



C116Z

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

EVOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA LÍNEA DE PLAYA

PRESENTA
JUAN MANUEL MORA CHAVARRÍA

DIRECTOR DE TESIS
Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA



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.

*Ese mar es una especie de eternidad,
cuando yo era niño, él golpeaba y golpeaba,
pero también golpeaba cuando era niño mi abuelo,
cuando era niño el abuelo de mi abuelo.*

*Una presencia móvil pero sin vida,
una presencia de olas oscuras, insensibles,
testigo de la historia, testigo inútil porque
no sabe nada de historia.*

Una presencia móvil, pero sin vida...

Mario Benedetti.

DEDICATORIAS

A mi madre Manuela, con mi más cariñoso, sincero y caro de los agradecimientos por su apoyo y comprensión en todo momento. Porque siempre me brindó el ejemplo y el amor de madre que es el más invaluable de los regalos. La consecución de esta meta es tan tuya como mía y te lo agradeceré toda la vida.

A mis hermanas Rosalía y Pandora, porque siempre creyeron en mí y me brindaron una confianza ingente.

A mis cuñados Salvador y Alejandro que con su amistad siempre me apoyaron.

A todos mis sobrinos: Jehnnatan, Julieta, Evelyn, Víctor, Kevin y Abix por todo el cariño que les tengo.

A Bibiana, porque le diste vida a mi vida, porque inspiras las más grandes acciones y porque me enseñaste que el amor verdadero llega hasta la última bolita del mundo y no importan las distancias. Gracias a ti aprendí que en este mundo todo es posible...

A todos mis familiares y amigos que con sus afecto y cariño contribuyeron para este logro.

... porque aún es posible el amor.

A. B. G. M.

AGRADECIMIENTOS

A todos los compañeros del cubículo 414-C: Georges, Juan Carlos, Bernice, Adrián, Gabriel, Adolfo y Francisco, porque con ellos conviví muchos años, porque eran, son y serán mis amigos por siempre. A ellos me une un gran afecto.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín por compartir conmigo todo su conocimiento técnico y humano, por brindarme su amistad y por aceptar dirigir este trabajo de tesis. Gracias también por su infinita paciencia.

Un agradecimiento muy especial al M. en I. Víctor Franco por su inmensa calidad humana y por la oportunidad que me brindó de pertenecer al Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.

Al Dr. Moisés Berezovsky, al Dr. Carlos Escalante y al Dr. Alejandro Rodríguez por la valiosa ayuda y comentarios que hicieron a este trabajo.

A la U.N.A.M.; mi alma mater

A la Facultad de Ingeniería por la formación que me brindó.

Al Instituto de Ingeniería y todo su personal por el respaldo.

Al Ing. Carlos Sánchez Sinares y al Departamento de Oceanografía de CFE por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
LISTA DE SÍMBOLOS.....	III
LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Introducción.....	1
I.2. Objetivos del trabajo.....	5
I.3. Aportaciones.....	5
I.4. Organización del trabajo.....	6

II. TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE

II.1. Introducción.....	7
II.2. Ecuaciones de gobierno.....	10
II.3. Refracción.....	10
II.4. Difracción.....	16
II.5. Someramiento.....	21
II.6. Rotura.....	22
II.7. Mecanismos de rotura.....	27
II.8. Reflexión.....	29
II.9. Resumen.....	30

III. MORFODINÁMICA DE PLAYAS

III.1. Introducción.....	32
III.2. Tipología de los estados morfodinámicos límites.....	35
III.3. Estado modal de una playa.....	43
III.4. Perfiles de playas.....	45
III.5. Profundidad de cierre.....	57
III.6. Resumen.....	60

IV. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

IV.1. Introducción.....	62
IV.2. Modelo de oleaje.....	64
IV.3. Modelo de transporte de sedimentos.....	69
IV.4. Fórmulas para el gasto de transporte longitudinal de sedimentos.....	70
IV.5. Valores numéricos de los coeficientes de transporte de sedimento K_1 y K_2	74
IV.6. Criterios teóricos para K_1 y K_2	75
IV.7. Soluciones numéricas a la ecuación de continuidad del sedimento.....	78
IV.8. Condiciones de contorno y límites de movimiento de la línea de costa.....	81
IV.9. Resumen.....	84

V. APLICACIÓN DEL MODELO OLT

V.1. Introducción.....	87
V.2. Localización y estado actual de la zona de estudio.....	88
V.3. Problemática del lugar.....	90
V.4. Datos disponibles.....	92
V.5. Evolución cronológica de las estructuras.....	101
V.6. Desarrollo.....	101
V.7. Predicción de la evolución de la línea de costa, diseño y estabilidad de las playas.....	106
V.8. Resumen.....	115

VI CONCLUSIONES

VI.1. Conclusiones.....	117
VI.2. Futuras líneas de investigación.....	120

BIBLIOGRAFÍA.....	121
-------------------	-----

ANEXO A

ESQUEMAS DE DIFRACCIÓN	124
------------------------------	-----

ANEXO B

TERMINOLOGÍA.....	130
-------------------	-----

ANEXO D

PERFILES DE LA ZONA DE TUXPAN VERACRUZ, DATOS DE OLEAJE Y LÍNEAS DE COSTA.....	133
--	-----

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Amplitud de la onda.
f	Frecuencia.
g	Aceleración de la gravedad.
h	Profundidad.
k	Número de onda.
n	Parámetro para determinar el perfil de equilibrio.
p	Presión.
p_D	Presión dinámica.
$\tan\beta$	Pendiente del fondo.
\bar{z}	Altura media desde el fondo hasta el centro de gravedad.
A	Parámetro para determinar el perfil de equilibrio.
B	Abertura entre dos rompeolas.
C	Celeridad de onda.
C_g	Celeridad de grupo.
C_f	Coefficiente de fricción.
D	Diámetro de sedimento.
D_c	Profundidad de cierre.
D_s	Disipación de energía por unidad de volumen.

\bar{F}	Flujo de energía.
H	Altura de onda.
H_B	Altura de ola en rotura.
H_D	Altura de ola en el área afectada por la difracción.
H_{mo}	Altura significativa obtenida a partir de un espectro.
H_{rms}	Altura cuadrática media.
H_s	Altura significativa.
\bar{H}	Altura de ola media.
I	Gasto de transporte de sedimentos en función del flujo de energía.
I_t	Número de Iribarren.
K_d	Coefficiente de difracción.
K_r	Coefficiente de refracción.
K_s	Coefficiente de someramiento.
K_1	Coefficiente empírico de transporte.
K_2	Coefficiente empírico de transporte.
L	Longitud de onda.
L_0	Longitud de onda en aguas profundas.
Q	Gasto de transporte de sedimentos.
Q_p	Parámetro para definir la agudeza de pico.
S_0	Peralte de la ola.
T	Periodo de onda.
Ω	Parámetro de escala de rompiente.

ε	Parámetro de escala de rompiente.
η	Superficie libre del mar.
γ	Coefficiente de criterio de rotura.
ν	Anchura espectral que depende de momentos de menor orden.
ρ	Densidad del agua.
ρ_s	Densidad del sedimento.
σ	Frecuencia angular.
ω	Velocidad de caída.
ζ	Desplazamiento de la partícula en la dirección x.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1. Valores de Iribarren para los cuatro tipos de rotura. Horikawa, 1988. _____ 25

Tabla II.2. Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de rotura, Silva, 1997. _____ 26

Tabla V.1. Localización de los levantamientos topobatimétricos. _____ 93

Tabla V.2. Perfiles disponibles a cada sección y fecha de levantamiento. _____ 94

Tabla V.3. Datos de dirección del oleaje incidente vs. altura de ola. Cortesía de CFE _____ 96

Tabla V.4. Comparación de los valores de K_1 y K_2 en los distintos periodos _____ 106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Playa Las Gatas, Zihuatanejo Gro, México.	2
Figura I.2. Playas Las Gatas, Zihuatanejo Gro, México.	3
Figura I.3. Boca del Río, Ver. México.	4
Figura II.1. Refracción del oleaje.	8
Figura II.2. Difracción del oleaje.	9
Figura II.3. Refracción del oleaje con líneas batimétricas rectas y paralelas a la línea de costa.	12
Figura II.4. Refracción del oleaje debido a la presencia de una cresta.	12
Figura II.5. Refracción del oleaje debido a la presencia de un cañón submarino.	12
Figura II.6. Refracción del oleaje con la presencia de una bahía y de un cabo.	13
Figura II.7. Características de los rayos del oleaje durante la refracción y con líneas batimétricas idealizadas.	15
Figura II.8. Diagrama de difracción con un ángulo de aproximación de 90° , SPM, 1984.	18
Figura II.9. Difracción entre dos rompeolas con abertura de $5L$, SPM, 1984.	19
Figura II.10. Diagrama de difracción con un abertura de $2L$ y con oleaje incidente a 45° y comparación con una abertura de $2L \sin 45^\circ$ con oleaje incidente a 90° , SPM, 1984.	20
Figura II.11. Sistema de coordenadas para el fenómeno de difracción.	67
Figura II.12. Esquema de la conservación del flujo de energía.	22
Figura II.13. Rotura del oleaje en descrestamiento.	24
Figura II.14. Rotura del oleaje en voluta.	24

Figura II.15. Rotura del oleaje en colapso.	25
Figura II.16. Rotura del oleaje en oscilación.	25
Figura II.17. Regiones en la zona de rotura.	26
Figura II.18. Reflexión del oleaje.	29
Figura III.1. Esquema de las principales partes de la zona costera.	34
Figura III.2. Esquema de las principales partes de la zona costera.	34
Figura III.3. Estado morfodinámico límite. Playa disipativa.	36
Figura III.4. Estado morfodinámico límite. Playa reflejante.	38
Figura III.5 Estado intermedio "Barra Longitudinal y Valle".	41
Figura III.6. Estado intermedio "Barras y Playas Rítmicas".	42
Figura III.7. Estado intermedio "Barra Transversal y RIP".	43
Figura III.8. Estado intermedio "Terrazas Mareales".	43
Figura III.9 Distribución de frecuencias de Ω y su correspondiente estado modal para distintas playas, Wright, 1984	45
Figura III.10. Variación del perfil de diversas playas en función de su estado modal, Wright, 1984.	46
Figura III.11. Perfil de Equilibrio propuesto por Bruun (1954).	47
Figura III.12. Equilibrio de flujo de energía en un perfil de playa.	50
Figura III.13. Variación del parámetro A con el tamaño del grano, Moore, 1982.	53
Figura III.14. Coeficientes de arrastre, C_D en función del número de Reynolds, CEM, 1998.	56
Figura III.15. Profundidad de cierre.	58
Figura III.16. Variabilidad temporal del perfil de playa en las cercanías en la planta Termoeléctrica "Adolfo López Mateos". Silva, 1996.	59
Figura IV.1. Esquema para calcular el oleaje.	66

Figura IV.2. Esquema para el cálculo del oleaje utilizando un contorno modificado en su orientación.	68
Figura IV.3. Esquema para la ecuación de continuidad del sedimento.	70
Figura IV.4. Definición de los ángulos asociados a las olas en rompientes.	72
Figura IV.5. Gráfica propuesta por Bruno et al., 1980. K_1 vs. diámetro de sedimento D_{50} , López de San Román, 1996.	75
Figura IV.6. Gráfica propuesta por Dean et al., 1980. K_1 vs. diámetro de sedimento D_{50} , López de San Román, 1996.	76
Figura IV.7. Dependencia de K_1 con el diámetro de sedimento D_{50} , López de San Román, 1996.	76
Figura IV.8. Representación de la posición de la línea de playa y de los gastos en diferencias finitas.	79
Figura IV.9. Representación de un muro costero en el modelo OLT.	84
Figura IV.10. Ejemplos hipotéticos del cambio de línea de costa en la presencia de un muro costero.	85
Figura V.1. Localización de la PT "Adolfo López Mateos"	88
Figura V.2. Croquis de las estructuras de la PT "Adolfo López Mateos" Tuxpan, Ver.	89
Figura V.3. Obra de toma de la PT "Adolfo López Mateos". Cortesía CFE.	90
Figura V.4. Erosión al sur de la obra de toma de la PT "ALM". Tuxpan, Ver.	91
Figura V.5. Sedimentación en el canal de llamada de la obra de toma de la PT "ALM"	91
Figura V.6. Transporte del material producto del dragado en los canales de llamada.	92
Figura V.7. Placas de concreto para disminuir el efecto de erosión en la zona sur de la obra de toma.	93
Figura V.8. Perfil en la sección 01, Tuxpan, Ver. Silva, 1996.	95

Figura V.9. Evolución de la línea de costa (1985 - 1988).	98
Figura V.10. Evolución de la línea de costa (1988 - 1989).	98
Figura V.11. Evolución de la línea de costa (1989 - 1990).	99
Figura V.12. Evolución de la línea de costa (1990 - 1996).	99
Figura V.13. Evolución de la línea de costa (1985 - 1996).	100
Figura V.14. Resultado de la simulación para el periodo de 1985 - 1988.	103
Figura V.15. Resultado de la simulación para el periodo de 1988 - 1989.	103
Figura V.16. Resultado de la simulación para el periodo de 1989 - 1990.	104
Figura V.17. Resultado de la simulación para el periodo de 1990 - 1996.	104
Figura V.18. Resultado de la simulación para el periodo de 1985 - 1996.	105
Figura V.19. Resultado de la simulación para el periodo de 1985 - 2009.	107
Figura V.20. Resultado de la simulación sin batería de espigones para el periodo de 1985 - 2009.	108
Figura V.21. Playa Pedregalejo, Málaga, España. CIRIA Special Publication 83, 1991.	110
4	
Figura V.22. Playa Rihuete. Murcia, España. CIRIA Special Publication 83, 1991.	111
Figura V.23. Playa Rockaway, Nueva York, EUA, SPM, 1984.	112
Figura V.24. Dade County, Florida, EUA. SPM, 1984.	113
Figura V.25. Playa Carolina, Carolina del Norte, EUA. SPM, 1984.	114

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Introducción

Parece superfluo mencionar que el hombre desde su aparición, tuvo la necesidad de localizar sus asentamientos al lado de grandes volúmenes de agua para satisfacer sus necesidades más elementales; sin embargo, cuando el hombre en su afán de conocer e investigar más allá de sus dominios terrestres, inició sus travesías en el mar y cuando vio la riqueza de éste, se inició la historia hombre-mar. Desde el Faraón Snefru que llevó 40 embarcaciones desde Babilonia hasta Fenicia en el año 3200 A. C., pasando por las expediciones de los egipcios, polinesios, fenicios, cartagineses, griegos, vikingos, posteriormente el surgimiento de los grandes exploradores inglese, portugueses y españoles, ulteriormente aparecen los famosos Piratas, hasta finalmente llegar a nuestros días; el hombre, en su afán de búsqueda, de exploración y de conquista ha vivido unido al mar.

Esta unión inherente entre hombre-mar ha llevado al diseño y construcción de embarcaciones mayores día a día, conllevando a la construcción de estructuras costeras para recibir y dar cabida a dichas embarcaciones. El diseño de las estructuras no ha sido

fácil, pues ha sido necesario la intervención de mucha gente: ingenieros, oceanógrafos, físicos, matemáticos, etc.

El estudio de la zona costera ha sido históricamente de vital importancia para la humanidad como ya comenté. Actualmente, cerca de 2.5 billones de personas viven dentro de los primeros 100 kilómetros de la zona costera y se estima que a futuro esta cantidad llegue a 6 billones de personas.

En México, sólo hasta fechas recientes, se le ha dado importancia a nuestro extenso litoral, 11592.77 km, de los cuales el 72% corresponde al Océano Pacífico y el 28 % restante al Golfo de México y Mar Caribe; es importante remarcar que con tan vasto litoral, el país cuente únicamente con 45 puertos y sólo 21 de ellos se consideran puertos de altura; sin embargo, el 80 por ciento de los productos de exportación e importación pasan por estos 21 puertos.

Como un dato histórico, la primer estructura de protección costera que se construyó en nuestro litoral, fue obra del emperador prehispánico Calzontzin, quien ordenó la construcción de un rompeolas para proteger su playa privada contra el arribo de tiburones, Playa las Gatas, en Zihuatanejo, Guerrero. Figuras I.1 y I.2.



Figura I.1. Playa Las Gatas, Zihuatanejo Gro, México.

La línea de costa es el límite entre el océano y tierra que se encuentra en constante cambio, tanto temporal como espacial, debido a las fluctuaciones del nivel del mar causadas principalmente, por las mareas y el oleaje. Esta zona es extremadamente dinámica debido a la combinación de la acción del oleaje, de corrientes inducidas por el oleaje y por el movimiento de los sedimentos.



Figura I.2. Playas Las Gatas, Zihuatanejo Gro, México.

La zona costera ha sido reconocida como un recurso natural para las actividades de la humanidad. El océano, y en especial su litoral, han sido utilizados para varios propósitos y actividades, tales como: transportación y/o recreación; adicionalmente, las zonas costeras han sido utilizadas para la industria, espacios habitacionales y turísticos. Con objeto de salvaguardar todas estas actividades, varios trabajos ingenieriles han sido enfocados a la zona costera, con particular intensidad en la última mitad de este siglo. En un principio el diseño adecuado para asegurar la integridad estructural fue la principal inquietud de los ingenieros de costas. Pronto, el impacto de estas estructuras en el ambiente costero trajo consigo un problema severo, que llevaron a los ingenieros a considerar otros aspectos para el diseño. Uno de estos aspectos, es el transporte de sedimentos longitudinal a la playa íntimamente ligado a la evolución costera, es decir al avance o retroceso de la línea de costa. En la Figura I.3 se presenta una zona en Boca del Río, Ver, México, en donde se nota un severo problema de erosión.

Fisiográficamente existen diferentes configuraciones morfológicas de las líneas costeras según son las playas de arena, de roca, etc, éstas pueden ser rectas o en forma de bahía; se tienen también los estuarios, deltas, lagunas costeras e islas. Estos sistemas y configuraciones se ven modificados por la presencia de los elementos dinámicos como las olas, las mareas las corrientes y los vientos; además, debido a las necesidades del hombre, la construcción de estructuras también modifica considerablemente estos sistemas.

A lo largo de las líneas de costa se presentan fenómenos de erosión y depósito, que son función de la interacción de los elementos dinámicos, los contornos físicos y de las

características físicas de la misma playa. La línea de costa muestra muchas irregularidades en su contorno. Es muy difícil encontrar líneas de costa totalmente rectas y con una batimetría paralela a la misma; es común encontrarlas con gran variación en la forma, tanto espacial como temporalmente. Las diferentes formas de las playas reciben, igualmente, diferentes nombres: bahías, golfos, lagunas costeras, tómbolos, puntas, deítas, dependiendo de su morfología y del volumen de agua que encierran.



Figura I.3. Boca del Río, Ver, México.

La estabilidad de playas comprende el estudio completo de las playas, su morfología y su evolución espacial y temporal, longitudinal y transversal. Para comprender este concepto, iniciaremos por definir lo que se denomina estabilidad de playas de la siguiente manera: es el estudio y diseño de la playa formada por material granular no cohesivo, donde el oleaje causa una rápida y profunda transformación al interaccionar con el lecho de los granos. El equilibrio de una playa se presenta cuando el estado morfodinámico que alcanza en planta y perfil, bajo la acción de un oleaje incidente constante en el tiempo, actuando sobre una geometría de playa inicial.

El estudio de las playas en equilibrio tradicionalmente se realiza mediante un análisis independiente de sus dos direcciones, longitudinal y transversal a la línea de playa. Es decir, se realiza separando dos conceptos fundamentales: la playa en planta y el perfil de equilibrio.

Estos conceptos de equilibrio quedan enmarcados en lo que puede definirse como "métodos ingenieriles de diseño de playas". Este método tiene como objetivo la descripción de la forma en planta y la predicción de la respuesta de la misma ante agentes externos; no debe olvidarse, que esta predicción se realiza desde un punto de vista

macroscópico y aproximado. La planta y el perfil de equilibrio no pretenden explicar a fondo los mecanismos o procesos de transporte en planta y perfil de playa, sino solamente el resultado final con un grado de aproximación que pueda considerarse aceptable en términos ingenieriles.

Los conceptos de planta y de perfil de equilibrio constituyen una herramienta eficaz para predecir el comportamiento de una playa, diseñar o analizar proyectos de regeneración o conservación de playas.

1.2. Objetivos del trabajo

El objetivo fundamental de este trabajo es profundizar en el entendimiento del proceso de la evolución espacial y temporal de la línea de costa bajo la influencia de factores físicos, como el oleaje y las características de la playa, así también como de la presencia de estructuras costeras que en conjunto alterarán en forma significativa el equilibrio de las mismas, con la finalidad de proporcionar criterios de diseño y soluciones para estabilizar las playas.

Para lograr este objetivo, es necesario comprender la transformación que sufre el oleaje al ingresar a aguas someras, la morfodinámica de playas, el transporte longitudinal de sedimentos y el modelo numérico de solución.

Además del estudio de los aspectos teóricos de los conceptos mencionados anteriormente, el trabajo pretende exponer en forma clara y breve el estudio de las características y tipos del oleaje, así como la presentación de los parámetros y distribuciones espectrales y estadísticas del oleaje.

1.3 Aportaciones

Se proporciona una herramienta que es lo suficientemente práctica y útil desde un punto de vista ingenieril, la cual permite dar luz al ingeniero para diseñar y estabilizar playas. Un ejemplo es cuando ya se tienen construidas estructuras costeras, (ya sea para un fin distinto de proteger la playa o para protegerla) y donde, a pesar de la existencia de las estructuras la playa sufre procesos erosivos o de acreción; es necesario una simulación de la zona considerando las condiciones de oleaje y la presencia de las estructuras con el objeto de proponer la construcción o eliminación de estructuras y con ello suprimir los efectos mencionados.

Se expone el modelo numérico para predecir la evolución de la línea de costa denominado, Teoría de una línea (One Line Theory, OLT) y que tiene la característica de depender de dos parámetros importantes, llamados parámetros de calibración o coeficientes de transporte de sedimentos. La adecuada selección en los valores de estos parámetros de calibración implica que los resultados sean satisfactorios o no, es decir, que la predicción a futuro sea precisa en términos ingenieriles y para la escala manejada.

I.4 Organización del trabajo

Con la finalidad de presentar el trabajo en forma clara y de fácil seguimiento, éste se dividió en seis capítulos organizados de la siguiente manera:

- Capítulo II. Transformación del oleaje.

Se exponen los fenómenos de la transformación del oleaje: refracción, difracción, someramiento, rotura y reflexión, así como sus bases teóricas.

- Capítulo III. Morfodinámica de playas.

En este capítulo se expone la tipología de estados morfodinámicos de las playas, presentando la descripción de los estados límites y los respectivos intermedios. Se realiza una exposición de un concepto muy importante que se denomina perfil de equilibrio, así como, de los modelos cinemáticos y dinámicos del cálculo de los perfiles. Se describen brevemente los conceptos de peralte de la ola y velocidad de caída del grano. Finalmente, se describe un concepto vital para este trabajo que se denomina "profundidad de cierre".

- Capítulo IV. Evolución de la línea de costa.

En este capítulo se describe la herramienta de predicción numérica basada en la ecuación de continuidad del sedimento y en la ecuación para el transporte longitudinal del sedimento, a esta herramienta se denomina "teoría de una línea" (OLT). Este capítulo presenta en una primer parte el modelo de oleaje y continuando con la ecuación de la continuidad del sedimento. Se presentan, criterios teóricos para determinar los coeficientes de transporte de sedimentos. Finalmente, se presentan la solución numérica de la ecuación de continuidad del sedimento y, las condiciones de contorno y límites de movimiento de la línea de costa.

- Capítulo V. Aplicación del modelo OLT.

Se presenta la aplicación del modelo al caso de la playa contigua a la planta Termoeléctrica "Adolfo López Mateos" en el estado de Veracruz. En este sitio se presentaron problemas de erosión y acreción en la playa debido a la presencia de estructuras costeras que comprenden las obras de toma para la planta. Se presentan los datos disponibles, el desarrollo y los resultados del trabajo.

- Capítulo VI.

Aquí se presentan las principales conclusiones de este trabajo y se indican algunas futuras líneas de investigación referentes a este tema.

II. TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

II.1. Introducción

Una parte de la ingeniería marítima, es conocer las características del oleaje al llegar a las zonas poco profundas, una vez que ha sufrido los efectos de refracción, someramiento, en algunos casos difracción y reflexión. El oleaje es el principal factor en la determinación de la geometría y composición de las playas. Además, tiene una influencia preponderante en la planeación y diseño de puertos, medidas de protección costera, estructuras costeras, canales de navegación y otros trabajos costeros.

Para determinar la energía del oleaje en las zonas cercanas a la playa se requiere determinar la transformación que sufre el oleaje cuando, al viajar, pasan de zonas de aguas profundas a zonas de aguas someras. Generalmente, las áreas de estudio abarcan grandes extensiones lo cual resulta incosteable e imposible de representarse a una escala en un modelo físico, por tanto, para esto tipo de problemas se utilizan modelos numéricos.

El cálculo de las propiedades del oleaje en grandes áreas, una vez que este ha sufrido cambios en sus características, es un problema importante en sitios cercanos a la playa. La información de la altura local de olas y de la dirección permite diseñar estructuras o playas estimando las fuerzas del oleaje y las elevaciones. Diversos medios se han utilizado para calcular la transformación del oleaje desde las áreas de generación, mar adentro, hacia la costa.

En el estudio de diversos problemas de ingeniería costera es necesario tener información de las condiciones del oleaje en el área de interés. Estas condiciones incluyen la altura de ola y su dirección de propagación, estas se obtienen a través de algún modelo de transformación que transfiere las características mencionadas desde el lugar de medición hasta el lugar de interés. En este traslado, la variación de la profundidad y la presencia de corrientes marinas, de estructuras costeras o características geológicas provocan la transformación del oleaje, en la velocidad y en la redistribución de la energía a lo largo de toda la cresta del frente de onda y en dirección de la playa. Dentro de la zona de Surf, se presenta la rotura del oleaje como una característica importante.



Figura II.1. Refracción del Oleaje, SPM, 1984.

El oleaje, al propagarse de aguas profundas a aguas someras sufre una variación en sus características. Cuando el oleaje arriba en forma oblicua a la línea de playa, con líneas batimétricas ligeramente paralelas a esta línea; la dirección de los rayos del oleaje tienden a girar y arribar perpendiculares a la línea de costa en donde se produce el fenómeno de rotura; a este cambio se le conoce como *refracción del oleaje*. Figura II.1

Por otro lado, la presencia de algún objeto o estructura que intercepte al oleaje incidente, hace que una parte gire al lado de sotavento de la estructura debido a una cesión de energía lateral, originando, lo que se conoce como *difracción del oleaje*. Figura II.2



Figura II.2. Difracción del Oleaje, SPM, 1984.

Aunado a los fenómenos de refracción y difracción, se presenta el *efecto de someramiento*. Debido al mecanismo generador del oleaje y a las componentes del mismo; al aproximarse a aguas someras, por efecto del fondo (principalmente al efecto de fricción de fondo) la altura del oleaje aumenta y disminuye su longitud de onda.

Finalmente, cuando la fricción de fondo ocasiona que la altura de ola sea considerablemente mayor que la longitud de onda, es decir, que el período aumente, la ola colapsará, a esto se le llama *rotura del oleaje*.

II.2. Ecuaciones de gobierno

Un tren de ondas se puede representar como:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Omega \quad \text{II.1}$$

donde:

$$\Omega = kx - \sigma t \quad \text{II.2}$$

La parte mas alta de la ola, cresta, se presenta cuando $\Omega = 2n\pi$, donde n es un número entero positivo.

El número de onda, k , se puede definir como:

$$k = n \nabla \Omega \quad \text{II.3}$$

donde n es un vector unitario normal a una función escalar y

$$\nabla = \nabla_k = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j \quad \text{II.4}$$

por tanto:

$$k = k_x i + k_y j \quad \text{II.5}$$

y cuyo módulo es:

$$|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad \text{II.6}$$

Si el ángulo de incidencia del oleaje, θ , se define como el ángulo entre una línea normal a la playa y la dirección del oleaje, entonces se tiene:

$$\begin{aligned} k_x &= |k| \cos \theta \\ k_y &= |k| \sin \theta \end{aligned} \quad \text{II.7}$$

II.3. Refracción

La refracción se define como el cambio de dirección de un tren de ondas al pasar de un medio a otro, el cambio en la profundidad se considera como un cambio de medio.

Considerando la ecuación de la longitud de onda, obtenida a partir de la ecuación de dispersión, se define la siguiente expresión de celeridad de onda:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad \text{II.8}$$

La celeridad de onda depende de la profundidad donde se está propagando el tren de oleaje. es decir, si la celeridad de onda decrece con la profundidad y la longitud de onda también decrece proporcionalmente. La variación de la celeridad de onda ocurre a lo largo de la cresta de una onda en movimiento y ésta parte se mueve más rápido en aguas profundas que en aguas someras. Esta variación provoca que la cresta de la onda gire y trate de alinearse con el contorno. Este efecto de giro se conoce como *refracción*.

El efecto de *refracción* es importante por las siguientes razones:

1. La refracción, junto con el efecto de someramiento, definen la altura de ola en alguna profundidad determinada con condiciones dadas del oleaje incidente en aguas profundas. esto es, altura de ola, periodo y la dirección del oleaje incidente. Por lo tanto, la refracción tiene una influencia importante en la altura de ola y en la distribución de la energía del oleaje a lo largo de la costa.
2. El cambio en la dirección en diferentes regiones a lo largo de la costa resulta en la convergencia o divergencia de la energía. Esto afecta materialmente, en la fuerza ejercida por el oleaje sobre las estructuras.
3. La refracción contribuye a la alteración en la batimetría por los efectos de deposición y erosión de los sedimentos.
4. Una descripción aérea de la batimetría cercana a la costa se puede obtener de un conocimiento de los patrones de refracción, como se puede ver en las figuras II.3 a II.6.

La disminución de la celeridad de onda al decrecer la profundidad, puede considerarse similar a la disminución de la velocidad de la luz con un aumento en el índice de reflexión en el medio de transmisión. Utilizando esta analogía, O'Brien (1942) sugirió el uso de la ley de Snell de Óptica, para resolver el problema de la refracción de una onda de agua con el cambio de profundidad. La validación de estas aproximaciones ha sido demostrada experimentalmente por Chien (1954), Rall (1956) y Wiegel y Arnold (1957). Existen dos técnicas básicas disponibles para el análisis de la refracción, una gráfica y otra numérica. Existen numerosos procedimientos gráficos, sin embargo, todos los métodos se basan en la ley de Snell.

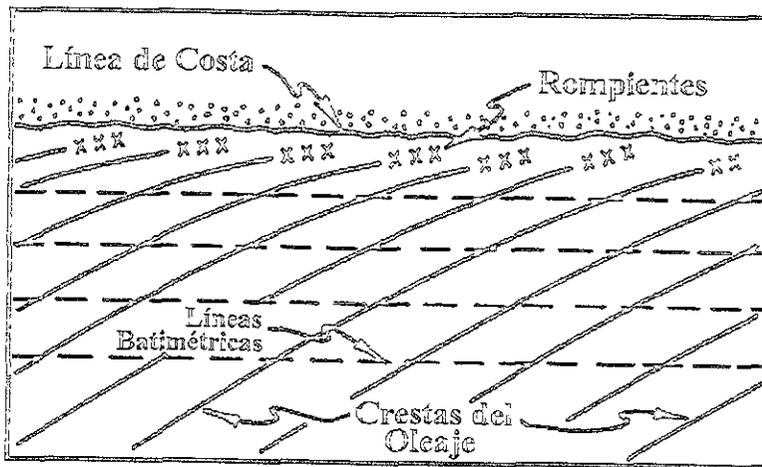


Figura II.3. Refracción del oleaje con líneas batimétricas rectas y paralelas a la línea de costa.

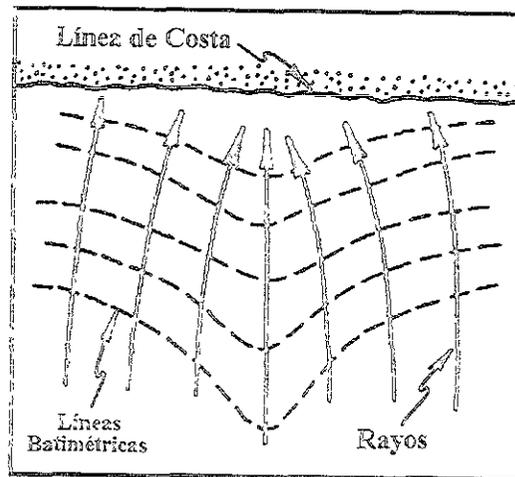


Figura II.4. Refracción del oleaje debido a la presencia de una cresta.

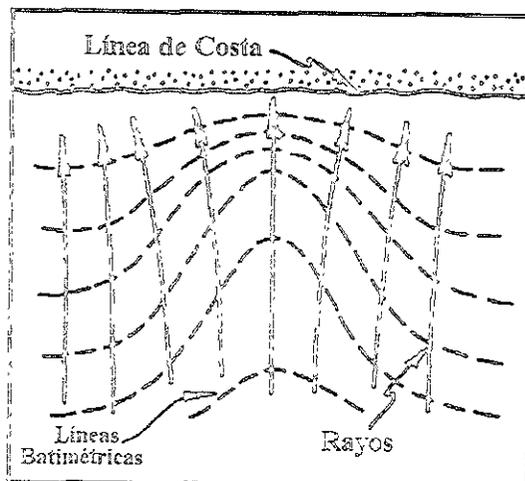


Figura II.5. Refracción del oleaje debido a la presencia de un cañón submarino

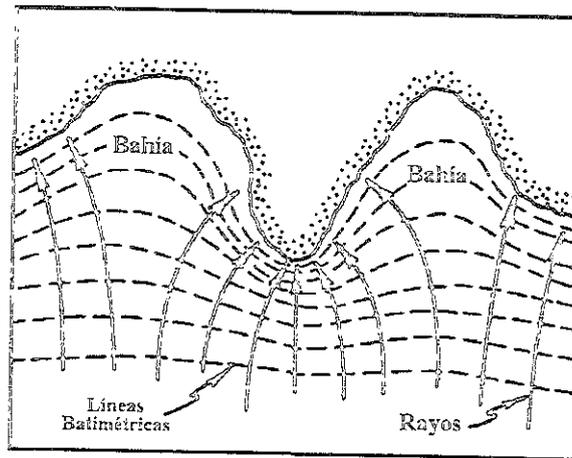


Figura II.6. Refracción del oleaje con la presencia de una bahía y de un cabo.

Para iniciar el análisis de refracción se debe tomar en cuenta las siguientes suposiciones:

1. La energía entre los rayos de oleaje o líneas ortogonales permanece constante (las líneas ortogonales se dibujan perpendiculares a las crestas del oleaje y se extienden en la dirección del avance del oleaje).
2. La dirección de avance del oleaje es perpendicular a la cresta de la ola.
3. La velocidad de la onda con un periodo dado en un lugar particular, depende únicamente de la profundidad en ese lugar.
4. Los cambios en el fondo son graduales y relacionados con la longitud de onda.
5. La ola es de cresta larga, periodo constante, amplitud pequeña y monocromático.
6. Los efectos de las corrientes, vientos y de reflexión causada por la playa no son considerados en la refracción.

Considerando la ecuación II.5, el vector k es el gradiente de un escalar, si se toma el producto cruz de k , se tiene:

$$\nabla \times k = 0 \quad \text{II.9}$$

por identidad, el producto cruz de un escalar es igual a cero. Esta condición de irrotacionalidad de k indica que la integral de línea $\int k \cdot dl$ es independiente de la trayectoria. La integral de línea también puede expresarse como $\int \nabla \Omega \cdot dl = \int d\Omega$, por tanto, la irrotacionalidad implica que $\Omega(x, y, t)$ es únicamente determinada para cada punto en un tiempo dado.

Lo que implica:

$$\frac{\partial(k \operatorname{sen} \theta)}{\partial x} - \frac{\partial(k \operatorname{cos} \theta)}{\partial y} = 0 \quad \text{II.10}$$

Cuando las líneas batimétricas son rectas y paralelas a los contornos de la playa, la ecuación II.9, se reduce a:

$$\frac{\partial(k \operatorname{sen} \theta)}{\partial x} = 0 \quad \text{II.11}$$

de donde

$$k \operatorname{sen} \theta = \text{cte} \quad \text{II.12}$$

Por tanto, la proyección longitudinal k es una constante. Dividiendo entre σ la ecuación II.12, resulta:

$$\frac{\operatorname{sen} \theta}{C} = \text{constante} \quad \text{II.13}$$

Lo más común es evaluar esta constante en aguas profundas (denotado con el subíndice 0) y compararlo con un punto en aguas someras, es decir:

$$\frac{\operatorname{sen} \theta}{C} = \frac{\operatorname{sen} \theta_0}{C_0} \quad \text{II.14}$$

La ecuación II.14 es conocida como la ley de Snell.

II.3.1. Conservación de la Energía

De la figura II.7, si se considera que no existe flujo a través de los rayos, entonces el flujo de energía a través de b_0 es el mismo que en b_1 y b_2 . Debido a la convergencia o divergencia de los rayos, resultado del efecto del contorno físico del fondo, la energía por área unitaria cambia entre b_1 y b_2 . Considerando que no existe reflexión, la ecuación de conservación de la energía queda:

$$(EnC)_{b_1} = (EnC)_{b_2} \quad \text{II.15}$$

Recordando que la energía total es $E=1/8 \rho g H^2$ y sustituyéndola en la ecuación II.15, al despejar la altura de ola en el punto 2, se obtiene:

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{Cg_1}{Cg_3}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad \text{II.16}$$

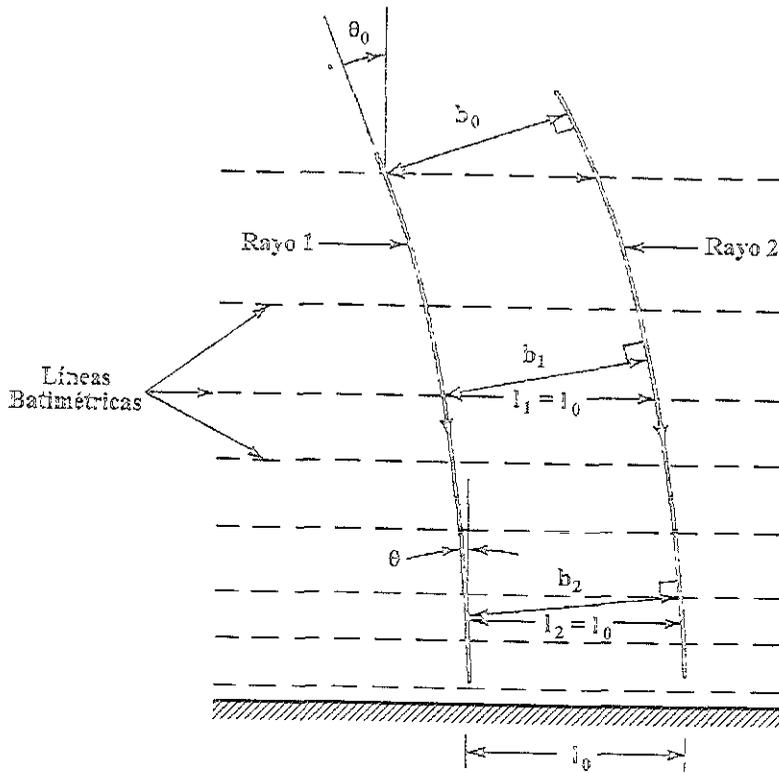


Figura II.7. Características de los rayos del oleaje durante la refracción y con líneas batimétricas idealizadas.

Es común evaluar H_1 en aguas relativamente profundas, en tal caso, se tiene:

$$H_2 = H_0 \sqrt{\frac{C_0}{2Cg_2}} \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} \quad \text{II.17}$$

Lo que es igual a:

$$H_2 = H_0 K_s K_r \quad \text{II.18}$$

donde K_s es el coeficiente de someramiento y K_r es el coeficiente de refracción.

Si los contornos batimétricos son rectos y paralelos es posible determinar el coeficiente de refracción.

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b_1}} \quad \text{II.19}$$

De la ley de Snell, ecuación II.14, se puede obtener la siguiente relación:

$$k_0 \operatorname{sen} \theta_0 = k \operatorname{sen} \theta \quad \text{II.20}$$

De la figura II.10 se observa que:

$$b_0 = l_0 \cos \theta_0 \quad \text{II.21}$$

$$b_1 = l_1 \cos \theta_1 \quad \text{II.22}$$

Sustituyendo las ecuaciones II.21 y II.22 en la ecuación II.19, se obtiene que el coeficiente de refracción puede expresarse como:

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_1}} \quad \text{II.23}$$

II.4. Difracción

La difracción del oleaje es el fenómeno en el que se transfiere energía lateral a lo largo de la longitud de cresta, en otras palabras, la difracción es la flexión de una onda alrededor de un obstáculo colocado en su trayectoria. Esto se observa claramente cuando un tren de ondas es obstruido por una barrera como una rompeolas o una pequeña isla. El cálculo de la difracción es importante por diversas razones. La distribución de las alturas de olas dentro de un puerto o en una playa encajada se determina con el grado de difracción causado por estructuras o barreras naturales.

Putnam y Arthur (1948) presentaron resultados experimentales de la solución propuesta por Penny y Price (1944) para el comportamiento del oleaje al ser interceptado por un rompeolas sencillo. Wiegel (1962) utilizó una aproximación teórica para el estudio de la difracción alrededor de un rompeolas. Blue y Johnson (1949) trató el problema de la difracción al pasar el oleaje a través de dos rompeolas.

Las suposiciones para el desarrollo de las teorías de difracción son:

1. El agua es un fluido ideal, es decir, no viscoso e incompresible.
2. El oleaje es de amplitud pequeña y se ajusta a teoría lineal.
3. El flujo es irrotacional y satisface la ecuación de Laplace.

4. La profundidad del rompeolas es constante.

II.4.1. Cálculo de la de la difracción

Difracción debida a un rompeolas sencillo. Wiegel (1962) presentó una serie de diagramas con una profundidad constante, éstos presentan líneas de igual altura de ola reducida debido a la presencia de la estructura. Estas gráficas se presentan en el anexo A. Las unidades de las gráficas están en función de la longitud de onda. La reducción de la altura de la ola esta en función del coeficiente de difracción, K_d , que se define como la relación entre la altura de ola en el área afectada por la difracción, H_d , y la altura de ola incidente H_0 , obviamente, en el área no afectada por la difracción. Esto es:

$$K_d = \frac{H_d}{H_0} \quad \text{II.24}$$

La figura II.8, es un ejemplo del diagrama para el cálculo de la difracción del oleaje con un ángulo de aproximación de 90° (el ángulo es medido a partir de la línea que forma un rompeolas semi-infinito e impermeable). El procedimiento de cálculo es sencillo, consiste en obtener la relación del radio (distancia del morro al punto de interés) entre longitud de onda del oleaje incidente y localizar la intersección de esta relación con el ángulo del rayo del punto de interés dentro de la zona de sombra, en ese punto se lee un valor de K_d .

Los diagramas presentados, se elaboraron en coordenadas polares con arcos y rayos concéntricos al extremo de la estructura. Los arcos están separados por una unidad de radio de longitud de onda y con rayos separados a cada 15° . Los rayos y los arcos de los diagramas otorgan un fácil manejo.

Los esquemas de difracción se presentan para un rompeolas en el extremo derecho, dado el caso que el rompeolas se encontrara en el lado izquierdo, las gráficas son igualmente válidas y sólo se requiere invertir el esquema.

II.4.2. Difracción del oleaje al pasar entre dos rompeolas con una abertura de hasta 5L y con oleaje incidente normal a las estructuras

La solución de este problema es más compleja que para el caso anterior y es casi imposible construir diagramas de para cada relación de abertura entre longitud de onda B/L (B = abertura), combinado esto con las diferentes direcciones del oleaje incidente. En el anexo A se presentan algunas gráficas propuestas por Johnson (1952) para calcular la difracción del oleaje hasta una relación $B/L=5$ y sólo con oleaje incidente normal a la abertura.

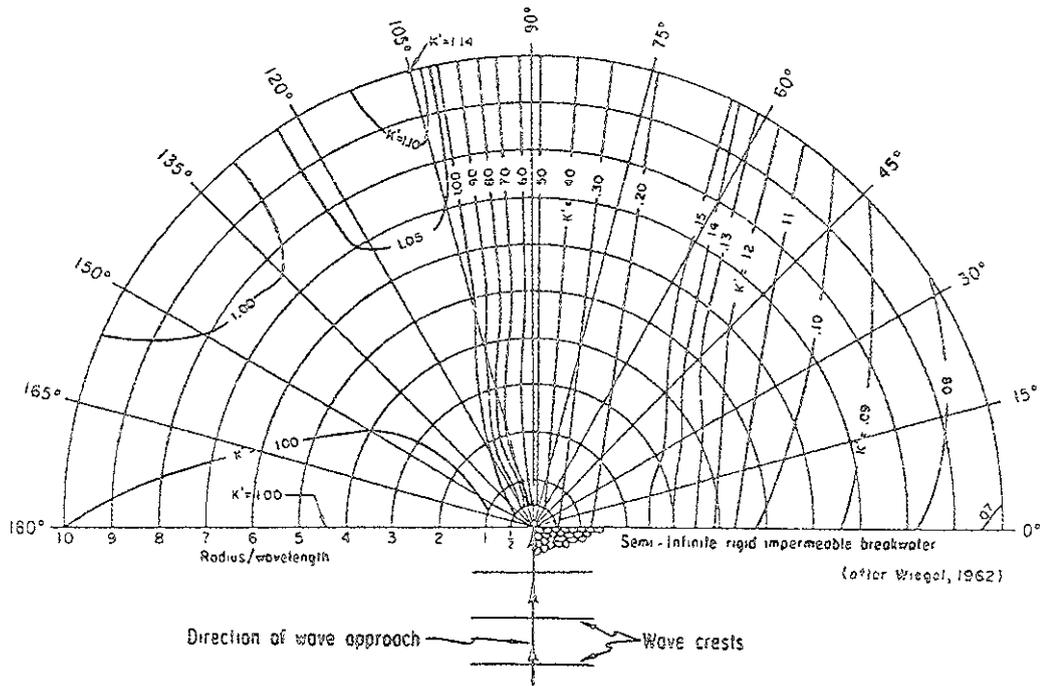


Figura II.8. Diagrama de difracción con un ángulo de aproximación de 90°, SPM, 1984.

II.4.3. Difracción del oleaje al pasar entre dos rompeolas con una abertura mayor a $5L$ y con oleaje incidente normal a las estructuras

Cuando la abertura es mayor a $5L$, los efectos de difracción en cada uno de los rompeolas son relativamente independientes y el cálculo se realiza con la ayuda de los diagramas para un rompeolas sencillo. En la figura II.9 se muestra la forma en la que se realiza el cálculo.

II.4.4. Difracción del oleaje al pasar entre dos rompeolas con oleaje incidente oblicuo a las estructuras

Cuando el tren de ondas se aproxima con un ángulo respecto al eje que forman los extremos de los rompeolas, el efecto de difracción difiere de los casos anteriores. Una aproximación del efecto de difracción se obtiene al considerar una supuesta abertura normal al oleaje incidente de un ancho igual a la proyección de la abertura original, como se puede ver en la figura II.10, en el anexo A se presentan gráficas para determinar el coeficiente de difracción con diferentes ángulos del oleaje incidente utilizando únicamente la relación $B/L=1$.

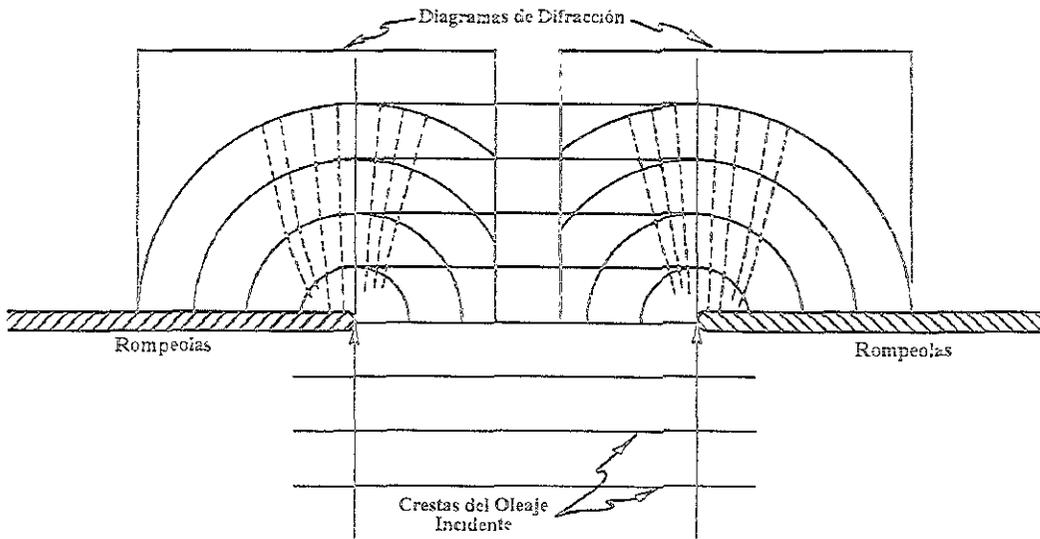


Figura II.9. Difracción entre dos rompeolas con abertura de 5L, SPM, 1984.

II.4.5. Difracción pura

Para determinar el coeficiente de difracción en forma analítica, se considera que el oleaje es de pequeñas amplitudes y que éste viaja en aguas con profundidad, h , constante. La expresión de Helmholtz para el desplazamiento, ζ , Horikawa, 1988:

$$\nabla^2 \zeta + k^2 \zeta = 0 \tag{II.25}$$

La expresión II.25, se aplica a oleaje en aguas profundas.

Para la difracción de la superficie originada por un rompeolas semi-infinito, Penney & Price (1952) obtuvieron la solución de la ecuación II.25 basada en la teoría de Sommerferl de la difracción de la luz. El coeficiente de difracción K_D , esta dado en coordenadas polares, figura II.11.

$$K_d = I \left(-\sqrt{\frac{4kr}{\pi}} \operatorname{sen} \frac{\alpha - \theta}{2} \right) e^{-ikr \cos(\alpha - \theta)} + I \left(-\sqrt{\frac{4kr}{\pi}} \operatorname{sen} \frac{\alpha + \theta}{2} \right) e^{-ikr \cos(\alpha + \theta)} \tag{II.26}$$

donde

$$I(\lambda) = \frac{1+i}{2} \int_{-\lambda}^{\lambda} e^{-i\frac{\pi \lambda^2}{2}} d\lambda \tag{II.27}$$

$$I(\lambda) = \frac{1+C(\lambda)+S(\lambda)}{2} + i \frac{C(\lambda)-S(\lambda)}{2} \tag{II.28}$$

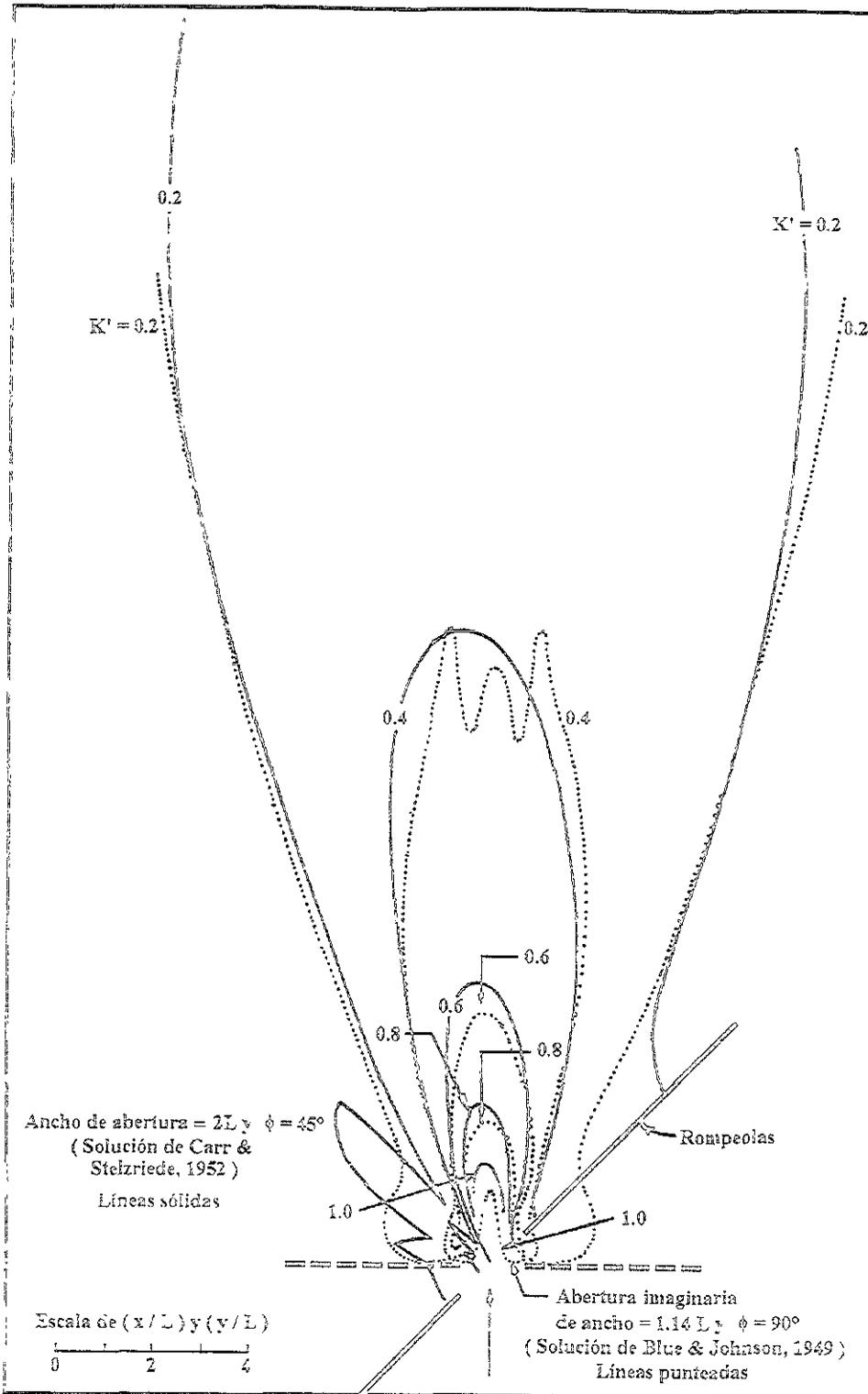


Figura II.10. Diagrama de difracción con una apertura de $2L$ y con oleaje incidente a 45° y comparación con una apertura de $2L \text{sen} 45^\circ$ con oleaje incidente a 90° , SPM, 1984.

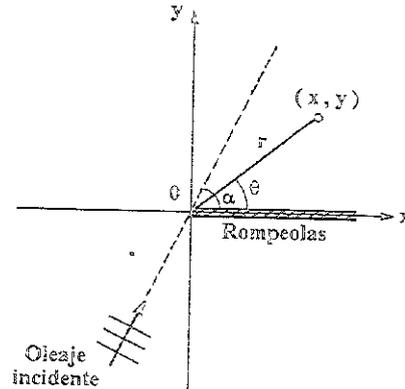


Figura II.11. Sistema de coordenadas para el fenómeno de difracción.

en donde las integrales de Fresnel, $C(\lambda)$ y $S(\lambda)$, se definen como:

$$C(\lambda) = \int_0^{\lambda} \cos \frac{\pi \lambda^2}{2} d\lambda$$

II.29

$$S(\lambda) = \int_0^{\lambda} \text{sen} \frac{\pi \lambda^2}{2} d\lambda$$

II.5. Someramiento

Si el oleaje incide normal a la playa con una batimetría recta y paralela, el cambio en el perfil de la onda es causado por el cambio en la profundidad. Esta transformación es llamada someramiento del oleaje. Bajo estas condiciones, el oleaje aumenta gradualmente de altura manteniéndose simétrica. Conforme la profundidad decrece la altura de la ola se incrementa rápidamente y se produce una asimetría en el perfil de la ola hasta que finalmente la ola rompe.

Si el perfil de la ola es simétrico y la pendiente de fondo es suave el campo de oleaje local puede representarse como un campo de oleaje regular con una profundidad constante, el cambio en la altura de la ola puede predecirse bajo la suposición que el flujo de energía es constante. Este se le conoce como el método del flujo de energía.

II.5.1. Método del flujo de energía

Cuando ocurren cambios en el fondo, la altura y la longitud de onda también cambian, sin embargo, el periodo permanece constante si el número de ondas se conservan. Con esto, se acepta que la viscosidad es despreciable y la presión atmosférica es constante; así que

la energía del oleaje no se disipa entre dos secciones, como se muestra en la figura II.12 entre las secciones 0 y 1, por tanto, el flujo de energía es igual en ambas secciones.

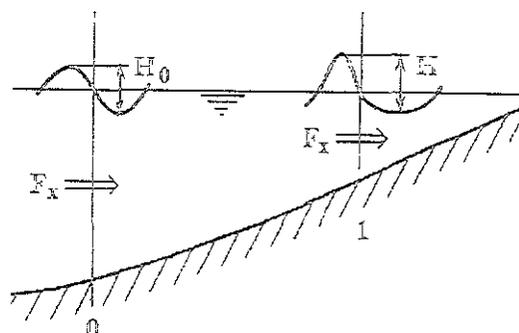


Figura II.12. Esquema de la conservación del flujo de energía.

La ecuación de flujo de energía en aguas profundas es:

$$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H_0^2 \right) \frac{1}{2} C_0 \quad \text{II.30}$$

y en aguas intermedias está dado por:

$$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) Cn \quad \text{II.31}$$

Con las expresiones anteriores, la relación de alturas de olas puede expresarse como:

$$K_1 = \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2n} \frac{C_0}{C}} = \sqrt{\frac{Cg_0}{Cg}} \quad \text{II.32}$$

II.6. Rotura

En la rotura se produce una transformación de la energía incidente. Hasta fechas recientes se suponía que el proceso de rotura era originado exclusivamente por la reducción de la profundidad, por tanto, un fenómeno circunscrito a profundidades reducidas. Sin embargo, y especialmente debido a los estudios de generación de oleaje, 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.

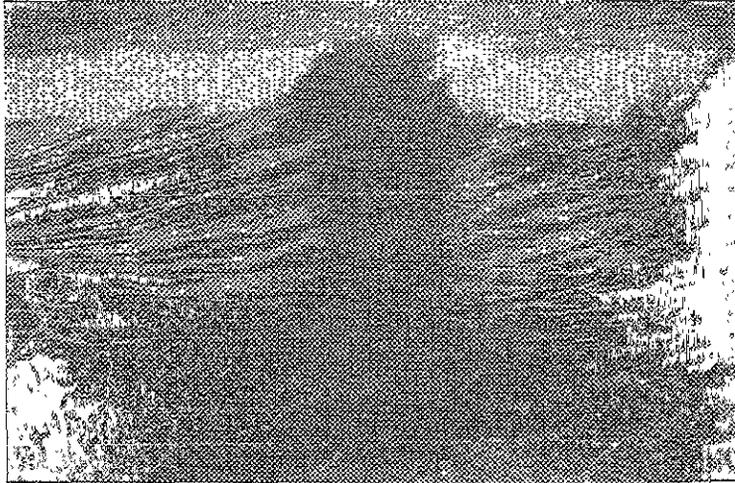
Para fines de este trabajo, la principal concepción de rotura está íntimamente ligada al la línea de costa y a la dramática transformación de las olas desde el momento en que se pueden observar hasta que alcanzan la orilla de la playa.

Iversen (1952), Patrik y Wiegel (1954) y Galvin (1968), propusieron cuatro tipos de rotura, que se describen a continuación:

- Decrestamiento (Spilling). Aparecen espuma, burbujas y turbulencias en la cresta de la ola y eventualmente cubren parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la cresta, que se decresta formando un pequeño chorro en algunos casos imperceptible que resbala por el frente de la onda. Figura II.13.
- Voladura (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. Figura II.14.
- Colapso (Collapsing). 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 II.15.
- Oscilación (Surging). Aquí el frente de la onda y la cresta permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno con pequeña producción de espuma, burbujas y turbulencia. Figura II.16.

La descripción anterior indica cuatro puntos de referencia de un proceso que, en principio, parece continuo con diferentes niveles de intensidad. En este caso, existiría un parámetro único que combinando las características de la ola incidente y las de contorno (en este caso la playa), permitiría describir numéricamente las diferentes formas de rotura. A lo largo de los años, se ha experimentado en este sentido. Iribarren y Nogales (1949), 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, es decir:

$$Ir = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad \text{II.33}$$



DECRESTAMIENTO

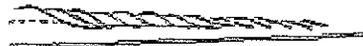
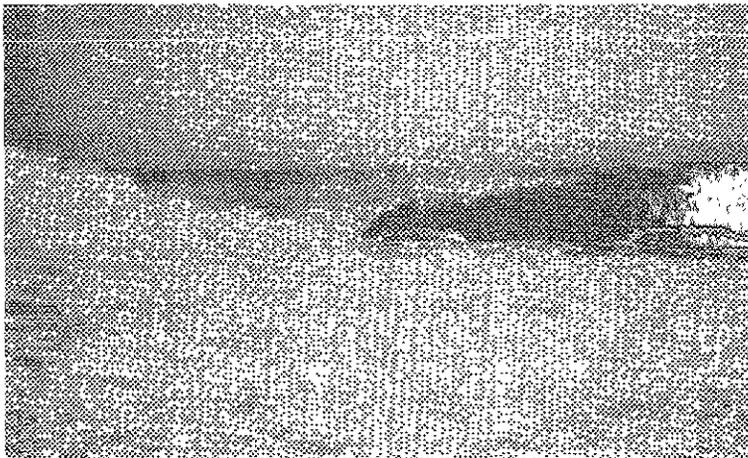


Figura II. 13. Rotura del oleaje en Decrestamiento.



VOLUTA



Figura II. 14. Rotura del oleaje en Voluta.

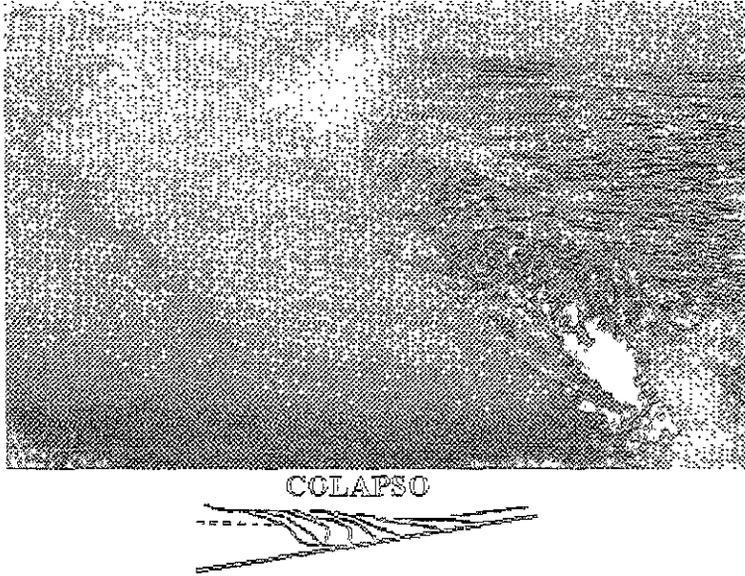


Figura II.15. Rotura del oleaje en Colapso.

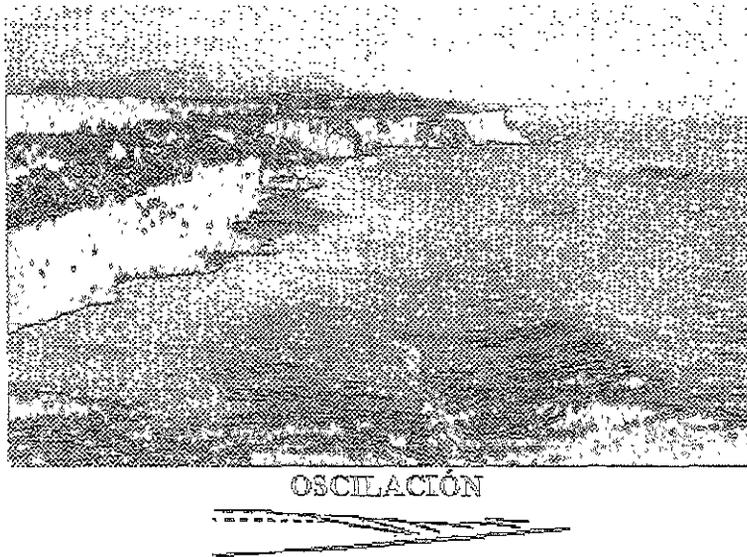


Figura II.16. Rotura del oleaje en Oscilación.

Horikawa (1988) presenta una tabla de rangos de valores del número de Iribarren para cada tipo de rotura, se presentan en la tabla II.1.

$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H/L_0}}$	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	Decrecimiento		Voluta			Colapso		Oscilación		No existe rotura		

Tabla II.1. Valores de Iribarren para los cuatro tipos de rotura, Horikawa, 1988.

Tipo de Rotura	Número de Iribarren. $Ir = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$
Descrestamiento. (Spilling)	$Ir < 1.0$
Voluta. (Plunging)	$1.0 < Ir < 2.6$
Colapso. (Colapsing)	$2.6 < Ir < 3.1$
Oscilación. (Surging)	$3.1 < Ir$

Tabla II.2. Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de roturas, Silva, 1997.

En la figura II.17 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. 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.

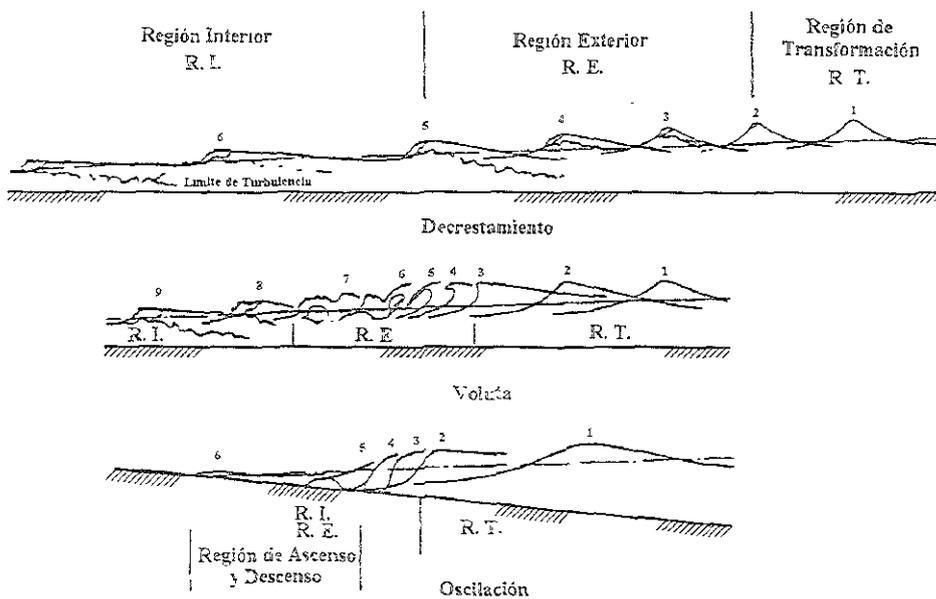


Figura II.17. Regiones en la zona de rotura, Losada, 1988.

II.6.1. Rotura de la onda con predominio del peraltamiento y el volteo

En este tipo de rotura se engloban las roturas en decrestamiento y en voluta no violenta. Se caracterizan porque una zona de la superficie libre se peralta, adquiere la verticalidad y la cresta volteo, formando un chorro de agua. Cada onda mantiene un proceso de rotura independiente de otras. La intensidad del volteo y del chorro distingue una rotura en decrestamiento de la rotura en voluta, siendo esta última más intensa que la primera.

El proceso de transformación es lento y gradual, por tanto, este tipo de rotura se asocia, en general, a fondos gradualmente variables, es decir, al criterio e hipótesis de someramiento, es decir:

- La onda ajusta continuamente su forma, tal que el perfil superficial, velocidad, etc, pueden determinarse como si la onda se propagase por fondo horizontal aplicando los valores locales de profundidad y altura de ola.
- El flujo de energía a través de una sección vertical es constante, lo que implica que la reflexión es despreciable.
- El número de ondas durante el proceso de propagación permanece constante, es decir se conserva el periodo.
- Estas hipótesis se aplican antes, durante y después de la rotura. La validez de estas hipótesis requiere que el fondo varíe gradualmente. Rayleigh mostró que para aplicar la teoría lineal, es suficiente que la pendiente del fondo $h_x = dh/dx$ en una longitud de onda, L , sea del mismo orden de magnitud que el peralte de la onda,

II.7. Mecanismo de Rotura

La primera inestabilidad en este tipo de roturas se presenta en la superficie libre a la altura de la cresta. La onda en esa zona se peralta localmente, pasa por una posición vertical y toma la forma de un chorro el cual se extiende de manera progresiva hacia delante y hacia abajo hasta que alcanza la cara frontal de la onda. En ese punto se forma un vórtice con la circulación alrededor de la cavidad en el sentido de avance de la onda. Cuando el chorro alcanza el frente de onda, se produce el roció de agua, que forma un segundo vórtice enfrente del primero. Este proceso se repite dependiendo de la intensidad de la rotura. Así, en una rotura en decrestamiento se produce un sólo vórtice, mientras que en una rotura en voluta pueden producirse hasta cuatro o cinco nuevos vórtices y que son identificados en la superficie por la hendidura que se produce. No obstante, a medida que se producen nuevos vórtices, éstos son más débiles que el precedente. De esta forma, se introducen en las masas de agua desde la superficie una serie de impulsos en forma de vórtice, que contribuyen al rápido decrecimiento de la altura de ola. Con el movimiento de cada vórtice en el interior de la masa del fluido se produce un proceso de mezcla de

agua - aire, con introducción de burbujas, las cuales se trasladan con el fluido; algunas veces esta compresión de aire rompe la superficie libre y sale al exterior en forma de rocío. La velocidad de traslación del vórtice es, necesariamente, inferior a la velocidad de propagación de la onda.

Si el número de Froude de la onda rota no es superior al crítico, entonces se forma una nueva ola, que romperá más adelante con un proceso análogo.

II.7.1. Peralte de la onda y profundidad de rotura

En profundidades indefinidas, el peralte máximo de una onda es, según Michell (1944), $(H/L)_{\text{máx}}=0.142$. También propuso como peralte máximo en aguas someras:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{\text{máx}} = 0.14 \tan\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad \text{II.34}$$

que para el caso de pendientes suaves, la ec. II.34 da un ajuste bastante bueno con los resultados experimentales. Dividiendo ambos lados de la ecuación II.34 por $2h_B$ se obtiene una relación implícita de la profundidad relativa en el instante de la rotura en términos de $k_B=2\pi/L_B$, número de onda en rotura:

$$\frac{H_B}{h_B} = 0.89 \left(\frac{\tanh h_B}{k_B h_B}\right) \quad \text{II.35}$$

En profundidades reducidas, la onda solitaria representa mejor las condiciones de propagación; las condiciones de rotura o inestabilidad de una onda solitaria propagándose por un fondo horizontal ocurren cuando se cumple aproximadamente la relación:

$$\gamma = \left(\frac{H}{h}\right)_{\text{lim}} \approx 0.80 \quad \text{II.36}$$

donde γ , es un coeficiente de criterio de rotura. Sunamura (1980) propuso el siguiente valor:

$$\gamma = 1.1 (\tan \beta)^{1/6} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/12} \quad \text{II.37}$$

en forma similar, Singamsetti & Wind (1980) propusieron la siguiente expresión:

$$\gamma = 1.16 \left[\frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \right]^{0.23} \quad \text{II.38}$$

Concluyendo, la condición de rotura queda expresado de la siguiente manera:

$$H_B = \gamma n_B \quad \text{II.39}$$

II.8. Reflexión

El oleaje puede ser total o parcialmente reflejada por una barrera natural o artificial. La reflexión a menudo puede ser importante en el diseño de estructuras costeras particularmente en estructuras de puertos. Este fenómeno implica la reflexión de la energía del oleaje y que se opone a la energía de disipación, figura II.21.



Figura II.18. Reflexión del oleaje, SPM, 1984.

Consecuentemente, la presencia de reflexiones múltiples aunado a una baja energía de disipación dentro de un puerto puede originar energía en forma de agitación, estas fluctuaciones de la superficie libre pueden causar un movimiento en naves ancladas. Por tanto, muros costeros, malecones y revestimientos dentro de puertos deben ser, de la manera más eficiente, capaces de disipar la onda más que reflejarla. Las playas naturales dentro de los puertos son excelentes disipadores de energía. La importancia de la

reflexión del oleaje y sus efectos dentro de puertos han sido discutidos por Bretschneider (1966), Lee (1964) y Le Méhauté (1965).

Para los alcances de este trabajo no se considera la importancia de la reflexión, pues la parte medular del trabajo es la estabilidad de las playas, en donde los efectos más importantes son los de refracción, difracción y someramiento.

II.9. Resumen

Como se mencionó, la parte medular de la ingeniería marítima es conocer las características del oleaje al llegar a zonas poco profundas, lugar donde éste sufre los efectos de refracción, someramiento y en algunos casos de difracción y reflexión.

Definiendo estos efectos como:

Refracción. Se define como el cambio de dirección de un tren de ondas al pasar de un medio a otro, el cambio en la profundidad se considera como un cambio de medio.

Someramiento. Si el oleaje incide normal a la playa con una batimetría recta y paralela, el cambio en el perfil de la onda es causado por el cambio en la profundidad. Esta transformación es llamada someramiento del oleaje.

Difracción: Es el fenómeno en el que se transfiere energía lateral a lo largo de la longitud de cresta, en otras palabras, la difracción es la flexión de una onda alrededor de un obstáculo colocado en su trayectoria.

Reflexión. Este fenómeno implica la reflexión de la energía del oleaje y que se opone a la energía de disipación. La reflexión es causada por la presencia de estructuras tales como muros costeros.

Rotura. Conforme la profundidad decrece la altura de la ola se incrementa rápidamente y se produce una asimetría en el perfil de la ola hasta que finalmente la ola rompe.

Conociendo la transformación del oleaje se define la altura de ola en rotura y la profundidad de la ola en rotura, elementos necesarios para el diseño de estructuras y para el diseño y estabilidad de playas, como se verá más adelante, el transporte de sedimentos es función de la altura de ola en rotura. Para comprender la transformación del oleaje, es necesario entender las bases teóricas, aquí se presentan los desarrollos de la ecuación de continuidad y de la ecuación de Laplace. Se presentan las propiedades ingenieriles para determinar las características físicas del oleaje, tales como: longitud y celeridad de onda; velocidad, aceleración y desplazamiento de las partículas; presión y flujo de energía. Las expresiones anteriores se dedujeron para tres zonas definidas como: aguas someras, aguas intermedias y aguas profundas. En este capítulo se describen las transformaciones del oleaje y sus bases teóricas para resolver el problema. Finalmente, se desarrolla el

fenómeno de rotura, describiendo los tipos y características de ellas. Todos los efectos presentados en este capítulo son de importancia relevante para el estudio de la evolución costera.

III. MORFODINÁMICA DE PLAYAS

III.1. Introducción

Para comprender la evolución que se presenta en las playas, es preciso entender qué es y qué sucede en estos lugares. Es necesario indicar que las playas son zonas muy dinámicas, donde el oleaje transmite toda su energía al lecho de la playa ocasionando una rápida transformación. 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. En la escala de tiempo geológico, el cambio que experimenta una playa es inmediato, aunque en realidad pueda llevar días, semanas o meses, en función de las características del oleaje.

Las costas pueden clasificarse en tres tipos: rocosas, de arena (material granular no cohesivo) y de material cohesivo. Una costa rocosa es casi inalterable en condiciones naturales; en contraste, las playas de arena se deforman fácilmente, la posición de la línea de costa y su perfil transversal están en constante movimiento y depende de las propiedades del oleaje incidente.

El cambio en una playa se manifiesta en forma longitudinal y transversal a lo largo del tiempo. Cuando se presentan cambios cíclicos en la morfología de la playa, se dice que se encuentra en equilibrio dinámico.

De aquí surge otro concepto muy importante: la estabilidad de playas, que se define como el estudio y diseño de una playa formada de material granular no cohesivo para que permanezca en equilibrio dinámico y donde el oleaje causa en la playa una rápida y profunda transformación al interactuar con el lecho de los granos.

Raramente se presentan playas rectilíneas o con curvaturas continuas, sino que generalmente, contienen formas de media luna de mayor o menor dimensión, con salientes o puntas de arena o entrantes moderadamente profundas y alargadas. Estas formas son conocidas por diversos nombres, tales como: formas arenadas (beach-cups), ondas de arena (sand waves), playas rítmicas (shoreline rhythms), arcos gigantes (giant cups), barras crecientes (crescentic bars), etc. Losada (1988)

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. Todavía en los setenta, no se tenía una justificación de la presencia de alguna o varias de estas formas, ni establecido su relación con las características del oleaje. Sin embargo, definido el concepto de estado morfodinámico de una playa, se pueden establecer las formas periódicas, Short (1978), así como su evolución en función de la energía incidente. 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 a corto plazo del orden de horas (un estado de mar tendrá una sensibilidad diaria al cambio) y a largo plazo, del orden de meses, años, pudiéndose en este caso hablar de un estado morfodinámico modal. También se puede hablar de una sensibilidad de cambio a largo plazo alrededor de este estado morfodinámico modal.

En este capítulo se describen dos estados morfodinámicos extremos para después definir situaciones intermedias notablemente complejas, las cuales participan de características comunes a ambos estados morfodinámicos extremos o límites. En las figuras III.1 y III.2. se ilustran las partes principales de la zona costera y en el anexo B se definen cada uno de los términos que aparecen en las mismas.

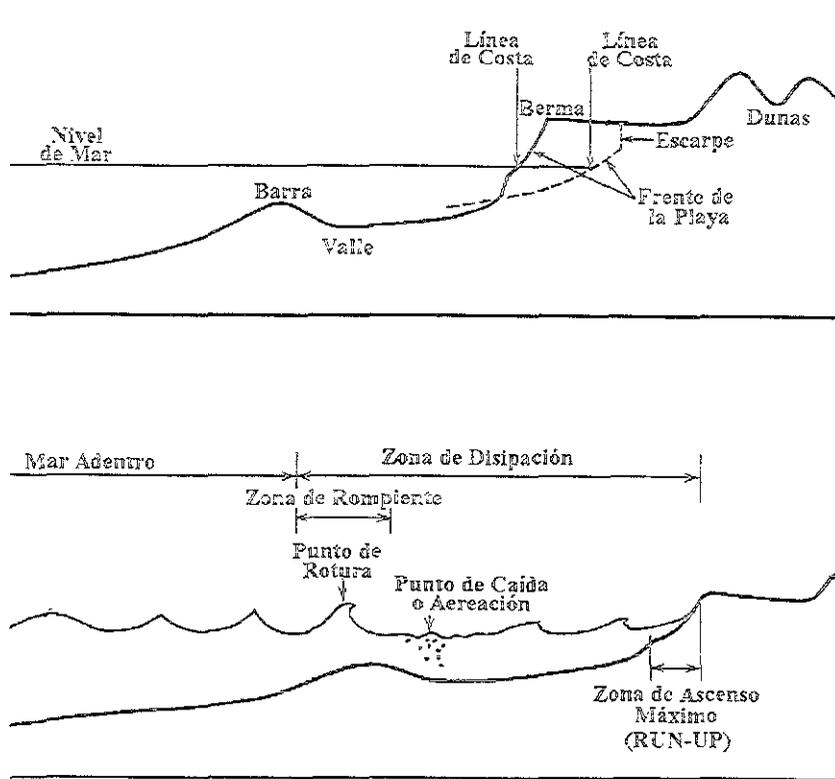


Figura III.1. Esquema de las principales partes de la zona costera.

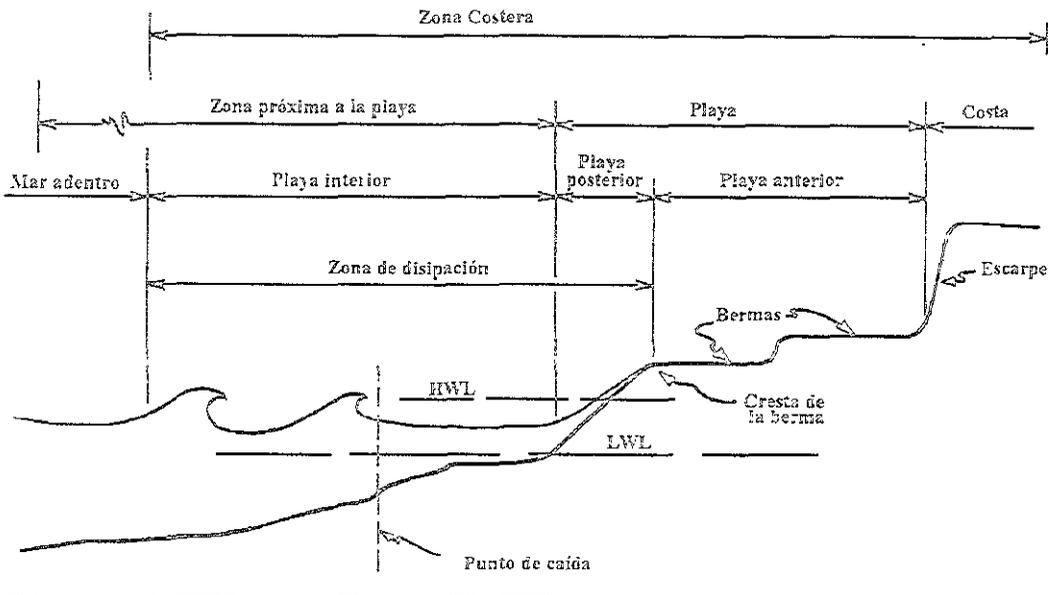


Figura III.2. Esquema de las principales partes de la zona costera.

III.2. 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, Wright & Short (1984) definieron seis estados morfodinámicos de playa, cuatro de ellos intermedios y los otros dos, los estados límite ya mencionados. Estos estados tienen la siguiente nomenclatura:

- Disipativa (Disipative, D)
- Barra longitudinal y valle (Longshore Bar and Through, LBT)
- Barra y playa rítmica (Ritmic Bar and Beach, RBB)
- Barra transversal y corriente de retorno (Transverse Bar and Rip, TBR)
- Terrazas mareales (Ridge Runnel or Low Tide Terraze, RR o LTT)
- Reflejante (Reflective, R)

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 dominar sobre el propio oleaje. Estos modos de movimiento se clasifican en cuatro grandes categorías:

1. 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.
2. Flujos oscilatorios 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.
3. Corrientes longitudinales y de retorno generadas por la rotura del oleaje.
4. Corrientes de marea y de viento.

La experiencia ha demostrado que las velocidades relativas de los diferentes modos de movimiento del fluido dependen fuertemente del estado de la playa en un instante

determinado y de las condiciones ambientales. Cada uno de los movimientos se identifica a través de su frecuencia. Las oscilaciones estacionarias se detectan porque en ellas la oscilación de la superficie libre tiene un desfase de $\pm 90^\circ$ con la oscilación de la velocidad horizontal normal a la costa, U . Finalmente, las corrientes medias netas se manifiestan al promediar de quince a treinta minutos de datos de velocidades.

Antes de iniciar la descripción de los estados morfodinámicos de las playas, es preciso definir el parámetro de escala de rompiente, ε , Huntley et. al. (1977) propusieron la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{a_b \sigma^2}{g \tan^2 \beta} = \frac{\pi}{I_r^2} \quad \text{III.1}$$

donde:

- a_b Amplitud del oleaje incidente
- σ Frecuencia angular del oleaje incidente
- g Aceleración de la gravedad
- $\tan \beta$ Pendiente del fondo
- I_r Número de Iribarren.

III.2.1. Playa disipativa

Este es el primer estado límite de la morfodinámica, la playa disipativa, figura III.3, tiene una morfología prácticamente bidimensional con un perfil muy tendido ($\tan \beta \approx 0.01 - 0.02$); en este perfil existen una o varias barras longitudinales paralelas a la línea de costa y separadas por valles poco marcados. Dada la geometría de este tipo de playas, las corrientes de retorno son casi nulas; únicamente se presentan, cuando existen discontinuidades marcadas por la propia playa; un ejemplo pueden ser los arrecifes rocosos. En las playas disipativas, se presentan valores de ε , superiores a 20, lo que implica que las olas rompen en descrestamiento y en voluta, además de una disipación de la energía del oleaje progresiva a lo largo del perfil.

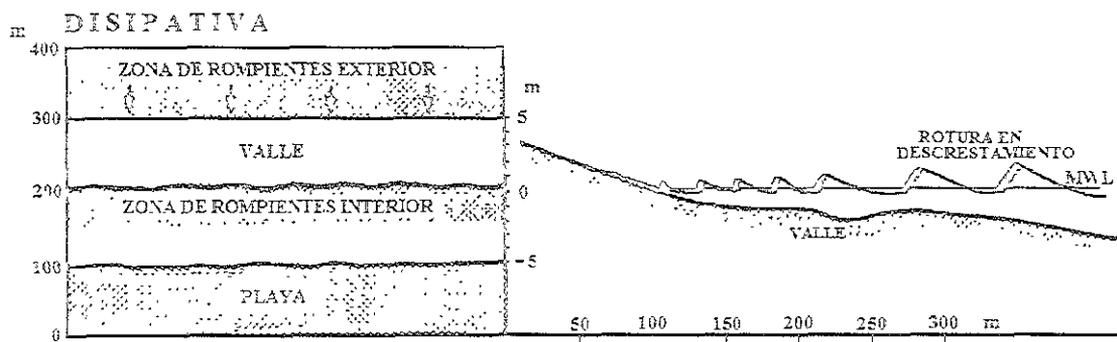


Figura III.3. Estado morfodinámico límite. Playa disipativa.

La playa disipativa se caracteriza por un perfil en el que se distinguen los siguientes factores:

- a. Pendiente cóncava, relativamente suave, donde las olas inician su asimetría.
- b. 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.
- c. Talud de perfil cóncavo, coronado por una berma.
- d. Salvo la presencia de barras cortadas, o no, por canales no existen formas asociadas de playa.
- e. 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.
- f. 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 sobreelevación 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, como consecuencia de la variación espacial y temporal de la rotura en descrestamiento puede oscilar con periodos infragravitatorios (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 infragravitatorios.

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.

III.2.2. Playa Reflejante

La playa reflejante, figura III.4, se encuentra en el otro extremo límite de la escala de estados morfodinámicos de la playa. En éstas se producen roturas en colapso o en oscilación sobre el frente de la playa, que tienen pendientes elevadas ($\tan\beta \approx 0.01 - 0.02$) y con valores del parámetro de escala de rompientes, ε , menores de 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 lo 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).

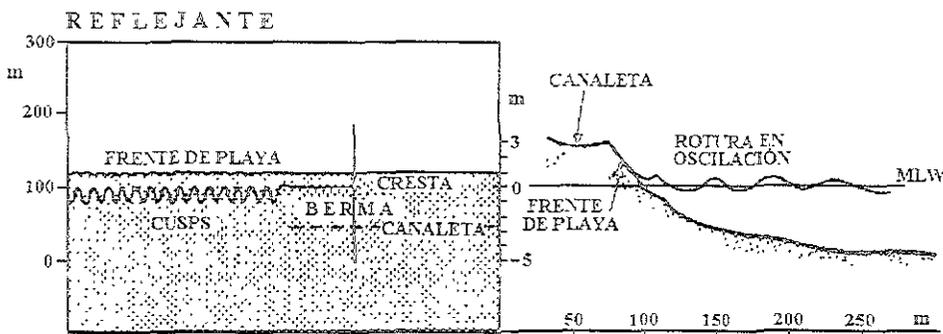


Figura III.4. Estado morfodinámico límite. Playa reflejante.

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 pueden rebasar la berma e iniciar cortes en la playa.

La playa reflejante se caracteriza por un perfil en el que se distinguen los siguientes factores:

- a. Pendiente suave y material fino desde el punto de rotura hacia el mar.
- b. Talud muy rígido con los materiales más gruesos de la playa en el punto de colisión del refluo de la onda incidente.
- c. Talud rígido, constituyendo el talud de la playa propiamente dicho y coronado en una berma.
- d. No existen formas asociadas de playa, excepto formas arenadas en algunos casos.
- e. 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.
- f. 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 esa 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 refluo 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 por 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.

En 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 licúa 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.

III.2.3. Perfiles intermedios

Los cuatro estados intermedios poseen elementos de los estados disipativo y reflejante, a su vez, el parámetro de escala de rompiente varía notablemente tanto transversal como longitudinalmente. Cada uno de estos estados presentan una morfología muy compleja, como en general las playas intermedias presentan diferentes estados en función de las condiciones del oleaje, la variabilidad total de estas playas es muy elevada.

Los estados intermedios presentan las siguientes características:

- a. 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.
- b. Estas barras 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.
- c. 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 infragravitatorias de periodos 10 a $20T$, prevaleciendo cada una de ellas sobre las otras en función del perfil.
- d. Las olas que rompen bajo la acción de las diversas formas de barra, se reorganizan en nuevas olas de periodos del orden de la mitad del incidente las cuales al alcanzar el talud interno de la playa, se reflejan produciendo una onda estacionaria, la cual es inestable a ondas de borde. Ello 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.
- e. 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. De la posición de estos puntos de salida donde aún se discute si son por causas topográficas o hidrodinámicas. Evidentemente, en algunas situaciones la topografía representa un papel fundamental; sin embargo, una propiedad de estas corrientes de retorno es tener un periodo de oscilación del orden de $2T$ a $6T$, es decir, el periodo de ondas de borde subarmónicas. Esto significaría que el tamaño de la barra y la localización de las corrientes de retorno y, en consecuencia, la anchura de los canales paralelos a la playa

y su profundidad responderían a causas hidrodinámicas inducidas por el sistema oscilatorio.

- 7. 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 infragravitatorias originadas por las roturas en descrestamiento sobre la barra no soldada.

III.2.4. Estados "Barra Longitudinal y Valle" y de "Barra y Playa Rítmicas"

Estos estados "Barra Longitudinal y Valle", figura III.5 y "Barra y Playa Rítmicas", figura III.6, están próximos a la playa disipativa y 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 (barra creciente). 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 ($\varepsilon = 2 - 3$). Las ondas de menor peralte rompen en oscilación sobre el frente de la playa, mientras que las de mayor peralte colapsan sobre la base. En ambos casos el ascenso - descenso tiene gran amplitud; con frecuencia aparecen beach - cusps en el frente de la playa.

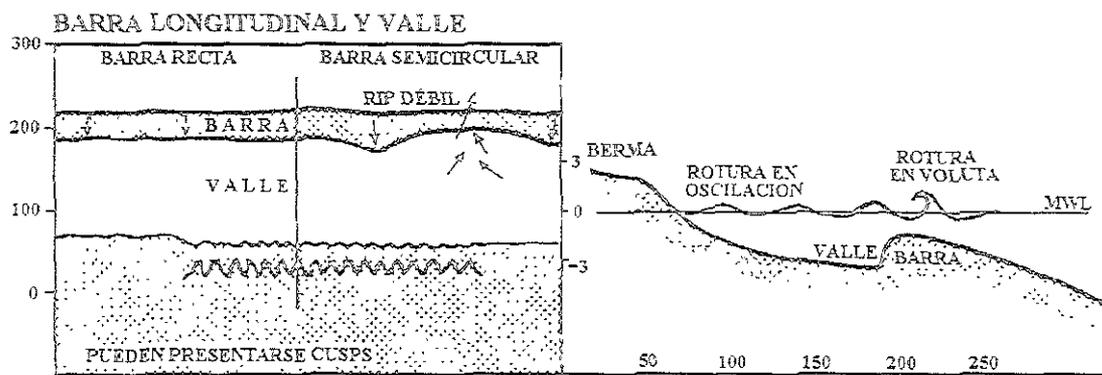


Figura III.5. Estado intermedio "Barra Longitudinal y Valle".

Cuando se producen estas 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.

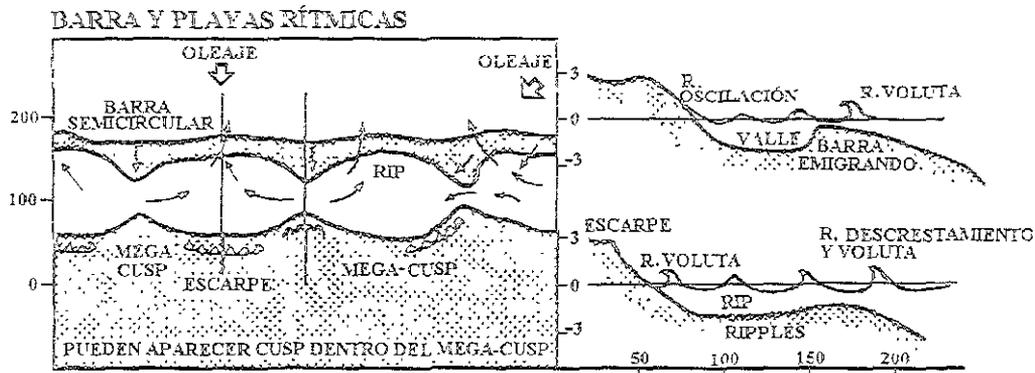


Figura III.6. Estado intermedio "Barras y Playas Rítmicas".

III.2.5. Estado "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, figura III.7.

En el proceso se forman barras transversales altamente disipativas, alternando longitudinalmente con zonas de mayor profundidad, altamente reflejantes y con fuertes corrientes de retorno; las playas en esta situación son las que experimentan las corrientes de retorno de mayor magnitud.

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. 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.

III.2.6. Estado "Terrazas mareales"

Continuando con la secuencia cumulativa, la barra creciente continúa su avance y se une casi totalmente al frente de la playa, formando una terraza cuasi-horizontal que puede emerger ligeramente en bajamar, figura III.8. 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.

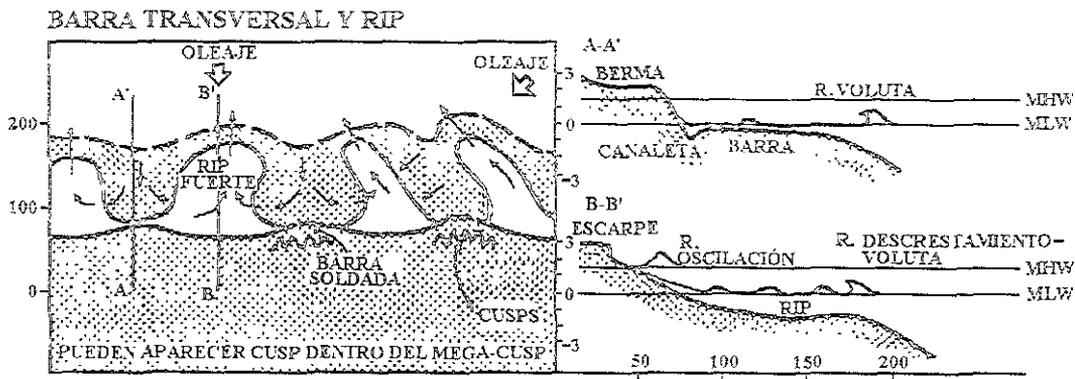


Figura III.7. Estado intermedio "Barra Transversal y RIP".

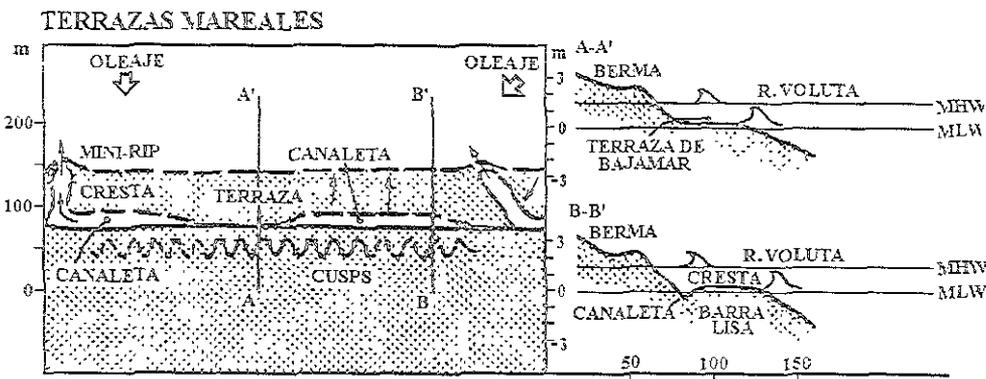


Figura III.8. Estado intermedio "Terrazas Mareales".

III.3. Estado modal de una playa

La morfología de una playa en un instante dado es función de las características del sedimento, de las condiciones del oleaje, marea, viento y del estado precedente de la misma; sin embargo, a largo plazo la playa tenderá a mostrar un estado con mayor frecuencia, llamado estado modal. Alrededor de este estado modal, la morfología de la playa oscilará en respuesta a las variaciones del oleaje. El rango de esta oscilación alrededor del estado modal define la movilidad de la playa.

Para definir la influencia del oleaje y de las características del sedimento en el estado de la playa, se empleará el parámetro adimensional de la velocidad de caída del grano, Ω , propuesto por Dean (1973) y Dalrymple (1977), el parámetro es:

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s T} \quad \text{III.2}$$

donde H_b es la altura de ola en rotura, T es el periodo de la onda y ω_s es la velocidad de caída del grano.

En la parte superior de la figura III.9, se presenta la distribución porcentual de los valores de Ω para distintas playas, en la parte inferior se presentan las distribuciones de los estados de las mismas playas. Como se puede observar, existe una correspondencia entre la distribución de Ω y la distribución de estados de playa. Se ha indicado con un asterisco el estado modal de cada una, con base en la figura III.9, se puede deducir que el parámetro adimensional Ω debe ser menor de uno para que una playa permanezca en el extremo reflejante, mientras que debe ser mayor de seis para permanecer en el extremo disipativo.

En general las condiciones del oleaje y de la morfología de la playa se encuentra en constante cambio, por lo que existe siempre un desfase entre el valor de Ω en un instante dado y el estado de la playa en ese mismo instante debido a que los cambios en la morfología de la playa dependen del estado anterior de la misma y de la energía disponible para el cambio. Por ello, el parámetro adimensional en un instante dado no describe adecuadamente el estado de playa en ese instante. Wright et. al. (1985), propusieron utilizar un parámetro $\underline{\Omega}$ obtenido mediante una media ponderada de los valores de Ω previos al instante de evaluación del parámetro:

$$\underline{\Omega} = \frac{\sum_{i=1}^D \left(\Omega_i 10^{-\frac{i}{\phi}} \right)}{\sum_{i=1}^D 10^{-\frac{i}{\phi}}} \quad \text{III.3}$$

donde $i=1$ corresponde al día anterior a la observación e $i=D$ indica el día correspondiente a D días anteriores; el valor de ϕ depende del grado de "pérdida de memoria del sistema".

Utilizando un análisis de discriminación, Wright et. al. (1985) determinaron los valores de ϕ y D que producen una serie de valores de Ω que mejor explican la variación de los estados de playa. Para el caso de la playa de Narrabeen en Australia, los valores de ϕ y D obtenidos fueron de 5 y 30 días respectivamente; estos resultados son consistentes con la observación de que, en promedio, la playa mencionada cambiaba de estado una vez por semana; excepto durante periodos de alta energía, la variación de estado de playa raramente superó un estado cada dos días. Estos resultados sólo son extrapolables a playas con condiciones morfológicas similares, en otros casos se hace necesario repetir el proceso para obtener los valores de ϕ y D .

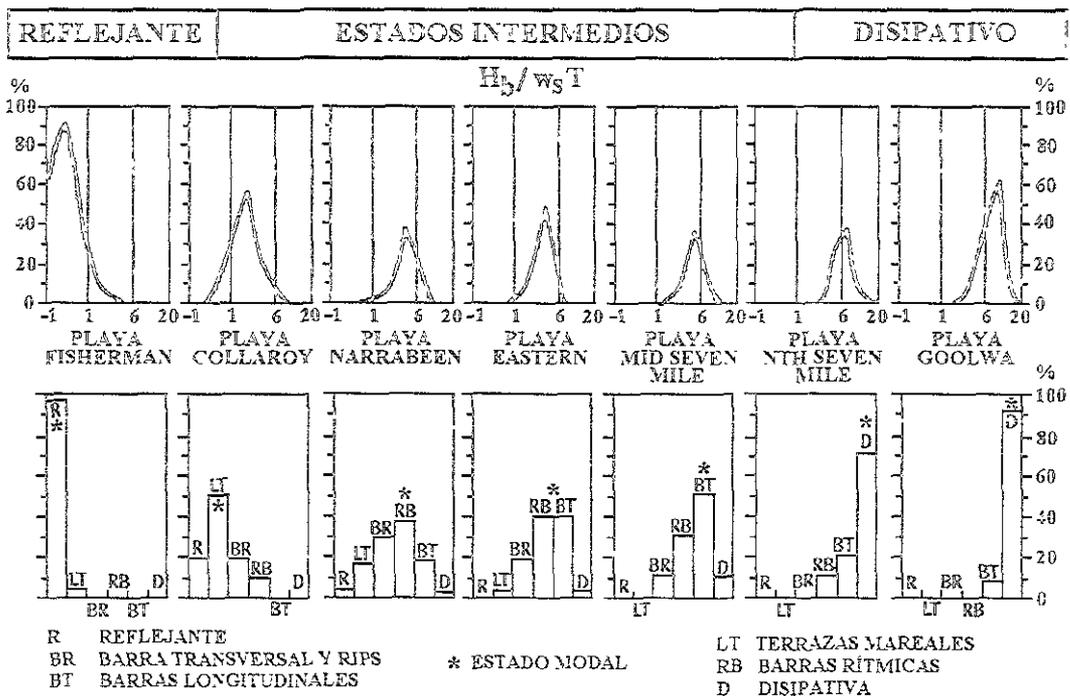


Figura III.9. Distribución de frecuencias de Ω y su correspondiente estado modal para distintas playas, Wright, 1984.

En la figura III.10 se muestra la variabilidad del perfil para diversas playas, ordenadas desde las disipativas hasta las reflejantes. Puede observarse cómo las playas situadas en los extremos de la escala son las que experimentan una menor oscilación en su perfil. Aquellas playas cuyo estado modal es intermedio, especialmente las que tienen un estado modal cercano al reflejante, pero sometida a fuertes oleajes periódicos que la hacen barrer todos los estados, son las que tienen mayor oscilación.

III.4. Perfiles de playas

Se define perfil de playa como la variación de la profundidad del agua, h , con la distancia desde la línea de costa, x , en dirección normal a la misma. $h=f(x)$. Tradicionalmente, el transporte de sedimentos se ha dividido en dos modos ortogonales independientes: transporte longitudinal y transporte transversal o en perfil. El transporte longitudinal se estudiará a detalle en el capítulo V de este trabajo. El transporte transversal se define como el transporte de sedimentos perpendicular a la playa. Esta división ha originado que históricamente, estos dos modos hayan sido analizados por separado.

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), Wright 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.

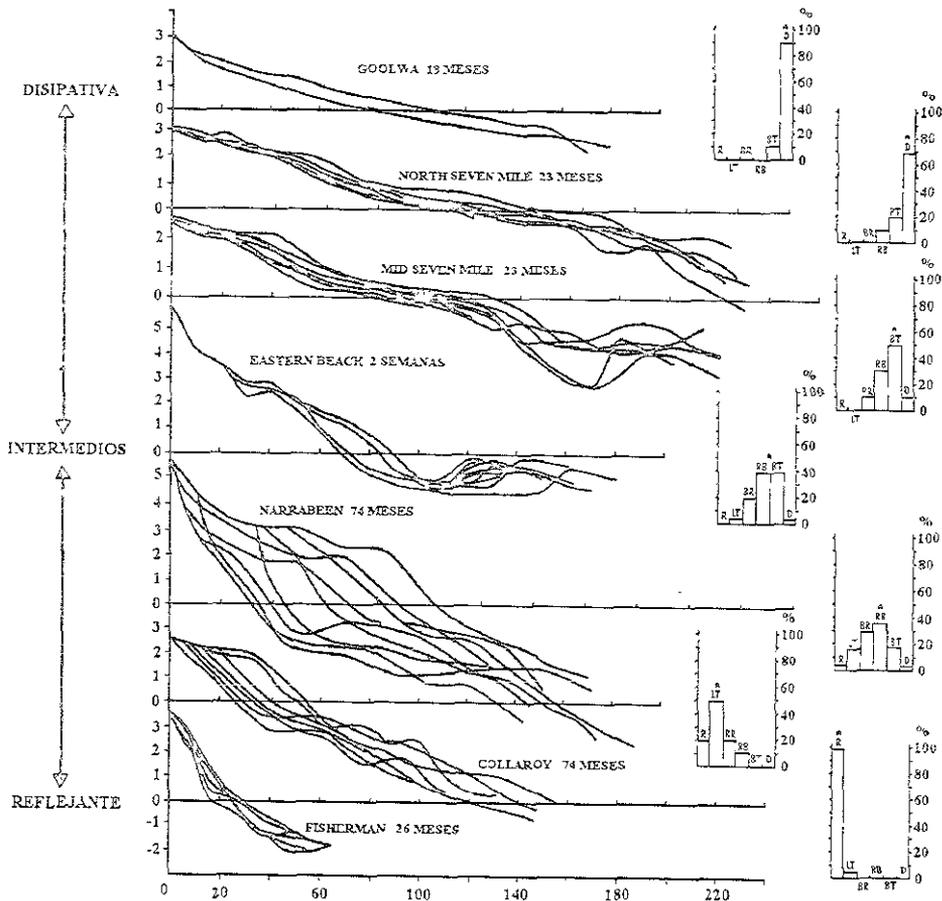


Figura III.10. Variación del perfil de diversas playas en función de su estado modal. Wright, 1984.

La separación del estudio de los movimientos de la playa en transversal y longitudinal como si estos fueran modos ortogonales sirve para la caracterizar ciertos elementos fundamentales y su influencia en los mecanismos de transporte, pero no representa la realidad existente puesto que las variaciones en un perfil de playa pueden estar motivadas no sólo por el transporte transversal, sino también por el transporte longitudinal. A estas variaciones espaciales de los perfiles de playa hay que añadir las variaciones temporales vistas anteriormente.

Un concepto fundamental en el análisis de las variaciones de los perfiles de playa es la idea del perfil de equilibrio, introducido por Bruun (1962) e Inman y Bagnold (1963). Dicho perfil de equilibrio se define como el perfil que se mantendría constante cuando una determinada zona de costa con unas características fijas (tamaño de arena, etc.) esté solicitada por una serie de fuerzas actuantes (olas, corrientes y marea). Esto es, el perfil que no varía en el tiempo si las fuerzas actuantes permanecen constantes, figura III.11.

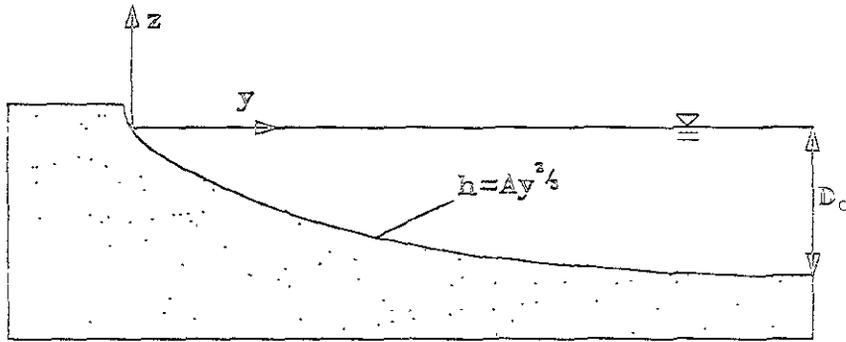


Figura III.11. Perfil de Equilibrio propuesto por Bruun (1954).

Como las zonas de playa presentan variaciones importantes en las fuerzas actuantes, el perfil de equilibrio puede ser tomado como un perfil medio estadístico en un plazo determinado de tiempo. Esto quiere decir que un método adecuado para el estudio de un perfil de playa sería la determinación del perfil medio y el examen de las desviaciones del mismo respecto a la media. De este modo, el perfil medio será un indicador de los agentes hidrodinámicos dominantes medios, mientras que las desviaciones respecto a la media serán un indicador de las variaciones de esos agentes y otros fenómenos, como aportes de sedimentos, etc.

El perfil de equilibrio constituye una herramienta eficaz para predecir el comportamiento de una playa y diseñar o analizar proyectos de regeneración de playas. El concepto de perfil de equilibrio por sí mismo, se encuentra limitado en su aplicación, de acuerdo a las hipótesis generales en que se basa. Numerosos autores han planteado modificaciones del perfil de equilibrio para el estudio de casos más específicos, en los cuales existen parámetros o procesos que se escapan de las hipótesis básicas; como es el caso del perfil de equilibrio con un modelo de disipación, Dally (1985); en la zona de rotura, Larson y Kraus (1989); el perfil de equilibrio con D_{50} variables, Dean (1991), el perfil de equilibrio con disipación exponencial a lo largo de la playa, Larson (1991); entre otros.

Existen al menos tres posibles vías de investigación para el desarrollo de una teoría para la determinación del perfil de equilibrio, Dean y Dalrymple (1991).

- Aproximación cinemática. Se intenta determinar el movimiento de las partículas de sedimento (en suspensión o por fondo), mediante la descripción de las fuerzas que actúan sobre ellas. El equilibrio se obtiene cuando el transporte neto se anula en cada punto del perfil. A este tipo pertenecen los modelos de Bowen (1980, 1981), Dally y Dean (1984) y Leontev (1985).
- Aproximación dinámica. En este caso, el perfil de playa se define como resultado del balance de las fuerzas constructivas y erosivas de una magnitud dinámica o fuerza que se ejerce sobre las partículas del sedimento. Esta aproximación es menos satisfactoria desde el punto de vista del conocimiento del proceso, pero permite resultados

fácilmente aplicables desde el punto de vista ingenieril. A este tipo de aproximación pertenecen el modelo de Dean (1977), Dean y Dalrymple (1981).

- Aproximación empírica. Esta aproximación es puramente descriptiva y representa al intento de ajustar el perfil de playa a las formas más comunes encontradas en la naturaleza, utilizando parámetros determinados mediante las técnicas del análisis dimensional.

Evidentemente, un perfil de equilibrio tal como se definió anteriormente, sólo se puede obtener en el laboratorio donde se puede fijar el oleaje incidente. En la naturaleza, la variación del nivel del mar y del oleaje es constante, por tanto, un perfil de equilibrio en sentido estricto no existe, Kriebel et. al. (1991). No obstante, dado que las variaciones de los diferentes agentes están, en principio, acotadas, también lo estará la variabilidad del perfil pudiéndose admitir en la naturaleza la existencia de una situación modal o perfil de equilibrio que sufre variaciones en función del clima marítimo existente. Más aún, es posible reconocer periodos en los que las condiciones de oleaje pueden considerarse constantes (verano, invierno, un temporal). Bajo estas condiciones la playa puede desarrollar un perfil de equilibrio.

Finalmente, para caracterizar el perfil de equilibrio, Dean (1991) describió cuatro particularidades del mismo:

1. Generalmente son cóncavos hacia arriba.
2. Un menor tamaño de arena origina un perfil con pendiente más suave.
3. El frente de la playa es generalmente lineal.
4. Olas peraltadas dan lugar a pendientes más suaves y con tendencia a formación de barras.

III.4.1. Modelos cinemáticos

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. Bruun (1954) 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:

$$h = A x^{\frac{2}{3}} \quad \text{III.4}$$

Dean (1977) analizó 504 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:

$$h = A x^n \quad \text{III.5}$$

dejando libres los parámetros A y n . Los valores obtenidos fueron:

$$0.1 < n < 1.4$$

$$0.0025 < A < 631$$

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 teniendo el 99% de los valores en el rango:

$$0.0 < A < 0.3$$

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

$$\left(7.6/H_{os}\right)^y = 0.47 \left[\left(\frac{7.6}{H_{os}} \right)^{1.28} \left(\frac{\omega}{0.0268} \right)^{0.56} x + 18 \right]^{0.5} - 2 \quad \text{III.6}$$

donde H_{os} es la altura de ola significativa y ω la velocidad de caída del grano.

Para determinar el ajuste, Vellinga fijó arbitrariamente el valor del exponente $n=0.5$. Posteriormente, en 1984, realizó un nuevo análisis de los resultados de sus ensayos y concluyó que los perfiles de erosión pueden ser descritos por la curva potencial del tipo:

$$h = A x^n$$

encontrando como mejor ajusten de sus ensayos $n=0.78$. Vellinga comparó sus resultados con curvas con exponentes $n=2/3$ siendo los perfiles dibujados con ambos exponentes prácticamente iguales.

III.4.2. Modelos dinámicos

Dean (1977), propuso una aproximación sencilla que se funda en las siguientes cuatro hipótesis:

- En una playa en equilibrio, el transporte neto longitudinal es independiente del transporte transversal, además es nulo o constante; por tanto, el perfil de equilibrio se estudia como un fenómeno bidimensional en el que no existe transferencia lateral de energía.
- La disipación de energía por unidad de volumen, D_x , 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 de la forma ($H = \gamma h$), donde γ es el índice de rotura que se considera constante y está comprendido en el rango (0.7 - 1.0).
- No hay variación en el nivel del mar.

En primer lugar se calcula el flujo de energía que atraviesa las secciones 1 y 2 de un perfil de playa como el mostrado en la figura III.12, separados una distancia, dx :

$$E_1 C_{g1} = E_2 C_{g2} + \frac{\partial(EC_g)}{\partial x} dx \quad \text{III.7}$$

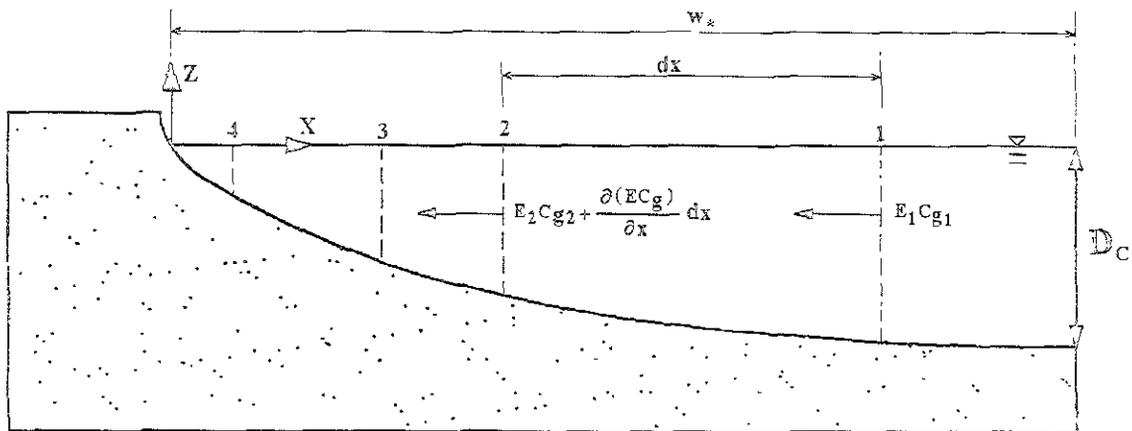


Figura III.12. Equilibrio de flujo de energía en un perfil de playa.

El flujo de energía incidente es igual al flujo de energía que sale más la parte de energía disipada en el interior del volumen de control. También se puede expresar como:

$$E_1 C_{g1} = E_2 C_{g2} + \varepsilon dx \quad \text{III.8}$$

siendo:

$$\varepsilon = \frac{\partial(EC_g)}{\partial x} \quad \text{III.9}$$

Si se evalúa la disipación, ε , en otra sección, por ejemplo entre 3 y 4, el valor de esta disipación será diferente de la anterior. Dean señala como hipótesis que la disipación por unidad de volumen, D_* , es constante, esto es:

$$D_* = \frac{\varepsilon}{h} = \frac{1}{h} \frac{\partial (EC_g)}{\partial x} = \text{constante} \quad \text{III.10}$$

Dean proporciona la siguiente justificación a su hipótesis: Durante el proceso de rotura el movimiento organizado del oleaje se transforma en fluctuaciones turbulentas. Estas fluctuaciones ponen el material en suspensión y causan su movilización lo cual reduce la disipación por unidad de volumen dando lugar a una posición de equilibrio.

Utilizando la teoría lineal en aguas someras y admitiendo que el índice de rotura, γ , es constante y con apoyo en las siguientes expresiones:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad \text{III.11}$$

$$C_g = \sqrt{gh} \quad \text{III.12}$$

$$H = \gamma h \quad \text{III.13}$$

Al sustituir y ordenando en la ecuación III.10, se obtiene:

$$hD_* = \frac{\partial \left(\frac{1}{8} \rho g \gamma^2 h^2 \sqrt{gh} \right)}{\partial x} \quad \text{III.14}$$

si h sólo depende de x , se tiene:

$$\frac{1}{h} \frac{dh^{5/2}}{dx} = \frac{D_*}{\left(\frac{1}{8} \rho g^{3/2} \gamma^2 \right)} \quad \text{III.15}$$

derivando:

$$\left(\frac{5}{2} \right) h^{3/2} dh = \frac{D_*}{\left(\frac{1}{8} \rho g^{3/2} \gamma^2 \right)} dx \quad \text{III.16}$$

integrando:

$$h^{3/2} = \frac{D_*}{\left(\frac{5}{24} \rho g^{3/2} \gamma^2\right)} x \quad \text{III.17}$$

III.4.3. Factores que afectan el parámetro A

o Tamaño del sedimento

Hughes y Chiu (1978) llevaron a cabo un análisis de perfiles de playa y de las características del sedimento asociado a dichos perfiles en diferentes lugares de la costa de Florida y del lago Michigan. Estos análisis mostraron que el perfil de equilibrio describía de modo correcto los perfiles de playa y que, en los perfiles de la costa Este de Florida, existía una gran relación entre el tamaño del grano y el valor del parámetro A . En los perfiles de la costa Oeste de Florida y del lago Michigan la correlación encontrada fue, sin embargo, muy baja.

Moore (1982) revisó los 504 perfiles analizados por Dean (1977) incorporando la información del tamaño del sedimento. Además, en su estudio incluye un gran número de resultados de ensayos de laboratorio. El conjunto de perfiles analizados por Moore abarcaba desde perfiles con tamaño de 1 mm hasta 30 cm. Moore dibujó los valores del tamaño del sedimento en función del parámetro A , figura III.13. Como era de esperar, a mayor diámetro del sedimento, mayor es el parámetro A , y por tanto, el perfil de la playa tiene más pendiente. La relación encontrada fue $A \approx D^{1/3}$.

Posteriormente, Dean (1987), transformó los datos de Moore expresando A en función de la velocidad de caída del grano, ω , figura III.13; encontrando una relación entre ambas:

$$A = K \omega^{0.44} \quad \text{III.18}$$

con $K = 0.51$ y ω expresada en m/s.

Los resultados muestran además, que los valores de A varían suavemente a lo largo de grandes distancias en una misma costa y que son razonablemente constantes en el tiempo. La relación entre el parámetro A y la velocidad de caída del grano propuesta por Dean coincide con la encontrada con anterioridad por Vellinga (1984), basándose en las relaciones de escala adoptadas en los ensayos de erosión de dunas efectuadas por él.

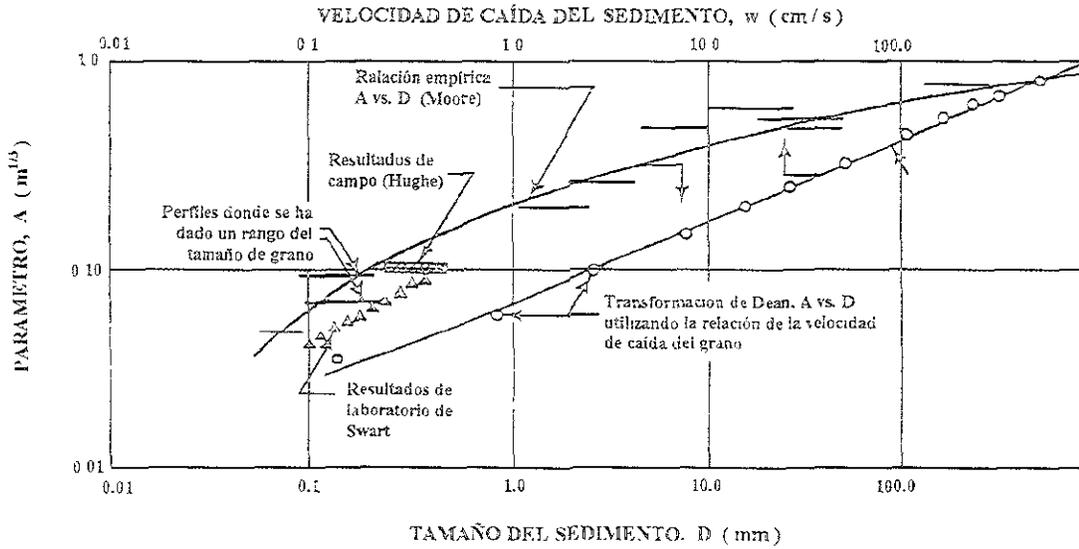


Figura III.13. Variación del parámetro A con el tamaño del grano, Moore, 1982.

Bowen (1980) y Kriebel et al. (1991) por medio de argumentos energéticos y siguiendo aproximaciones totalmente diferentes propusieron una relación del tipo:

$$A \approx \omega^{\frac{2}{3}} \tag{III.19}$$

En particular Kriebel et al. (1991) propusieron:

$$A = 105\omega^{\frac{2}{3}} \tag{III.20}$$

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 alcanza el 20%.

Como valores de A se pueden emplear las funciones dadas por Hanson & Kraus (1989).

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

Los valores del tamaño medio del grano, D_{50} , vienen dados en milímetros.

La pendiente media hasta la profundidad en la que no se produce transporte longitudinal de sedimentos, se obtiene del perfil anterior:

$$\overline{\tan \beta} = \sqrt[3]{\frac{A^3}{D_c}} \quad \text{III.21}$$

Otra de las expresiones para determinar el parámetro A , se obtienen de la ecuación III.17, en donde, si dicha ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$h = Ax^{2/3} \quad \text{III.22}$$

La expresión para determinar el parámetro A queda definido por:

$$A = \left[\frac{24D_*}{5\rho g^{2/3}\gamma^2} \right]^{2/3} \quad \text{III.23}$$

Como se mostró en la figura III.13, el parámetro A puede relacionarse con la velocidad de caída del grano. Kriebel, Kraus y Larson (1991), desarrollaron una correlación similar, considerando tamaños de sedimento de 0.1 mm a 0.4 mm y presentaron la siguiente relación:

$$A = 2.25 \left(\frac{\omega^2}{g} \right)^{1/3} \quad \text{III.24}$$

Existen dos limitantes inherentes en la ecuación III.22; en primer lugar la pendiente del perfil de playa hasta la línea de costa es infinita. En segundo lugar, el perfil de playa no permite representar barras.

◦ *Peralte de la ola*

El peralte del oleaje $S_0 = H_0 / L_0$ [donde el subíndice ()₀ indica aguas profundas o indefinidas], juega, junto al número de Dean o parámetro de velocidad de caída del grano $D = H / \omega T$, un papel determinante en el tipo de perfil existente en una playa. Darlymple (1992), comprobó que una combinación de ambos números adimensionales que denominó parámetro del perfil P , es capaz de distinguir entre ambos tipos de perfiles:

$$P = \frac{D^3}{S_0} > 9000 \quad \text{Perfil disipativo (Erosión)} \quad \text{III.24}$$

$$P = \frac{D^3}{S_0} < 9000 \quad \text{Perfil reflejante (Acumulación)} \quad \text{III.25}$$

Es necesario aclarar que el valor de 9000 debe sustituirse por 22200 si se utiliza el oleaje en rotura H_B en lugar de H_0 . Y por 26500 si se utiliza el valor de la altura de ola significativa H_{0s} .

Suh y Dalrymple (1988) mostraron que tanto los perfiles disipativos como los reflejantes se podían representar en su forma por medio de un perfil de equilibrio del tipo $h = A x^{2/3}$ estando el parámetro A relacionado con el tamaño del grano del perfil siendo mínima su dependencia con las características del oleaje incidente. Este trabajo se realizó utilizando datos de Sunamura y Horikawa (1974), en los cuales se partía de un perfil lineal de pendiente m , y se le sometía a oleaje de diferente peralte al objeto de obtener perfiles de erosión y perfiles de acumulación.

Por otro lado, Vellinga (1983), comprobó en ensayos de laboratorio que la forma del perfil era independiente de la altura de ola variando únicamente la distancia del límite exterior del perfil, es decir, la distancia w_* , figura III.12, en la cual el perfil de equilibrio $h = A w_*^{2/3}$ es válido.

En general, se concluye que el principal parámetro físico relevante en la forma del perfil de equilibrio en A , es el tamaño representativo del sedimento (D_{50}), siendo despreciables los efectos de la altura de ola.

o *Velocidad de caída*

La velocidad de caída es la máxima velocidad que adquiere una partícula al caer dentro de un líquido y se alcanza cuando el peso de la partícula se equilibra con la fuerza de empuje que ejerce el líquido contra la partícula.

Para una esfera sencilla cayendo en un líquido, el balance entre las fuerzas de arrastre y las gravitacionales es:

$$C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho \omega^2}{2} = \frac{\pi D^3}{6} (\rho_s - \rho) g \quad \text{III.26}$$

despejando:

$$\omega = \left(\frac{4}{3} \frac{g D}{C_D} \left[\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{III.27}$$

donde:

- ω Velocidad de caída, m/s
- C_D Coeficiente de adimensional de arrastre
- D Diámetro del grano, m
- ρ Densidad del agua, kg/m^3
- ρ_s Densidad del sedimento, kg/m^3

Ahora el problema es determinar el valor apropiado del coeficiente de arrastre. En la figura III.14, fundamentada en extensivos datos de laboratorio, se muestra el coeficiente C_D como función del número de Reynolds ($Re = \omega D / \nu$, donde ν es la viscosidad cinemática) para partículas esféricas. Re es un número adimensional. La figura III.14 se divide en tres regiones.

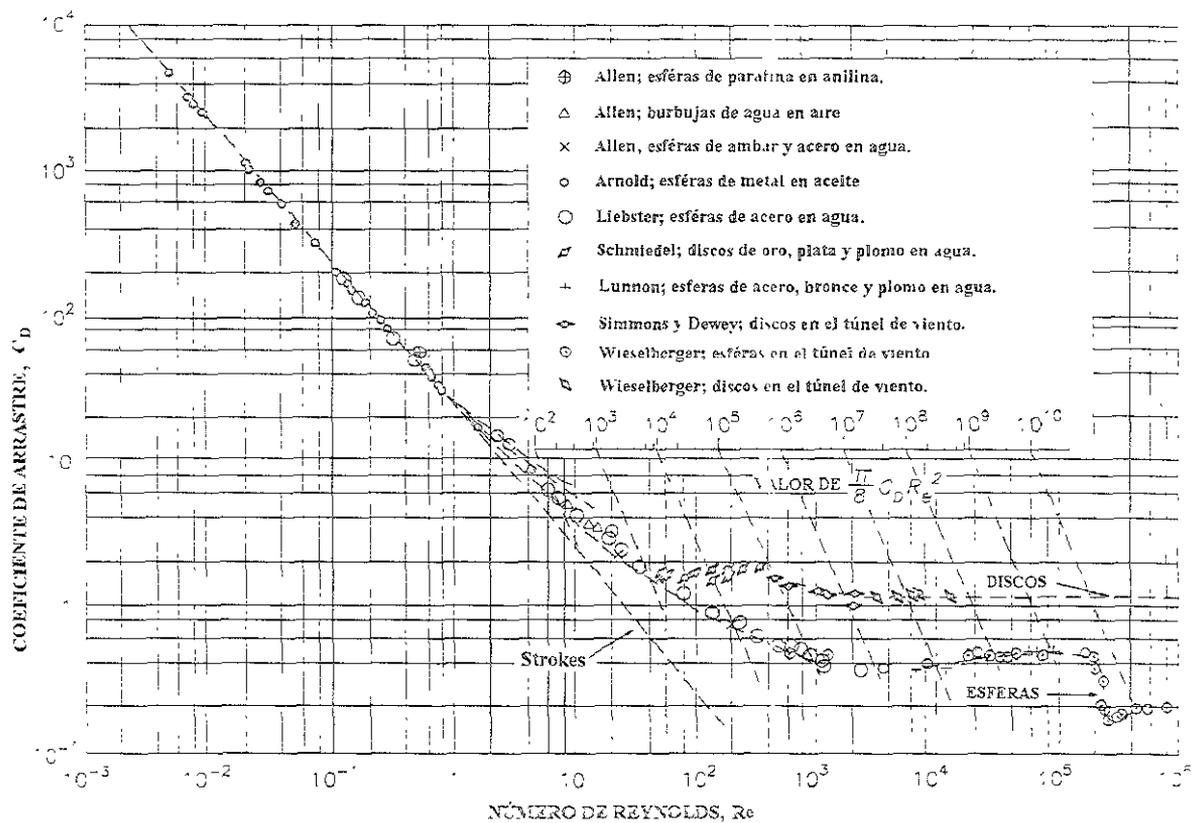


Figura III.14. Coeficiente de arrastre, C_D en función del número de Reynolds, CEM, 1998.

En la primer región, $0.5 < Re < 400$, el coeficiente de arrastre decrece linealmente con el incremento del número de Reynolds. esta región corresponde a pequeños y ligeros granos cayendo lentamente en un líquido. El arrastre de un grano es dominado por las fuerzas viscosas, un poco por las fuerzas de inercia y por el flujo si es completamente laminar. La región intermedia, $400 < Re < 200000$, donde el coeficiente de arrastre toma valores aproximados entre 0.4 y 0.6, en este rango las partículas son grandes y densas, y la velocidad de caída es rápida. La razón física de este cambio en el comportamiento de C_D es, que la fuerza inercial de arrastre ahora es predominante sobre las fuerzas viscosas y la estela

atrás de la partícula es turbulenta. En la tercer región, $Re > 200000$, el coeficiente de arrastre decrece abruptamente, esta es la región de la partículas muy grandes y de altas velocidades de caída. Aquí, no sólo es la estela turbulenta, también lo es la capa límite alrededor de la partícula.

En la primer región, Stokes propone la solución analítica de C_D como:

$$C_D = \frac{24}{Re} = \frac{24\nu}{\omega D} \quad \text{III.28}$$

Sustituyendo la ecuación III.28 en la III.27, se obtiene la velocidad de caída en esta primer región:

$$\omega = \frac{8D^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \quad \text{III.29}$$

Cabe hacer notar que en esta región la velocidad se incrementa con el cuadrado del diámetro del grano y depende de la viscosidad cinemática.

Para la región de $400 < Re < 200000$, se tiene la siguiente aproximación $C_D \approx 0.5$, de la ecuación III.27, se obtiene:

$$\omega = 1.6 \left(gD \left[\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{III.30}$$

Aquí se observa que la velocidad de caída con la raíz cuadrada del diámetro del grano y es independiente de la viscosidad cinemática.

En forma análoga, para la región $Re > 200000$, se tiene la siguiente aproximación, $C_D \approx 0.2$, se tiene:

$$\omega = 2.6 \left(gD \left[\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{III.31}$$

III.5. Profundidad de Cierre

La profundidad de cierre es un concepto muy utilizado en la ingeniería de costas, éste describe el límite mar adentro a partir del cual no se tienen cambios apreciables. Esta fundamentado en observaciones repetitivas del perfil de la playas, donde se aprecia la variabilidad vertical al incrementarse la profundidad, figura III.16.

La profundidad de cierre es comúnmente utilizada para inferir el límite mar adentro donde el transporte de sedimentos transversal es considerable y en las siguientes aplicaciones:

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

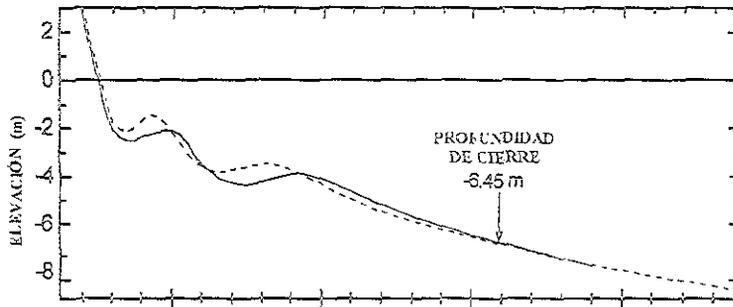


Figura III.15. Profundidad de cierre.

En algunos sitios, donde las características del perfil de la playa es constante, la estimación de la profundidad de cierre se puede realizar directamente, sin embargo, es inusual encontrar este tipo de lugares y normalmente, para calcular este concepto se tienen un rango de posibilidades.

Una expresión para calcular la profundidad de cierre utilizando condiciones extremas del oleaje, es la propuesta por Hallermeier (1978).

$$D_{C,t} = 2.28 H_{e,t} - 68.5 \left(\frac{H_{e,t}^2}{g T_{e,t}^2} \right) \quad \text{III.32}$$

donde:

- $D_{C,t}$: Profundidad de cierre en t años, referenciada al nivel medio del mar.
- $H_{e,t}$: 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.

Hallermeier definió la condición resultante del movimiento del sedimento con unas condiciones de oleaje relativamente rara y poco usual. Esto es, la altura de ola significativa basada en las condiciones de excedencia sólo 12 horas al año, esto es, 0.14 por ciento del tiempo.

Una aproximación para calcular la profundidad de cierre, es el propuesto por el CEM (1998), y se tiene la siguiente expresión:

$$D_c = 2.28 H_e - 68.5 \left(\frac{H_e^2}{g T_e^2} \right) \quad \text{III.33}$$

en donde H_e puede determinarse con la media anual de la altura de ola significativa \bar{H} y con su desviación estándar, σ_H , esto es:

$$H_e = \bar{H} + 5.6\sigma_H \quad \text{III.34}$$

Basándose en la relación anterior, Hallermeier propuso una forma para calcular la profundidad de cierre y que no depende del periodo de onda

$$D_c = 2\bar{H} + 11\sigma_H \quad \text{III.35}$$

Birkemeier (1985), evaluó la relación propuesta por Hallermeier, ecuación III.35, utilizando perfiles medidos y encontró la siguiente aproximación simplificada de la profundidad de cierre proporcionando un buen ajuste a los datos. La expresión es:

$$D_c = 1.57H_e \quad \text{III.36}$$

En la figura III.16, se presentan datos medidos en campo, proporcionados por Comisión Federal de Electricidad.

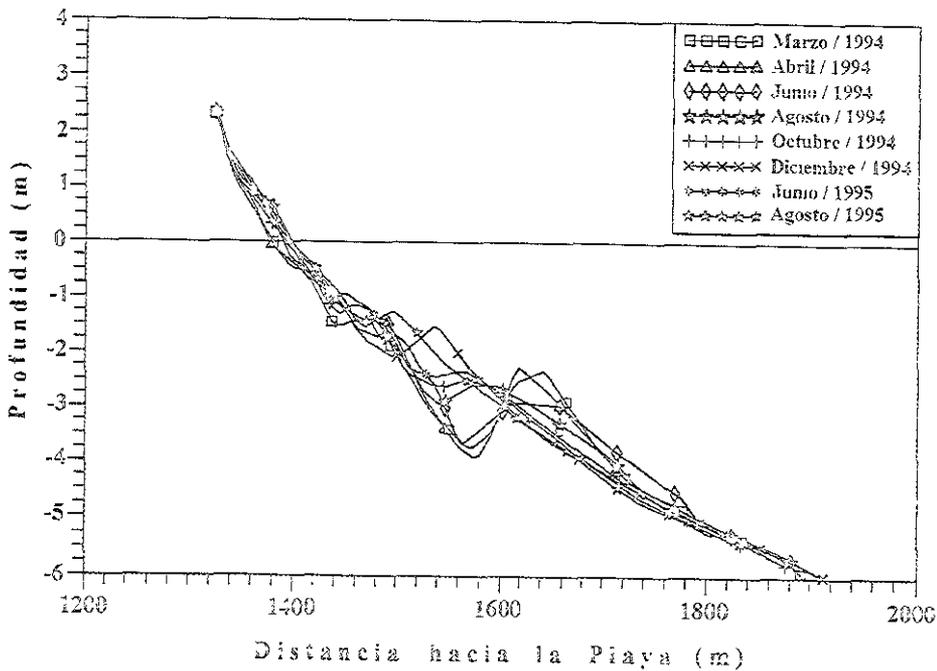


Figura III.16. Variabilidad temporal del perfil de playa en las cercanías de la planta Termoeléctrica "Adolfo López Mateos", Silva et al., 1996

En la figura III.16, se puede observar la variabilidad del perfil en la playa aledaña a la planta termoeléctrica "Adolfo Lopez Mateos", Tuxpan, Veracruz, México; Los levantamientos se realizaron desde marzo de 1994 hasta agosto de 1995. Se observa la evolución desde un perfil de playa disipativo a uno reflejante y la 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, en la escala de la figura III.16. Esto significa que la profundidad de cierre es de -5.25 m.

III.6. Resumen

El equilibrio dinámico es cuando la playa adquiere una forma invariable bajo la presencia de transporte longitudinal de sedimentos sin cambio en el volumen global de material dentro de la unidad fisiográfica. Otro concepto muy importante manejado en este capítulo es, 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.

En este capítulo se definieron los estados morfodinámicos de las playas:

- Disipativa (Disipative, D)
- Barra longitudinal y valle (Longshore Bar and Through, LBT)
- Barra y playa rítmica (Ritmic Bar and Beach, RBB)
- Barra transversal y corriente de retorno (Transverse Bar and Rip, TBR)
- Terrazas mareales (Ridge Runnel or Low Tide Terraze, RR o LTT)
- Reflejante (Reflective, R)

En los estados morfodinámicos de las playas se distinguen dos estado límites que son: las playas reflejantes y las playas disipativas; y cuatro estado intermedios. La descripción y características de cada uno de los seis estados morfodinámicos se presentaron en este capítulo.

Otro concepto de importancia relevante, es el "perfil de equilibrio", que se define como: el perfil que se mantendría constante cuando una determinada zona de costa con unas características fijas (tamaño de arena, etc.) esté solicitada por una serie de fuerzas actuantes (olas, corrientes y marea). Esto es, el perfil que no varía en el tiempo si las fuerzas actuantes permanecen constantes. Este concepto es de vital importancia para la simplificación de la teoría de una línea como se verá posteriormente.

Para definir el límite mar adentro, se define a la "profundidad de cierre" que es un concepto vital en el estudio de la evolución costera. Esta se define como el límite mar adentro a partir del cual no se tienen cambios apreciables. A partir de este punto, el transporte de sedimentos es irrelevante, por tanto, es el límite físico para definir el volumen de control donde se valúa el transporte de sedimentos

IV. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA.

IV.1. Introducción.

Un modelo de línea de costa es una herramienta de predicción numérica basada en la ecuación de continuidad del sedimento y en una ecuación para el transporte longitudinal de sedimentos. Se denomina también Teoría de Una Línea (*One Line Theory*, OLT) para la predicción del movimiento de la costa, donde "Una Línea" se refiere a la línea de costa.

El movimiento de sedimentos causado por el oleaje puede ser clasificado en dos tipos, según su dirección: transporte longitudinal, a lo largo de la línea de costa, y transporte transversal, perpendicular a ella. Salvo en determinados casos como puede ser la caída del sedimento en cañones submarinos, o el transporte de sedimento hacia tierra por el viento, a largo plazo, el transporte transversal está confinado en una franja de costa. Esta franja está limitada por la línea de máximo asenso en el período invernal (cuando la playa se encuentra en estado disipativo) y la zona donde el oleaje ya no es capaz de poner en movimiento el sedimento. Para predicciones a largo plazo, la mayor parte de la información del cambio de la línea de costa viene dada por el transporte longitudinal de sedimento.

Ya que las ecuaciones del transporte longitudinal de sedimentos dependen de las características del oleaje, en el modelo de línea de costa es necesario determinar las variaciones longitudinales de aquél mediante modelos de refracción-difracción. El cambio de línea de costa que se produce en un intervalo de tiempo, puede ser calculado a partir de las diferencias en el gasto de transporte longitudinal, suponiendo que el perfil de la playa se mueve paralelamente a sí mismo. En el caso de que se produzcan pérdidas o aportaciones puntuales de sedimento, pueden tenerse en cuenta igualmente en el modelo. En el modelo más general, es necesario tener en cuenta la interacción entre el modelo de oleaje y el cambio de línea, pues el primero modifica las características del oleaje a medida que cambia el segundo.

El modelo OLT sólo debe ser utilizado para la predicción a largo plazo y a gran escala. Es especialmente adecuado para determinar el efecto de espigones, diques exentos, aportaciones puntuales de sedimento, etc. Este modelo no puede describir la formación del perfil de playa ni determinar por lo tanto los cambios estacionales del perfil, erosiones por muros de protección y otros cambios que involucren transporte transversal de sedimentos.

El modelo fue desarrollado originalmente por Pernald-Considerere (1956), para examinar el cambio de la línea de costa debido a un espigón. Supuso que el gasto de transporte longitudinal era proporcional al ángulo de incidencia del oleaje. Los resultados se ajustaron bien con los de ensayos de laboratorio. 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.

El procedimiento para la aplicación de los modelos de cambio de línea de costa se puede resumir de la manera siguiente:

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.

Calculada la nueva línea de costa, se vuelve a empezar en el punto 2, dándose por terminada la iteración cuando se alcanza el equilibrio o una determinada posición de la línea de costa.

IV.2. Modelo de oleaje

El modelo de línea de costa calcula el gasto del transporte longitudinal de sedimentos mediante el conocimiento de las características del oleaje en rotura. Se requiere, por tanto, disponer de un modelo de oleaje que permita determinar la distribución longitudinal de la altura y el ángulo de la ola en rotura, partiendo de la información de altura de ola, período y ángulo del oleaje incidente en una determinada profundidad de referencia fuera del área de rompientes. Este modelo de oleaje se describe a continuación.

La predicción de los modelos de cambio de línea de costa son sensibles a la secuencia del oleaje que se introduce en ellos. Se ha demostrado que el intervalo de tiempo de simulación para la entrada de datos de oleaje y la secuencia de entrada son factores importantes en el resultado de la simulación. Para obtener resultados fiables es aconsejable que los datos de oleaje incidente se renueven con intervalos de un día o menos. El intervalo de tiempo óptimo para la renovación de los datos de oleaje depende de la variabilidad temporal del ángulo de incidencia y de la altura de ola. Si los efectos de la difracción en la línea de costa no son importantes, el modelo es más sensible a la variación del ángulo de incidencia que a la altura de ola. Si los efectos de la difracción son importantes, el modelo es sensible tanto a los cambios de dirección como a los de la altura de ola (Hanson y Kraus, 1986)

Si se dispone de una serie de datos de oleaje suficientemente larga, el proceso de calibrado del modelo de línea de costa es relativamente sencillo. Sin embargo, a la hora de realizar predicciones con el modelo, se requiere, además aceptar la hipótesis de que los datos de oleaje que se han utilizado en la calibración son representativos de las condiciones de oleaje en el futuro.

En la práctica, se debe llegar a un equilibrio entre el nivel de sofisticación exigido al modelo de oleaje, el que se utiliza en los cálculos del transporte de sedimentos y en el modelo de línea de costa. Esto es debido a que las rutinas de refracción-difracción sobre una topografía bidimensional arbitraria pueden consumir un tiempo de computadora hasta dos órdenes de magnitud superior a la rutina de cambio de línea de costa. Para períodos de simulación de un año o mayores, el tiempo de cálculo puede llegar a ser excesivo. Para evitar estos problemas se utilizan estrategias para ahorrar tiempo de cálculo, como pueden ser: disminuir la frecuencia de cambio de las condiciones de oleaje o limitar éstas a un número fijo de categorías, como, por ejemplo, limitando los casos a bandas de altura de ola y período, almacenando los resultados para recuperarlos de acuerdo con el tipo de datos de entrada.

En general, se puede hablar de dos tipos de situaciones que requieren dos condiciones diferentes de modelo de oleaje:

- a) Secciones largas de playa sin estructuras significantes.
- b) Secciones relativamente cortas de playa en la vecindad de estructuras.

En el caso a), la refracción sobre fondo irregular (incluyendo someramiento) es predominante. En este caso es necesario refractar el oleaje sobre una malla bidimensional que describa la batimetría. El cálculo se puede realizar por el método clásico de los rayos o resolviendo las ecuaciones de gobierno directamente sobre la malla.

En el caso b) la difracción es dominante, mientras que la refracción queda en un segundo plano no despreciable. Existen modelos de refracción-difracción combinada, que resuelven la ecuación elíptica de la pendiente suave o su aproximación parabólica y que consumen gran cantidad de tiempo de computadora, dependiendo del tamaño de la malla, por lo que, sólo se podrían emplear tras el almacenamiento de los resultados de los distintos casos de oleaje para su utilización en el modelo de la línea de costa.

Se estiman las condiciones del oleaje en rotura mediante un modelo de oleaje semiempírico, considerando las siguientes hipótesis:

1. Fondo de pendiente constante con batimétricas paralelas localmente.
2. Oleaje regular, definido por la teoría lineal.
3. Interacciones oleaje - corriente despreciables.
4. Estructuras con condiciones de difracción y reflexión simples.

IV.2.1. Modelo de oleaje semi-empírico para difracción-refracción causado por estructuras costeras

La figura IV.1 presenta un esquema para el procedimiento de cálculo del oleaje detrás de estructuras. Como es habitual, se divide el área de interés en una zona iluminada, donde la dirección de los rayos no cambia por difracción, pero si la altura de ola y en un área de sombra, donde la difracción cambia tanto la dirección como la altura del oleaje.

En lo que se refiere al ángulo del oleaje dentro del área de sombra, se supone que los rayos parten radialmente desde el extremo de la estructura, con un ángulo α_1 para alcanzar el punto de rotura P_2 con un ángulo α_2

La altura de ola en rotura, en el punto P_2 se determina por la solución simultánea de la ecuación de altura de ola en el punto, teniendo en cuenta la refracción, difracción, someramiento y un criterio de rotura, esto es:

$$H_B = K_d(\alpha_D, \alpha_2, h_B) K_r(\alpha_1, h_B) K_s(h_B) H_{\text{morro}} \quad \text{IV.1}$$

$$H_B = \gamma h_B \quad \text{IV.2}$$

Donde:

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

K_d : Coeficiente de difracción en el punto P_2 , calculado una vez conocidos α_B , ángulo en rotura y h_B profundidad en rotura.

K_r : Coeficiente de refracción para el rayo que, desde el extremo de la estructura, pasa por P_2 .

K_s : Coeficiente de someramiento en el punto P_2 , relativo a la profundidad en el extremo de la estructura.

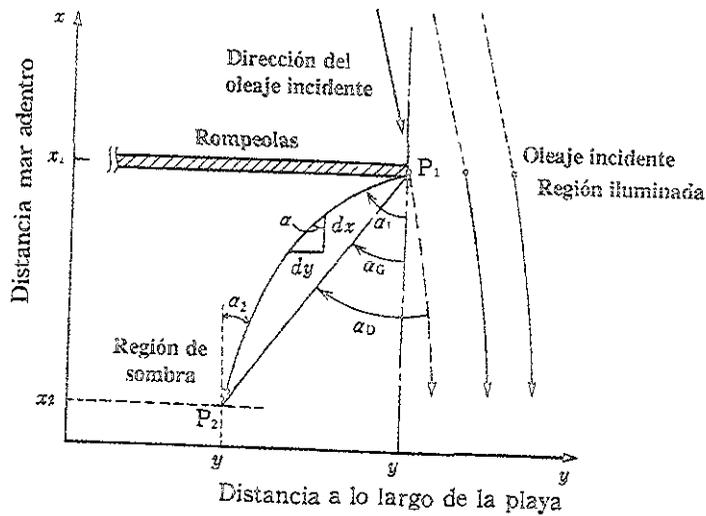


Figura IV.1. Esquema para calcular el oleaje.

El coeficiente de difracción, K_d , se puede calcular por el método clásico de Penney & Price (1952), Silva (1995), o por otros métodos aproximados, Goda (1985). El efecto de la dispersión direccional en la refracción es pequeño y puede ser ignorado en este nivel de modelo.

El coeficiente de refracción, K_r , es una función del ángulo de partida del rayo, punto P_1 y del ángulo de llegada al punto P_2 :

$$K_r = \left(\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \right)^{1/2}, \text{ para la región de sombra.} \quad \text{IV.3}$$

$$K_r = \left(\frac{\cos \alpha_{morro}}{\cos \alpha_2} \right)^{1/2}, \text{ para la región iluminada.} \quad \text{IV.4}$$

donde:

α_1 : Ángulo de salida del rayo desde el extremo de la estructura.

α_{morro} : Ángulo de llegada de las olas al extremo de la estructura.

α_2 : Ángulo de llegada de las olas al punto P_2 .

El coeficiente de someramiento, K_s , es una función de las profundidades en el extremo de la estructura y en el punto P_2 , y viene dado por la siguiente relación entre las celeridades de grupo en P_1 y P_2 .

$$K_s = \left(\frac{C_{g1}}{C_{g2}} \right)^{1/2} \quad \text{IV.5}$$

El coeficiente de índice de rotura, γ , depende del peralte del oleaje en profundidades indefinidas, H_0/L_0 y la pendiente de la playa, $\tan\beta$. Se presenta aquí una expresión simple debida a Singamsetti & Wind (1980):

$$\gamma = 1.16 \left[\frac{\tan \beta}{(H_0/L_0)^{1/2}} \right]^{0.22} \quad \text{IV.6}$$

Un rayo que saliendo de P_1 llega a P_2 no sigue la línea recta que señala el ángulo α_0 , figura IV.1, sino que sale de P_1 con un ángulo mayor, α_1 , debido a la refracción. El ángulo α_1 no es conocido y se determina por la ecuación del rayo:

$$y_1 - y_2 = \int_{x_2}^{x_1} \tan \alpha dx \quad \text{IV.7}$$

La ecuación IV.7 simplemente integra ($dy/dx = \tan \alpha$) entre P_1 y P_2 . El valor de $\tan \alpha$ se obtiene a partir de la ley de Snell:

$$\frac{\sin \alpha_1}{c_1} = \frac{\sin \alpha_2}{c_2} \quad \text{IV.8}$$

En la práctica, se itera con diferentes ángulos de salida α_1 hasta que se cumple la ecuación IV.7. La búsqueda del ángulo de salida α_1 consume mucho tiempo en comparación con los otros procesos del cálculo de oleaje.

IV.2.2. Variación de la playa y su interacción con el oleaje

La forma en planta y las batimétricas cambian como resultado de la acción del oleaje. El cambio de la playa modifica a su vez el progreso del oleaje. La interrelación entre la playa y el oleaje se puede representar en el cálculo de dos maneras. Primero, con el cambio de posición de la línea de costa, la distancia al punto fuente de los rayos, P_1 , figura IV.2, cambiará y por tanto el ángulo de salida, α_1 . En segundo lugar y más importante, la forma en planta cambiará significativamente en las proximidades de la estructura y la orientación de las batimétricas tenderá a alinearse con la forma en planta. Para tener en cuenta esta variación del fondo en los cálculos de refracción, se supone que la orientación de la línea de costa en cada punto se extiende hasta el punto fuente de difracción. Por lo tanto, aunque entre las hipótesis iniciales del modelo se encontraba la de fondo de pendiente constante, su orientación permite que cambie en función de la posición a lo largo de la línea de costa para adaptarse localmente a la forma en planta de la playa.

Este sistema local de coordenadas alineado con las batimétricas locales es el denominado (x',y') en la figura IV.2. Este sistema de coordenadas forma un ángulo con el sistema general (x,y) igual al de orientación local de la línea de costa, α_s , evaluado en el punto P_3 :

$$\alpha_s = \tan^{-1}\left(\frac{\partial x_s}{\partial y}\right) \quad \text{IV.9}$$

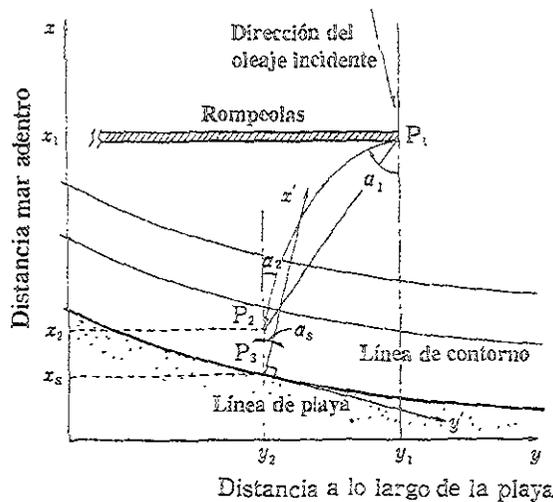


Figura IV.2. Esquema para el cálculo del oleaje utilizando un contorno modificado en su orientación.

En el sistema de coordenadas local, el ángulo de salida se denomina α_1' y está relacionado con el α_1 por:

$$\alpha_1' = \alpha_1 + \alpha_s = \alpha_1 + \tan^{-1} \left(\frac{\partial x_s}{\partial y} \right) \quad \text{IV.10}$$

Los puntos P_1 y P_2 se encuentran de nuevo unidos por un rayo mediante la ecuación IV.7, pero utilizando la ley de Snell en el sistema local de coordenadas:

$$\frac{\text{sen} \alpha_1'}{c_1} = \frac{\text{sen} \alpha_2'}{c_2} \quad \text{IV.11}$$

De la misma manera, el coeficiente de refracción, ecuación IV.3, se modifica, resultando:

$$K_r = \left(\frac{\cos \alpha_1'}{\cos \alpha_2'} \right)^{1/2} \quad \text{IV.12}$$

El ángulo α_2' está relacionado con el α_2 mediante una transformación similar a la ecuación IV.10. 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.

IV.3. Modelo de transporte de sedimentos

IV.3.1. Ecuación de continuidad del sedimento

El modelo OLT es un método para resolver el cálculo del balance de sedimentos. Está basado en la ecuación de continuidad del sedimento. En lo sucesivo, se representará al eje X perpendicular a la línea de costa, con el sentido positivo hacia el mar y al eje Y paralelo a la línea de costa, figura IV.3. Como resultado del balance de sedimentos entre las secciones separadas una anchura Δy , la línea de costa cambia su posición una distancia Δx_s durante un tiempo Δt . Una hipótesis básica del modelo es que el perfil se traslada en la dirección x paralelamente a él mismo hasta una profundidad determinada conocida como profundidad de cierre, D_c por debajo de la cual el perfil ya no cambia, figura IV.3.a. El volumen de sedimento que entra por los contornos del volumen de control en el mismo incremento de tiempo, se observa en la figura IV.3.b. La ecuación de continuidad que gobierna la posición de la línea de costa es:

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_c} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0 \quad \text{IV.13}$$

Donde:

Q: Gasto del transporte longitudinal de sedimentos [L^3/T].

q: Gasto de sedimentos, por unidad de longitud de playa, [L^3/T] que entran (+) y salen (-) por los contornos de los lados del mar y tierra, es decir:

$$q = q_s + q_o \quad \text{IV.14}$$

q_s : Gasto de sedimentos, por unidad de longitud y que entran en el área de control por el lado de tierra.

q_o : Gasto de sedimentos, por unidad de longitud y que entran en el área de control por el lado del mar.

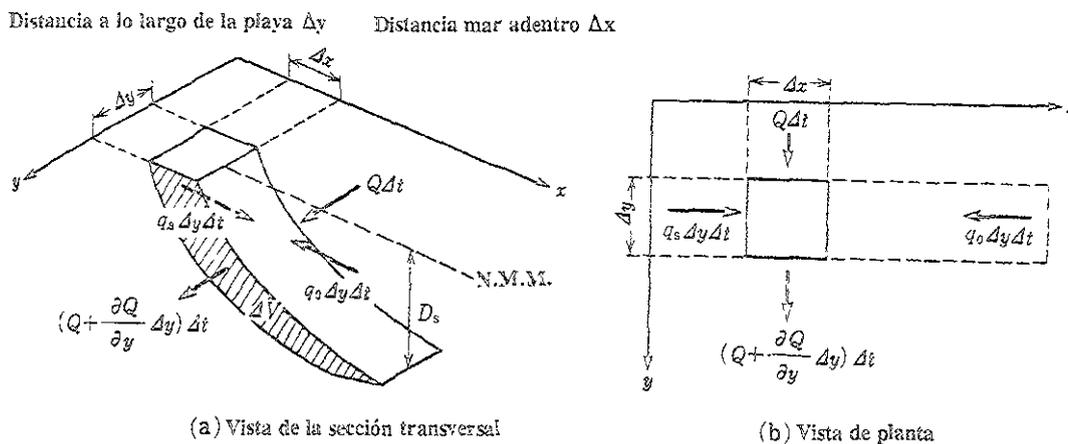


Figura IV.3. Esquema para la ecuación de continuidad del sedimento.

IV.4. Fórmulas para el gasto de transporte longitudinal de sedimentos

El gasto del transporte longitudinal de sedimentos, Q, generado por las corrientes longitudinales de la zona de rompientes, es el principal factor que controla la evolución a largo plazo de una línea de costa. Las expresiones predictivas para Q vienen formuladas habitualmente en función de las condiciones del oleaje en la línea de rotura.

IV.4.1. Gasto de transporte longitudinal de sedimentos en función del flujo de energía del oleaje

La expresión predictiva mas usada para el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos es la presentada por Komar e Inman, (1970), que relaciona el flujo de energía del oleaje en rotura con el gasto del transporte longitudinal de sedimentos en peso sumergido, I :

$$I = K(E C_g)_{\text{B}} \text{sen } \alpha_{\text{Bs}} \text{cos } \alpha_{\text{Bs}} \quad \text{IV.15}$$

Donde:

K : Coeficiente empírico. Komar e Inman (1970), $K=0.77$

α_{Bs} : Ángulo de incidencia del oleaje con la batimetría en rotura.

E_{B} : Energía por unidad de área en rotura = $\rho g H_{\text{B}}^2 / 8$.

C_{gB} : Celeridad de grupo en rotura = $(g h_{\text{B}})^{1/2}$.

ρ : Densidad del agua.

g : Aceleración de la gravedad.

H_{B} : Altura de ola en rotura.

h_{B} : Profundidad del agua en el punto de rotura.

Tal y como se indica en la figura IV.4, el ángulo α_{Bs} se puede expresar como la diferencia entre el ángulo de las crestas, α_{B} y el ángulo de la línea de costa, α_{s} , con el eje y :

$$\alpha_{\text{Bs}} = \alpha_{\text{B}} - \alpha_{\text{s}} = \alpha_{\text{B}} - \arctan\left(\frac{\partial x_{\text{s}}}{\partial y}\right) \quad \text{IV.16}$$

Se utiliza el gasto de sedimentos en peso sumergido, I , porque tiene las mismas unidades físicas (Newton/segundo) que el flujo de energía. Sin embargo, para aplicaciones ingenieriles relacionadas con el balance de sedimentos, como es el caso de la OLT, se requiere el gasto del transporte longitudinal de sedimentos en volumen, Q . Las cantidades I y Q están relacionadas de la siguiente forma:

$$I = (\rho_s - \rho)g(1-n)Q \quad \text{IV.17}$$

Donde ρ_s y n son la densidad de los granos y la porosidad (Vol. sólidos/ Vol. huecos) del sedimento, respectivamente).

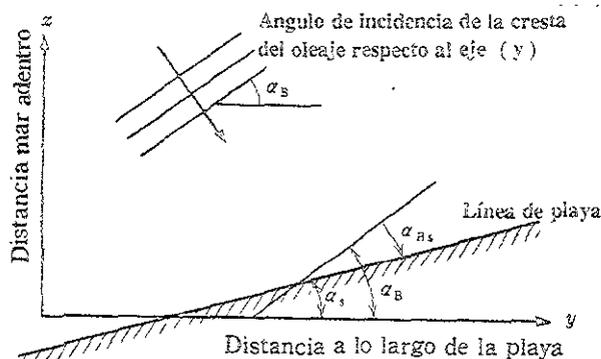


Figura IV.4. Definición de los ángulos asociados a las olas en rompiente.

IV.4.2. Gasto de transporte longitudinal de sedimentos en función de la corriente longitudinal

Una relación entre el gasto de transporte de sedimentos y la velocidad de la corriente se puede encontrar en el modelo de Bagnold (Inman y Bagnold, 1963), aplicado a playas:

$$I = \frac{K'(E C_g)_B V}{u_m} \quad \text{IV.18}$$

Donde:

- V Valor representativo de la velocidad de la corriente longitudinal en la zona de rompientes.
- u_m Valor máximo de la velocidad orbital horizontal debida a oleaje en la línea de rotura, dado por la teoría lineal: $U_m = 0.5\gamma(gh_B)^{1/2}$.
- γ Índice de rotura.
- K' Coeficiente adimensional empírico. Komar & Inman (1970) propusieron un valor de 0.28 y Kraus et. al., (1982) propusieron, con base en experimentos, un valor de 0.21.

Así mismo, Kraus et al., (1982), también demostraron que el gasto del transporte longitudinal de sedimentos en volumen se podía representar por:

$$Q = 0.024 H_B^2 V \quad \text{IV.19}$$

Las ecuaciones IV.18 y IV.19 se pueden reducir a la ecuación IV.15 si la corriente longitudinal se produce solamente por la rotura del oleaje con incidencia oblicua. La ventaja de las ecuaciones IV.18 y IV.19 es que, en principio, el mecanismo generador de la corriente longitudinal puede ser arbitrario.

IV.4.3. 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 IV.18 con el modelo de corriente longitudinal de Bakker (1971) para obtener una expresión predictiva para el transporte longitudinal de sedimentos que incluía tanto la incidencia oblicua como la variación longitudinal de la altura de ola, dada de la siguiente forma:

$$I = (EC_g)_B \left(K_1 \sin \alpha_B \cos \alpha_B - \frac{K_2}{\tan \beta} \cos \alpha_B \frac{\partial H_B}{\partial y} \right) \quad \text{IV.20}$$

Kraus & Harikai (1983) parametrizaron la fórmula de Ozasa & Brampton (1980) y la aplicaron con éxito para modelar el cambio de la línea de costa detrás del rompeolas de la playa de Orai (Japón). Trabajos posteriores avalan la aplicabilidad de ésta fórmula:

$$Q = (H^2 C_g)_B \left(\overline{K_1} \sin 2 \alpha_B - \overline{K_2} \cos \alpha_B \frac{\partial H_B}{\partial y} \right) \quad \text{IV.21}$$

Donde:

$$\overline{K_1} = \frac{0.0262 K_1}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \lambda_v)} \quad \text{IV.22}$$

$$\overline{K_2} = \frac{0.0524 K_2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \lambda_v) \tan \beta} \quad \text{IV.23}$$

K_1 y K_2 son coeficientes empíricos (parámetros de transporte o de calibración) y $\tan \beta$ es la pendiente del fondo. K_1 puede tomar el valor propuesto para la ecuación IV.18, $K_1' = 0.28$ o el valor de 0.58 de la experimentación del CERC, SPM (1984). Para K_2 Kraus & Harikai, (1983), proponen la siguiente relación de $0.5 < \overline{K_1}/\overline{K_2} < 1.5$.

El primer término de la ecuación IV.21 corresponde a la llamada fórmula del CERC y describe el transporte longitudinal de sedimentos en la zona de rompientes debido a la acción del oleaje incidiendo oblicuamente a la costa. El segundo término tiene en cuenta la influencia de las variaciones longitudinales de la altura de ola en rotura. En principio, debería aparecer un tercer término, debido a la influencia que la corriente longitudinal pueda tener sobre el ángulo de incidencia de la altura de ola en rotura. Sin embargo, se ha demostrado que este tercer término es despreciable en comparación con los otros dos.

El término que contiene $\delta H_B/\delta y$ se ha introducido para tener en cuenta variaciones longitudinales permanentes de la altura de ola en rotura, debido a la refracción y difracción por islas o estructuras. Esta variación está siempre presente debido a la naturaleza variable del oleaje, pero en los casos en que no intervienen fenómenos de refracción-difracción; los gradientes longitudinales de altura de ola son pequeños y aleatorios, por tanto, el segundo término de la ecuación IV.21 puede ser despreciado.

IV.5. Valores numéricos de los coeficientes de transporte de sedimento K_1 y K_2

Como se menciono anteriormente, el modelo numérico OLT, 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 IV.21, es dependiente de los parámetros de calibración, K_1 y K_2 , la bondad 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 poner a punto estos parámetros, es decir, cada playa tiene inherentes los parámetros de calibración 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.

IV.6. Criterios para los valores de K_1 y K_2

A continuación se exponen algunos de los principales criterios para determinar los valores de los coeficientes de calibración K_1 y K_2 . Estos criterios proponen a dichos 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, es decir, para la teoría de una línea (OLT)

IV.6.1. Coeficiente de calibración K_1

Komar & Inman, (1970), proponen un valor constante $K_1 = 0.77$. Más tarde, el mismo Komar, reanalizando datos y gráficos existentes concluyó que dicho parámetro no dependía del tamaño del sedimento, de la pendiente de la playa, del peralte de la ola ni del parámetro de Iribarren, de manera que reafirma el valor constante en playas de arena de $K_1 = 0.77$, siendo un poco menor en playas de gravas

Por otro lado, Longuett Higgins, (1970), lo propone en función de la pendiente de la playa β y del coeficiente de fricción C_f , la siguiente ecuación:

$$K_1 = 0.55 \frac{\tan \beta}{C_f} \quad (\text{IV } 24)$$

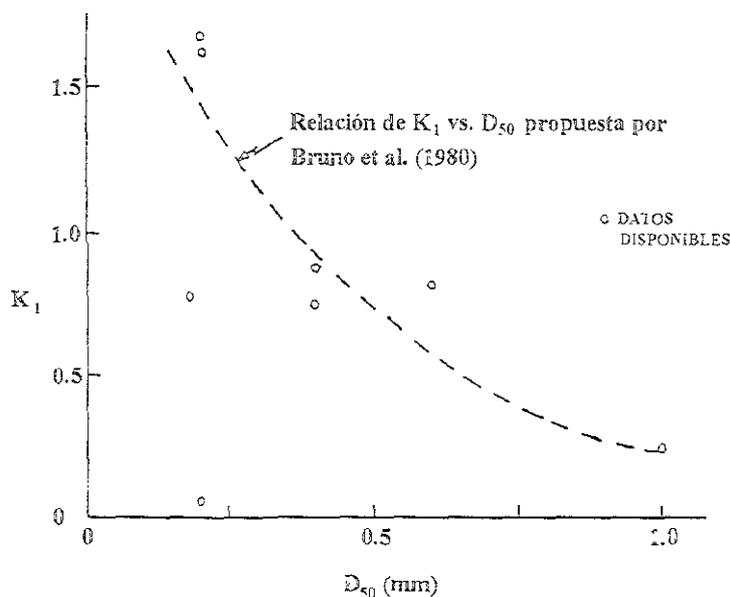


Figura IV.5. Gráfica propuesta por Bruno et al, 1980. K_1 vs diámetro del sedimento D_{50} , López de San Roman, 1996.

Bruno et al., (1980), examinaron la fórmula de transporte longitudinal, llegando a la conclusión de que como en ella no se tienen en cuenta ni el tamaño del sedimento, ni la pendiente de la playa, ni la porosidad, no parece factible que K_1 sea una verdadera constante,

finalmente concluyen que existe una relación inversamente proporcional entre K_1 y el tamaño del sedimento, D_{50} , figura IV.5 Dean et al, (1982), corroboran este resultado y presentan una gráfica de K_1 versus D_{50} figura IV 6.

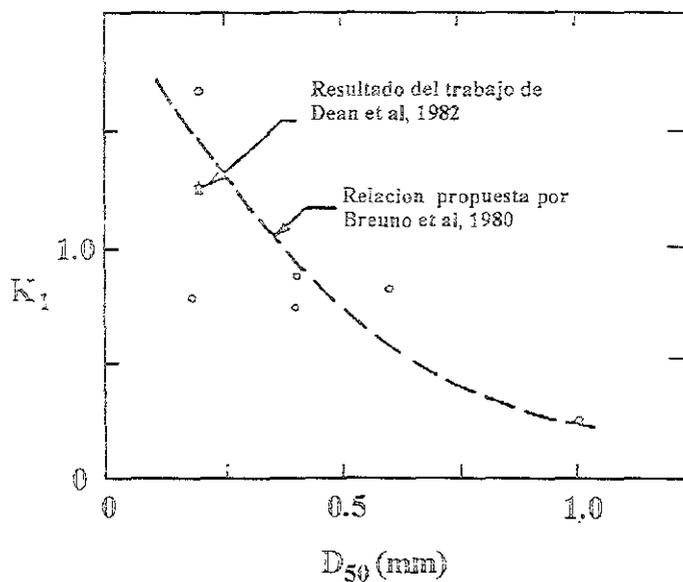


Figura IV.6. Gráfica propuesta por Dean et al, 1982. K_1 vs. diámetro de sedimento D_{50} , López de San Roman, 1996.

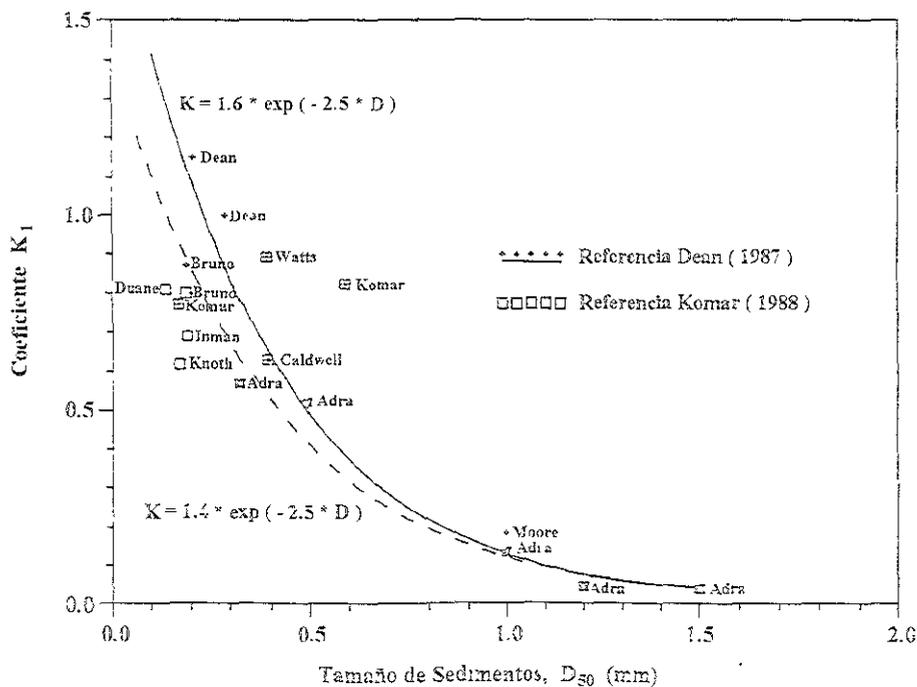


Figura IV 7 Dependencia de K_1 con el diámetro de sedimento, D_{50} , López de San Roman, 1996

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} y
- Para granos no cohesivos, $D_{50} > 0.6$ mm, K_1 depende del D_{50} .

Lo anterior puede observarse en la figura IV 7.

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, proponen la siguiente expresión:

$$K_1 = 2m_K \sqrt{\gamma_B} \quad \text{IV 25}$$

donde

γ_B índice de rotura
 m_K pendiente móvil del lecho, dada por

$$m_K = 1.5 \sqrt{D_{50}/H_B} \quad \text{IV 26}$$

H_B altura de ola en rotura

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

$$K_1 = 0.004 \left(\frac{H_{BS} m_K}{D_{50}} \right) \quad \text{IV.27}$$

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 IV.26

IV.6.2. Coeficiente de calibración K_2

López de San Román (1996), propone la siguiente expresión, como una función de la ecuación IV 27. Esta expresión es función de la pendiente de la playa y del tamaño del grano.

$$K_2 = \beta \frac{m_K^2}{D_{50}} \quad \text{IV.28}$$

donde β es una constante

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

$$K_2 = \frac{\delta}{H} \quad \text{IV.29}$$

donde δ es una constante.

IV.7. Soluciones numéricas a la ecuación de continuidad del sedimento

La ecuación de conservación del sedimento ecuación IV.13 es no lineal en la coordenada x_s , debido a que α_{Bs} y, por tanto, Q , dependen de x_s . Bajo fuertes simplificaciones (condiciones de oleaje constantes, pequeños ángulos de incidencia y condiciones de contorno ideales), no es necesario un modelo para el oleaje ni una solución numérica para la línea de costa. La ecuación IV.13 se reduce en este caso a la ecuación unidimensional de difusión, que como se verá mas adelante, da lugar al modelo matemático de evolución de la línea de costa presentado por primera vez por Pernald-Considerere (1956). Ejemplo de soluciones analíticas se pueden encontrar en Bakker (1968), Le Méhauté & Soldate (1978), Walton & Chiu (1979) y Larson, Hanson & Kraus (1987). Estas soluciones cerradas permiten aportar 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.

IV.7.1. Ecuaciones en diferencias finitas

La ecuación de conservación de sedimento, ecuación IV.13, se transforma fácilmente a la forma en diferencias finitas. En los siguientes apartados se presenta las aproximaciones de Kraus & Harikai (1983) a los métodos de solución implícita y explícita.

La ecuación IV.13, 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 IV.8, en la cual "i" denota el número de la celda. El gasto longitudinal de sedimentos en volumen, Q , se define en los contornos de las celdas de anchura constante Δy , y la línea de costa se define en el centro de cada celda, $\Delta y/2$. Por conveniencia para la notación una (') sobre una cantidad indica esa cantidad en el siguiente paso de tiempo. Una cantidad sin (') expresa esa cantidad en la etapa de tiempo presente. La ecuación IV.13, se integra desde el tiempo t al $t+\Delta t$ mediante la expresión:

$$x'_{st} = x_{st} - \Delta t \left[\lambda \left(\frac{\partial x_s}{\partial t} \right)_i - (1 - \lambda) \left(\frac{\partial x_s}{\partial t} \right)'_i \right] \quad \text{IV.30}$$

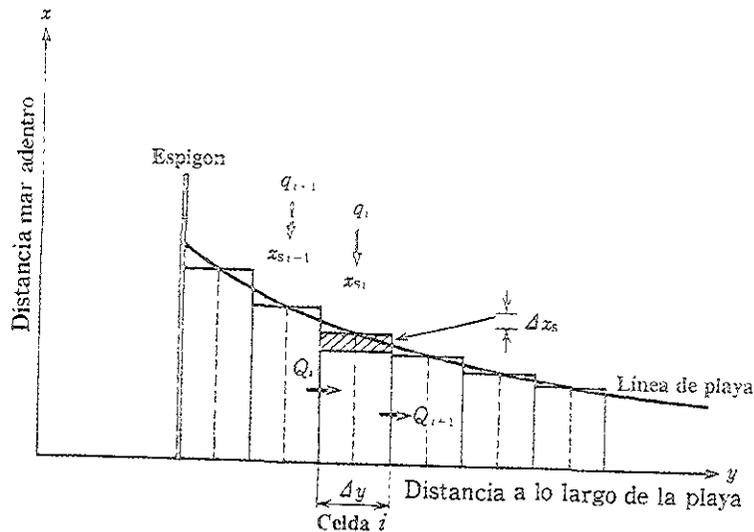


Figura IV.8. Representación de la posición de la línea de playa y de los gastos en diferencias finitas.

Donde Δt es el paso de tiempo y λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) es un parámetro relacionado con el esquema de solución numérica elegido. Las derivadas con respecto al tiempo en la ecuación anterior se obtienen de la siguiente forma:

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t} \right)_i = - \frac{I}{D_s} \left(\frac{Q_{i-1} - Q_i}{\Delta y} - q_i \right) \quad \text{IV.31}$$

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t} \right)'_i = - \frac{I}{D_s} \left(\frac{Q'_{i-1} - Q'_i}{\Delta y} - q'_i \right) \quad \text{IV.32}$$

IV.7.2. Método de solución explícito

Haciendo $\lambda = 1$ en la ecuación IV.30, la posición de la línea de costa en el siguiente paso de tiempo, x'_{st} , se plantea sólo en función de la situación anterior, expresándose en forma de diferencias finitas mediante:

$$x'_{st} = x_{st} + \frac{\Delta t}{D_s \Delta y} (Q_i - Q_{i-1} + \Delta y Q_i) \quad \text{IV.33}$$

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE LA PATAGONIA

Como puede verse, el método explícito utiliza la posición antigua de la línea de costa para calcular la nueva posición. 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.

El inconveniente es que el paso del tiempo no puede especificarse arbitrariamente. Si Δt excede un determinado valor para unas condiciones de oleaje y constantes físicas dadas, la solución explícita comienza a oscilar y se vuelve inestable. Como la ecuación IV.33 es no lineal debido a las funciones trigonométricas de α_{Bs} en la ecuación IV.20 y que contiene a su vez a x_s , ecuación IV.16, el máximo de tiempo que mantiene la estabilidad sólo se puede obtener mediante prueba y error. Sin embargo se puede obtener un criterio de estabilidad aproximado linealizando la ecuación IV.33 con respecto a x_s . La linealización se realiza suponiendo pequeños ángulos de rotura, esta consideración corresponde a la propuesta en el modelo original de Pernald-Considerere (1956). Utilizando la figura IV.4, se plantea por trigonometría:

$$\left. \begin{aligned} \sin 2\alpha_{Bs} &= \sin 2\alpha_{Bs} (2 \cos^2 \alpha_s - 1) - 2 \cos 2\alpha_B \cos^2 \alpha_s \tan \alpha_s \\ \cos \alpha_{Bs} &= \cos \alpha_B \cos \alpha_s + \sin \alpha_B \cos \alpha_s \tan \alpha_s \end{aligned} \right\} \text{IV.34}$$

Bajo la suposición de que las olas rompen con pequeños ángulos de incidencia respecto al eje y (α_B es pequeño) y que el ángulo de orientación de la línea de costa, α_s , también es pequeño, se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} \sin 2\alpha_{Bs} &\approx -2 \tan \alpha_s = -2 \frac{\partial x_s}{\partial y} \\ \cos \alpha_{Bs} &\approx 1 + \sin \alpha_B \tan \alpha_s = 1 + \sin \alpha_B \frac{\partial x_s}{\partial y} \end{aligned} \right\} \text{IV.35}$$

Con la suposición de que la altura de ola en rotura, H_B , la celeridad de grupo, C_{gB} , el gradiente de la altura de ola en rotura, $\partial H_B / \partial y$, son constantes y la aportación o pérdida de sedimento transversal, q , es nula. Entonces la ecuación IV.13 toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} = e \frac{\partial^2 x_s}{\partial y^2} \quad \text{IV.36}$$

donde:

$$\left. \begin{aligned}
 e &= e_1 + e_2 \\
 e_1 &= 2(H^2 C_s)_B \bar{K} \\
 e_2 &= \frac{1}{D_2} (H^2 C_s)_B \bar{K} \frac{\partial H_B}{\partial y} \operatorname{sen} \alpha_B
 \end{aligned} \right\} \text{IV.37}$$

La ecuación IV.36 tiene la forma de la ecuación unidimensional de la difusión. Las propiedades de los esquemas numéricos de solución para resolver esta ecuación son conocidos. Para el esquema de solución explícito, el paso de tiempo debe satisfacer la siguiente relación:

$$R_s = \frac{\Delta t (e)_{\max}}{(\Delta y)^2} \leq \frac{1}{2} \quad \text{IV.38}$$

Donde $(e)_{\max}$ es el máximo valor en la malla numérica. La cantidad de e se puede interpretar como un tipo de "coeficiente de difusión" que gobierna la velocidad de cambio de la línea de costa a través del tiempo. La cantidad de R_s se denomina "parámetro de estabilidad".

El esquema numérico de solución es más preciso si $R_s \rightarrow 1/2$ o se encuentra por debajo de este valor y es más difusivo entre más lejos se esté de ese valor. En la práctica es deseable la utilización del número de pasos de tiempo mayores para reducir el número de iteraciones. La ecuación IV.38 se puede utilizar para determinar el mayor valor posible de Δt para el esquema de solución explícito

Un método implícito es el propuesto por Horikawa (1988) para resolver la ecuación IV.33 con un sistema tridiagonal.

IV.8. Condiciones de contorno y límites de movimiento 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 ser 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.

IV.8.1. Condiciones de contorno

a) 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:

$$Q_e = 0 \quad \text{IV.39}$$

b) Espigón impermeable con trasvase.

En este caso, 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 (zona efectiva de transporte) 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. La primera aproximación es suponer una distribución rectangular del gasto en el transporte de sedimentos, por lo que la cantidad de los mismos que sobrepasa el espigón es proporcional a la longitud de la zona efectiva de transporte no cortada por éste. El límite exterior de la zona de transporte se especifica convenientemente mediante la profundidad de cierre, D_s , que puede ser comparada con la profundidad del extremo del espigón, D_e , pues se ha tomado como suposición que la pendiente de la playa es constante. El gasto del transporte longitudinal, Q_e , es:

$$Q_e = \begin{cases} Q_{e0} \left(1 - \frac{D_e}{D_s} \right) & D_e \leq D_s \\ 0, & D_e > D_s \end{cases} \quad \text{IV.40}$$

Donde Q_{e0} es el gasto de transporte en la celda del espigón calculada como si el espigón no estuviera presente.

c) Playa fija (Línea de costa fija)

En este caso, 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 en equilibrio a largo plazo. De la ecuación de continuidad del sedimento, ecuación IV.13, se obtiene que si la posición línea de costa permanece constante en el tiempo, el gradiente longitudinal del gasto del transporte de sedimentos en ese contorno debe ser cero. Esto implica:

$$Q_b = Q_{b \pm 1} \quad \text{IV.41}$$

donde Q_b es el gasto del transporte longitudinal en el contorno de la playa fija y $Q_{b \pm 1}$ es el gasto en los puntos internos de la malla colindantes.

d) Playa libre.

Esta condición especifica la posición del punto de contorno mediante valores en los puntos internos de la malla. Utilizando la extrapolación lineal, se tiene:

$$x_{sb} = 2x_{sb \pm 1} - x_{sb \pm 2} \quad \text{IV.42}$$

donde x_{sb} es la posición de la línea de costa en el contorno y las otras cantidades son las posiciones de la línea de costa en dos puntos de la malla contiguos a ambos lados. Esta condición implica que el transporte de sedimentos dentro del área de cálculo domina a cualquier otro transporte que llegue a la celda desde ese contorno en particular. Esta condición de contorno es útil si se localiza una estructura larga en el área de cálculo y se tiene poca información de los contornos distantes.

IV.8.2. Límites de movimiento de la línea de costa

Un muro perpendicular a la playa limita el movimiento hacia tierra de la línea de costa. Ejemplos comunes son: los muros de defensa, barreras contra tempestades, rompeolas de puertos y acantilados rocosos. En el modelo no se consideran la socavación ni la falla de la estructura por colapso, de tal forma que el modelado del cambio en la evolución de la línea de costa en la zona limitada por muros debe realizarse con precaución.

Hay pocos estudios a la limitación que impone un muro. Ozasa & Brampton (1979), consideraron algunos aspectos de la interacción entre la línea de costa y un muro, pero este desarrollo no es completo como lo apuntaron Tanaka & Nadaoka (1982). Hanson & Kraus (1985, 1986), con base en observaciones de campo cualitativas sobre el movimiento del sedimento en el área de los muros, plantearon la hipótesis de que el sedimento se puede mover longitudinalmente a la línea de costa si existe una zona de rompientes frente al muro. Su algoritmo conserva el volumen de sedimentos y la dirección de su transporte longitudinal.

Considérese una playa limitada por un muro, como la mostrada en la figura IV.9. La línea de costa en la celda i , la posición de la línea de costa x_s , no puede moverse hacia tierra más allá de la posición correspondiente al muro x_{mi} . Supóngase que en un paso de tiempo determinado el modelo produce una posición de la línea de costa x'_s , situado más allá del muro en la dirección de la tierra. Esto corresponde a un transporte ficticio de sedimento, con un gasto de transporte longitudinal, Q_{fc} , dado por:

$$\Delta Q_{fic} = \frac{D_s \Delta y}{\Delta y} (x_m - x_n) \quad \text{IV.43}$$

Para satisfacer la limitación que supone el muro, los gastos del transporte para cada paso de tiempo deben ajustarse los gastos del transporte de sedimentos longitudinal en la dirección apropiada para eliminar Q_{fic} , y conservar el volumen de sedimentos. El procedimiento para implementar la limitación del muro es bastante complejo, Hanson & Kraus (1986).

La figura IV.10. se muestra un ejemplo sencillo de la evolución de la línea de costa en las proximidades del muro que la limita por el lado de tierra. En $t=0$, la línea de costa es recta (a). Se aplica una serie temporal de olas convergentes y divergentes, creando las primeras un "beach cusp" (b) y las segundas una fuerte erosión frente al muro (c). Finalmente, un periodo de oleaje con incidencia normal devuelve la línea de costa a una posición, aproximada a la inicial.

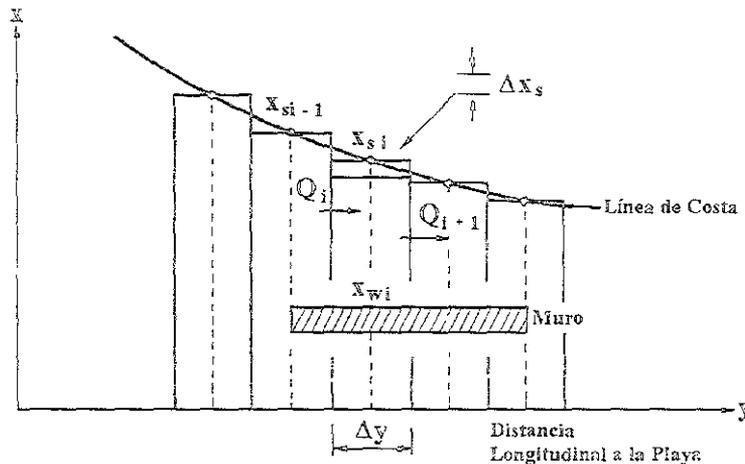


Figura IV.9. Representación de un muro costero en el modelo OLT.

Larson, et. al., (1997) presentaron la solución analítica para modelar el cambio en la línea de costa con la teoría de una línea, OLT, con estructuras costeras.

IV.9. Resumen

La teoría de una línea que se expone en este capítulo, es una herramienta de predicción numérica que se fundamenta en la ecuación de continuidad del sedimento y en la ecuación para el transporte del sedimento, ambas desarrolladas en éste. El procedimiento para la aplicación de este modelo se puede resumir en los siguientes cuatro puntos:

- Recopilación y análisis de los datos disponibles de oleaje y perfil de playa.

- Cálculo de las condiciones de contorno iniciales.
- Cálculo del transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa.
- Cálculo del cambio de la línea de costa.

El capítulo se divide en dos partes, un modelo de oleaje y un modelo de transporte de sedimentos.

En el modelo de oleaje se abarca la solución del modelo de una línea a los problemas de la transformación del oleaje. Se exponen el modelo de oleaje semi-empírico para determinar la difracción - refracción causados por estructuras costeras; se presenta la variación de la playa y su interacción con el oleaje.

Se presenta un modelo de transporte de sedimentos donde se exponen las ecuaciones para valuar el transporte. Se abarca la ecuación de continuidad del sedimento y las soluciones numéricas a la ecuación. Se muestra la fórmula para determinar el transporte longitudinal en caso de variaciones longitudinales de altura de ola en rotura, esta ecuación es importante y en ella están intrínsecos los parámetros de calibración, K_1 y K_2 , de la teoría de una línea.

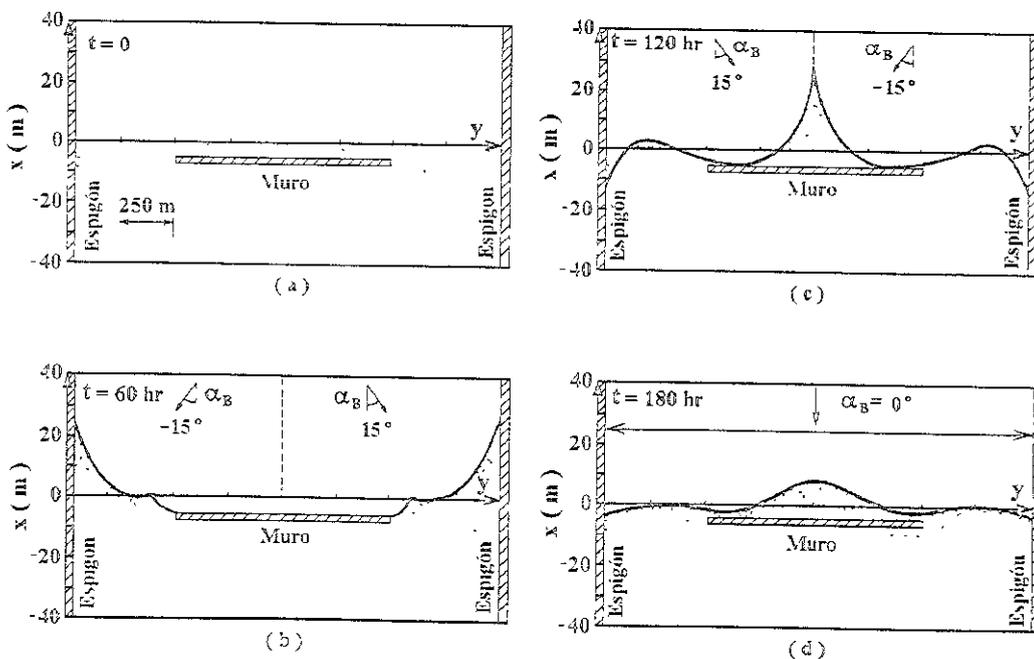


Figura IV.10. Ejemplos hipotéticos del cambio de línea de costa con la presencia de un muro costero.

Posteriormente, se presentan valores numéricos de los coeficientes de calibración K_1 y K_2 y criterios teóricos para calcular y definirlos. 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, estos valores no pueden utilizarse como definitivos en el modelo para predecir la evolución de la línea de costa. Finalmente, se presentan las condiciones de contorno y límites de movimiento de la línea de costa, que son:

- o Espigón impermeable sin trasvase.
- o Espigón impermeable con trasvase.
- o Playa fija.
- o Playa libre.
- o Muros.

V. APLICACIÓN DEL MODELO OLT

V.1. Introducción

La energía eléctrica en México se genera de diversas formas, siendo las hidroeléctricas y las termoeléctricas las principales; las centrales termoeléctricas requieren de sistemas de enfriamiento de sus componentes. Este proceso se lleva a cabo con grandes volúmenes de agua. Por esta razón el lugar más adecuado para la construcción de una planta termoeléctrica es la zona costera. Existen dos formas de tomar el agua de mar, con tomas superficiales o con tomas submarinas. En México, actualmente sólo existe un caso de toma submarina en la PT "Manzanillo", todas las demás plantas cuentan con tomas superficiales. Para realizar la toma de agua es necesario que ésta contenga la menor cantidad de sedimentos. Esto se logra construyendo una obra de toma superficial que consiste en estructuras llamadas escolleras y rompeolas. Dichas estructuras permiten que exista una zona donde no haya efectos del oleaje y donde la velocidad del agua permita la decantación del sedimento en el canal de llamada. Sin embargo, las obras que se construyen para tomas de agua, alteran significativamente el equilibrio dinámico de la playa. Esto trae como consecuencia que la línea de costa situada inmediatamente antes y después de la obra sufra, por un lado una acumulación de material y por el otro un retroceso.

V.2. Localización y estado actual de la zona de estudio

Un ejemplo es la planta termoeléctrica Adolfo López Mateos, PT ALM, puesta en operación en 1989. Se localiza en el litoral del estado de Veracruz a 5 km al norte de la desembocadura del río Tuxpan y del puerto del mismo nombre. La playa esta orientada de norte a sur. En la figura V.1 se muestra el croquis de localización de la planta. La capacidad inicial instalada fue de 1400 Mw y requiere un gasto de 60 m³/s de agua para el sistema de enfriamiento de los condensadores. Este gasto es tomado de las aguas del Golfo de México mediante una obra de toma superficial constituida, en su primera etapa, por dos escolleras perpendiculares a la costa; la norte, con 615 m de longitud, con el cuerpo de oeste a este y el bastión orientado hacia el SSE; y la sur, paralela a la norte con 440 m de longitud.

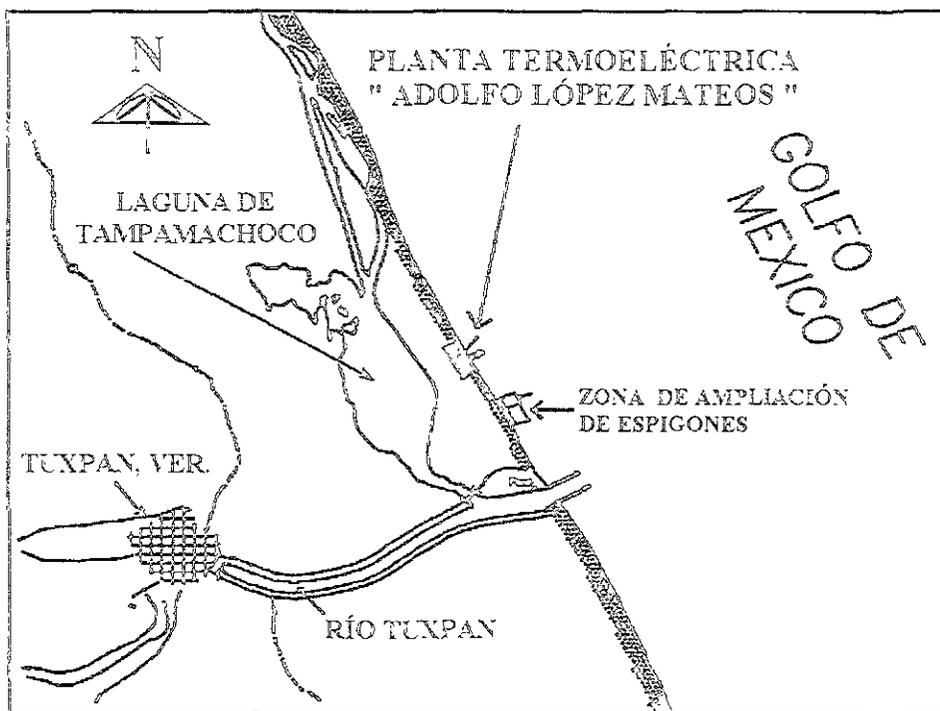


Figura V.1. Localización de la PT "Adolfo López Mateos"

En el año de 1995 se incrementó la capacidad de generación de la planta, instalando dos unidades más de 350 Mw cada una, teniendo una capacidad total instalada de 2100 Mw. Por ende, el sistema de enfriamiento requirió un gasto adicional de 30 m³/s. Para proporcionar dicho volumen se construyó una tercera escollera, segunda etapa, al sur y paralelas a las anteriores. A esta se le llama la escollera sur-sur con 440 m de longitud.

La zona de estudio comprende una longitud de 6.5 km, medidos a partir de la escollera del río Tuxpan hasta 1.1 km al norte de la escollera norte. Estos límites se impusieron por ser la zona de donde se tienen datos completos de la línea de costa. Además, se ha comprobado que el efecto de las estructuras no influye más allá. Figura V.2.

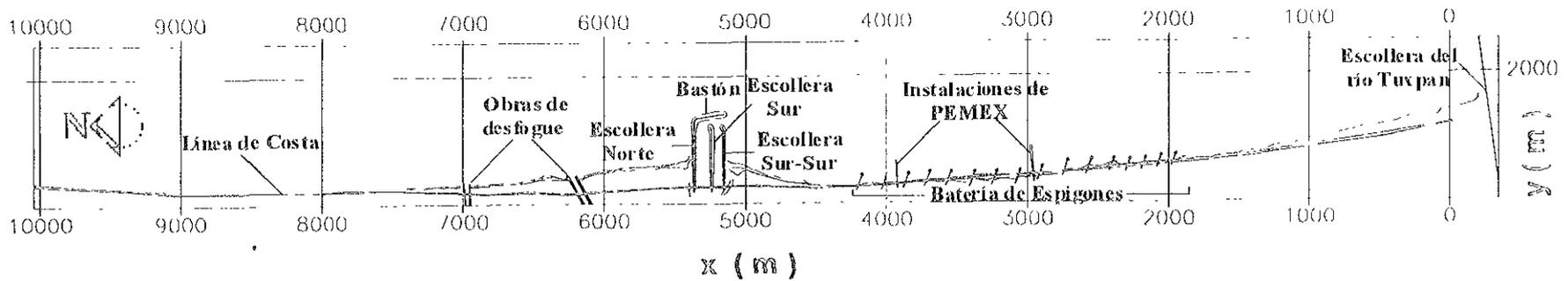


Figura V.2 Croquis de las estructuras de la PT "Adolfo López Mateos" Tuxpan, Ver.

En la figura V.3, se presenta una fotografía de la obra de toma de la PT "Adolfo López Mateos". En la misma se aprecia la acumulación de sedimentos del lado de la escoliera norte (a la izquierda de la foto).

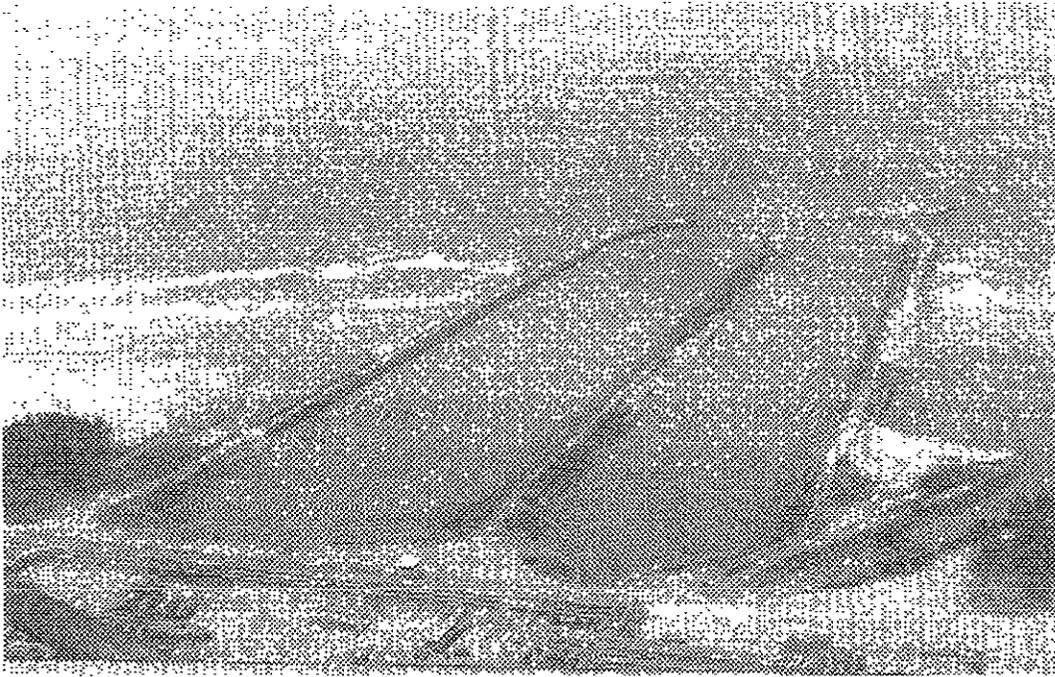


Figura V.3. Obra de toma de la PT "Adolfo López Mateos". Cortesía CFE.

V.3. Problemática del lugar

Como consecuencia de la obra de toma, se modificó el equilibrio de la playa; el acarreo del sedimento se vio alterado y la playa inició un proceso de sedimentación en el lado norte de la obra de toma y un proceso de erosión en la parte sur de la misma a partir de diciembre de 1989. Figura V.4.

Como consecuencia de las tres escolleras, se agudizó el problema del acarreo de los sedimentos y se modificó de manera considerable el equilibrio dinámico de la playa en que ésta se hallaba antes de 1989, combinado con la succión del gasto para enfriamiento, el transporte eólico y las corrientes.

Es conveniente señalar que dentro de los canales de llamada se tiene una sedimentación considerable, figura V.5, y es necesario dragarlos continuamente. Para garantizar el correcto funcionamiento de la obra de toma, es necesario dragar aproximadamente 40,000 m³ anuales de sedimentos dentro de los canales de llamada, teniendo como consecuencia incrementos en los costos por mantenimiento. Para dar una idea de lo que esto implica, el dragado de 1m³ de sedimentos tiene un costo aproximado entre 6 y 10 USD. El material, producto del dragado, se transporta en camiones materialistas a ambos lados de la obra de toma. Figura V.5.



Figura V.4. Erosión al sur de la obra de toma de la PT "ALM" Tuxpan Ver.



Figura V.5. Sedimentación en el canal de llamada de la obra de toma de la PT "ALM"

Parte del material, producto del dragado, se deposita, erróneamente, en el extremo norte de la escollera del mismo nombre, acelerando con ello el proceso de sedimentación en ese lugar; la otra parte del material dragado se deposita en la zona de la playa donde se

localiza la batería de espigones con ello se acelera la recuperación de esta zona. No se tiene un registro exacto de los volúmenes de dragado, lo que conllevó a tener dificultades a la hora de calcular la evolución de la línea de playa.

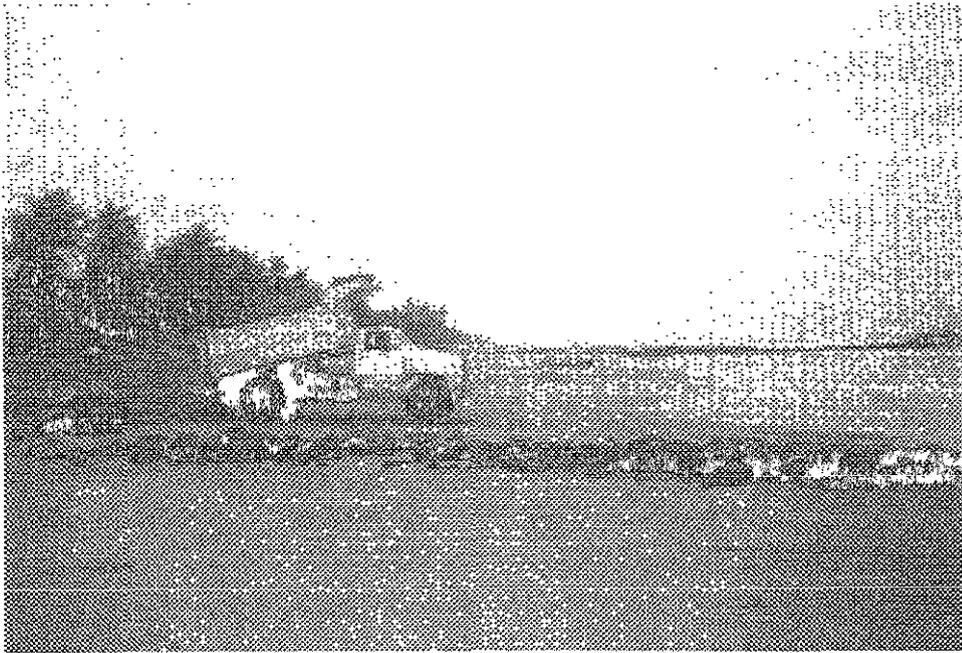


Figura V.6. Transporte del material producto del dragado en los canales de llamada

El proceso erosivo que se presentó en el extremo sur de las estructuras, puso en peligro instalaciones de Petróleos Mexicanos. Para resolver el problema de forma inmediata, se colocaron placas de concreto tratando así de impedir el retroceso de la línea de costa se avanzara tierra adentro, figura V.7, pero esta solución no resolvió el problema y continuó el proceso de retroceso.

Posteriormente se construyó una serie de 4 espigones en 1990; sin embargo, el proceso erosivo continuó y se requirió la construcción de otra serie de 8 espigones al sur de los anteriores. Finalmente, el proceso se controló y actualmente se tiene una zona de relativo equilibrio.

V.4. Datos Disponibles

Para realizar la modelación de la zona fue necesario realizar, como primer paso, la recopilación y análisis de los datos disponibles de perfiles de playa y de oleaje en la zona de interés. Así mismo, se clasificó y se adecuaron los datos batimétricos para identificar la cota 0, es decir, la línea de costa. Se obtuvo el diámetro de la arena de la zona de interés.

Comisión Federal de Electricidad, CFE, a través de su Departamento de Oceanografía realizan normalmente cuatro levantamientos de perfiles transversales a la línea de costa por

año. Silva et al., (1997) realizaron un estudio completo de todos los perfiles de la zona donde se puede observar la evolución temporal y espacial de los perfiles. En el análisis de la información se detectó un retroceso de la línea de costa a la altura de las instalaciones de PEMEX debido esencialmente a la erosión de la playa. Las campañas de campo, nueve en total, se realizaron durante el periodo comprendido entre marzo de 1994 y agosto de 1995. Estos cubren una distancia longitudinal a la línea de costa de aproximadamente 1.6 km, mientras que en la dirección transversal abarca aproximadamente 0.7 km. Los datos cubren una distancia vertical de aproximadamente 8.5 m, desde la cota +2.5 a la cota -6.0. En la figura V.8, se presenta un perfil de la zona. La totalidad de la información se presenta en el anexo C.



Figura V.7. Placas de concreto para disminuir el efecto de erosión en la zona sur de la obra de toma.

V.4.1. Perfiles de playa

En la tabla V.1, se presentan las secciones y las coordenadas de cada uno de los levantamientos topobatemétricos, las coordenadas están referenciadas a las coordenadas que se muestran en la figura V.2. Así también se muestran en la tabla V.2 los perfiles disponibles en cada sección y en cada fecha.

Sección	Coordenadas del levantamiento.
01	1950
02	2050
03	2150

04	2250
05	2350
06	2450
07	2550
08	2650
09	2750
10	2850
11	2950
12	3050
13	3150
14	3250
15	3350
16	3450

Tabla V.1. Localización de los levantamientos topobatiométricos.

FECHA	SECCION															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Marzo ' 94																
Abril ' 94																
Junio ' 94																
Agosto ' 94																
Octubre ' 94																
Diciembre ' 94																
Marzo ' 95																
Junio ' 95																
Agosto ' 95																

 Existe información del perfil

Tabla V.2. Perfiles disponibles a cada sección y fecha de levantamiento.

Del análisis de las variaciones espaciales y temporales de los perfiles, considerando las figuras del anexo C, se observa lo siguiente:

- La profundidad de cierre se encuentra entre las cotas -5 y -6, como se puede apreciar en la figura V.8.
- Aproximadamente, en la cota +2.3, el perfil no experimenta cambios espaciales.
- Los perfiles de playa obtenidos en el mes de abril de 1994, son los que presentan mayor variación transversal, ya que se identifican tres diferentes posiciones de la barra.

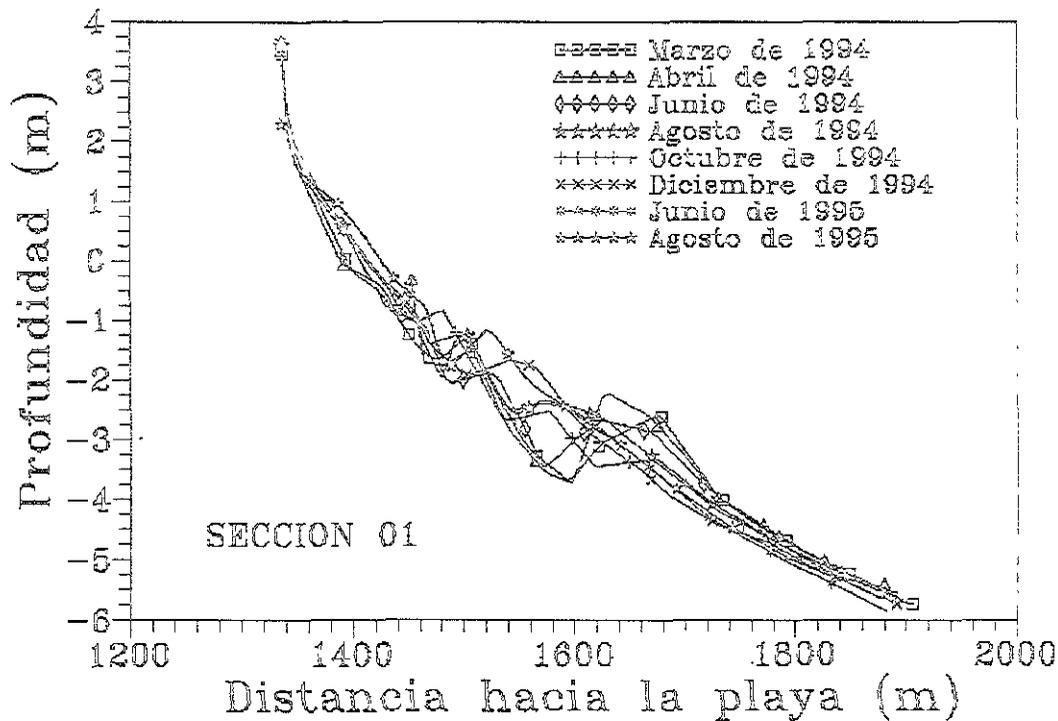


Figura V.8. Perfiles en la sección 01, Tuxpan, Ver. México. Silva et al., 1996.

- Por otro lado, los perfiles obtenidos en el mes de junio de 1995, son lo que menor variación presentaron, no se tienen valles o bermas.
- La pendiente de los perfiles es mucho más suave mar adentro de las barras.
- La barra es inferior a un metro en los perfiles cercanos a la obra de toma, mientras que en las secciones más alejadas la profundidad supera el metro y medio.
- Los perfiles cercanos a la desembocadura del río Tuxpan, presentan variaciones temporales más importantes que los cercanos a la obra de toma.

Si se observan todos los levantamientos, se puede apreciar la tendencia del estado morfodinámico; en un principio, de un estado intermedio de “Barra y Playas Rítmicas”, se adopta un estado de “Barra Longitudinal y Valle”, finalmente, se tiene un estado de playa “Disipativa”.

V.4.2. Datos de Oleaje

Esta información fue proporcionada por el Departamento de Oceanografía de CFE, teniéndose registros de altura de ola vs. periodo de ola, dirección del oleaje incidente vs. altura de ola y dirección del oleaje incidente vs. periodo de ola. En la tabla de dirección del oleaje incidente vs. altura de ola, tabla V.3, los datos se obtuvieron desde el 19 de julio de 1994 hasta el 17 de diciembre de 1997 en aguas profundas.

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
RESIDENCIA CRUZ ZONA GOLFO

TABLA DE REFERENCIAS CRUZADAS ABSOLUTAS Y RELATIVAS
DIRECCION VS ALTURA DE OLA
TUXPAN VERACRUZ

REGISTROS 1 AL 30 DEL 19-JUL-1994 AL 17-DIC-1997

Altura	0.1m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	TOTAL	TOTAL
Dirección	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	>		ACUM
NORTE	26 906 4.12%	3 425 1.29%	1 234 0.19%	189 0.03%	33 0.01%	2 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	36 790 5.63%	36 790 5.63%
N-NE	51 835 9.47%	20 583 3.15%	3 337 0.51%	517 0.08%	78 0.01%	14 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	36 334 13.22%	123 124 18.85%
NORESTE	119,036 18.23%	39,342 6.02%	6,316 0.97%	1,080 0.17%	134 0.03%	22 0.00%	7 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	165,957 25.42%	289,111 44.27%
E-NE	149,681 22.92%	44,371 6.79%	5,033 0.77%	636 0.10%	95 0.01%	22 0.00%	4 0.00%	3 0.00%	2 0.00%	199,844 30.60%	488,955 74.87%
ESTE	74 599 11.42%	19,908 3.05%	1,850 0.28%	182 0.03%	36 0.01%	2 0.00%	0 0.00%	1 0.00%	2 0.00%	96,550 14.79%	585 535 89.66%
E-SE	17 862 2.74%	4,926 0.75%	502 0.08%	41 0.01%	5 0.00%	1 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	23 335 3.57%	608 873 93.23%
SURESTE	3 303 0.51%	1 144 0.18%	144 0.02%	14 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	4 613 0.71%	513 486 83.94%
S-SE	965 0.15%	464 0.71%	66 0.01%	11 0.00%	2 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	1,509 0.23%	814,995 94.17%
SUR	1,162 0.18%	433 0.07%	75 0.01%	10 0.00%	3 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	1 686 0.26%	816 681 94.43%
S-SO	1 976 0.30%	253 0.04%	45 0.01%	14 0.00%	1 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	2 290 0.35%	818 971 94.78%
SUROESTE	1 625 0.25%	185 0.03%	20 0.00%	4 0.00%	2 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	1 817 0.28%	620 788 95.08%
O-SO	312 0.05%	35 0.01%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	350 0.05%	621 138 95.11%
OESTE	58 0.01%	26 0.00%	4 0.00%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	91 0.01%	621,229 95.12%
O-NO	181 0.03%	102 0.02%	34 0.01%	4 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	321 0.05%	621 550 95.17%
NOROESTE	1 183 0.18%	461 0.07%	71 0.01%	19 0.00%	4 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	1 743 0.27%	623,293 95.44%
N-NO	7 035 1.08%	2 333 0.36%	421 0.06%	77 0.01%	9 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	9 878 1.51%	833 169 96.95%
TOTAL	467,730 71.62%	142,941 21.89%	19,155 2.93%	2,801 0.43%	454 0.07%	69 0.01%	13 0.00%	2 0.00%	4 0.00%		
TOTAL ACUM	467,730 71.62%	610 671 93.51%	629,826 96.44%	632 627 96.37%	633,081 96.94%	633,150 96.95%	633 163 96.95%	633 165 96.95%	633 169 96.95%		

	Nº de eventos	Porcentaje
CALMA	64,535	9.89%
>10 cm	588 489	90.11%
TOTAL	653,024	100.00%

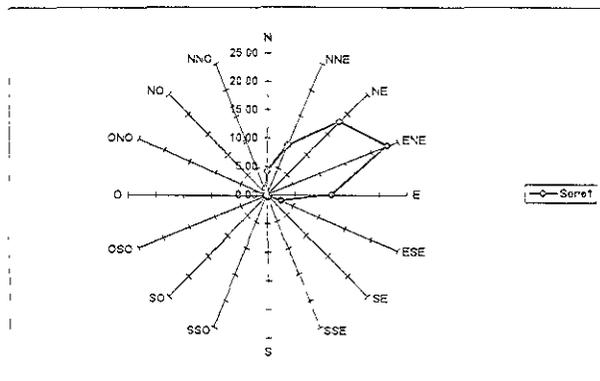


Tabla V.3. Datos de dirección del oleaje incidente vs. altura de ola. Cortesía de CFE.

Posteriormente, los datos se separaron en periodos de tres meses (primavera, verano, otoño e invierno). En la tabla V.3 se presentan los datos de oleaje para las 16 direcciones en todo el periodo. Se puede observar que para la dirección E-NE se tienen 199,844 eventos que van desde 0.5 m hasta 4.0 m de altura de ola y que corresponde a un 30.60% del total. De igual forma se aprecia que para la misma dirección, el mayor número de eventos corresponde a una altura de entre 0.1 m y 0.05 m, 149,681 eventos. Se presentan las rosas de direcciones vs. altura de ola para todo el periodo y para cada una de los periodos, representando el porcentaje de eventos de la altura de ola reinante, es decir, la altura de ola que más se presenta. El mismo Departamento de Oceanografía de CFE, proporcionó tablas de dirección vs periodo, anexo C, de las cuales se obtuvo el periodo asociado a la altura de ola significativa obtenida anteriormente.

De las tablas por periodos (primavera, verano, otoño e invierno) se obtuvo la altura de ola de ola significativa H_s , su periodo asociado y su dirección. Estos datos son indispensables para predecir la evolución de la línea de costa con la teoría de una línea, OLT. Es importante señalar que el norte magnético con el que se realizaron las tablas de oleaje y las rosas de direcciones no coincide con el norte señalado en la figura V.1, se presentó una diferencia de 17° lo cual llevó a un ajuste de los datos en la dirección del oleaje respecto a la ubicación de la planta.

V.4.3. Línea de costa (cota 0)

Los datos para identificar la línea de costa (cota 0), fueron, de igual forma, proporcionada por el Departamento de Oceanografía de CFE. Estos datos se presentan en tablas con formato xyz, donde $z=0$, unidades en m. Se obtuvieron los levantamientos batimétricos para identificar la línea de costa (cota 0), en una longitud considerable contigua a la PT ALM. La información de las líneas de costa corresponden a los siguientes años: 1985, 1988, 1989, 1990 y 1996. Cabe mencionar que estos levantamientos se realizaron sin un orden adecuado, es decir, que los datos de la cota cero no estaban ubicados en los mismos puntos ni a las mismas distancias longitudinales entre un levantamiento y otro. Este problema llevó a manejar los datos para ajustar los datos de la cota cero a distancias equidistantes longitudinalmente y en los mismos puntos entre un levantamiento y otro. Se realizaron interpolaciones de primer orden a los datos disponibles, este procedimiento fue necesario para introducir los datos al modelo de una línea y poder así, realizar la simulación de la zona de interés.

Para realizar la simulación con los datos disponibles se manejaron periodos que quedaron con el siguiente arreglo: (1985-1988), (1988-1989), (1989-1990), (1990-1996) y (1985-1996). En las figuras V.I. 9 a la V.I.13. se muestra las líneas de costa para cada uno de los periodos mencionados.

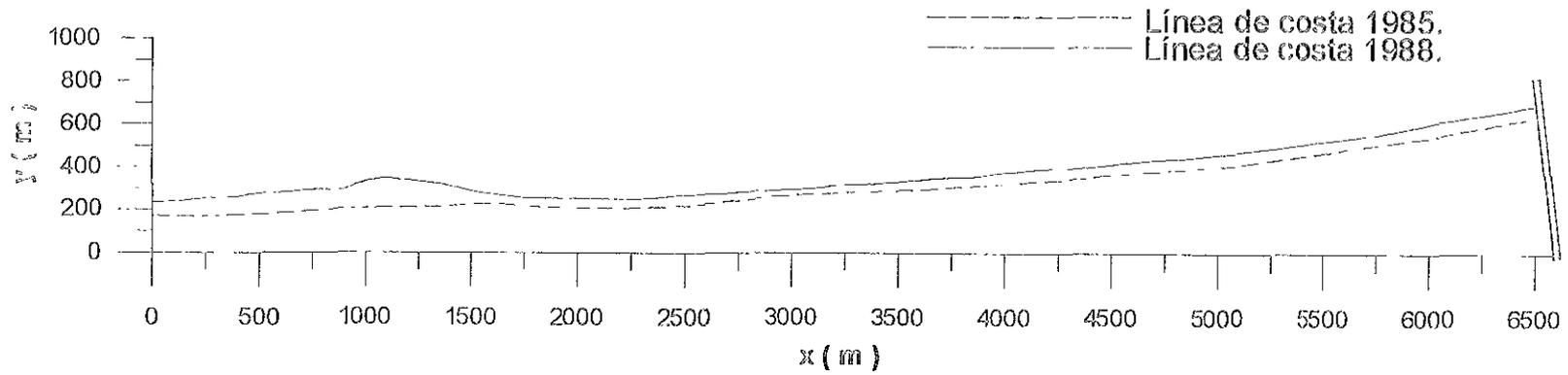


Figura V.9. Evolución de la línea de costa (1985 - 1988).

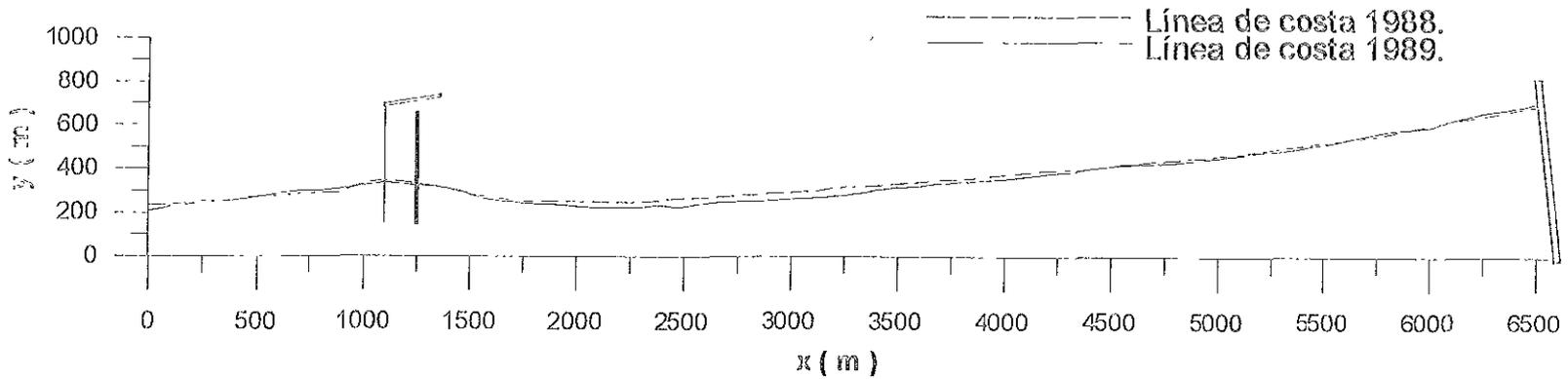


Figura V.10. Evolución de la línea de costa (1988-1989).

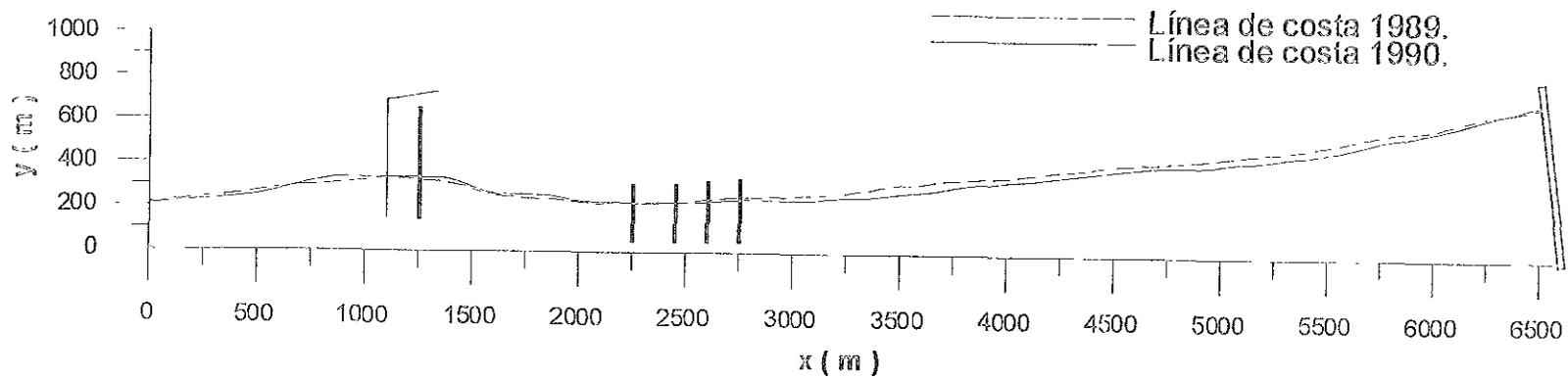


Figura V.11. Evolución de la línea de costa (1989-1990).

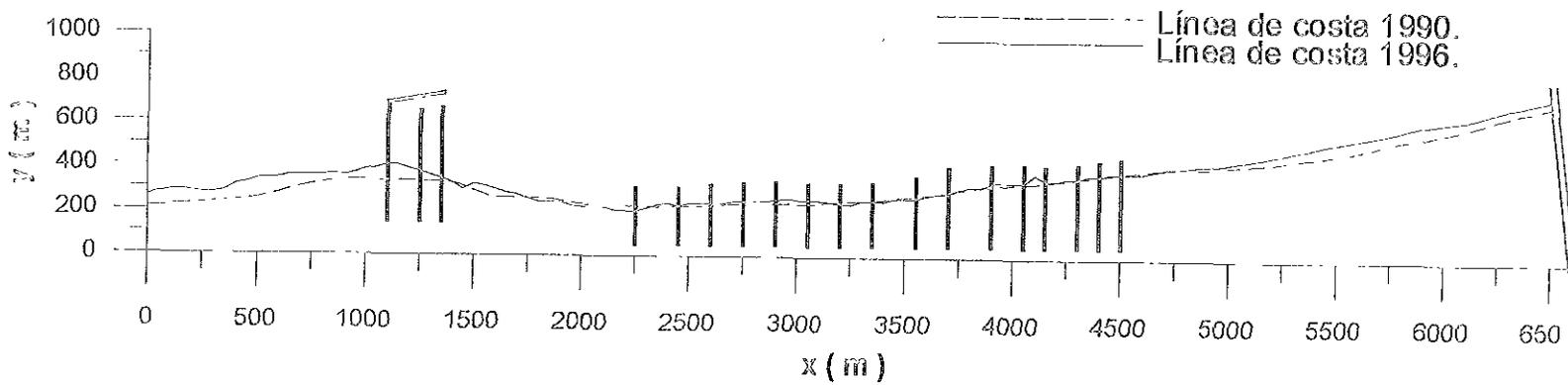


Figura V.12. Evolución de la línea de costa (1990-1996).

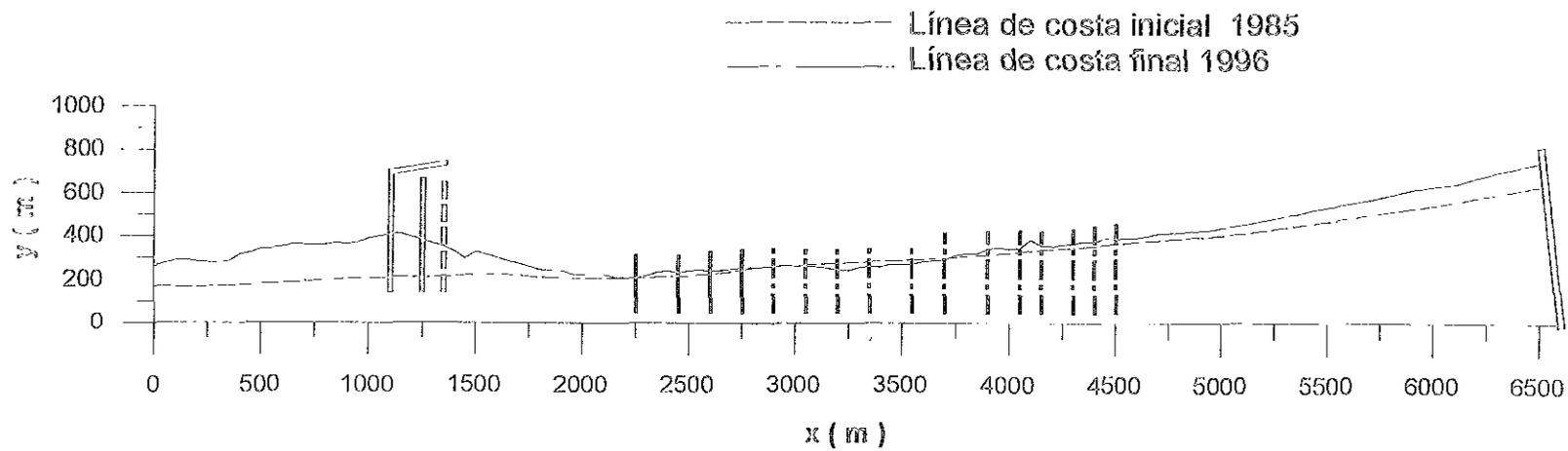


Figura V.13. Evolución de la línea de costa, medidas (1985-1996).

V.5. Evolución cronológica de la construcción de las estructuras

Para la construcción de la obra de toma constituida por un canal de llamada (canal 1-4), se inició en marzo de 1987 la construcción de la escollera norte, del bastón y de la escollera sur, finalizando estas obras en noviembre del mismo año. Debido a los problemas que se presentaron, en julio de 1990 se inició la construcción de 4 espigones en la zona de erosión, concluyéndolos en noviembre del mismo año. En mayo de 1993 se inició la construcción de 12 espigones más, concluyendo en septiembre del mismo año, formando así una batería de 16 espigones. Finalmente, se inició la construcción de la escollera sur-sur en noviembre de 1994 y concluyéndola en enero de 1995.

V.6. Desarrollo

Con toda la información recopilada se simuló la evolución para cada intervalo que se describió anteriormente: (1985-1988), (1988-1989), (1989-1990), (1990-1996), así como la simulación de todo el periodo, es decir, del año 1995 al año 1996.

Se inició la simulación del primer periodo (1985 - 1988) que de acuerdo a la evolución cronológica descrita anteriormente, en este periodo no se tienen estructuras costeras de la obra de toma. Sin embargo, se tiene un avance de la línea de costa en toda la sección que abarca este trabajo, debido a la escollera del río Tuxpan al sur de la zona de interés, figura V.9. Este avance de la línea de costa no afecta de manera significativa la evolución costera, se puede observar que el transporte de sedimentos es continuo y con una dirección norte - sur, ya que el material se acumula en el área cercana a la escollera del río Tuxpan. Después de realizar las simulaciones necesarias se obtuvo el menor error posible y se determinaron los coeficientes de calibración $K_1 = 0.3$ y $K_2 = 1.0$. Con estos valores se obtuvo un error de 5.47102 %, este error es aceptable, por las grandes escalas utilizadas. El resultado de la simulación se puede ver en la figura V.14.

Posteriormente, se realizó la simulación para el siguiente periodo (1988 -1989). En este lapso, según la evolución cronológica, ya se tiene la primer etapa de la obra de toma consistente en la escollera norte y la escollera sur, figura V.10. En la misma figura se puede observar que se inició un proceso de erosión que va de la cota longitudinal 1700 a la 4300, considerando la figura V.1, se aprecia que en esa sección se tienen las primeras instalaciones de PEMEX. Una vez realizadas las simulaciones, los valores encontrados de los coeficientes son $K_1 = 0.4$ y $K_2 = 0.6$, con un error de 6.48545 % que es aceptable. El resultado de la simulación se puede observar en la figura V.15.

Posteriormente se realizó la simulación del siguiente periodo (1989 - 1990). como consecuencia de la erosión que se presentó en el periodo anterior, el retroceso de la línea de costa puso en peligro las instalaciones mencionadas, el problema se resolvió en forma inmediata con la construcción, en este periodo, de la primer batería de cuatro espigones, figura V.11. Como se puede apreciar en la figura V.11, la batería de espigones resolvió el problema de la erosión en la sección afectada en un principio, pero se originó un retroceso al sur del último espigón hasta la escollera del río Tuxpan. Se realizaron las

simulaciones necesarias y se llegaron a los valores de los coeficientes de calibración siguientes: $K_1 = 0.4$ y $K_2 = 1.0$. Obteniéndose, un error de 7.66246% aceptable. El resultado de la simulación se puede observar en la figura V.16.

En el siguiente período (1990 - 1996) se construyeron los siguientes 12 espigones, al sur de los anteriores, figura V.1. El resultado de la construcción de la batería fue la protección de las instalaciones y la recuperación de la playa en esta zona, figura V.12. En esta figura se puede observar que la línea de costa, entre el último espigón y la escollera del río Tuxpan, sufrió un avance. De igual forma, al norte de la obra de toma, se presenta un avance de la línea de costa. Este periodo se simuló con la presencia de todas las estructuras existentes y se obtuvieron los siguientes valores de los coeficientes de calibración: $K_1 = 0.5$ y $K_2 = 0.3$, con un error de 8.88605%. EL resultado para este periodo se presenta en la figura V.17.

Finalmente, se simuló el periodo en su totalidad (1985 - 1996), con la presencia de todas las estructuras, figura V.13. El proceso de simulación y de determinación de los coeficientes de calibración conllevó más tiempo que para los periodos anteriores por la presencia de todas las estructuras y por el periodo de tiempo. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes: $K_1 = 0.4$ y $K_2 = 0.0$, con un error de 9.53357%. El resultado para este periodo se presenta en la figura V.18.

En las figuras V. 14 a V.18, se puede observar que las líneas de costa calculadas se superponen a las líneas de costa final. El proceso del modelo es iniciar los cálculos a partir de una línea de costa inicial y, en función de los coeficientes de calibración, se llega a una línea de costa calculada, la cual es comparada con la línea de costa final y de allí se obtiene el error de la simulación.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la parte más importante de la simulación es la calibración del modelo. Esto consiste en encontrar los valores de los coeficientes de calibración K_1 y K_2 hasta que la línea de costa calculada se ajuste, con el menor error posible, a la línea de costa final medida a partir de la inicial también medida. En la tabla V.4 se muestran los valores de los coeficientes de calibración y el error que se tuvo entre la costa final medida y la línea de costa calculada por el modelo. Debido a las grandes escalas espaciales y temporales que se manejan en este tipo de problemas, espacialmente son de kilómetros y temporalmente de años, los errores menores a 10% se consideran aceptables. Por esta razón, los resultados de los errores que se presentan en la tabla V.4, son aceptables. Se observa que entre mayor sea el número de estructuras, el error será mayor. También se observa que a pesar de ser la misma escala espacial, los parámetros de calibración difieren de un periodo a otro, esto demuestra una dependencia temporal de estos.

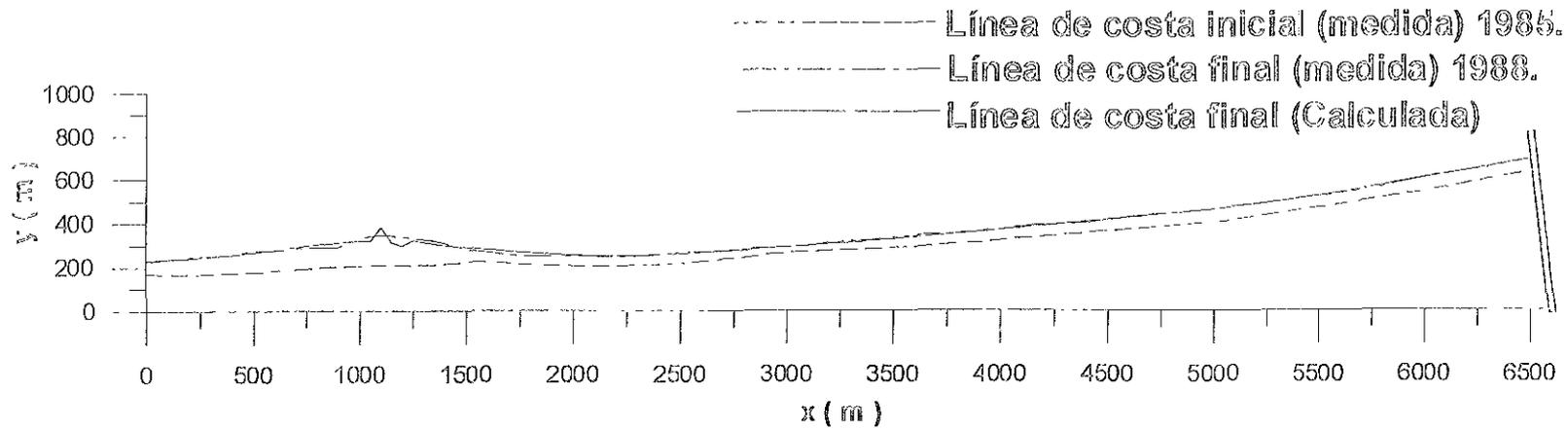


Figura V.14. Resultado de la simulación para el periodo de 1985 - 1988.

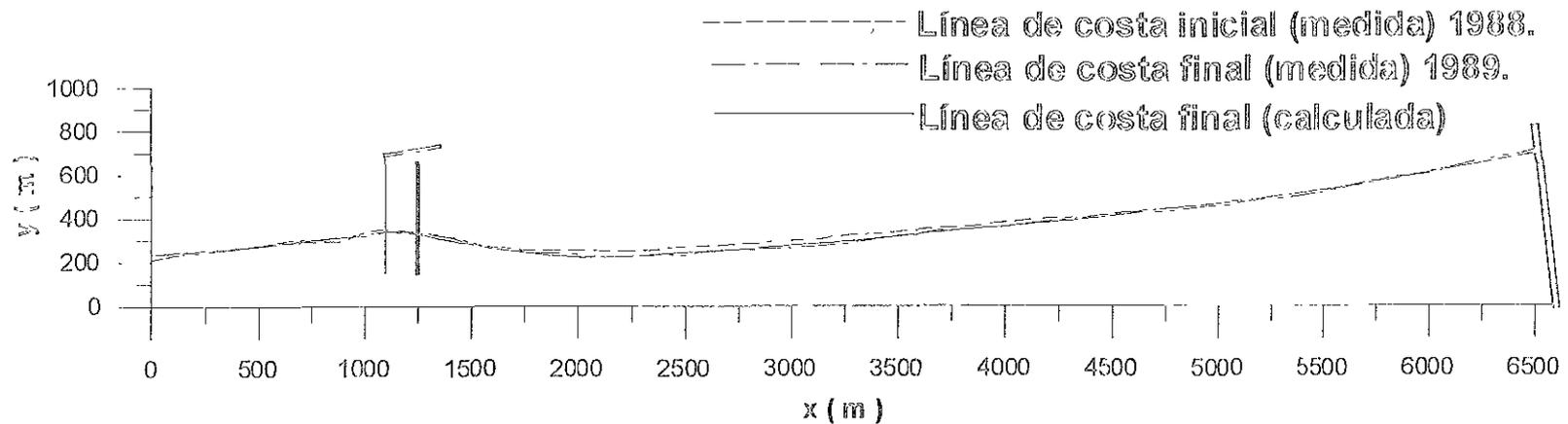


Figura V.15. Resultado de la simulación para el periodo de 1988 - 1989.

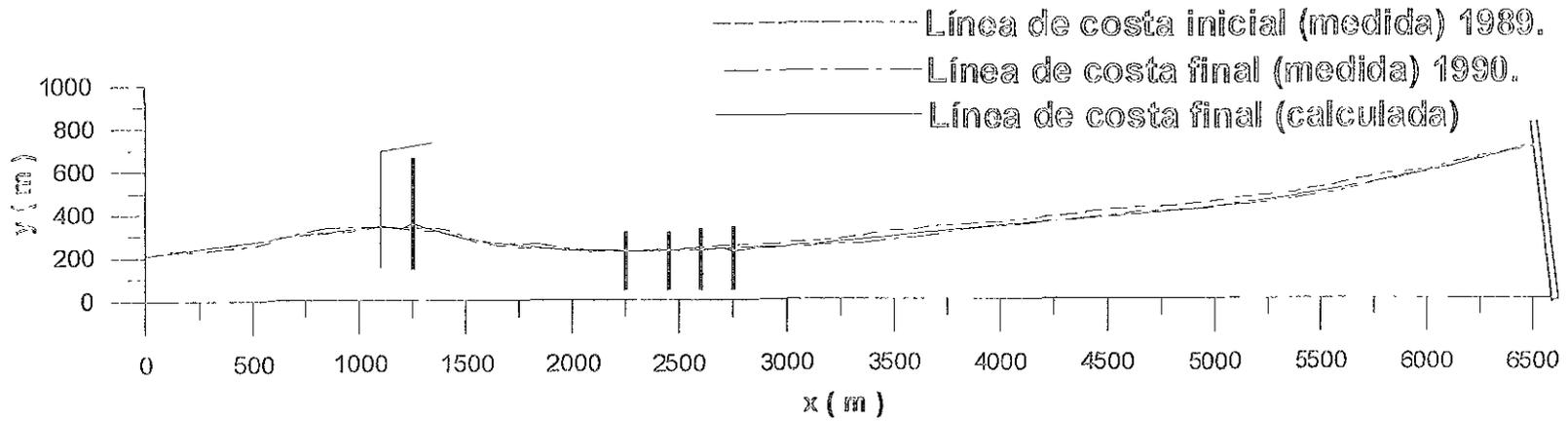


Figura V.16. Resultado de la simulación para el periodo de 1989 - 1990

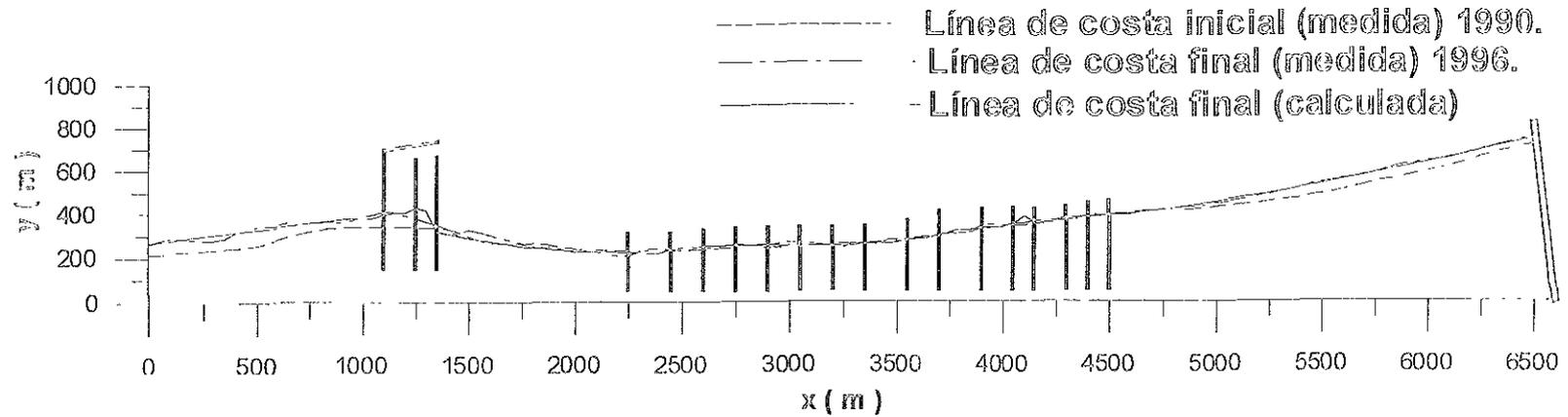


Figura V.17. Resultado de la simulación para el periodo de 1990 - 1996.

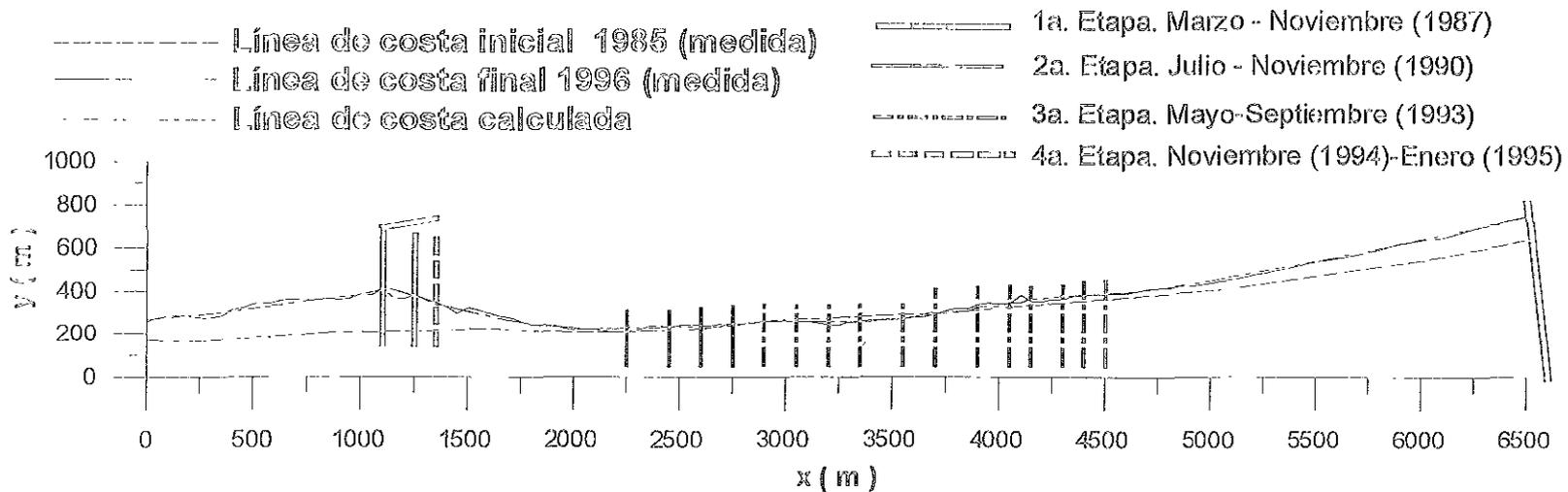


Figura V.18. Resultado de la simulación para el periodo de 1985 - 1996.

PERIODO	K ₁	K ₂	ERROR (%)
1985 - 1988	0.3	1.0	5.47102
1988 - 1989	0.4	0.6	6.48545
1989 - 1990	0.4	1.0	7.68246
1990 - 1996	0.5	0.3	8.88605
1985 - 1996	0.4	0.0	9.53357

Tabla V.4. Comparación de los valores de K_1 y K_2 en los distintos periodos.

Como se describió en el capítulo anterior existen formulaciones del parámetro K_1 donde se propone como constante o como función del tamaño del sedimento, de la pendiente de la playa y/o del tamaño del sedimento. 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.

Sin embargo, es importante hacer notar que, de acuerdo a la tabla V.4 también existe una variabilidad de K_1 y K_2 , en función del tiempo, más marcada en el segundo. En este trabajo se muestra que existe una dependencia temporal de los parámetros de calibración.

Esta variabilidad temporal implica el siguiente problema; si la información con que se cuenta es escasa y de periodos donde se han presentado sucesos extraordinarios, tormentas, dragados y/o vertidos, al momento de utilizar un modelo de una línea y encontrar los coeficientes de calibración para esta playa, se debe tener cuidado dada la incertidumbre para utilizar estos parámetros como base de predicción de la evolución de la línea de costa a largo plazo.

Se realizaron dos simulaciones de predicción hasta el año 2009. La primera se realizó considerando todas las estructuras actuales. En la figura V.19, se observa que la playa sólo sufre cambios considerables entre la obra de toma y el primer espigón: la línea de playa toma un perfil longitudinal paralelo a la línea de costa inicial.

En la figura V.20, se simuló eliminando la batería de espigones. Aquí se observa que la línea de playa sufre un retroceso considerable, desde la obra de toma hasta la cota 2500.

V.7. Predicción de la evolución de la línea de costa, diseño y estabilidad de las playas

Para predecir la evolución de una línea de costa a futuro es necesario, como primer paso, la recopilación de la información necesaria, (altura, dirección y periodo del oleaje, perfiles, líneas de costa, diámetro del sedimento). Posteriormente, se introducen los datos al modelo y se calibra, una vez encontrados los parámetros de calibración K_1 y K_2 con el menor error posible y que son únicos para cada playa en un periodo dado, se procede a simular la playa hasta la fecha deseada. Se puede proponer estructuras para realizar el diseño de una playa, realizar aportaciones y trasvases de material granular.

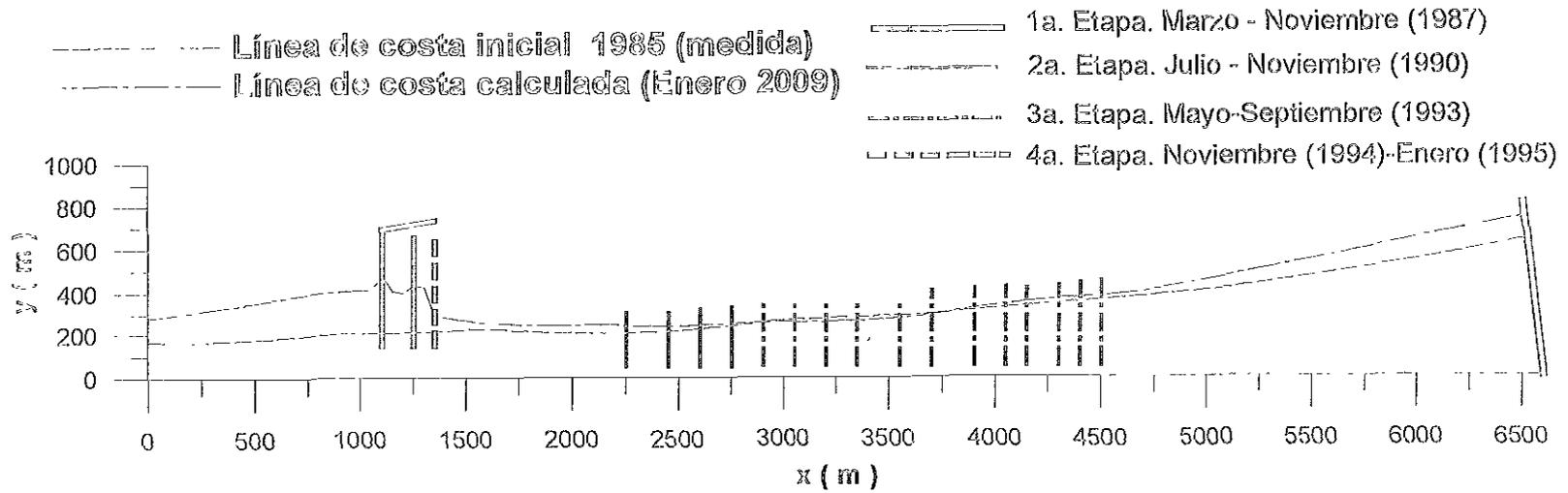


Figura V.19. Resultado de la simulación para el periodo de 1985 - 2009.

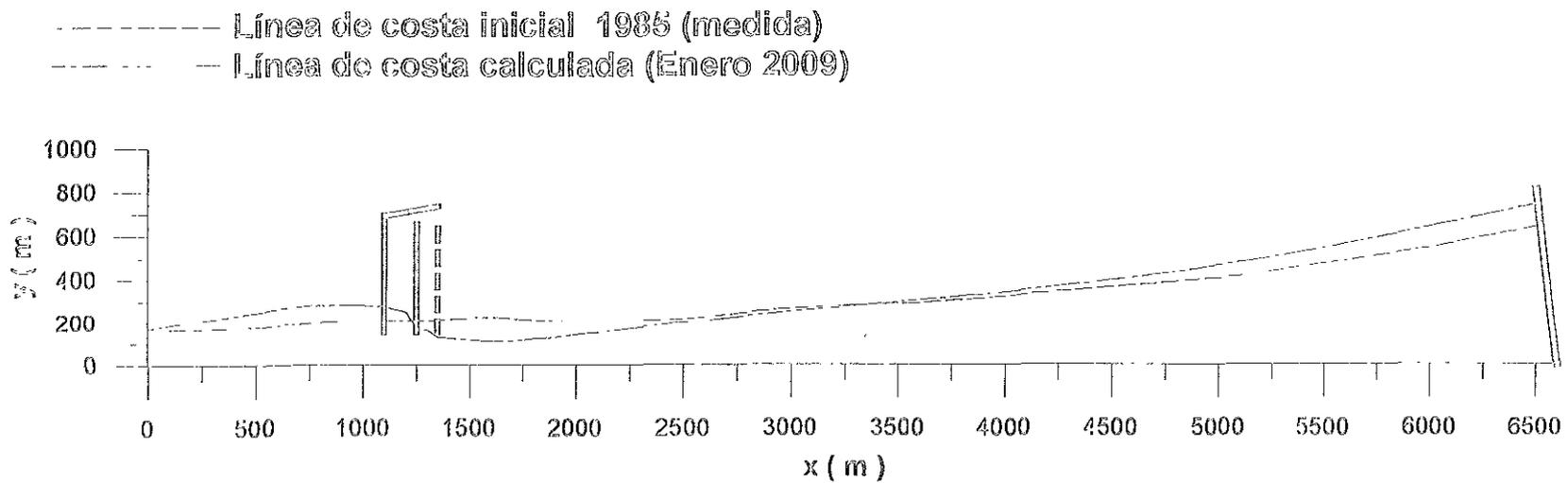


Figura V.20. Resultado de la simulación sin la batería de espigones para el periodo de 1985 - 2009.

El modelo es capaz de simular la evolución de la línea de costa de una línea inicial hasta una línea final, en función de los parámetros de calibración. Una vez hallados éstos, es posible predecir la evolución de la línea de costa. Esta capacidad del modelo es la que permite al ingeniero diseñar o estabilizar las playas. En los casos de diseño y teniendo todos los datos disponibles, se determinan los parámetros de calibración para posteriormente proponer la ubicación y tipo de estructuras o acciones de rellenos o trasvases que permitan "elaborar" la playa, buscando la estabilidad de la misma, funcionalidad y en muchos casos, estética, a ese proceso se le llama restauración de la playa. En la figura V.21, Playa Pedregalejo, Málaga, España; se observan los distintos tipos de estructuras que se construyeron para llegar a la playa que se observa.

La mayoría de las veces, el ingeniero se tiene que enfrentar al problema de estabilizar la playa en la cual, se tienen problemas de erosión o deposición de sedimentos; comúnmente originados por la construcción de estructuras costeras para diversos fines. Las más de las veces la erosión de la playa es ya avanzada y se recurre a la recopilación de información y a la posterior determinación los coeficientes de calibración. Una vez obtenidos, se simula la zona eliminando o proponiendo nuevas estructuras y solicitándole al modelo una simulación de varios años, posteriores al año en que se levantó la línea de costa final. Con ello, el ingeniero puede determinar el número, posición y tipo de estructuras a construir o eliminar: De igual forma el ingeniero puede, de ser necesario, proponer rellenos o trasvases para acelerar el proceso de estabilización.

Los resultados de estabilizar una playa son satisfactorios y muy recurrentes, pues resulta común que se construyan estructuras costeras sin un estudio previo que garantice la estabilidad de la playa lo que origina la erosión de la misma. A continuación, en las figuras V.22, V.23, V.24 y V.25 se muestran ejemplos donde, en un principio, se tenían problemas de estabilidad de la playa y la erosión de ésta avanzó tierra adentro hasta poner en riesgo las edificaciones de la zona, se muestran las fotos antes de la restauración y posterior a la restauración.

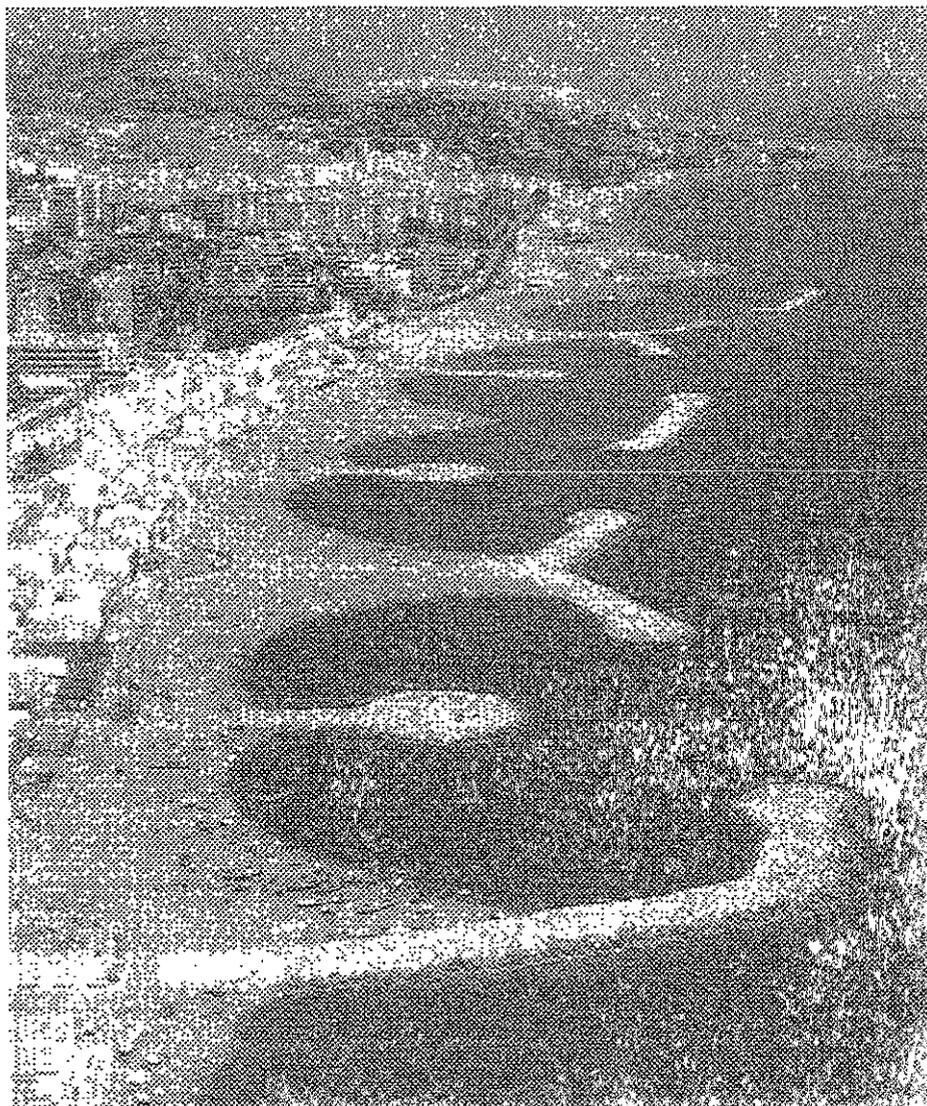


Figura V.21. Playa Pedregalejo, Málaga, España. CIRIA Special Publication 83, 1991.

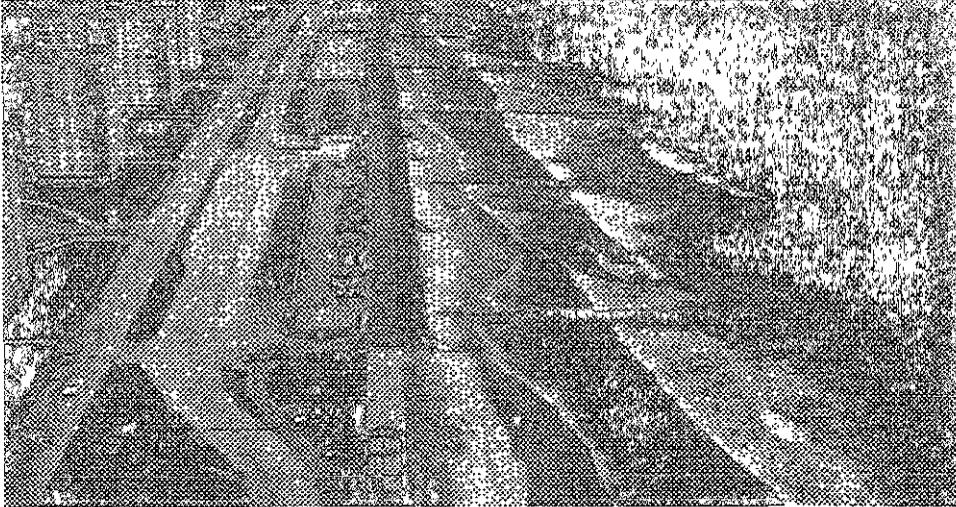


Antes de la restauración.

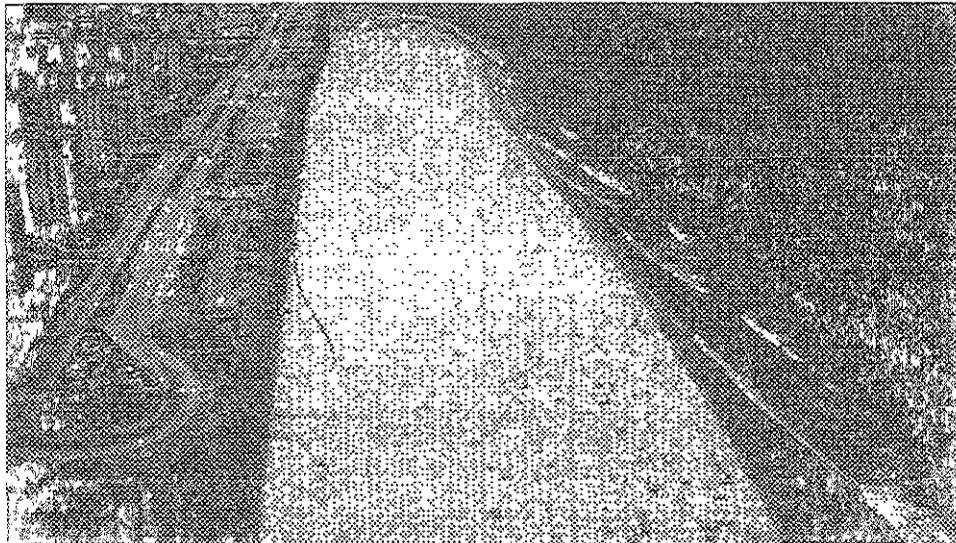


Después de la restauración.

Figura V.22. Playa Rihuete, Murcia, España. CIRIA Special Publication 83, 1991.

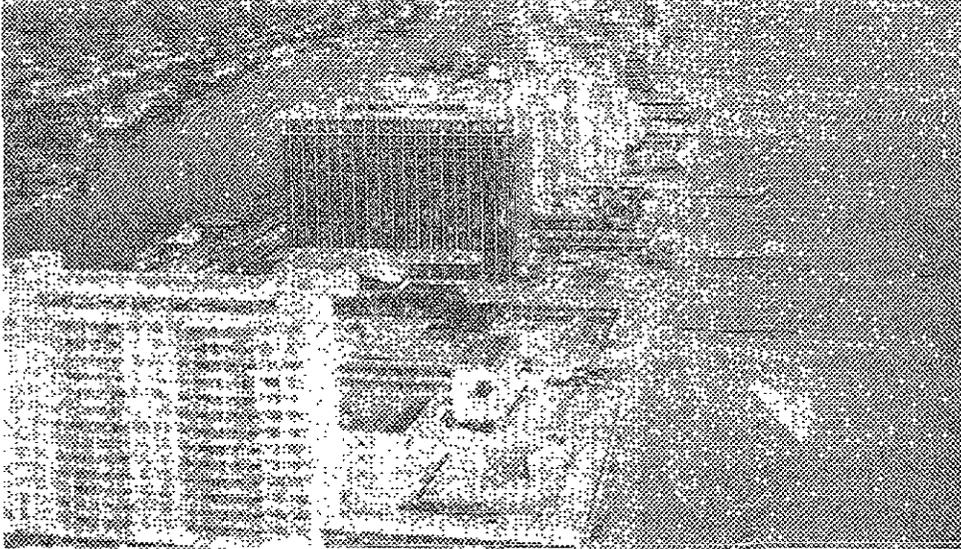


Antes de la restauración, abril de 1973.

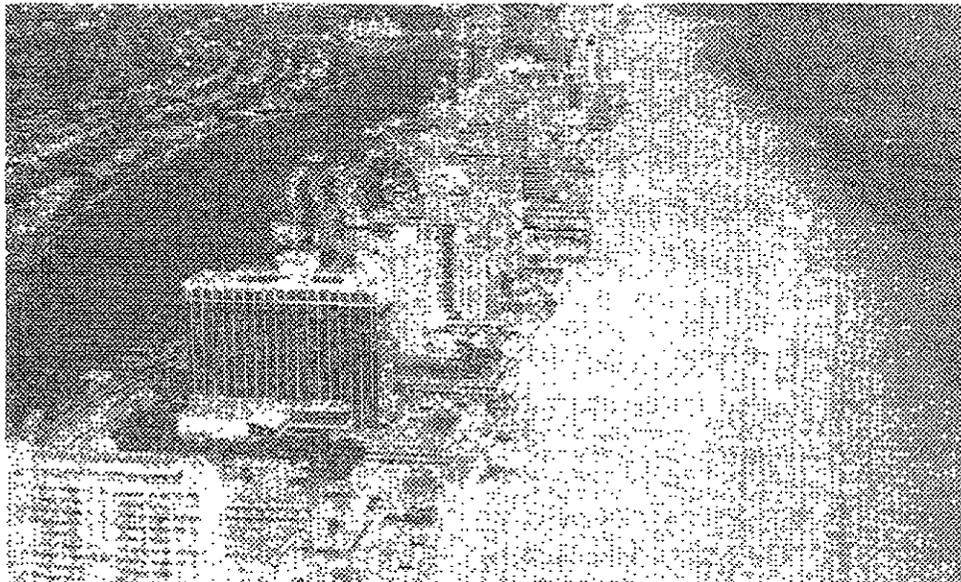


Después de la restauración, julio de 1975.

Figura V.23. Playa Rockaway, Nueva York, EJA. SPM, 1984

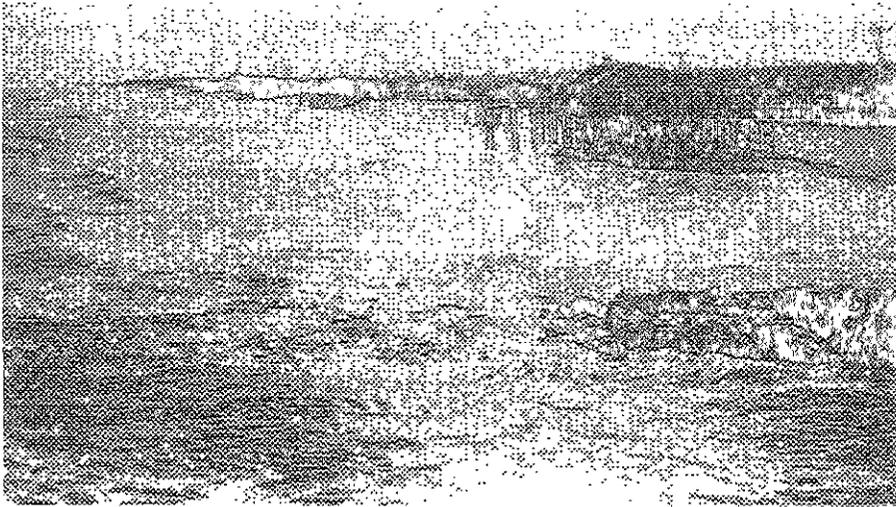


Antes de la restauración, febrero de 1978.

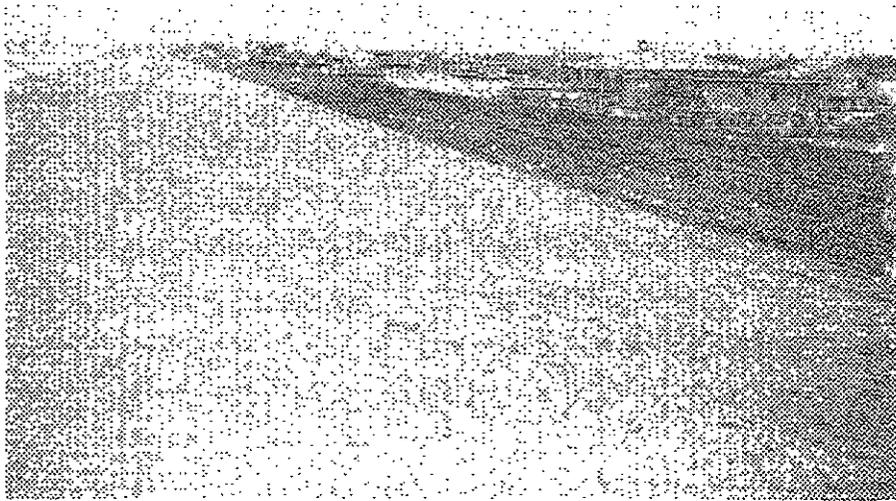


Después de la restauración, octubre de 1979.

Figura V.24. Dade County, Florida, EJA. SPM, 1984.



Antes de la restauración, 1964



Después de la restauración, 1965.

Figura V.25. Playa Carolina, Carolina del Norte, EUA. SPM, 1984.

V.8. Resumen

En este capítulo se presentó la aplicación del modelo OLT al caso de la playa alterada, contigua a las planta termoeléctrica "Adolfo López Mateos" en el estado de Veracruz. En este lugar, como consecuencia de la construcción de la obra de toma, el equilibrio de la playa se modificó; el acarreo del sedimento se vio alterado y la playa inició un proceso de sedimentación en el lado norte de la obra de toma y un proceso de erosión al sur de la misma.

Para realizar la simulación de la zona fue necesario recopilar y analizar los datos disponibles de perfiles de playa y de oleaje en la zona de interés. Así mismo, se recopiló y se adecuó los datos batimétricos para identificar la cota 0, es decir, la línea de costa.

Se presentó la evolución cronológica de la construcción de las estructuras de todas las obras de la zona y posteriormente se inició la modelación que se organizó de la siguiente forma.

El primer paso, posterior a la recopilación de información, fue obtener la altura de ola significativa, la dirección y el periodo asociados a esta altura con la información disponible.

Con toda la información recopilada se simuló la evolución para cada uno de los siguientes intervalos: (1985-1988), (1988-1989), (1989-1990), (1990-1996), así como la simulación de todo el periodo, es decir, (1995 - 1996).

Se inició la simulación del primer periodo (1985 - 1988) y después de realizar los cálculos necesarios se obtuvo el menor error posible y se determinaron los coeficientes de calibración $K_1 = 0.3$ y $K_2 = 1.0$ y un error de 5.47102 %. Posteriormente, se realizó la simulación para el periodo (1988 -1989). En este lapso, los valores encontrados de los coeficientes son $K_1 = 0.4$ y $K_2 = 0.6$, y un error de 6.48545 %.

Posteriormente se realizó la simulación del siguiente periodo (1989 - 1990) llegando a los valores de los coeficientes de calibración siguientes: $K_1 = 0.4$ y $K_2 = 1.0$ con un error de 7.66246%. Para el siguiente periodo (1990 - 1996) los coeficientes de calibración obtenidos fueron: $K_1 = 0.5$ y $K_2 = 0.3$, con un error de 8.88605%. Finalmente, se simuló el periodo en su totalidad (1985 - 1996), con la presencia de todas las estructuras y se obtuvieron los siguientes: $K_1 = 0.4$ y $K_2 = 0.0$, con un error de 9.53357%.

El proceso del modelo es iniciar los cálculos a partir de una línea de costa inicial y, en función de los coeficientes de calibración, se llega a una línea de costa calculada, la cual es comparada con la línea de costa final y de allí se obtiene el error de la simulación.

Con los coeficientes de calibración encontrados para cada periodo, se concluye que éstos son función de lo expuesto en el capítulo IV y, además, son función de la escala temporal por lo cual es necesario tener una especial precaución en la utilización de los parámetros,

especialmente si se cuenta con poca información de la zona y se desea predecir la evolución de la línea de costa, sea para diseñar una playa o para estabilizar una playa erosionada.

Es importante mencionar, que la presencia de estructuras modifican los valores de los coeficientes de calibración, pues a medida de que aumenta el número de estructuras, el error aumenta y la combinación de coeficientes que proporcione el menor error es más complicada de hallar.

VI. CONCLUSIONES.

VI.1. Conclusiones.

El estudio de la evolución playera, como se ha venido tratando en este trabajo es muy importante. A continuación se presentan las conclusiones de todo el trabajo.

- La cambio en la posición de la línea de playa es un proceso natural de las playas siendo esté un proceso cíclico, la playa siempre vuelve a un estado inicial. Sin embargo, la construcción de algún tipo de estructura costera origina una erosión que llega a convertirse en un serio problema, modificando la posición de la línea de playa en forma definitiva.

- Tanto para el análisis del problema como para el diseño de la solución, es necesario la cuantificación del transporte de sedimentos. Este puede obtenerse fácilmente. Se pueden comparar perfiles perpendiculares a la playa del mismo lugar a distintas fechas o se pueden comparar líneas de costa a distintas fechas. En ocasiones es difícil tener este tipo de datos, por lo que puede recurrirse a la construcción de espigones de

prueba. Un método numérico para valorar el transporte de sedimentos se presenta en este trabajo, esta basado en la ecuación de continuidad del sedimento y la cual proporciona resultados fiables.

- La teoría de una línea (OLT), es una herramienta sencilla y eficaz, capaz de modelar la evolución de la línea de costa con una precisión, que en términos ingenieriles y para la gran escala que se maneja, se considera aceptable.
- En la mayoría de las aplicaciones de la teoría de una línea, OLT, lo que se requiere es la evaluación de la respuesta de la costa a una perturbación natural e ingenieril, como la construcción de un rompeolas, la colocación de rellenos a lo largo de cierta porción de la costa o descarga de arena desde un río. El modelo de una línea trabaja mejor al calcular la respuesta de la costa, porque la perturbación producirá una tendencia a largo plazo distinta a la que normalmente ocurrirá debida al movimiento aleatorio de la arena en la playa, en otras palabras, este modelo de cambio de línea de costa, calcula el movimiento de la misma en transición de un estado de equilibrio a otro
- La teoría de una línea, OLT, sólo debe utilizarse para la predicción con una escala temporal a largo plazo y con una gran escala espacial (se habla de una escala espacial de kilómetros y una temporal de años). La teoría es especialmente adecuada para, observar y predecir el efecto que tienen los espigones, diques exentos y/o aportaciones puntuales de sedimento, en la evolución de la playa.
- Este modelo no puede describir la formación del perfil transversal de playa ni determinar, por lo tanto, los estados morfodinámicos de los perfiles, erosiones por muros de protección y otros cambios que involucren transporte transversal de sedimentos.
- La teoría de una línea (OLT) tiene las siguientes limitantes, no es posible simular estructuras oblicuas a la línea de playa ni estructuras curvas.
- El modelo se basa en el perfil de equilibrio de Dean, expuesto en el capítulo IV. Es un perfil teórico incapaz de representar barras y/o valles. El perfil de equilibrio es representativo y útil para utilizarse en la teoría de una línea, proporcionando una buena aproximación.
- Si se dispone de una serie de datos de oleaje suficientemente larga, es decir, que abarque un periodo de tiempo de varios años, el proceso de calibrado del modelo de línea de

costa, selección de K_1 y K_2 , es relativamente sencillo, pues consiste en variar el valor de los coeficientes hasta encontrar la pareja que arroje el menor error posible.

- En el momento de realizar las simulaciones con el modelo de una línea, es necesario aceptar la hipótesis de que los datos de oleaje que se han utilizado en la simulación son representativos de las condiciones de oleaje en el futuro.
- La aplicación del modelo OLT es, principalmente, la regeneración de las playas. Para esto es necesario predecir la evolución de la línea de playa bajo las condiciones actuales de oleaje y presencia de estructuras, que han generado problemas de erosión o deposición de arena; una vez calibrado el modelo se propone la eliminación o construcción de estructuras definiendo su ubicación y tipo que contrarresten el problema. Posteriormente, se diseñan estas estructuras. Otra aplicación es el diseño una playa, para esto se requiere simular y calibrar el modelo con el estado de la playa original y proponer la ubicación y tipo de estructuras que generen el crecimiento de la playa hasta los requerimientos necesarios, se introducen las estructuras y se observa la evolución de la línea de playa. En ambos casos se busca que las playas consigan su condición de estabilidad.
- Diversos autores proponen ecuaciones y gráficas para definir el valor del primer parámetro de calibración, K_1 , en función de las características de la playa o de las condiciones del oleaje, sin embargo, estas teorías son difíciles de aplicar pues es necesario conocer otras condiciones como son: la pendiente de la playa o la altura de ola en rotura.
- También se propone la relación K_1/K_2 , que indica una dependencia entre K_1 y K_2 y que se puede tomar como una primera aproximación, pero de igual forma, se tienen los mismos inconvenientes.
- En este trabajo se encontró que los valores de los coeficientes variaban para la misma zona, a diferentes periodos de tiempo. Por tanto, los valores de los coeficientes de calibración K_1 y K_2 dependen, en gran medida, de los intervalos de tiempo que se utilizan para calibrar.
- La presencia de estructuras costeras modifican los valores de los coeficientes temporalmente, teniendo como consecuencia errores en la predicción o en el diseño de playas.

- Debe tenerse precaución en el uso de los parámetros, principalmente si se cuenta con poca información de la zona y se desea predecir la evolución de la costa y estabilizar y/o diseñar una playa. Esto es, cuando se tiene poca información, debe tenerse precaución en el análisis de los resultados.

VI.2. Futuras líneas de investigación.

Este trabajo deja abiertas nuevas líneas de investigación entre las que se destacan las siguientes.

- Elaborar un modelo de refracción-difracción, con otras técnicas de solución numérica que permita obtener resultados fiables y rápidos. Tal es el caso del método de Lax Wendroff.
- Mejorar 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 poder trabajar con la evolución playera en sus dos direcciones: longitudinal y transversas. Con ello poder describir la formación del perfil y determinar las variaciones morfodinámicas, obteniéndose así una visión global del problema.
- Elaborar tablas con los parámetros de calibración K_1 y K_2 , obtenidos con el modelo y para diferentes playas y así definir, posteriormente, criterios o formulaciones de fácil aplicación.
- Así mismo, elaborar tablas de los mismos parámetros de calibración para distintos periodos de tiempo y para distintas playas, con la finalidad de analizar la dependencia temporal y proporcionar criterios para ellos en este caso.

BIBLIOGRAFÍA

- CEM, 1998. "Coastal Engineering Manual" Department of the Army. U S Army Corps of Engineers. Cap III.
- CIRIA Special Publication 83, 1991. "Manual on the use of rock coastal and shoreline engineering" Construction Industry Research and Information Association.
- Dean, R. y Dalrymple R. 1991. "Water wave mechanics for engineers and scientists " Advanced Series on Ocean Engineering, volume 2, World Scientific, pp 353.
- Goveare G. 1997 "Acción del oleaje sobre estructuras marítimas no rebasables" Tesis de Maestría, UNAM. México
- González M. 1995 "Morfología de playas en equilibrio. Planta y Perfil" Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Santander, España.
- Gravens M, Kraus N, Hanson H. 1991. "GENESIS: Generalized Model For Simulating Shoreline Change" Technical Report CERC-89-19. U.S. Army Corps of Engineers

- Horikawa H 1988. "Nearshore Dynamics and Coastal Processes" Theory, Measurement and Predictive Models. University of Tokio Press.
- Larson M., Hanson H, Kraus N 1997. "Analytical solutions of One Line Model for shoreline change near Coastal Structures" Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Vol. 123 No. 4, pp 180-191
- Leont'yev, I. O. 1997. "Short-term shoreline changes due to cross-shore structures: a one line numerical model" Coastal Engineering. An international journal for coastal, harbour and offshore engineers. Vol. 31. Elsevier.
- López de San Román, B. 1996. "Estudio comparativo de los modelos de evolución de la línea de costa (One Line) y los modelos de forma en planta de equilibrio" Tesina de Magister. Universidad de Cantabria. Santander, España.
- Losada M. A. 1988. "Estabilidad de playas. Morfodinámica de los procesos litorales" Universidad de Cantabria. Santander, España
- 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
- Nicholls, R., Birkemeier, W., Hallermeier, R., "Application of the depth of closure concept" Coastal Engineering 1996. Proceedings of the twenty-fifth international conference. ASCE. Volume 4. Chapter 299.
- Sánchez J.L., Carmona R. 1991. "Fundamentos de mecánica de fluidos para ingenieros hidráulicos" Series del Instituto de Ingeniería. UNAM. México.
- Sánchez J.C., Mora J.M., Silva R. 1998 "Dependencia temporal de los parámetros K_1 y K_2 para la predicción de la evolución de playas" Segundo Congreso Internacional sobre Ingeniería Marítima y Portuaria" Veracruz. México.
- Silva. R., Govaere G. Ortiz. L. 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 Termoelectrica de Tuxpan, Veracruz." Elaborado para Comisión Federal de Electricidad" Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 6341.
- Silva R., Govaere G., Mora J.M., Mendoza J.A. 1997. "Desarrollo de un sistema para el análisis y diseño de playas" Elaborado para Comisión Federal de Electricidad" Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 7324
- Silvester R y Hsu J. R. C 1997. "Coastal stabilization" Advanced Series on Ocean Engineering, volume 14, World Scientific.

-
- SPM, 1984. Shore Protection Manual" Coastal Engineering Research Center US Army Corps of Engineers.
 - Wright L.D., Short A.D. 1984 "Morphodynamic variability of surf zones and beaches. a synthesis" Marine Geology, 56 (1984) Elsevier Science Publishers B V., Amsterdam. The Netherlands. pp. 93-118

ANEXO A

ESQUEMAS DE DIFRACCIÓN

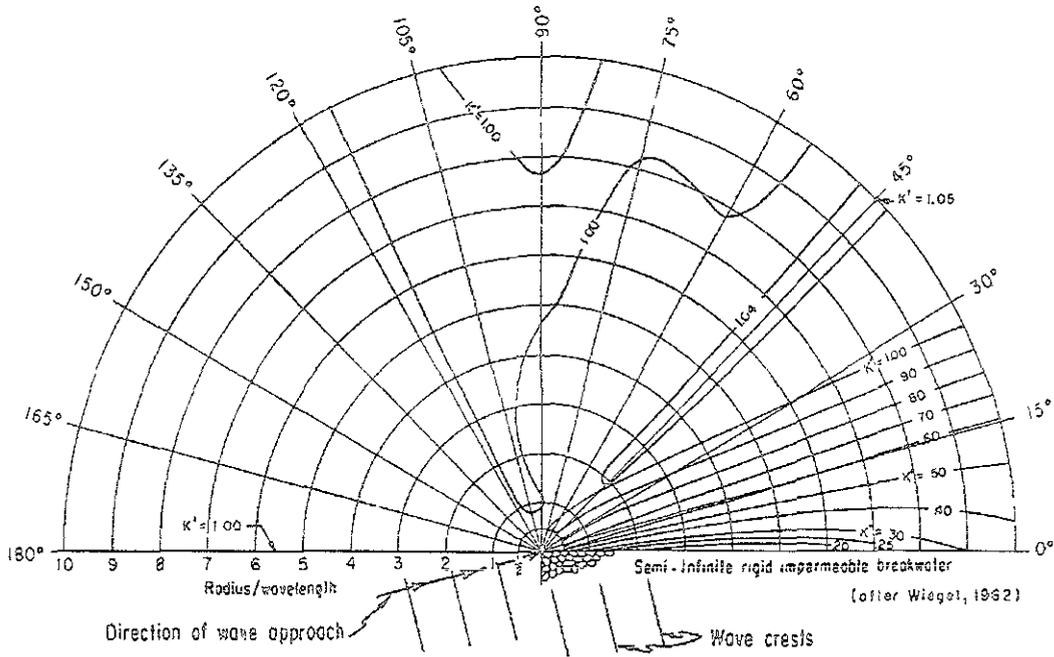


Figura A.1. Diagrama de difracción, 15° de ángulo incidente. SPM, 1984.

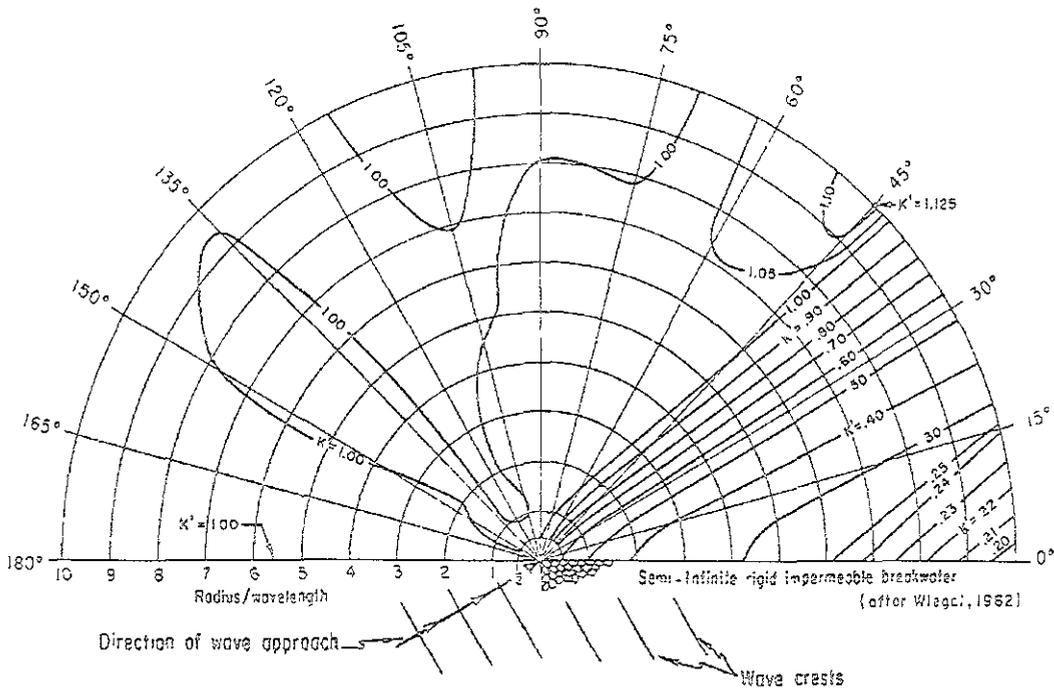


Figura A.2. Diagrama de difracción, 30° de ángulo incidente. SPM, 1984.

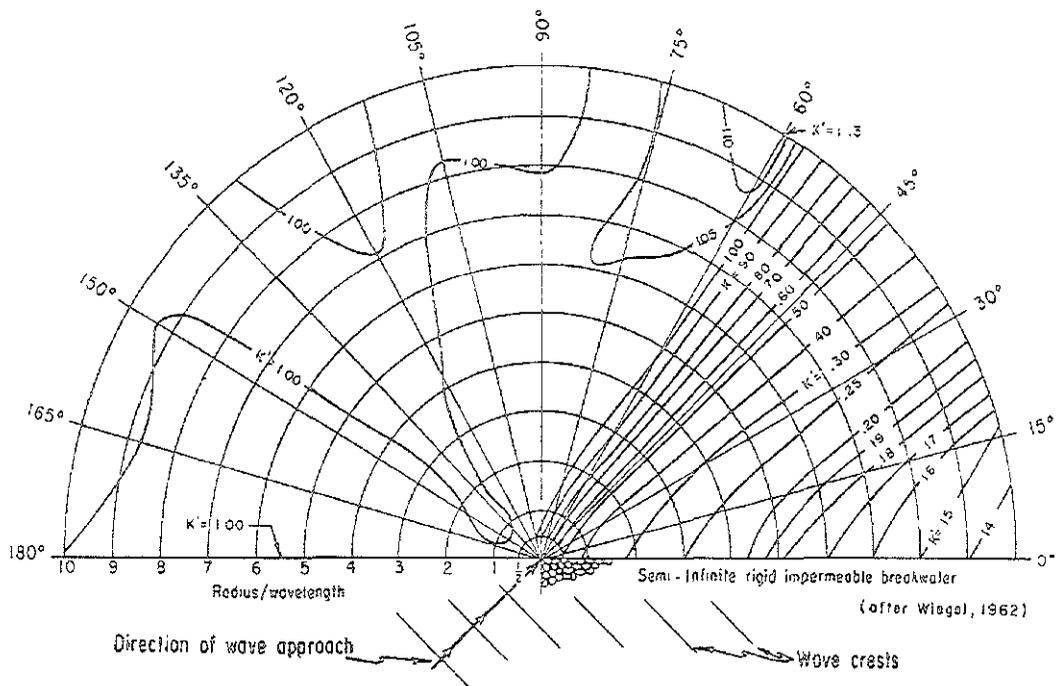


Figura A.3. Diagrama de difracción, 45° de ángulo incidente. SPM, 1984.

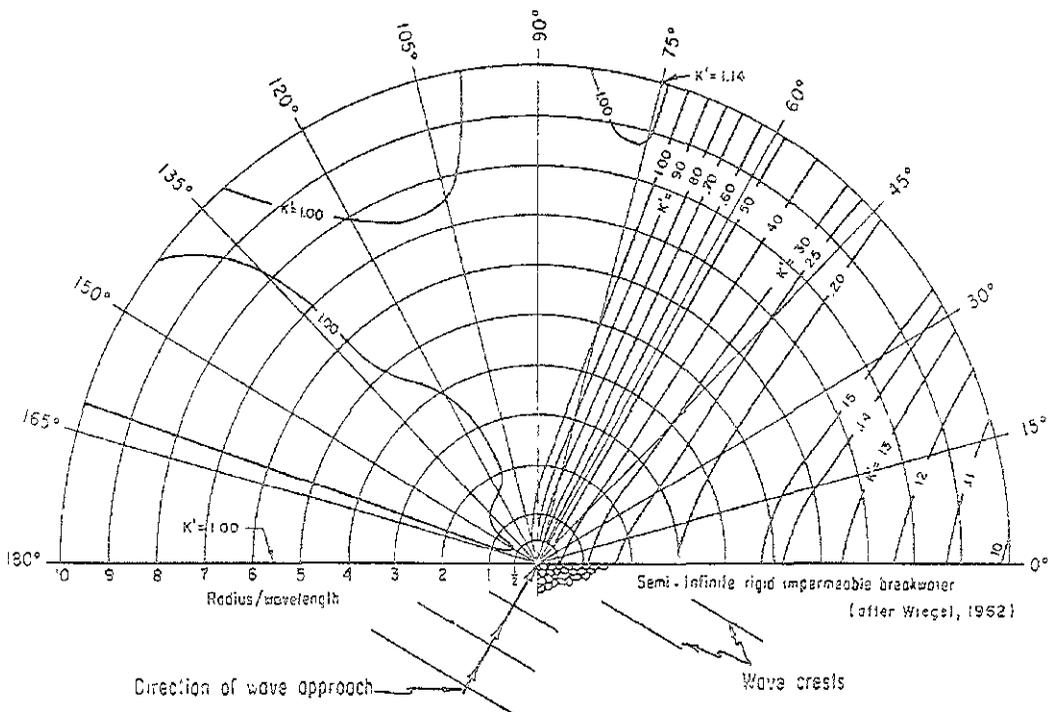


Figura A.4. Diagrama de difracción, 60° de ángulo incidente. SPM, 1984.

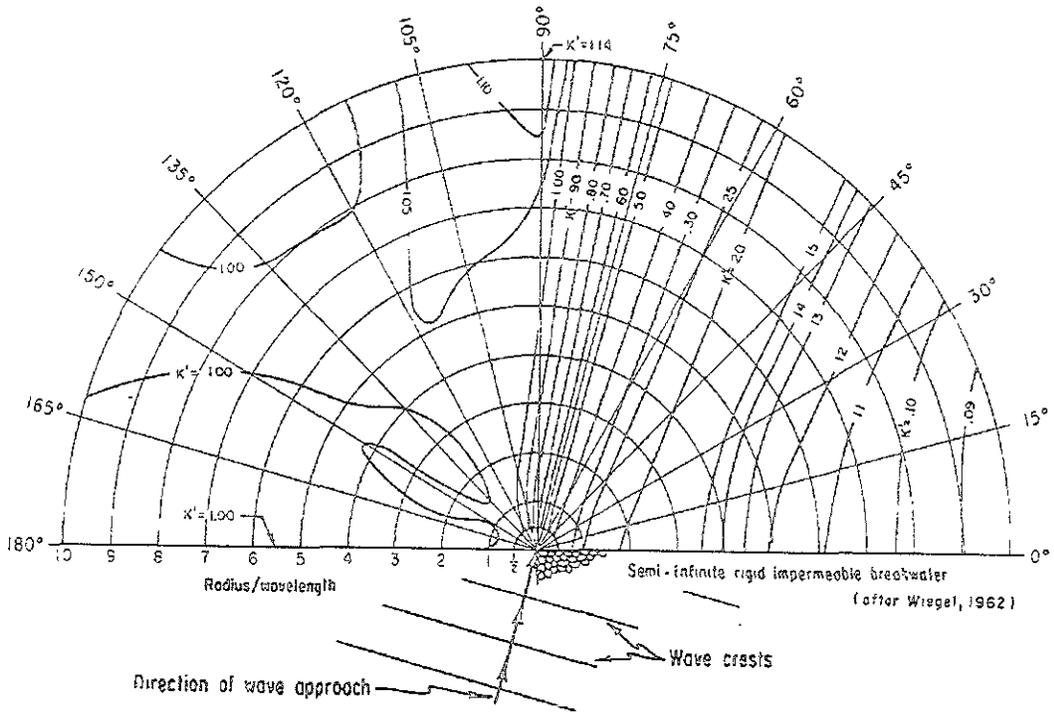


Figura A.5. Diagrama de difracción, 75° de ángulo incidente. SPM, 1984.

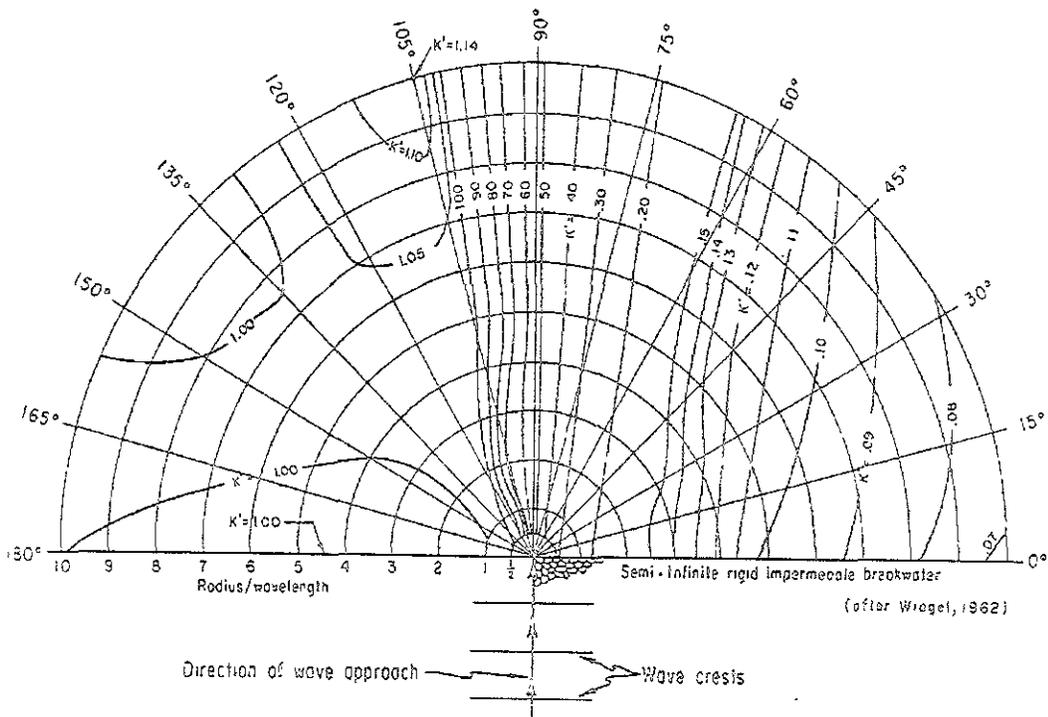


Figura A.6. Diagrama de difracción, 90° de ángulo incidente. SPM, 1984.

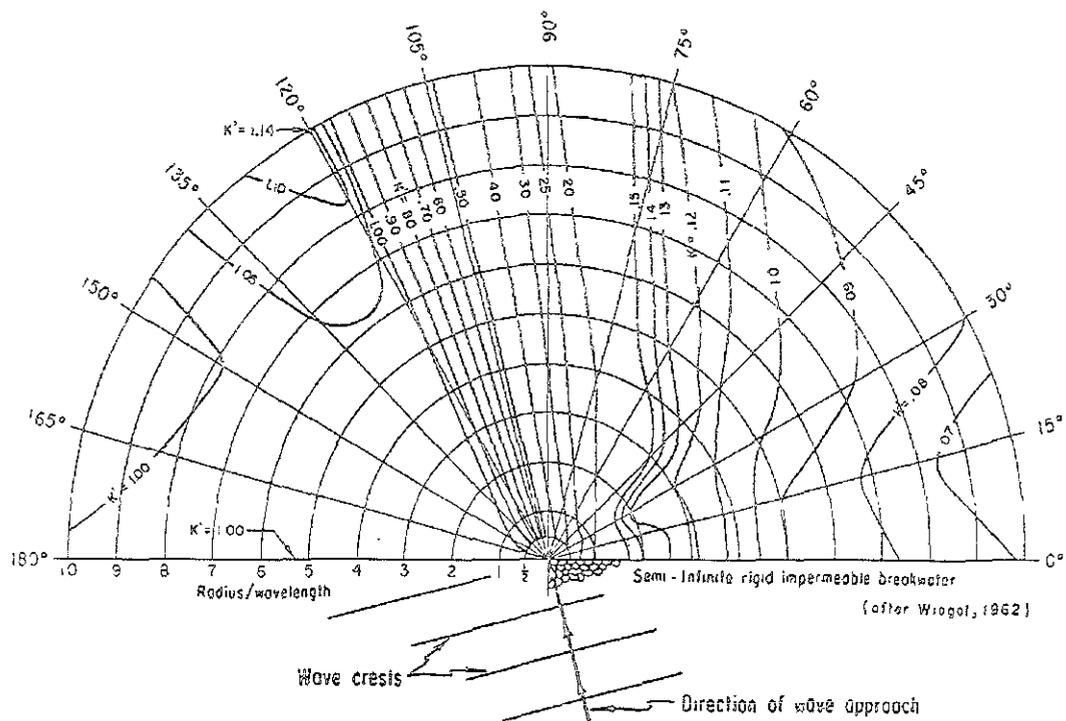


Figura A.7. Diagrama de difracción, 105° de ángulo incidente. SPM, 1984.

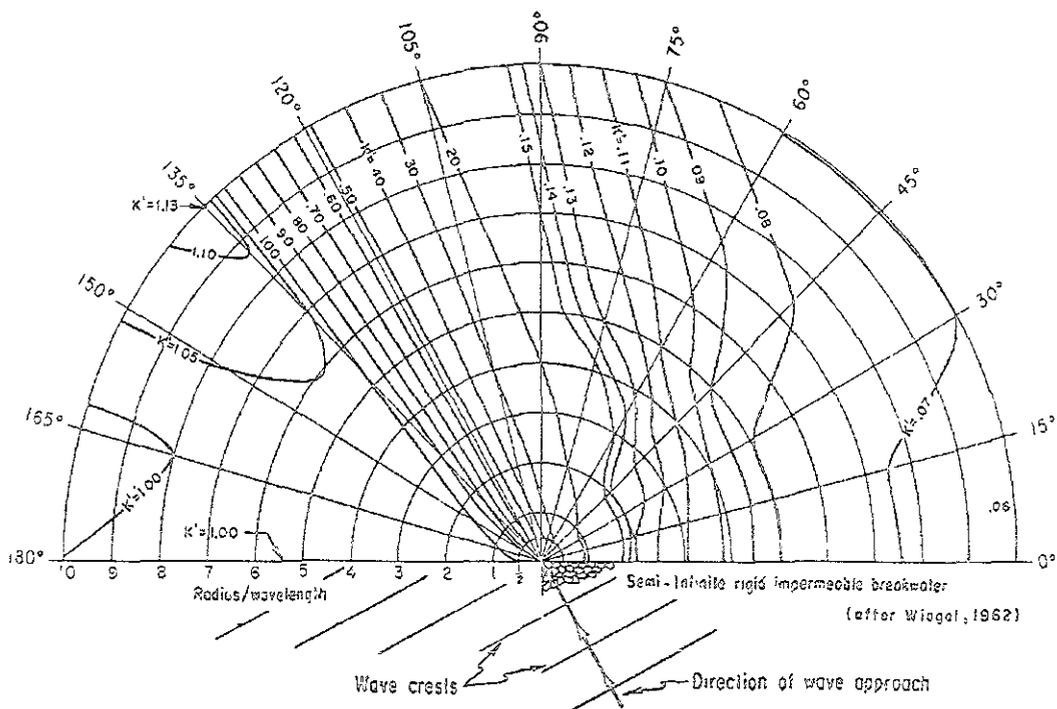


Figura A.8. Diagrama de difracción, 120° de ángulo incidente. SPM, 1984.

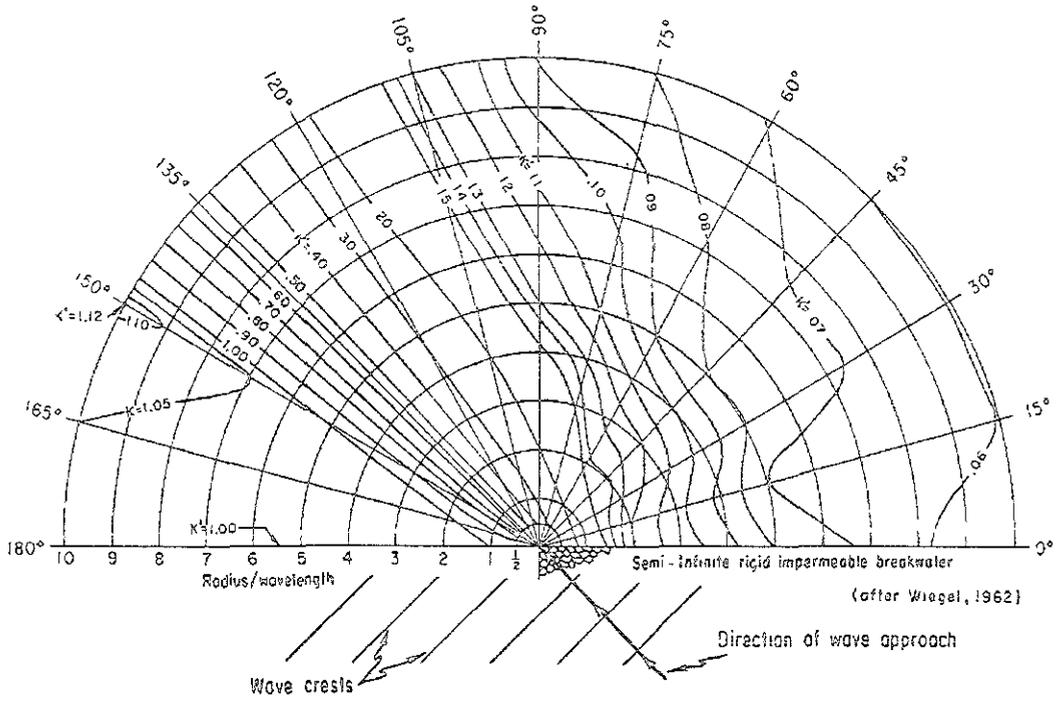


Figura A.9. Diagrama de difracción, 135° de ángulo incidente. SPM, 1984.

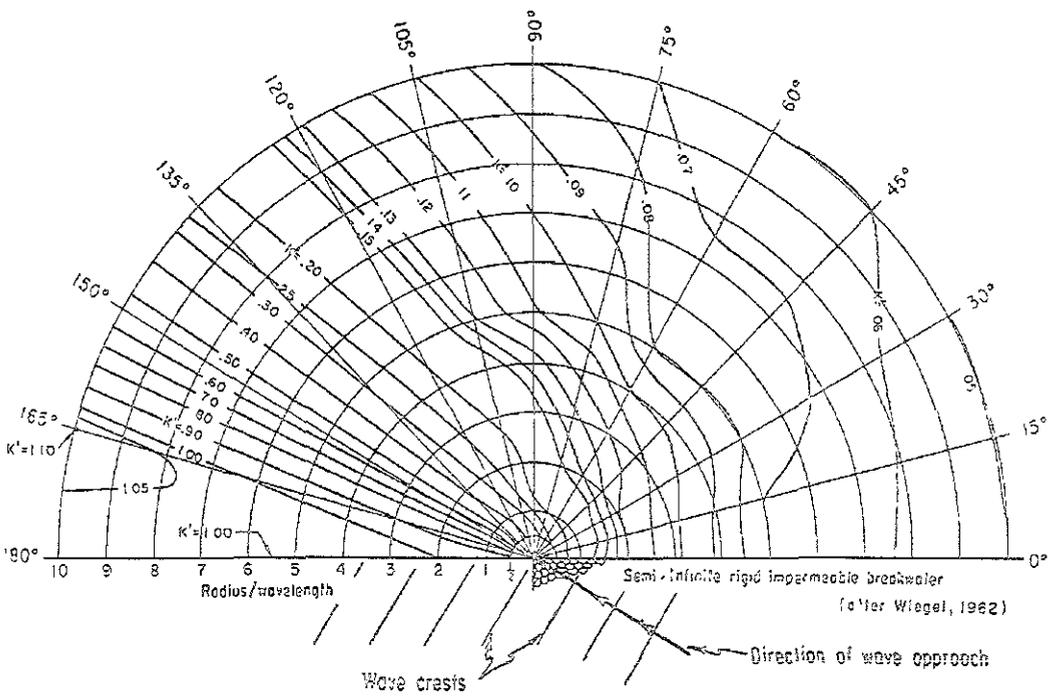


Figura A.10. Diagrama de difracción, 150° de ángulo incidente. SPM, 1984.

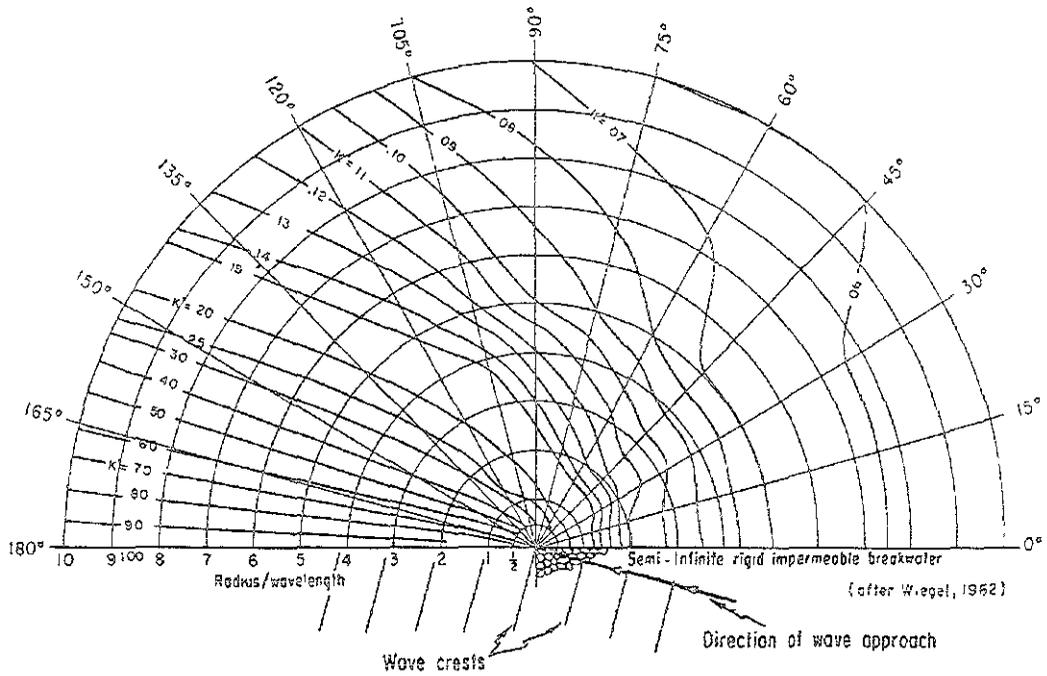


Figura A.11. Diagrama de difracción, 165° de ángulo incidente. SPM, 1984.

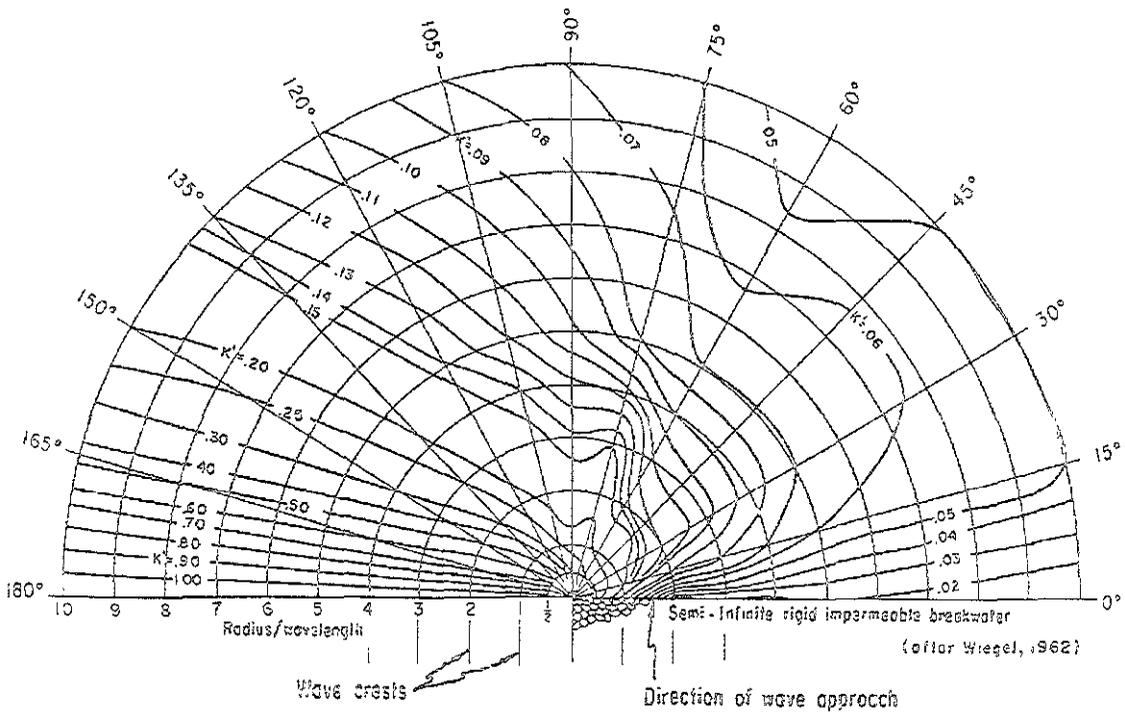


Figura A.12. Diagrama de difracción. 180° de ángulo incidente. SPM, 1984.

ANEXO B

TERMINOLOGÍA

A continuación se definen cada uno de los términos que definen a la zona costera.

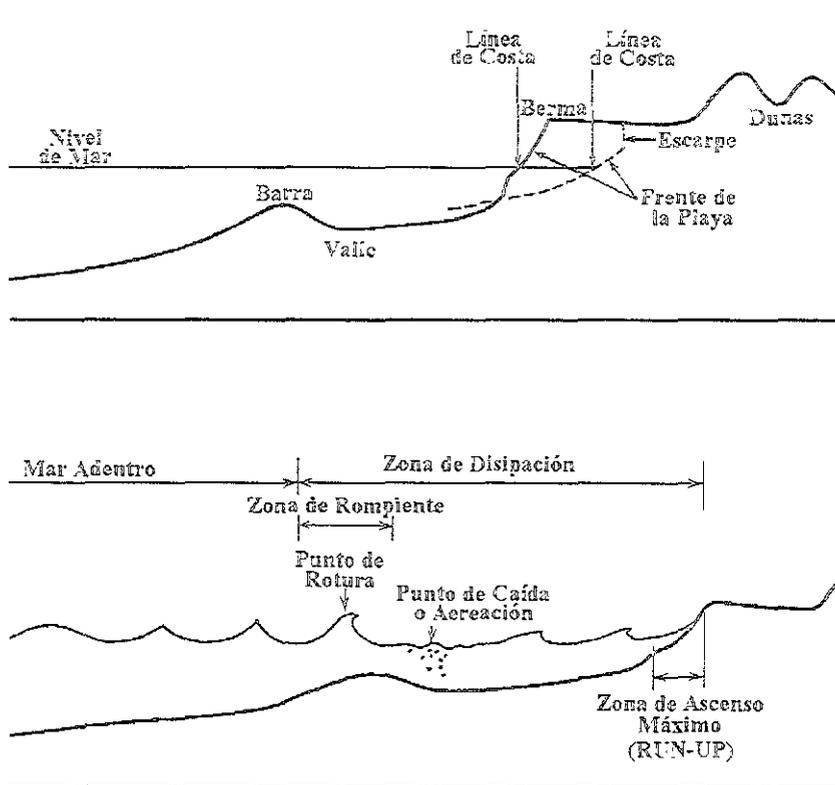


Figura B.1. Esquema de las principales partes de la zona costera.

Línea de costa: Es la línea que forma la intersección entre tierra, mar y aire.

Berma: Es una parte semi-horizontal de la playa (playa posterior) formada por material depositado por la acción del oleaje. Algunas playas pueden no tener bermas y otras pueden tener una o varias.

Escarpe: Es una línea más o menos continua de acantilados o de pendientes abruptas, éstas se originan por la erosión o por alguna falla en la zona.

Barra: Terraplén sumergido o no, constituido de material no consolidado, forma parte del fondo marino y se encuentra en aguas someras.

Valle: Es la depresión localizada inmediatamente después de la barra, entre ésta y la línea de costa.

Dunas: Crestas o montes de material suelto, formada por la arena que es transportada por el viento.

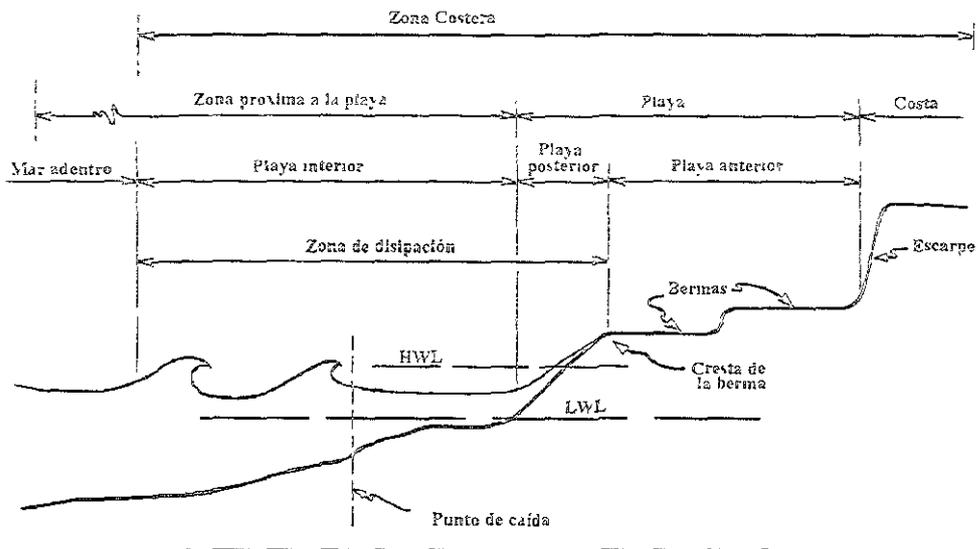


Figura B.2. Esquema de las principales partes de la zona costera.

Frente de Costa: Es la sección de la playa normalmente expuesta al acción del ascenso máximo de la ola.

Zona de Rompiente: Es la zona donde las olas irregulares sufren el colapso y liberan toda su energía.

Punto de Rotura: Es el punto donde la ola inicia su proceso de colapso, es decir, donde las olas alcanzan su máxima altura.

Mar Adentro: Es la zona que se extiende a partir de la zona de rompiente hacia el mar hasta una distancia indefinida.

Zona de Disipación: Es el área comprendida entre el límite más alejado de la zona de rotura y el límite máximo a que asciende la ola.

Punto de caída o aireación: Es el punto donde las olas se desintegran completamente, donde la cresta se introduce en el agua.

Zona de ascenso máximo (RUN-UP): Es una porción de la playa donde la ola inicia su ascenso máximo sobre el frente de la costa y finaliza, donde la ola alcanza su máxima altura sobre el frente de la playa.

Costa: Es una franja de tierra de ancho indefinido (en algunos casos de kilómetros) que se extiende desde la línea de costa hasta el primer cambio importante en las características de la superficie.

Playa: Es la zona de material no consolidado que se extiende tierra adentro desde el nivel mínimo del agua hasta el lugar donde se marca un cambio en el material o hasta la línea de vegetación permanente.

Zona próxima a la playa: Se define como la zona que se extiende mar adentro desde la línea de costa hasta más allá de la zona de rompientes.

Playa interior: Es la zona de anchura variable que se extiende desde la línea que marca el nivel mínimo del agua y que abarca toda la zona de rompientes.

Playa posterior: Es la parte de la playa, localizada entre la cresta de la berma y la marca del nivel bajo; ésta es normalmente la zona desde el ascenso máximo hasta el descenso mínimo de la marea.

Playa anterior: Es la zona de la playa situada entre el límite de la playa posterior y la playa que comprende una o varias bermas y en donde las olas tiene una gran influencia sólo y durante severas tormentas

Cresta de la berma: Es el límite superior de la berma, también llamado borde de la berma.

HWL: Pleamar máxima (High Water Level)

LWL: Bajamar máxima (Low Water Level)

ANEXO C

PERFILES DE LA ZONA DE TUXPAN VERACRUZ

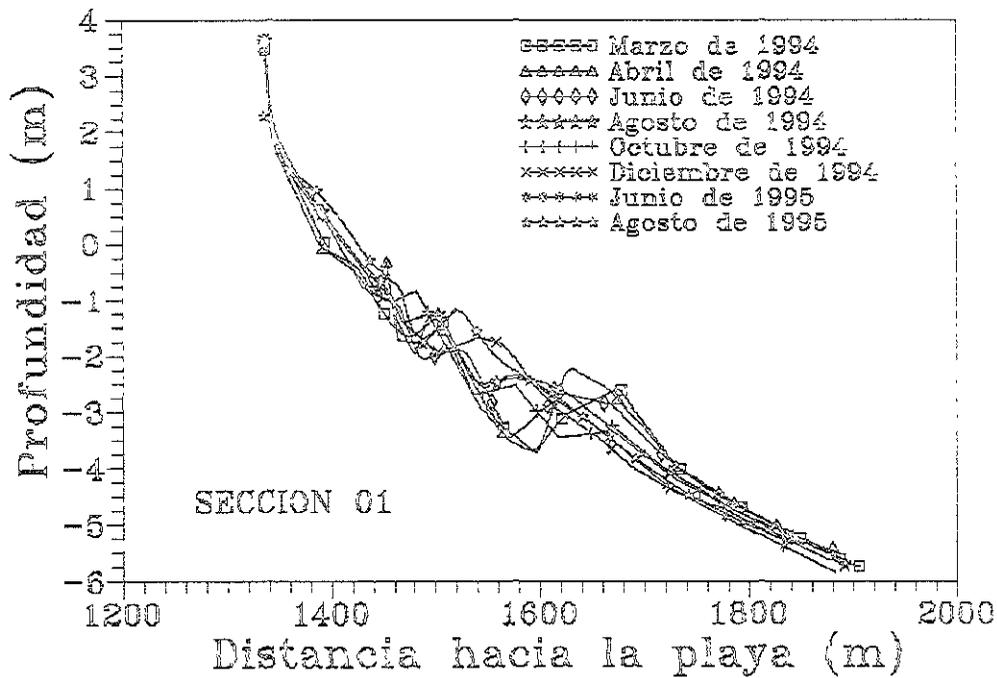


Figura C.1. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 1.
Silva et al., 1996.

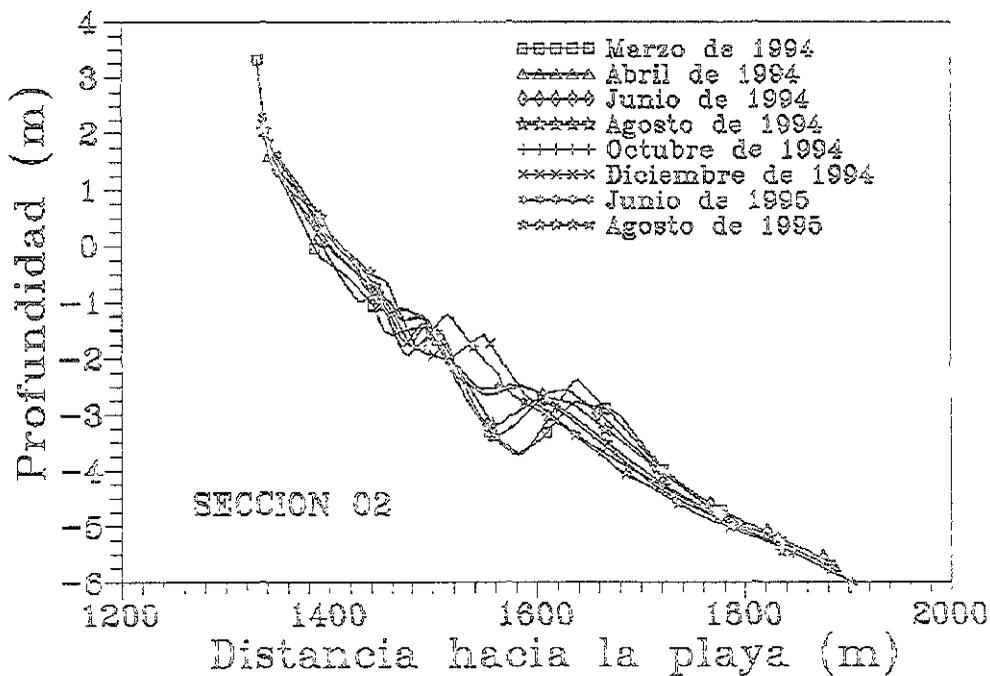


Figura C.2. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 2.
Silva et al., 1996.

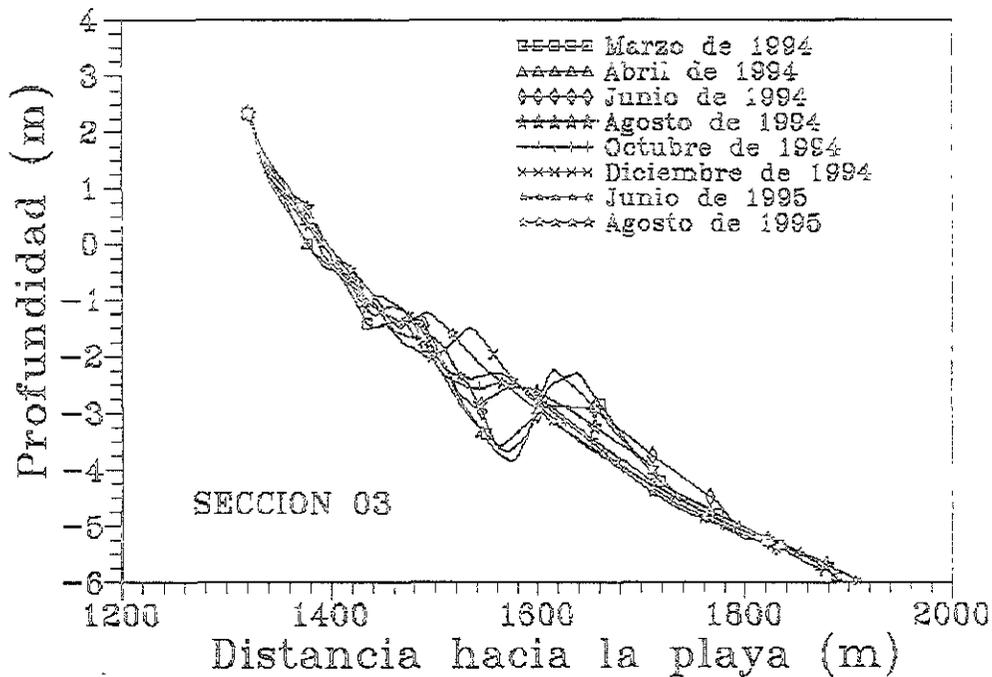


Figura C.3. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 3.
Silva et al., 1996.

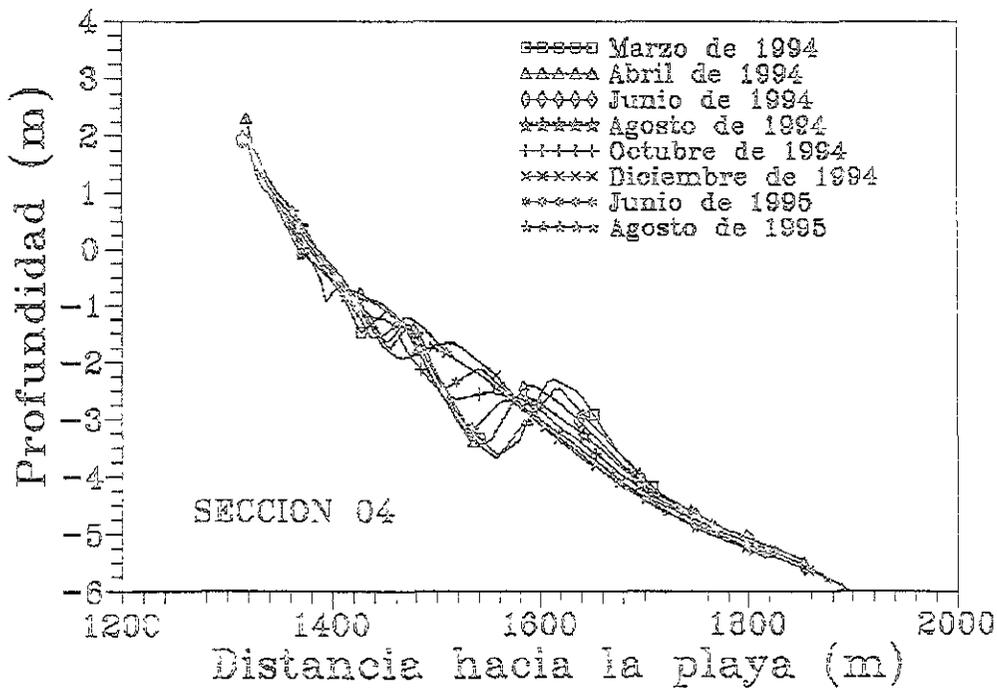


Figura C.4. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 4.
Silva et al., 1996.

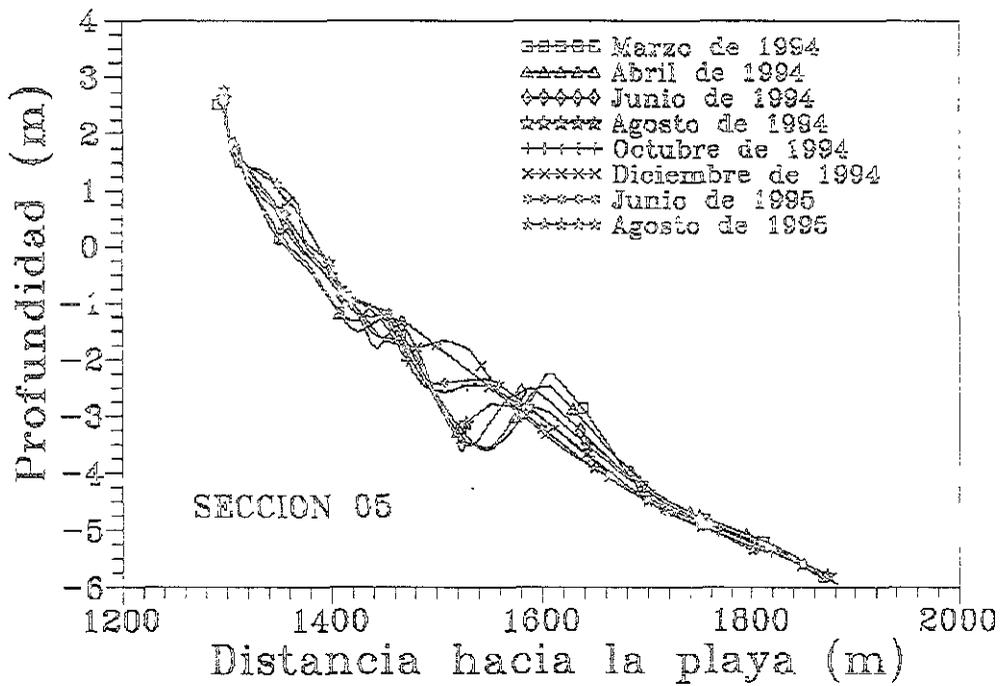


Figura C.5. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 5.
Silva et al., 1996.

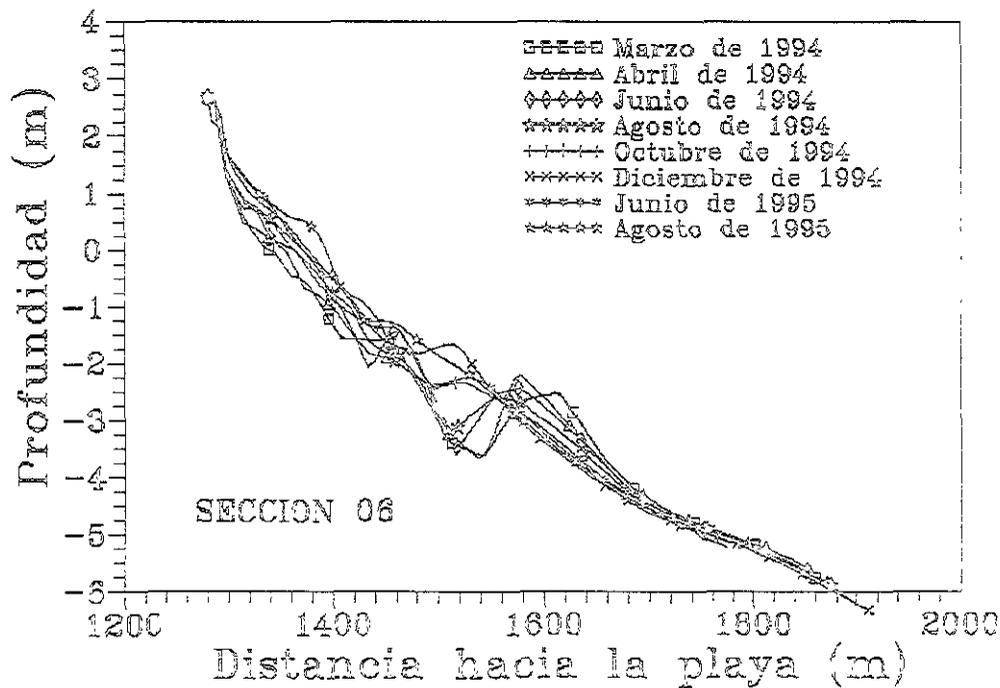


Figura C.6. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 6.
Silva et al., 1996.

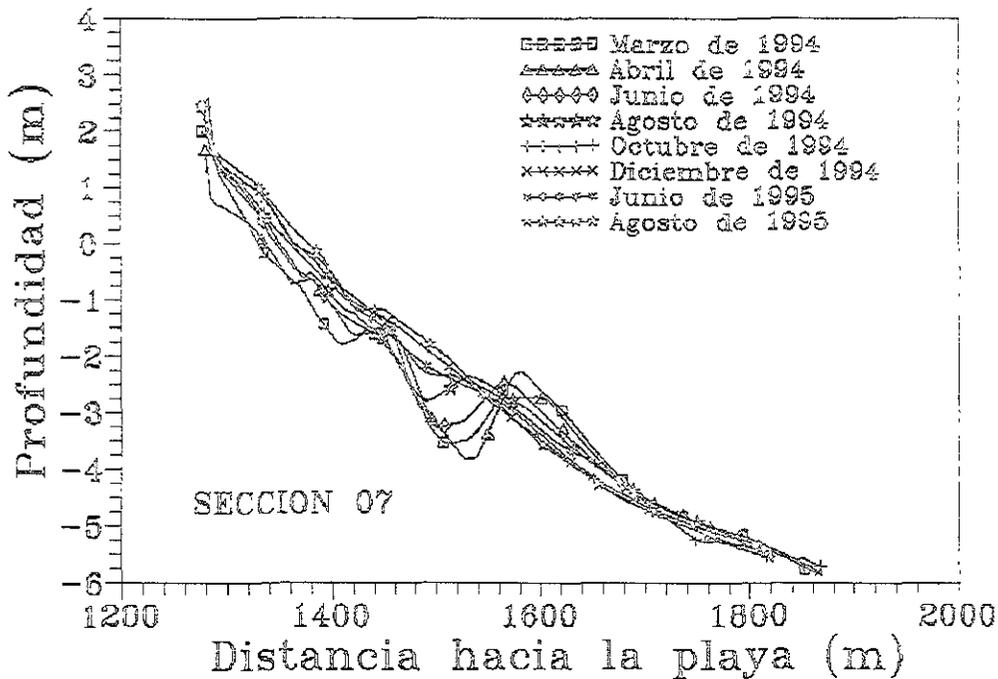


Figura C.7. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 7.
Silva et al., 1996.

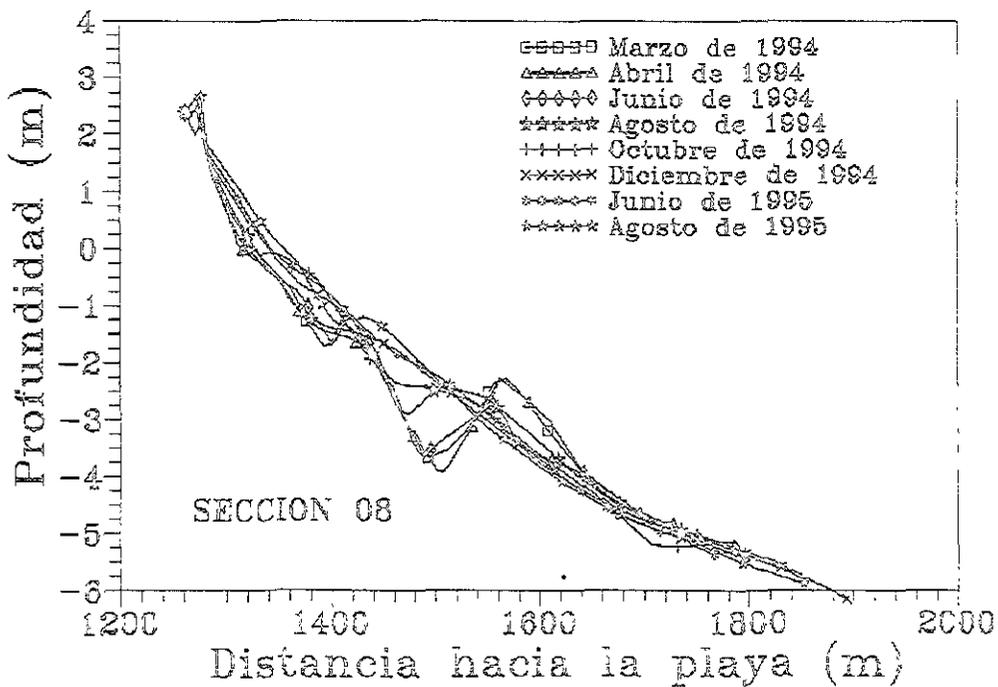


Figura C.8. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 8.
Silva et al., 1996.



Figura C.9. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 9. Silva et al., 1996.

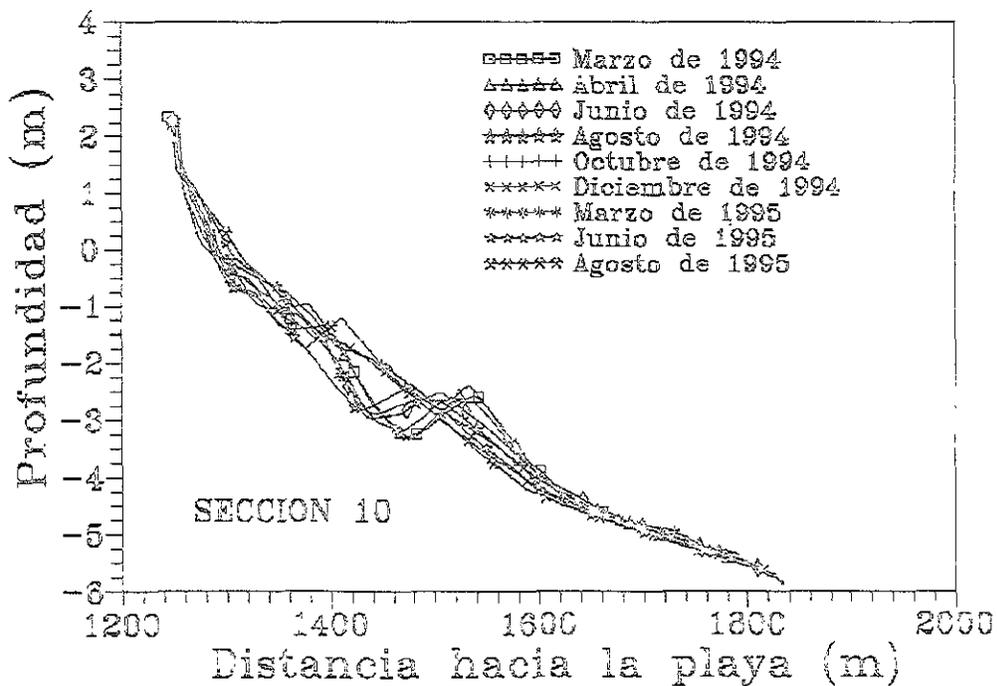


Figura C.10. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 10. Silva et al., 1996.

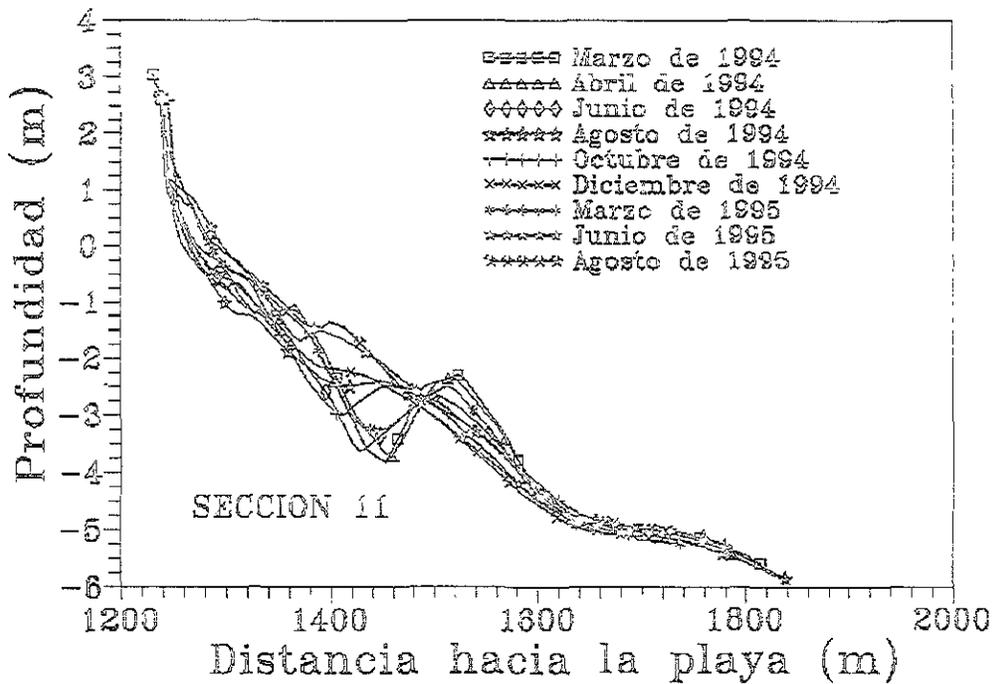


Figura C.11. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 11. Silva et al., 1996.

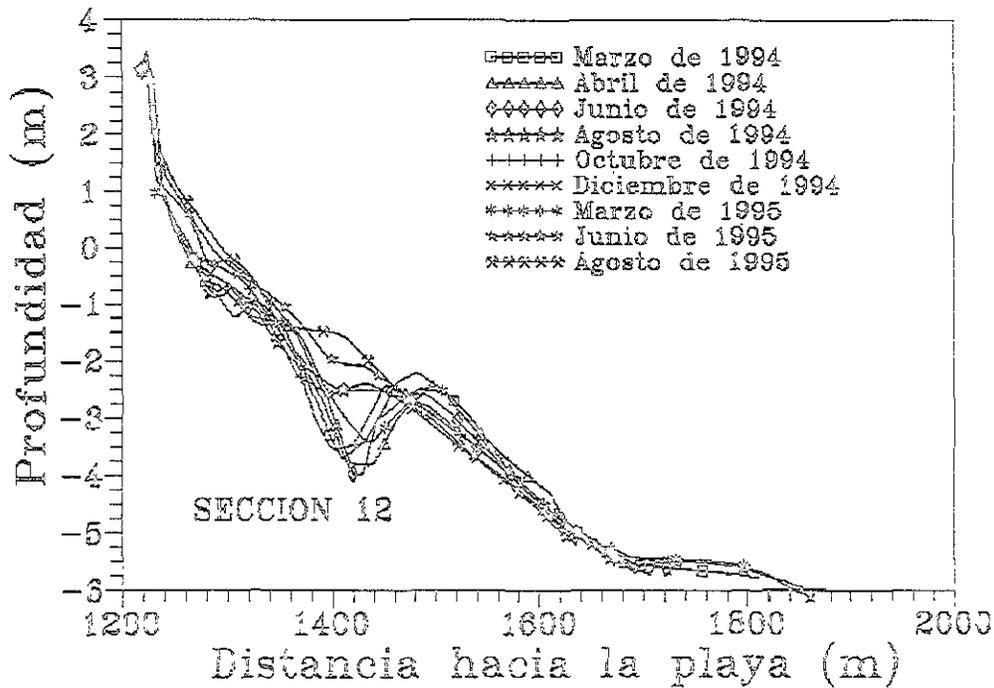


Figura C.12. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 12. Silva et al., 1996.

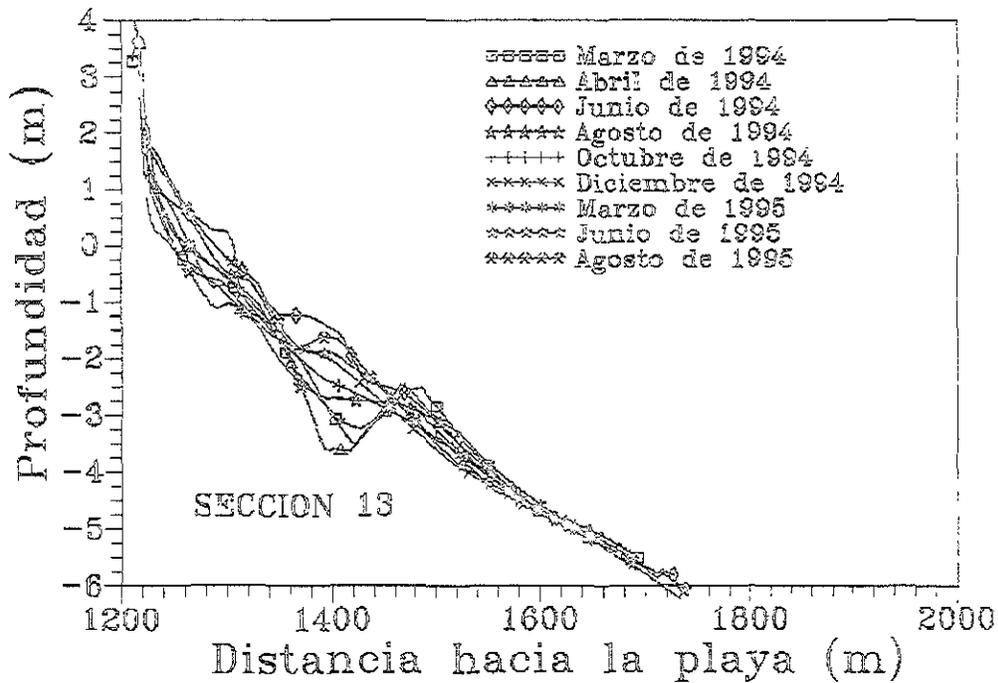


Figura C.13. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 13. Silva et al., 1996.

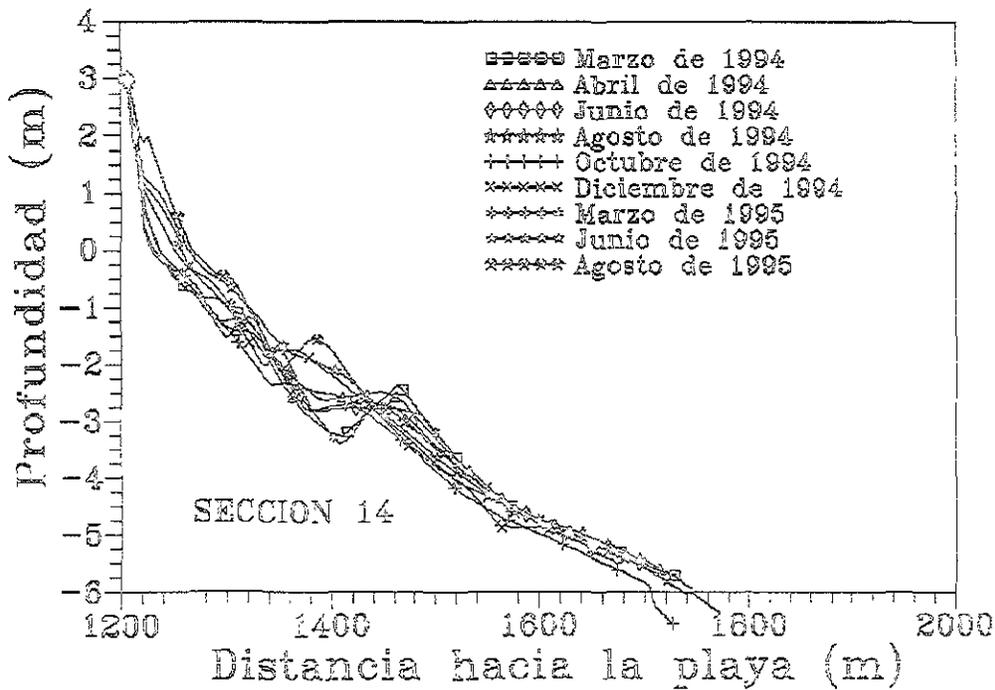


Figura C.14. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 14. Silva et al., 1996.

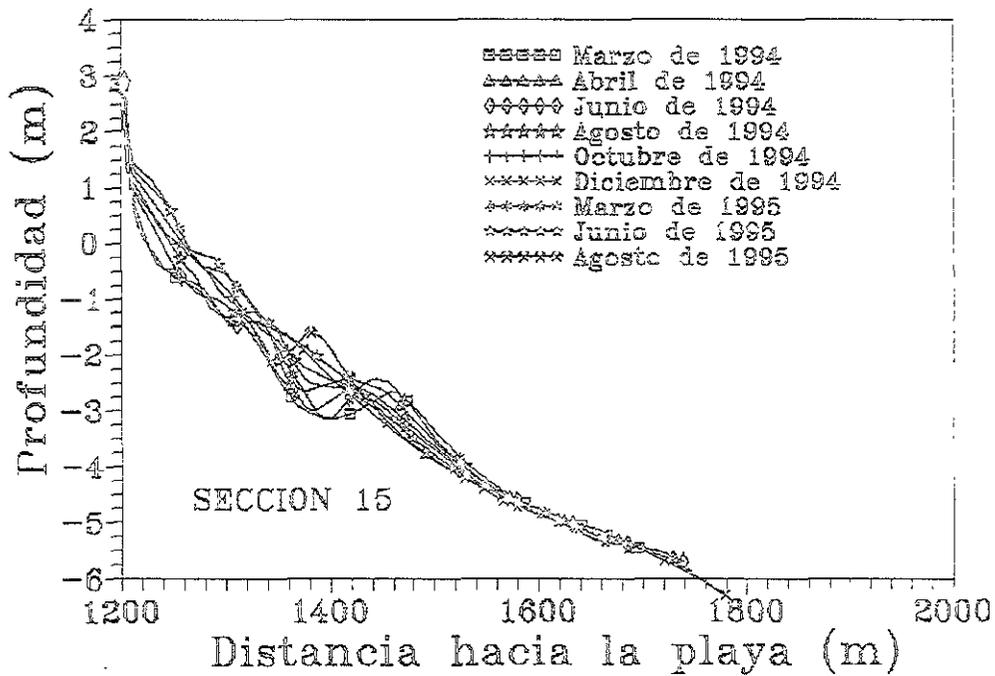


Figura C.15. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 15. Silva et al., 1996.

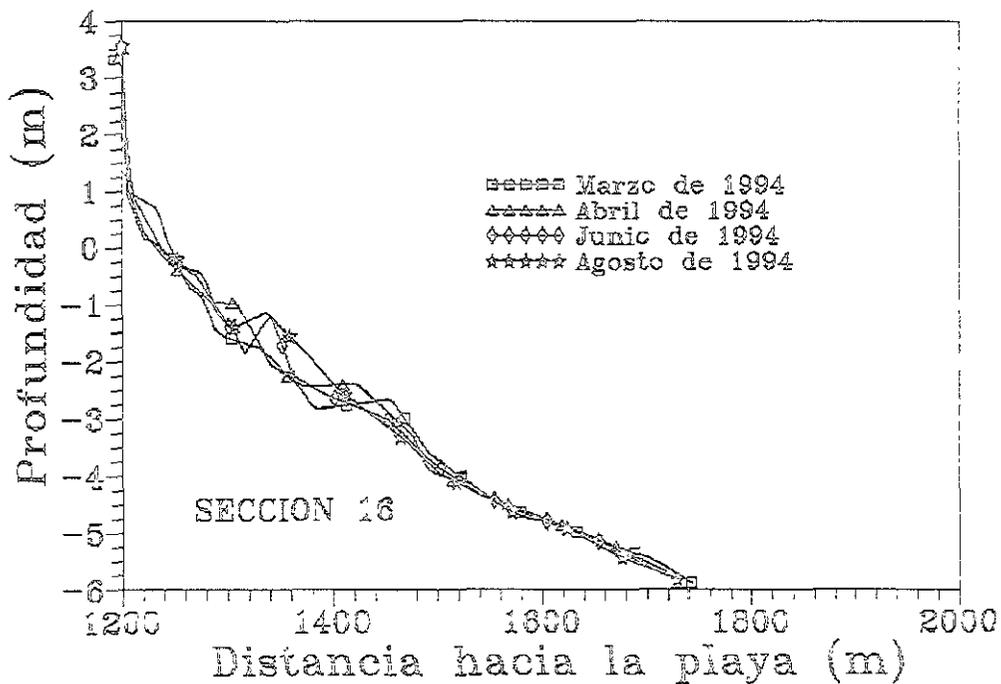


Figura C.16. Perfil longitudinal de la playa de Tuxpan, variación temporal en la sección 16. Silva et al., 1996.

DATOS DE OLEAJE

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
RESIDENCIA ZONA GOLFO

TABLA DE REFERENCIAS CRUZADAS ABSOLUTAS Y RELATIVAS
DIRECCION VS PERIODO
TUXPAN, VERACRUZ

REGISTROS 1 AL 30, DEL 19-JUL-1994 AL 17-DIC-1997

Período	<	5s	6s	7s	8s	9s	10s	11s	12s	TOTAL	TOTAL	
Dirección	5s	6s	7s	8s	9s	10s	11s	12s	>		ACUM	
NORTE	6,456 0.92%	9,026 1.29%	8,591 1.23%	6,028 0.86%	3,540 0.51%	1,841 0.26%	774 0.11%	315 0.04%	220 0.03%	36,760	36,790	
N-NE	15,754 2.25%	22,423 3.20%	19,800 2.83%	13,295 1.90%	7,816 1.12%	4,027 0.57%	1,871 0.27%	760 0.11%	537 0.08%	86,334	123,124	
NORESTE	28,860 4.09%	40,479 5.78%	38,356 5.48%	26,718 3.81%	16,004 2.29%	8,575 1.22%	3,943 0.56%	1,826 0.26%	1,426 0.20%	155,987	289,111	
E-NE	41,149 5.88%	59,081 8.44%	48,728 6.96%	27,551 3.93%	13,375 1.91%	5,689 0.81%	2,391 0.34%	1,006 0.14%	674 0.12%	199,844	488,955	
ESTE	26,020 3.72%	32,548 4.65%	21,655 3.09%	9,938 1.42%	3,993 0.57%	1,434 0.20%	554 0.08%	208 0.03%	230 0.03%	96,580	585,535	
E-SE	7,459 1.06%	7,462 1.07%	4,782 0.68%	2,213 0.32%	862 0.12%	329 0.05%	126 0.02%	61 0.01%	44 0.01%	23,338	608,873	
SURESTE	1,451 0.21%	1,367 0.20%	928 0.13%	487 0.07%	211 0.03%	95 0.01%	45 0.01%	14 0.00%	15 0.00%	4,613	613,486	
S-SE	347 0.05%	345 0.05%	300 0.04%	239 0.03%	142 0.02%	79 0.01%	36 0.01%	11 0.00%	10 0.00%	1,509	614,995	
SUR	254 0.04%	316 0.05%	376 0.05%	342 0.05%	194 0.03%	104 0.01%	56 0.01%	25 0.00%	19 0.00%	1,688	616,681	
S-SO	363 0.05%	712 0.10%	562 0.08%	335 0.05%	149 0.02%	60 0.01%	45 0.01%	11 0.00%	53 0.01%	2,290	618,971	
SUROESTE	323 0.05%	692 0.10%	470 0.07%	187 0.03%	63 0.01%	23 0.00%	14 0.00%	8 0.00%	37 0.01%	1,817	620,788	
O-SO	69 0.01%	137 0.02%	94 0.01%	26 0.00%	12 0.00%	6 0.00%	3 0.00%	3 0.00%	3 0.00%	350	621,138	
OESTE	21 0.00%	33 0.00%	14 0.00%	8 0.00%	7 0.00%	3 0.00%	2 0.00%	2 0.00%	1 0.00%	91	621,229	
O-NO	62 0.01%	74 0.01%	77 0.01%	47 0.01%	29 0.00%	13 0.00%	6 0.00%	7 0.00%	1 0.00%	321	621,550	
NOROESTE	379 0.05%	426 0.06%	417 0.06%	254 0.04%	151 0.02%	61 0.01%	34 0.00%	14 0.00%	7 0.00%	1,743	623,293	
N-NO	1,857 0.27%	2,298 0.33%	2,312 0.33%	1,632 0.23%	941 0.13%	467 0.07%	224 0.03%	87 0.01%	60 0.01%	9,876	633,169	
TOTAL	130,623 18.65%	177,417 25.33%	147,462 21.05%	89,301 12.75%	47,489 6.78%	22,811 3.26%	10,124 1.45%	4,355 0.62%	3,587 0.51%			
TOTAL ACUM	130,623 18.65%	303,040 43.92%	455,502 65.04%	544,803 77.79%	592,292 84.57%	615,103 87.82%	625,227 89.27%	629,582 89.89%	633,169 90.40%			
										N° de eventos	Porcentaje	
										CALMA	87,216	9.60%
										> 10 cm	633,169	90.40%
										TOTAL	700,385	100.00%

Tabla C.1. Datos de dirección del oleaje incidente vs. periodo de ola. Cortesía de CFE.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA
RESIDENCIA ZONA GOLFO

TABLA DE REFERENCIAS CRUZADAS ABSOLUTAS Y RELATIVAS
DIRECCION VS. ALTURA DE OLA
TUXPAN, VERACRUZ

REGISTROS DE PRIMAVERA ABRIL, MAYO Y JUNIO 1995-1997

Altura	0.1m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	TOTAL	TOTAL
Dirección	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	>		ACUM.
NORTE	8,075 5.53%	3,039 2.08%	318 0.22%	29 0.02%	6 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	11,467 7.85%	11,467 7.85%
N-NE	11,187 7.66%	4,223 2.89%	517 0.35%	54 0.04%	5 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	15,986 10.94%	27,453 18.79%
NORESTE	20,475 14.01%	6,541 4.48%	737 0.50%	78 0.05%	11 0.01%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	27,842 19.06%	55,295 37.85%
E-NE	35,844 24.53%	12,492 8.55%	1,130 0.77%	79 0.05%	4 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	49,549 33.91%	104,844 71.76%
ESTE	15,959 10.92%	5,170 3.54%	425 0.29%	32 0.02%	4 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	21,590 14.78%	126,434 86.54%
E-SE	3,709 2.54%	1,180 0.81%	97 0.07%	5 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	4,991 3.42%	131,425 89.95%
SURFSTE	700 0.48%	239 0.16%	20 0.01%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	959 0.66%	132,384 90.61%
S-SE	103 0.07%	53 0.04%	3 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	162 0.11%	132,546 90.72%
SUR	87 0.06%	36 0.02%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	125 0.09%	132,671 90.81%
S-SO	44 0.03%	16 0.01%	5 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	67 0.05%	132,738 90.85%
SUROESIE	20 0.01%	11 0.01%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	33 0.02%	132,771 90.87%
O-SO	2 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	3 0.00%	132,774 90.88%						
OESTE	11 0.01%	7 0.00%	0 0.00%	18 0.01%	132,792 90.89%						
O-NO	61 0.04%	53 0.04%	8 0.01%	4 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	126 0.09%	132,918 90.97%
NOROESTE	409 0.28%	200 0.14%	15 0.01%	2 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	628 0.43%	133,546 91.40%
N-NO	2,194 1.50%	865 0.59%	94 0.06%	17 0.01%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	3,171 2.17%	136,717 93.58%
TOTAL	98,880 67.68%	34,126 23.36%	3,373 2.31%	304 0.21%	33 0.02%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%		
TOTAL ACUM.	98,880 67.68%	133,006 91.04%	136,379 93.34%	136,683 93.55%	136,716 93.57%	136,717 93.58%	136,717 93.58%	136,717 93.58%	136,717 93.58%		
										Nº de eventos	Porcentaje
										CALMA	9,387 6.42%
										>10 cm	136,717 93.58%
										TOTAL	146,104 100.00%

Tabla C.2. Dirección del oleaje incidente vs. Altura de ola, PRIMAVERA. Cortesía de CFE.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA
RESIDENCIA ZONA GOLFO

TABLA DE REFERENCIAS CRUZADAS ABSOLUTAS Y RELATIVAS
DIRECCION VS. ALTURA DE OLA
TUXPAN, VERACRUZ

REGISTROS DE VERANO JULIO, AGOSTO Y SEPTIEMBRE 1995-1997

Altura	0.1m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	TOTAL	TOTAL								
Dirección	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	>		ACUM								
NORTE	9,743 4.13%	1,396 0.59%	156 0.07%	23 0.01%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	11,318 4.80%	11,318 4.80%								
N-NE	23,737 10.06%	4,175 1.77%	441 0.19%	30 0.01%	0 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	28,385 12.03%	39,703 16.83%								
NORESTE	36,560 15.49%	5,452 2.31%	469 0.20%	43 0.02%	2 0.00%	2 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	42,530 18.02%	82,233 34.85%								
E-NE	52,390 22.20%	9,539 4.04%	792 0.34%	95 0.04%	12 0.01%	2 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	2 0.00%	62,834 26.63%	145,067 61.48%								
ESTE	32,831 13.91%	5,993 2.54%	463 0.20%	49 0.02%	12 0.01%	2 0.00%	0 0.00%	1 0.00%	2 0.00%	39,353 16.68%	184,420 78.15%								
E-SE	7,559 3.20%	1,380 0.58%	87 0.04%	13 0.01%	0 0.00%	0 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	9,040 3.83%	193,460 81.98%								
SURESTE	1,208 0.51%	255 0.11%	24 0.01%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	1,488 0.63%	194,948 82.62%								
S-SE	179 0.08%	63 0.03%	7 0.00%	1 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	251 0.11%	195,199 82.72%								
SUR	136 0.06%	37 0.02%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	176 0.07%	195,375 82.80%								
S-SO	98 0.04%	10 0.00%	4 0.00%	0 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	113 0.05%	195,488 82.84%								
SUROESTE	41 0.02%	4 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	47 0.02%	195,535 82.86%								
O-SO	4 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	5 0.00%	195,540 82.87%														
O-ESTE	4 0.00%	3 0.00%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	10 0.00%	195,550 82.87%								
O-NO	57 0.02%	8 0.00%	8 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	73 0.03%	195,623 82.90%								
NOROESTE	395 0.17%	55 0.02%	18 0.01%	10 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	478 0.20%	196,101 83.10%								
N-NO	2,622 1.11%	347 0.15%	92 0.04%	8 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	3,069 1.30%	199,170 84.40%								
TOTAL	167,564 71.01%	28,718 12.17%	2,569 1.09%	273 0.12%	28 0.01%	8 0.00%	5 0.00%	1 0.00%	4 0.00%	<table border="1"> <tr> <td>Nº de eventos</td> <td>Porcentaje</td> </tr> <tr> <td>CALMA</td> <td>36,801 15.60%</td> </tr> <tr> <td>>10 cm</td> <td>199,170 84.40%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>235,971 100.00%</td> </tr> </table>		Nº de eventos	Porcentaje	CALMA	36,801 15.60%	>10 cm	199,170 84.40%	TOTAL	235,971 100.00%
Nº de eventos	Porcentaje																		
CALMA	36,801 15.60%																		
>10 cm	199,170 84.40%																		
TOTAL	235,971 100.00%																		
TOTAL ACUM	167,564 71.01%	196,282 83.18%	198,851 84.27%	199,124 84.38%	199,152 84.40%	199,160 84.40%	199,165 84.40%	199,166 84.40%	199,170 84.40%										

Tabla C.3. Dirección del oleaje incidente vs. Altura de ola, VERANO. Cortesía de CFE.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA
RESIDENCIA ZONA GOLFO

TABLA DE REFERENCIAS CRUZADAS ABSOLUTAS Y RELATIVAS
DIRECCION VS. ALTURA DE OLA
TUXPAN, VERACRUZ

REGISTROS DE OTOÑO OCTUBRE, NOVIEMBRE Y DICIEMBRE 1994-1997

Altura	0 1m	0 5m	1.0m	1 5m	2 0m	2.5m	3.0m	3 5m	4 0m	TOTAL	TOTAL
Dirección	0 5m	1.0m	1 5m	2 0m	2.5m	3.0m	3 5m	4 0m	>		ACUM.
NORIE	4,951 2 52%	2,535 1 29%	568 0 29%	118 0 06%	20 0 01%	1 0 00%	1 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	8,194 4 17%	8,194 4 17%
N-NE	17,969 9 14%	7,610 3 87%	1,590 0 81%	311 0 16%	58 0 03%	9 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	27,547 14 02%	35,741 18 19%
NORESTE	41,669 21 20%	17,851 9 08%	3,335 1 70%	673 0 34%	134 0 07%	15 0 01%	2 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	63,679 32 40%	99,420 50 59%
E-NE	34,860 17 74%	13,424 6 83%	2,061 1 05%	334 0 17%	59 0 03%	16 0 01%	2 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	50,756 25 83%	150,176 76 41%
E-STE	13,171 6 70%	4,907 2 50%	621 0 32%	68 0 03%	15 0 01%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	18,782 9 56%	168,958 85 97%
E-SE	3,314 1 69%	1,354 0 69%	203 0 10%	18 0 01%	3 0 00%	1 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	4,893 2 49%	173,851 88 46%
SURESTE	800 0 41%	410 0 21%	70 0 04%	10 0 01%	2 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	1,292 0 66%	175,143 89 11%
S-SE	535 0 27%	278 0 14%	44 0 02%	6 0 00%	1 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	864 0 44%	176,007 89 55%
SUR	854 0 43%	302 0 15%	53 0 03%	8 0 00%	2 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	1 0 00%	0 0 00%	1,220 0 62%	177,227 90 18%
S-SO	1,795 0 91%	183 0 09%	26 0 01%	12 0 01%	0 0 00%	1 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	2,017 1 03%	179,244 91 20%
SUROESTE	1,544 0 79%	121 0 06%	11 0 01%	3 0 00%	1 0 00%	1 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	1,681 0 86%	180,925 92 06%
O-SO	304 0 15%	30 0 02%	2 0 00%	0 0 00%	336 0 17%	181,261 92 23%					
OESTE	39 0 02%	9 0 00%	1 0 00%	3 0 00%	0 0 00%	52 0 03%	181,313 92 25%				
O-NO	21 0 01%	17 0 01%	15 0 01%	0 0 00%	53 0 03%	181,366 92 28%					
NOROESTE	164 0 08%	90 0 05%	24 0 01%	6 0 00%	2 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	286 0 15%	181,652 92 43%
N-NO	985 0 50%	605 0 31%	182 0 09%	40 0 02%	8 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	0 0 00%	1,820 0 93%	183,472 93 35%
TOTAL	122,975 62 57%	49,726 25 30%	8,806 4 48%	1,610 0 82%	305 0 16%	44 0 02%	5 0 00%	1 0 00%	0 0 00%	Nº de eventos Porcentaje CAL MA 13,064 6 65% >10 cm 183,472 93 35% TOTAL 196,536 100 00%	
TOTAL ACUM.	122,975 62 57%	172,701 87 87%	181,507 92 35%	183,117 93 17%	183,422 93 33%	183,466 93 35%	183,471 93 35%	183,472 93 35%	183,472 93 35%		

Tabla C.4. Dirección del oleaje incidente vs. Altura de ola, OTOÑO. Cortesía de CFE.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA
RESIDENCIA ZONA GOLFO

TABLA DE REFERENCIAS CRUZADAS ABSOLUTAS Y RELATIVAS
DIRECCION VS. ALTURA DE OLA
TUXPAN, VERACRUZ

REGISTROS DE INVIERNO, ENERO, FEBRERO Y MARZO 1995-1997

Altura	0.1m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	TOTAL	TOTAL								
Dirección	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	>		ACUM								
NORTE	4,137 3.40%	1,455 1.19%	192 0.16%	19 0.02%	7 0.01%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	5,811 4.77%	5,811 4.77%								
N-NE	8,942 7.34%	4,545 3.73%	789 0.65%	122 0.10%	15 0.01%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	14,416 11.84%	20,227 16.61%								
NORESTE	20,332 16.70%	9,498 7.80%	1,775 1.46%	286 0.23%	37 0.03%	5 0.00%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	31,936 26.23%	52,163 42.84%								
E-NE	26,587 21.83%	8,916 7.32%	1,050 0.86%	128 0.11%	20 0.02%	4 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	36,705 30.14%	88,868 72.98%								
ESTE	12,638 10.38%	3,838 3.15%	341 0.28%	33 0.03%	5 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	16,855 13.84%	105,723 86.82%								
E-SE	3,280 2.69%	1,012 0.83%	115 0.09%	5 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	4,414 3.62%	110,137 90.44%								
SURESTE	601 0.49%	240 0.20%	30 0.02%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	874 0.72%	111,011 91.16%								
S-SE	148 0.12%	70 0.06%	12 0.01%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	232 0.19%	111,243 91.35%								
SUR	85 0.07%	58 0.05%	17 0.01%	2 0.00%	1 0.00%	2 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	165 0.14%	111,408 91.49%								
S-SO	39 0.03%	44 0.04%	10 0.01%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	93 0.08%	111,501 91.56%								
SUROESTE	20 0.02%	29 0.02%	5 0.00%	1 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	56 0.05%	111,557 91.61%								
O-SO	2 0.00%	3 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	6 0.00%	111,563 91.61%								
OESTE	4 0.00%	7 0.01%	0 0.00%	11 0.01%	111,574 91.62%														
O-NO	42 0.03%	24 0.02%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	69 0.06%	111,643 91.68%								
NOROESTE	220 0.18%	116 0.10%	14 0.01%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	351 0.29%	111,994 91.97%								
N-NO	1,234 1.01%	516 0.42%	53 0.04%	12 0.01%	0 0.00%	1 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	1,816 1.49%	113,810 93.46%								
TOTAL	78,311 64.31%	30,371 24.94%	4,407 3.62%	614 0.50%	88 0.07%	16 0.01%	3 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	<table border="1"> <tr> <td>Nº de eventos</td> <td>Porcentaje</td> </tr> <tr> <td>CALMA</td> <td>7,964 6.54%</td> </tr> <tr> <td>>10 cm</td> <td>113,810 93.46%</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>121,774 100.00%</td> </tr> </table>		Nº de eventos	Porcentaje	CALMA	7,964 6.54%	>10 cm	113,810 93.46%	TOTAL	121,774 100.00%
Nº de eventos	Porcentaje																		
CALMA	7,964 6.54%																		
>10 cm	113,810 93.46%																		
TOTAL	121,774 100.00%																		
TOTAL ACUM	78,311 64.31%	108,682 89.25%	113,089 92.87%	113,703 93.37%	113,791 93.44%	113,807 93.46%	113,810 93.46%	113,810 93.46%	113,810 93.46%										

Tabla C.5. Dirección del oleaje incidente vs. Altura de ola, INVIERNO. Cortesía de CFE.

LÍNEAS DE COSTA

Cota longitudinal a la línea de costa x (m)	Cota transversal a la línea de costa y (m)				
	Año 85	Año 88	Año 89	Año 90	Año 96
0	168.11	231.01	207.73	209.42	258.95
50	167.16	233.21	216.30	211.65	276.02
100	166.21	235.69	226.23	218.72	286.36
150	165.25	238.64	231.93	225.19	290.02
200	164.30	243.88	237.95	228.76	281.78
250	165.92	251.50	242.26	229.74	277.17
300	168.23	254.46	248.12	234.14	277.05
350	170.54	253.64	251.46	238.53	284.79
400	172.85	257.01	257.60	242.93	313.53
450	175.17	269.18	263.30	247.33	323.84
500	177.54	273.85	270.81	252.49	339.81
550	179.91	275.98	280.58	265.55	342.00
600	182.28	277.13	286.76	278.54	347.00
650	184.65	279.36	292.49	292.71	358.25
700	187.60	285.27	296.86	303.12	357.09
750	191.21	289.86	299.68	314.87	355.15
800	194.81	290.96	301.51	323.42	357.18
850	198.42	290.45	305.96	330.68	364.88
900	201.55	291.04	309.71	334.68	359.50
950	202.79	318.31	315.64	336.76	367.89
1000	204.03	330.74	323.30	337.49	383.75
1050	205.28	339.75	329.76	337.69	392.86
1100	206.52	346.72	337.86	337.06	407.00
1150	207.35	342.17	333.49	336.90	405.42
1200	207.91	336.69	329.13	336.73	390.63
1250	208.48	331.22	324.76	336.57	375.84
1300	209.05	325.74	320.40	336.41	361.05
1350	210.22	319.98	316.03	336.24	346.25
1400	213.74	308.86	309.10	327.32	326.75
1450	217.26	295.05	300.87	311.16	296.60
1500	220.79	281.68	283.81	291.89	325.00
1550	224.31	274.06	267.00	273.66	311.57
1600	224.74	267.37	257.64	263.32	297.57
1650	220.64	262.56	251.64	263.49	283.79
1700	216.55	255.90	247.89	262.39	273.60
1750	212.45	250.74	242.56	260.19	256.67
1800	208.77	249.94	240.23	260.89	242.70
1850	207.80	250.04	238.08	256.14	240.56
1900	206.82	249.39	237.09	247.36	241.11
1950	205.85	250.99	233.95	238.44	224.11
2000	204.87	250.57	227.71	233.56	219.04
2050	203.90	249.47	223.30	231.40	220.58
2100	203.92	247.50	221.51	231.08	220.12
2150	204.38	247.50	225.48	230.25	208.14
2200	204.84	247.74	224.59	227.50	204.44
2250	205.31	248.62	223.61	225.15	204.04
2300	206.45	248.21	225.55	223.01	214.82
2350	208.79	250.84	229.41	222.90	232.20
2400	211.12	257.08	232.11	226.49	238.52
2450	213.46	261.56	225.94	226.90	228.93
2500	215.79	265.80	226.53	226.07	238.88
2550	218.95	269.40	235.77	228.37	242.18
2600	224.31	271.70	240.74	231.05	237.95
2650	229.67	272.50	244.61	233.43	240.43
2700	235.03	275.09	250.16	238.27	246.95
2750	240.35	278.76	250.07	239.23	251.05
2800	245.65	282.38	253.20	240.92	248.97
2850	250.94	285.12	254.95	241.53	250.39
2900	256.24	287.08	257.54	242.88	257.99
2950	261.54	289.75	256.99	242.87	263.22
3000	265.16	291.32	260.21	242.42	260.33
3050	267.79	295.49	264.16	239.68	259.14
3100	270.42	297.60	266.54	242.85	257.71
3150	273.01	302.26	268.67	246.63	250.74
3200	275.18	311.74	273.45	251.30	242.49

3250	277 36	316 28	278 39	255.32	240 00
3300	279 54	321 52	285 69	256 29	255 57
3350	281.71	320 48	292 29	256 81	257 53
3400	283 89	323 64	302 00	261 52	253 70
3450	286 11	326 73	309.04	269 51	269 15
3500	288.42	333 23	316 29	275 31	268 44
3550	290 72	337 80	318 73	278 83	268 58
3600	293 03	341.44	322 04	283 89	280.91
3650	296 06	345 37	330 06	287.58	288 09
3700	299 29	348.52	336 87	296 92	290 36
3750	302 51	352 17	338 60	306 72	309.72
3800	305.73	354 50	342.43	314.70	319 81
3850	308 96	356.77	344 81	319.36	318 05
3900	312 18	360 68	349 51	324 30	339 43
3950	316 86	368 73	352.08	329 68	346 07
4000	321 69	374 10	355 17	333.72	340 03
4050	326 52	379 01	361 35	336 86	343 12
4100	331 34	384 57	366.65	340 43	380 20
4150	335 41	390 79	373 13	345.51	356 35
4200	339 47	394 46	378 38	352 24	352 75
4250	343 54	397 12	384 32	357 25	362 80
4300	347 60	397 53	388 23	363 69	364 76
4350	351 67	399 14	392 90	369 66	377 45
4400	355 73	402 13	400 32	375 10	377 71
4450	359 80	407 61	407 08	381 15	386 66
4500	363 86	414 27	411 94	386 35	385 86
4550	367 93	420 71	416 36	392 34	390 08
4600	371 99	426.13	421 48	397 49	389.86
4650	376 06	430 48	424 76	403.23	399 93
4700	380.13	435.30	425.35	407.67	410.00
4750	384 19	439 86	426.96	409.77	413 75
4800	388 26	443 42	430 62	409.33	417 50
4850	392 32	446.28	435 48	409 74	421 25
4900	396.39	451 27	442 85	411.57	425 00
4950	400 45	455 08	447 55	416 98	432 00
5000	404 52	461 49	452 36	425 01	439.00
5050	408 58	465 06	458 18	430.27	446 00
5100	412 65	469 85	463 81	433 22	453 00
5150	416 67	476.32	470.73	437 04	463 00
5200	426.90	482 76	476.65	442.34	473 00
5250	434 12	489 24	480 81	447 39	483 00
5300	441.34	495.62	485 36	456 47	493 00
5350	448.56	502 41	490 74	462.16	503 50
5400	455 78	509 56	497 87	466 20	514 00
5450	463 01	516 41	506.90	474 06	524 50
5500	470 23	522 64	514 10	481.27	535 00
5550	477 45	529 21	523 11	489 24	543 25
5600	484 67	535.36	532 86	499 89	551 50
5650	491 90	541 98	545 96	512.70	559 75
5700	499 12	548.77	555 32	524 28	566 00
5750	506.34	553 25	564 26	536.68	580 50
5800	513 56	563 90	574 13	546 30	593 00
5850	520 78	573 92	580.79	552 73	605.50
5900	528 01	584.24	584 00	563.41	618 00
5950	535 23	593.86	589 12	574 29	624 75
6000	542 45	605 41	595 53	584.15	631.50
6050	550 49	616.76	608 49	596 16	638.25
6100	559 92	622.86	623.75	606.86	645 00
6150	569 35	629 38	636 40	621 43	658.75
6200	578 78	638.09	647.30	635 80	672.50
6250	588 21	643 74	657 64	651.15	686 25
6300	597 64	652 71	666 45	665 05	700.00
6350	607 07	662 17	674.00	677 20	711 25
6400	616.50	671 82	681 13	688 08	722 50
6450	625 93	682 81	691 26	700 79	733 75
6500	635 36	689.95	704 94	710 98	745 00

Tabla C.6. Líneas de costa de la zona de Tuxpan, Veracruz. Cortesía de CFE