



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

ESTABILIZACIÓN DE PERFILES DE
PLAYA CON TAPETES DE GRAVA EN LA
ZONA DE ROMPIENTES

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

PRESENTA :

VICTOR GUSTAVO CERVANTES RICO



TUTOR :

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

MÉXICO D.F. ABRIL 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Carlos Escalante Sandoval

Secretario: Dr. Rodolfo Silva Casarín

Vocal: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

1er Suplente: Dr. Adrián Pedrozo Acuña

2do Suplente: M.I. Víctor Franco

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

A mis amorosos padres

A mis protectoras hermanas

A mi hermano ingeniero

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la educación que me ha brindado desde el bachillerato, haciéndome crecer en lo humano antes que en lo ingenieril.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM y al Dr. Rodolfo Silva Casarín por brindarme el espacio y los recursos para la realización del trabajo de investigación que culmina en esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que hizo posible mi manutención durante mis estudios de posgrado.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, mi tutor, por su apoyo y dirección durante el desarrollo de esta tesis y por motivarme a publicarla como artículo.

Al M.I. Miguel Ángel Delgadillo Calzadilla por su ayuda al inicio de mi trabajo de investigación y por sacarme adelante con sus enseñanzas cuando tuve dudas técnicas.

A mis profesores de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por los conocimientos que me transmitieron.

Al M.I. Humberto Ivan Navarro Gómez, la Ing. Maria del Rosario Ángulo Álvarez y al Ing. H. Alberto González Serrano por el apoyo al inicio de mis estudios de posgrado, por la confianza entregada a mi y por ayudarme a dar mis verdaderos primeros pasos como ingeniero.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, pero especialmente a sus profesores, porque fue ahí y con ellos donde inicié mi formación como ingeniero.

A mis padres por acompañarme y llevarme en este largo proceso que inició desde aquellos años en que aprendí a leer y sumar.

A mi familia, por todo el apoyo recibido desde la cuna.

A mis amigos por todo el apoyo que me han brindado siempre y que, a pesar de no mencionarlos uno por uno, saben quienes son.

Al Pez Azul, por estar ahí conmigo en los momentos más duros de este proceso y por enseñarme tantas cosas.

**ESTABILIZACIÓN DE PERFILES DE PLAYA CON
TAPETES DE GRAVA EN LA ZONA DE ROMPIENTES**

RESUMEN

La erosión en playas obedece a un déficit en el balance sedimentario que puede ser relacionado a procesos naturales y/o a la actividad humana. Dependiendo de las características mecánicas y físicas de los sedimentos, geología de la zona, clima marítimo, aumento del nivel del mar, asentamientos del terreno, retiro de vegetación, entre otros, el transporte de sedimentos puede darse en una dirección en particular y aumentar o disminuir su intensidad. México, como otras naciones, enfrenta el dilema de definir cuáles playas deben ser protegidas o recuperadas y cómo hacerlo.

En el presente trabajo de investigación se analizan y desarrollan criterios para la utilización de una alternativa de bajo costo económico y de impacto ambiental y paisajístico reducido que permite la estabilización de perfiles de playa de arena. Su principio de operación tiene como base el funcionamiento de un dique sumergido, pero con una sumergencia relativamente grande que lo convierte en un "tapete de grava". El tapete de grava ofrece mayor resistencia al movimiento del sedimento, lo cual modifica la profundidad de cierre y permite la generación de un perfil de playa que necesita menos arena.

Los resultados de los ensayos de laboratorio muestran que con un aumento en la resistencia al movimiento en la zona de rotura y transformación, así como una mayor disipación energética del oleaje, se incrementa la playa seca en los perfiles de playa.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Resumen	I
Índice general	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	3
1.2 Objetivos particulares	4
1.3. Descripción del trabajo	4
II. MORFOLOGÍA COSTERA	9
2.1 Introducción	11
2.2 Evolución costera en playas de arena	12
2.2.1 El proceso del transporte de Sedimentos.....	12
2.3 Playas en equilibrio	14
2.3.1 Perfiles de playa en equilibrio	14
2.3.1.1 Definición	14
2.3.1.2 Métodos para el trazo de perfiles en equilibrio	15
2.3.1.2.1 Modelo de Brunn (1954)	16
2.3.1.2.2 Modelo de Dean (1977)	16
2.3.1.2.3 Modelo de Read y Shaw (1979)	16
2.3.1.2.4 Modelo de Sayao (1982)	17
2.3.1.2.5 Modelo de Vellinga (1983)	17
2.3.1.2.6 Modelo de Larson y Kraus (1989)	17
2.3.1.2.7 Modelo de Kriebel (1991)	18
2.3.1.2.8 Modelo de Dean (1990)	18
2.4 Perfiles de playa inestables	18
2.4.1 Playas en transgresión	19
2.4.2 Playas en regresión	21
2.4.3 Playas en ascenso	22
2.5 Hidrodinámica de los perfiles de playa	22
2.5.1 Perfiles disipativos	23
2.5.2 Perfiles reflejantes	23
2.6 Estabilización de perfiles	23

2.6.1 Estructuras de protección costera	23
III. OLEAJE	25
3.1 Introducción	27
3.2 Características de las ondas	27
3.3 Clasificación del oleaje	28
3.4 Transformación del oleaje	30
3.4.1 Rotura	30
3.4.1.1 Tipos de rotura	33
3.4.2 Ascenso máximo	35
3.4.3 Reflexión	36
3.5 Análisis estadístico	36
3.5.1 Análisis temporal de un estado de Mar	38
3.5.2 Análisis espectral de un estado de Mar	40
3.5.3 Separación de oleaje incidente y oleaje reflejado	43
3.5.3.1 Método de Goda y Suzuki (1976).....	43
3.5.3.2 Método de Mansard y Funke (1980)	48
IV. METODOLOGÍA	53
4.1 Instalación experimental	55
4.2 Instrumentación	58
4.3 Modelo experimental	58
4.3.1 Determinación del perfil inicial	58
4.3.2 Obtención de los perfiles deformados para diferentes condiciones de oleaje	59
4.3.3 Evaluación del funcionamiento del tapete de grava como protección de playa	60
V. RESULTADOS	63
5.1 Topografía	65
5.2 Oleaje	68
5.2.1 Forzamiento de la rotura y definición de la profundidad de cierre	69
5.2.2 Cambios en el tipo de rotura	69
5.2.3 Coeficientes de reflexión	71

CONCLUSIONES	77
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	81
REFERENCIAS	85
ANEXO A	
EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE PLAYA	89
ANEXO B	
PROPAGACIÓN DEL OLEAJE SOBRE EL PERFIL DE PLAYA	103

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Secciones componentes de un perfil de playa (Shore Protection Manual, 1984)	12
Figura 2.2 Volumen de control para el transporte de sedimentos en una playa	13
Figura 2.3 Perfil de playa en acreción	19
Figura 2.4 Perfil de playa en erosión	19
Figura 2.5 Transgresión erosiva, Regla de Bruun	20
Figura 2.6 Transgresión con deposición	21
Figura 2.7 Regresión erosiva	21
Figura 2.8 Regresión con deposición	22
Figura 2.9 Playa en ascenso	22
Figura 3.1 Características de las ondas	28
Figura 3.2 Tipos de rotura	34
Figura 3.3 Ascenso máximo	35
Figura 4.1 Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería	55
Figura 4.2 Generador de olas del canal de oleaje	56
Figura 4.3 Generador de olas del canal de oleaje	56
Figura 4.4 Sensores de nivel de superficie libre	57
Figura 4.5 Velocímetro acústico de efecto Doppler	57
Figura 4.6 Instalación de los sensores sobre el canal	58
Figura 4.7 Configuración inicial del perfil de playa	59
Figura 4.8 Instalación del tapete de protección, vista superior	61
Figura 4.9 Instalación del tapete de protección, vista interior	61
Figura 4.10 Instalación del tapete de protección, vista frontal	61
Figura 4.11 Configuración deformada del perfil de playa para periodo $T=3s$, altura de ola $H=12cm$, tiempo $t=293min$ y tapete con grava de diámetro $f=2in$	62

Figura 5.1	Perfiles deformados para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$	67
Figura 5.2	Perfiles deformados para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$	67
Figura 5.3	Perfiles deformados para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$	67
Figura 5.4	Perfiles deformados para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$	68
Figura 5.5	Forzamiento de la rotura sobre el tapete	70
Figura 5.6	Forzamiento de la rotura sobre el tapete	70
Figura 5.7	Forzamiento de la rotura sobre el tapete	70
Figura 5.8	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Goda	72
Figura 5.9	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Mansard	72
Figura 5.10	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Goda	73
Figura 5.11	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Mansard	73
Figura 5.12	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Goda	74
Figura 5.13	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Mansard	74
Figura 5.14	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Goda	75

Figura 5.15	Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Mansard	75
Figura A.1	Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=000min$	91
Figura A.2	Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=060min$	91
Figura A.3	Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=120min$	91
Figura A.4	Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=180min$	93
Figura A.5	Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=240min$	93
Figura A.6	Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=293min$	93
Figura A.7	Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=000min$	95
Figura A.8	Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=060min$	95
Figura A.9	Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=120min$	95
Figura A.10	Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=180min$	97
Figura A.11	Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=240min$	97
Figura A.12	Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=lin$ y $t=293min$	97
Figura A.13	Evolución del perfil de playa en la zona	99

	de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y	
	$t = 000min$	
Figura A.14	Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y	
	$t = 060min$	99
Figura A.15	Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y	
	$t = 120min$	99
Figura A.16	Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y	
	$t = 180min$	101
Figura A.17	Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y	
	$t = 240min$	101
Figura A.18	Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y	
	$t = 293min$	101
Figura B.1	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de someramiento	105
Figura B.2	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de someramiento	105
Figura B.3	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de someramiento	105
Figura B.4	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de rompientes	107
Figura B.5	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de rompientes	107
Figura B.6	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de rompientes	107
Figura B.7	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de lavado	109
Figura B.8	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de lavado	109
Figura B.9	Propagación del oleaje sobre el perfil de playa. Zona de lavado	109

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1 Fuerzas involucradas en el oleaje	27
Tabla 3.2 Clasificación de las ondas por su periodo (Silva, 2005)	29
Tabla 3.3 Tipos de rotura según el número de Iribarren	34
Tabla 3.4 Límites de rotura para el coeficiente de someramiento	35
Tabla 3.5 Parámetros estadísticos para la altura de ola y su periodo	38
Tabla 3.6 Metodología para el análisis temporal de un estado de mar (Silva, 2005)	40
Tabla 3.7 Metodología para el análisis espectral de un estado de mar (Silva, 2005)	43
Tabla 4.1 Instalación de los sensores sobre el canal de oleaje	58
Tabla 4.2 Condiciones de oleaje en la fase 2	60
Tabla 4.3 Diseño de las pruebas en la fase 3	62
Tabla 5.1 Ganancia en playa seca para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$	66
Tabla 5.2 Ganancia en playa seca para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$	66
Tabla 5.3 Ganancia en playa seca para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$	66
Tabla 5.4 Ganancia en playa seca para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$	66
Tabla 5.5 Cambios en el tipo de rotura	69

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El desarrollo turístico tiene gran importancia económica y social para muchas naciones. Al atraer al turismo, se capta dinero proveniente de otros países y la demanda de servicios es generadora de empleos directos (ya sea en la industria hotelera, restaurantera, recreativa, etc.) e indirectos, pues resulta necesario el suministro de insumos y materias primas de muy diversa índole. Además, al desarrollarse una zona turística, se hace necesaria la construcción de infraestructura que, en adición a satisfacer las necesidades propias del turista, también genera bienestar para los habitantes de las localidades pertenecientes y cercanas a dicha zona.

Para lograr lo anterior, es necesario atraer y realizar inversiones provenientes tanto del sector público como de la iniciativa privada. Con ello, se habrán de evaluar y, de cierta manera, contabilizar los atractivos naturales, culturales, recreativos y de servicios con que cuenta una localidad o región, así como las condiciones en que se encuentren para, así, conocer las necesidades de inversión y determinar si es viable y redituable invertir.

En México, debido a su posición geográfica y condiciones climatológicas, un alto porcentaje del turismo, a nivel nacional, tiene como destino único o combinado alguna playa. Por lo tanto, uno de los principales recursos turísticos explotables con los que cuenta nuestro país son las costas, cuya extensión es de más de 11,000 km de longitud.

Para lograr complejos turísticos redituables en las zonas costeras es imperativo mantener ciertas condiciones que atraigan al turismo de alto nivel y alto consumo, pues éste es el que destina mayor cantidad de recursos económicos en su esparcimiento (baste comparar los precios de las habitaciones hoteleras y la oferta de hoteles de gran lujo en dos zonas turísticas completamente distintas). Una de las condiciones que hacen atractivo a un destino turístico de costa son las playas de arena que representan un recurso casi imprescindible debido a su apreciable belleza.

Sin embargo, actualmente gran parte de las playas de arena en todo el mundo se encuentran en un proceso de transgresión erosiva (van Rijn, 1998) dados la composición mecánica de sus

sedimentos, los procesos geológicos que les dieron origen y la actividad humana predominante en ellas. Este fenómeno es mayormente visible en las costas sometidas a procesos de oleaje altamente energéticos (tormentas y/o huracanes) y a mareas de tormenta.

En virtud de la importancia que algunas playas representan para la vida social y económica de las poblaciones aledañas, resulta necesario garantizar la seguridad de las actividades turísticas y recreativas, así como la estabilidad del recurso litoral, minimizando las afectaciones al medio natural y manteniendo la estética que las haga atractivas a los visitantes. Es aquí donde se hacen presentes las obras de ingeniería costera.

Como propuesta de estructura de protección costera, la alternativa que se explora en este trabajo consiste en la utilización de un "tapete de grava" que, al ser un elemento más estable que las arenas, permite que la profundidad de cierre se modifique y que funciona, además, como apoyo del perfil de playa generando un "perfil colgado".

El objetivo central de este trabajo es el desarrollo de herramientas para uso ingenieril que proporcionen una alternativa para la regeneración de playas con déficit sedimentario. Para conseguir dicho objetivo se realizó un grupo de experimentos en el Laboratorio de Olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

1.2 Objetivos particulares

- Desarrollar una alternativa simple, de bajo costo y de bajo impacto ambiental para la estabilización de perfiles de playa de arena.
- Determinar experimentalmente las condiciones de funcionamiento óptimo, aplicación y eficiencia de la alternativa de protección propuesta.
- Contribuir al estado del arte en cuanto a protección costera se refiere.

1.3. Descripción del trabajo

Con la intención de que el trabajo de investigación y

experimentación realizado sea correctamente entendido y con la necesidad de dar justificación a la estructura de este documento, a continuación se presenta una breve explicación de cada uno de los capítulos que conforman la presente Tesis.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la importancia de las playas de arena como atractivo turístico captador de ingresos para el desarrollo social, así como la problemática que estas playas enfrentan y una breve descripción de la alternativa de solución propuesta.

CAPÍTULO II. MORFOLOGÍA COSTERA

En este capítulo, se hace mención de las diferentes formas de clasificar a las costas y se exponen los principales procesos que dan lugar al desarrollo de la forma en perfil de las playas de arena.

Para los perfiles de playa, se explican las clasificaciones según su estado dinámico (perfil de equilibrio y perfil inestable) y según su hidrodinámica (perfiles disipativos y perfiles reflejantes) por ser éstas de interés para la evaluación de la alternativa de protección costera propuesta en este trabajo.

Finalmente, se hace mención de los principales métodos para el trazo de perfiles en equilibrio en playas de arena y una breve introducción a las estructuras de protección costera.

CAPÍTULO III. OLEAJE

Se presenta una introducción a las características del oleaje entendido como ondas sinusoidales y su clasificación según su profundidad relativa, fuerza generadora principal y periodo de onda. Se hace mención, únicamente, de los fenómenos de transformación del oleaje sobre taludes conocidos como rotura, ascenso máximo y reflexión por ser los que se presentaron en los experimentos llevados a cabo durante la realización de este estudio.

Se explican los métodos de separación de oleaje incidente y reflejado propuestos por Goda y Suzuki (1976) y Mansard y Funke (1980) por ser éstos los empleados en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería para el cálculo de la reflexión.

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen tanto el laboratorio donde fueron realizados los experimentos como los instrumentos de medición empleados y su ubicación en el canal de oleaje.

Se presenta una descripción de los procesos llevados a cabo durante las tres distintas fases de experimentación: la determinación del perfil inicial, la obtención de los perfiles deformados para diferentes condiciones de oleaje y la evaluación del funcionamiento del tapete de grava como protección de playa.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

En este capítulo se presentan gráficos y tablas con los resultados en la evolución morfológica del perfil de playa (topografía) al emplear el tapete de protección.

En cuanto al oleaje, el capítulo presenta los resultados en el cambio del tipo de rotura, así como evidencia fotográfica que documenta los resultados en el forzamiento de la rotura sobre el tapete. Además, se presentan los resultados en la evolución temporal del coeficiente de reflexión.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Se exponen las conclusiones obtenidas a partir de los resultados.

CAPÍTULO VII. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Aquí se exponen las recomendaciones para complementar el presente trabajo, de manera que puedan obtenerse las condiciones óptimas para la aplicación del tapete de grava como estructura de protección costera.

ANEXOS

El Anexo A muestra tres secuencias fotográficas de la evolución temporal del perfil de playa: una en la zona de someramiento, otra en la zona de rompientes y una más en la zona de lavado. Se muestran imágenes obtenidas a cada hora durante la prueba correspondiente a $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=000min$.

El Anexo B presenta una sola secuencia fotográfica en la cual se muestra la propagación del oleaje sobre un perfil deformado durante una de las pruebas.

Ambos anexos son meramente ilustrativos.

II. MORFOLOGÍA COSTERA

2.1 Introducción

Para lograr las formas conocidas de las costas, tanto en planta como en perfil, es necesaria la intervención de muchos factores a lo largo del tiempo. Dentro de estos factores, los más importantes son aquellos que se encuentran agrupados en el llamado clima marítimo (Pedrozo, 2011), a saber: oleaje, mareas, corrientes y vientos. Éstos, junto con las descargas fluviales, intervienen directamente en el proceso del transporte de sedimentos para dar forma y cambio a las costas y, en menor medida, pero también de manera importante, participan la actividad humana y algunos eventos geológicos extremos.

Por lo tanto, es importante hacer notar que, debido a la variabilidad de climas marítimos, sedimentos y condiciones geológicas, el desarrollo de las playas pueda estar sujeto a múltiples combinaciones entre los diferentes factores que modelan las costas. Sin embargo, el comportamiento natural de las costas es muy parecido en todo el mundo.

De esta manera, las diferencias en el comportamiento de una playa u otra tendrán que ver, principalmente, con la forma en planta, la forma en perfil y con la composición sedimentaria, pudiendo ser clasificadas las playas según las tres características anteriores. Así, se tiene que existen distintas clasificaciones para las playas según su composición sedimentaria, elementos morfológicos, suministro de sedimentos y energía que la gobierna, génesis y procesos morfológicos. De igual manera, los perfiles de playa pueden clasificarse según su estado dinámico, su hidrodinámica, sus formaciones de fondo y por parámetros numéricos.

Para entender los procesos que dan lugar a los cambios en el perfil de una playa, primero es necesario conocer las principales secciones que componen a un perfil de playa (figura 2.1).

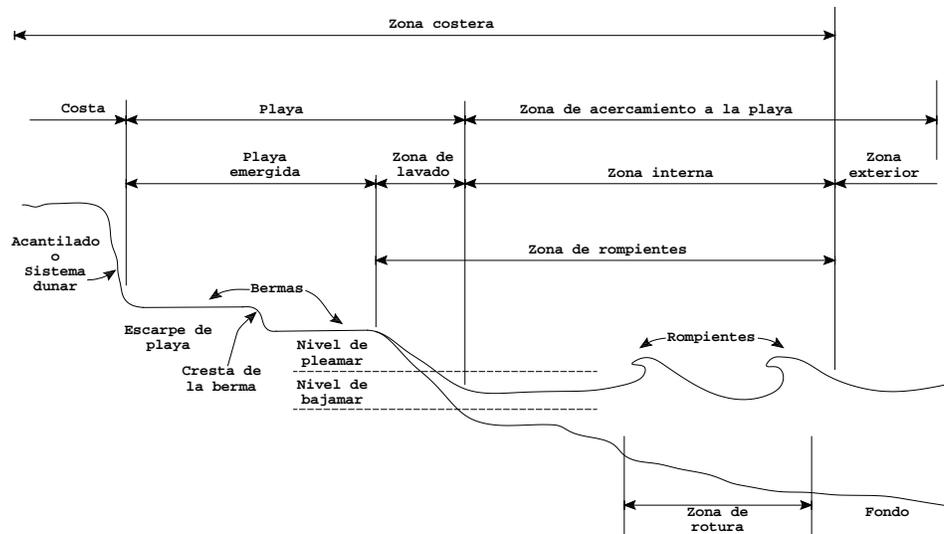


Figura 2.1 Secciones componentes de un perfil de playa (Shore Protection Manual, 1984).

Se dice, entonces, que el perfil de playa es la variación de la profundidad del agua en función de la distancia hacia el mar desde la línea de costa (ecuación 2.1).

$$y = f(x) \quad \text{Ec. 2.1}$$

2.2 Evolución costera en playas de arena

Como principal clasificación de las playas, se tiene la correspondiente a la composición sedimentaria: playas de lodos, playas de gravas, playas de arena, playas de roca (riscos) y playas mixtas.

Así, puede entenderse a las playas de arena como sistemas costeros dominados por la energía del oleaje generado por viento, cuyas fuentes sedimentarias son el oleaje y las corrientes inducidas por éste y con tamaño de los sedimentos que las componen entre 0.0625 y 2 mm.

2.2.1 El proceso del transporte de sedimentos

Debido a la alta energía cinética del oleaje y al reducido tamaño de los granos de arena, éstos se encuentran permanentemente en movimiento suspendidos en el agua. De esta manera, el oleaje va transportando al sedimento en la dirección transversal (perpendicular a la línea de costa) y las corrientes inducidas por el oleaje lo transportan en la dirección longitudinal (paralela a la línea de costa).

Estos dos procesos son conocidos como transporte transversal y transporte longitudinal y son la principal causa del cambio en la morfología de las playas.

Mientras que el transporte longitudinal se encarga de modelar la forma en planta de las playas, el transporte transversal se encarga de modelar la forma en perfil.

Entonces, el proceso del transporte de sedimentos debe cumplir con el principio de conservación de la masa (figura 2.2 y ecuación 2.2).



Figura 2.2 Volumen de control para el transporte de sedimentos en una playa.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dQ}{dx} + \frac{dQ}{dy} \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde:

- V = Volumen de sedimento
- Q = Flujo de sedimentos
- x = Dirección transversal
- y = Dirección longitudinal

2.3 Playas en equilibrio

Si, durante el transporte de sedimentos, la cantidad de sedimento dentro del volumen de control no cambia en el tiempo (ecuación 2.3), se estará ante la presencia de una playa en equilibrio morfológico. Y, como este cambio depende de los gradientes de transporte $\frac{dQ}{dx}$ y $\frac{dQ}{dy}$, también será posible identificar si los cambios en la playa se producen en su forma en planta o en su forma en perfil.

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{dV_2}{dt} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Pero, el que la cantidad de sedimento se mantenga constante en todos y cada uno de los instantes no basta ni es condición necesaria para presentarse el equilibrio morfológico de una playa, ya que pueden ocurrir cambios en las playas durante las diferentes estaciones del año o existir ciclos en los que la playa regresa a un estado inicial tras varios años de cambios. De esta manera, se puede hablar de playas en estado meta-estable y de condiciones de playa de verano, de invierno o en transición.

2.3.1 Perfiles de playa en equilibrio

2.3.1.1 Definición

Atendiendo a la clasificación de los perfiles de playa según su estado dinámico, se tienen perfiles de playa en equilibrio y perfiles de playa inestables. Los primeros, pueden definirse recordando la definición del perfil de playa (ecuación 2.1) que señala que el perfil de una playa es la variación de la profundidad del agua en función de la distancia hacia el mar desde la línea de costa. Entonces, idealmente, el perfil de playa en equilibrio es aquel cuya geometría no cambia con el tiempo (ecuación 2.4).

$$\frac{df(x)}{dt} = 0 \quad \text{Ec. 2.4}$$

En cuanto a la composición sedimentaria, se puede entender al perfil de playa en equilibrio como aquel perfil cuyo contenido de sedimento se mantiene constante en el tiempo, a pesar de que su geometría pueda experimentar modificaciones temporales.

Además, se tienen dos condiciones generales necesarias para que un perfil de playa se considere en equilibrio: la posición de la duna y la posición de la línea de costa, ambas deben permanecer inalteradas.

El concepto de equilibrio en la ingeniería costera ha sido ampliamente utilizado desde los años 50 en que Bruun (Bruun, 1954) concluyó que cerca de la línea de costa se presentan perfiles que se encuentran en equilibrio. De esta manera formuló una ecuación para describir la forma parabólica de los perfiles costeros llamada "Perfil de Bruun" (ecuación 2.5). Esta ecuación depende únicamente del tamaño de los granos que componen la superficie y se aplica solamente a playas de arena sin presencia de rocas, lodos o pastos. No obstante, sea cual sea la composición sedimentaria de un perfil de playa, éste puede encontrarse en equilibrio.

Años más tarde, Bruun (1962, 1983 y 1988), Dean (1977, 1987 y 1990), Swift (1976) y otros investigadores realizaron estudios que concluyeron en formas modificadas del perfil de Bruun. Sin embargo, tanto la forma original como las modificadas de Bruun son simplificaciones matemáticas muy básicas basadas, principalmente, en principios geométricos que describen la forma del perfil. Para su aplicabilidad, es necesario que la playa estudiada cumpla con las condiciones básicas granulométricas propuestas por Bruun.

2.3.1.2 Métodos para el trazo de perfiles en equilibrio

El método más ampliamente utilizado para el trazo teórico de perfiles en equilibrio es el llamado perfil de Bruun que es de aplicación exclusiva para playas de arena (ecuación 2.5). Este perfil es una ecuación parabólica que, dependiendo de las consideraciones adoptadas con respecto al tamaño de los granos, el cálculo de la velocidad de caída de éstos y la definición del límite de aplicación (donde el perfil ya no siente el efecto del nivel del mar) resulta en una familia de parábolas que bien podría describir cualquier perfil de playa.

Según Bruun, una playa de arena sufre un proceso erosivo como consecuencia, únicamente, de un aumento en el nivel del mar, conservando su forma inalterada pero desplazada tierra adentro. Con este comportamiento de las costas, Bruun propone que los granos que se encuentran en la parte superior de un perfil de playa se desplazan hacia el fondo, esto como función de la velocidad de caída de los granos.

Sin embargo, existen otros factores que definen los cambios morfológicos en las costas como son los flujos transversales y longitudinales de entrada y salida de sedimentos en la zona considerada, el tipo de sedimentos y su composición química, la variabilidad del oleaje, las corrientes producidas por la marea, el viento y la descarga de ríos, etc. Faltaría, además, considerar los efectos de las fuerzas de arrastre producidas durante la rotura y el ascenso y descenso de las olas, las fuerzas friccionantes entre los materiales, el incremento de la energía de oleaje causado por el viento y las tormentas, la variabilidad de las tormentas, etc. En fin, el perfil de Bruun excluye muchos parámetros importantes que deberían ser tomados en cuenta para predecir el proceso erosivo en las costas.

2.3.1.2.1 Modelo de Brunn (1954)

$$y = Ax^m \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$0.0025 < A < 6.31$$

$$0.1 < m < 1.4$$

2.3.1.2.2 Modelo de Dean (1977)

$$y = Ax^{2/3} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$0 < A < 0.3$$

2.3.1.2.3 Modelo de Read y Shaw (1979)

$$y = Ax^{0.98} \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$A = 0.51w^{0.44}$$

$$A = w^{2/3}$$

$$A = 1.05w^{2/3}$$

$$w = 1.1 \times 10^6 D^2 \quad D < 0.1mm$$

$$w = 273D^{1.1} \quad 0.1mm < D < 1.0mm$$

$$w = 4.36D^{0.5} \quad 1.0mm < D$$

w = Velocidad de caída del sedimento

D = Diámetro medio del sedimento

2.3.1.2.4 Modelo de Sayao (1982)

$$y = Ax^{0.633} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$A = 0.51w^{0.44}$$

$$A = w^{2/3}$$

$$A = 1.05w^{2/3}$$

$$w = 1.1 \times 10^6 D^2 \quad D < 0.1mm$$

$$w = 273D^{1.1} \quad 0.1mm < D < 1.0mm$$

$$w = 4.36D^{0.5} \quad 1.0mm < D$$

w = Velocidad de caída del sedimento

D = Diámetro medio del sedimento

2.3.1.2.5 Modelo de Vellinga (1983)

$$y = Ax^{0.78} \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$A = 0.51w^{0.44}$$

$$A = w^{2/3}$$

$$A = 1.05w^{2/3}$$

$$w = 1.1 \times 10^6 D^2 \quad D < 0.1mm$$

$$w = 273D^{1.1} \quad 0.1mm < D < 1.0mm$$

$$w = 4.36D^{0.5} \quad 1.0mm < D$$

w = Velocidad de caída del sedimento

D = Diámetro medio del sedimento

2.3.1.2.6 Modelo de Larson y Kraus (1989)

$$y = A(x - x_0)^{2/3} \quad \text{Ec. 2.10}$$

$$A = 0.51w^{0.44}$$

$$A = w^{2/3}$$

$$A = 1.05w^{2/3}$$

$$\begin{aligned}
 w &= 1.1 \times 10^6 D^2 & D < 0.1mm \\
 w &= 273D^{1.1} & 0.1mm < D < 1.0mm \\
 w &= 4.36D^{0.5} & 1.0mm < D
 \end{aligned}$$

w = Velocidad de caída del sedimento
 D = Diámetro medio del sedimento

2.3.1.2.7 Modelo de Kriebel (1991)

$$y = \left(\frac{w^2}{g} \right)^{1/3} \quad \text{Ec. 2.11}$$

$$\begin{aligned}
 w &= 1.1 \times 10^6 D^2 & D < 0.1mm \\
 w &= 273D^{1.1} & 0.1mm < D < 1.0mm \\
 w &= 4.36D^{0.5} & 1.0mm < D
 \end{aligned}$$

w = Velocidad de caída del sedimento
 D = Diámetro medio del sedimento

2.3.1.2.8 Modelo de Dean (1990)

$$x = \frac{y}{m} + \frac{1}{A^{2/3}} y^{2/3} \quad \text{Ec. 2.12}$$

m = Pendiente de la playa

2.4 Perfiles de playa inestables

Recordando el volumen de control (ecuación 2.2), un perfil de playa puede considerarse inestable si, de manera muy general pero permanente, se encuentra en proceso de acreción (figura 2.3 y ecuación 2.13) o en proceso de erosión (figura 2.4 y ecuación 2.14).

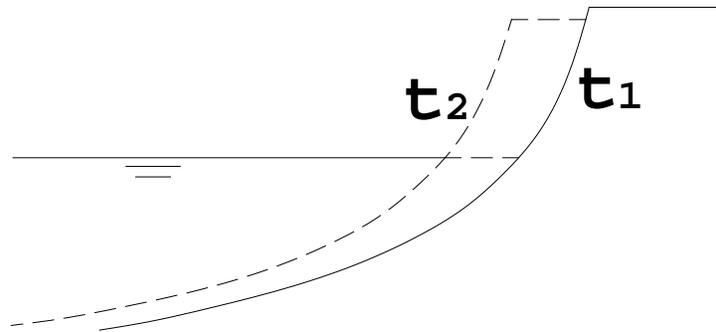


Figura 2.3 Perfil de playa en acreción.

$$Q_{\text{entrante}} > Q_{\text{saliente}} \Leftrightarrow \text{Acreción} \quad \text{Ec. 2.13}$$

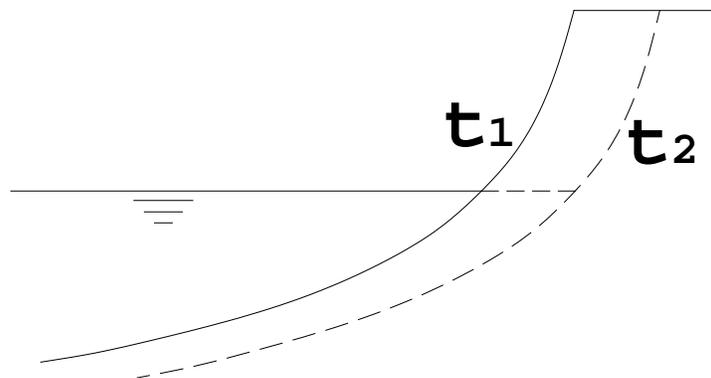


Figura 2.4 Perfil de playa en erosión.

$$Q_{\text{entrante}} < Q_{\text{saliente}} \Leftrightarrow \text{Erosión} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Por supuesto que la condición más deseable es que el perfil de playa se encuentre en equilibrio pero, de no ser así, un proceso de acreción también es favorable pues representa una acumulación de material en la costa que puede ser aprovechado para rellenos de playa en otros sitios o, simplemente, para incrementar el tamaño de la playa en cuestión de manera natural. Por el contrario, una playa en erosión representa grandes problemas sociales y económicos que deben ser resueltos.

Una clasificación más precisa, pero aún básica, de los procesos de evolución costera hace referencia a 5 diferentes modelos: transgresión erosiva, transgresión con deposición, regresión erosiva, regresión con deposición, y ascensión.

2.4.1 Playas en transgresión

La transgresión se caracteriza por el desplazamiento de la línea de costa hacia tierra y puede presentarse como transgresión erosiva o transgresión con deposición.

El proceso de transgresión erosiva es generado por la acción del oleaje en playas donde el suministro de sedimentos es escaso y se tiene presencia de un aumento en el nivel del mar. En este proceso, los sedimentos finos removidos durante la erosión son depositados en el fondo del perfil, más allá de la profundidad de cierre, lo que dificulta la recuperación del perfil. Durante este proceso, el fondo se eleva en igual magnitud que el nivel del mar y se alcanza un perfil de equilibrio a largo plazo.

Según la regla de Bruun (Bruun, 1962), el proceso de transgresión erosiva en una playa depende de varios aspectos como el incremento del nivel del mar, el porcentaje de sedimentos finos presentes en la composición granulométrica del perfil, la profundidad al fondo del perfil, la longitud del perfil y la altura de la berma existente en tierra (figura 2.5 y ecuación 2.15).

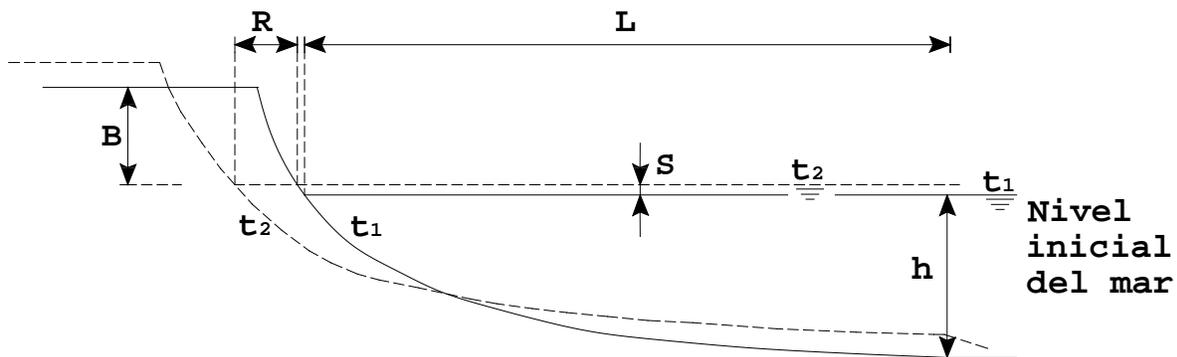


Figura 2.5 Transgresión erosiva, Regla de Bruun.

$$R = SL \frac{(1-p)}{(B+h)} \quad \text{Ec. 2.15}$$

donde:

- R = Retroceso de la línea de costa hacia tierra
- S = Incremento en el nivel del mar
- L = Longitud del perfil
- p = Porcentaje de finos en la composición del

perfil
 B = Altura de la berma
 h = Profundidad de la base del perfil donde no ocurre el intercambio de sedimento

Por otro lado, durante la transgresión con deposición el sedimento removido durante la erosión es depositado por el oleaje en la parte alta del perfil y se presenta como el desplazamiento de una barra hacia tierra (figura 2.6).

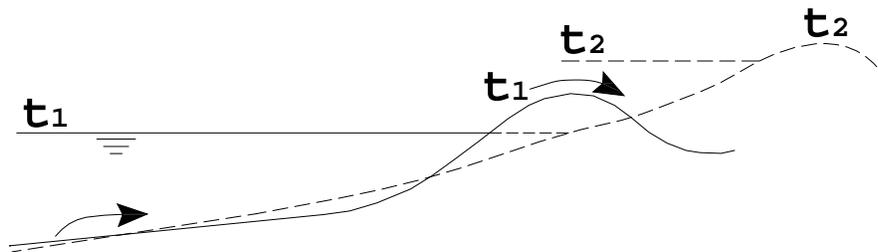


Figura 2.6 Transgresión con deposición.

2.4.2 Playas en regresión

El proceso de evolución de costas conocido como regresión se caracteriza por el avance de la línea de costa hacia el mar.

En cuanto a la regresión erosiva, ésta ocurre cuando hay descenso del nivel del mar, sin presencia de fuentes de material sedimentario (figura 2.7).

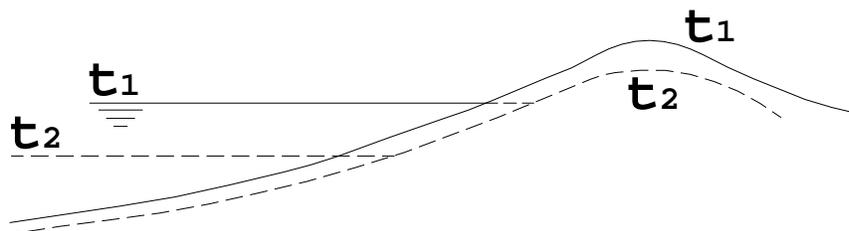


Figura 2.7 Regresión erosiva.

La regresión con deposición, por su parte, implica el desplazamiento de la línea de costa en dirección al mar, ya sea con ascenso o descenso del nivel del mar, pero siempre con fuentes sedimentarias disponibles (figura 2.8).

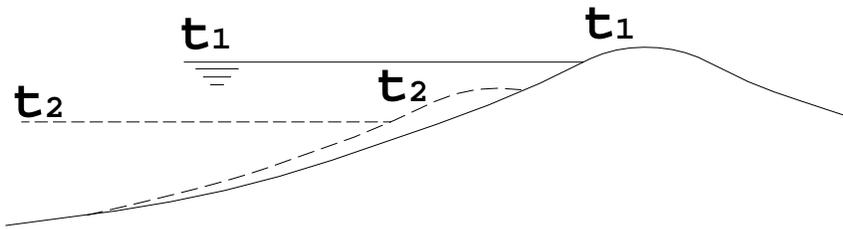


Figura 2.8 Regresión con deposición.

2.4.3 Playas en ascenso

Finalmente, el proceso mediante el cual se considera que una playa está en ascenso significa que se mantiene la posición de la línea de costa pero se presenta elevación del terreno. Esto se consigue cuando hay aumento en el volumen del material sedimentario que constituye la playa y aumento del nivel del mar (figura 2.9).

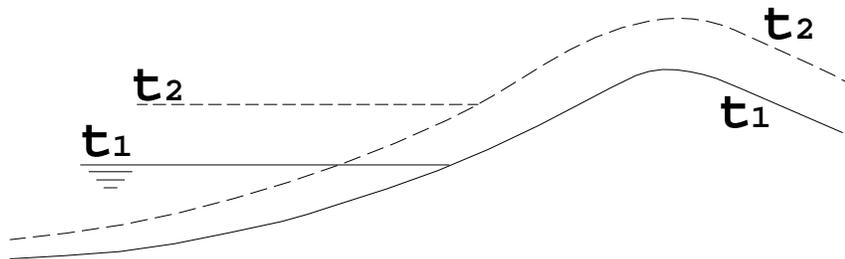


Figura 2.9 Playa en ascenso.

2.5 Hidrodinámica de los perfiles de playa

La clasificación de los perfiles de playa según su hidrodinámica es importante para conocer el grado en que ésta disipa la energía del oleaje incidente. Se pueden tener dos tipos de perfiles: disipativos y reflejantes.

Para clasificar a los perfiles de playa como disipativos o reflejantes, se puede emplear el siguiente parámetro:

$$\frac{H_{br}}{gT^2 \tan^2(\beta)} \quad \text{Ec. 2.16}$$

donde:

H_{br} = Altura de ola en

rotura

 $T =$ Periodo de la ola $\beta =$ Pendiente de la playa

Si $\frac{H_{br}}{gT^2 \tan^2(\beta)} < 0.1$ el perfil es totalmente reflejante.

Si $1.0 < \frac{H_{br}}{gT^2 \tan^2(\beta)}$ el perfil es totalmente disipativo.

2.5.1 Perfiles disipativos

En un perfil disipativo, la mayor parte de la energía del oleaje es disipada durante la rotura y otra parte es disipada gracias a la fricción durante el proceso del ascenso.

Estos perfiles se caracterizan por tener poca pendiente, su zona de acercamiento a la playa es de gran longitud, presentan formaciones tipo barras y cusps. Generalmente, los perfiles disipativos se presentan en playas cuya composición granulométrica es de materiales finos y medios.

2.5.2 Perfiles reflejantes

En cambio, en los perfiles reflejantes, la mayor parte de la energía del oleaje es reflejada al mar.

Además de una gran pendiente, las características principales de los perfiles de playa reflejantes son la ausencia de formaciones debidas a la erosión y la composición granulométrica de materiales gruesos.

2.6 Estabilización de perfiles

La estabilización de perfiles de playa de arena ha sido objeto de múltiples investigaciones y pruebas tanto en campo como en laboratorio (Dean, 1990) y las alternativas de solución son muchas y muy variadas, algunas son simples y otras muy complejas.

2.6.1 Estructuras de protección costera

EL funcionamiento principal de una estructura de protección costera consiste en disipar la energía del oleaje por fricción. Además, las estructuras de protección costera pueden reflejar

la energía del oleaje de vuelta al mar o permitir su transmisión hacia la playa.

Entre las alternativas convencionales que han ofrecido buenos resultados se cuentan estructuras de roca o elementos prefabricados, diques sumergidos y arrecifes artificiales de muy diversos materiales y formas, rellenos artificiales de arena, colocación de geotextiles rellenos de arena, entre otros; cada uno con sus ventajas, desventajas y condiciones óptimas de aplicación.

En años recientes se ha explorado la utilización de pastos marinos para la estabilización de los perfiles de playa ofreciendo resultados aceptables. Sin embargo, la principal desventaja de esta alternativa es la sensación de incomodidad e inseguridad a los bañistas, por lo que en sitios eminentemente turísticos puede no ser del todo recomendable.

III. OLEAJE

3.1 Introducción

El oleaje es un fenómeno oscilatorio que se presenta debido a fuerzas externas que transmiten energía al agua, produciendo movimiento en ella. Dependiendo del tipo de fuerza que actúa sobre el agua, será el tipo de ola generada.

De esta manera, en el mar se encuentran fuerzas que intentan poner al agua en movimiento y fuerzas que intentan mantenerla o regresarla al estado de reposo. A estas fuerzas se les conoce como fuerzas generadoras y fuerzas restauradoras, respectivamente (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Fuerzas involucradas en el oleaje

Fuerzas generadoras	Fuerzas restauradoras
Viento	Tensión superficial
Presión atmosférica	Gravedad
Cambios de temperatura	Fuerza de Coriolis
Maremotos o terremotos	
Fuerzas astronómicas	

De manera natural, las olas en el mar no son regulares, por lo que se presentan como un fenómeno meramente aleatorio. Así, la elevación máxima de la cresta de una ola presentada en un punto difícilmente será la misma en dos instantes distintos y, además, difícilmente se presentarán en el mismo punto dos o más crestas en instantes poco espaciados.

Para entender al oleaje como un fenómeno aleatorio, puede considerársele como un conjunto de ondas distintas entre sí, todas con diferentes direcciones y características.

Por otro lado, para entender el fenómeno del oleaje, es necesario pensar en los llamados "estados de mar", entendiendo por estado de mar a aquella condición en que, durante un periodo de tiempo, se puede considerar que hay equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras, por lo que los cambios en el oleaje se dan de manera lenta.

3.2 Características de las ondas

La representación más sencilla del oleaje y los estados de mar es mediante ondas sinusoidales perfectas, de periodo definido y con crestas y valles idénticos (figura 3.1). Según lo anterior, los principales parámetros físicos que definen al oleaje son:

- L = Longitud de onda
- P = Periodo de la onda
- f = Frecuencia
- H = Amplitud de onda o altura de la ola
- c = Celeridad de onda

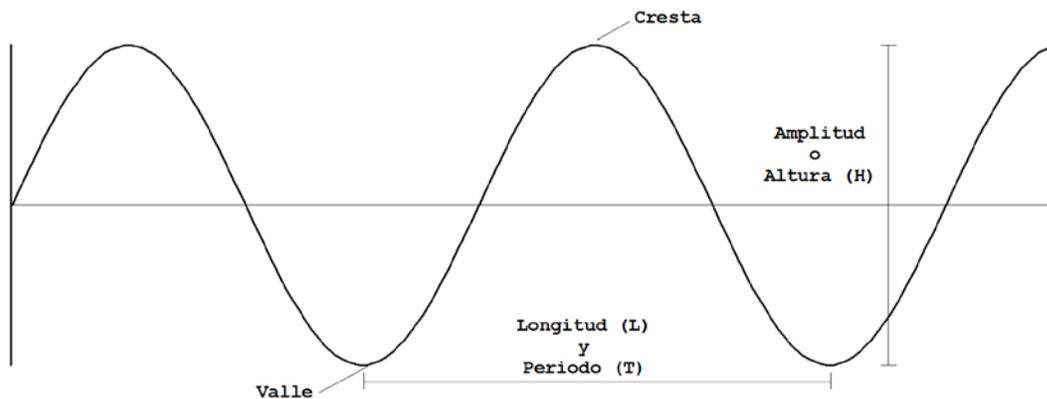


Figura 3.1 Características de las ondas.

Así, se entiende por longitud de onda a la distancia horizontal entre dos crestas consecutivas, como periodo de la onda al tiempo necesario para que dos crestas consecutivas pasen por un mismo punto, a la frecuencia como el inverso del periodo, la amplitud de onda o altura de la ola será la distancia vertical medida desde la elevación máxima de una cresta hasta la elevación mínima de un valle y como celeridad de onda a la velocidad horizontal con la cual se mueve una cresta sobre la superficie del mar.

3.3 Clasificación del oleaje

Debido a que el oleaje nunca es regular y se presenta como un fenómeno aleatorio, lo más correcto es caracterizarlo en función de métodos estadísticos según los parámetros que lo definen, pudiendo identificarse tres formas de clasificar al oleaje (Silva, 2005): profundidad relativa, fuerza generadora principal y periodo de onda.

Atendiendo a la clasificación según la profundidad relativa, se puede hablar de oleaje en aguas profundas y aguas someras.

El oleaje en aguas profundas se presenta cuando la profundidad del agua es igual o mayor que la mitad de la longitud de onda de la ola. Aquí, el oleaje no es modificado por el fondo.

En cuanto al oleaje en aguas someras, éste se presenta cuando la profundidad del agua es igual o menor que un vigésimo de la longitud de onda de la ola ($L/20$). Aquí, el oleaje depende en su totalidad del fondo y sufre severas modificaciones.

La tabla 3.2 presenta una clasificación más completa del oleaje.

Tabla 3.2 Clasificación de las ondas por su periodo (Silva, 2005)

Nombre	Periodo T	Longitud L	Altura H	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0.1 s	2 a 7 cm	1 a 3 mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0 a 0.1 s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 m	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s a 30 min	100 a 200 m	Pequeña	Viento	Gravedad y fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 min a 24 h	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 m	Sismos, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad y fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24 h	-	0 a 12 m	Oscilaciones climáticas	Gravedad y fuerza de Coriolis

Además, en función de la región donde es generado el oleaje (también conocida como fetch), se puede distinguir una clasificación más en la cual se distinguen dos tipos de oleajes: el oleaje local o tipo sea y el oleaje distante o tipo swell.

El oleaje local o sea se presenta en la zona de generación y se caracteriza por ser un oleaje completamente irregular con olas de gran altura en relación con su longitud y por asimetría entre las crestas y los valles. Esta zona de generación está

bastante alejada de las costas, en lo que se conoce como "alta mar" y es donde el viento, como principal fuerza generadora, transmite energía al agua.

El oleaje distante o swell ocurre en aguas someras, fuera del área de generación. Se caracteriza por ser ahí donde las olas viajan movidas únicamente por su propia energía que comienza a "perderse", se presenta dispersión de las olas que comienzan a viajar en todas direcciones con una mayor celeridad para las ondas de mayor longitud y, finalmente, porque las ondas de periodos cercanos se juntan formando largas crestas que van tendiendo a la regularidad.

Finalmente, para el oleaje generado de manera artificial se puede hablar también de oleaje regular y de oleaje irregular.

3.4 Transformación del oleaje

Debido a la fricción por fondo, turbulencia, someramiento o ante la presencia de un obstáculo, el oleaje experimenta ciertas transformaciones durante su propagación en aguas someras, a saber: rotura, ascenso sobre un talud, descenso sobre un talud, rebase, transmisión y reflexión.

Estas transformaciones son causantes de la disipación de la energía del oleaje, por lo que resultan de interés en la protección de las costas, de manera que deben ser consideradas en el diseño o revisión de una estructura de protección costera.

3.4.1 Rotura

La rotura se presenta cuando la ola sufre peraltamiento debido al fondo y a la celeridad con que viaja, pierde estabilidad y es incapaz de mantener su forma. Durante este fenómeno, se disipa gran cantidad de la energía al perder el oleaje su estructura de manera violenta por lo que se considera a la rotura como el proceso más disipativo.

Para evaluar la rotura y clasificarla, el parámetro que se emplea es el número de Iribarren (ecuación 3.1, ecuación 3.2, ecuación 3.3 y ecuación 3.4).

Número de Iribarren para oleaje regular en aguas profundas:

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde:

H_0 = Altura de la ola medida en aguas profundas

L_0 = Longitud de onda calculada para la ola en aguas profundas (ecuación 3.5)

α = Ángulo del talud en el cual se propaga la ola

Número de Iribarren para oleaje regular en rompientes o aguas someras:

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde:

H_b = Altura de la ola medida en la zona de rotura

L_0 = Longitud de onda calculada para la ola en aguas profundas (ecuación 3.5)

α = Ángulo del talud en el cual se propaga la ola

Número de Iribarren local para oleaje regular:

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde:

H = Altura de la ola

medida en la zona de estudio

L = Longitud de onda calculada para la ola en la zona de estudio (ecuación 3.6)

α = Ángulo del talud en el cual se propaga la ola

Número de Iribarren para oleaje irregular:

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{1/3}}{L_m}}} \quad \text{o} \quad Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{1/3}}{L_p}}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

donde:

$H_{1/3}$ = Altura de la ola significativa

L_m = Longitud de onda calculada como local pero correspondiente al periodo medio (ecuación 3.7)

L_p = Longitud de onda calculada como local pero correspondiente al periodo pico (ecuación 3.8)

α = Ángulo del talud en el cual se propaga la ola

En cuanto a las diferentes tipos de longitudes de ondas empleadas, éstas se calculan de la siguiente manera:

Longitud de onda calculada para la ola en aguas profundas

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Longitud de onda calculada para la ola en la zona de estudio

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) \quad \text{Ec. 3.6}$$

Longitud de onda calculada como local pero correspondiente al periodo medio

$$L_m = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L_m} h\right) \quad \text{Ec. 3.7}$$

Longitud de onda calculada como local pero correspondiente al periodo pico

$$L_p = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L_p} h\right) \quad \text{Ec. 3.8}$$

3.4.1.1 Tipos de rotura

Siguiendo el criterio del número de Iribarren, la manera de explicar los diferentes tipos de rotura es la siguiente (Delgadillo, 2011):

- Spilling o descrestamiento. Este tipo de rotura se caracteriza por la inestabilidad del frente de la ola, comenzando en la cresta. Aparecen espuma, burbujas y turbulencias en la cresta de la ola y, eventualmente, cubren parte del frente de la misma. La ola se "descresta" formando un pequeño chorro que, en algunos casos, es imperceptible y resbala por el frente de la ola.
- Plunging o voluta. Se presenta cuando la cresta de una ola se desplaza hacia la costa con mayor velocidad que el resto de la ola. La mayor parte del frente de la ola adquiere la posición vertical y forma una voluta con un chorro en la parte superior que, mientras envuelve una masa de aire, se precipita contra la base de la ola originando una "salpicadura" de agua. El chorro de agua, además, penetra la superficie libre del agua y genera vórtices.
- Collapsing o colapso. La parte inferior del frente de la ola se peralta y voltea, comportándose como una rotura en voluta pero truncada ya que el punto frontal, desde donde la ola se voltea o "desmorona", está por delante y por debajo de la cresta de la ola.
- Surging u oscilación. El frente de la ola y la cresta permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno con una pequeña producción de espuma, burbujas y

turbulencia.

La tabla 3.3 muestra la clasificación de los diferentes tipos de rotura según el criterio del número de Iribarren. Además, se ejemplifican en la figura 3.2.

Tabla 3.3 Tipos de rotura según el número de Iribarren

Tipo de rotura	Límites del número de Iribarren
Spilling o descrestamiento	$Ir < 0.5$
Plunging o voluta	$0.5 < Ir < 3.0$
Collapsing o colapso	$3.0 < Ir < 3.5$
Surging u oscilación	$3.5 < Ir$

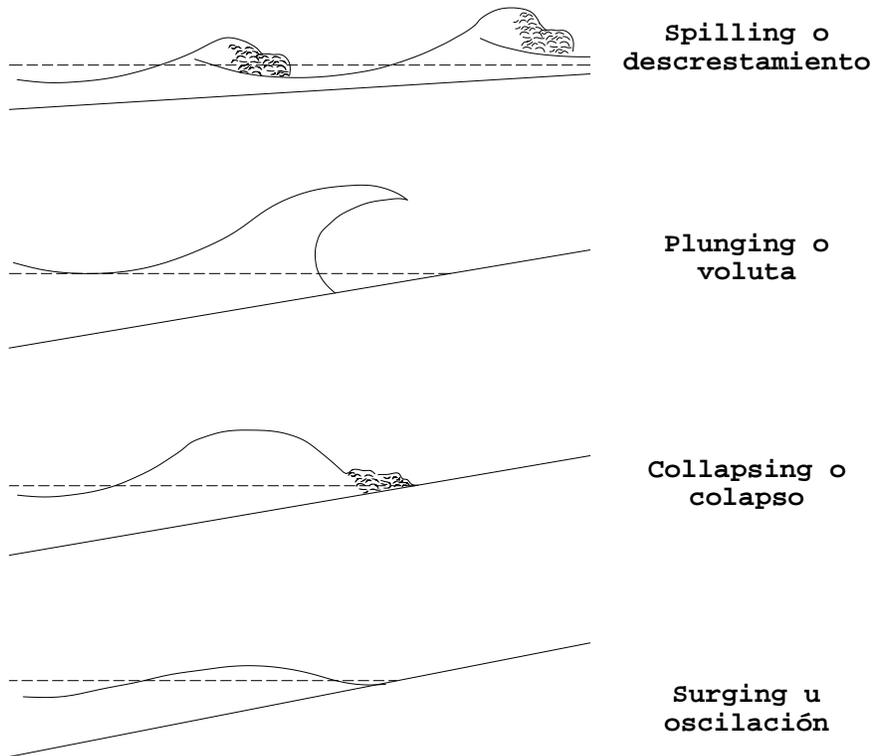


Figura 3.2 Tipos de rotura.

Por otro lado, las olas no pueden alcanzar valores mayores a ciertos límites que dependen, principalmente, de la profundidad del agua, pero también de la longitud de la onda y la pendiente del fondo. Estos valores máximos definen el instante en que se iniciará la rotura de la ola y son llamados límites de rotura para el coeficiente de someramiento (tabla 3.4).

Tabla 3.4 Límites de rotura para el coeficiente de someramiento

Tipo de oleaje	Límite de rotura
Aguas profundas	$\frac{H}{h_0} = 0.142$
Aguas somera	$\frac{H}{h} = 0.78$

3.4.2 Ascenso máximo

El ascenso del oleaje R_u se presenta cuando una ola incide sobre una playa o estructura y representa la cota máxima, con respecto al nivel medio del mar, que dicha ola alcanza (figura 3.3). Su estudio resulta importante para determinar la cota de coronación de una estructura de protección no rebasable o, en el caso de las playas, porque el ascenso y el descenso del oleaje rigen el transporte de sedimentos en la dirección transversal en la zona de lavado. Donde se presenta el ascenso máximo, se genera la berma.

El ascenso máximo es función de la altura de la ola, de su periodo y del tipo de rotura que, a su vez, depende del ángulo del talud sobre el cual se propaga la ola; además, el ascenso máximo depende de la rugosidad y porosidad del talud.

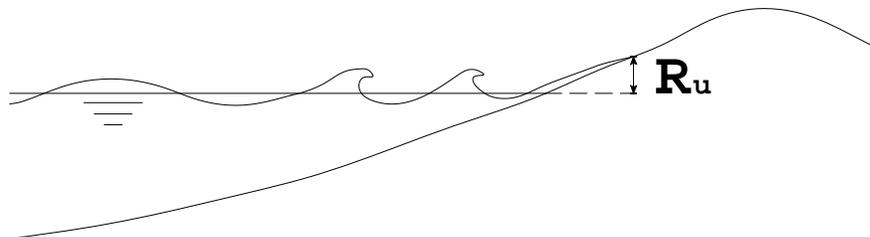


Figura 3.3 Ascenso máximo.

Para la determinación del ascenso máximo de una ola sobre un talud aún no ha sido posible establecer una ley única de aplicación general que tenga en consideración todas las posibles combinaciones geométricas e hidrodinámicas, por lo que su cálculo debe ser realizado empleando los métodos y ecuaciones que mejor se adapten al caso específico de estudio, teniendo en cuenta la semejanza con problemas ya resueltos con anterioridad.

3.4.3 Reflexión

Cualquier tipo de obstáculo que el oleaje encuentre (estructura marítima, playa, etc.) produce un proceso de reflexión a las ondas que será función, principalmente, de la forma en que dicho obstáculo disipe la energía.

Así, se entiende como reflexión del oleaje al proceso mediante el cual parte de la energía de una ola o tren de olas genera otro tren de olas en sentido contrario al incidir sobre un obstáculo. Durante este proceso, la energía no disipada es devuelta al mar.

La reflexión se define mediante el coeficiente de reflexión K_r que representa la proporción entre la altura de las olas incidente y reflejada (ecuación 3.9) o la proporción entre la energía del oleaje incidente y la energía del oleaje reflejado (ecuación 3.10):

$$K_r = \frac{H_R}{H_I} \quad \text{Ec. 3.9}$$

donde:

H_I = Altura de la ola
incidente
 H_R = Altura de la ola
reflejada

$$K_r = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad \text{Ec. 3.10}$$

donde:

E_I = Energía incidente
 E_R = Energía reflejada

Existen, también, expresiones matemáticas para definir a la reflexión en función de las características geométricas del talud de la estructura o playa donde el oleaje incide.

3.5 Análisis estadístico

Volviendo a la clasificación estadística, resulta necesario considerar al oleaje como un proceso estocástico obtenido a partir de una muestra que es resultado de una medición. En esta medición, se identifica un conjunto de ondas armónicas simples

que, superpuestas, crean la superficie libre del mar $\eta(x, y, t)$, la cual se define de la siguiente manera:

$$\eta(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[\frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t + \varepsilon_i \right] \quad \text{Ec. 3.11}$$

donde:

- a = Amplitud
- σ = Frecuencia angular
($2\pi/T$)
- T = Periodo de la onda
- θ = Ángulo de incidencia
con respecto al eje X
- ε = Fase
- x, y = Posición espacial de
la onda
- t = Tiempo

En este caso, tanto las amplitudes como las fases son consideradas como parámetros aleatorios ya, que de no considerarse al menos un solo parámetro aleatorio, el oleaje sería un fenómeno determinista.

De esta manera, el análisis del desplazamiento de la superficie libre del agua se expresa mediante la suma de un gran número de ondas sinusoidales representadas por

$$\begin{aligned} \eta(t) &= \sum_i \eta_i(t) \\ \eta(t) &= \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \varepsilon_i) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde las amplitudes de las ondas se definen como

$$a_{2j+1}^2 = 2S(\sigma_{2j+1})(\sigma_{2j+1} - \sigma_{2j}) \quad \text{Ec. 3.13}$$

la fase ε_i tiene distribución uniforme en el intervalo $(0, 2\pi)$, es decir,

$$\text{Prob}(\alpha \leq \varepsilon_{2j+1} < \alpha + d\alpha) = \frac{d\alpha}{2\pi} \quad \text{Ec. 3.14}$$

para $0 \leq \alpha \leq \alpha + d\alpha < 2\pi$
y cero en el resto

y, finalmente, $S(\sigma)$ es una función definida en el intervalo $(0, \infty)$ tal que

$$S(\sigma) \geq 0 \quad \forall \sigma$$

Ec. 3.15

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} S(\sigma) = 0$$

Para lograr un adecuado análisis estadístico del oleaje, la muestra objeto de estudio será un estado de mar, el cual puede ser tratado mediante dos distintos métodos: el análisis temporal y el análisis espectral.

3.5.1 Análisis temporal de un estado de mar

En el análisis temporal de un estado de mar se consideran las propiedades estadísticas de la muestra de oleaje y los parámetros y distribuciones de la superficie libre del agua a partir de una serie de tiempo. En esta muestra de oleaje, los parámetros fundamentales son la altura de la ola H y su periodo asociado T .

Así, para el análisis temporal, lo primeros parámetros que deben ser calculado a partir de la muestra, tanto para las alturas de ola como para los periodos, son los siguientes:

Tabla 3.5 Parámetros estadísticos para la altura de ola y su periodo

Parámetro	Ecuación	
Número de mediciones	N	Ec. 3.16
Media	$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$	Ec. 3.17
Media cuadrática	$X_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2$	Ec. 3.18
Media de los N/n valores mayores	$X_{1/n}$	Ec. 3.19
Valor significativo	$X_{1/3}$	Ec. 3.20
Valor un décimo	$X_{1/10}$	Ec. 3.21
Valor máximo del parámetro de la muestra	$X_{máx}$	Ec. 3.22

Sin embargo, los parámetros estadísticos más importantes que

definen un estado de mar a partir de una serie de tiempo son los siguientes:

Variación del nivel medio del mar

$$\eta(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad \text{Ec. 3.23}$$

donde:

η_i = Elevación de la superficie libre del mar en el tiempo t_i
 N = Número de mediciones

Altura media de ola

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad \text{Ec. 3.24}$$

Periodo medio de ola

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad \text{Ec. 3.25}$$

donde:

N_0 = Número de olas individuales de todo el registro
 H_i = Altura de ola
 T_i = Periodo de ola

Altura de ola cuadrática media

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad \text{Ec. 3.26}$$

Otros parámetros relevantes del oleaje son la altura de ola un medio $H_{1/2}$ que es el promedio del 50% de las olas más altas, la altura de ola un tercio o altura de ola significativa $H_{1/3}$ que es el promedio del 33% de las olas más altas, la altura de ola un décimo $H_{1/10}$ que es el promedio del 10% de las

olas más altas, la altura de ola un centésimo $H_{1/100}$ que es el promedio del 1% de las olas más altas, y la altura de ola un milésimo $H_{1/1000}$ que es el promedio del 0.1% de las olas más altas.

Para los periodos de ola, los parámetros relevantes son el periodo de ola un medio $T_{1/2}$ que es el promedio de los periodos asociados al 50% de las olas más altas, el periodo de ola un tercio o periodo de ola significativa $T_{1/3}$ que es el promedio de los periodos asociados al 33% de las olas más altas, el periodo de ola un décimo $T_{1/10}$ que es el promedio de los periodos asociados al 10% de las olas más altas, el periodo de ola un centésimo $T_{1/100}$ que es el promedio de los periodos asociados al 1% de las olas más altas, y el periodo de ola un milésimo $T_{1/1000}$ que es el promedio de los periodos asociados al 0.1% de las olas más altas.

Finalmente, la tabla 3.6 muestra un resumen de la metodología a seguir para la realización del análisis temporal de un estado de mar.

Tabla 3.6 Metodología para el análisis temporal de un estado de mar (Silva, 2005)

Etapa	Método
Corrección del nivel medio	Media aritmética Corrección lineal Corrección parabólica
Discretización de la señal (separa H y T)	Pasos ascendentes por cero Pasos descendentes por cero Crestas Valles
Estimación de cruces	
Evaluación de parámetros y velocidades orbitales	
Determinación de la dirección del oleaje	Gráfico con las velocidades

3.5.2 Análisis espectral de un estado de mar

En el análisis espectral de un estado de mar se considera el estudio del espectro energético de las ondas en el dominio del tiempo como representación de la distribución de la energía del

oleaje en función de las frecuencias. En este modelo, se considera que la muestra es la suma de un gran número de ondas sinusoidales en que la amplitud es función de la densidad espectral de energía.

Según la metodología para el análisis espectral, la energía total del oleaje por unidad de superficie está dada por:

$$E = \frac{1}{2} \gamma \left[\sum_i 2S(f_i) \Delta f_i \right] \quad \text{Ec. 3.27}$$

donde:

- $\gamma =$ Peso específico del agua de mar
- $S(f_i) =$ Densidad espectral de energía
- $\Delta f_i =$ Intervalo de frecuencia

siendo la densidad espectral de energía una función de la transformada rápida de Fourier $F(f_i)$ de la serie de datos de superficie libre, definida por

$$\begin{aligned} S(f_i) &= 0 && \text{para } i=0 \\ S(f_i) &= \frac{1}{2\Delta f} |2F(f_i)|^2 && \text{para } i=1, \dots, \frac{N}{2} \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.28}$$

el intervalo de frecuencia está dado por

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{1}{N\Delta t} \\ \Delta f &= \frac{1}{t_{m\acute{a}x}} \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.29}$$

la frecuencia máxima se determina como

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} \quad \text{Ec. 3.30}$$

y los coeficientes de Fourier se obtienen de

$$F(f_i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i2\pi f_i n \Delta t} \quad \text{Ec. 3.31}$$

Además, se pueden definir los parámetros característicos del espectro de oleaje en función de sus momentos:

Anchura espectral de 4to orden

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.32}$$

Anchura espectral de 2do orden

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.33}$$

Agudeza espectral o agudeza de pico

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \sum_{i=1}^N f(S(f_i))^2 \quad \text{Ec. 3.34}$$

Periodo medio de 1er orden

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad \text{Ec. 3.35}$$

Periodo medio de 2do orden

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad \text{Ec. 3.36}$$

Variación cuadrática media de la superficie libre

$$\eta_{rms} = \sqrt{m_0} \quad \text{Ec. 3.37}$$

Altura de ola cuadrática media

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0} \quad \text{Ec. 3.38}$$

Altura de ola de momento cero

$$H_{m_0} = 4.004\sqrt{m_0} \quad \text{Ec. 3.39}$$

Momento de orden n

$$m_n = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i^n S(f_i) \quad \text{Ec. 3.40}$$

De esta manera, es posible definir la metodología para la realización del análisis espectral de un estado de mar.

Tabla 3.7 Metodología para el análisis espectral de un estado de mar (Silva, 2005)

Etapa	Método
Corrección del nivel medio	Media aritmética Corrección lineal Corrección parabólica Filtro espectral
Aplicación de una función ventana	Ventana tipo trapezoide Ventana espectral
Estimación de las componentes de Fourier	
Cálculo del espectro de energía	
Suavizado del espectro de energía	
Parámetros espectrales	
Estimación de la dirección del oleaje	Espectro dimensional

3.5.3 Separación de oleaje incidente y oleaje reflejado

Para medir la reflexión del oleaje es necesario hacer una separación del oleaje incidente y el oleaje reflejado. Para lograr lo anterior existen distintos métodos, cada uno con sus condiciones particulares de aplicación y sus distintas consideraciones, a éstos se les conoce con el nombre de "métodos de separación de oleaje incidente y reflejado".

3.5.3.1 Método de Goda y Suzuki (1976)

Este método se basa en el desplazamiento de la superficie libre obtenido a partir de dos sensores separados por una distancia determinada y permite obtener tanto el coeficiente de reflexión como el desfase en cualquier oleaje unidireccional regular o irregular generado en laboratorio.

Con este método se logra separar un tren de oleaje con cualquier frecuencia f_n en una amplitud incidente a_{I_n} y una amplitud reflejada a_{R_n} . De esta manera, se puede obtener el espectro de energía para el oleaje incidente y el oleaje reflejado.

Debido a que la adquisición digital de los datos de posición de la superficie libre del agua se hace en diferentes instantes, el registro resulta ser una función discreta. Para poder ser empleados estos datos en el análisis, es necesario representarlos mediante una función continua, para lo cual es necesario aplicarles un análisis de Fourier discreto (ecuación 3.41).

$$f(t_i) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) + B_n \text{sen}\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \right] \quad \text{Ec. 3.41}$$

donde:

$f(t_i)$ = Función cualquiera que se obtendrá a partir de los datos de los sensores
 t_i = Tiempo en el instante i
 T = Periodo de ola

Los coeficientes de Fourier A_0 , A_n y B_n pueden ser obtenidos mediante las ecuaciones siguientes:

$$A_0 = \frac{1}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \Delta t \quad \text{Ec. 3.42}$$

$$A_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Ec. 3.43}$$

$$B_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \text{sen}\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Ec. 3.44}$$

Debido a que el oleaje $f(t)$ generado utiliza el nivel medio de la superficie libre del agua como paso por cero, el

coeficiente A_0 es nulo. Por ello, las áreas positivas y negativas de la función $f(t)$ se compensan, obteniéndose el espectro de energía del oleaje como sigue:

$$f(t_i) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(\omega_n t) + B_n \cos(\omega_n t)] \quad \text{Ec. 3.45}$$

donde los coeficientes A_n y B_n se obtienen mediante las ecuaciones 3.43 y 3.44.

Por otro lado, el oleaje irregular se expresa como la suma de diferentes olas regulares mediante la ecuación:

$$\eta(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad \text{Ec. 3.46}$$

de manera que puede expresarse la superposición de un oleaje irregular con su oleaje reflejado de la siguiente manera:

$$\eta(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_{I_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_{I_n})] + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{R_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_{R_n})] \quad \text{Ec. 3.47}$$

Para lograr la separación del oleaje incidente a_{I_n} y el oleaje reflejado a_{R_n} basta con igualar la ecuación teórica del oleaje irregular $\eta(t, x)$ (ecuación 3.47) con la función $f(t)$ que representa al registro medido por los sensores obtenida mediante el análisis de Fourier (ecuación 3.45).

$$\eta(t, x) = f(t) \quad \text{Ec. 3.48}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} [a_{I_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_{I_n})] + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{R_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_{R_n})] = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(\omega_n t) + B_n \cos(\omega_n t)] \quad \text{Ec. 3.48}$$

De esta igualdad (ecuación 3.48) resultan, nuevamente, los coeficientes A_n y B_n (ecuación 3.49 y ecuación 3.50, respectivamente).

$$A_n = a_{I_n} \cos(k_n x + \varepsilon_{I_n}) + a_{R_n} \cos(k_n x + \varepsilon_{R_n}) \quad \text{Ec. 3.49}$$

$$B_n = a_{I_n} \text{sen}(k_n x + \varepsilon_{I_n}) + a_{R_n} \text{sen}(k_n x + \varepsilon_{R_n}) \quad \text{Ec. 3.50}$$

En las ecuaciones anteriores se tienen como incógnitas la altura de ola incidente a_{I_n} con su desfase ε_{I_n} y la altura de ola reflejada a_{R_n} con su desfase ε_{R_n} . Además, del análisis de Fourier se tienen, como datos, los valores de los coeficientes A_n y B_n obtenidos mediante las ecuaciones 3.43 y 3.44. Así, al emplear los registros de dos sensores distintos, se obtiene un sistema de 4 ecuaciones (2 ecuaciones por sensor) con 4 incógnitas que permitirá determinar las características del oleaje incidente y del oleaje reflejado.

Con los datos obtenidos por el primer sensor se plantea la ecuación siguiente:

$$\eta_1(x_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{1_n} \cos(\omega_n t) + B_{1_n} \text{sen}(\omega_n t) \quad \text{Ec. 3.51}$$

Con los datos obtenidos por el segundo sensor se obtiene:

$$\eta_2(x_2, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{2_n} \cos(\omega_n t) + B_{2_n} \text{sen}(\omega_n t) \quad \text{Ec. 3.52}$$

Despejando A_{1_n} , B_{1_n} , A_{2_n} y B_{2_n} se obtienen las ecuaciones:

$$A_{1_n} = a_{I_n} \cos \phi_{I_n} + a_{R_n} \cos \phi_{R_n} \quad \text{Ec. 3.53}$$

$$B_{1_n} = a_{I_n} \text{sen} \phi_{I_n} - a_{R_n} \text{sen} \phi_{R_n} \quad \text{Ec. 3.54}$$

$$A_{2_n} = a_{I_n} \cos(k_n \Delta x + \phi_{I_n}) + a_{R_n} \cos(k_n \Delta x + \phi_{R_n}) \quad \text{Ec. 3.55}$$

$$B_{2_n} = a_{I_n} \text{sen}(k_n \Delta x + \phi_{I_n}) - a_{R_n} \text{sen}(k_n \Delta x + \phi_{R_n}) \quad \text{Ec. 3.56}$$

donde:

A_{1_n} = Coeficiente de Fourier calculado a partir de los registros de los sensores (ecuación 3.43)

B_{1_n} = Coeficiente de Fourier calculado a partir de los registros de los sensores (ecuación 3.44)

$$3.44)$$

A_{2_n} = Coeficiente de Fourier calculado a partir de los registros de los sensores (ecuación 3.43)

B_{2_n} = Coeficiente de Fourier calculado a partir de los registros de los sensores (ecuación 3.44)

Δx = Distancia entre los dos sensores

ϕ_{I_n} = Fase en el primer sensor (ecuación 3.57)

ϕ_{R_n} = Fase en el primer sensor (ecuación 3.58)

La fase en el primer sensor se calcula mediante las siguientes expresiones, donde x es su posición:

$$\phi_{I_n} = k_n x + \varepsilon_{I_n} \quad \text{Ec. 3.57}$$

$$\phi_{R_n} = k_n x + \varepsilon_{R_n} \quad \text{Ec. 3.58}$$

De esta manera, las ecuaciones 3.53, 3.54, 3.55 y 3.56 forman un sistema de 4 ecuaciones lineales con 4 incógnitas a_{I_n} , a_{R_n} , ϕ_{I_n} y ϕ_{R_n} cuya solución está dada por las ecuaciones 3.59, 3.60, 3.61 y 3.62.

$$a_{I_n} = \frac{\sqrt{[A_{2_n} - A_{1_n} \cos(k_n \Delta x) - B_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)]^2 + [B_{2_n} + B_{1_n} \cos(k_n \Delta x) - A_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)]^2}}{2 \text{sen}(k_n \Delta x)} \quad \text{Ec. 3.59}$$

$$a_{R_n} = \frac{\sqrt{[A_{2_n} - A_{1_n} \cos(k_n \Delta x) + B_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)]^2 + [B_{2_n} - B_{1_n} \cos(k_n \Delta x) - A_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)]^2}}{2 \text{sen}(k_n \Delta x)} \quad \text{Ec. 3.60}$$

$$\phi_{I_n} = \tan^{-1} \left(\frac{A_{2_n} - A_{1_n} \cos(k_n \Delta x) + B_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)}{B_{2_n} - B_{1_n} \cos(k_n \Delta x) + A_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)} \right) \quad \text{Ec. 3.61}$$

$$\phi_{R_n} = \tan^{-1} \left(\frac{A_{2_n} - A_{1_n} \cos(k_n \Delta x) + B_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)}{B_{2_n} - B_{1_n} \cos(k_n \Delta x) - A_{1_n} \text{sen}(k_n \Delta x)} \right) \quad \text{Ec. 3.62}$$

3.5.3.2 Método de Mansard y Funke (1980)

Este método de separación de oleaje incidente y reflejado se basa en el ajuste por mínimos cuadrados, utilizando 3 sensores de superficie libre del agua.

La consideración inicial es la medición simultánea de 3 puntos conocidos durante un tiempo $t_{m\acute{a}x}$ tal que $0 \leq t \leq t_{m\acute{a}x}$. Además, introduce una nueva variable de error. De esta manera, se obtiene el valor de la reflexión que minimiza el error en el método de mínimos cuadrados.

Inicialmente, el método de Mansard y Funke hace las mismas consideraciones que el método de Goda y Suzuki: aplicar un análisis de Fourier discreto a los datos obtenidos por los sensores (ecuación 3.41).

$$f(t_i) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) + B_n \text{sen}\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \right] \quad \text{Ec. 3.41}$$

Al igual que en el método de Goda y Suzuki, los valores de los coeficientes de Fourier A_0 , A_n y B_n se obtienen mediante las ecuaciones 3.42, 3.43 y 3.44.

$$A_0 = \frac{1}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \Delta t \quad \text{Ec. 3.42}$$

$$A_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Ec. 3.43}$$

$$B_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \text{sen}\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Ec. 3.44}$$

La diferencia con el método de Goda y Suzuki es la reformulación de la serie de Fourier que, expresada de manera más compacta mediante una amplitud y una fase, queda como sigue:

$$f(t_i) = \frac{E_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \text{sen} \left(\frac{2\pi m t_i}{T} - \alpha_n \right) \quad \text{Ec. 3.63}$$

donde E_n y α_n se obtienen con

$$E_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad \text{Ec. 3.64}$$

$$\alpha_n = \tan^{-1} \left(\frac{B_n}{A_n} \right) \quad \text{Ec. 3.65}$$

En este caso, E_0 debe ser nulo debido a que el oleaje $f(t)$ generado utiliza como paso por cero el nivel medio de la superficie libre del agua y las áreas positivas y negativas se compensan. Así, el registro de la superficie libre del agua obtenido por los sensores se expresa de la siguiente manera:

$$f(t_i) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \text{sen} \left(\frac{2\pi m t_i}{T} - \alpha_n \right) \quad \text{Ec. 3.66}$$

Considerando, por otro lado, que el oleaje irregular registrado por un sensor p puede expresarse como la suma de diferentes olas regulares, se tiene:

$$\eta_p(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{sen} \left(-\frac{2\pi m t}{T} + \frac{2\pi x}{L_n} + \varepsilon_{p,n} \right) \quad \text{Ec. 3.67}$$

Si se tiene un sensor p ubicado en la posición $x=X1$, el registro debido a la superposición del oleaje incidente y el oleaje reflejado queda como:

$$\begin{aligned} \eta_{p=1}(x = X1, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} a_{I_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi m t}{T} + \frac{2\pi(X1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n} \right) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} a_{R_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi m t}{T} + \frac{2\pi(X1 + 2XR1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n} + \gamma_{1,n} \right) + \Omega_1(t) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.68}$$

donde:

$\Omega_1(t)$ = Interferencias y posibles errores de la ecuación

$XR1$ = Distancia del sensor
al punto donde el
oleaje es reflejado

Al considerar otro sensor p situado en la posición $x = X1 + X1P$, el registro de este nuevo sensor será:

$$\eta_p(x = X1 + X1P, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{I_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + X1P)}{L_n} + \varepsilon_{p,n} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} a_{R_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + 2XR1 - X1P)}{L_n} + \varepsilon_{p,n} \right) + \Omega_p(t)$$

Ec. 3.69

Al igualar la ecuación teórica de oleaje irregular (ecuación 3.68) con la función obtenida con el análisis de Fourier para los datos medidos por los sensores (ecuación 3.66), es posible realizar la separación del oleaje incidente del oleaje reflejado (ecuación 3.70).

$$\eta_{p=1}(x = X1, t) = f(t_i)$$

Ec. 3.70

Para un primer sensor:

$$a_{I_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n} \right) + a_{R_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + 2XR1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n} \right) + \Omega_1(t) = E_n \text{sen} \left(\frac{2\pi n t}{T} - \alpha_n \right)$$

Ec. 3.70

Para otro sensor:

$$a_{I_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + X1P)}{L_n} + \varepsilon_{p,n} \right) + a_{R_n} \text{sen} \left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(X1 + 2XR1 - X1P)}{L_n} + \varepsilon_{p,n} \right) + \Omega_p(t) = E_n \text{sen} \left(\frac{2\pi n t}{T} - \alpha_n \right)$$

Ec. 3.71

Expresado en forma polar y eliminando los términos iguales en ambas igualdades, se obtiene, para el primer sensor:

$$B_{1,n} = \underbrace{a_{I_n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right)}}_{Z_{I_n}} + \underbrace{a_{R_n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1+2XR1)}{L_n} + \varepsilon_{1,n} + \gamma_{1,n}\right)}}_{Z_{R_n}} + \underbrace{Y_{1,n} e^{i\rho_{1,n}}}_{Z_{error_{1,n}}} \quad \text{Ec. 3.72}$$

para el segundo sensor:

$$B_{p,n} = \underbrace{a_{I_n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1+X1P)}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right)}}_{Z_{I_n}} + \underbrace{a_{R_n} e^{i\left(\frac{2\pi(X1+2XR1-X1P)}{L_n} + \varepsilon_{p,n} + \gamma_{p,n}\right)}}_{Z_{R_n}} + \underbrace{Y_{p,n} e^{i\rho_{1,n}}}_{Z_{error_{1,n}}} \quad \text{Ec. 3.73}$$

siendo

$$B_{p,n} = -A_n \cdot e^{\alpha_n} \quad \text{Ec. 3.74}$$

Agrupando términos, se obtiene las siguientes expresiones:

$$B_{1,n} = Z_{I_n} + Z_{R_n} + Z_{error_{1,n}} \quad \text{Ec. 3.75}$$

$$B_{p,n} = Z_{I_n} \cdot e^{i\left(\frac{2\pi(X1P)}{L_n}\right)} + Z_{R_n} \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi(X1P)}{L_n}\right)} + Z_{error_{1,n}} \quad \text{Ec. 3.76}$$

en las que los valores de $B_{1,n}$ y $B_{p,n}$ se conocen a partir del análisis de Fourier hecho a los datos obtenidos por los sensores.

En las ecuaciones anteriores (ecuación 3.75 y 3.76), se puede introducir una nueva variable para simplificar:

$$\psi_{p,n} = \frac{2\pi(X1P)}{L_n} \quad \text{Ec. 3.77}$$

$$\psi_{p,n} = k_n(X1P)$$

Con la cual, quedan reescritas como sigue:

$$Z_{I_n} \cdot e^{i\psi_{1,n}} + Z_{R_n} \cdot e^{-i\psi_{1,n}} - B_{1,n} = -Z_{error_{1,n}} \quad \text{Ec. 3.78}$$

$$Z_{I_n} \cdot e^{i\psi_{p,n}} + Z_{R_n} \cdot e^{-i\psi_{p,n}} - B_{p,n} = -Z_{error_{p,n}} \quad \text{Ec. 3.79}$$

A partir de aquí, se aplica el método de mínimos cuadrados para encontrar los valores de Z_{I_n} y Z_{R_n} cuya suma del cuadrado de $Z_{error_{p,n}}$ sea mínima (ecuación 3.80).

$$\sum_{p=1}^m (Z_{error,p,n}) = \text{mínimo} \quad \text{Ec. 3.80}$$

Para encontrar los valores de Z_{I_n} y Z_{R_n} por mínimos cuadrados es necesario resolver el sistema de ecuaciones expresado en forma matricial como (ecuación 3.81 y ecuación 3.82):

$$Z_n = Y_n \cdot D_n \quad \text{Ec. 3.81}$$

$$\begin{pmatrix} \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{-i\psi_{p,n}} \\ \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{i\psi_{p,n}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M & \sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} \\ \sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{I_n} \\ Z_{R_n} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3.82}$$

Cuya solución es

$$\begin{pmatrix} Z_{I_n} \\ Z_{R_n} \end{pmatrix} = \frac{1}{M^2 - \left[\sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} \cdot \sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} \right]} \begin{pmatrix} M & -\sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} \\ \sum_{p=1}^M e^{-2i\psi_{p,n}} & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{-i\psi_{p,n}} \\ \sum_{p=1}^M B_{p,n} \cdot e^{i\psi_{p,n}} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3.83}$$

La posición de la superficie libre del agua está representada por Z_{I_n} para el oleaje incidente $\eta_I = (x = X1, t)$ y Z_{R_n} para el oleaje reflejado $\eta_R = (x = X1, t)$.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Instalación experimental

El presente trabajo se desarrolló en el Laboratorio del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería (II) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En este laboratorio se cuenta con un canal de oleaje de 37 m de largo por 0.8 m de ancho y 1.2 m de profundidad (figura 4.1).



Figura 4.1 Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería.

Esta instalación tiene la capacidad de generar oleaje monocromático, espectral y arbitrario (definido por el usuario) y cuenta con un sistema de absorción de las ondas re-reflejadas en tiempo real (figura 4.2 y figura 4.3).



Figura 4.2 Generador de olas del canal de oleaje.

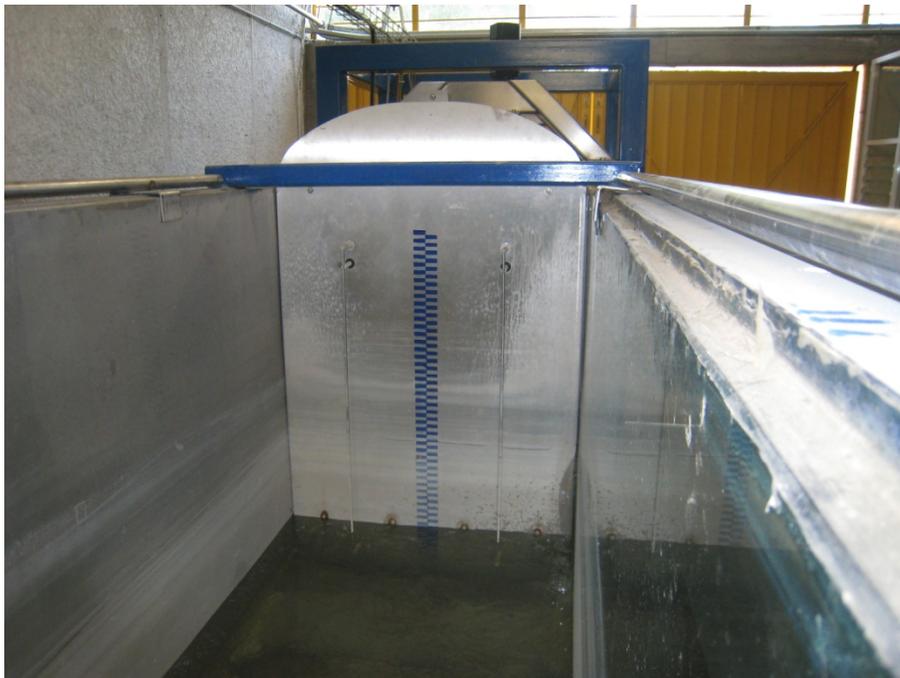


Figura 4.3 Generador de olas del canal de oleaje.

Dentro del equipo de medición, el laboratorio está equipado con sensores de nivel de superficie libre, velocímetros acústicos de efecto Doppler, velocímetro por trazado de partículas, sensores de presión, equipo topográfico y sistemas de video grabación convencional y de alta velocidad (figura 4.4 y figura 4.5).

Así mismo, se cuenta con un sistema de bombeo para generación de oleaje corriente.



Figura 4.4 Sensores de nivel de superficie libre.



Figura 4.5 Velocímetro acústico de efecto Doppler.

4.2 Instrumentación

Para la realización de los experimentos se emplearon 6 sensores de nivel de superficie libre, ordenados en 2 grupos de 3 sensores cada uno (tabla 4.1 y figura 4.6). El primer grupo, que se encuentra más alejado de la pala generadora de olas, se empleó para determinar los coeficientes de reflexión, mientras que el segundo grupo de sensores ubicado cerca de la pala y donde la profundidad del fondo es constante se empleó como apoyo para determinar posibles modificaciones al oleaje.

Tabla 4.1 Instalación de los sensores sobre el canal de oleaje.

Tipo de Sensor	Distancia a la pala (m)	Profundidad de instalación (cm)
Nivel	11.0	45.0
Nivel	11.8	45.0
Nivel	12.1	45.0
Nivel	18.4	31.1
Nivel	19.1	30.0
Nivel	19.5	27.5

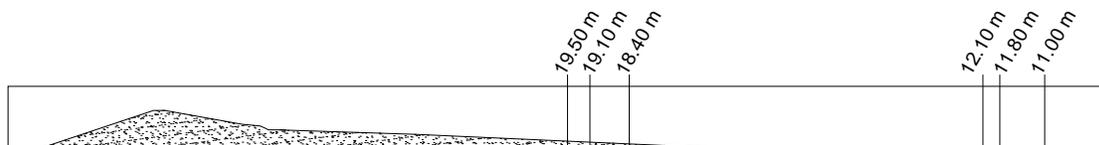


Figura 4.6 Instalación de los sensores sobre el canal.

4.3 Modelo experimental

Se realizaron tres fases de experimentación: determinación del perfil inicial, obtención de los perfiles deformados para diferentes condiciones de oleaje y evaluación del funcionamiento del tapete de grava como protección de playa.

4.3.1 Determinación del perfil inicial

En una primera fase del trabajo, en el laboratorio se realizó un grupo de experimentos a partir de los cuales se determinó un perfil de playa estable propio de la instalación experimental. Para ello, se colocó arena de 0.3 mm de diámetro medio a volteo simple y, a partir de ahí, se generó un tren de olas irregular con altura de ola significativa de 15cm y periodo pico de 2s.

Se permitió al perfil deformarse libremente durante 72 horas, tiempo en el que, mediante inspección visual, se verificó que no se presentara más deformación significativa. El perfil alcanzado es el que se utilizó como perfil inicial para el resto de los experimentos (figura 4.7). Es importante señalar que este perfil se considera que corresponde a una condición de daño luego de algún evento energético y que los ensayos posteriores corresponden a una "nueva tormenta".



Figura 4.7 Configuración inicial del perfil de playa.

4.3.2 Obtención de los perfiles deformados para diferentes condiciones de oleaje

El primer grupo de ensayos, correspondientes a la fase 2, consistió en obtener los perfiles estables para diferentes condiciones de oleaje (tabla 4.2) sin tapete de protección.

Lo anterior se consiguió permitiendo al perfil deformarse hasta alcanzar una condición estable en que no hubiera más deformaciones significativas. El tiempo máximo en que se alcanzó la condición estable fue de 293 minutos.

De las pruebas realizadas en la fase 2, se obtuvieron perfiles en erosión y perfiles en acreción. Finalmente, se registró la topografía de los perfiles deformados sin tapete de protección.

Tabla 4.2 Condiciones de oleaje en la fase 2.

Periodo (s)	Altura de ola (cm)	Tipo de oleaje	Energía
1	12	Regular	Normal
1	16	Regular	Media
3	12	Regular	Alta
3	16	Regular	Muy alta

4.3.3 Evaluación del funcionamiento del tapete de grava como protección de playa

La tercera fase de experimentación consistió en colocar el tapete de protección y probar los mismos trenes de oleaje de la fase 2 (figuras 4.8, 4.9 y 4.10).

Para determinar la zona de colocación del tapete de protección sobre el perfil de playa en su configuración inicial, se eligió una zona donde, para todas las condiciones de oleaje, se presenta el rompimiento de las olas.

Para definir la longitud del tapete de grava, la zona de colocación cumple con ser aquella en la cual la regeneración de las olas, de presentarse, es más significativa.

Para controlar las condiciones de las pruebas, se pesó cada uno de los tapetes con las gravas secas y mojadas antes de ser colocados de manera definitiva para la prueba. De esta manera fue posible recuperar las piezas del tapete que fueron transportadas durante el ascenso una vez finalizadas las pruebas.

La propuesta inicial implicó el ensayo de 4 tapetes con grava de diferentes diámetros medios, a saber: $\frac{1}{4}$ in, $\frac{1}{2}$ in, 1 in y 2 in. Sin embargo, los tapetes de grava de $\frac{1}{4}$ in y $\frac{1}{2}$ in sufrieron importantes daños y las gravas que los componían fueron arrastradas durante el ascenso, de manera que no ofrecieron protección alguna a la playa por lo que fueron eliminados de este estudio quedando, únicamente, los tapetes con mayor tamaño de grava.

Una vez definida la zona de colocación, longitud total y diámetro medio de las gravas de los tapetes de protección propuestos, el siguiente paso fue evaluar su funcionamiento para las mismas condiciones de oleaje empleadas para el perfil de playa sin tapete de protección (tabla 4.3). La duración de

las pruebas fue el determinado anteriormente: 293 min. Al igual que en la fase 2, se registró la topografía de los perfiles deformados, esta vez, con tapete de protección (figura 4.11).



Figura 4.8 Instalación del tapete de protección, vista superior.



Figura 4.9 Instalación del tapete de protección, vista interior.

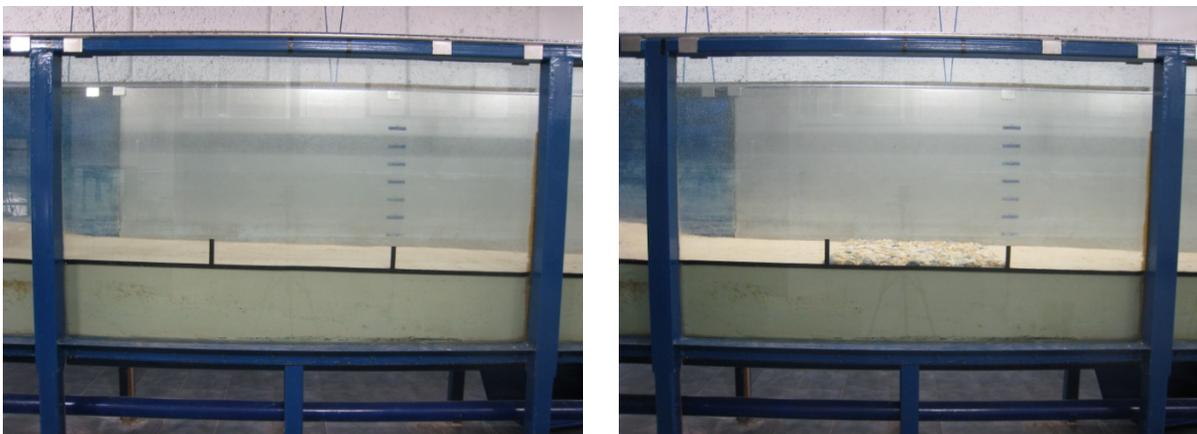


Figura 4.10 Instalación del tapete de protección, vista frontal.

Tabla 4.3 Diseño de las pruebas en la fase 3.

Periodo (s)	Altura de ola (cm)	Diámetro de las gravas del tapete (in)	Peso del tapete de gravas (kg)	Tipo de oleaje	Energía
1	12	1.00	19.04	Regular	Normal
1	16	1.00	19.04	Regular	Media
3	12	1.00	19.04	Regular	Alta
3	16	1.00	19.04	Regular	Muy alta
1	12	2.00	25.12	Regular	Normal
1	16	2.00	25.12	Regular	Media
3	12	2.00	25.12	Regular	Alta
3	16	2.00	25.12	Regular	Muy alta



Figura 4.11 Configuración deformada del perfil de playa para periodo $T=3s$, altura de ola $H=12cm$, tiempo $t=293min$ y tapete con grava de diámetro $\phi=2in$.

V. RESULTADOS

5.1 Topografía

Con los datos de topografía registrados durante las 3 fases de experimentación se hizo una comparación de los perfiles deformados obtenidos con y sin tapete de protección.

Además, se determinó la magnitud transversal de la ganancia en playa seca, definida como la distancia horizontal entre el perfil inicial y el perfil final (en estado deformado) donde el nivel medio de la superficie libre del agua es igual a cero.

Para los perfiles en erosión ($T=1s$, $H=12cm$ y $T=1s$, $H=16cm$), se observa que la magnitud horizontal de la zona erosionada en el nivel medio de la superficie libre del agua (profundidad nula) es menor para el tapete de grava con diámetro medio $\phi=1in$ que para el tapete de grava con diámetro medio $\phi=2in$.

Para todos los casos con tapete, la erosión es significativamente menor que para el perfil de playa sin tapete de protección (tablas 5.1, 5.2 y figuras 5.1 y 5.2).

La magnitud transversal de la ganancia en playa seca para los perfiles en acreción ($T=3s$, $H=12cm$ y $T=3s$, $H=16cm$) es mayor para el tapete de grava con diámetro medio $\phi=1in$ que para el tapete de grava con diámetro medio $\phi=2in$. Esto representa un avance de la línea de costa en dirección hacia el mar mayor mientras menor sea el tamaño de las gravas del tapete. En ambos casos, la ganancia en playa seca es mucho mayor para playas con tapete de protección que para playas no protegidas (tablas 5.3, 5.4 y figuras 5.3 y 5.4).

Tabla 5.1 Ganancia en playa seca para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$.

Tipo de prueba	Ganancia en playa seca (m)	Tipo de proceso
Sin tapete	-0.17	Erosión
Tapete 1 in	-0.08	Erosión
Tapete 2 in	-0.12	Erosión

Tabla 5.2 Ganancia en playa seca para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$.

Tipo de prueba	Ganancia en playa seca (m)	Tipo de proceso
Sin tapete	-0.14	Erosión
Tapete 1 in	-0.03	Erosión
Tapete 2 in	-0.08	Erosión

Tabla 5.3 Ganancia en playa seca para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$.

Tipo de prueba	Ganancia en playa seca (m)	Tipo de proceso
Sin tapete	0.37	Acreción
Tapete 1 in	0.68	Acreción
Tapete 2 in	0.65	Acreción

Tabla 5.4 Ganancia en playa seca para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$.

Tipo de prueba	Ganancia en playa seca (m)	Tipo de proceso
Sin tapete	0.71	Acreción
Tapete 1 in	1.37	Acreción
Tapete 2 in	1.11	Acreción

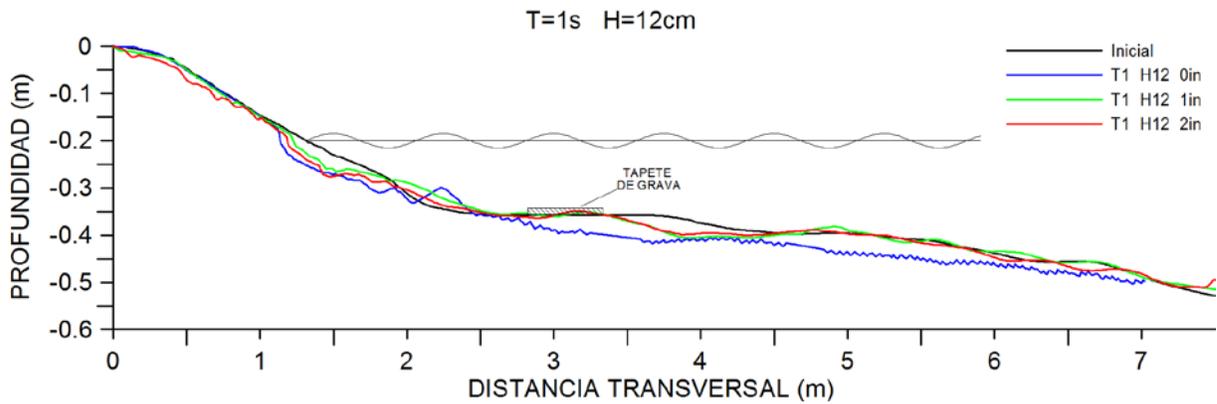


Figura 5.1 Perfiles deformados para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$.

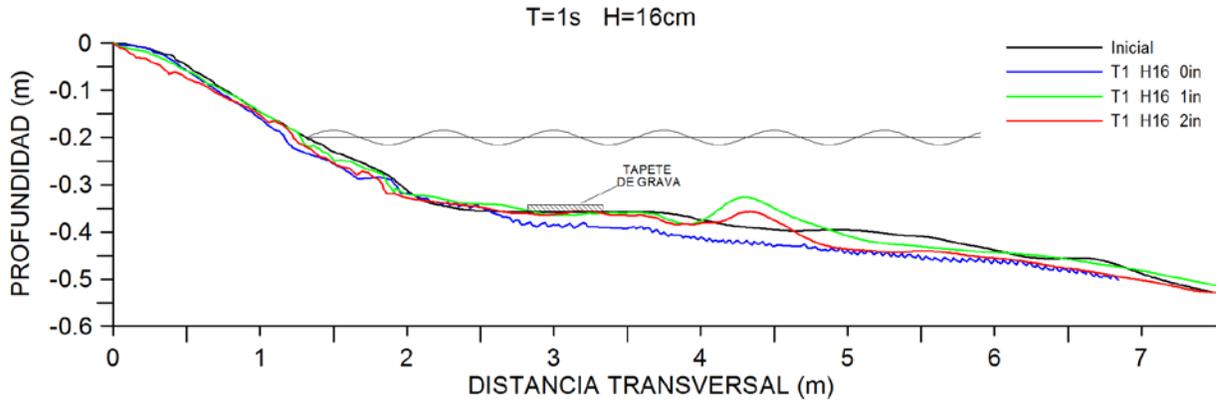


Figura 5.2 Perfiles deformados para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$.

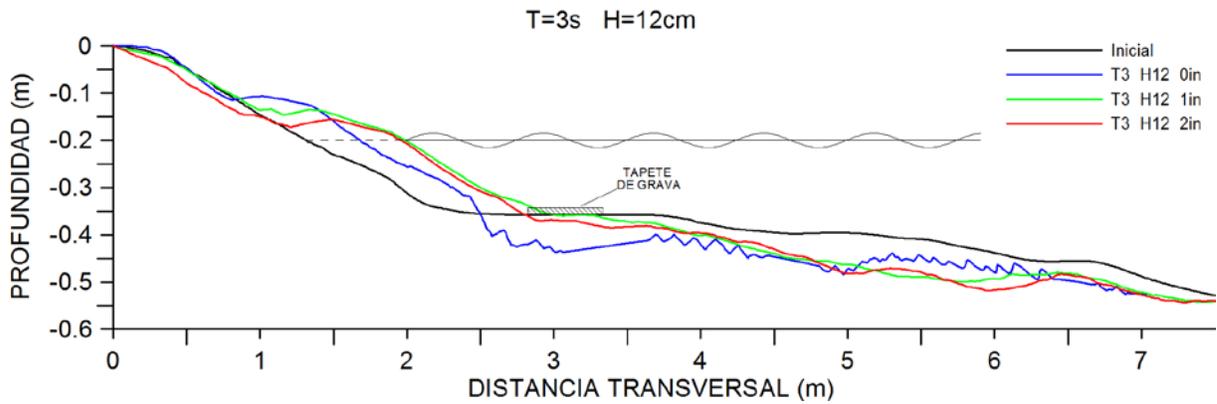


Figura 5.3 Perfiles deformados para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$.

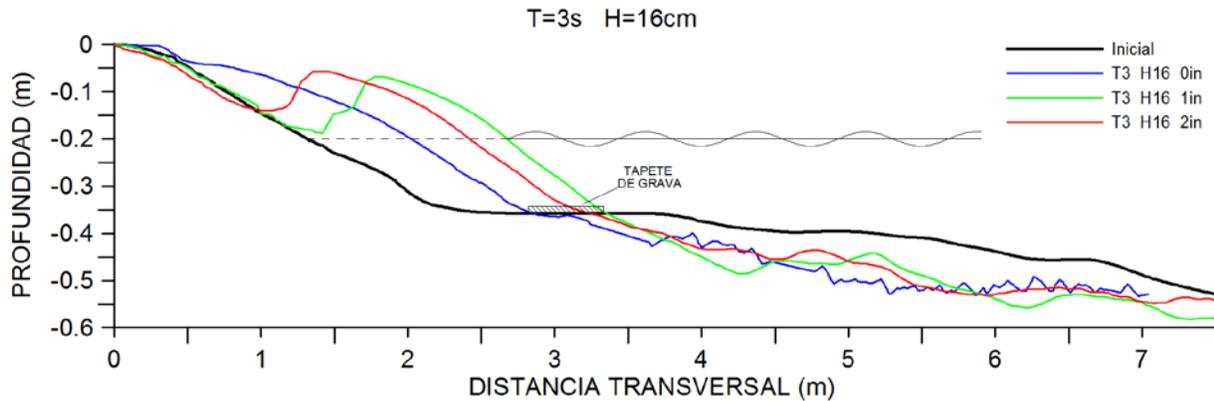


Figura 5.4 Perfiles deformados para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$.

Se observa que, para todos los casos ($T=1s$, $H=12cm$; $T=1s$, $H=16cm$; $T=3s$, $H=12cm$ y $T=3s$, $H=16cm$), el perfil de playa se apoya sobre el tapete de grava, creando un perfil colgado. Además, también para todos los casos, se observa que en la zona de someramiento la pérdida de sedimento es menor cuando se colocó el tapete de protección que cuando no se usó, evitando, con ello, el transporte hacia "aguas profundas".

Finalmente, en la zona de someramiento, la formación de pequeñas barras es menor cuando se usó el tapete de protección que cuando no se usó, teniéndose un perfil más "lineal".

Para el caso de periodo de ola $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$ se observa la formación de una barra antes del tapete de grava. Esta barra brinda protección adicional a la playa e, incluso, protege al tapete de grava, evitando su destrucción.

El Anexo A presenta una secuencia fotográfica de la evolución temporal del perfil de playa durante la prueba correspondiente a periodo de ola $T=3s$, altura de ola $H=12cm$ y tapete con grava de diámetro $\phi=1in$.

5.2 Oleaje

Los resultados de las pruebas de laboratorio muestran una disminución en la energía de oleaje por efectos de la disipación por fricción y turbulencia con el tapete para las pruebas con periodo de ola $T=1s$ y aumento en la reflexión para las pruebas con periodo de ola $T=3s$.

El Anexo B contiene, de manera meramente ilustrativa, una

secuencia fotográfica que muestra la propagación del oleaje sobre el perfil de playa.

5.2.1 Forzamiento de la rotura y definición de la profundidad de cierre

Al constituir una discontinuidad en el perfil, se redefine la profundidad de cierre y la rotura es forzada a presentarse sobre el tapete de protección (figuras 5.5, 5.6 y 5.7), con lo que se logra reducir significativamente la puesta en suspensión de los sedimentos finos, incluso para los trenes de oleaje en que se presenta rotura tipo voluta altamente energética.

Las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 muestran la secuencia en que se presenta el fenómeno de rotura en toda la longitud del tapete para las condiciones más desfavorables: olas con periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$ (altamente energético), tiempo $t=180min$ (perfil aún inestable) y diámetro medio de grava del tapete $\phi=lin$ (menor tamaño de las piezas).

5.2.2 Cambios en el tipo de rotura

De una inspección visual realizada durante las diferentes fases de experimentación se determinaron los tipos de rotura presentados (tabla 5.5). Se observó en casi todos los casos que, al colocar el tapete de protección, la rotura se transformó en una condición más disipativa.

Tabla 5.5 Cambios en el tipo de rotura

Periodo (s)	Altura (cm)	Diámetro (in)	Rotura Sin Tapete	Rotura Con Tapete
1	12	1.00	Voluta	Voluta
1	12	2.00	Voluta	Descrestamiento
1	16	1.00	Descrestamiento	Voluta
1	16	2.00	Descrestamiento	Voluta
3	12	1.00	Colapso	Voluta
3	12	2.00	Colapso	Voluta
3	16	1.00	Voluta	Voluta
3	16	2.00	Voluta	Voluta



Figura 5.5 Forzamiento de la rotura sobre el tapete.



Figura 5.6 Forzamiento de la rotura sobre el tapete.



Figura 5.7 Forzamiento de la rotura sobre el tapete.

5.2.3 Coeficientes de reflexión

Con los datos de oleaje obtenidos a partir de las mediciones hechas con los sensores de nivel (superficie libre del agua) se calcularon los coeficientes de reflexión mediante los métodos de separación de oleaje incidente y oleaje reflejado de Goda y Suzuki (1976) y Mansard y Funke (1980). Los resultados obtenidos con cualquiera de los dos métodos muestran comportamientos similares en la evolución temporal del coeficiente de reflexión (figura 5.8 y figura 5.9, figura 5.10 y figura 5.11, figura 5.12 y figura 5.13, figura 5.14 y figura 5.15), por lo que se considera que ambos métodos se validan uno al otro.

Las pruebas correspondientes a $T=1s$ y $H=16cm$ (figura 5.10 y figura 5.11), $T=3s$ y $H=12cm$ (figura 5.12 y figura 5.13) y $T=3s$ y $H=16cm$ (figura 5.14 y figura 5.15) presentan comportamientos similares del coeficiente de reflexión para los perfiles de playa con o sin tapete de protección, mostrando que, a pesar de la disminución en la energía de oleaje para periodos $T=1s$ o el aumento en la reflexión para periodos $T=3s$ como consecuencia de la implementación del tapete de grava de protección, el comportamiento hidrodinámico se mantuvo sin cambios significativos. Para el caso de $T=1s$ y $H=12cm$ (figura 5.8 y figura 5.9), la evolución temporal del coeficiente de reflexión presenta diferencias entre el perfil con y sin tapete; sin embargo, al alcanzarse el equilibrio morfodinámico en $t=293min$ el valor del coeficiente de reflexión es similar con o sin tapete, de manera que el tapete no cambia el comportamiento hidrodinámico una vez alcanzado el equilibrio morfológico.

La tendencia horizontal en la evolución temporal del coeficiente de reflexión en las pruebas de $T=1s$ y $H=12cm$ (figura 5.8 y figura 5.9), $T=1s$ y $H=16cm$ (figura 5.10 y figura 5.11) y $T=3s$ y $H=12cm$ (figura 5.12 y figura 5.13) confirma la tendencia del perfil a alcanzar el equilibrio hidrodinámico que, a su vez, depende únicamente de que el perfil alcance su equilibrio morfológico ya que las condiciones de oleaje no cambian con el tiempo (oleaje regular).

Finalmente, para la prueba de $T=3s$ y $H=16cm$ (figura 5.14 y figura 5.15), el coeficiente de reflexión toma valores muy altos, hecho que se confirma con la pendiente tan pronunciada que presenta el perfil deformado con o sin tapete para esta prueba (figura 5.4)

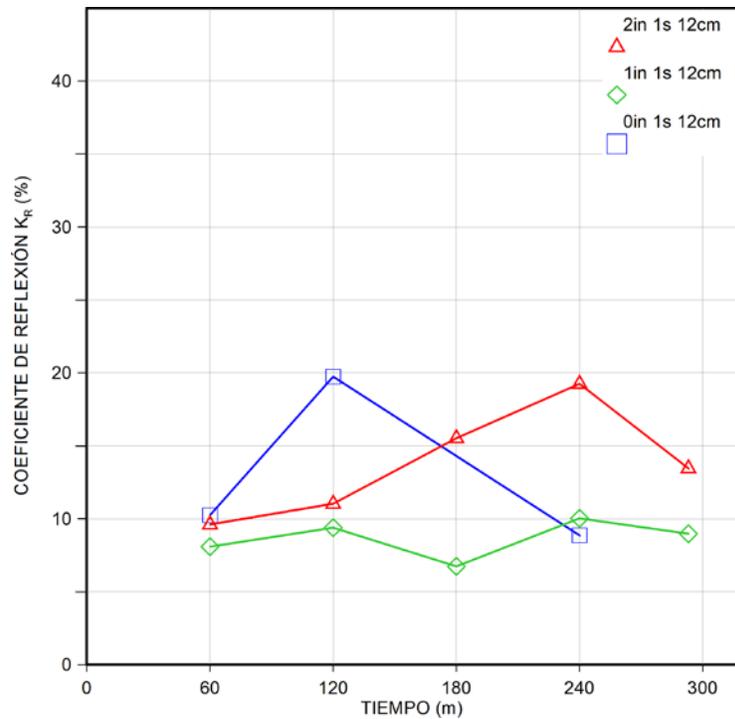


Figura 5.8 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Goda.

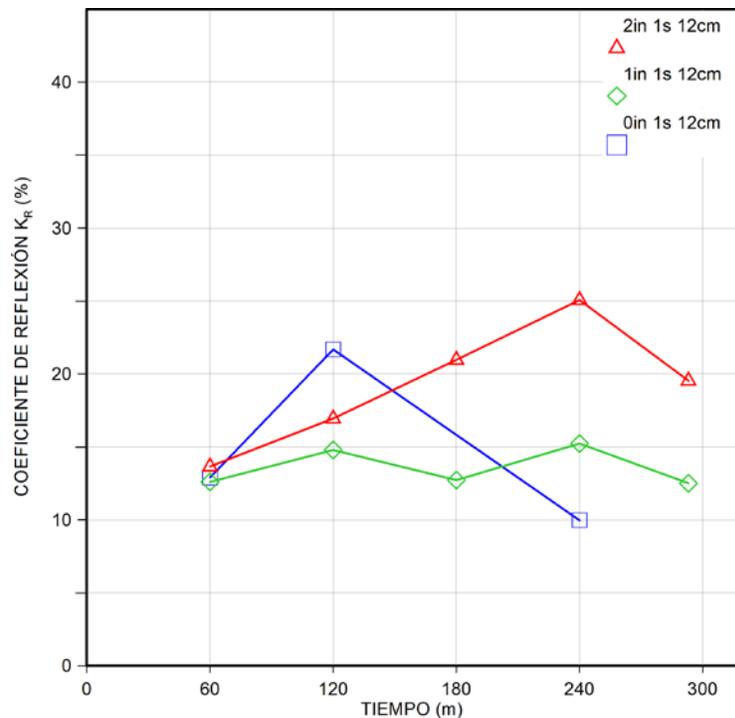


Figura 5.9 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Mansard.

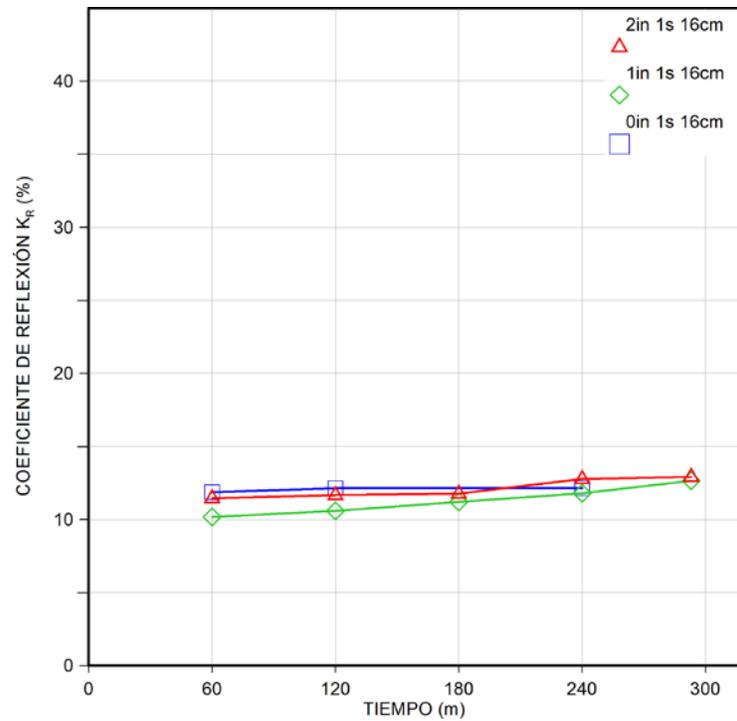


Figura 5.10 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Goda.

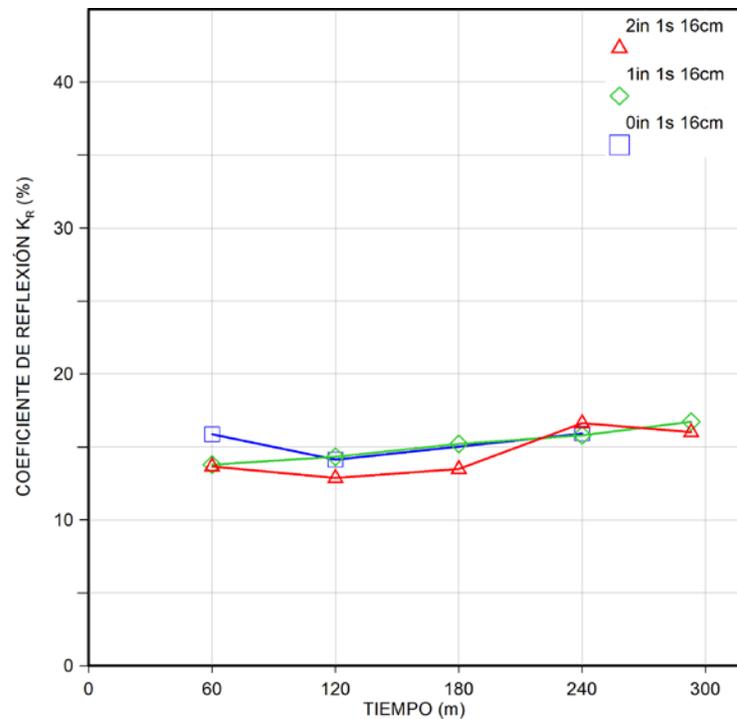


Figura 5.11 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=1s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Mansard.

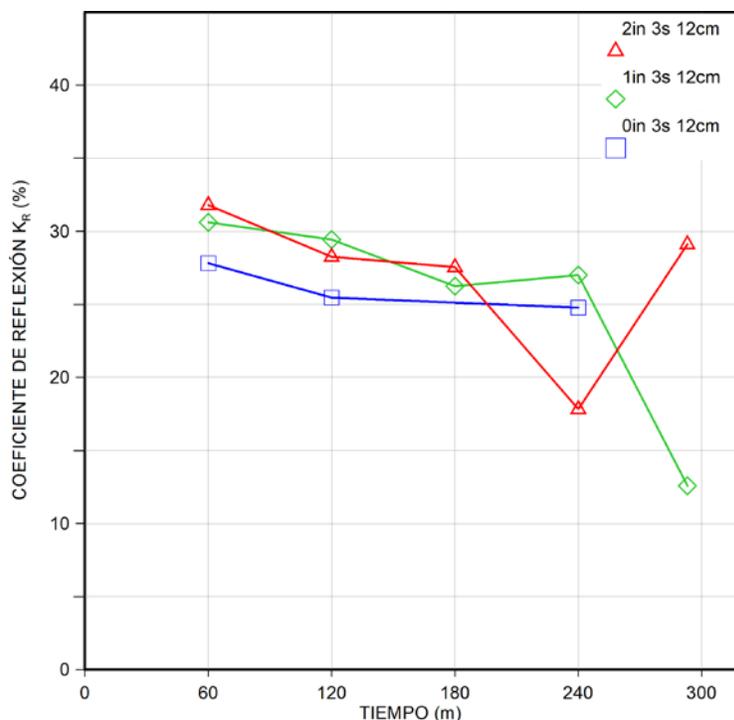


Figura 5.12 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Goda.

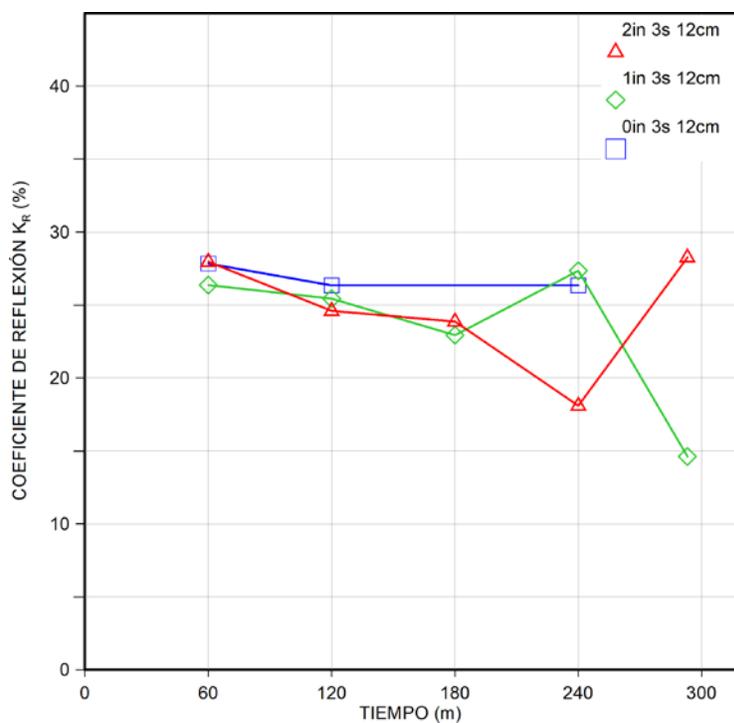


Figura 5.13 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=12cm$, determinados con el método de Mansard.

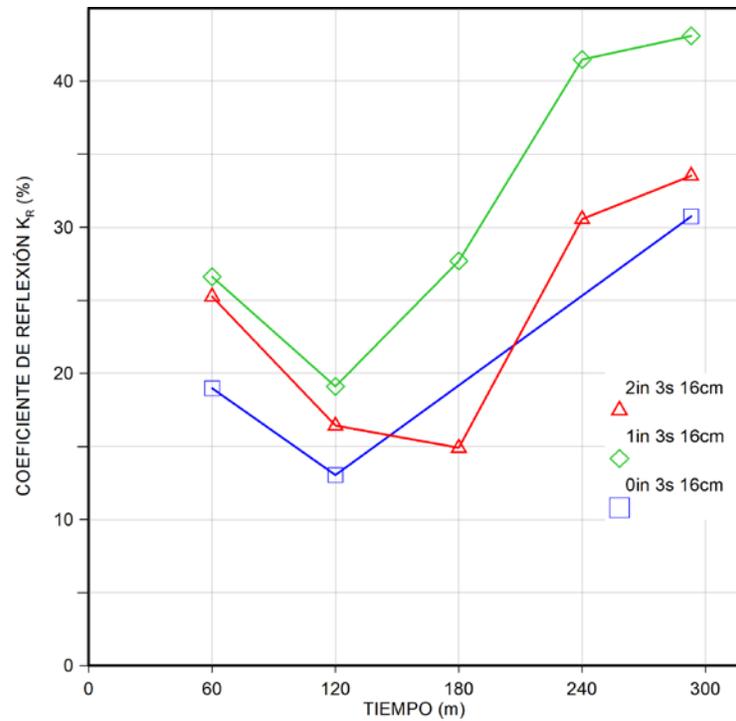


Figura 5.14 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Goda.

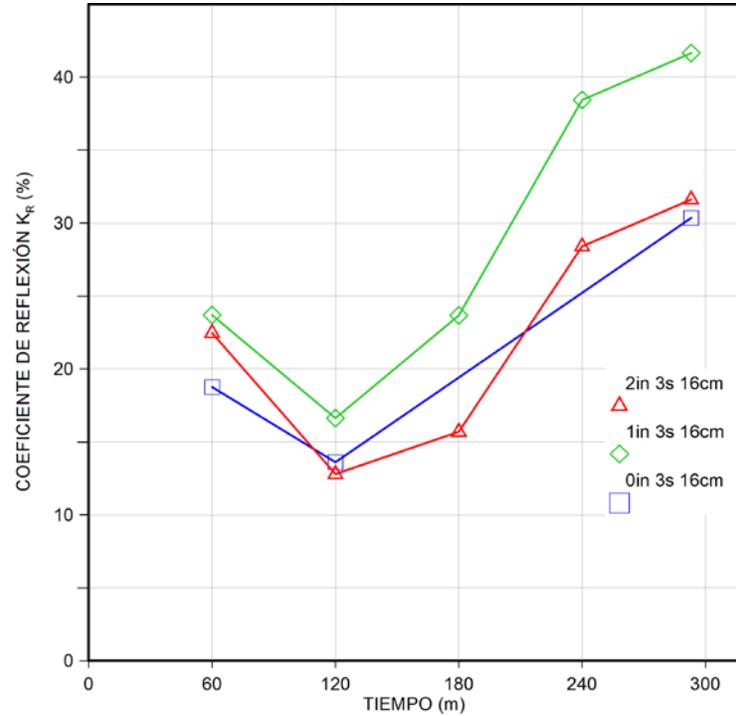


Figura 5.15 Cambio en los coeficientes de reflexión y su evolución temporal para periodo $T=3s$ y altura de ola $H=16cm$, determinados con el método de Mansard.

CONCLUSIONES

Numerosos esfuerzos han sido llevados a cabo para reducir o eliminar los procesos erosivos causados por el oleaje en playas de arena con perfiles que no han alcanzado aún el equilibrio dinámico. Para la estabilización de estas playas se cuenta con múltiples alternativas que van desde estructuras de protección muy complejas y robustas construidas con roca o elementos prefabricados, hasta otras menos complejas como la utilización de pastos marinos, por ejemplo. Estas y otras alternativas, cuyos resultados son satisfactorios, presentan sus propias ventajas y desventajas, así como las condiciones necesarias para su aplicación dependiendo de los requerimientos económicos y sociales, de la morfología de la playa y del clima marítimo.

La alternativa propuesta en este trabajo obtuvo resultados aceptables para el perfil y las condiciones de oleaje estudiados, ofreciendo protección adecuada a la playa tanto para el perfil en erosión como para el perfil en acreción.

La alternativa propuesta en este trabajo puede ser complementada o no con un relleno artificial de playa.

De las dos propuestas estudiadas ($\phi=1in$ y $\phi=2in$), se obtienen mejores resultados con el tapete de grava de diámetro medio $\phi=1in$. Esto es favorable pues, al implementar en campo la solución propuesta, resulta aún más económica.

La implementación del tapete de grava como estructura de protección costera no genera cambios importantes en el comportamiento hidrodinámico de la playa.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Es necesario realizar pruebas con tapetes de grava de diferentes longitudes para determinar la longitud mínima óptima, de manera que, al reducir el tamaño del tapete, se logre una disminución mayor en la cantidad de grava empleada y, con ello, en los costos de implementación.

Sería conveniente realizar pruebas variando la posición del tapete para mejorar la determinación de las condiciones óptimas necesarias para su funcionamiento.

Resultaría adecuado complementar este estudio con pruebas en perfiles de playa distintos, ya sean perfiles medidos en campo y/o determinados por algún método para el trazo de perfiles en equilibrio.

Sería deseable probar los perfiles deformados generados con el tapete de protección con condiciones de oleaje distintas para evaluar su equilibrio dinámico.

Comparaciones del funcionamiento del tapete de grava contra estructuras más robustas serían deseables. Sin embargo, la reducción en volúmenes de material hace al tapete una alternativa más adecuada económicamente, siempre y cuando las condiciones de la playa a proteger permitan su implementación.

Es conveniente repetir, cuando menos, una vez todas las pruebas para asegurar que ninguna de ellas presenta errores significativos o distorsiones en las mediciones y procedimientos.

Sería conveniente variar la escala de las pruebas de manera que se cuente con una muestra más representativa del experimento y que permita identificar los problemas causados por los factores de escala.

REFERENCIAS

Bruun, P., (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach erosion board, technical memorandum No. 44. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.

Bruun, P., (1962). *Sea-level rise as a cause of shore erosion*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbors Division 88, 117-130.

Bruun, P., (1983). *Review of conditions for use of the Bruun Rule of erosion*. Coastal Engineering 7, 77- 89.

Cervantes, V., Mendoza, E., Delgadillo, M., (2010). *Estabilización de perfiles de playa con tapetes de grava en la zona de rompientes*. Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Cowell, P.J., Hanslow, D.J., and Meleo, J.F., (1999). *The shoreface, In: A.D. Short (Editor), Handbook of Beach and Shoreface morphodynamics*. Wiley and Sons. Chichester.

Dean, R.G., (1990). *Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications*. Journal of Coastal Research, 7, 53-84.

Delgadillo, M., (2011). *Comparación de la respuesta dinámica de perfiles de playa, bajo un gradiente hidráulico*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente de España, (2000). *Documento de Referencia, proyecto "Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral"*. Volumen I Dinámicas. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria.

Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente de España, (2000). *Documento de Referencia, proyecto "Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral"*. Volumen III Obras. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria.

Fontirroig, H., (2004). *Calibración del Canal de Oleaje CIEM para un ensayo de estabilidad de dique en talud*. Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña.

Goda, Y., Suzuki, Y., (1976). *Estimation of incident and Reflected Waves in Random Wave Experiment*. Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol 1, pp 828-845.

Juarez, E., Rico, A., (2007). *Mecánica de suelos. Tomo 1, fundamentos de la mecánica de suelos*. Ed. Limusa. México.

Mansard, E.P., Funke, E.R., (1980). *The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Square Method*. Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol.1 pp 154-172.

Mendoza, E., (2002). *Diques arrecife como elementos de protección litoral*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Pedrozo-Acuña, A., (2011). *Procesos costeros y morfodinámica de playas, apuntes de clase*. Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ruiz, G., (2009). *Determinación del estado morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos*. Tesis de doctorado. Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 215 p.

Silva, R., (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Series del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

United States Army Corps of Engineers, (1984). *Shore protection manual*. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center.

Van Rijn, L., (1998). *Principles of coastal morphology*. Aqua Publications. Holanda. 715 p.



Figura A.1 Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=000min$.



Figura A.2 Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=060min$.



Figura A.3 Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=120min$.



Figura A.4 Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=180$ min .



Figura A.5 Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=240$ min .



Figura A.6 Evolución del perfil de playa en la zona de someramiento para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=293$ min .



Figura A.7 Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=000min$.



Figura A.8 Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=060min$.



Figura A.9 Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=120min$.



Figura A.10 Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=180min$.



Figura A.11 Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=240min$.



Figura A.12 Evolución del perfil de playa en la zona de rompientes para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=293min$.



Figura A.13 Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=000min$.



Figura A.14 Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=060min$.



Figura A.15 Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T=3s$, $H=12cm$, $\phi=1in$ y $t=120min$.



Figura A.16 Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y $t = 120min$.



Figura A.17 Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y $t = 240min$.



Figura A.18 Evolución del perfil de playa en la zona de lavado para $T = 3s$, $H = 12cm$, $\phi = 1in$ y $t = 293min$.



Figura B.1 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de someramiento.

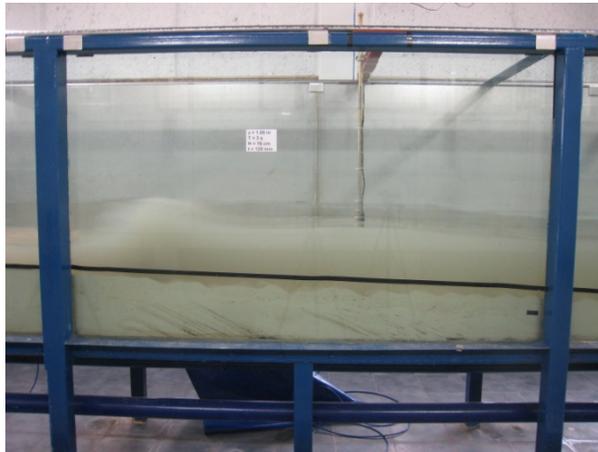


Figura B.2 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de someramiento.



Figura B.3 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de someramiento.



Figura B.4 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de rompientes.



Figura B.5 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de rompientes.



Figura B.6 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de rompientes.



Figura B.7 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de lavado.



Figura B.8 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de lavado.



Figura B.9 Propagación del oleaje sobre el perfil de playa.
Zona de lavado.