedimentos a lo largo de la playa.
- El modelo propuesto estima de forma satisfactoria la evolución de la línea de costa por presencia de estructuras de protección, el error que se obtiene es muy pequeño, sin embargo cabe decir que una de las complicaciones que se tiene para su empleo es la determinación de los coeficientes de transporte de sedimento K_1 y K_2 , dado que a ecuación de continuidad es muy sensible al valor de estos coeficientes.
- Con respecto al caso de erosión en la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, durante el período de simulación se observó que la playa se está erosionando al Sur de la escollera Sur-Sur y sedimentando al Norte a la izquierda de la escollera Norte.
- Para la configuración del fondo marino, el concepto de perfil de equilibrio debe ser utilizado con reservas, dado que es muy susceptible a generar errores, consecuencia de que no incluye en el modelado del perfil de una playa la hidrodinámica de la zona y las corrientes, ambos factores son de suma importancia en la evolución de la batimetría en un sitio dado.
- Debido a que este modelo se basa en el perfil de equilibrio de Dean, éste es incapaz de describir barras y/o valles, sin embargo la obtención del perfil de la línea de costa es representativo y útil para proporcionar una buena aproximación.

7. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

- ◆ Optimizar el modelo numérico para poder simular cualquier tipo y cualquier posición de las estructuras costeras. Es decir, poder incluir estructuras curvas, oblicuas, incluso, diques sumergidos..
- ◆ Realizar un modelo numérico para el análisis de los perfiles y con ello describir la formación de barras y/o valles en el perfil y determinar las variaciones morfodinámicas, obteniéndose así una visión global del problema.

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

7. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

- ◆ Optimizar el modelo numérico para poder simular cualquier tipo y cualquier posición de las estructuras costeras. Es decir, poder incluir estructuras curvas, oblicuas, incluso, diques sumergidos..
- ◆ Realizar un modelo numérico para el análisis de los perfiles y con ello describir la formación de barras y/o valles en el perfil y determinar las variaciones morfodinámicas, obteniéndose así una visión global del problema.

BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Dean, R. y Dalrymple R. 1991. "Water wave mechanics for engineers and scientists." Advanced Series on Ocean Engineering, volume 2, World Scientific.
2. GENESIS. 1989. "Generalized Model For Simulating Shoreline Change" Coastal Engineering Research Center. US Army Corps of Engineers.
3. González, M. 1995. "Morfología de playas en equilibrio. Planta y Perfil" Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander, España
4. Goveare, G. 1997. "Acción del oleaje sobre estructuras marítimas no rebasables" Tesis de Maestría, UNAM, México.
5. Horikawa, H. 1988. "Nearshore Dynamics and Coastal Processes" Theory, Measurement and Predictive Models. University of Tokio Press.
6. INEGI 1999. "Información geográfica de México", www.inegi.gob.mx
7. Martínez, E. 2002. "Análisis de vulnerabilidad por presencia de huracanes en las costas del estado de Guerrero". Tesis de Licenciatura, UNAM, México.
8. Mendoza, E. 2000. "Criterios para el diseño de espaldones en rompeolas de piezas sueltas". Tesis de Licenciatura, UNAM, México
9. Mora J. M., Silva R. 1998. "Método simplificado para la predicción del cambio en la línea de costa" XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica". Oaxaca, México.
10. Mora, J. M. 1999. "Evolución espacial y temporal de la línea de playa", Instituto de Ingeniería, UNAM, México
11. Pedrozo, A. 1999. "Análisis frecuencial y temporal del oleaje". Tesis de Licenciatura, UNAM, México
12. Silva, R. 1998. "Apuntes del curso: Análisis y predicción de oleaje", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
13. Silva, R., Govaere, G. 1996. "Estudio de la evolución de la playa e hidrodinámica del transporte de sedimentos en las cercanías de la obra de toma de la Central Termoeléctrica de Tuxpan, Veracruz", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
14. Silva, R., Govaere, G., Mora J. Manuel. 1992. "Desarrollo de un sistema para el análisis y diseño de playas", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

BIBLIOGRAFÍA

15. SPM, 1984. "Shore Protection Manual" Coastal Engineering Research Center. US Army Corps of Engineers. Volume 2.
16. Uribe, R. 2000. "Caracterización del clima marítimo mexicano". Tesis de Licenciatura, UNAM, México.

ANEXO 1

INFORMACIÓN DE LOS DATOS INGRESADOS EN EL GENESIS

En el presente anexo se explican los pasos a seguir para el cálculo de la evolución de la línea de costa utilizando el GENESIS.

Archivos de entrada

Para iniciar las corridas del GENESIS, se deben ingresar los datos en los cuatro archivos de entrada:

- ◆ **START** es el archivo que contiene las instrucciones que controlan la simulación del modelo de cambio de línea de costa. Estas instrucciones incluyen: los rangos espacial y temporal de la simulación, estructuras y datos de la playa, los valores de los parámetros de calibración y los tiempos de simulación en la salida que se desean.
- ◆ **WAVES** es el archivo que contiene la información sobre oleaje que define el transporte de sedimentos y por ende el cambio en la línea de playa; estos son periodo T , altura de ola H y dirección a .
- ◆ **SHORL** es el archivo que contiene la posición inicial de la línea de costa referida a un punto base para el cálculo.
- ◆ **SHORM** es el archivo que contiene la posición de la línea de costa medida para realizar la comparación con el obtenido por el modelo.

Los otros archivos restantes **SEAWL** y **DEPTH** se utilizan en caso de que el proyecto lo requiera.

Archivos de salida

Una vez corrido los datos en el modelo, se obtienen los siguientes archivos de salida:

- ◆ **SETUP** es el archivo que contiene los datos del archivo **START**. También indica mensajes de error o de advertencia encontrados durante la simulación del modelo.
- ◆ **SHORC** es el archivo que contiene la posición de la línea de costa calculada en el intervalo de simulación en el modelo.
- ◆ **OUTPT** es el archivo que contiene la mayor información de los resultados de la simulación. Es decir, presenta los datos de la posición inicial de la línea de costa, la posición de la línea de playa para diferentes incrementos de tiempo, transporte volumétrico total, altura y ángulo con respecto al eje x de la ola en rotura, el promedio de las anturas de ola no difractadas, promedio del ángulo respecto a la línea de costa del oleaje no difractado, promedio del transporte a lo largo de la línea de costa en función del oleaje no difractado, posición de la línea de costa final calculada y el error de calibración.

Todos los datos de los archivos de entrada y de salida se pueden desplegar en pantalla utilizando cualquier editor.

Como ya se menciona el archivo **START** contiene las instrucciones que controlan la simulación del modelo de cambio de línea de costa. Los datos ingresados en este archivo se describen a continuación:

```

*****
*
*          INPUT FILE START.DAT TO GENESIS VERSION 3.0          *
*****
A----- MODEL SETUP -----A
A.1 RUN TITLE
  Adolfo López Mateos 1985 - 1995
A.2 INPUT UNITS (METERS=1; FEET=2): ICONV
  1
A.3 TOTAL NUMBER OF CALCULATION CELLS AND CELL LENGTH: NN, DX
  131  50
A.4 GRID CELL NUMBER WHERE SIMULATION STARTS AND NUMBER OF CALCULATION
  CELLS (N = -1 MEANS N = NN): ISSTART, N
  1  131
A.5 VALUE OF TIME STEP IN HOURS: DT
  12
A.6 DATE WHEN SHORELINE SIMULATION STARTS
  (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): SIMDATS
  850101
A.7 DATE WHEN SHORELINE SIMULATION ENDS OR TOTAL NUMBER OF TIME STEPS
  (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): SIMDATE
  950601
A.8 NUMBER OF INTERMEDIATE PRINT-OUTS WANTED: NOUT
  5
A.9 DATES OR TIME STEPS OF INTERMEDIATE PRINT-OUTS
  (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NOUT VALUES): TOUT(I)
  870101 890101 910101 930101 950101
A.10 NUMBER OF CALCULATION CELLS IN OFFSHORE CONTOUR SMOOTHING WINDOW
  (ISMOOTH = 0 MEANS NO SMOOTHING, ISMOOTH = N MEANS STRAIGHT LINE.
  RECOMMENDED DEFAULT VALUE = 11): ISMOOTH
  11
A.11 REPEATED WARNING MESSAGES (YES=1; NO=0): IRWM
  0
A.12 LONGSHORE SAND TRANSPORT CALIBRATION COEFFICIENTS: K1, K2
  0.45  0.25
A.13 PRINT-OUT OF TIME STEP NUMBERS? (YES=1, NO=0): IPRINT
  1
B----- WAVES -----B
B.1 WAVE HEIGHT CHANGE FACTOR. WAVE ANGLE CHANGE FACTOR AND AMOUNT (DEG)
  (NO CHANGE: HCNGF=1, ZCNGF=1, ZCNGA=0): HCNGF, ZCNGF, ZCNGA
  1  1  0
B.2 DEPTH OF OFFSHORE WAVE INPUT: DZ
  16.5
B.3 IS AN EXTERNAL WAVE MODEL BEING USED (YES=1; NO=0): NWD
  0
B.4 COMMENT: IF AN EXTERNAL WAVE MODEL IS NOT BEING USED, CONTINUE TO B.9

```


B.5 NUMBER OF SHORELINE CALCULATION CELLS PER WAVE MODEL ELEMENT: ISPW

0

B.6 NUMBER OF HEIGHT BANDS USED IN THE EXTERNAL WAVE MODEL TRANSFORMATIONS

(MINIMUM IS 1, MAXIMUM IS 9): NBANDS

1

B.7 COMMENT: IF ONLY ONE HEIGHT BAND WAS USED CONTINUE TO B.9

B.8 MINIMUM WAVE HEIGHT AND BAND WIDTH OF HEIGHT BANDS: HBMIN, HBWIDTH

0 0

B.9 VALUE OF TIME STEP IN WAVE DATA FILE IN HOURS (MUST BE AN EVEN MULTIPLE OF, OR EQUAL TO DT): DTW

720

B.10 NUMBER OF WAVE COMPONENTS PER TIME STEP: NWAIVES

1

B.11 DATE WHEN WAVE FILE STARTS (FORMAT:YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): WDATS
850101

C----- BEACH -----C

C.1 EFFECTIVE GRAIN SIZE DIAMETER IN MILLIMETERS: D50

0.2

C.2 AVERAGE BERM HEIGHT FROM MEAN WATER LEVEL: ABH

1

C.3 CLOSURE DEPTH: DCLOS

10

C.4 ANY OPEN BOUNDARY? (NO=0, YES=1): IOB

0

C.5 COMMENT: IF NO OPEN BOUNDARY, CONTINUE TO D.

C.6 TIME BASE IN BOUNDARY MOVEMENT SPECIFICATION(S)?
(SIMULATION PERIOD = 1, DAY = 2, TIME STEP = 3): ITB

1

C.7 OPEN BOUNDARY ON LEFT-HAND SIDE? (NO=0, YES=1): IOB1

0

C.8 COMMENT: IF A GROIN ON LEFT-HAND BOUNDARY, CONTINUE TO C.10

C.9 BOUNDARY MOVEMENT PER TIME BASE ON LEFT-HAND BOUNDARY, IN SYSTEM OF UNITS SPECIFIED IN A.2 (PINNED BEACH => YC1 = 0): YC1

0

C.10 OPEN BOUNDARY ON RIGHT-HAND SIDE? (NO=0, YES=1): IOBN

1

C.11 COMMENT: IF A GROIN ON RIGHT-HAND BOUNDARY, CONTINUE TO D.

C.12 BOUNDARY MOVEMENT PER TIME BASE ON LEFT-HAND BOUNDARY, IN SYSTEM OF UNITS SPECIFIED IN A.2 (PINNED BEACH => YCN = 0): YCN

0

D----- NON-DIFFRACTING GROINS -----D

D.1 ANY NON-DIFFRACTING GROINS? (NO=0, YES=1): INDG

1

D.2 COMMENT: IF NO NON-DIFFRACTING GROINS, CONTINUE TO E.

D.3 NUMBER OF NON-DIFFRACTING GROINS: NNDG

19

D.4 GRID CELL NUMBERS OF NON-DIFFRACTING GROINS (NNDG VALUES): IXNDG(I)
26 28 46 50 53 56 59 62 65 68 72 75 79 82 84 87 89 91 132

D.5 LENGTHS OF NON-DIFFRACTING GROINS FROM X-AXIS (NNDG VALUES): YNDG(I)
660 660 305 305 320 330 335 330 330 335 365 405 415 420 415 425 440 450 750

E----- DIFFRACTING (LONG) GROINS AND JETTIES -----E

E.1 ANY DIFFRACTING GROINS OR JETTIES? (NO=0, YES=1): IDG

1

E.2 COMMENT: IF NO DIFFRACTING GROINS, CONTINUE TO F.

E.3 NUMBER OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES: NDG

1

E.4 GRID CELL NUMBERS OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES (NDG VALUES): IXDG(I)

23 46 50 53 56 59 62 65 68 72 75 79 82 84 87 89 91

E.5 LENGTHS OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES FROM X-AXIS (NDG VALUES): YDG(I)

690 305 305 320 330 335 330 330 335 365 405 415 420 415 425 440 450

E.6 DEPTHS AT SEAWARD END OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES(NDG VALUES): DDG(I)

4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

F----- ALL GROINS/JETTIES ----- F

F.1 COMMENT: IF NO GROINS OR JETTIES, CONTINUE TO G.

F.2 PERMEABILITIES OF ALL GROINS AND JETTIES (NNDG+NDG VALUES): PERM(I)

0.15 0.15 0.15 0.15 .15 .15 .15 .15 .15 .15 .15 .15 .15 .15 .15 .15

.15 .15 .15

F.3 IF GROIN OR JETTY ON LEFT-HAND BOUNDARY, DISTANCE FROM SHORELINE
OUTSIDE GRID TO SEAWARD END OF GROIN OR JETTY: YG1

0

F.4 IF GROIN OR JETTY ON RIGHT-HAND BOUNDARY, DISTANCE FROM SHORELINE
OUTSIDE GRID TO SEAWARD END OF GROIN OR JETTY: YGN

0

G----- DETACHED BREAKWATERS ----- G

G.1 ANY DETACHED BREAKWATERS? (NO=0, YES=1): IDB

1

G.2 COMMENT: IF NO DETACHED BREAKWATERS, CONTINUE TO H.

G.3 NUMBER OF DETACHED BREAKWATERS: NDB

1

G.4 ANY DETACHED BREAKWATER ACROSS LEFT-HAND CALCULATION BOUNDARY
(NO=0, YES=1): IDB1

0

G.5 ANY DETACHED BREAKWATER ACROSS RIGHT-HAND CALCULATION BOUNDARY
(NO=0, YES=1): IDBN

0

G.6 GRID CELL NUMBERS OF TIPS OF DETACHED BREAKWATERS

(2 * NDB - (IDB1+IDBN) VALUES): IXDB(I)

23 28

G.7 DISTANCES FROM X-AXIS TO TIPS OF DETACHED BREAKWATERS

(1 VALUE FOR EACH TIP SPECIFIED IN G.6): YDB(I)

690 730

G.8 DEPTHS AT DETACHED BREAKWATER TIPS (1 VALUE FOR EACH TIP
SPECIFIED IN G.6): DDB(I)

4 4.5

G.9 TRANSMISSION COEFFICIENTS FOR DETACHED BREAKWATERS (NDB VALUES):
TRANDB(I)

0.05

H----- SEAWALLS ----- H

H.1 ANY SEAWALL ALONG THE SIMULATED SHORELINE? (YES=1; NO=0): ISW

0

H.2 COMMENT: IF NO SEAWALL, CONTINUE TO I.

H.3 GRID CELL NUMBERS OF START AND END OF SEAWALL (ISWEND = -1 MEANS
ISWEND = N): ISWBEG, ISWEND

1 131

I----- BEACH FILLS ----- I

I.1 ANY BEACH FILLS DURING SIMULATION PERIOD? (NO=0, YES=1): IBF

1

- I.2 COMMENT: IF NO BEACH FILLS, CONTINUE TO K.
 I.3 NUMBER OF BEACH FILLS DURING SIMULATION PERIOD: NBF
 7
 I.4 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE FILLS START
 (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBF VALUES): BFDATS(I)
 850301 850601 860201 860101 870101 870601 890101
 I.5 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE FILLS END
 (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBF VALUES): BFDATS(I)
 850601 860201 860801 860601 870601 880101 900101
 I.6 GRID CELL NUMBERS OF START OF RESPECTIVE FILLS (NBF VALUES): IBFS(I),
 1 8 16 28 31 75 99
 I.7 GRID CELL NUMBERS OF END OF RESPECTIVE FILLS (NBF VALUES): IBFE(I)
 8 16 23 31 36 99 131
 I.8 ADDED BERM WIDTHS AFTER ADJUSTMENT TO EQUILIBRIUM CONDITIONS
 (NBF VALUES): YADD(I)
 100 130 130 450 0 33 25
- J----- BYPASSING -----J
- J.1 ANY BYPASSING OPERATIONS DURING SIMULATION PERIOD? (NO=0, YES=1): IBP
 1
 J.2 COMMENT: IF NO BYPASSING OPERATIONS, CONTINUE TO K.
 J.3 READ BYPASSING RATES FROM A FILE OR SPECIFY BELOW?
 (FILE=1, BELOW=2): IBPF
 2
 J.4 COMMENT: IF BYPASSING OPERATIONS ARE SPECIFIED BELOW, CONTINUE TO J.8
 -- BYPASSING OPERATIONS SPECIFIED IN SEPARATE DATA FILE --
 J.5 DATE OR TIME STEP WHEN BYPASS DATA FILE STARTS AND ENDS, RESPECTIVELY
 (FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): QQDATS QQDATE
 0 0
 J.6 CELL NOS. WHERE BYPASS FILE STARTS AND ENDS, RESPECTIVELY: IQQS, IQQE
 0 0
 J.7 COMMENT: END OF BYPASS DATA FILE SECTION. CONTINUE TO K.
 -- BYPASSING OPERATIONS SPECIFIED IN THIS FILE --
 J.8 NUMBER OF BYPASSING OPERATIONS DURING SIMULATION PERIOD: NBP
 11
 J.9 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE OPERATIONS START
 (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBP VALUES): BPDATS(I)
 890801 930201 950501 950501 950501 890806 950501 930201 930201 930201 930201
 J.10 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE OPERATIONS END
 (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBP VALUES): BPDATS(I)
 890805 930205 950505 950505 950505 890811 950505 930205 930205 930205
 930205
 J.11 GRID CELL NUMBERS OF START OF RESPECTIVE OPERATIONS (NBP VALUES): IBPS(I)
 24 27 27 30 53 40 37 48 64 6 9
 J.12 GRID CELL NUMBERS OF END OF RESPECTIVE OPERATIONS (NBP VALUES): IBPE(I)
 29 29 29 53 80 130 58 64 77 6 9
 J.13 BYPASSING RATES AS TOTAL AVERAGE VOLUME PER HOUR (CY/HR OR M3/HR,
 ACCORDING TO UNITS GIVEN IN A.2) FOR RESPECTIVE OPERATIONS
 (NBP VALUES): QBP(I)
 2000 2000 3500 -5000 -4000 5000 -2500 1500 -1500 -1500 -1500
- K----- COMMENTS -----K
- * ALL COORDINATES MUST BE GIVEN IN THE "TOTAL" GRID SYSTEM
 * ONE VALUE FOR EACH STRUCTURE, TIP ETC. ESPECIALLY IMPORTANT FOR
 COMBINED STRUCTURES, E.G., TWO DBW'S WHERE THE LOCATION WHERE THEY

- MEET HAS TO BE TREATED AS TWO TIPS.
- * ANY GROIN CONNECTED TO A DETACHED BREAKWATER MUST BE REGARDED AS DIFFRACTING
- * CONNECTED STRUCTURES MUST BE GIVEN THE SAME Y AND D VALUES WHERE THEY CONNECT
- * IF DOING REAL CASES, THE WAVE.DAT FILE MUST CONTAIN FULL YEARS DATA
- * DATA FOR START OF BEACH FILL IN SPACE AND TIME SHOULD BE GIVEN IN INCREASING/CHRONOLOGICAL ORDER. DATA FOR END OF BEACH FILL MUST CORRESPOND TO THESE VALUES, AND NOT NECESSARILY BE IN INCREASING ORDER.
- * DON'T CHANGE THE LABELS OF THE LINES SINCE THEY ARE USED TO IDENTIFY THE LINES BY GENESIS.

END

El archivo WAVES tiene los siguientes datos:

Datos del oleaje de la planta termoeléctrica "Adolfo López Mateos"

Periodo (s), Altura de ola (H) (m), Dirección del oleaje incidente (a)

6.5	0.5527	5
6.5	0.5527	5
6.5	0.5527	5
5.5	0.5772	5
5.5	0.5772	5
5.5	0.5772	5
6.5	0.4595	5
6.5	0.4595	5
6.5	0.4595	5
6.5	0.6336	28
6.5	0.6336	28
6.5	0.6336	28

En el archivo SHORL se ingresaron los siguientes datos:

Coordenadas de la línea de costa inicial en la planta termoeléctrica "Adolfo López Mateos" Tuxpan. Veracruz. Año 1985. dx = 50 m

168.11	167.16	166.21	165.25	164.30	165.92	168.23	170.54	172.85	175.17
177.54	179.91	182.28	184.65	187.60	191.21	194.81	198.42	201.55	202.79
204.03	205.28	206.52	207.35	207.91	208.48	209.05	210.22	213.74	217.26
220.79	224.31	224.74	220.64	216.55	212.45	208.77	207.80	206.82	205.85
204.87	203.90	203.92	204.38	204.84	205.31	206.45	208.79	211.12	213.46
215.79	218.95	224.31	229.67	235.03	240.35	245.65	250.94	256.24	261.54
265.16	267.79	270.42	273.01	275.18	277.36	279.54	281.71	283.89	286.11
288.42	290.72	293.03	296.06	299.29	302.51	305.73	308.96	312.18	316.86
321.69	326.52	331.34	335.41	339.47	343.54	347.60	351.67	355.73	359.80
363.86	367.93	371.99	376.06	380.13	384.19	388.26	392.32	396.39	400.45

404.52	408.58	412.65	419.67	426.90	434.12	441.34	448.56	455.78	463.01
470.23	477.45	484.67	491.90	499.12	506.34	513.56	520.78	528.01	535.23
542.45	550.49	559.92	569.35	578.78	588.21	597.64	607.07	616.50	625.93
635.36									

En el archivo SHORM se ingresaron los siguientes datos:

 Coordenadas de la línea de costa final en la planta termoeléctrica
 "Adolfo López Mateos" Tuxpan. Veracruz. Año 1995. dx = 50 m

258.95	276.02	286.36	290.02	281.78	277.17	277.05	284.79	313.53	323.84
339.81	342.00	347.00	358.25	357.09	355.15	357.18	364.88	359.50	367.89
383.75	392.86	407.00	405.42	390.63	375.84	361.05	346.25	326.75	296.60
325.00	311.57	297.57	283.79	273.60	256.67	242.70	240.56	241.11	224.11
219.04	220.58	220.12	208.14	204.44	204.04	214.82	232.20	238.52	228.93
238.88	242.18	237.95	240.43	246.95	251.05	248.97	250.39	257.99	263.22
260.33	259.14	257.71	250.74	242.49	240.00	255.57	257.53	253.70	269.15
268.44	268.58	280.91	288.09	290.36	309.72	319.81	318.05	339.43	346.07
340.03	343.12	380.20	356.35	352.75	362.80	364.76	377.45	377.71	386.66
385.86	390.08	389.86	399.93	410.00	413.75	417.50	421.25	425.00	432.00
439.00	446.00	453.00	463.00	473.00	483.00	493.00	503.50	514.00	524.50
535.00	543.25	551.50	559.75	568.00	580.50	593.00	605.50	618.00	624.75
631.50	638.25	645.00	658.75	672.50	686.25	700.00	711.25	722.50	733.75
745.00									

Finalmente se tienen los archivos de salida del modelo. A continuación se muestra los datos obtenidos del archivo SETUP:

RUN: Adolfo López Mateos 1985 - 1995

METRIC UNITS

GROIN X-COORDINATES

23	26	28	46	50	53	56	59	62	65
68	72	75	79	82	84	87	89	91	132

DISTANCE TO GROIN TIPS FROM X-AXIS

690.00	660.00	660.00	305.00	305.00	320.00	330.00	335.00	330.00	330.00
335.00	365.00	405.00	415.00	420.00	415.00	425.00	440.00	450.00	750.00

GROIN PERMEABILITIES

0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

X-COORDINATES OF DETACHED BREAKWATER TIPS

23	28
----	----

DISTANCE TO BREAKWATER TIPS FROM X-AXIS

690.00	730.00
--------	--------

DETACHED BREAKWATER TRANSMISSION COEFFICIENTS

0.05

DATES OR TIME STEPS WHEN FILLS START

850301 850601 860201 860101 870101 870601 890101

DATES OR TIME STEPS WHEN FILLS END

850601 860201 860801 860601 870601 880101 900101

X-COORDINATES WHERE FILLS START

1 8 16 28 31 75 99

X-COORDINATES WHERE FILLS END

8 16 23 31 36 99 131

DX = 50.0 DT = 12.00 ISSTART = 1 N = 131 NTS = 7602
 NWAVES = 1 DCLOS = 10.0 ABH = 1.0 DZ = 16.5 D50 = 0.20
 HCNGF = 1.0 ZCNGF = 1.0 ZCNGA = 0.0 K1 = 0.45 K2 = 0.25

SHORELINE POSITION AFTER 1.YEARS = 730 TIME STEPS. DATE IS 860101

269.20	270.38	271.84	273.88	276.79	280.74	285.81	292.29	296.27	298.02
297.70	295.43	291.26	285.32	277.68	268.27	256.92	247.93	240.94	235.57
231.43	228.11	225.16	211.01	209.06	209.79	208.18	199.77	198.27	197.44
197.48	198.25	199.58	201.38	203.50	205.80	208.24	210.82	213.56	216.43
219.36	222.25	224.90	227.11	228.68	210.14	211.66	213.71	216.03	216.30
219.06	222.12	226.85	230.44	234.25	240.72	244.83	248.96	253.83	257.84
261.76	263.32	267.03	270.67	272.46	275.97	279.46	282.29	285.93	289.62
293.10	291.18	294.44	297.80	298.91	302.79	306.93	311.02	314.95	318.87
322.79	326.72	330.57	335.29	339.18	343.04	347.46	351.12	351.57	355.04
349.53	353.92	359.17	365.05	371.28	377.63	383.96	390.17	396.27	402.26
408.18	414.04	419.86	425.65	431.45	437.28	443.18	449.16	455.25	461.48
467.87	474.46	481.31	488.48	496.03	504.06	512.67	521.95	531.96	542.78
554.57	567.48	581.54	596.72	613.00	630.50	649.19	668.66	688.57	708.84
729.36									

SHORELINE CHANGE AFTER 1.YEARS = 730 TIME STEPS. DATE IS 860101

101.09	103.22	105.63	108.63	112.49	114.82	117.58	121.75	123.42	122.85
120.16	115.52	108.98	100.67	90.08	77.06	62.11	49.51	39.39	32.78
27.40	22.83	18.64	3.66	1.15	1.31	-0.87	-10.45	-15.47	-19.82
-23.31	-26.06	-25.16	-19.26	-13.05	-6.65	-0.53	3.02	6.74	10.58
14.49	18.35	20.98	22.73	23.84	4.83	5.21	4.92	4.91	2.84
3.27	3.17	2.54	0.77	-0.78	0.37	-0.82	-1.98	-2.41	-3.70
-3.40	-4.47	-3.39	-2.34	-2.72	-1.39	-0.08	0.58	2.04	3.51
4.68	0.46	1.41	1.74	-0.38	0.28	1.20	2.07	2.77	2.01
1.10	0.20	-0.77	-0.12	-0.29	-0.50	-0.14	-0.55	-4.16	-4.76
-14.33	-14.01	-12.82	-11.01	-8.85	-6.56	-4.30	-2.15	-0.12	1.81
3.66	5.46	7.21	5.98	4.55	3.16	1.84	0.60	-0.53	-1.53
-2.36	-2.99	-3.36	-3.42	-3.09	-2.28	-0.89	1.17	3.95	7.55
12.12	16.99	21.62	27.37	34.22	42.29	51.55	61.59	72.07	82.91
94.00									

SHORELINE POSITION AFTER 2.YEARS = 1460 TIME STEPS. DATE IS 870101

269.20	273.00	276.85	280.80	284.90	289.25	294.00	299.16	304.73	310.71
317.11	323.97	331.07	337.79	343.72	348.73	353.07	357.32	361.64	365.74
369.20	371.59	438.27	217.74	215.53	222.66	227.48	500.50	494.39	482.32
463.30	341.77	317.61	298.12	282.16	268.52	256.44	245.63	236.30	229.00
223.95	220.90	219.43	218.94	218.99	214.35	215.34	216.84	218.78	219.36
222.01	224.94	228.14	231.52	235.07	240.10	243.89	247.72	251.95	255.77
259.54	261.25	264.94	268.62	271.34	275.00	278.65	283.06	286.63	290.11
293.50	292.70	296.04	299.44	300.88	304.45	308.10	311.82	316.21	319.94
323.63	327.32	330.94	334.97	338.50	341.98	344.74	348.08	346.86	350.16
346.91	350.93	355.59	360.83	366.53	372.58	378.87	385.29	391.78	398.27
404.73	411.15	417.52	423.84	430.17	436.53	442.98	449.57	456.34	463.36
470.66	478.32	486.38	494.89	503.91	513.48	523.65	534.45	545.90	558.02
570.86	584.44	598.76	613.76	629.39	645.67	662.55	679.79	697.20	714.73
732.34									

SHORELINE CHANGE AFTER 2.YEARS = 1460 TIME STEPS. DATE IS 870101

101.09	105.84	110.64	115.55	120.60	123.33	125.77	128.62	131.88	135.54
139.57	144.06	148.79	153.14	156.12	157.52	158.26	158.90	160.09	162.95
165.17	166.31	231.75	10.39	7.62	14.18	18.43	290.28	280.65	265.06
242.51	117.46	92.87	77.48	65.61	56.07	47.67	37.83	29.48	23.15
19.08	17.00	15.51	14.56	14.15	9.04	8.89	8.05	7.66	5.90
6.22	5.99	3.83	1.85	0.04	-0.25	-1.76	-3.22	-4.29	-5.77
-5.62	-6.54	-5.48	-4.39	-3.84	-2.36	-0.89	1.35	2.74	4.00
5.08	1.98	3.01	3.38	1.59	1.94	2.37	2.86	4.03	3.08
1.94	0.80	-0.40	-0.44	-0.97	-1.56	-2.86	-3.59	-8.87	-9.64
-16.95	-17.00	-16.40	-15.23	-13.60	-11.61	-9.39	-7.03	-4.61	-2.18
0.21	2.57	4.87	4.17	3.27	2.41	1.64	1.01	0.56	0.35
0.43	0.87	1.71	2.99	4.79	7.14	10.09	13.67	17.89	22.79
28.41	33.95	38.84	44.41	50.61	57.46	64.91	72.72	80.70	88.80
96.98									

SHORELINE POSITION AFTER 3.YEARS = 2190 TIME STEPS. DATE IS 880101

269.20	274.54	279.90	285.30	290.76	296.31	301.96	307.70	313.53	319.44
325.39	331.49	337.66	343.30	348.04	351.84	354.79	357.12	358.89	360.00
360.39	360.08	471.17	223.31	219.81	238.49	240.39	346.47	345.30	342.70
339.44	335.36	330.38	324.75	318.60	311.60	303.64	295.04	286.26	277.84
270.14	263.30	257.42	252.55	248.72	224.08	222.22	221.27	221.17	221.76
223.06	224.90	228.95	231.65	234.69	239.48	243.02	246.67	250.41	254.14
257.87	259.71	263.47	267.28	269.67	273.74	277.97	281.62	286.10	290.66
295.36	296.83	302.07	307.73	328.85	334.60	340.01	345.10	349.38	353.94
358.25	360.70	364.57	367.25	370.68	373.91	375.31	378.27	376.62	379.44
377.47	380.66	384.17	387.93	391.84	395.79	399.65	403.27	406.54	409.32
412.83	416.98	421.68	426.87	432.52	438.59	445.07	451.96	459.25	466.96
475.09	483.64	492.63	502.06	511.96	522.33	533.19	544.57	556.45	568.86
581.80	595.26	609.24	623.68	638.54	653.85	669.56	685.49	701.53	717.64
733.81									

SHORELINE CHANGE AFTER 3 YEARS = 2190 TIME STEPS. DATE IS 880101

101.09	107.38	113.69	120.05	126.46	130.39	133.73	137.16	140.68	144.27
147.85	151.58	155.38	158.65	160.44	160.63	159.98	158.70	157.34	157.21
156.36	154.80	264.65	15.96	11.90	30.01	31.34	136.25	131.56	125.44
118.65	111.05	105.64	104.11	102.05	99.15	94.87	87.24	79.44	71.99
65.27	59.40	53.50	48.17	43.88	18.77	15.77	12.48	10.05	8.30
7.27	5.95	4.64	1.98	-0.34	-0.87	-2.63	-4.27	-5.83	-7.40
-7.29	-8.08	-6.95	-5.73	-5.51	-3.62	-1.57	-0.09	2.21	4.55
6.94	6.11	9.04	11.67	29.56	32.09	34.28	36.14	37.20	37.08
36.56	34.18	33.23	31.84	31.21	30.37	27.71	26.60	20.89	19.64
13.61	12.73	12.18	11.87	11.71	11.60	11.39	10.95	10.15	8.87
8.31	8.40	9.03	7.20	5.62	4.47	3.73	3.40	3.47	3.95
4.86	6.19	7.96	10.16	12.84	15.99	19.63	23.79	28.44	33.63
39.35	44.77	49.32	54.33	59.76	65.64	71.92	78.42	85.03	91.71
98.45									

SHORELINE POSITION AFTER 4 YEARS = 2920 TIME STEPS. DATE IS 881231

269.20	275.18	281.17	287.19	293.25	299.34	305.45	311.56	317.66	323.73
329.73	335.78	341.82	347.27	351.76	355.30	357.94	359.77	360.84	361.12
360.60	359.40	484.70	230.85	225.63	251.69	251.36	304.17	303.45	302.62
302.19	301.98	301.81	301.75	301.74	301.18	299.75	297.53	294.66	291.35
287.71	283.83	279.82	275.74	271.71	249.42	246.15	243.58	241.76	229.02
228.69	229.06	230.15	231.75	233.86	238.62	241.53	244.71	248.67	252.21
255.88	257.94	261.83	265.84	268.46	272.77	277.26	282.80	287.60	292.53
297.57	304.50	309.76	315.09	325.16	330.46	335.62	340.63	347.16	351.73
356.03	359.47	363.25	366.84	370.18	373.30	375.06	377.75	374.16	376.57
370.73	373.47	376.58	380.07	383.92	388.14	392.68	397.53	402.65	408.01
413.60	419.38	425.34	431.48	437.82	444.40	451.25	458.40	465.88	473.73
481.98	490.65	499.76	509.33	519.37	529.88	540.86	552.31	564.22	576.59
589.39	602.62	616.24	630.23	644.53	659.16	674.08	689.16	704.31	719.51
734.75									

SHORELINE CHANGE AFTER 4 YEARS = 2920 TIME STEPS. DATE IS 881231

101.09	108.02	114.96	121.94	128.95	133.42	137.22	141.02	144.81	148.56
152.19	155.87	159.54	162.62	164.16	164.09	163.13	161.35	159.29	158.33
156.57	154.12	278.18	23.50	17.72	43.21	42.31	93.95	89.71	85.36
81.40	77.67	77.07	81.11	85.19	88.73	90.98	89.73	87.84	85.50
82.84	79.93	75.90	71.36	66.87	44.11	39.70	34.79	30.64	15.56
12.90	10.11	5.84	2.08	-1.17	-1.73	-4.12	-6.23	-7.57	-9.33
-9.28	-9.85	-8.59	-7.17	-6.72	-4.59	-2.28	1.09	3.71	6.42
9.15	13.78	16.73	19.03	25.87	27.95	29.89	31.67	34.98	34.87
34.34	32.95	31.91	31.43	30.71	29.76	27.46	26.08	18.43	16.77
6.87	5.54	4.59	4.01	3.79	3.95	4.42	5.21	6.26	7.56
9.08	10.80	12.69	11.81	10.92	10.28	9.91	9.84	10.10	10.72
11.75	13.20	15.09	17.43	20.25	23.54	27.30	31.53	36.21	41.36
46.94	52.13	56.32	60.88	65.75	70.95	76.44	82.09	87.81	93.58
99.39									

SHORELINE POSITION AFTER 5.YEARS = 3650 TIME STEPS. DATE IS 891231

269.20	275.52	281.85	288.19	294.53	300.85	307.11	313.28	319.35	325.29
331.06	336.80	342.58	348.00	352.79	357.00	360.62	363.59	365.88	367.46
368.28	368.48	493.02	310.57	305.23	329.95	326.00	316.12	311.81	307.77
304.33	301.42	299.00	297.27	296.33	295.82	295.45	295.22	295.06	294.82
294.38	293.65	292.55	291.04	289.16	282.30	279.97	277.63	275.37	262.26
260.70	259.71	250.22	250.46	251.30	253.30	255.19	257.51	261.52	264.57
267.92	270.99	274.85	278.94	282.87	287.35	292.03	298.29	303.25	308.32
313.47	321.05	326.27	331.48	339.02	344.11	349.07	353.89	360.04	364.46
368.61	372.47	376.11	379.46	382.65	385.64	386.90	389.55	385.03	387.64
382.64	385.99	389.97	394.62	399.95	405.98	412.73	420.19	428.40	436.58
444.73	452.86	460.95	469.01	477.08	485.18	493.36	501.66	510.13	518.81
527.75	536.99	546.56	556.49	566.77	577.43	588.43	599.75	611.34	623.15
635.08	647.05	658.95	670.71	682.23	693.39	704.08	714.32	724.11	733.38
742.06									

SHORELINE CHANGE AFTER 5.YEARS = 3650 TIME STEPS. DATE IS 891231

101.09	108.36	115.64	122.94	130.23	134.93	138.88	142.74	146.50	150.12
153.52	156.89	160.30	163.35	165.19	165.79	165.81	165.17	164.33	164.67
164.25	163.20	286.50	103.22	97.32	121.47	116.95	105.90	98.07	90.51
83.54	77.11	74.26	76.63	79.78	83.37	86.68	87.42	88.24	88.97
89.51	89.75	88.63	86.66	84.32	76.99	73.52	68.84	64.25	48.80
44.91	40.76	25.91	20.79	16.27	12.95	9.54	6.57	5.28	3.03
2.76	3.20	4.43	5.93	7.69	9.99	12.49	16.58	19.36	22.21
25.05	30.33	33.24	35.42	39.73	41.60	43.34	44.93	47.86	47.60
46.92	45.95	44.77	44.05	43.18	42.10	39.30	37.88	29.30	27.84
18.78	18.06	17.98	18.56	19.82	21.79	24.47	27.87	32.01	36.13
40.21	44.28	48.30	49.34	50.18	51.06	52.02	53.10	54.35	55.80
57.52	59.54	61.89	64.59	67.65	71.09	74.87	78.97	83.33	87.92
92.63	96.56	99.03	101.36	103.45	105.18	106.44	107.25	107.61	107.45
106.70									

SHORELINE POSITION AFTER 6.YEARS = 4380 TIME STEPS. DATE IS 901231

269.20	275.48	281.77	288.07	294.40	300.75	307.10	313.46	319.80	326.10
332.33	338.63	345.05	351.19	356.73	361.63	365.85	369.26	371.78	373.37
373.99	373.81	500.28	317.40	310.80	324.88	319.51	302.82	298.42	294.77
292.02	290.01	288.61	287.94	288.03	288.50	289.03	289.62	290.22	290.74
291.11	291.30	291.26	290.96	290.41	286.95	285.99	284.91	283.75	278.48
277.38	276.41	263.04	262.61	262.57	257.12	257.99	259.36	260.26	262.59
265.35	268.66	272.29	276.30	282.39	287.01	291.85	299.38	304.51	309.71
314.95	323.13	328.27	333.31	338.40	343.22	347.94	352.54	358.09	362.35
366.40	370.26	373.89	377.13	380.41	383.54	384.80	387.67	384.72	387.59
384.54	388.04	392.05	396.61	401.72	407.37	413.54	420.20	427.31	434.83
442.68	450.82	459.20	467.76	476.49	485.38	494.42	503.59	512.91	522.37
531.97	541.72	551.61	561.64	571.81	582.10	592.49	602.97	613.53	624.13
634.76	645.40	656.02	666.62	677.18	687.69	698.16	708.58	718.96	729.33
739.67									

SHORELINE CHANGE AFTER 6 YEARS = 4380 TIME STEPS. DATE IS 901231

101.09	108.32	115.56	122.82	130.10	134.83	138.87	142.92	146.95	150.93
154.79	158.72	162.77	166.54	169.13	170.42	171.04	170.84	170.23	170.58
169.96	168.53	293.76	110.05	102.89	116.40	110.46	92.60	84.68	77.51
71.23	65.70	63.87	67.30	71.48	76.05	80.26	81.82	83.40	84.89
86.24	87.40	87.34	86.58	85.57	81.64	79.54	76.12	72.63	65.02
61.59	57.46	38.73	32.94	27.54	16.77	12.34	8.42	4.02	1.05
0.19	0.87	1.87	3.29	7.21	9.65	12.31	17.67	20.62	23.60
26.53	32.41	35.24	37.25	39.11	40.71	42.21	43.58	45.91	45.49
44.71	43.74	42.55	41.72	40.94	40.00	37.20	36.00	28.99	27.79
20.68	20.11	20.06	20.55	21.59	23.18	25.28	27.88	30.92	34.38
38.16	42.24	46.55	48.09	49.59	51.26	53.08	55.03	57.13	59.36
61.74	64.27	66.94	69.74	72.69	75.76	78.93	82.19	85.52	88.90
92.31	94.91	96.10	97.27	98.40	99.48	100.52	101.51	102.46	103.40
104.31									

SHORELINE POSITION AFTER 7 YEARS = 5110 TIME STEPS. DATE IS 911231

269.20	275.73	282.28	288.85	295.45	302.09	308.75	315.43	322.10	328.74
335.29	341.89	348.61	355.04	360.83	365.91	370.19	373.57	375.97	377.46
378.37	380.10	504.26	323.65	315.63	319.26	313.28	294.42	289.53	285.34
282.29	280.27	279.04	278.63	279.14	280.17	281.41	282.80	284.30	285.80
287.22	288.51	289.65	290.75	292.15	288.69	289.61	289.94	290.50	285.39
286.00	286.94	274.74	276.10	278.11	261.62	264.50	268.00	259.07	263.63
268.74	265.16	271.28	277.76	279.14	286.30	293.57	296.94	304.09	310.46
317.86	320.93	328.76	336.68	335.07	342.31	348.28	355.22	353.79	360.87
367.63	366.29	373.65	372.87	378.52	384.02	381.34	388.02	381.77	389.01
381.54	387.52	392.32	397.09	402.26	407.92	414.10	420.76	427.88	435.42
443.32	451.53	459.99	468.68	477.55	486.59	495.77	505.09	514.52	524.07
533.73	543.48	553.33	563.27	573.30	583.40	593.56	603.79	614.13	624.51
634.89	645.29	655.72	666.18	676.66	687.14	697.62	708.11	718.61	729.16
739.90									

SHORELINE CHANGE AFTER 7 YEARS = 5110 TIME STEPS. DATE IS 911231

101.09	108.57	116.07	123.60	131.15	136.17	140.52	144.89	149.25	153.57
157.75	161.98	166.33	170.39	173.23	174.70	175.38	175.15	174.42	174.67
174.34	174.82	297.74	116.30	107.72	110.78	104.23	84.20	75.79	68.08
61.50	55.96	54.30	57.99	62.59	67.72	72.64	75.00	77.48	79.95
82.35	84.61	85.73	86.37	87.31	83.38	83.16	81.15	79.38	71.93
70.21	67.99	50.43	46.43	43.08	21.27	18.85	17.06	2.83	2.09
3.58	-2.63	0.86	4.75	3.96	8.94	14.03	15.23	20.20	24.35
29.44	30.21	35.73	40.62	35.78	39.80	42.55	46.26	41.61	44.01
45.94	39.77	42.31	37.46	39.05	40.48	33.74	36.35	26.04	29.21
17.68	19.59	20.33	21.03	22.13	23.73	25.84	28.44	31.49	34.97
38.80	42.95	47.34	49.01	50.65	52.47	54.43	56.53	58.74	61.06
63.50	66.03	68.66	71.37	74.18	77.06	80.00	83.01	86.12	89.28
92.43	94.80	95.80	96.83	97.88	98.93	99.98	101.04	102.11	103.23
104.54									

SHORELINE POSITION AFTER 8.YEARS = 5840 TIME STEPS. DATE IS 921230

269.20	276.11	283.03	289.97	296.94	303.94	310.93	317.91	324.86	331.74
338.52	345.35	352.29	358.97	365.03	370.45	375.23	379.37	382.99	386.26
389.37	392.77	509.02	328.59	319.67	313.29	308.36	283.13	277.91	273.43
270.41	268.75	268.12	268.45	269.77	271.64	273.71	275.96	278.36	280.82
283.33	285.88	288.43	290.99	293.52	288.75	291.10	293.34	295.43	291.52
293.60	295.79	284.69	287.35	290.37	271.96	276.05	280.84	261.63	267.70
274.37	263.88	271.62	279.82	276.03	284.86	293.91	292.96	302.31	311.82
321.44	320.14	330.10	340.21	329.56	339.55	349.31	358.82	350.66	359.76
368.64	363.37	371.70	368.69	376.59	384.37	380.78	388.56	380.78	388.99
372.28	380.09	387.39	394.30	400.98	407.60	414.34	421.33	428.63	436.27
444.25	452.53	461.04	469.74	478.63	487.68	496.89	506.23	515.68	525.24
534.89	544.63	554.45	564.33	574.29	584.30	594.38	604.51	614.72	625.05
635.41	645.74	656.08	666.46	676.87	687.33	697.84	708.39	718.97	729.58
740.21									

SHORELINE CHANGE AFTER 8.YEARS = 5840 TIME STEPS. DATE IS 921230

101.09	108.95	116.82	124.72	132.64	138.02	142.70	147.37	152.01	156.57
160.98	165.44	170.01	174.32	177.43	179.24	180.42	180.95	181.44	183.47
185.34	187.49	302.50	121.24	111.76	104.81	99.31	72.91	64.17	56.17
49.62	44.44	43.38	47.81	53.22	59.19	64.94	68.16	71.54	74.97
78.46	81.98	84.51	86.61	88.68	83.44	84.65	84.55	84.31	78.06
77.81	76.84	60.38	57.68	55.34	31.61	30.40	29.90	5.39	6.16
9.21	-3.91	1.20	6.81	0.85	7.50	14.37	11.25	18.42	25.71
33.02	29.42	37.07	44.15	30.27	37.04	43.58	49.86	38.48	42.90
46.95	36.85	40.36	33.28	37.12	40.83	33.18	36.89	25.05	29.19
8.42	12.16	15.40	18.24	20.85	23.41	26.08	29.01	32.24	35.82
39.73	43.95	48.39	50.07	51.73	53.56	55.55	57.67	59.90	62.23
64.66	67.18	69.78	72.43	75.17	77.96	80.82	83.73	86.71	89.82
92.96	95.25	96.16	97.11	98.09	99.12	100.20	101.32	102.47	103.65
104.85									

SHORELINE POSITION AFTER 9.YEARS = 6570 TIME STEPS. DATE IS 931230

269.20	269.71	270.37	271.31	272.66	274.75	278.02	282.52	288.10	294.74
302.39	311.12	320.85	331.01	341.20	351.37	361.40	370.99	379.94	388.18
395.62	402.53	525.44	333.73	330.02	377.63	374.26	309.91	302.97	296.70
291.80	288.04	285.07	282.90	281.63	280.89	280.50	280.68	281.54	282.93
284.75	286.97	289.55	292.41	295.48	293.04	296.29	299.54	302.70	305.69
308.50	311.06	308.00	310.18	312.18	303.39	305.25	307.10	292.02	294.12
296.52	280.73	284.01	287.90	271.75	277.14	283.47	273.35	281.43	290.33
299.89	294.94	305.47	316.26	312.14	323.33	334.61	345.85	341.82	352.62
362.98	358.83	368.26	366.16	374.85	383.25	380.67	388.73	380.50	388.66
367.44	375.45	383.27	390.90	398.39	405.82	413.28	420.85	428.62	436.61
444.84	453.29	461.92	470.68	479.60	488.66	497.87	507.20	516.64	526.19
535.83	545.55	555.35	565.21	575.14	585.12	595.15	605.24	615.37	625.58
635.91	646.28	656.61	666.94	677.32	687.74	698.21	708.71	719.22	729.76
740.31									

SHORELINE CHANGE AFTER 9 YEARS = 6570 TIME STEPS. DATE IS 931230

101.09	102.55	104.16	106.06	108.36	108.83	109.79	111.98	115.25	119.57
124.85	131.21	138.57	146.36	153.60	160.16	166.59	172.57	178.39	185.39
191.59	197.25	318.92	126.38	122.11	169.15	165.21	99.69	89.23	79.44
71.01	63.73	60.33	62.26	65.08	68.44	71.73	72.88	74.72	77.08
79.88	83.07	85.63	88.03	90.64	87.73	89.84	90.75	91.58	92.23
92.71	92.11	83.69	80.51	77.15	63.04	59.60	56.16	35.78	32.58
31.36	12.94	13.59	14.89	-3.43	-0.22	3.93	-8.36	-2.46	4.22
11.47	4.22	12.44	20.20	12.85	20.82	28.88	36.89	29.64	35.76
41.29	32.31	36.92	30.75	35.38	39.71	33.07	37.06	24.77	28.86
3.58	7.52	11.28	14.84	18.26	21.63	25.02	28.53	32.23	36.16
40.32	44.71	49.27	51.01	52.70	54.54	56.53	58.64	60.86	63.18
65.60	68.10	70.68	73.31	76.02	78.78	81.59	84.46	87.36	90.35
93.46	95.79	96.69	97.59	98.54	99.53	100.57	101.64	102.72	103.83
104.95									

SHORELINE POSITION AFTER 10 YEARS = 7300 TIME STEPS. DATE IS 941230

269.20	273.29	277.42	281.62	285.91	290.41	295.27	300.49	306.07	312.02
318.36	325.27	332.84	340.70	348.54	356.41	364.18	371.56	378.26	383.92
388.03	390.31	533.99	340.92	336.18	364.35	357.70	296.02	289.54	284.33
280.46	277.65	275.76	274.94	275.22	276.11	277.37	279.08	281.20	283.55
286.02	288.55	291.06	293.43	295.57	296.11	298.29	300.70	303.20	305.60
307.70	309.31	309.17	309.93	310.30	306.73	306.55	306.17	298.82	298.35
298.00	291.22	291.34	291.76	285.92	287.25	289.13	287.70	291.23	295.60
300.01	302.67	307.31	312.27	319.04	325.10	331.73	337.91	344.30	349.62
354.70	358.11	362.38	367.73	372.08	376.28	380.81	384.21	381.35	384.33
371.42	376.01	382.04	389.02	396.53	404.29	412.18	420.19	428.34	436.66
445.15	453.81	462.58	471.45	480.43	489.52	498.74	508.06	517.50	527.03
536.66	546.36	556.14	565.98	575.88	585.84	595.86	605.92	616.04	626.22
636.45	646.73	657.04	667.38	677.75	688.13	698.53	708.93	719.29	729.59
739.82									

SHORELINE CHANGE AFTER 10 YEARS = 7300 TIME STEPS. DATE IS 941230

101.09	106.13	111.21	116.37	121.61	124.49	127.04	129.95	133.22	136.85
140.82	145.36	150.56	156.05	160.94	165.20	169.37	173.14	176.71	181.13
184.00	185.03	327.47	133.57	128.27	155.87	148.65	85.80	75.80	67.07
59.67	53.34	51.02	54.30	58.67	63.66	68.60	71.28	74.38	77.70
81.15	84.65	87.14	89.05	90.73	90.80	91.84	91.91	92.08	92.14
91.91	90.36	84.86	80.26	75.27	66.38	60.90	55.23	42.58	36.81
32.84	23.43	20.92	18.75	10.74	9.89	9.59	5.99	7.34	9.49
11.59	11.95	14.28	16.21	19.75	22.59	26.00	28.95	32.12	32.76
33.01	31.59	31.04	32.32	32.61	32.74	33.21	32.54	25.62	24.53
7.56	8.08	10.05	12.96	16.40	20.10	23.92	27.87	31.95	36.21
40.63	45.23	49.93	51.78	53.53	55.40	57.40	59.50	61.72	64.02
66.43	68.91	71.47	74.08	76.76	79.50	82.30	85.14	88.03	90.99
94.00	96.24	97.12	98.03	98.97	99.92	100.89	101.86	102.79	103.66
104.46									

SHORELINE POSITION AFTER 10.YEARS = 7606 TIME STEPS. DATE IS 950601

269.20	273.87	278.58	283.35	288.22	293.28	298.61	304.22	310.10	316.22
322.56	329.25	336.33	343.26	349.57	355.44	361.30	367.20	372.71	377.31
380.94	384.19	531.73	344.56	339.80	364.16	601.27	535.58	514.67	275.82
254.40	241.45	233.31	227.78	223.43	219.09	214.67	211.24	209.87	210.72
213.08	215.94	218.74	221.40	223.94	225.84	228.29	230.78	233.35	233.23
235.85	238.43	232.80	237.14	241.67	247.03	250.02	253.00	264.70	267.20
269.17	260.50	262.03	263.56	257.09	258.87	260.88	259.26	261.90	264.93
268.44	272.46	276.99	281.98	288.62	294.25	300.15	306.47	320.40	328.32
336.28	356.31	362.53	366.68	371.73	376.43	377.80	381.93	379.55	383.32
380.83	384.97	389.56	394.69	400.38	406.63	413.40	420.65	428.35	436.42
444.81	453.46	462.31	471.31	480.44	489.68	499.01	508.42	517.90	527.46
537.08	546.77	556.53	566.36	576.24	586.19	596.19	606.25	616.36	626.51
636.70	646.93	657.18	667.46	677.75	688.06	698.39	708.71	719.04	729.36
739.68									

SHORELINE CHANGE AFTER 10.YEARS = 7606 TIME STEPS. DATE IS 950601

101.09	106.71	112.37	118.10	123.92	127.36	130.38	133.68	137.25	141.05
145.02	149.34	154.05	158.61	161.97	164.23	166.49	168.78	171.16	174.52
176.91	178.91	325.21	137.21	131.89	155.68	392.22	325.36	300.93	58.56
33.61	17.14	8.57	7.14	6.88	6.64	5.90	3.44	3.05	4.87
8.21	12.04	14.82	17.02	19.10	20.53	21.84	21.99	22.23	19.77
20.06	19.48	8.49	7.47	6.64	6.68	4.37	2.06	8.46	5.66
4.01	-7.29	-8.39	-9.45	-18.09	-18.49	-18.66	-22.45	-21.99	-21.18
-19.98	-18.26	-16.04	-14.08	-10.67	-8.26	-5.58	-2.49	8.22	11.46
14.59	29.79	31.19	31.27	32.26	32.89	30.20	30.26	23.82	23.52
16.97	17.04	17.57	18.63	20.25	22.44	25.14	28.33	31.96	35.97
40.29	44.88	49.66	51.64	53.54	55.56	57.67	59.86	62.12	64.45
66.85	69.32	71.86	74.46	77.12	79.85	82.63	85.47	88.35	91.28
94.25	96.44	97.26	98.11	98.97	99.85	100.75	101.64	102.54	103.43
104.32									

OUTPUT LAST TIMESTEP NO. 7606 DATE IS 950601

OFFSHORE WAVE DATA INPUT:

HZ = 0.459500 T = 6.50000 ZZ = 5.00000

CALIBRATION/VERIFICATION ERROR = 16.4683

CALCULATED VOLUMETRIC CHANGE = +4.46E+06 (M3)

SIGN CONVENTION: EROSION (-), ACCRETION (+)

Los cálculos obtenidos del archivo **OUTPT** son los siguientes:

RUN: Adolfo López Mateos 1985 - 1995

INITIAL SHORELINE POSITION (M)

168.11	167.16	166.21	165.25	164.30	165.92	168.23	170.54	172.85	175.17
177.54	179.91	182.28	184.65	187.60	191.21	194.81	198.42	201.55	202.79
204.03	205.28	206.52	207.35	207.91	208.48	209.05	210.22	213.74	217.26
220.79	224.31	224.74	220.64	216.55	212.45	208.77	207.80	206.82	205.85
204.87	203.90	203.92	204.38	204.84	205.31	206.45	208.79	211.12	213.46
215.79	218.95	224.31	229.67	235.03	240.35	245.65	250.94	256.24	261.54
265.16	267.79	270.42	273.01	275.18	277.36	279.54	281.71	283.89	286.11
288.42	290.72	293.03	296.06	299.29	302.51	305.73	308.96	312.18	316.86
321.69	326.52	331.34	335.41	339.47	343.54	347.60	351.67	355.73	359.80
363.86	367.93	371.99	376.06	380.13	384.19	388.26	392.32	396.39	400.45
404.52	408.58	412.65	419.67	426.90	434.12	441.34	448.56	455.78	463.01
470.23	477.45	484.67	491.90	499.12	506.34	513.56	520.78	528.01	535.23
542.45	550.49	559.92	569.35	578.78	588.21	597.64	607.07	616.50	625.93
635.36									

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 850101 TO 860101

97	97	94	90	86	83	83	88	124	110
103	100	99	104	114	129	148	113	85	63
46	30	13	2	1	0	2	1	11	20
30	39	52	66	76	83	87	87	86	84
79	73	64	52	37	21	23	24	19	10
14	14	8	15	15	8	15	15	8	14
14	10	18	20	15	22	23	18	25	26
21	12	17	16	10	18	21	18	8	14
13	7	10	6	12	12	6	9	6	11
11	25	37	45	50	53	55	56	56	55
55	55	56	59	61	62	63	64	64	64
64	64	63	63	62	61	59	58	56	54
53	53	53	54	56	61	71	87	112	149
194	246								

NET TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 850101 TO 860101

93	93	92	90	86	79	72	63	114	108
103	100	99	101	108	121	141	107	80	58
40	25	12	2	0	0	0	0	5	14
24	37	52	65	76	83	87	87	85	82
76	68	58	46	34	21	18	15	12	10
8	6	5	3	3	3	3	4	5	6
8	10	12	14	15	17	18	18	17	16
14	12	12	11	10	10	10	9	8	7
5	5	5	5	5	5	6	6	6	8
11	19	27	34	40	44	48	50	52	52
51	49	46	42	38	36	34	33	33	33
34	35	37	39	41	42	44	44	43	41
37	30	21	9	-5	-24	-47	-75	-109	-149
-194	-246								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3/1000) FROM 850101 TO 860101

-2	-2	0	0	0	-1	-5	-12	-4	0
0	0	0	-1	-3	-3	-3	-2	-2	-2
-2	-2	0	0	0	0	-1	-1	-2	-3
-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	-2	-3	-2	-1	0	-2	-4	-3	0
-2	-3	-1	-5	-6	-2	-5	-5	-1	-4
-3	0	-2	-2	0	-2	-2	0	-3	-4
-3	0	-2	-2	0	-4	-5	-4	0	-3
-4	0	-2	0	-3	-3	0	-1	0	-1
0	-2	-5	-5	-5	-4	-3	-2	-1	-1
-2	-3	-5	-8	-11	-13	-14	-15	-15	-15
-15	-14	-13	-11	-10	-9	-7	-6	-6	-6
-8	-11	-16	-22	-31	-42	-59	-81	-111	-149
-194	-246								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3/1000) FROM 850101 TO 860101

95	95	93	90	86	81	77	75	119	109
103	100	99	102	111	125	145	110	82	61
43	28	13	2	0	0	1	0	8	17
27	38	52	65	76	83	87	87	86	83
78	71	61	49	35	21	21	19	16	10
11	10	6	9	9	6	9	9	6	10
11	10	15	17	15	19	20	18	21	21
18	12	14	13	10	14	15	13	8	10
9	6	7	6	9	9	6	7	6	10
11	22	32	39	45	49	52	53	54	53
53	52	51	50	50	49	49	49	49	49
49	50	50	51	51	51	51	51	50	48
45	42	37	32	25	18	11	5	1	0
0	0								

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 860101 TO 870101

68	68	67	65	65	69	73	78	73	68
69	71	71	73	79	96	87	84	86	87
80	64	52	7	3	0	7	17	66	152
245	348	269	204	151	109	81	76	74	68
61	55	47	36	24	18	23	24	20	11
15	14	7	14	14	8	14	14	7	13
14	9	16	17	13	19	19	15	22	24
20	13	17	16	10	18	21	17	8	14
13	6	9	6	12	12	6	11	9	14
15	24	39	50	57	61	63	64	63	62
61	60	59	58	57	56	56	56	56	57
57	58	58	59	61	62	64	66	68	71
74	78	81	85	89	92	95	98	101	103
104	104								

NET TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 860101 TO 870101

65	65	64	61	57	53	48	44	49	54
56	55	49	36	16	-10	26	45	57	63
63	59	52	7	3	0	-6	-17	66	152
245	348	269	204	150	107	73	46	27	14
7	5	6	9	13	18	16	14	12	11
9	8	6	5	5	4	5	5	6	7
8	9	10	12	13	13	14	14	14	13
13	13	12	11	10	9	8	8	7	7
6	6	5	5	5	6	6	8	9	12
15	16	18	20	22	25	27	30	33	35
37	39	41	42	43	44	44	44	44	44
43	41	39	36	33	28	23	17	10	3
-5	-14	-23	-33	-42	-51	-59	-67	-73	-78
-81	-82								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3/1000) FROM 860101 TO 870101

-1	-1	-1	-1	-3	-8	-12	-17	-12	-7
-6	-8	-11	-18	-31	-53	-30	-19	-14	-11
-8	-2	0	0	0	0	-7	-17	0	0
0	0	0	0	0	0	-3	-15	-23	-26
-26	-24	-20	-13	-5	0	-3	-5	-3	0
-2	-3	0	-4	-4	-1	-4	-4	0	-3
-2	0	-2	-2	0	-2	-2	0	-4	-5
-3	0	-2	-2	0	-4	-6	-4	0	-3
-3	0	-2	0	-3	-3	0	-1	0	-1
0	-4	-10	-15	-17	-18	-17	-16	-15	-13
-11	-10	-8	-7	-6	-6	-5	-5	-6	-6
-7	-8	-9	-11	-14	-17	-20	-24	-29	-34
-40	-46	-52	-59	-65	-72	-77	-83	-87	-90
-92	-93								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3/1000) FROM 860101 TO 870101

67	67	65	63	61	61	61	61	61	61
62	63	60	55	48	43	57	64	72	75
71	62	52	7	3	0	0	0	66	152
245	348	269	204	151	108	77	61	51	41
34	30	26	22	18	18	19	19	16	11
12	11	7	10	9	6	9	10	7	10
11	9	13	14	13	16	17	14	18	19
17	13	15	14	10	14	15	13	8	10
9	6	7	6	9	9	6	9	9	13
15	20	28	35	40	43	45	47	48	49
49	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50	49	49	48	47	45	44	42	39	37
34	31	29	26	23	20	18	15	13	12
11	10								

SHORELINE POSITION (M) AFTER 1461 TIME STEPS. DATE IS 870101

269.20	273.00	276.86	280.81	284.91	289.27	294.02	299.18	304.75	310.74
317.13	323.99	331.09	337.80	343.72	348.73	353.06	357.31	361.61	365.70
369.14	371.53	438.32	217.75	215.54	222.69	227.50	500.23	494.11	482.03
462.99	341.98	317.79	298.27	282.29	268.63	256.52	245.71	236.35	229.05
223.98	220.92	219.44	218.93	218.98	214.35	215.34	216.85	218.79	219.37
222.01	224.94	228.14	231.52	235.07	240.10	243.89	247.71	251.95	255.77
259.54	261.25	264.94	268.63	271.35	275.00	278.65	283.06	286.63	290.11
293.49	292.70	296.04	299.44	300.88	304.45	308.10	311.82	316.21	319.94
323.63	327.32	330.94	334.97	338.50	341.98	344.73	348.07	346.86	350.16
346.94	350.96	355.61	360.84	366.54	372.59	378.87	385.29	391.77	398.26
404.72	411.14	417.51	423.84	430.17	436.53	442.99	449.57	456.35	463.36
470.67	478.33	486.39	494.90	503.92	513.50	523.67	534.47	545.92	558.04
570.88	584.46	598.78	613.78	629.40	645.68	662.56	679.80	697.20	714.73
732.35									

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 870101 TO 880101

59	59	58	57	55	54	55	57	59	62
64	67	69	71	71	71	70	67	61	53
40	24	22	4	1	1	10	17	67	149
226	294	297	290	276	256	232	206	179	152
125	99	76	56	38	20	20	21	17	8
13	13	7	13	14	8	14	13	7	14
14	9	16	16	12	18	19	14	22	24
21	13	17	17	11	20	22	18	8	14
14	7	10	6	13	13	7	12	10	15
14	24	38	48	55	59	60	61	65	74
67	62	57	57	57	57	57	58	59	60
61	63	64	66	67	69	71	73	74	76
79	81	83	85	86	88	90	91	92	92
92	92								

NET TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 870101 TO 880101

57	57	56	54	52	49	45	40	36	31
26	22	17	14	11	8	7	6	6	7
11	15	22	4	1	-1	-9	-17	67	149
226	294	297	290	276	256	232	206	179	152
125	99	76	55	37	20	15	11	9	7
6	5	5	5	5	5	6	6	7	7
8	9	10	11	12	13	13	14	14	15
14	13	11	8	3	6	8	8	8	8
7	7	6	6	6	7	7	9	10	12
14	15	17	20	23	27	33	39	48	58
52	47	44	42	40	39	37	36	35	33
31	29	26	23	19	14	9	4	0	-6
-12	-18	-24	-30	-35	-40	-45	-49	-52	-54
-56	-57								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3/1000) FROM 870101 TO 880101

0	0	-1	-1	-1	-2	-4	-8	-11	-15
-18	-22	-25	-28	-30	-31	-31	-30	-27	-22
-14	-4	0	0	0	-1	-10	-17	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-2	-4	-3	0
-3	-3	0	-4	-4	-1	-4	-3	0	-3
-2	0	-2	-2	0	-2	-2	0	-3	-4
-3	0	-2	-4	-3	-6	-7	-4	0	-3
-3	0	-1	0	-3	-3	0	-1	0	-1
0	-4	-10	-14	-15	-15	-13	-10	-8	-8
-7	-7	-6	-7	-8	-9	-9	-10	-12	-13
-14	-16	-19	-21	-24	-27	-30	-34	-37	-41
-45	-49	-53	-57	-61	-64	-67	-70	-72	-73
-74	-74								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3/1000) FROM 870101 TO 880101

58	58	57	56	54	51	50	49	47	46
45	44	43	42	41	40	38	36	34	30
25	20	22	4	1	0	0	0	67	149
226	294	297	290	276	256	232	206	179	152
125	99	76	56	37	20	18	16	13	7
10	9	6	9	9	6	10	10	7	10
11	9	13	14	12	15	16	14	18	20
18	13	14	12	7	13	15	13	8	11
10	7	8	6	10	10	7	10	10	13
14	20	28	34	39	43	47	50	56	66
59	54	51	49	48	48	47	47	47	47
46	46	45	44	43	42	40	38	37	35
33	31	29	27	25	23	22	20	19	18
18	17								

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 880101 TO 881231

56	56	56	57	57	57	58	59	60	61
63	64	65	66	67	66	65	62	57	50
38	23	12	4	0	2	10	15	12	30
52	72	91	107	119	128	134	136	135	130
123	113	102	90	77	64	51	40	28	14
15	14	7	13	14	8	14	14	7	13
14	9	16	17	12	18	19	15	22	25
21	11	16	17	12	20	22	19	9	15
16	11	15	13	19	19	14	16	14	18
17	26	37	46	53	56	59	60	61	61
60	59	57	56	56	57	59	60	61	63
64	66	67	69	70	72	73	75	76	78
79	81	82	83	84	85	86	87	87	87
87	87								

NET TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 880101 TO 881231

43	43	43	42	41	40	38	36	34	32
30	27	25	23	20	18	16	15	13	12
12	11	12	4	0	-2	-9	-15	7	30
52	72	91	107	119	128	134	136	135	130
123	113	102	90	77	64	50	37	25	14
10	7	4	4	4	4	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	13	14	13	12
11	10	6	2	-2	0	2	4	7	8
10	11	12	12	13	13	14	14	14	16
17	21	25	29	34	38	42	46	50	52
53	52	51	49	46	43	40	37	33	30
26	22	18	14	10	6	2	-1	-5	-10
-14	-18	-22	-26	-30	-33	-36	-38	-40	-42
-43	-43								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3/1000) FROM 880101 TO 881231

-6	-6	-6	-7	-7	-8	-9	-11	-12	-14
-16	-18	-20	-21	-23	-24	-24	-23	-22	-18
-13	-5	0	0	0	-2	-10	-15	-2	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0
-2	-3	-1	-4	-5	-1	-4	-4	0	-3
-2	0	-2	-2	0	-2	-2	0	-4	-6
-4	0	-5	-7	-7	-10	-10	-7	0	-3
-2	0	-1	0	-3	-3	0	-1	0	-1
0	-2	-5	-8	-9	-9	-8	-6	-5	-4
-3	-3	-2	-3	-5	-7	-9	-11	-13	-16
-19	-21	-24	-27	-30	-32	-35	-38	-41	-44
-47	-49	-52	-55	-57	-59	-61	-63	-64	-65
-65	-65								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3/1000) FROM 880101 TO 881231

50	50	50	49	49	49	48	48	47	47
46	46	45	44	44	42	41	38	35	31
25	17	12	4	0	0	0	0	10	30
52	72	91	107	119	128	134	136	135	130
123	113	102	90	77	64	51	39	27	14
13	10	6	8	9	6	9	9	7	10
11	9	13	14	12	15	16	14	18	18
16	11	11	9	5	10	12	12	8	12
13	11	13	13	16	16	14	15	14	17
17	23	31	38	43	47	51	53	55	56
56	55	54	52	51	50	49	48	47	46
45	44	43	42	40	39	38	36	35	34
32	31	29	28	27	26	25	24	23	22
22	21								

SHORELINE POSITION (M) AFTER 2923 TIME STEPS. DATE IS 890101

269.20	275.18	281.18	287.20	293.26	299.36	305.46	311.58	317.68	323.75
329.74	335.79	341.82	347.27	351.76	355.29	357.91	359.74	360.80	361.08
360.55	359.35	484.69	230.90	225.66	251.74	251.41	304.11	303.39	302.56
302.12	301.92	301.76	301.70	301.69	301.14	299.71	297.50	294.65	291.34
287.71	283.84	279.83	275.76	271.73	249.49	246.22	243.65	241.83	229.06
228.72	229.10	230.16	231.76	233.86	238.62	241.53	244.70	248.66	252.20
255.88	257.94	261.83	265.84	268.47	272.78	277.27	282.80	287.60	292.53
297.57	304.51	309.77	315.10	325.16	330.45	335.62	340.62	347.15	351.72
356.02	359.47	363.26	366.84	370.17	373.30	375.04	377.73	374.15	376.56
370.76	373.50	376.61	380.09	383.95	388.15	392.69	397.53	402.68	408.05
413.63	419.41	425.37	431.52	437.86	444.45	451.30	458.45	465.94	473.79
482.04	490.72	499.83	509.40	519.43	529.94	540.92	552.37	564.29	576.65
589.45	602.68	616.30	630.28	644.58	659.21	674.13	689.21	704.35	719.55
734.78									

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 881231 TO 891231

59167	59167	59194	59255	59360	59516	59732	59995	60288	60582
60812	60875	60619	59888	58620	56799	54349	51049	46501	41113
33839	23234	9541	4946	1286	2677	6728	7373	32969	64369
60372	60200	62080	64557	67057	70467	74387	78178	81648	84693
80917	81911	84427	85341	84843	83162	73102	63502	52668	40938
33261	24430	11969	15112	13819	7635	13990	14038	7812	13799
13983	9102	15520	16249	11297	17437	18942	15154	22929	25089
21564	12339	17358	16521	9726	18872	21850	18602	9148	15043
14806	9204	13253	12014	18138	18942	14330	17894	16731	20716
20486	27030	38591	48536	56422	62092	66218	69558	72834	69810
67336	65331	63737	62552	61790	61445	61489	61888	62596	63568
64762	66138	67659	69294	70973	72593	74135	75649	77132	78529
79776	80780	81424	81577	81090	79793	77454	73788	68517	61335
58543	58557								

NET TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 881231 TO 891231

38494	38494	38304	37929	37381	36678	35849	34939	33996	33071
32216	31484	30919	30500	30099	29532	28596	27119	25015	22240
18751	14520	9522	4946	1101	-2677	-5716	-6762	26667	62067
59233	58050	58351	59890	62350	65317	68262	70623	71888	71668
77669	81911	84427	85341	84843	83162	72997	62313	51506	40938
30568	20872	11926	8796	6422	4741	4582	4984	5854	6695
7809	9102	9836	10589	11297	11285	11178	10968	10361	9663
8891	8063	6872	5701	4600	4887	5291	5807	6423	7248
8161	9154	9914	10757	11729	12781	13905	15307	16731	18663
20486	21846	22870	23416	23324	22419	20513	17396	12836	20301
26217	30718	33929	35968	36946	36977	36169	34628	32454	29738
26565	23012	19147	15032	10725	6275	1746	-2793	-7261	-11552
-15536	-19041	-21851	-23715	-24354	-23464	-20664	-15538	-7749	2987
16989	26683								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3) FROM 881231 TO 891231

-10336	-10336	-10444	-10662	-10989	-11419	-11941	-12528	-13146	-13755
-14297	-14695	-14850	-14693	-14260	-13633	-12876	-11965	-10742	-9436
-7544	-4356	-9	0	-92	-2677	-6222	-7068	-3150	-1151
-569	-1074	-1864	-2333	-2353	-2574	-3062	-3777	-4879	-6512
-1624	0	0	0	0	0	-52	-594	-581	0
-1346	-1778	-21	-3158	-3698	-1446	-4703	-4527	-978	-3552
-3087	0	-2841	-2830	0	-3076	-3882	-2092	-6284	-7712
-6336	-2137	-5242	-5410	-2562	-6992	-8279	-6397	-1362	-3897
-3322	-25	-1669	-628	-3204	-3080	-212	-1293	0	-1026
0	-2591	-7860	-12560	-16549	-19836	-22852	-26081	-29998	-24754
-20559	-17306	-14903	-13292	-12421	-12233	-12659	-13629	-15071	-16915
-19098	-21563	-24256	-27130	-30123	-33159	-36194	-39221	-42196	-45041
-47656	-49910	-51638	-52646	-52722	-51628	-49059	-44663	-38133	-29174
-20777	-15936								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3) FROM 881231 TO 891231

48830	48830	48749	48592	48370	48097	47790	47467	47142	46827
46514	46179	45769	45194	44359	43166	41472	39084	35758	31677
26295	18877	9531	4946	1193	0	505	305	29818	63218
59802	59125	60216	62223	64704	67892	71324	74401	76768	78181
79293	81911	84427	85341	84843	83162	73050	62907	52087	40938
31915	22651	11948	11954	10120	6188	9286	9511	6833	10247
10896	9102	12678	13419	11297	14361	15060	13061	16645	17376
15227	10201	12115	11111	7163	11879	13571	12204	7785	11146
11484	9179	11583	11385	14934	15862	14118	16601	16731	19690
20486	24438	30730	35976	39873	42255	43365	43477	42835	45055
46777	48025	48833	49260	49368	49211	48829	48258	47525	46653
45664	44575	43403	42163	40849	39434	37941	36428	34935	33488
32120	30869	29786	28931	28367	28164	28395	29125	30384	32161
37766	42620								

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 891231 TO 901231

58402	58402	58411	58441	58514	58663	58927	59340	59934	60726
61695	62786	63883	64818	65393	65366	64380	61950	57494	50335
39704	25076	8866	4865	1159	1952	3038	4404	11751	19766
28145	35861	42272	47306	51266	54703	58718	62250	65332	67997
70246	72046	73337	74046	74092	73402	70844	67662	63676	58914
50875	42064	31642	27579	21644	11767	15279	14244	7579	14149
14958	10260	17537	19632	16221	23576	25912	23276	29827	31487
28177	19850	21407	17613	9682	18260	22415	20809	13521	19171
19349	14534	18600	17941	23692	24714	20981	23919	22739	24659
22934	26976	38698	49205	56749	61957	65398	67520	68622	68780
68464	67938	67368	66888	66588	66498	66614	66907	67345	67891
68511	69172	69850	70524	71137	71603	71917	72157	72359	72516
72624	72675	72660	72561	72357	72018	71500	70768	69795	68594
67230	66346								

NET TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 891231 TO 901231

37474	37474	37499	37546	37611	37684	37742	37744	37642	37392
36943	36242	35238	33877	32122	29959	27411	24534	21419	18176
14926	11789	8857	4865	1112	-1952	837	4404	11714	19078
26227	32998	39274	44989	50123	54691	58718	62250	65332	67997
70246	72046	73337	74046	74092	73402	70844	67531	63523	58914
49992	40821	31642	24593	17909	11709	9605	8063	7042	7736
8829	10239	11519	12926	14374	14635	14826	14923	14322	13628
12862	12048	10910	9811	8806	9150	9637	10258	11001	12077
13236	14452	15667	16886	18166	19397	20556	21709	22739	22909
22934	21888	20761	19616	18520	17549	16788	16344	16344	17008
18041	19240	20431	21469	22234	22632	22598	22095	21110	19656
17773	15526	12998	10293	7529	4832	2336	174	-1526	-2654
-3120	-2865	-1878	-188	2137	4990	8196	11526	14759	17661
19962	21352								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3) FROM 891231 TO 901231

-10464	-10464	-10455	-10447	-10451	-10489	-10592	-10797	-11145	-11666
-12376	-13271	-14322	-15470	-16635	-17703	-18484	-18708	-18037	-16079
-12389	-6643	-4	0	-23	-1952	-1100	0	-18	-343
-958	-1431	-1499	-1158	-571	-6	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-65	-76	0
-441	-621	0	-1493	-1867	-29	-2837	-3090	-268	-3206
-3064	-10	-3009	-3352	-923	-4470	-5543	-4176	-7752	-8929
-7657	-3901	-5248	-3900	-437	-4555	-6388	-5275	-1260	-3546
-3056	-41	-1466	-527	-2763	-2658	-212	-1104	0	-874
0	-2543	-8968	-14794	-19114	-22204	-24305	-25587	-26139	-25886
-25211	-24349	-23468	-22709	-22177	-21933	-22007	-22406	-23117	-24117
-25368	-26823	-28426	-30115	-31804	-33385	-34790	-35991	-36943	-37585
-37872	-37770	-37269	-36375	-35110	-33514	-31652	-29620	-27517	-25466
-23633	-22496								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3) FROM 891231 TO 901231

47938	47938	47955	47994	48063	48174	48334	48542	48788	49059
49319	49514	49560	49347	48757	47663	45895	43242	39456	34255
27315	18432	8861	4865	1135	0	1938	4404	11733	19422
27186	34430	40773	46147	50695	54697	58718	62250	65332	67997
70246	72046	73337	74046	74092	73402	70844	67596	63600	58914
50433	41443	31642	26086	19777	11738	12442	11154	7311	10942
11893	10250	14528	16279	15297	19105	20369	19100	22074	22557
20519	15949	16158	13712	9244	13705	16026	15533	12261	15624
16293	14493	17133	17413	20929	22055	20768	22814	22739	23784
22934	24432	29730	34410	37634	39753	41093	41932	42483	42894
43253	43589	43900	44179	44411	44565	44606	44501	44227	43774
43142	42349	41424	40409	39333	38217	37126	36166	35416	34931
34751	34905	35390	36186	37247	38504	39848	41147	42277	43128
43596	43849								

SHORELINE POSITION (M) AFTER 4383 TIME STEPS. DATE IS 910101

269.20	275.48	281.77	288.08	294.40	300.75	307.11	313.47	319.81	326.11
332.34	338.64	345.06	351.19	356.72	361.63	365.84	369.24	371.76	373.34
373.96	373.78	500.25	317.43	310.82	324.86	319.49	302.82	298.42	294.77
292.02	290.01	288.61	287.93	288.02	288.49	289.02	289.60	290.20	290.72
291.10	291.29	291.24	290.95	290.40	286.94	285.99	284.92	283.76	278.50
277.39	276.42	263.06	262.62	262.59	257.13	258.01	259.37	260.27	262.59
265.36	268.67	272.29	276.31	282.40	287.01	291.85	299.38	304.51	309.71
314.94	323.12	328.27	333.30	338.40	343.22	347.94	352.54	358.09	362.35
366.40	370.26	373.89	377.12	380.40	383.53	384.79	387.66	384.72	387.59
384.57	388.07	392.09	396.64	401.75	407.39	413.56	420.22	427.33	434.84
442.69	450.83	459.20	467.76	476.49	485.38	494.42	503.59	512.91	522.37
531.98	541.73	551.62	561.65	571.82	582.10	592.50	602.98	613.53	624.13
634.76	645.39	656.02	666.61	677.17	687.69	698.15	708.57	718.96	729.32
739.67									

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 901231 TO 911231

61351	61351	61391	61483	61648	61919	62328	62906	63672	64634
65767	67006	68236	69267	69884	69836	68767	66196	61555	54180
43259	27719	7269	4990	1561	1127	3753	5425	10520	17461
25344	33428	40398	45832	49760	52316	53898	55391	58764	62022
64740	66885	68421	69301	69408	68429	67493	65660	62882	59001
55855	51243	44644	40191	33298	22208	23894	20817	11381	17588
17199	9627	18340	20538	15516	25098	27890	24137	32467	34644
31075	21205	24000	19910	11219	20842	24764	22408	13145	20474
20651	14411	19498	17775	24832	25725	20374	24069	21500	24986
22332	29185	41576	52031	59367	64295	67423	69263	70216	70593
70615	70428	70136	69847	69645	69570	69625	69794	70049	70367
70716	71080	71443	71800	72144	72482	72769	72943	73008	73031
73048	73085	73135	73171	73175	73129	73009	72784	72437	71941
71247	70246								

NET TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 901231 TO 911231

41479	41479	41341	41061	40636	40057	39318	38408	37322	36055
34604	32976	31183	29227	27107	24848	22497	20109	17737	15429
13168	10723	7197	4990	1557	-1097	1999	5425	10061	14967
20173	25545	30919	36200	41330	46230	50814	55012	58764	62022
64740	66885	68421	69301	69408	68429	67492	65508	62735	59001
55221	50472	44644	38241	30811	22208	19779	16193	11381	12093
11518	9600	11585	12146	11294	13135	13525	12539	13934	14186
13755	12095	13351	13081	11168	13067	13594	13383	11844	14266
15088	14360	16575	16692	19079	20117	19804	21722	21500	23143
22332	24054	24375	24240	23979	23682	23376	23069	22760	22448
22122	21773	21386	20947	20442	19861	19198	18452	17629	16739
15798	14829	13857	12909	12009	11185	10465	9877	9428	9094
8888	8821	8881	9047	9288	9579	9889	10188	10447	10644
10731	10601								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3) FROM 901231 TO 911231

-9935	-9935	-10024	-10210	-10505	-10930	-11505	-12248	-13174	-14289
-15581	-17015	-18526	-20020	-21388	-22493	-23134	-23043	-21908	-19375
-15045	-8498	-36	0	-1	-1112	-876	0	-229	-1247
-2585	-3941	-4739	-4816	-4214	-3042	-1541	-189	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-76	-73	0
-317	-385	0	-975	-1243	0	-2057	-2311	0	-2747
-2840	-13	-3377	-4196	-2111	-5981	-7182	-5799	-9266	-10228
-8660	-4554	-5324	-3414	-25	-3887	-5584	-4512	-650	-3103
-2781	-25	-1461	-541	-2876	-2804	-284	-1173	0	-921
0	-2565	-8600	-13895	-17693	-20306	-22023	-23096	-23727	-24072
-24246	-24327	-24374	-24450	-24601	-24854	-25213	-25670	-26210	-26814
-27458	-28125	-28792	-29445	-30067	-30648	-31152	-31532	-31789	-31968
-32080	-32132	-32126	-32061	-31943	-31774	-31559	-31297	-30995	-30648
-30258	-29822								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3) FROM 901231 TO 911231

51415	51415	51366	51272	51142	50988	50823	50657	50497	50345
50185	49991	49710	49247	48496	47342	45632	43152	39646	34804
28214	19221	7233	4990	1559	14	2876	5425	10291	16214
22759	29487	35658	41016	45545	49273	52356	55201	58764	62022
64740	66885	68421	69301	69408	68429	67492	65584	62809	59001
55538	50857	44644	39216	32055	22208	21836	18505	11381	14841
14359	9613	14962	16342	13405	19116	20707	18338	23201	24415
22415	16650	18676	16496	11193	16955	19179	17896	12494	17370
17870	14386	18036	17234	21955	22921	20089	22895	21500	24064
22332	26620	32975	38136	41673	43988	45399	46166	46488	46520
46369	46100	45761	45397	45044	44716	44412	44123	43839	43553
43257	42954	42650	42354	42076	41833	41617	41410	41218	41063
40968	40953	41008	41109	41232	41354	41449	41486	41442	41293
40989	40423								

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 911231 TO 921230

77334	77334	77329	77334	77371	77475	77687	78050	78599	79357
80312	81402	82501	83423	83943	83775	82491	79499	74045	65191
51833	32918	8035	4802	2080	434	4733	5847	12732	21992
32626	43004	51886	58997	64320	67995	70288	71505	71863	71755
73315	75448	76894	77565	77439	76707	76666	76045	74137	71262
68411	64264	58843	54668	48782	40450	37724	31819	21343	24528
22719	14589	21067	22987	18390	28125	31525	28686	37846	40666
36615	26200	27956	23192	14487	25036	29811	26819	16966	23719
24142	18289	22674	21854	28993	29971	24725	26826	24115	26560
24680	35175	51671	64440	73020	78416	81540	83131	83735	83743
83418	82917	82349	81824	81431	81201	81128	81187	81337	81550
81788	82035	82274	82504	82726	82941	83164	83392	83598	83718
83719	83667	83622	83592	83554	83475	83315	83030	82577	81938
81109	80158								

NET TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 911231 TO 921230

56568	56568	56362	55949	55332	54510	53493	52294	50929	49414
47765	45989	44087	42061	39901	37588	35084	32306	29103	25232
20382	14343	7417	4802	2080	-140	3141	5847	12056	18450
24997	31523	37855	43862	49460	54616	59313	63548	67311	70581
73315	75448	76894	77565	77439	76707	76646	75818	73954	71262
67865	63683	58843	53332	47143	40450	34705	28350	21343	19872
17631	14589	15236	15048	13964	15627	16420	16279	18417	19374
18649	16735	17118	16377	14487	17454	18946	18404	16490	18156
18760	18258	19837	20924	23182	24240	24096	24386	24115	24638
24680	29725	33801	36520	38068	38782	38966	38838	38531	38124
37657	37144	36595	36022	35437	34844	34242	33627	33000	32361
31716	31070	30436	29821	29233	28688	28189	27734	27347	27023
26729	26441	26189	25997	25845	25726	25618	25500	25353	25157
24935	24770								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3) FROM 911231 TO 921230

-10383	-10383	-10483	-10692	-11019	-11482	-12096	-12877	-13834	-14971
-16273	-17706	-19206	-20680	-22021	-23093	-23703	-23596	-22470	-19979
-15725	-9287	-308	0	0	-287	-795	0	-338	-1771
-3814	-5740	-7015	-7567	-7430	-6689	-5487	-3978	-2275	-586
0	0	0	0	0	0	-10	-113	-91	0
-273	-290	0	-668	-819	0	-1509	-1734	0	-2327
-2543	0	-2915	-3969	-2213	-6249	-7552	-6203	-9714	-10645
-8982	-4732	-5419	-3407	0	-3790	-5432	-4207	-238	-2781
-2691	-15	-1418	-465	-2905	-2865	-314	-1219	0	-960
0	-2724	-8935	-13959	-17476	-19816	-21287	-22146	-22601	-22809
-22880	-22886	-22876	-22900	-22996	-23178	-23443	-23780	-24168	-24594
-25035	-25482	-25919	-26341	-26746	-27126	-27487	-27829	-28125	-28347
-28494	-28613	-28716	-28797	-28854	-28874	-28848	-28765	-28611	-28390
-28086	-27694								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3) FROM 911231 TO 921230

66951	66951	66845	66642	66351	65992	65590	65172	64764	64386
64039	63695	63294	62742	61922	60681	58788	55903	51574	45212
36108	23631	7726	4802	2080	147	3937	5847	12394	20221
28811	37263	44871	51429	56890	61305	64801	67527	69587	71168
73315	75448	76894	77565	77439	76707	76656	75932	74046	71262
68138	63974	58843	54000	47963	40450	36215	30084	21343	22200
20175	14589	18152	19018	16177	21876	23972	22483	28131	30020
27632	21468	22537	19784	14487	21245	24378	22611	16728	20938
21451	18273	21255	21389	26088	27105	24410	25606	24115	25599
24680	32450	42736	50480	55544	58599	60253	60984	61133	60933
60537	60031	59472	58923	58434	58023	57685	57407	57169	56955
56752	56553	56355	56162	55980	55815	55676	55563	55472	55371
55224	55054	54906	54794	54700	54601	54466	54265	53965	53547
53022	52464								

SHORELINE POSITION (M) AFTER 5845 TIME STEPS. DATE IS 930101

269.20	276.11	283.04	289.98	296.96	303.95	310.95	317.93	324.87	331.75
338.53	345.36	352.31	359.00	365.08	370.54	375.36	379.58	383.27	386.62
389.79	393.21	509.26	328.59	319.69	313.21	308.38	282.80	277.58	273.12
270.12	268.49	267.88	268.25	269.60	271.51	273.61	275.89	278.31	280.81
283.34	285.91	288.48	291.04	293.57	288.80	291.14	293.39	295.50	291.65
293.74	295.92	284.85	287.51	290.51	272.17	276.24	281.00	261.71	267.75
274.41	263.88	271.60	279.80	275.96	284.79	293.84	292.92	302.30	311.84
321.48	320.24	330.21	340.32	329.49	339.50	349.28	358.81	350.66	359.76
368.63	363.32	371.65	368.65	376.57	384.35	380.85	388.63	380.82	389.00
371.91	379.73	387.08	394.06	400.81	407.50	414.29	421.31	428.63	436.29
444.27	452.55	461.06	469.76	478.64	487.70	496.90	506.23	515.69	525.25
534.90	544.64	554.45	564.34	574.29	584.31	594.38	604.51	614.72	625.05
635.42	645.75	656.09	666.47	676.88	687.34	697.85	708.40	718.98	729.59
740.22									

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 921230 TO 931230

163	163	161	161	167	180	173	100	139	207
178	158	145	128	113	100	89	78	66	54
41	27	13	4	1	4	44	7	69	135
122	111	102	97	93	89	86	83	81	79
79	78	76	73	69	65	63	61	65	69
69	72	74	72	70	68	62	57	52	48
45	41	43	47	39	32	25	19	28	30
27	16	21	20	12	23	29	30	17	23
22	16	21	21	27	28	24	26	24	26
24	32	48	61	70	76	80	82	83	83
83	83	82	82	81	81	81	81	81	81
81	81	82	82	82	82	83	83	83	83
83	83	83	83	83	83	83	82	82	81
81	80								

NET TRANSPORT VOLUME (M3/1000) FROM 921230 TO 931230

146	146	149	156	166	180	16	34	53	-106
-85	-65	-47	-29	-14	-1	9	16	21	23
22	18	13	4	1	-4	-39	4	69	135
122	110	100	91	83	76	71	67	65	63
62	61	60	60	59	58	56	53	60	66
69	72	74	72	70	68	62	56	52	46
42	41	42	46	39	28	20	13	11	9
8	7	8	9	9	6	2	-2	4	9
13	16	19	21	22	23	24	24	24	24
24	27	29	31	33	35	36	36	36	36
36	36	36	35	35	34	33	33	32	32
31	31	30	30	29	29	28	28	28	27
27	27	26	26	26	26	25	25	25	25
25	25								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3/1000) FROM 921230 TO 931230

-8	-8	-6	-2	0	0	-78	-33	-42	-156
-132	-112	-96	-79	-64	-51	-40	-30	-22	-15
-9	-4	0	0	0	-4	-41	-1	0	0
0	0	-1	-3	-5	-6	-7	-7	-8	-8
-8	-8	-7	-6	-5	-3	-3	-4	-2	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
-1	0	0	0	0	-1	-2	-3	-8	-10
-9	-4	-6	-5	-1	-8	-13	-16	-6	-6
-4	0	-1	0	-2	-2	0	-1	0	0
0	-2	-9	-14	-18	-20	-22	-22	-23	-23
-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-24	-24
-24	-25	-25	-26	-26	-26	-27	-27	-27	-27
-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28
-27	-27								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3/1000) FROM 921230 TO 931230

154	154	155	159	167	180	94	67	96	50
46	46	48	49	49	49	49	47	43	38
31	22	13	4	1	0	2	5	69	135
122	111	101	94	88	83	79	75	73	71
70	69	68	66	64	61	59	57	63	68
69	72	74	72	70	68	62	57	52	47
43	41	43	46	39	30	22	16	19	20
17	12	15	14	11	14	15	14	10	16
18	16	20	21	25	26	24	25	24	25
24	29	39	46	51	55	58	59	60	60
60	59	59	58	58	57	57	57	57	56
56	56	56	56	56	56	56	55	55	55
55	55	55	55	54	54	54	54	54	53
53	52								

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 931230 TO 941230

97891	97891	95920	92044	86383	79104	70498	62496	65279	69958
74562	78877	82662	85645	87566	88153	87026	83669	77472	67690
53344	33197	9010	4234	725	3115	6055	13308	20924	28619
36164	42965	48870	53821	57853	60981	63199	64570	65232	65380
65041	64345	63523	62782	62170	62065	60559	60511	61231	61332
60579	59505	59824	59910	59971	60378	59564	58896	58364	56246
54213	51485	48664	45107	39569	37116	32618	23122	28991	30629
25378	12150	20681	20502	11499	24407	28642	24370	11371	20088
19833	10813	17281	15249	24102	25402	18927	22966	20356	23941
22282	30451	46113	57757	65614	70693	73786	75501	76289	76484
76324	75961	75501	75057	74720	74524	74472	74541	74700	74922
75174	75437	75699	75947	76181	76405	76625	76850	77085	77336
77593	77773	77811	77740	77637	77518	77347	77082	76684	76107
75294	74186								

NET TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 931230 TO 941230

97891	97891	95920	92044	86383	79104	70498	61025	51149	41275
31780	23004	15226	8631	3307	-734	-3507	-5035	-5346	-4409
-2046	2155	8910	4234	273	-3115	4189	13308	20920	28278
35052	41265	46964	52068	56432	59952	62579	64302	65188	65380
65041	64345	63482	62660	62110	62065	60370	59267	58628	58349
58403	58851	59824	59188	59332	60378	58547	57838	58364	54625
52297	51485	45716	41689	39569	31776	26222	23122	15218	9826
6936	6889	2631	1618	3818	4	-979	615	4998	3627
5276	9838	10226	13458	12583	14099	17936	17865	20356	19895
22282	20055	19718	20372	21388	22404	23244	23847	24213	24365
24336	24162	23881	23520	23101	22647	22174	21694	21217	20745
20282	19827	19384	18952	18530	18122	17722	17334	16954	16585
16237	15949	15702	15461	15219	14985	14772	14595	14479	14450
14549	14825								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3) FROM 931230 TO 941230

0	0	0	0	0	0	0	-735	-7064	-14341
-21390	-27936	-33718	-38506	-42129	-44443	-45267	-44352	-41409	-36049
-27695	-15521	-49	0	-225	-3115	-932	0	-2	-170
-555	-849	-953	-876	-710	-514	-309	-134	-21	0
0	0	-20	-60	-29	0	-94	-622	-1301	-1491
-1087	-327	0	-361	-319	0	-508	-528	0	-810
-958	0	-1474	-1708	0	-2670	-3197	0	-6886	-10401
-9221	-2630	-9025	-9441	-3840	-12201	-14810	-11877	-3186	-8230
-7278	-487	-3527	-895	-5759	-5651	-495	-2550	0	-2023
0	-5197	-13197	-18692	-22112	-24144	-25271	-25826	-26037	-26059
-25993	-25899	-25809	-25768	-25809	-25938	-26149	-26423	-26741	-27088
-27445	-27805	-28157	-28497	-28825	-29141	-29451	-29758	-30065	-30375
-30677	-30912	-31054	-31139	-31209	-31266	-31287	-31243	-31102	-30828
-30372	-29680								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3) FROM 931230 TO 941230

97891	97891	95920	92044	86383	79104	70498	61760	58214	55616
53171	50941	48944	47138	45436	43709	41759	39316	36062	31640
25648	17676	8960	4234	499	0	5122	13308	20922	28449
35608	42115	47917	52945	57143	60466	62889	64436	65210	65380
65041	64345	63502	62721	62140	62065	60465	59889	59929	59840
59491	59178	59824	59549	59651	60378	59056	58367	58364	55435
53255	51485	47190	43398	39569	34446	29420	23122	22105	20228
16157	9520	11656	11060	7659	12206	13831	12492	8184	11857
12555	10326	13754	14353	18343	19751	18432	20416	20356	21918
22282	25253	32915	39064	43501	46548	48515	49674	50251	50425
50330	50061	49691	49288	48910	48585	48323	48118	47959	47834
47728	47632	47541	47449	47356	47263	47174	47092	47019	46960
46915	46861	46757	46600	46428	46251	46059	45839	45581	45278
44921	44506								

SHORELINE POSITION (M) AFTER 7305 TIME STEPS. DATE IS 950101

269.20	273.30	277.44	281.65	285.95	290.46	295.33	300.56	306.14	312.10
318.44	325.36	332.94	340.80	348.65	356.52	364.28	371.61	378.22	383.74
387.70	389.87	533.92	341.01	336.22	364.30	357.46	296.15	289.65	284.42
280.51	277.68	275.76	274.92	275.18	276.07	277.33	279.05	281.18	283.53
286.00	288.52	291.00	293.36	295.52	296.21	298.39	300.77	303.22	305.57
307.62	309.20	309.15	309.87	310.21	306.76	306.53	306.10	298.91	298.38
297.97	291.33	291.37	291.73	286.05	287.31	289.11	287.98	291.36	295.51
299.76	302.81	307.33	312.17	319.36	325.24	331.59	337.58	344.41	349.60
354.55	358.13	362.39	367.85	372.08	376.17	380.75	384.13	381.28	384.26
371.85	376.35	382.23	389.08	396.50	404.22	412.11	420.13	428.30	436.63
445.14	453.80	462.58	471.45	480.44	489.54	498.75	508.08	517.51	527.04
536.66	546.37	556.14	565.98	575.89	585.85	595.86	605.93	616.05	626.23
636.46	646.73	657.04	667.38	677.75	688.13	698.53	708.92	719.27	729.57
739.81									

LAST TIME STEP. DIFFRACTED WAVES ALONGSHORE

BREAKING WAVE HEIGHT

0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.13	0.20	0.27	0.35	0.47	0.58	0.62
0.62	0.63	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.66
0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67

BREAKING WAVE ANGLE TO X-AXIS

5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.73	5.86	5.98	6.07	6.14
6.20	6.47	6.85	6.80	6.40	6.41	7.09	7.85	8.01	7.29
6.07	5.09	3.35	-1.43	-1.21	-1.55	-3.32	-6.64	-10.16	-12.38
-12.84	-12.34	-11.63	-10.48	-8.99	-7.86	-6.98	-5.56	-3.36	-0.99
0.83	1.76	2.15	2.43	2.65	2.83	2.97	3.09	3.20	3.28
3.34	3.36	3.38	3.42	3.45	3.42	3.36	3.27	3.14	2.95
2.73	2.55	2.47	2.43	2.44	2.52	2.68	2.91	3.23	3.63
4.10	4.65	5.19	5.69	6.14	6.54	6.86	7.11	7.27	7.30
7.22	7.03	6.72	6.35	5.98	5.63	5.31	5.03	4.82	4.71
4.71	4.82	5.03	5.32	5.67	6.03	6.41	6.78	7.14	7.47
7.76	8.01	8.22	8.39	8.54	8.67	8.78	8.87	8.96	9.03
9.10	9.16	9.21	9.26	9.31	9.35	9.39	9.43	9.47	9.50
9.53	9.55	9.58	9.60	9.61	9.63	9.64	9.65	9.65	9.65
9.65	9.65								

9.65 9.65

GROSS TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 941230 TO 950601

4140	4140	3823	3188	2236	1024	910	2440	4491	6707
9017	11326	13513	15422	16821	17375	17473	18458	18376	16593
12930	7471	1054	2289	401	1703	5472	6443	12761	29056
9228	4920	8267	9291	8089	4514	5646	2301	3754	3780
3569	3380	3428	3638	3883	4083	4102	3970	3807	3621
4745	5622	5966	20764	13616	8778	10459	10802	10432	10850
10846	9559	9322	8300	6664	5386	3851	2238	1681	1580
966	344	1257	1708	1808	3307	3933	3133	2033	6038
11468	1374	785	691	1302	1232	585	1926	3176	4159
4710	967	5357	9490	12608	14733	16027	16704	16963	16969
16840	16654	16465	16319	16245	16252	16337	16485	16678	16901
17135	17370	17598	17815	18023	18219	18410	18593	18775	18953
19115	19255	19367	19445	19486	19491	19452	19372	19253	19115
18987	18909								

NET TRANSPORT VOLUME (M3) FROM 941230 TO 950601

4140	4140	3823	3188	2236	967	-605	-2440	-4491	-6707
-9017	-11326	-13513	-15422	-16821	-17375	-16828	-15233	-12828	-9776
-6153	-2275	1054	2289	291	-1703	-1616	4418	12761	29049
8635	-2103	-7238	-8905	-7966	-4474	1893	-2262	-3592	-3000
-1581	-97	1205	2346	3323	4083	4102	3970	3795	3576
4745	5622	5965	-7832	1415	8396	10453	10765	9218	10850
10846	9559	9322	8300	6664	5386	3851	2238	752	-251
-532	-330	-850	-1316	-1808	-2201	-2369	-2156	-2033	-6038
-11468	-1335	-340	-417	168	362	274	1926	3176	4159
4710	-444	-5357	-9490	-12608	-14733	-16027	-16704	-16963	-16969
-16840	-16654	-16465	-16319	-16245	-16252	-16337	-16485	-16678	-16901
-17135	-17370	-17598	-17815	-18023	-18219	-18410	-18593	-18775	-18953
-19115	-19255	-19367	-19445	-19486	-19491	-19452	-19372	-19253	-19115
-18987	-18909								

TRANSPORT VOLUME TO THE LEFT (M3) FROM 941230 TO 950601

0	0	0	0	0	-28	-757	-2440	-4491	-6707
-9017	-11326	-13513	-15422	-16821	-17375	-17150	-16845	-15602	-13184
-9542	-4873	0	0	-55	-1703	-3544	-1012	0	-3
-296	-3512	-7753	-9098	-8027	-4494	-1876	-2282	-3673	-3390
-2575	-1739	-1111	-645	-279	0	0	0	-6	-22
0	0	0	-14298	-6100	-190	-3	-18	-607	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-464	-915
-749	-337	-1054	-1512	-1808	-2754	-3151	-2645	-2033	-6038
-11468	-1355	-563	-554	-566	-434	-155	0	0	0
0	-705	-5357	-9490	-12608	-14733	-16027	-16704	-16963	-16969
-16840	-16654	-16465	-16319	-16245	-16252	-16337	-16485	-16678	-16901
-17135	-17370	-17598	-17815	-18023	-18219	-18410	-18593	-18775	-18953
-19115	-19255	-19367	-19445	-19486	-19491	-19452	-19372	-19253	-19115
-18987	-18909								

TRANSPORT VOLUME TO THE RIGHT (M3) FROM 941230 TO 950601

4140	4140	3823	3188	2236	995	152	0	0	0
0	0	0	0	0	0	322	1612	2774	3408
3388	2598	1054	2289	346	0	1927	5431	12761	29052
8931	1408	514	193	61	20	3770	19	80	389
994	1641	2317	2992	3603	4083	4102	3970	3801	3599
4745	5622	5966	6465	7516	8587	10456	10784	9825	10850
10846	9559	9322	8300	6664	5386	3851	2238	1216	664
217	7	203	196	0	552	782	488	0	0
0	19	222	136	735	797	430	1926	3176	4159
4710	261	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

OUTPUT OF BREAKING WAVE STATISTICS FOR SELECTED LOCATIONS
 N.B. WAVE DIFFRACTION IS NOT ACCOUNTED FOR!
 GRID CELL NUMBERS

1	2	5	7	10	13	15	18	20	23
26	28	31	34	36	39	41	44	47	49
52	55	57	60	62	65	68	70	73	75
78	81	83	86	89	91	94	96	99	102
104	107	110	112	115	117	120	123	125	128

AVERAGE UNDIFFRACTED BREAKING WAVE HEIGHTS (M).

0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74
0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

AVERAGE UNDIFFRACTED BREAKING WAVE ANGLE TO SHORELINE (DEG)

2.42	2.42	2.34	0.92	0.25	0.92	0.47	0.71	0.66	4.79
-4.10	0.42	5.88	4.63	4.05	3.28	2.95	2.45	1.98	1.67
1.30	0.94	0.85	0.70	3.19	2.95	1.73	0.39	0.31	1.56
0.19	0.25	0.39	0.48	3.59	5.21	0.68	0.69	0.75	0.85
0.79	0.69	0.54	0.40	0.14	-0.03	-0.34	-0.72	-1.01	-1.47

AVERAGE LONGSHORE TRANSPORT RATE BASED ON UNDIFFRACTED WAVES
*100 (M3/SEC)

0.20	0.20	0.20	0.14	0.09	0.11	0.07	0.08	0.07	0.33
-0.23	0.04	0.40	0.32	0.29	0.25	0.23	0.19	0.16	0.13
0.10	0.08	0.07	0.06	0.25	0.24	0.16	0.04	0.03	0.15
0.02	0.03	0.04	0.04	0.27	0.40	0.07	0.08	0.09	0.10
0.10	0.09	0.08	0.07	0.05	0.04	0.02	0.00	-0.02	-0.05

0.10	0.09	0.08	0.07	0.05	0.04	0.02	0.00	-0.02	-0.05
LONGSHORE TRANSPORT FOR LAST TIME STEP *100 (M3/SEC)									
0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04
-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.04	-0.01	0.02	0.06	0.09	0.10
0.10	0.07	0.03	0.01	0.01	-0.02	-0.09	-0.03	0.41	0.90
0.43	0.09	-0.12	-0.20	-0.19	-0.14	-0.10	-0.08	-0.09	-0.10
-0.10	-0.08	-0.05	-0.03	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
0.02	0.02	0.02	-0.08	-0.09	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	0.00
0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	-0.02	-0.09
-0.09	-0.04	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
0.02	0.00	-0.01	-0.03	-0.04	-0.06	-0.07	-0.08	-0.08	-0.09
-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
-0.10	-0.10								

CALCULATED FINAL SHORELINE POSITION (M)

269.20	273.87	278.58	283.35	288.22	293.28	298.61	304.22	310.10	316.22
322.56	329.25	336.33	343.26	349.57	355.44	361.30	367.20	372.71	377.31
380.94	384.19	531.73	344.56	339.80	364.16	601.27	535.58	514.67	275.82
254.40	241.45	233.31	227.78	223.43	219.09	214.67	211.24	209.87	210.72
213.08	215.94	218.74	221.40	223.94	225.84	228.29	230.78	233.35	233.23
235.85	238.43	232.80	237.14	241.67	247.03	250.02	253.00	264.70	267.20
269.17	260.50	262.03	263.56	257.09	258.87	260.88	259.26	261.90	264.93
268.44	272.46	276.99	281.98	288.62	294.25	300.15	306.47	320.40	328.32
336.28	356.31	362.53	366.68	371.73	376.43	377.80	381.93	379.55	383.32
380.83	384.97	389.56	394.69	400.38	406.63	413.40	420.65	428.35	436.42
444.81	453.46	462.31	471.31	480.44	489.68	499.01	508.42	517.90	527.46
537.08	546.77	556.53	566.36	576.24	586.19	596.19	606.25	616.36	626.51
636.70	646.93	657.18	667.46	677.75	688.06	698.39	708.71	719.04	729.36
739.68									

CALCULATED SEAWARDMOST SHORELINE POSITION (M)

269.20	276.15	283.11	290.09	297.07	304.07	311.06	318.03	324.96	331.85
338.68	345.61	352.75	359.76	366.25	372.50	379.13	385.69	391.45	395.95
399.33	403.65	534.68	344.56	339.80	381.98	603.36	586.41	582.20	572.11
555.50	377.09	354.95	337.49	322.90	311.60	305.14	299.52	297.10	302.89
304.10	302.93	300.74	297.84	296.89	298.32	301.47	309.32	313.81	313.88
315.01	316.33	311.16	310.59	312.56	306.78	306.67	308.84	299.43	299.12
300.68	292.85	292.94	294.73	288.54	289.71	295.85	299.53	304.91	312.69
322.55	326.17	332.21	342.20	339.13	344.21	350.97	360.65	360.54	365.03
372.81	372.47	377.66	380.14	383.42	389.23	389.84	393.39	386.64	391.93
385.13	388.66	392.71	397.32	402.47	408.15	414.67	421.71	429.18	437.04
445.26	453.82	462.58	471.48	480.53	489.71	499.02	508.42	517.90	527.46
537.08	546.77	556.53	566.36	576.24	586.19	596.19	606.25	616.36	626.51
636.70	647.18	659.07	670.82	682.33	693.47	704.15	715.07	727.45	737.62
743.03									

CALCULATED LANDWARDMOST SHORELINE POSITION (M)

168.11	167.16	166.21	165.25	164.30	12.49	168.20	170.44	32.45	174.95
177.36	179.86	182.28	184.65	187.60	190.68	192.97	195.46	198.07	200.58
202.49	203.49	206.52	207.32	207.91	207.77	208.12	199.77	198.27	197.44
197.10	197.82	199.36	201.34	203.47	205.73	208.00	207.80	206.81	205.81
204.86	203.90	203.92	204.36	204.84	199.56	206.41	208.76	211.12	209.31
215.79	218.95	214.02	229.65	233.67	232.88	240.79	243.59	242.16	250.88
254.54	250.99	260.42	262.53	252.81	258.63	260.37	259.17	261.79	264.79
268.24	272.46	276.96	281.55	288.62	294.25	299.60	304.81	308.35	316.86
321.14	323.47	330.49	329.22	338.08	341.55	342.83	346.89	345.13	350.07
336.27	344.56	352.28	359.43	366.14	372.56	378.82	385.01	391.13	397.28
403.55	408.58	412.65	419.67	426.86	434.01	441.15	448.28	455.23	461.47
467.85	474.42	481.18	488.20	495.43	502.85	510.46	518.26	526.17	534.20
542.45	550.49	559.91	569.31	578.67	588.12	597.62	607.07	616.50	625.93
635.36									

CALCULATED REPRESENTATIVE OFFSHORE CONTOUR POSITION (M)

569.20	574.42	579.64	584.86	590.09	595.31	600.81	606.42	612.14	617.96
623.86	629.80	636.92	643.60	649.71	655.39	662.55	670.59	679.29	686.61
692.36	696.42	698.73	696.85	693.90	689.99	684.72	674.19	659.52	641.12
623.01	605.60	589.16	573.86	561.05	549.26	538.54	529.19	523.24	520.19
519.85	520.24	521.09	522.27	523.72	525.39	527.24	529.22	531.34	533.56
535.89	538.22	540.52	542.95	545.39	547.80	550.14	552.35	554.43	556.23
557.77	559.03	560.23	561.39	562.51	563.77	565.23	566.95	569.11	571.73
574.95	578.88	583.52	588.78	594.61	600.96	607.69	614.75	622.05	629.36
636.55	643.56	650.11	656.19	661.80	666.96	671.70	676.10	680.21	684.19
688.15	692.28	696.65	701.42	706.63	712.30	718.45	725.08	732.15	739.67
747.54	755.75	764.21	772.89	781.76	790.80	799.98	809.28	818.69	828.19
837.78	847.44	857.17	866.97	876.83	886.74	896.71	906.73	916.79	926.90
937.04	947.22	957.43	967.66	977.91	988.18	998.48	1008.78	1019.08	1029.38
1039.68									

CALIBRATION/VERIFICATION ERROR = 16.4683

CALCULATED VOLUMETRIC CHANGE = +4.46E+06 (M3)

SIGN CONVENTION: EROSION (-), ACCRETION (+)

Por último se muestran a continuación los cálculos del archivo SHORC:

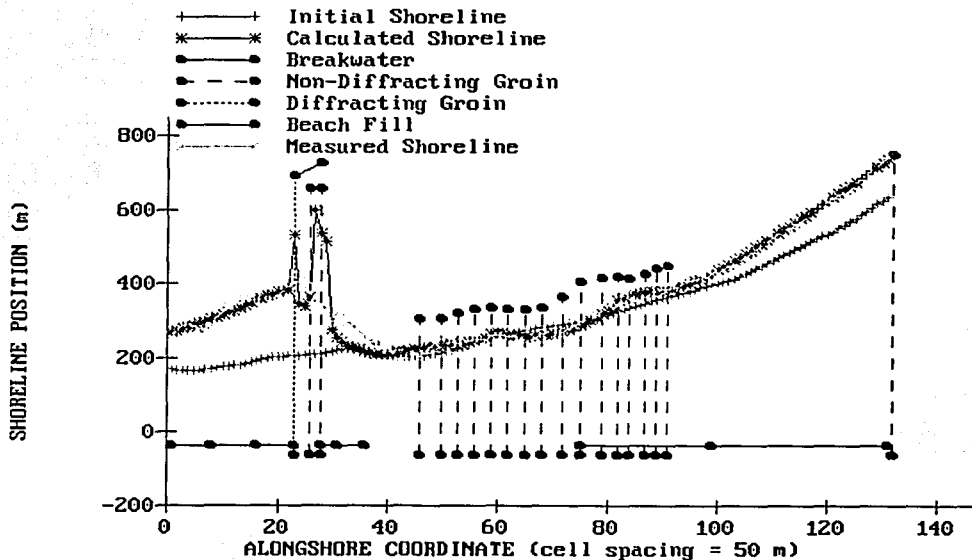
FINAL SHORELINE LOCATION. BY COPYING THIS FILE TO SHORL.DAT AND UP-DATING
START.DAT, THE MODEL MAY BE RUN AGAIN FOR A NEW CONFIGURATION.

269.20	273.87	278.58	283.35	288.22	293.28	298.61	304.22	310.10	316.22
322.56	329.25	336.33	343.26	349.57	355.44	361.30	367.20	372.71	377.31
380.94	384.19	531.73	344.56	339.80	364.16	601.27	535.58	514.67	275.82
254.40	241.45	233.31	227.78	223.43	219.09	214.67	211.24	209.87	210.72
213.08	215.94	218.74	221.40	223.94	225.84	228.29	230.78	233.35	233.23
235.85	238.43	232.80	237.14	241.67	247.03	250.02	253.00	264.70	267.20
269.17	260.50	262.03	263.56	257.09	258.87	260.88	259.26	261.90	264.93
268.44	272.46	276.99	281.98	288.62	294.25	300.15	306.47	320.40	328.32
336.28	356.31	362.53	366.68	371.73	376.43	377.80	381.93	379.55	383.32
380.83	384.97	389.56	394.69	400.38	406.63	413.40	420.65	428.35	436.42
444.81	453.46	462.31	471.31	480.44	489.68	499.01	508.42	517.90	527.46
537.08	546.77	556.53	566.36	576.24	586.19	596.19	606.25	616.36	626.51
636.70	646.93	657.18	667.46	677.75	688.06	698.39	708.71	719.04	729.36
739.68									

La siguiente figura es la representación gráfica de las posiciones de línea de costa:

Adolfo Lopez Mateos 1985 - 1995

01-16-2002



Quit - exit graphics
Q @ D E L C R V Z P S I

Figura A-1.1. Gráfica de las posiciones de línea de costa inicial, final y calculada

ANEXO 2

PROGRAMA DEL PERFIL DE DEAN

En este anexo se presenta el programa en lenguaje fortran utilizado para el cálculo del fondo marino para las diferentes líneas de costa. Este programa fue realizado por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería.

Para ejecutar el programa del perfil de Dean se necesitan ingresar los datos de línea de costa para las diferentes fechas que se desee calcular el fondo marino. Una vez ingresado los datos, se genera otro archivo que contiene datos en el plano XYZ.

C-----PERFILES DE PLAYA-----

```
C
  REAL D,W,A,DELTAX1(1000),DELTAX2(1000)
  REAL FIN(1000,1000),COSTA1,COSTA2
```

```
C
  G=9.81
  PI=4.*ATAN(1.)
```

```
C
  OPEN(1,FILE="perfil95.DAT")
  DO I=1,131
    READ(1,*) COSTA1,COSTA2
    DELTAX1(I)=COSTA1
    DELTAX2(I)=COSTA2
  ENDDO
  CLOSE(1)
```

C-----CALCULO DE LA BATIMETRIA-----

```
C
  D=0.2
  W=273*D**1.1
  A=0.51*(W/1000)**0.44
  DO I=1,131
    DO J=1,100
      IF(10*(J-1)-DELTAX2(I).LE.0.) THEN
        FIN(J,I)=-1
      ELSE
        FIN(J,I)=A*((10*(J-1))-DELTAX2(I))**(0.666)
      ENDIF
    ENDDO
  ENDDO
```

```
C
  **
  OPEN (2,FILE='resultados95.DAT')
  DO J=1,131
    DO I=1,100
      WRITE(2,*) DELTAX1(J),10*(I-1),-FIN(I,J)
    ENDDO
  ENDDO
  CLOSE(2)
```

```
C
  STOP
  END
```