

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD ZACATENCO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE
ALTERNATIVAS DE PROTECCIÓN
COSTERA, CASO CHELEM-
CHUBURNÁ, YUCATÁN”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA:

JUAN ARIEL MANRIQUE SANGUINO

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN C. JAIME ROBERTO RUIZ Y ZURVIA FLORES



MÉXICO D.F, NOVIEMBRE DE 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F., siendo las 17:00 horas del día 23 del mes de noviembre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. – U. Z. para examinar la tesis titulada:

“Estudio experimental de alternativas de protección costera Caso Chelem-Chuburná, Yucatán”

Presentada por el alumno:

Manrique
Apellido paterno

Sanguino
Apellido materno

Juan Ariel
Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	1	3	6	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

M. en C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

M. en C. Juan Manuel Navarro Pineda

M. en C. Lucio Fragozo Sandoval

M. en C. Ricardo Contreras Contreras

M. en C. Norma Josefina Ruiz Castillejos

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



M. en C. Pino Durán Escamilla



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día **23** del mes **Noviembre** del año **2012**, el que suscribe **Juan Ariel Manrique Sanguino**, alumno del Programa de **Maestría en Ingeniería Civil** con número de registro **B101361**, adscrito a la **Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **M. en C. Jaime Roberto R. y Zurvia Flores**, y cede los derechos del trabajo intitulado **“Estudio Experimental de Alternativas de Protección Costera, caso Chelem-Chuburná, Yucatán”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **juanariel_m@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Juan Ariel Manrique Sanguino



AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Muchas gracias a Dios.....

Que me ha dado la vida, la salud, las oportunidades y todo lo demás por lo cual existo, y lo necesario para lograr mis metas, gracias JESÚS.

Muchas gracias a mi padre Juan Isaac y a mi madre Marlene Ivonne.....

Por todo su apoyo, económico, moral y espiritual incondicional, por predicarme con el ejemplo, por la pasión admirable de su consagración y dedicación para con sus hijos, y por ser los MEJORES PAPAS DEL MUNDO, los amo.

A mi esposa e hijos.....

Nunca creí que al inicio de este camino que hoy termina, Dios me regalara el par más hermoso del mundo, mis gemelos Ariel David y Adrián Elías que con todo mi amor les dedico mi esfuerzo plasmado en esta tesis, para que cuando sean grandes se den cuenta de lo que por lo menos, pueden lograr hacer.

Adriana Alejandra gracias porque sé que me seguirías hasta el fin del mundo, y por comprenderme en situaciones difíciles, tú y los niños son el motor de mi vida, te amo.

A mis hermanos Mizael, Bonny y David.....

Ustedes son muy importantes en mi vida, gracias por compartir su tiempo, su vida y sus cosas les deseo mucho éxito en sus metas personales, los amo.

A mi mentor y director de tesis, el M. en C. Jaime R. Ruiz y Zurvia Flores.....

Con toda estima, agradezco su esfuerzo y dedicación por enseñarme, exigirme y sacar lo mejor de mí, por su amistad y confianza, por dirigirme a cada paso en mis estudios de maestría; con gran admiración y aprecio le debo y dedico esta tesis.

A mi asesor el M. en C. Lucio Frago Sandoval.....

Por su invaluable ayuda, guianza y consejos, muchas gracias.

A mis profesores que enriquecieron con sus cátedras mi crecimiento profesional.....

M. en C. Jaime R. Ruiz y Zurvia Flores, M. en C. Manuel Meneses García, Dr. Oscar Cruz Castro, Dr. Juan Manuel Navarro Pineda, Dr. Sergio Cruz León, Dr. Mario Ulloa Ramírez, M. en C. Pino Durán Escamilla, Dr. Francisco Antelmo Díaz Guerra.

A los profesores parte de mi comisión revisora.....

M. en C. Norma J. Ruiz Castillejos, y M. en C. Ricardo Contreras Contreras.



Agradecimientos.

A los que de alguna forma intervinieron con sus aportes en mi investigación.....

Ing. Celso Morales Muñoz (SCT), Dr. Jorge Euán Ávila (CINVESTAV Mérida), Dr. Eduardo Battlori Sampedro (SEDUMA Mérida), Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida (LIPC Sisal del IIUNAM), Dr. Ismael Mariño Tapia (CINVESTAV Mérida).

Al Ing. José Luis Jaramillo Pedraza.....

Por su invaluable apoyo en la construcción del modelo.

Al Ing. Julio Martínez Hernández y a Marinas JMH.....

Por darme la oportunidad de pertenecer a este gran equipo, la confianza y el gran apoyo brindado para la culminación total de mis estudios.



ÍNDICE GENERAL

Glosario de términos	I
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XI
Lista de gráficas	XII
Nomenclatura	XIII
Resumen	XVI
Abstract	XVIII
Introducción.....	XX
Justificación.....	XXII
Objetivos	XXIII
Hipótesis.....	XXIV
Metodología.....	XXIV

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

1.1. La costa.....	1
1.2. Generalidades de la erosión costera	3
1.2.1. Erosión por Causas Naturales	4
1.2.2. Erosión por Causas inducidas por el hombre	5
1.3. Agentes Meteorológicos y oceanográficos	7
1.3.1. Viento	7
1.3.2. Oleaje	13
1.3.2.1. Clasificación de las olas	15
1.3.2.2. Teorías del oleaje	16
1.3.2.3. Oleaje irregular	19
1.3.2.4. Predicción del oleaje	20
1.3.2.5. Espectros energéticos del oleaje	21
1.3.2.6. Espectro frecuencial y direccional	22
1.3.2.7. Modelos espectrales de un estado de mar	23
1.3.3. Mareas	28
1.3.4. Corrientes	29



CAPÍTULO 2. EROSIÓN EN LA COSTA YUCATECA.

2.1.	Introducción	32
2.1.1.	Vulnerabilidad y cambio climático	32
2.2.	Caracterización regional	35
2.2.1.	Tipo de sedimento	36
2.2.2.	Geología de la zona	36
2.2.3.	Oleaje de la zona	37
2.2.4.	Marea de la zona	39
2.2.5.	Corrientes de la zona	41
2.3.	Antecedentes	43
2.3.1.	Causas de erosión en la región	44
2.3.2.	Orígenes de la problemática	45
2.3.2.1.	Intemperismos severos	47
2.3.2.2.	Huracán Gilberto	48
2.3.2.3.	Huracán Isidoro	49
2.4.	Reconocimiento de la problemática	49
2.5.	Caso de estudio	52
2.5.1.	Localización de la zona de estudio	52
2.6.	Diagnóstico preliminar	54
2.7.	Evolución de la costa y análisis de la situación actual	56
2.8.	Acciones realizadas	58

CAPÍTULO 3. OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.

3.1.	Generalidades	62
3.2.	Recarga artificial de arena	63
3.3.	Infraestructura de protección costera	67
3.3.1.	Espigones	69
3.3.2.	Rompeolas	70
3.3.3.	Escolleras	71
3.3.4.	Arrecifes artificiales y rompeolas sumergidos	72
3.3.4.1.	Bolsacreto	73
3.3.4.2.	Geotubos	74
3.3.4.3.	Reff balls	75
3.4.	Análisis general	76

CAPÍTULO 4. TRANSMISIÓN DEL OLEAJE.

4.1.	Definición de la transmisión del oleaje	78
------	---	----



4.2. Estudios experimentales de transmisión del oleaje	79
--	----

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTACIÓN POR MEDIO DE UN MODELO FÍSICO REDUCIDO.

5.1. Generalidades	92
5.1.1. Definición	92
5.1.2. Tipos de modelos	93
5.1.3. Modelo hidráulico	93
5.2. Escalas.....	94
5.3. Condiciones de similitud.....	97
5.4. Instalación	98
5.5. Equipo	99
5.6. El modelo	103
5.6.1. Preliminares	103
5.6.2. Construcción del modelo.....	107
5.6.3. Calibración del modelo	108
5.7. Ensayos.....	110
5.7.1. Programa de ensayos	110
5.7.2. Condiciones de los ensayos y procedimiento experimental	112
5.7.3. Observaciones de los ensayos	113

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.

6.1. Análisis y procesamiento de resultados	129
---	-----

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1. Conclusiones.....	144
7.2. Recomendaciones	146

BIBLIOGRAFÍA	147
---------------------------	------------

ANEXOS	161
---------------------	------------



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aguas intermedias: Aguas con profundidades medias donde la ola empieza a ser afectada por el fondo del mar, $(\frac{1}{20} < \frac{d}{L_o} < \frac{1}{2})$.

Aguas profundas: Son aguas que tienen gran profundidad en donde las olas no son afectadas por fondo marino, $(\frac{d}{L_o} \geq \frac{1}{2})$.

Aguas someras: Son aguas con poca profundidad, en donde existe una afectación del fondo marino sobre la ola, $(\frac{d}{L_o} \leq \frac{1}{20})$.

Altura de la ola (H): Es la distancia vertical entre la cresta y el valle de una ola, visualmente se identifica como la parte más alta y la más baja de la ola respectivamente.

Altura de ola incidente: Altura de la ola medida antes de la estructura.

Altura de ola significativa: Altura de la ola promedio del tercio de las alturas de las olas más grandes de un tren de olas.

Altura de ola transmitida: Altura de la ola medida después de la estructura.

Amplitud de ola: Distancia que una partícula se aleja de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. Es equivalente a la mitad de la altura de la ola.

Arrecife artificial: Estructura sumergida colocada sobre el suelo marino, para imitar alguna de las características de un arrecife natural.

Ascenso del oleaje (run-up): Ascenso máximo de la ola sobre el talud del rompeolas, medido por la distancia vertical del nivel medio del mar al punto máximo de desplazamiento.

Batimetría: Configuración del fondo marino.

Batimétrica: Línea de nivel que une puntos de igual profundidad en un plano.

Canal de oleaje angosto: Instalación requerida en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica, que con un equipo de generación se simula el oleaje para la realización del estudio experimental de la presente tesis.



Capa secundaria: Segunda capa de enrocamiento de un rompeolas que retiene y protege al núcleo del embate del oleaje.

Celeridad de la ola: Velocidad de desplazamiento de la ola.

Clapotís: Asociado con la reflexión de un tren de oleaje no rompiente en una estructura de pared vertical.

Coeficiente de reflexión: Relación entre la altura de ola reflejada y la altura de ola incidente.

Coeficiente de transmisión: Relación entre la altura de ola transmitida y la altura de ola incidente.

Condiciones hidrodinámicas: Se refiere al comportamiento de los fenómenos marítimos como son: viento, oleaje, mareas y corrientes.

Coraza: Capa principal de protección de un rompeolas, que constituye la defensa primordial de la estructura ante el embate de las olas, y se encuentra formada por elementos de gran tamaño.

Costa: Franja de ancho indefinido donde se encuentra la tierra con el mar.

Cresta de la ola: Parte más alta de una ola por encima del nivel de aguas tranquilas.

Daño: Condición que se presenta cuando en una estructura de protección los elementos de la coraza son desplazados de su posición original, por el embate de las olas.

Descenso del oleaje (Run down): Descenso de la ola sobre el talud del rompeolas, medido por la distancia vertical del nivel medio del mar al punto más bajo de desplazamiento sobre el talud.

Difracción: Efecto causado cuando el oleaje en su recorrido incide en los extremos de cualquier obstáculo causando una transferencia de energía lateral.

Efecto de escala: Discrepancia resultante entre las condiciones del modelo y el prototipo, originadas por la dificultad de reproducción simultánea de todos los parámetros de similitud del modelo.

Energía cinética: Porción de la energía total de la ola asociada con su movimiento y debida a las velocidades de las partículas de agua.



Energía Potencial: Porción de la energía total de la ola que resulta de las masas del fluido que se encuentra por encima del valle de la ola.

Ensayo: Reproducción controlada del fenómeno en laboratorio, para mediciones y estudio.

Escollera: Estructura implementada en la desembocadura de los ríos en forma convergente, para aumentar la velocidad de descarga con el fin de reducir el azolve en la bocana.

Espectro de oleaje: Representación gráfica de la relación de distribución de energía del oleaje respecto a sus frecuencias.

Espigón: Estructura perpendicular a la línea de costa, que atrapa los sedimentos del transporte litoral.

Estructura de protección costera: Obra marítima destinada para disminuir la energía el oleaje incidente generando una zona de abrigo o de calma.

Fondo fijo: Zona de desplante del rompeolas, impermeable sin movimiento alguno en el modelo.

Frecuencia del Oleaje: Parámetro inverso al periodo de la ola, dado por: $f=1/T$.

Fuerza de Coriolis: Fuerza por unidad de masa generada por el movimiento rotacional de la tierra.

Generador de oleaje: Equipo que genera oleaje por medios hidráulicos y mecánicos controlados por computadora.

Lado mar: Parte anterior del rompeolas, en donde incide el oleaje.

Lado tierra: Parte posterior del rompeolas o zona protegida.

Litoral: Relativo a las costas, riveras, o cercanías al mar.

Longitud de la ola: Distancia horizontal entre dos crestas o dos valles sucesivos.

Longitud del fetch: Distancia horizontal sobre la que sopla el viento generando oleaje local.

Marea: Oscilación periódica del ascenso y descenso del nivel del mar, causado por las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol, la fuerza de inercia de la tierra debido a su movimiento de rotación, la fuerza centrífuga y el efecto de Coriolis.



Modelo analógico: Es aquel en donde dos fenómenos físicos de diferente naturaleza son descritos por ecuaciones análogas.

Modelo físico reducido: Representación física a escala del prototipo del fenómeno físico a estudiar, que cumple con las tres leyes de similitud, la geometría, la cinemática y la dinámica.

Modelo matemático: Representación del fenómeno de estudio resuelto por medio de técnicas matemáticas.

Modelo: Sistema de reproducción y simulación a escala de un objeto real de estudio (prototipo).

Nivel de la superficie libre del agua: Es la altura con respecto a la superficie libre del agua en reposo.

Núcleo: Capa interior de una obra de protección costera formada por material pétreo de rezaga.

Número de Froude: Relación adimensional de las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales para un flujo dado y es representado por: $Fr = V / \sqrt{Lg}$ donde V es la velocidad del flujo, L es una longitud característica y g es la aceleración de la gravedad.

Número de Reynolds: Relación adimensional de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas para un fluido en movimiento.

Obras de protección: Estructuras que se encuentran en contacto directo con el embate de las olas.

Ola progresiva: Una ola que se mueve relativa a un sistema coordenado fijo en la superficie de un fluido.

Oleaje capilar: Oleaje con longitudes de onda menores a 1.7 cm, controlado por la tensión superficial del líquido en el cual la ola se encuentra.

Oleaje de gravedad: Oleaje con longitudes de onda mayores a 2 pulgadas cuya velocidad de propagación es controlada primordialmente por la gravedad.

Oleaje de tormenta: Oleaje producido por los fuertes vientos que genera una tormenta tropical o un huracán con velocidades superiores a los 75 km/hr.

Oleaje distante: Oleaje fuera de su área de generación.



Oleaje irregular: Oleaje caracterizado por una combinación de distintos periodos, alturas, direcciones, etcétera.

Oleaje local: Origen del oleaje generado por el viento en el lugar actúa.

Oleaje monocromático o regular: Oleaje donde cada tren de olas tiene la misma longitud de ola y período.

Oleaje: Ondulaciones con movimiento sinusoidal que se desarrolla en la superficie del mar.

Ológrafo: Equipo electrónico para registrar y amplificar las señales y registros enviados por los sensores de oleaje.

Parámetro adimensional: Parámetros que relacionan magnitudes del mismo tipo, por lo que carecen de dimensiones.

Parámetro de similitud de rompiente: Parámetro que indica si el oleaje rompe o no rompe.

Pendiente o talud: Inclinación con respecto a la horizontal.

Perfil: Contorno de una sección transversal.

Periodo de la ola: Tiempo en segundos que tardan en pasar dos crestas o dos valles de una ola por un mismo punto.

Predicción de oleaje: Pronóstico teórico de las características del oleaje, estimado mediante datos de fenómenos meteorológicos observados (forecasting). Igualmente se refiere al uso de cartas sinópticas de viento históricas para calcular las características del oleaje que probablemente ocurrieron en un tiempo pasado (hindcasting).

Profundidad del agua: Tirante de agua medido desde el fondo hasta el nivel medio del mar.

Profundidad relativa: Parámetro adimensional donde se relaciona la profundidad del agua con la longitud de la ola incidente (d/L).

Prototipo: Es el objeto de estudio el cual se pretende reproducir a través de un modelo físico reducido.

Reflexión: Efecto de rebote cuando el oleaje se encuentra con obstáculo en su camino.



Refracción: Efecto del oleaje causado por la batimetría del fondo cuando se aproxima a la costa, ocasionando cambios en su dirección y celeridad.

Relación de esbeltez: Relación entre la altura y la longitud de ola: (H/L) .

Rompeolas permeable: Rompeolas que permite el paso del agua entre sus capas y espacios entre elementos.

Rompeolas sumergido: Estructura de protección costera cuyo nivel de coronamiento se encuentra por debajo del nivel medio del mar.

Rompeolas superficial: Estructura de protección costera, cuyo nivel de coronamiento se encuentra por encima del nivel medio del mar.

Rompeolas: Estructura de protección costera, ya sea de enrocamiento o de elementos artificiales que puede generar una zona de abrigo.

Rompiente: Disipación de la energía de las olas, cuando se aproximan a la costa, al ser modificada su relación de esbeltez, por el efecto de fondo.

Ruido blanco: Algoritmo que permite al sistema generar los archivos de las señales de oleaje irregular para ser reproducidas por el generador de oleaje.

Sensor de oleaje: Instrumento capacitivo de contacto directo con el agua para medición y envío de datos del oleaje reproducido en los ensayos dentro del canal.

Señal de oleaje: Datos de las características del oleaje utilizados por el generador de oleaje para su posterior simulación en el canal.

Transporte litoral: Movimiento del sedimento en la zona litoral producido por oleaje y corrientes.

Trasmisión del oleaje: Porción de altura de ola, que logra pasar a través de una obra de protección costera al lado protegido, asociada con la permeabilidad y características geométricas de la estructura.

Valle de la ola: Parte más baja de la ola abajo del nivel estático del agua.

Velocidad de propagación de la onda: Rapidez con la que se propaga la onda, expresada como la relación de la longitud, con el periodo de la onda (L/T) .

WAVEGEN: Software para la simulación de las condiciones requeridas de oleaje para su generación física en el canal.



LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

Fig. 1.1. Esquema de perfil típico de playa	2
Fig. 1.2. Esquema del frente de playa y oleaje incidente	3
Fig. 1.3. Zona de generación del oleaje por influencia eólica (fetch)	9
Fig. 1.4. Dependencia del oleaje respecto a la velocidad del viento (U), duración de la tormenta (D) y longitud de Fetch (F)	9
Fig. 1.5. El Sea.....	10
Fig. 1.6. El Swell	10
Fig. 1.7. Modelo de Jeffrey.....	11
Fig. 1.8. Esquema de las características de una ola	14
Fig. 1.9. Oleaje irregular.....	14
Fig. 1.10. Idealización del oleaje irregular	14
Fig. 1.11. Clasificación de las olas conforme a su período	16
Fig. 1.12. Onda de Airi	17
Fig. 1.13. Comparación de las diferentes teorías del oleaje	18
Fig. 1.14. Áreas de validez de las diferentes teorías del oleaje	19
Fig. 1.15. Superposición de ondas como se presentan en la naturaleza	21
Fig. 1.16. Oleaje irregular como resultado de la sumatoria de olas regulares ..	21
Fig. 1.17. Espectro de energía	22
Fig. 1.18. Ejemplo de espectro frecuencial	22
Fig. 1.19. Ejemplo de un espectro de energía direccional, compuesto de dos oleajes, un Sea y un Swell	23
Fig. 1.20. Espectro de Jonswap y Pierson-Moskowitz	25
Fig. 1.21. Esquematación de la marea	28
Fig. 1.22. Sistema de circulación por celdas en la zona cercana a la costa	31



CAPÍTULO 2. EROSIÓN EN LA COSTA YUCATECA.

Fig. 2.1. Temperatura global	33
Fig. 2.2. Espesor del hielo Ártico	34
Fig. 2.3. Efecto de tormentas sobre las dunas	35
Fig. 2.4. Promedio mensual de la altura significativa del oleaje en Progreso y datos de oleaje en Chuburná	38
Fig. 2.5. Valor promedio de marea de la costa yucateca	40
Fig. 2.6. Predicción de marea, Progreso, Yucatán	40
Fig. 2.7. Esquema idealizado de la circulación superficial de corrientes en el Caribe mexicano	42
Fig. 2.8. Dunas erosionadas y patios de predios veraniegos invadidos por el mar en Chuburná, Puerto	45
Fig. 2.9. Fotografía de 1948	46
Fig. 2.10. Fotografía de 1979	47
Fig. 2.11. Trayectoria de huracanes y tormentas tropicales en la Península de Yucatán	48
Fig. 2.12. Destrucción del huracán Isidoro en el año 2002	49
Fig. 2.13. Espigones de madera	51
Fig. 2.14. Ubicación de la península de Yucatán dentro del territorio mexicano	53
Fig. 2.15. Localización de la zona de estudio	53
Fig. 2.16. Afectación del Puerto de Progreso	54
Fig. 2.17. Escollera Este de Yukalpetén	55
Fig. 2.18. Estructuras para intentar mitigar el daño	55
Fig. 2.19. Fuga de arena hacia el mar	56
Fig. 2.20. Fotografía de los 70's de la línea de costa de Chelem	56
Fig. 2.21. Evolución de la línea de costa en imagen multiespectral	57
Fig. 2.22. Fotografía satelital del 1/6/2010	58
Fig. 2.23. Instalación de Geotubos en Chelem, Yucatán	59
Fig. 2.24. Recuperación de playa mediante alimentación artificial en Chelem Yucatán	60



Fig. 2.25. Estado de la línea de costa en el año 2002 previo al manejo de playas	60
Fig. 2.26. Localización del sitio ECCA	61

CAPÍTULO 3. OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.

Fig. 3.1. Alimentación artificial de arena	64
Fig. 3.2. Espigones de tipo artesanal	69
Fig. 3.3. Esquema del funcionamiento de los espigones	70
Fig. 3.4. Abrigo generado por rompeolas	70
Fig. 3.5. Escolleras en canal de acceso	71
Fig. 3.6. Elementos artificiales preconstruidos	72
Fig. 3.7. Componentes del Geotubo	75
Fig. 3.8. Reef Ball	75

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTACIÓN POR MEDIO DE UN MODELO FÍSICO REDUCIDO.

Fig. 5.1. Plano en corte y planta del generador de oleaje	99
Fig. 5.2. Canal de oleaje	100
Fig. 5.3. Vista de la paleta y el generador de oleaje	100
Fig. 5.4. Equipo de cómputo de control	100
Fig. 5.5. Colocación de los sensores	102
Fig. 5.6. Ológrafo y controlador	102
Fig. 5.7. Caseta de control	102
Fig. 5.8. Mantenimiento del amortiguador de oleaje	103
Fig. 5.9. Configuración del perfil de playa en el canal de oleaje irregular	104
Fig. 5.10. Trazo de la línea de apoyo con nivel láser, relleno, compactación y nivelación	104
Fig. 5.11. Colado y tratamiento del firme	105



Fig. 5.12. Implementación del escantillón para la correcta construcción de la estructura	107
Fig. 5.13. Construcción de la estructura	107
Fig. 5.14. Calibración de los sensores en aguas someras y aguas intermedias	108
Fig. 5.15. Rompiente total sobre el talud, ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 0.50 m	114
Fig. 5.16. Rompiente total sobre la mitad del ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 0.50 m	115
Fig. 5.17. Rompiente total sobre la parte media del ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 1.00 m	116
Fig. 5.18. Reducción considerable de la altura de ola sobre un ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 1.00 m	117
Fig. 5.19. Rompiente total sobre un ancho de coronamiento de 34 m, sumergencia 0.50 m.....	118
Fig. 5.20. Rompiente total a la mitad del arrecife con ancho de coronamiento de 34 m, sumergencia 0.50 m	119
Fig. 5.21. Ancho de coronamiento de 34 m, sumergencia 1.00 m	120
Fig. 5.22. Disminución de la energía de la ola sobre un ancho de coronamiento de 34 m, sumergencia 1.00 m	120
Fig. 5.23. Ancho de coronamiento de 50 m, sumergencia 0.50 m	122
Fig. 5.24. Rompiente parcial sobre un ancho de coronamiento de 50 m, sumergencia 0.50 m	122
Fig. 5.25. Fricción entre la ola y el arrecife de 50 m de ancho de coronamiento, sumergencia 1.00 m	124
Fig. 5.26. Inicio de la formación de una rompiente total sobre un coronamiento de 50 m, sumergencia 1.00 m	124
Fig. 5.27. Fenómeno que se forma entre el espaciamiento y la segunda estructura	125
Fig. 5.28. Rompiente total sobre el espaciamiento de las estructuras	126
Fig. 5.29. Estructuras (2) de 17 m de ancho de coronamiento, con 7 m de separación, sumergencia de 1.00 m	127
Fig. 5.30. Estructuras (2) de 17 m, sumergencia 1.00 m	128



LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

Tabla 1.1. Escala de Beaufort	12
Tabla 1.2. Escala de Douglas	13

CAPÍTULO 2. EROSIÓN EN LA COSTA YUCATECA.

Tabla 2.1. Planos mareales de Progreso	40
--	----

CAPÍTULO 3. OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.

Tabla 3.1. Clasificación de las estructuras de protección costera	68
---	----

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTACIÓN POR MEDIO DE UN MODELO FÍSICO REDUCIDO.

Tabla 5.1. Diferentes tipos de escalas para distintos proyectos hidráulicos	95
Tabla 5.2. Tipos de escalas y sus diferentes valores	96
Tabla 5.3. Pesos de los elementos	106
Tabla 5.4. Señales de oleaje a reproducir en el modelo	110
Tabla 5.5. Programa de ensayos	111

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.

Tabla 6.1. Datos medidos y calculados de acuerdo a los ensayos	130
Tabla 6.2. Datos medidos, calculados y validación de coeficientes de transmisión	131



LISTA DE GRÁFICAS

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.

Gráfica 6.1. Profundidad de sumergencia relativa (R_c/H_i) contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras para una sumergencia de 0.50 m	132
Gráfica 6.2. Profundidad de sumergencia relativa (R_c/H_i) contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras para una sumergencia de 1.00 m	133
Gráfica 6.3. Profundidad de sumergencia relativa (R_c/H_i) contra coeficiente de transmisión (K_t) para ancho de coronamiento y sumergencia de las 4 estructuras.....	134
Gráfica 6.4. Ancho de coronamiento relativo B/L contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras, para una sumergencia de 0.5 m	135
Gráfica 6.5. Ancho de coronamiento relativo (B/L) contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras, para una sumergencia de 1.00 m	136
Gráfica 6.6. Ancho de coronamiento relativo (B/L) contra coeficiente de transmisión (K_t) para ancho de coronamiento y sumergencia de las 4 estructuras.....	137
Gráfica 6.7. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Goda (1969)	138
Gráfica 6.8. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a d' Angremond et al (1996).....	139
Gráfica 6.9. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Van der Meer (1991)	140
Gráfica 6.10. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Van der Meer (2000)	141
Gráfica 6.11. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Van der Meer (2004).	142
Gráfica 6.12. Coeficientes de transmisión medidos contra calculado respecto a los investigadores seleccionados	143



NOMENCLATURA

B/L = Ancho de coronamiento relativo.

R_c/H_i = Profundidad de sumergencia relativa.

H_d = Altura de ola de diseño en metros.

K_t = Coeficiente de transmisión de oleaje.

S_r = Densidad relativa de la roca, adimensional.

W_B = Peso de la coraza en toneladas.

γ_s = Peso específico de la roca, en ton/m^3 .

A_r = Área de la sección transversal de la estructura.

$A_s(f)$ = Área bajo el espectro.

B = Ancho de coronamiento de la estructura.

C = Celeridad o velocidad de propagación de la ola.

d = Profundidad.

d/L = Profundidad relativa.

D_{50} = Diámetro nominal del material o espesor de la coraza de la estructura.

ξ = Parámetro de similitud de rompiente.

E_C = Escala de celeridades de ola.

E_F = Escala de fuerzas.

E_H = Escala de alturas de ola.

E_L = Escala de líneas o de longitudes.

E_{LH} = Escala de líneas Horizontal.

E_{LO} = Escala de longitudes de ola.

E_{LV} = Escala de líneas vertical.

E_T = Escala de Períodos.

E_W = Escala de pesos.

f = Frecuencia de ola.

g = Aceleración de la fuerza de gravedad.

H = Altura de ola.

h = Profundidad de desplante de la estructura.



H/L = Relación de esbeltez de la ola.

$H_{1/10}$ = Promedio del décimo de las alturas más altas de un registro de oleaje.

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

H_d = Altura de ola de diseño.

H_i = Altura de la ola incidente.

H_{max} = Altura de ola máxima.

H_o = Altura de la ola en aguas profundas.

H_s = Altura de ola significativa incidente.

H_t = Altura de la ola transmitida.

K_t = Coeficiente de transmisión.

L = Longitud de ola.

$S(f)$ = Distribución de energía del oleaje respecto a sus frecuencias (espectro de energía).

L_i = Longitud de ola incidente.

L_o = Longitud de ola en aguas profundas.

M = Talud o parámetro de forma de la estructura.

m. b. n. m = Metros bajo el nivel del mar.

m. s. n. m = Metros sobre el nivel del mar.

N = Permeabilidad.

R_c = Profundidad de sumergencia.

R_c/H_i = Altura relativa de coronamiento.

S = Pendiente del talud del rompeolas.

T = Período de ola.

t = Tiempo.

$T_{1/10}$ = Período de ola un décimo.

$T_{1/3}$ = Período de ola significativa.

T_i = Período de ola incidente.

T_{max} = Período de ola máxima.

T_p = Período de ola en prototipo.

T_p = Período pico del registro.



T_z = Período medio por el método de cruces por cero.

U = Velocidad del viento real.

$U_{19.5}$ = Velocidad media del viento medida a una altura de 19.5 m.

V = Volumen del elemento.

U_{10} = Velocidad media del viento medida a una altura de 10 m.

W = Peso de los elementos.

$W - B$ = Peso sumergido del elemento.

X = Separación entre estructuras.

Z = Profundidad a pie del talud del arrecife artificial.

ξ = Parámetro de similitud de rompiente.

f = Frecuencia.

α = Angulo del talud de la estructura con la horizontal.

γ = factor de intensificación del pico de 1~7 (medio 3.3).



RESUMEN

La erosión costera se define, como el retroceso progresivo de la línea de costa cuyas causas pueden ser de origen natural como también antropogénicas. Es un fenómeno que ha cobrado importancia durante los últimos años en todo el mundo debido a las repercusiones económicas, sobre todo en las divisas por concepto del turismo, así como el incremento del riesgo para la infraestructura y población situada sobre la costa.

El grado de erosión en las playas yucatecas es de tal magnitud, que se ha desencadenado una lucha por frenar el problema, construyendo toda clase de obras de protección, sin ninguna clase de planeación en su diseño e implementación. Estas acciones no han sido suficientes para detener este fenómeno, y asimismo han contribuido a que el problema se acentúe de manera crítica, por lo que se requiere encontrar alternativas de protección costera adecuadas para la mitigación del problema.

Por su situación estratégica entre la costa y el mar abierto, los arrecifes funcionan como una barrera de protección contra los embates de las olas. En la actualidad simularlos artificialmente bajo ciertos límites permisibles de transmisión de oleaje, representan una conveniente alternativa de protección costera.

En la presente tesis se describe el grado de erosión existente en las playas de Yucatán en el tramo Chelem-Chuburná, así como la infraestructura implementada en dicho tramo. Además se desarrolla un estudio experimental mediante un modelo físico reducido en laboratorio sobre arrecifes de enrocamiento sumergidos, analizando la transmisión del oleaje en 4 secciones trapezoidales con diferentes anchos de coronamiento.



Las pruebas se efectuaron en el canal de oleaje irregular del Laboratorio de Hidráulica de la ESIA unidad Zacatenco. Las mediciones se efectuaron a través de sensores de tipo resistivo, conectados a un ológrafo controlado por un sistema computarizado.

Asimismo, se compararon los datos obtenidos en la experimentación con los resultados obtenidos con las fórmulas de Goda (1969), D'Angremond *et al.* (1996), Van der Meer (1991, 2000, 2004), siendo los resultados de Van der Meer *et al.* (2000) y la d' Angremond *et al.* (1996) los que han respondido mejor.



ABSTRACT

Coastal erosion is defined, as the progressive setback of the line of coast which reasons can be of natural origin as also provoked by the man. It is a phenomenon that has received importance during the last years in the whole world due to the economic repercussions, especially in the currencies for concept of the tourism, as well as the increase of the risk for the infrastructure and population placed on the coast.

The degree of coastal erosion in the Yucatán's beaches is of such a magnitude, which has freed itself a fight for stopping the problem, constructing all kinds of protection works, without any class of planeación in his design and implementation. These actions have not been sufficient to stop this phenomenon, and likewise they have contributed that the problem accents in a critical way, by what it is needed finding alternatives of coastal protection adapted for the mitigation of the problem.

For his strategic situation between the coast and the open sea, the reefs work as a protection barrier against the batterings of the waves. At present to simulate them artificially under certain permissable limits of transmission of surge, they represent a suitable alternative of coastal protection.

In the present work there is described the degree of existing erosion in the Yucatán's beaches in the section Chelem-Chuburná, as well as the infrastructure implemented in the above mentioned section. In addition an experimental study develops by means of a physical model reduced in laboratory on rouble mound reefs sumerged, analyzing the transmission of the surge in 4 trapezoidal sections with different crest width.

The tests carried out in the narrow irregular wave of the Laboratory of Hydraulics of the ESIA Zacatenco. The measurements were effected across sensors of resistive type, connected to the holograph one controlled by a computerized system.



Likewise, the information obtained in the experimentation was compared, with the results obtained with the formulae of Goda(1969), D´Angremond et al (1996), Van der Meer (1991,2000,2004), being the results of Van der Meer et al (2000) and D´Angremomd et al (1996) those who have answered better.



INTRODUCCIÓN.

La costa se puede definir como la zona donde la tierra se encuentra con el mar cuya morfología, cambia constantemente, en donde el ambiente terrestre y marino interactúan constantemente en respuesta a la incidencia de agentes externos naturales y antropogénicos.

México es un país que tiene poco más de 11 mil kilómetros de costa dentro de los cuales 1,250 kilómetros de litoral se encuentran en el estado de Yucatán, el cual es considerado como un centro turístico de importancia mundial, debido a su legado histórico representado por la gran cantidad de zonas arqueológicas, por ser la sede del esplendor maya y demás atractivos culturales y naturales y que además forma parte de la región que constituye al principal eje de gran turismo de masas del país junto con Cancún y la Riviera Maya, en Quintana Roo.

Desde hace ya varios años, en la costa yucateca se ha venido suscitando un problema que atañe no solo a la región, sino también a otros países del mundo; la erosión costera. Debido a ello, en la presente tesis se desarrolla un estudio hidrodinámico – experimental, el cual con el fin de tener un mayor alcance de los objetivos planteados en la investigación, se ha dividido en 7 capítulos:

En el *capítulo 1. Generalidades*. Se define el concepto de costa, así como su diversa morfología y las playas como parte de ella. También se considera el concepto de erosión costera, sus causas y efectos sobre las playas. Además se presentan los agentes que influyen en la hidrodinámica marítima como son el viento, el oleaje, las mareas y las corrientes.

En el *capítulo 2. Erosión en la costa yucateca*. Se aborda de manera general el tema de la vulnerabilidad de la costa frente a la erosión costera, y la influencia del cambio climático sobre ella. También se caracteriza la región en base al tipo de sedimento, geología, oleaje, mareas y corrientes de la zona mencionando sus antecedentes de erosión costera. Luego se aborda el caso de estudio en Chelem-Chuburná describiendo su localización, el diagnóstico preliminar, evolución del



problema, análisis de la situación actual, y acciones realizadas para mitigar los efectos del problema.

En el *capítulo 3. Obras de protección costera*. Se hace una descripción general de los tipos de obras de protección costera como son las obras paralelas y normales a la costa, y la recarga artificial playera. Se ofrece una tabla de clasificación de la infraestructura de protección costera utilizadas en México, y se describen las que han sido implementadas en la zona de estudio. Al final del capítulo se hace un análisis general de lo presentado.

En el *capítulo 4. Transmisión del oleaje*. Se presenta la definición de transmisión del oleaje, y del coeficiente de transmisión, y se describen las investigaciones realizadas por autores que se han dedicado al estudio de la transmisión del oleaje, haciendo énfasis en los que tienen desarrollo experimental sobre estructuras de protección sumergidas.

En el *capítulo 5. Experimentación por medio de un modelo físico reducido*. Se mencionan los conceptos generales para el desarrollo de un modelo como son las escalas, condiciones de similitud, instalaciones, equipo y tipos de modelos. Se presenta detalladamente el procedimiento experimental del modelo físico reducido de fondo fijo sin distorsión para el presente estudio, describiendo su construcción, calibración y ensayos.

En el *capítulo 6. Análisis y procesamiento de resultados*. Se presenta el cálculo de los coeficientes de transmisión del oleaje para cada sección evaluada, analizando los resultados obtenidos en el modelo realizado, comparándolos y validándolos con las formulaciones realizadas por Goda(1969), D'Angremond *et al.* (1996), Van der Meer (1991, 2000, 2004) inquiridos en el estado del arte.

En el *capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones*. Se obtienen las conclusiones y se sugieren las recomendaciones base a un análisis integral del desarrollo del presente estudio.



JUSTIFICACIÓN.

La erosión costera en la costa yucateca es un fenómeno que se ha venido incrementando en los últimos años manifestándose de manera irregular, pues en algunas zonas el deterioro tiene un avance acelerado, en tanto que en otras aún se pueden aplicar medidas de prevención en vez de mitigación.

En algunas playas de la costa yucateca, el efecto de la erosión se considera crítico por la cantidad de sedimentos del litoral que se han perdido, por lo cual existe una amenaza latente de derrumbes de decenas de viviendas, de las cuales muchas ya están literalmente en contacto con el mar y han quedado en la Zona Federal Marítimo Terrestre (Según el Art. 49 L.G.B.N es la franja de 20 metros de ancho de tierra firme, transitable y contigua a la playa, o en su caso a las riberas de los ríos desde la desembocadura de estos en el mar, hasta 100 metros río arriba).

Conviene citar que la zona más afectada por la erosión, es de 15 kilómetros en el tramo que va de Chelem a Chuburná. En dicha zona la erosión costera ha provocado seria preocupación debido a sus efectos destructivos, ya que en algunas zonas se pierden cada mes hasta dos metros de playa por lo que se requiere encontrar otras alternativas de solución a este problema.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

El objetivo de esta tesis es la de realizar un estudio experimental sobre arrecifes artificiales para protección costera, que disminuyan significativamente la energía del oleaje incidente en la costa causante de la erosión en playas, como alternativa(s) a las que ya se han implementado en el tramo erosionado crítico Chelem- Chuburná y con esto conllevar a proponer una alternativa de protección costera que sea funcional y que minimice la pérdida de sedimentos en esa zona de acuerdo con las condiciones locales.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Construcción y calibración de un modelo físico reducido de arrecifes artificiales de enrocamiento, que nos ayude a analizar el comportamiento de la(s) estructura(s) seleccionada(s) bajo la incidencia de oleaje irregular.
- Ensayos de laboratorio en modelo físico reducido, de secciones de arrecifes artificiales de enrocamiento, necesarias para proponer el prototipo como alternativa de protección costera en la zona crítica Chelem-Chuburná.
- Elaborar una tesis en el marco de la investigación desarrollada, para lograr el grado de Maestría.



HIPÓTESIS.

Mediante el estudio experimental en un modelo hidráulico físico reducido de arrecifes artificiales de enrocamiento, se puede obtener una estructura alternativa a las implementadas en la región de Chelem-Chuburná, Yucatán con la que se logre disminuir la energía del oleaje incidente en la costa, y de esta forma contribuir a la restitución de la línea costera erosionada en la zona.

METODOLOGÍA.

- Realizar una investigación y revisión del estado del arte referente al proyecto de investigación.
- Documentar sobre el estado del arte referente a la elaboración de los modelos físicos
- Seleccionar las secciones de arrecifes artificiales de enrocamiento a estudiar.
- Acondicionar el equipo e instalaciones a utilizar.
- Construir el modelo físico reducido.
- Calibrar el modelo físico reducido
- Ensayar las estructuras seleccionadas en un canal de oleaje y observar su comportamiento bajo la incidencia del oleaje irregular.
- Procesar y analizar los datos obtenidos en los ensayos.
- Concluir y hacer recomendaciones en base a los resultados obtenidos.



CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

1.1. La costa.

La costa es la zona limítrofe entre el mar y la tierra firme, la cual se encuentra sometida a la acción erosiva del mar por lo que constantemente, cambia su forma dependiendo del tipo de terreno costero y de la actividad de los fenómenos oceanográficos incidentes.

Las diversas formas que puede tener la costa pueden ser acantilados, deltas, playas, valles inundados y estuarios. Las costas acantiladas son aquellas donde terminan abruptamente en la línea de costa, siendo de pendiente vertical muy pronunciada. La acción del oleaje y de las mareas, arranca material rocoso que depositan al pie del acantilado, que en un tiempo se encuentran debajo del agua y que progresivamente, quedan al descubierto formando una playa. Las mareas son muy importantes en este caso, ya que en determinado tiempo saturan las rocas de agua, reblandeciéndolas para luego dejarlas a la intemperie en donde los agentes atmosféricos actúan sobre ellas.

El material de la costa que el oleaje se lleva al mar, y el aporte de sedimentos de los ríos al mar, son distribuidos por las corrientes alrededor del litoral formando playas, o son transportados hacia la plataforma continental o en las partes más profundas del océano.

Las playas son producto del balance entre la erosión marina, y los aportes de sedimentos al mar de los ríos o suministrados desde otros lugares.

Como se mencionó anteriormente la erosión marina modifica la morfología de la costa, moldeándola provocando diversas formas en su relieve [CFE, 1983].

Cuando la costa está formada por material suelto no consolidado recibe el nombre de playa (fig. 1.1), el material de ésta es pétreo y generalmente es arena grava o boleo.

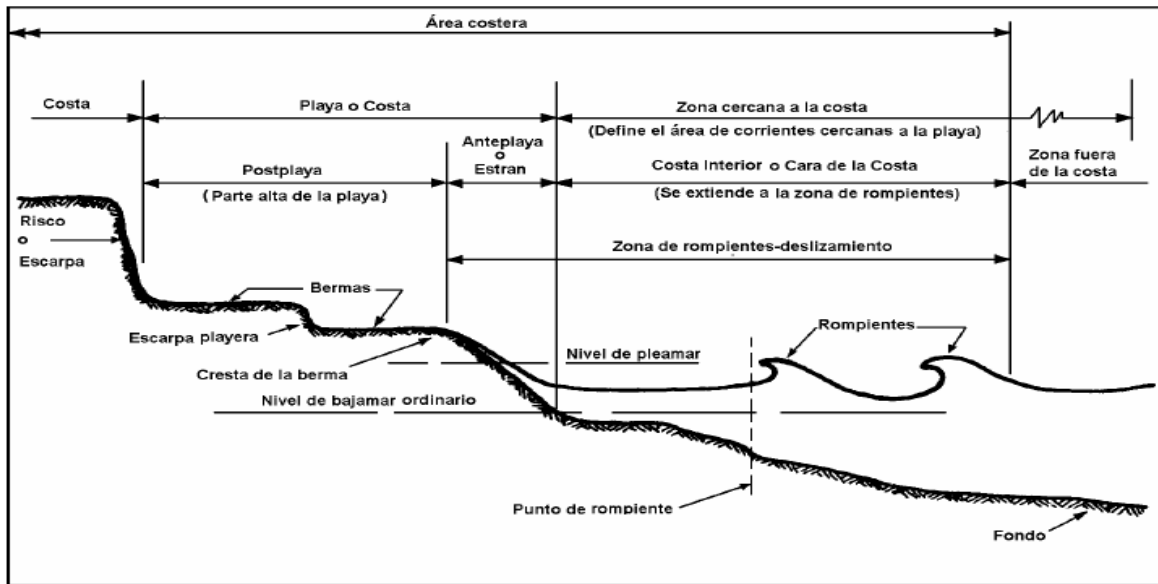


Fig.1.1. Esquema de perfil típico de una playa [USACE, 1984].

La playa es la parte de la costa cubierta de arena, que es un material suelto sujeto a erosión y acumulación, el cual se distribuye alrededor de la costa por medio del oleaje, corrientes y mareas, y que además se extiende desde el nivel de marea media baja, hasta algún accidente fisiográfico [CFE, 1983].

El sedimento de las playas es dinámico y está sujeto a ser removido, transportado y depositado por agentes naturales, por lo cual algunas zonas de la costa son inestables y por consecuencia se produce la erosión.

Los agentes principales que mueven el sedimento son: viento, oleaje, corrientes y mareas, los cuales al ser incitados por el hombre pueden provocar grave erosión sobre el litoral [USACE, 1984].



1.2. Generalidades de la erosión costera.

Por su importancia, históricamente la costa ha sido uno de los principales elementos registrados por la Cartografía, debido a su contribución con el desarrollo de las actividades humanas. En esta zona limítrofe entre mar y tierra es donde las mareas, vientos y olas atacan la tierra: es aquí donde la costa responde a estos ataques, cambiando su forma y configuración con el fin de disipar la energía del mar.

La erosión costera se define como el retroceso progresivo de la línea de costa cuyas causas pueden ser, de origen natural así como también antropogénicas (inducidas por el hombre).

La erosión de las playas se inicia principalmente a partir de la infraplaya, afectada por el oleaje y las corrientes, como resultado de la misma erosión en algún otro sitio, cercano o lejano, tendrá lugar el depósito de sedimentos, esto es, cuando en un sitio hay erosión, en otro hay depositación y viceversa (figura 1.2) [Carranza, 2009].

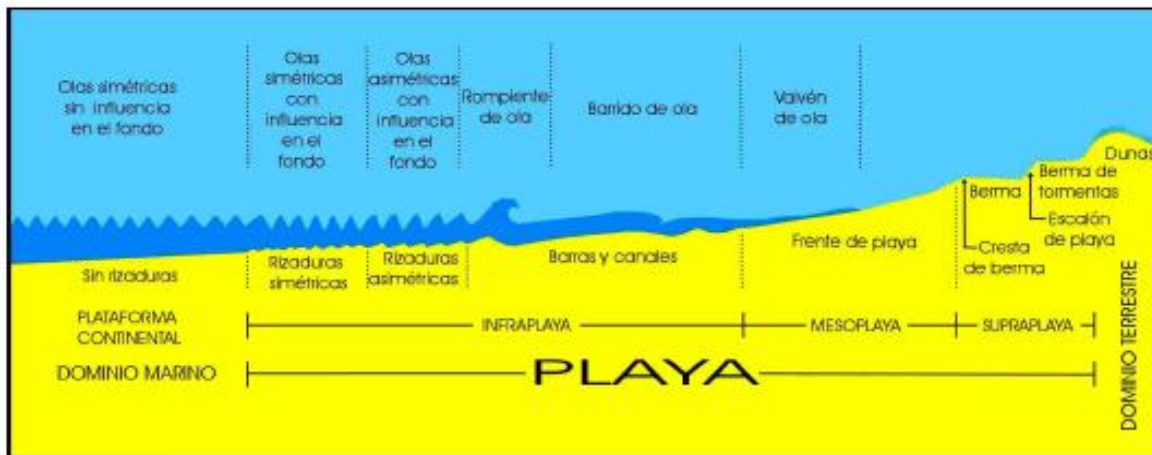


Fig. 1.2. Esquema del frente de playa y oleaje incidente [Carranza - Caso, 1994].

Algunas de las causas de la erosión son de origen natural, y son las que ocurren como resultado de la respuesta de la playa a los efectos de la naturaleza, como lo son las tormentas y huracanes.



La erosión por causas antropogénicas, es aquella inducida por el hombre y ocurre cuando éste actúa sobre el sistema natural, por ejemplo la construcción de infraestructura sobre las dunas costeras o la implementación de espigones, rompeolas, escolleras etcétera.

En muchas ocasiones la erosión costera es causada por la implementación de infraestructura de importancia económica para el hombre, y si fuera inminente esta necesidad, se debe acudir a la ingeniería de costas para minimizar o eliminar sus efectos sobre el ambiente natural.

1.2.1. Erosión por causas naturales.

Entre las causas naturales se encuentra la interacción de procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios con la morfología costera y con la batimetría del fondo de la zona cercana a la costa. Así como también:

- a. La sobreelevación del nivel del mar. Esta elevación resulta en un pequeño retroceso de la línea de costa, en parte debido directamente a la inundación y parte como resultado del ajuste del perfil en el nivel alto del agua.
- b. La reducción del suministro de sedimentos a la zona litoral. El cambio climático influye en la reducción de aquellas inundaciones sobre ríos que aportan sedimentos a la zona costera.
- c. El oleaje de tormenta. El oleaje de una tormenta en la costa, transporta la arena fuera de la costa almacenándola temporalmente en una barra o banco de arena. Después de la tormenta la recuperación parcial de la playa puede ser posible por el transporte natural de la arena dentro de la costa durante un periodo largo y con oleaje apropiado aunque en la mayoría de los casos después de una tormenta, gran cantidad del material se pierde en las profundidades del mar.
- d. Oleaje y deslave. El alcance superior de una ola es un fenómeno que ocurre durante períodos de marea por tormenta y acción crítica de oleaje. Las olas y ciertos sobre flujos deslavan la playa erosionándola transportando y depositando los sedimentos en otras partes.



e. La deflación. Es la erosión que causa el viento removiendo el material de la playa.

f. El Transporte de sedimento longitudinal a la costa. Existe una corriente paralela a la línea de costa llamada corriente litoral, que es generada por el oleaje rompiente, el cual incide sobre la costa con cierto ángulo. Esta corriente transporta el material a lo largo de la costa, pudiendo causar erosión en las zonas donde no se tenga un aporte suficiente de sedimentos.

g. La selección de la granulometría de sedimento playero. Esta resulta de la acción del oleaje, en el cual se redistribuye de forma selectiva las partículas de sedimentos (arena, concha y boleos) a lo largo del perfil de la playa de acuerdo al tamaño o propiedades hidráulicas.

Este mecanismo es particularmente importante en el diseño para los proyectos de retro-alimentación de la playa, debido a que la pérdida selectiva de material fino fuera de la costa y la retención del material grueso en la zona de rompiente de la playa requiere de un terraplén adicional en orden para balancear la pérdida de sedimento [USACE, 1984].

1.2.2. Erosión por causas inducidas por el hombre.

También llamadas antropogénicas y entre ellas se encuentra: la ocupación y construcción en la duna litoral así como la construcción desordenada de obras de protección.

Entre otras causas también se encuentran:

a. Socavación del terreno con la remoción de recursos superficiales. La remoción de recursos naturales, como gas, aceite, carbón y agua superficial en la zona costera, puede causar disminución de la playa. Esto tiene el mismo efecto como si se tratara del nivel superior del mar.

b. Interrupción en el transporte de sedimentos. Este caso es probablemente la causa más importante de erosión antropogénica. La construcción de estructuras para retener la arena como lo son los espigones, puede ocasionar una interrupción en el suministro de sedimentos, sin embargo esto puede ser minimizado por sistemas de bypass de arena.



- c. Reducción de suministro de sedimento a la zona litoral. La construcción de embalses en ríos, los cuales representan el mayor aporte de material a la costa, forman trampas reduciendo el suministro de sedimento a la costa lo que resulta en una erosión costera.
- d. Concentración de energía de oleaje sobre las playas. Las estructuras con paredes verticales construidas en la zona activa de la playa o en la post-playa, pueden incrementar la cantidad de energía de oleaje que tendría que ser disipada por el material de la playa frente la estructura, teniendo como resultado, un incremento de la erosión.
- e. Incremento de la variación del nivel del agua. Los canales de navegación profundos y amplios, pueden afectar negativamente el rango de marea en el puerto o la bahía, provocando que grandes olas entren al puerto y playas adyacentes exponiendo de esta forma el frente del puerto o de la playa, a los efectos erosionantes del oleaje, pudiendo causar cambios en el perfil litoral.
- f. Cambio natural de la protección costera. El dragado de las barras cercanas a la costa y de los bajos de arena, puede cambiar el patrón de disipación de energía en la cara de la playa; si los cambios incrementan la energía de oleaje que actúa sobre una sección de playa dada, se tendrá como resultado erosión en dicha zona. Por lo tanto, la nivelación de dunas, destrucción de vegetación en la playa, la pavimentación de grandes áreas en la zona post playa y la construcción de canales de navegación en la parte posterior de un estrecho cordón litoral puede incrementar la erosión y una potencial apertura en el cordón.
- g. Remoción de material de la playa. La remoción de las dunas de arena cualquiera que sea el propósito, es una pérdida directa a la cantidad de material disponible para el transporte litoral **[USACE, 1984]**.



1.3. Agentes meteorológicos y oceanográficos.

1.3.1. El viento.

El viento es el movimiento de las masas de aire que están relativamente cerca de la superficie terrestre. Es generado debido a las diferencias de presión atmosférica, por las diferencias de temperatura y de la densidad del aire.

Los vientos se mueven debido al gradiente de presiones, hacia donde la presión es menor y por efecto de la rotación de la tierra (fuerza de Coriolis) hacia la derecha en el Hemisferio Norte. Y por esta razón la circulación resultante es anticiclónica (a favor de las manecillas de un reloj), cuando son alrededor de los centros de alta presión atmosférica; y ciclónica (contra las manecillas de un reloj), en el caso de los centros de baja presión atmosférica.

La clasificación del viento respecto a su acción se puede clasificar en:

1. Constantes o regulares: Soplan en una sola dirección todo el año.
2. Periódicos: Cambien su dirección en relación con las estaciones del año y con el día y la noche.
3. Irregulares: Son aquellos que no son periódicos y soplan en cualquier dirección.

Los elementos que caracterizan al viento son:

1. Dirección que sopla
2. Intensidad o velocidad con que sopla
3. Frecuencia con la que se presenta

Los vientos cuando tienen la suficiente velocidad, actúan directamente sobre la playa moviendo la arena transportándola y depositándola en dunas a lo que se le llama deflación [**Savage - Woodhouse, 1968**].

El viento generalmente se lleva el material más fino dejando atrás las partículas de mayor tamaño y los fragmentos de conchas, formando las dunas de arena.



Existen 3 formas en que se presenta el transporte eólico:

1. Suspensión: Las partículas de material fino y ligero son levantadas por el viento y son acarreadas en distancias considerables.
2. Salteo: Las partículas que son menos ligeras son acarreadas por el viento en forma de pequeños saltos a lo largo de la superficie de la playa.
3. Arrastre superficial: Las partículas más grandes son rodadas por la fuerza del viento o por el movimiento de las que ascienden.

Estos métodos de transporte natural, seleccionan el material de la playa de tal modo que las partículas más pequeñas quedan en la duna costera, las medianas en la antiduna y las partículas más grandes en la zona de la rompiente de la ola [Bagnold, 1942].

Los principales elementos que contribuyen a combatir la erosión del sedimento playero por acción del viento, son las condiciones topográficas locales, las dunas y sobre todo la vegetación sobre la costa, los cuales atrapan la arena en movimiento fijándola en la duna costera.

Las dunas que son más importantes en este proceso litoral, son las antidunas, las cuales se encuentran inmediatamente detrás de la playa, y se forman debido a que los pastos playeros atrapan la arena que se mueve desde la playa hacia la tierra, estas acumulaciones de sedimento funcionan como una barrera protectora contra el oleaje y la pleamar, además proporcionan una reserva de arena llenando las zonas costeras posteriores a ella después de alguna erosión severa por tormenta. Es el viento el principal generador del oleaje, y su incidencia y efectos sobre la costa es permanente. El viento sopla sobre una determinada área del mar denominada fetch (fig. 1.3), en donde se genera el oleaje. El oleaje es el resultado del rozamiento del aire sobre la superficie del mar y su intensidad depende de la velocidad o intensidad del viento, de su duración y de la longitud del fetch sobre la cual sopla el viento (fig. 1.4).

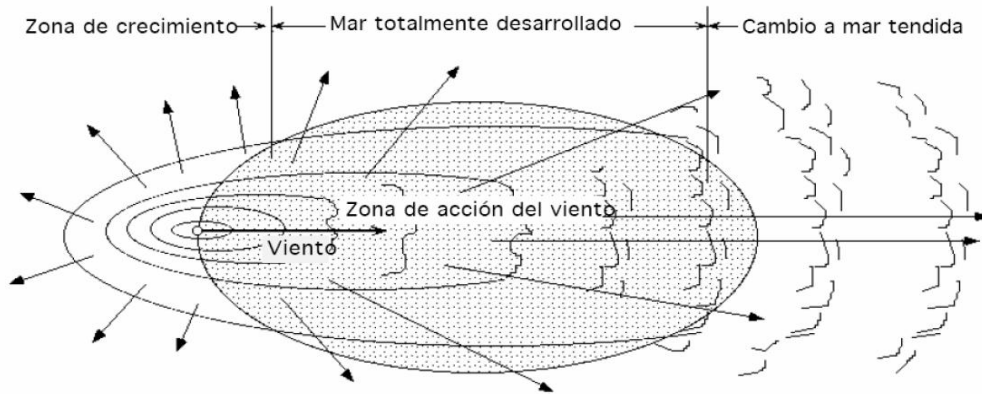
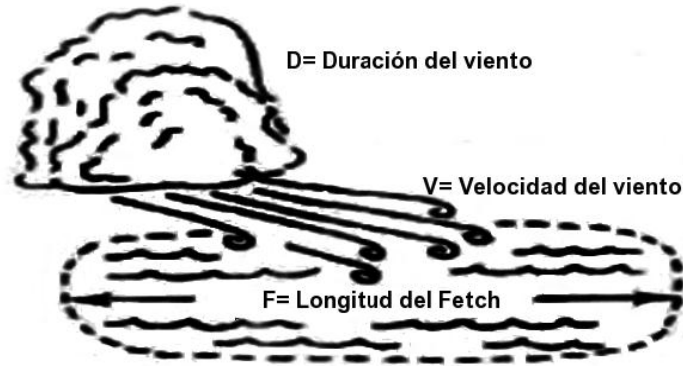


Fig.1.3. Zona de generación del oleaje por influencia eólica (Fetch) [Fernández, 2004].



La transferencia de energía del viento a las olas es $f(U, D, F)$

Fig.1.4. Dependencia del oleaje respecto a la velocidad del viento (U), duración de la tormenta (D) y longitud de Fetch (F). Modificado de [Komar, 1983].

Al soplar el viento sobre la superficie del mar en aguas profundas, se generan dos tipos de oleaje: El primero es denominado Sea o mar de viento (figura 1.5), que se produce en la zona de generación denominada fetch, el cual es un oleaje turbulento con diferentes direcciones aunque predomina la dirección en la que sopla el viento, se distingue por ser caótico ya que no cuenta con alturas y períodos definidos.

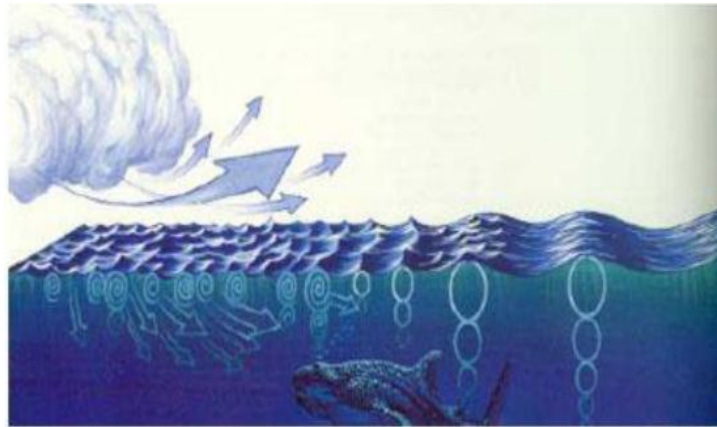


Fig.1.5. Él Sea [Medina, 2009].

Al propagarse estas olas, se alejan de la zona donde se generaron y de la influencia del viento, entrando a una etapa de decaimiento en la cual las olas son disminuidas en altura y separadas por períodos, las cuales se van acercando a la costa propagándose en una sola dirección principal, (tren de olas) a lo que se le denomina Swell (fig 1.6).



Fig.1.6. El Swell [Medina, 2009].

Existen varias teorías que explican la generación de oleaje; una de ellas es la de Jeffrey quien en 1925 investigó que el viento transfiere energía al oleaje, debido a las diferencias de presión causadas por el efecto de bloqueo debido a las crestas. En la figura 1.7 se esquematiza el modelo de Jeffrey en el cual, las líneas largas sobre la superficie del mar, representan el viento y las que están debajo del mar representan el movimiento del agua; en la parte trasera de la ola se experimenta un aumento de presión en tanto que en la parte delantera de la ola, existe una disminución de la presión que permite que la ola se impulse hacia adelante.

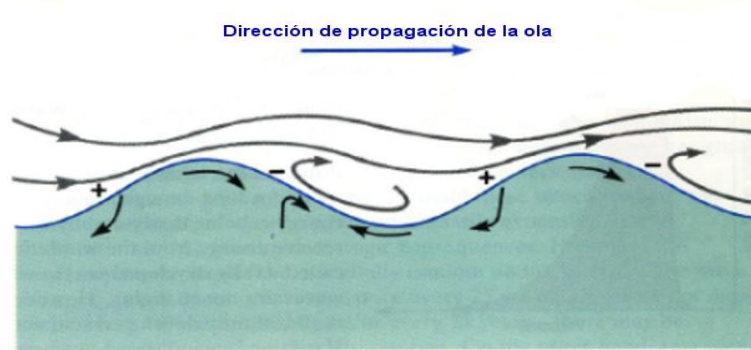


Fig.1.7. Modelo de Jeffrey. Modificado de [Medina, 2009].

El modelo de Jeffrey es válido cuando la velocidad del viento sea mayor a la del oleaje, y superior a 1 m/s, cuando la altura de la ola sea suficiente para bloquear el viento [Medina, 2009].

El oleaje se clasifica de acuerdo a la distancia de la tormenta con respecto al punto de observación.

Cuando el oleaje proviene de tormentas cercanas a éste se le conoce como mar local, y cuando proviene de tormentas lejanas se le conoce como mar distante. Para la medición de la intensidad del viento se utiliza la escala internacional de Beaufort (tabla 1.1), ésta describe el viento relacionando su velocidad o intensidad con la altura del oleaje y las condiciones en mar y tierra.

La escala Douglas (tabla 1.2) describe el oleaje relacionando su altura con su origen, es decir mar local o distante para cada una de los grados de Beaufort. Esta última es la aceptada por la Organización Meteorológica Mundial para caracterizar el estado del mar [SNET, 2009].



Tabla1.1. Escala de Beaufort [Ruiz, 2011].

Grado	Velocidad del viento		Descripción	Altura del oleaje		Condiciones en mar	Condiciones en tierra
	Kph	Nudos		Metros	Pies		
0	<1	<1	Calma	0	0	Superficie del mar lisa.	El humo sube verticalmente.
1	2-4	1-2	Ventolina	0.1	0.3	Superficie del mar rugosa.	El movimiento del viento es visible en el humo
2	6-19	3-10	Brisa suave	0.6	2	Oleaje de longitud corta. Rompimiento parcial de crestas. Espuma cristalina.	El viento se siente en la piel y las hojas susurran. Las hojas en constante movimiento.
3	20-28	11-15	Brisa moderada	1	3.3	Incremento en la longitud del oleaje. Rompimiento parcial de crestas. Espuma blanca. El sonido es suave y se disipa rápidamente.	El polvo y papel suelto se eleva. Pequeñas ramas comienzan a moverse.
4	30-37	16-20	Brisa regular	2	6.6	Oleaje de longitud mediana. Rompimiento total de crestas. Espuma blanca. El sonido es suave pero perdura por más tiempo.	Ramas de tamaño moderado se mueven. Pequeños árboles comienzan a balancearse.
5	39-48	21-26	Brisa fuerte	3	9.9	Oleaje de longitud mediana e incremento en la altura del oleaje. Superficie del mar con áreas de espuma blanca. El sonido es fuerte.	Ramas grandes se mueven. Los cables silban. Se hace difícil el uso de sombrillas. Depósitos vacíos de basura se vuelcan.
6	50-61	27-33	Temporal moderado	4	13.1	Superficie del mar encrespado. La espuma tiende a alinearse en bandas en la dirección del viento.	Los árboles se mueven. Se requiere un esfuerzo para caminar contra el viento. Se puede sentir el balanceo en los últimos pisos de edificaciones altas.
7	63-87	34-47	Temporal regular	7	23	Incremento de la longitud y altura del oleaje como de la longitud de sus crestas. Las bandas de espuma acortan distancia.	Se rompen las ramas de los árboles. Los carros son desviados por la fuerza del viento. Se caen pequeños árboles, señales de construcciones temporales y barricadas. Daños en carpas.
8	89-117	48-63	Temporal fuerte	11.5	37.7	Oleaje de gran altura y longitud de cresta. Rompimiento constante del oleaje. Formación rápida de bandas de espumas. Superficie del mar con grandes áreas de espuma blanca. Visibilidad reducida.	Se rompen los árboles o son sacados de raíz. Árboles jóvenes son doblados y deformados. Se levantan láminas mal sujetadas de los techos. Daños extendidos en la vegetación. En la mayoría de techos se desprenden láminas.
9	>117	>63	Huracán	>14	>46	Oleaje de enorme altura en constante rompimiento. El aire está saturado de agua pulverizada por el viento. Visibilidad mínima.	Daños considerables y extendidos en la vegetación. Algunas ventanas rotas. Daños estructurales a casas móviles y edificaciones mal construidas. Basura arrojada o lanzada por el viento.



Tabla 1.2. Escala de Douglas [Ruiz, 2011].

Grado	Altura del oleaje (metros)	Descripción del mar local	Descripción del Swell
0	0	Llana	Sin olas
1	0-0.10	Rizada	Olas cortas y pequeñas
2	0.10-0.50	Marejadilla	Olas largas y pequeñas
3	0.50-1.25	Marejada	Olas cortas y moderadas
4	1.25-2.50	Fuerte marejada	Olas medianas y moderadas
5	2.50-4.0	Gruesa	Olas largas y moderadas
6	4.0-6.0	Muy gruesa	Olas cortas y grandes
7	6.0-9.0	Arbolada	Olas medianas y grandes
8	9.0-14.0	Montañosa	Olas largas y grandes
9	14	Enorme	Olas de longitud y altura variable

1.3.2. Oleaje.

El oleaje puede describirse como una serie de ondulaciones que se propagan sobre la superficie del mar, y que son producidas en aguas profundas por la acción del viento y recorren los océanos hasta llegar a la zona costera en donde se disipa su energía. Este es producido por la acción del viento y es el fenómeno oceanográfico más energético, por lo que su estudio es de vital importancia en lo relacionado a las obras de protección costera ya que su incidencia en el litoral, es la mayor causa de cambios físicos en el perfil de las playas y de la consecuente erosión costera.

El cuerpo de la ola se forma por una cresta y un valle, siendo los parámetros que la describen: la altura, el período, la longitud de ola, la celeridad, la profundidad y la relación de esbeltez (fig.1.8), [USACE, 1984].

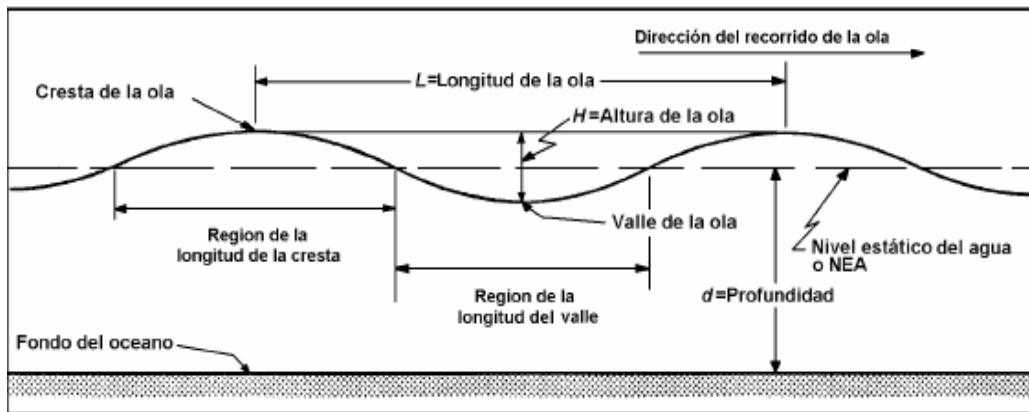


Fig.1.8. Esquema de las características de una ola [USACE, 1984].

El oleaje para su estudio se divide en oleaje monocromático o regular y en oleaje irregular, siendo éste el que se presenta en la naturaleza. El oleaje monocromático se estudia y describe de forma simple con un movimiento forma sinusoidal con alturas y períodos regulares (fig.1.9).

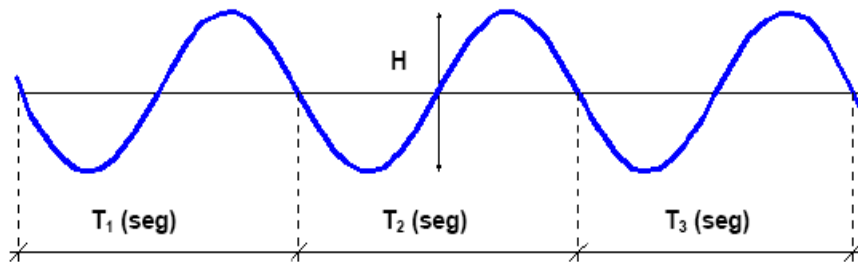


Fig. 1.9. Oleaje regular [Ramírez, 2009].

A diferencia el oleaje irregular, es difícil y complejo de describir matemáticamente debido a que las características del movimiento son tridimensionales aleatorias y no son lineales (fig. 1.10), [USACE, 1984].

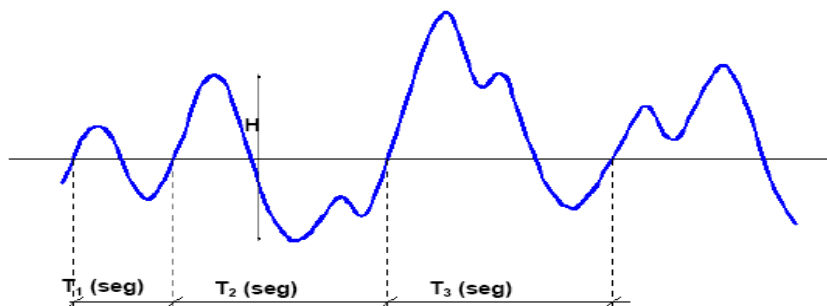


Fig. 1.10. Idealización del oleaje irregular [Ramírez, 2009].



1.3.2.1. Clasificación de las olas.

Dentro de los criterios para clasificar las olas, a continuación se mencionan los más relevantes (fig.1.11):

Respecto al período [**Kinsman, 1965**].

- Capilares
- De gravedad
- De ultragravedad
- De infragravedad
- De período largo(Mareas)
- De transmarea (Tsunamis)

Respecto a la profundidad relativa

- Aguas profundas
- Aguas intermedias
- Aguas someras o reducidas.

Respecto a la altura de la onda

- Amplitud pequeña
- Amplitud finita

Respecto al desplazamiento de su cresta

- Ondas estacionarias
- Ondas progresivas.

Respecto al movimiento de sus partículas

- Ondas de traslación
- Ondas de oscilación

Respecto al tiempo de aplicación de la fuerza o acción

- Ondas libres
- Ondas forzadas

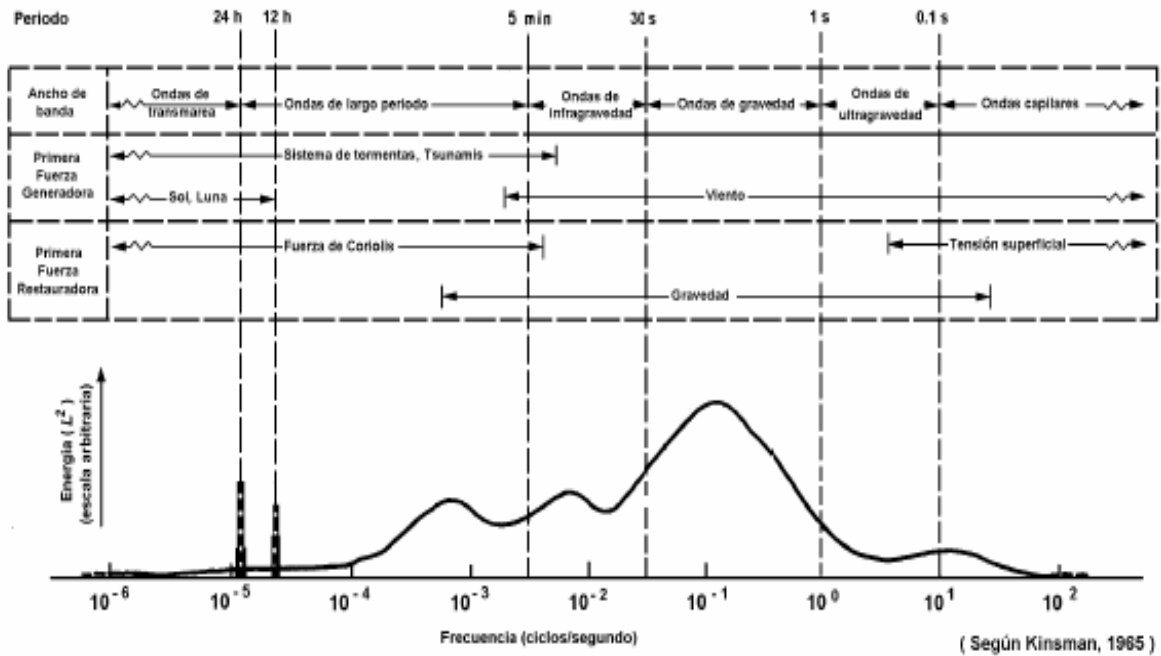


Fig.1.11. Clasificación de las olas conforme a su período [USACE, 1984].

1.3.2.2. Teorías del oleaje.

Como se mencionó anteriormente el oleaje en la naturaleza es irregular, es decir que su comportamiento es aleatorio y no lineal por lo que su descripción matemática presenta ciertas dificultades. Sin embargo a través del tiempo se han desarrollado teorías las cuales han ido evolucionando, estas son aproximaciones a la realidad y por lo tanto pueden describir bien sólo aquellos fenómenos que en su comportamiento real, puedan satisfacer las condiciones matemáticas hechas en su derivación.

Uno de los objetivos de las teorías es la protección de la costa el cual depende de la precisión en las aproximaciones formuladas y de la predicción de los perfiles de la superficie del mar y del movimiento del agua [Medina, 2009].

En esta tesis solo se mencionará las de mayor relevancia.



Existen dos clases de teorías: las lineales y las no lineales.

Dentro de las lineales o de primer orden se encuentran las de amplitud pequeña, una desarrollada por Airy (1845) y la otra por Stokes (1880), las cuales describen el oleaje simple y generalmente predicen mejor el comportamiento del oleaje donde la relación de esbeltez es relativamente grande. (H/L).

La teoría de Airy describe un oleaje de tipo sinusoidal (fig. 1.12), y es de importancia fundamental ya que es de fácil aplicación además que es confiable para muchos casos de régimen de oleaje y puede considerarse como una primera aproximación de la descripción teórica del comportamiento del oleaje [USACE, 1984].

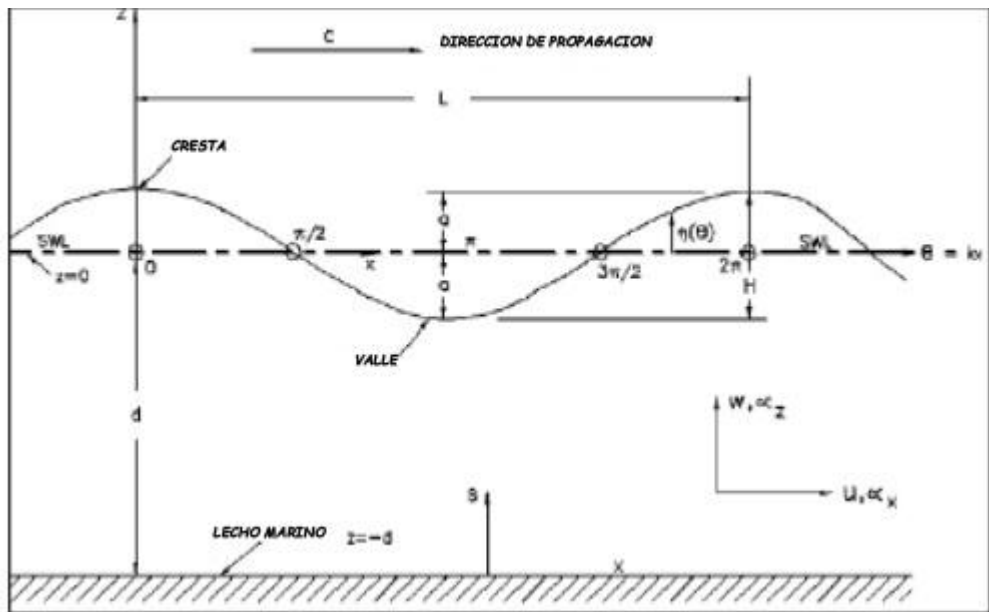


Fig.1.12. Onda de Airy [USACE, 1984].

Dentro de las teorías no lineales de orden superior encontramos la teoría trocoidal [Gerstner, 1802], que fue la primera en considerar ondas de amplitud finita. Es muy adecuada para describir con mucha precisión el perfil de la onda, sin embargo el movimiento de la partícula precedido no es el observado en la naturaleza.



[Stokes, 1880], desarrolló otra teoría de ampliación finita más precisa que la trocoidal, la cual en sus aproximaciones de orden superior describe adecuadamente el oleaje en aguas profundas.

Las teorías mencionadas anteriormente no son válidas en el caso de oleaje en aguas someras o reducidas ya que no consideran la influencia del fondo del océano en el perfil de la ola [Frías - Moreno, 1988].

En este caso la teoría Cnoidal [Korteweg- De Vries, 1895], sí es válida y es la que mejor define el funcionamiento ondulatorio del oleaje en aguas reducidas aunque, su aplicación no es muy práctica debido a su dificultad además que ya no es tan válida su aplicación cuando el oleaje se acerca a la zona de rompiente.

En cambio la teoría de la onda solitaria [Russell, 1845], se aproxima mejor y es mucho más sencilla de manejar. La ola solitaria no es oscilatoria ni tampoco muestra un valle, ésta se forma completamente por encima del nivel estático del agua, siendo de esta forma una ola de traslación en relación con la masa de agua [USACE, 1984]. En la figura 1.13 se hace una comparación de los diferentes perfiles de acuerdo a las teorías mencionadas.

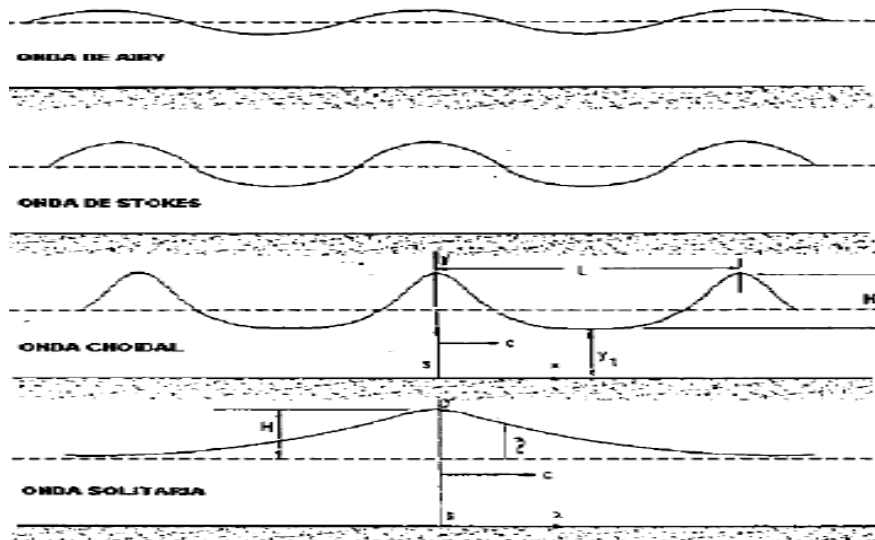


Fig. 1.13. Comparación de las diferentes teorías del oleaje [Medina, 2009].



En la figura 1.14, se esquematiza las áreas de validez de las diferentes teorías del oleaje en donde todavía no aparece la teoría de Fenton porque fue desarrollada posteriormente a la elaboración del gráfico.

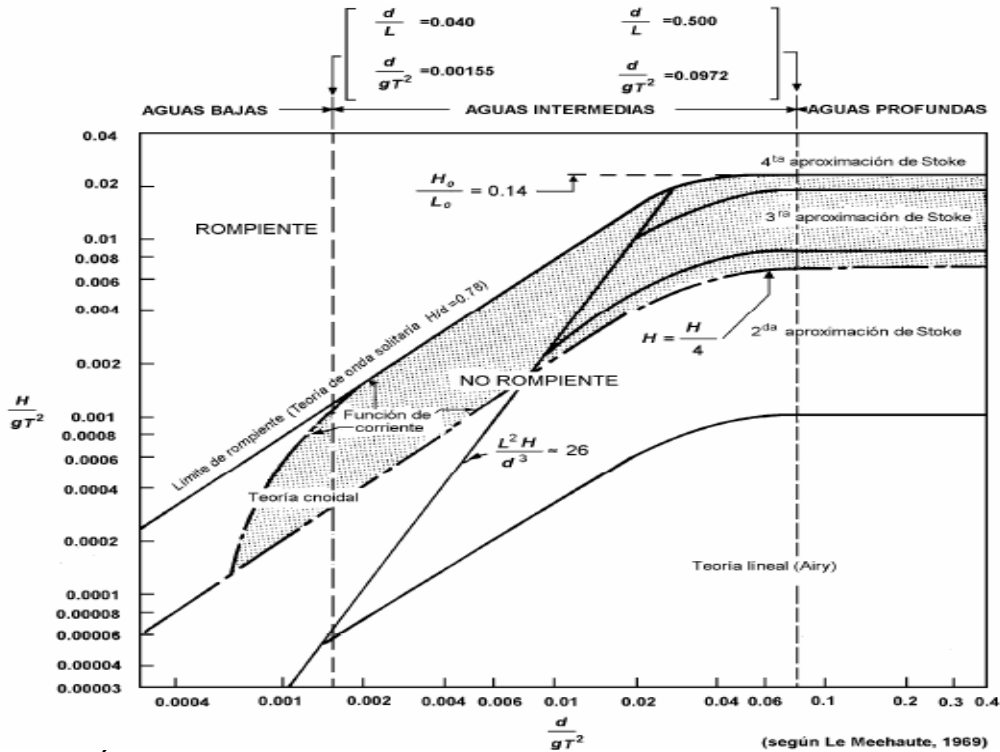


Fig.1.14. Áreas de validez de las diferentes teorías del oleaje [Le Mehaute, 1969].

1.3.2.3. Oleaje irregular.

El oleaje monocromático es una idealización aproximada del comportamiento natural del oleaje, sin embargo no es el que se presenta en la naturaleza.

El oleaje irregular es el que se presenta en la naturaleza y su estudio es de vital importancia en el campo de la ingeniería, ya que al emplearlo se observan grandes diferencias respecto a cuestiones de diseño, de donde se deriva el dimensionamiento que pudiera representar costos importantes en la infraestructura marítima- portuaria.



El oleaje irregular se estudia en base a datos y predicciones estadísticas del oleaje real tomando en cuenta el oleaje extremo o de tormenta utilizado para el diseño de estructuras en donde los parámetros a definir es la altura y el período de ola significativa **[Ruiz, 2011]**.

1.3.2.4. Predicción del oleaje.

La predicción del oleaje es el procedimiento para calcular las características del oleaje producido por alguna perturbación meteorológica o tormenta tropical. Tiene por objetivo determinar las condiciones a las que se verán sometidas las estructuras en la costa por efectos del oleaje extremo, el cual se considera factor determinante en el diseño de las mismas **[Ruiz, 2011]**.

Para obtener las características de la altura de ola y período se utilizan 3 tipos de métodos de predicción que pueden alimentarse ya sea con datos meteorológicos o registros de oleaje dependiendo sea el caso.

- a. Fórmulas empíricas: Las variables que intervienen son la altura y período, oleaje promediado contra la velocidad del viento y el fetch, son válidas solo para oleaje monocromático.
- b. Ola significativa: Tradicionalmente se ha definido la altura de ola significativa como aquella que percibe un observador habituado al mar. Fue definida por **[Sverdrup - Munk 1947]**, intentando vincular las alturas de ola medidas con las observadas por los marineros **[Medina, 2009]**.
Relaciona la altura de ola significativa ($H^{1/3}$) y el período significativo ($T^{1/3}$) con la velocidad y duración del viento y la longitud del fetch **[Ruiz, 2011]**. Existen para dos tipos de predicción uno para datos meteorológicos y para registros de oleaje.
- c. Espectros energéticos. Predice las características de la ola utilizando la teoría del espectro, desplazando a los métodos de ola significativa en relación al oleaje irregular.

1.3.2.5. Espectros energéticos de oleaje.

En la naturaleza el oleaje no se presenta en forma sinusoidal simple (oleaje regular), si no que se presenta como superposiciones de muchas de ellas (fig. 1.15), y cada onda con características diferentes lo cual conlleva a la construcción de una superficie concebida como la suma de ondas de amplitud variable que se le conoce como análisis espectral (fig. 1.16). Es la combinación de estas ondas la que se observa cuando se mira el mar desde un punto fijo [UAMAE, 2010].

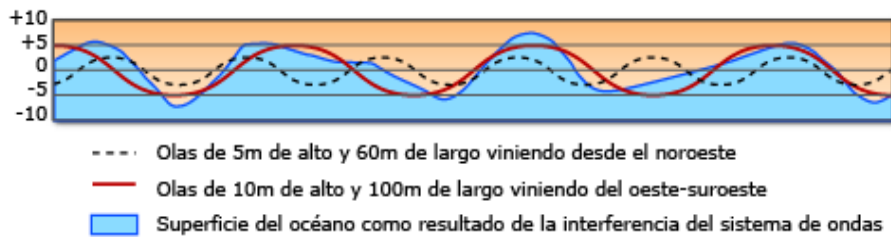


Fig.1.15. Superposición de ondas como se presentan en la naturaleza [UAMAE, 2010].

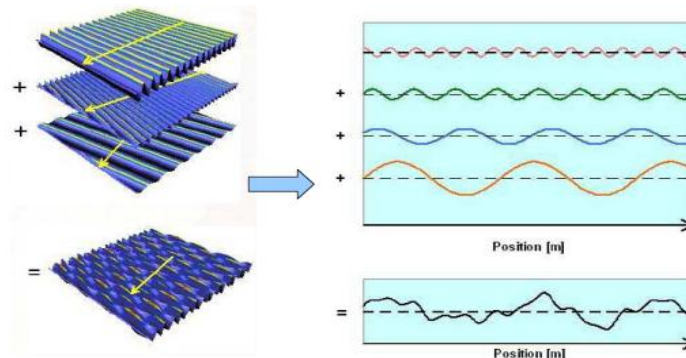


Fig. 1.16. Oleaje irregular como resultado de la sumatoria de olas regulares [Del Olmo, 2009].

El espectro es una de las formas más habituales de describir las propiedades del oleaje irregular (fig. 1.17). Dicho espectro representa como se distribuye la energía en las diferentes frecuencias y se obtiene a partir del cálculo de la serie de Fourier [Del Olmo, 2009].

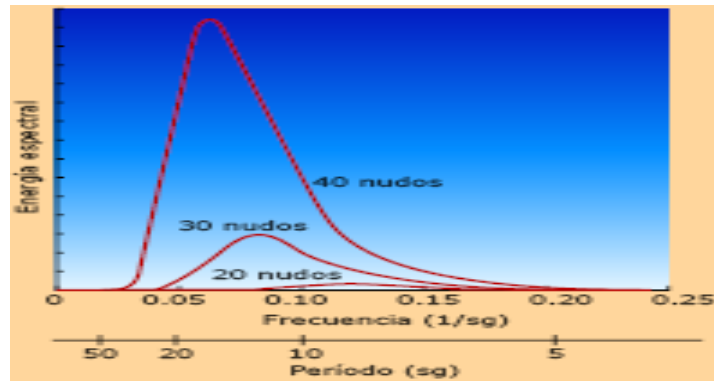


Fig. 1.17. Espectro de energía [UAMAE, 2010].

1.3.2.6. Espectro frecuencial y direccional.

La distribución de la energía en el dominio de las frecuencias se representa por el espectro de energía $S(f)$ (fig. 1.18), mientras que la distribución de la energía en el dominio de la dirección se representa por la función de dispersión direccional $D(f,\theta)$ (fig.1.19), [UAMAE, 2010].

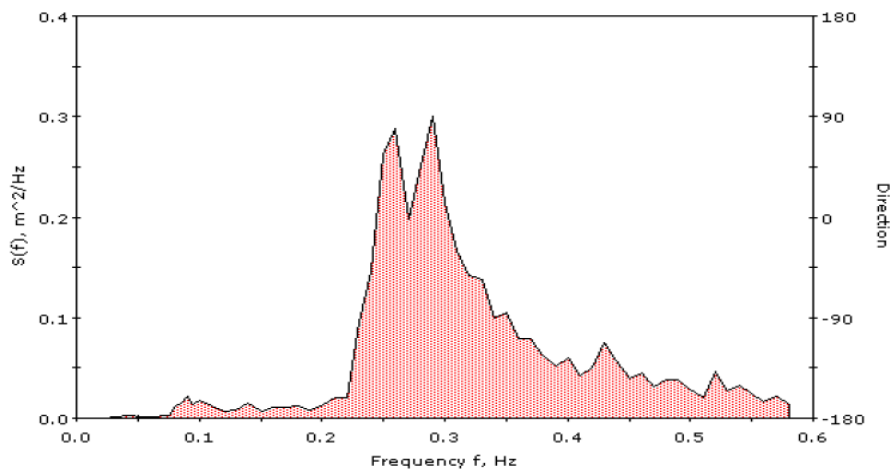


Fig. 1.18. Ejemplo de espectro frecuencial [Ortiz, 2003].

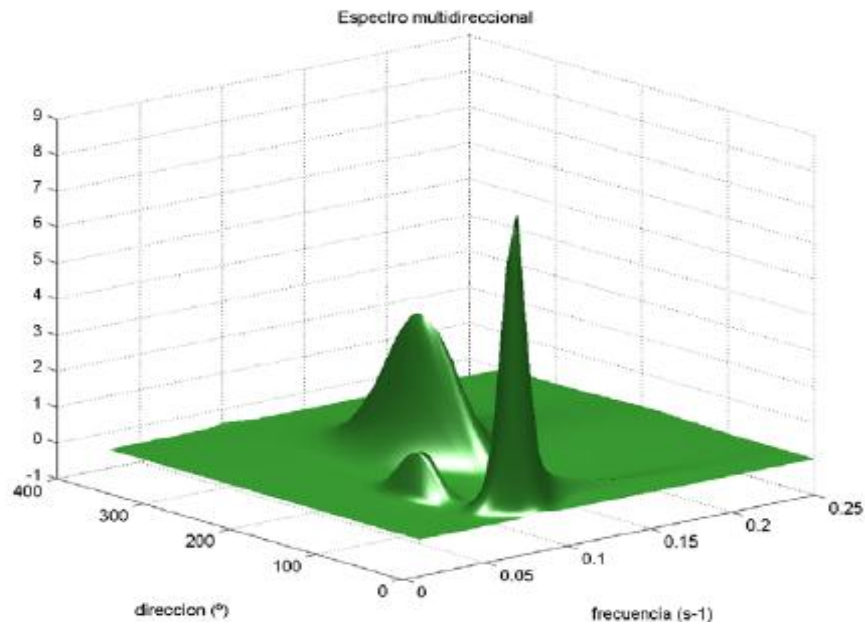


Fig.1.19. Ejemplo de un espectro de energía direccional, compuesto de dos oleajes, un sea y un swell [Del Olmo ,2009].

1.3.2.7. Modelos espectrales de un estado de mar.

El concepto de modelo espectral del oleaje en el dominio frecuencial, fue introducido primeramente por Neumann [Neumann, 1953] y Pierson [Pierson et al, 1953]. Existen muchos espectros pero entre los más importantes se encuentran:

Espectro de Pierson-Moscowitz.

Pierson y Moscowitz en 1964, se dedicaron al estudio de los espectros de oleaje en la zona del Atlántico Norte, los cuales con datos medidos en la zona desarrollaron la fórmula basada en la teoría de similitud de Kitaigorodskii, con el fin de representar los estados de mar completamente desarrollados generados por la acción eólica (fig. 1.20). Para que la aplicación del modelo sea válida se requiere que el viento sople con una velocidad constante durante varias horas sobre un área grande, todo esto antes de que el registro del oleaje medido se tome. En este se considera el Fetch y la duración de la acción del viento de forma infinita.



Este espectro representa el oleaje tipo local completamente desarrollado sobre el océano [Pierson et al, 1964].

La expresión del espectro a partir de las características del oleaje es:

$$S(f) = \frac{H_s^2}{2} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 (2\pi f)^{-5} \cdot e\left[-\left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \left(\frac{2\pi f}{\pi}\right)^{-4}\right] \quad (1.0)$$

donde:

T_z = Período medio por el método de cruces por cero.

H_s = Altura de ola significativa

f = Frecuencia.

Espectro de Jonswap-Hasselmann.

Las olas de un fetch limitado bajo la incidencia de vientos intensos, se caracterizan en un espectro de picos agudos. Dicha forma del espectro ha sido demostrada por un programa de observación de olas conocido como “Joint North Sea Wave Project” (JONSWAP). Un grupo de investigadores liderados por Hasselmann, formularon una expresión basada en el espectro de Jonswap (fig. 1.20), la cual está en función del fetch [Hasselmann et al, 1973]. No obstante, en base a un análisis numérico de perfiles de olas simuladas bajo formas espectrales dadas, Yoshimi Goda logró poner la fórmula en función de la altura de ola significativa y período pico [Goda, 1988].

$$S(f) = \alpha (H_{1/3})^2 T_p^{-4} f^{-5} \cdot e\left[-1.25(T_p f)^{-4}\right] \gamma \cdot e\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.1)$$

donde:

T_p = Período pico del registro.

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

$$\alpha = \frac{0.0624}{[0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}]} \cdot [1.094 - 0.01915 \cdot \ln \gamma] \quad (1.2)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a: f \leq f_p \\ \sigma_b: f \geq f_p \end{cases}$$

γ = factor de intensificación del pico de 1~7 (medio 3.3)



$$\sigma_a = 0.07$$

$$\sigma_b = 0.09$$

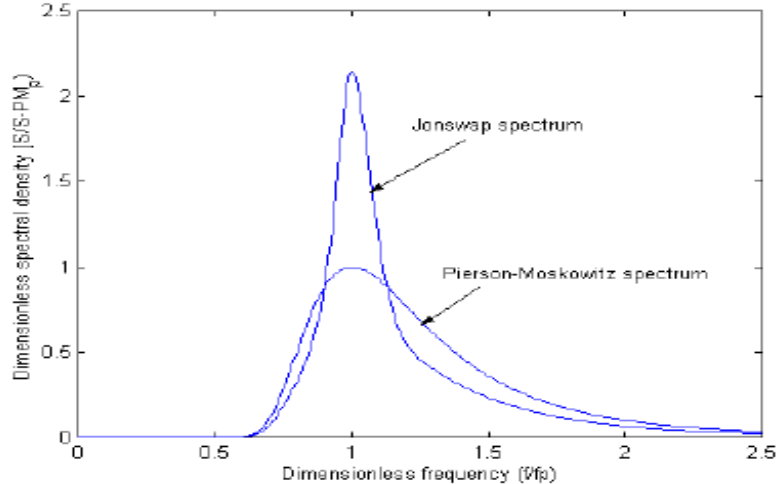


Fig. 1.20. Espectro de Jonswap y Pierson-Moskowitz [Del Olmo, 2009].

Espectro de Bretschneider –Mitsuyasu.

Bretschneider propuso un espectro desde el punto de vista ingenieril de banda angosta suponiendo que las alturas y períodos de la ola siguen la distribución de Rayleigh [Bretshneider, 1959]. A éste, Mitsuyasu (1970) ajustó los valores de los coeficientes mediante estudios de oleaje en laboratorio [Mitsuyasu, 1970].

$$S(f) = 0.257(H_{1/3})^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \cdot e^{-1.03(T_{1/3} f)^{-4}} \quad (1.3)$$

donde:

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

$T_{1/3}$ = Período de ola significativa.



Espectro de Neumann.

Este modelo es función de la velocidad del viento a 10 metros sobre el nivel medio del mar (U_{10}), y fue el primer modelo espectral analítico usado con fines de diseño ingenieril, desarrollado a partir del histograma de energía de las olas individuales, de acuerdo a mediciones visuales [Neumann, 1953], y su expresión es:

$$S(f) = 1.466H_{m_0}^2 \cdot e^{\left[-3\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-2}\right]} \quad (1.4)$$

donde:

H_{m_0} = Altura de ola del momento de orden cero, donde $H_s \approx H_{m_0} = 4(m_0)^{1/2}$, donde la frecuencia pico se obtiene:

$$f_p = \left[\left(\frac{1}{6}\right) \left(\frac{g}{\pi U_{10}}\right)\right]^{1/2} \quad (1.5)$$

Espectro ISSC.

Llamado así por las iniciales del Congreso de la International Ship Structures Congress de 1964 (ISSC) se sugirió una modificación al espectro de Bretchneider [Chakrabartis - Cooley, 1977], quedando de la siguiente manera:

$$S(f) = 0.1107 H_s^2 \frac{\bar{f}^4}{f^5} \cdot e^{\left[-0.4427 \left(\frac{f_s}{\bar{f}}\right)^4\right]} \quad (1.6)$$

Donde la relación de la frecuencia de pico f_p , entre la frecuencia media \bar{f} es:

$$\bar{f} = 1.296f_p \quad (1.7)$$



Espectro ITTC.

Llamado así por las iniciales del Congreso International Towing Tank Conference de 1966,1969 y 1972; se sugirió una modificación al espectro de Pierson-Moskowitz en términos de la altura de ola significativa y la frecuencia media $f_z = \frac{1}{t_{02}}$

[Chakrabartis - Cooley, 1977], quedando la expresión de la siguiente forma:

$$S(f) = 1.272 m_0 f_z^{-4} f^{-5} \cdot e^{\left[-0.318 \left(\frac{f_z}{f}\right)^4\right]} \quad (1.8)$$

Espectro TMA.

Es el espectro cuya aplicación se adapta mejor en aguas de profundidad infinita. Los investigadores Bows, Rosenthal y Vincent se basaron en las fuentes de datos de oleaje TEXEL, MARSEN Y ARSLOE para proponer el espectro TMA, el cual está relacionado con la profundidad del agua por lo que su aplicación en aguas someras es funcional. Se define a partir del espectro de JONSWAP como se expresa en la siguiente ecuación:

$$S_{TMA} = S_J(f) \phi k(\omega_H) \quad (1.9)$$

donde:

$$\phi k(\omega_H) = \frac{\tanh^2(kh)[1+(2kh)]}{\sinh(2kh)} \quad (1.10)$$

Donde k se evalúa a partir de la ecuación de dispersión:

$$(2\pi f)^2 = gk \tanh(kh) \quad (1.11)$$

En éste método se incluye implícitamente los procesos de atenuación del oleaje como la fricción del fondo, rompiente y refracción [Tucker, 1994].



1.3.3. Mareas.

El primero en demostrar este fenómeno fue Newton en su “Philosophie Naturalis Principia Mathematica”. La marea es el cambio en el nivel del mar producido por la incidencia sobre la tierra de las fuerzas de atracción de la luna y del sol, que tratan de sacar el agua del mar de la tierra generando en ese proceso oscilaciones diarias periódicas a lo que se le denomina marea semidiurna. Cuando se presenta una vez en el día se llama marea diurna con un período de 24.82 horas, y cuando ocurre dos veces se le denomina marea semidiurna con un período de 12 horas y 25 minutos (fig. 1.21).

Como punto de referencia en las mareas en proyectos de ingeniería, se toman los niveles extremos de la marea periódica, ya sea el nivel máximo llamado pleamar o el nivel mínimo llamado bajamar, mismos que se pueden presentar en las mareas de forma mixta de la manera que dos bajamares y dos pleamares notablemente diferentes, se presentan en 24.8 horas tomando en cuenta también la sobre elevación del mar que pudiera producir algún fenómeno meteorológico como un huracán denominada marea de tormenta, la cual puede determinar la vida útil esperada del proyecto y el grado de protección óptimo.

En el ámbito ingenieril, el análisis de las mareas es muy importante ya que de ella dependen las elevaciones que se le darán al proyecto de un puerto [Ruiz, 2011].

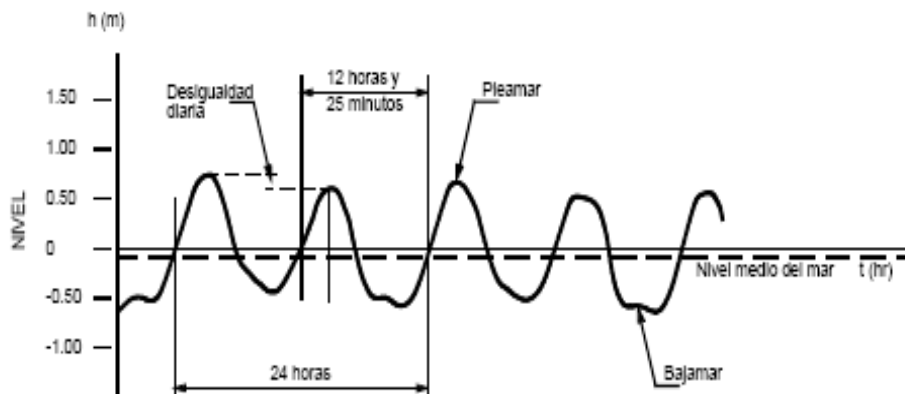


Fig.1.21. Esquematización de la marea [Suarez, 2001].



1.3.4. Corrientes.

Las corrientes se pueden definir como el desplazamiento de una masa de agua caracterizado por su dirección y velocidad **[Frías - Moreno, 1986]**.

Para su estudio las corrientes se dividen en:

- Oceánicas
- Inducidas por el viento
- Por marea
- Producidas por el oleaje.

Las corrientes marinas u oceánicas son generadas principalmente por el viento y el gradiente, por lo tanto puede decirse que este tipo de corrientes son prácticamente superficiales y de poca intensidad.

El efecto de los vientos para producir corrientes está sustentado tanto en investigación de campo como en laboratorio **[Van Dorn, 1953]**, **[Keulegan, 1951]**, **[Bretshneider, 1967]**. Estas corrientes superficiales fluyen en la dirección del viento a una velocidad igual al 2 o 3 % de la velocidad del viento. En los huracanes, los vientos generan corrientes superficiales de 0.6 a 2.4 metros por segundo. Dichas corrientes superficiales inducidas por el viento en dirección a la costa ocasionan significantes flujos de retorno en el fondo que pueden transportar sedimento hacia al mar; en forma similar los vientos fuera de la costa dan como resultado una corriente superficial fuera de la costa, y una corriente de fondo hacia la costa la cual puede auxiliar al transporte de sedimento hacia tierra **[Hattersley, 1968]**.

Las corrientes de marea son producidas debido a la elevación y descenso periódico del nivel del mar, generando movimientos notables en las masas líquidas sobre todo en la zona de la costa, donde la comunicación con mar abierto se encuentra prácticamente restringida **[Ruiz, 2011]**.



Las corrientes producidas por el oleaje se deben a la rompiente del oleaje en la costa, que después de romper, se modifican las características del transporte de la masa líquida.

Las corrientes más importantes en el campo de la ingeniería de costas son precisamente las corrientes producidas por el oleaje [Ruiz, 2011], y además son las que originan y regulan el movimiento de los sedimentos costeros [Frías - Moreno, 1986].

Se clasifican en:

Corrientes normales a la costa: Estas se manifiestan por la necesidad de desalojar el agua del oleaje que rompió en la costa, fluyendo en dirección a mar abierto en forma de canales ya sea superficial o sumergido.

Cuando la corriente es superficial se le llama corriente de retorno o rip current, y cuando la corriente es por debajo de la superficie del mar se le llama corriente de resaca ó Undertown.

Corrientes paralelas a la costa: Casi siempre el oleaje no incide normal a la costa, sino que tiene cierto ángulo debido ya sea a su refracción que modificó su trayectoria o a la dirección del viento que la produjo de esta forma al romper oblicuamente se forma la corriente litoral también llamada en el argot, Long shore current [Frías - Moreno, 1986].

Ambas corrientes producen una recirculación de agua en la zona cercana a la costa en donde las corrientes litorales alimentan a la corriente de retorno aumentando su velocidad hasta de 1 m/s [Ruiz, 2011] y que a su vez éstas, se alimentan de un flujo lento de transporte de masa de agua suministrada por el oleaje hacia la zona de rompientes (fig. 1.22).



Las más citadas y estudiadas son las corrientes paralelas a la costa, debido a que son las causantes de mover el 80% de los sedimentos, mientras que las corrientes normales a la costa mueven solo el 20% de los sedimentos de la playa, aunque es vital estudiarlas de forma integral ya que a pesar que la corriente normal a la costa solo mueva el 20% de los sedimentos playeros, es la que los pone en suspensión para que posteriormente, la corriente paralela a la costa entonces los pueda mover [Ruiz, 2011].

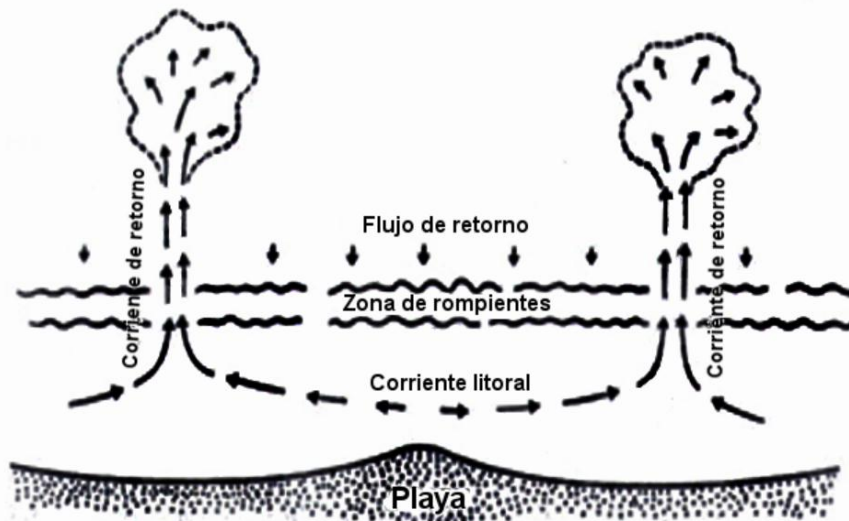


Fig.1.22. Sistema de circulación por celdas en la zona cercana a la costa modificado de [Komar, 1988].



CAPÍTULO 2. EROSIÓN EN LA COSTA YUCATECA.

2.1. Introducción.

La costa es la zona de interface entre el ambiente marino, y la porción continental del planeta, constituyendo uno de los elementos más importantes de la biósfera, en el que interactúan y diversifican ambientes y recursos, que además está sometida a degradación por causas naturales así como antropogénicas.

2.1.1. Vulnerabilidad y Cambio climático.

En la zona costera existe una constante perturbación, debida a la contaminación, la eutrofización, la industrialización, los desarrollos urbanos, la producción agrícola, la sobrepesca, entre otros factores, generando seria preocupación por poder administrar debidamente, el uso y explotación de la zona costera; de tal forma que sea sustentable su explotación y que las generaciones futuras también puedan disfrutar de ella. Estudios recientes de evaluación de los impactos de contaminación marina y costera desde fuentes terrestres, revelan que existe una constante degradación en la zona de costa, y que en muchos sitios se ha visto intensificado este problema **[GESAMP, 2001]**.

En el año 2001, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (**IPCC**), proyectó un incremento mundial en las concentraciones de CO₂ y la elevación de la temperatura de los océanos, lo que producirá un impacto importante en las poblaciones que habitan las zonas costeras **[Houghton et al., 2001]**.

La evaluación mundial del Ambiente **[OECD, 2001]**, de los recursos mundiales **[WRI, 2000]**, **[Burke et al., 2001]** de los océanos y áreas costeras **[Field et al., 2002]** y del cambio global **[Steffen et al., 2004]** proyectan un panorama amplio relacionado con los impactos y cambios impredecibles en las zonas costeras del planeta.



Las costas mexicanas presentan una alta vulnerabilidad a la acción de los fenómenos naturales, como huracanes, inundaciones, deslizamientos y sismos, dentro de los cuales destacan los huracanes, ya que sus efectos tienen un gran impacto en la población, la infraestructura y los ecosistemas costeros, causando inundaciones, grandes pérdidas económicas y de vidas humanas.

Debido al calentamiento global, se espera que la temperatura de la superficie del mar Caribe, Golfo de México y Pacífico Mexicano, se incremente entre uno y dos grados centígrados (fig. 2.1), lo que intensificaría la energía de los huracanes, superando probablemente las categorías en la escala Saffir-Simpson, lo que provocaría un aumento en la vulnerabilidad de las regiones costeras de México.

Se estima que el incremento en la ocurrencia de eventos extremos y la elevación del nivel del mar actuando simultáneamente, combinado con el efecto de marejada que ocasionan los huracanes y tormentas, provoquen grandes daños en la costa, impactando gravemente la economía del país, relacionada con el turismo y la actividad portuaria. Por lo tanto los principales problemas en la zona costera, asociados con el cambio climático, son las variaciones potenciales en la frecuencia e intensidad de los huracanes en combinación con el ascenso del nivel medio del mar.

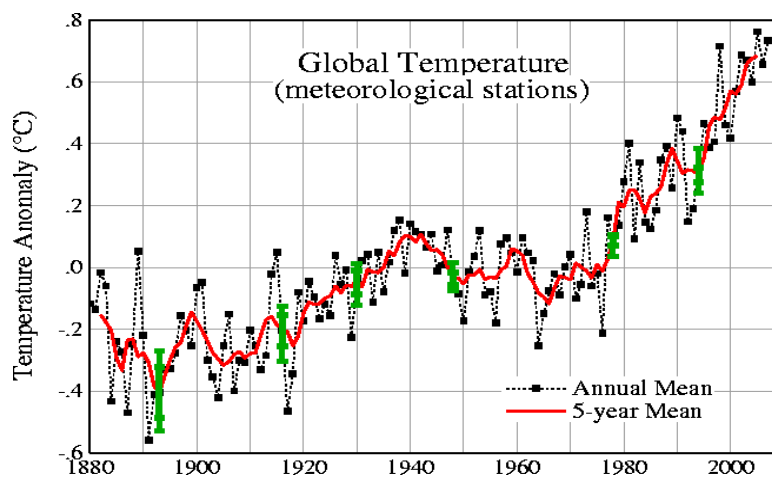


Fig. 2.1. Temperatura global [Euán, 2011].



La elevación del nivel del mar es causada por la expansión térmica de los océanos debida al calentamiento global y al derretimiento del hielo polar; esta elevación ocasionaría que zonas costeras bajas, por debajo de los 2 m de la marea alta sean vulnerables a inundaciones, lo que podría ocasionar que en algunas zonas el mar, invada más de 40 Km tierra adentro.

La fusión total del casquete de la Antártida (21.5 millones de km^3 de agua) ocasionaría un ascenso del nivel del mar global de unos 59 metros, y en el caso de Groenlandia (2.38 millones de m^3), de unos 6 metros [Sugden y John, 1976]. Se cree que estos escenarios extremos son improbables; no obstante existe una tendencia al descongelamiento de las masas de hielo causado por el calentamiento global, con el consecuente aumento del nivel del mar y los riesgos de inundación de las tierras bajas adyacentes al océano. Durante los últimos 100 años, el nivel global del mar aumentó entre 10 y 20 centímetros [Oerlemans y Fortuin, 1992]. El calentamiento global podría ocasionar un incremento en las precipitaciones, sobre partes del casquete de la Antártida y así engrosarlo; no obstante, las proyecciones señalan una reducción en los volúmenes de hielo (fig. 2.2) y un incremento en el nivel del mar de 0.09 m a 0.88 m hacia el año 2100 [McCarthy et al., 2001].

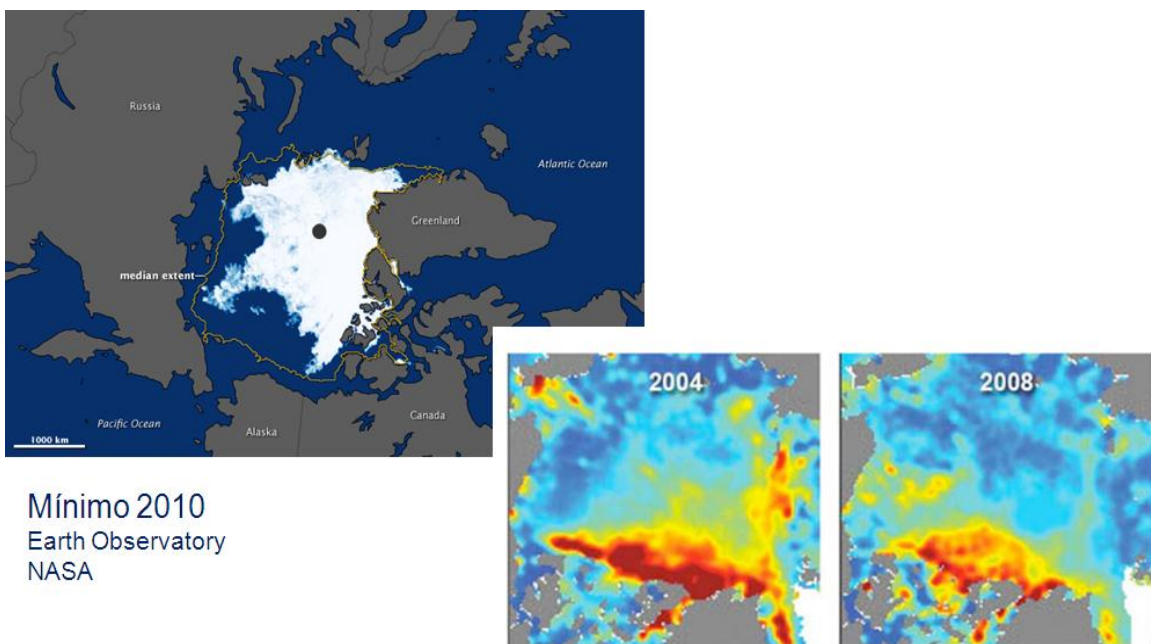


Fig. 2.2. Espesor del hielo Ártico [NASA, 2009].



2.2. Caracterización regional.

Las playas y las dunas en el litoral yucateco son sometidas a grandes energías, transmitidas por las olas (de tormentas y nortes); resisten el impacto, protegiendo los humedales costeros y la infraestructura instalada. Las dunas costeras de Yucatán se desarrollan por la interacción del viento, arena y vegetación; actúan como banco de material arenoso, al acumular arena en condiciones climatológicas normales, para ser transportado a la playa y barras litorales durante fuertes tormentas (fig. 2.3). La arena acumulada en las barras litorales sirve de apoyo a las playas para amortiguar la energía de las olas, y suministra el material para restituir la duna después de una tormenta. En muchas zonas del litoral yucateco, las dunas costeras han sido removidas por medios antropogénicos debido a la construcción de infraestructura, o se ha dañado severamente por el tráfico peatonal o vehicular, reduciendo de este modo la capacidad de absorber el embate de las olas al romper, incrementando la vulnerabilidad ante una tormenta e inundación con efectos devastadores para el ambiente natural y el socioeconómico [Battlori et al, 1999].

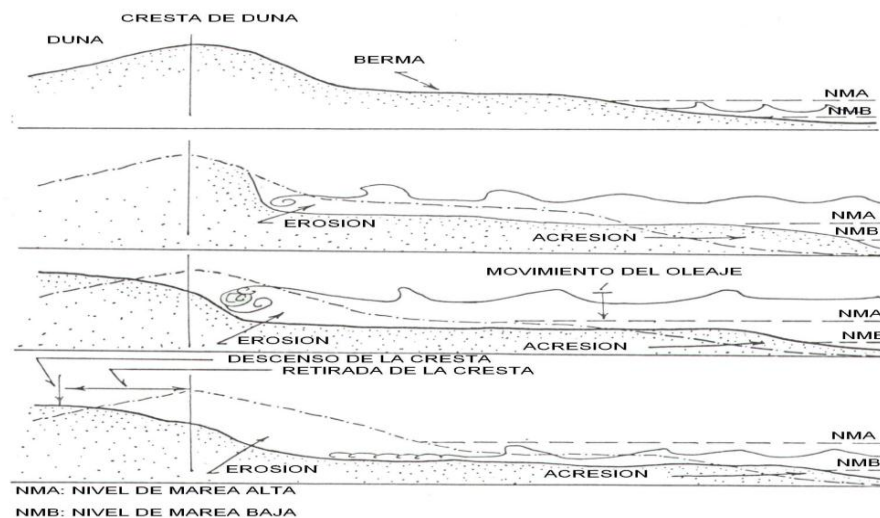


Fig. 2.3. Efecto de tormentas sobre las dunas [Salmon et al, 1982].



2.2.1. Tipo de sedimento.

La arena que constituye las playas en la costa yucateca es producto de la erosión de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, así como de la precipitación de sales (material autigénico) o bien, son fragmentos de estructuras rígidas secretadas por organismos marinos, llamado material biogénico. Esta clase de material sedimentario no consolidado, aunado a los procesos que determinan su transporte, tienen un papel predominante en la configuración y dinámica de la playa, estableciendo sectores de acumulación y de erosión que forman la línea de costa. Los procesos que condicionan la dinámica de las playas se relacionan con factores ambientales como el oleaje, las mareas, los vientos, las corrientes, la batimetría, el tamaño del sedimento y la disponibilidad del mismo [Bird, 2003], [Short, 1999].

La comunidad vegetal que se presenta en la duna y en la zona de intermarea, constituyen un factor ecológico adicional en el proceso de transporte sedimentario actuando como agente estabilizador de sedimento [Bird, 2003].

La arena, debido a su constitución caracterizada por sedimento no consolidado, hace que la morfología de la playa responda rápidamente a los cambios en los patrones hidrodinámicos y eólicos. El impacto constante del oleaje, la marea y el viento, puede representar una grave amenaza al desarrollo costero [USACE, 1984].

2.2.2. Geología de la zona.

La plataforma de Yucatán pertenece a la parte sumergida de una placa caliza, la cual tiene una suave pendiente hacia el norte y es bordeada en el oeste, norte y este por el talud continental que se inclina desde la margen de la plataforma sumergida a profundidades abisales del Mar Caribe y Golfo de México. Las condiciones sedimentarias de la plataforma de Yucatán, están constituidas por una depositación de sedimentos carbonatados sobre roca caliza antigua y han sido similares desde el Terciario (66 Millones de años) y el Pleistoceno temprano (1.6 Millones de años), hasta el Cuaternario tardío (10,000 años).



La tierra emergente adyacente presenta una topografía cárstica que carece de un sistema de drenaje superficial, por lo que el material sedimentario predominante está conformado de sedimentos carbonatados propios de la misma plataforma [Logan *et al.*, 1969].

La configuración de la zona costera está constituida por restingas e islas de barrera, que forman un sistema de humedales a lo largo de todo el Estado de Yucatán. En ella se encuentran diversas poblaciones como son: Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub y Uaymitún; en los que se encuentran inmuebles veraniegos que son particularmente habitados durante períodos vacacionales, y de residentes permanentes. En la zona también se realizan otras actividades asociadas al puerto de altura y al manejo de carga y pasajeros, la pesca ribereña y de mediana altura, el turismo y la investigación.

2.2.3. Oleaje de la zona.

La altura de ola significativa (H_s) máxima mensual (fig. 2.4), en la zona es de 1.02 metros, siendo el período significativo (T_s) de 12 segundos. En temporada de nortes el oleaje local presenta valores de 1.84 metros; el oleaje distante de 3.06 metros con un periodo de 8 segundos.

La altura de ola ciclónica corresponde a los 4.27 metros, siendo el período de 13 segundos. Las alturas máximas de las olas, se presentan en el otoño y hasta el invierno. En esta temporada, la velocidad del viento, corrientes oceánicas y altura de las olas son las mayores registradas.

La relación de esbeltez de la ola, definida como el cociente H/L (altura/longitud de onda), caracteriza el estado del mar y condiciona a que exista un movimiento de los materiales del fondo. Relaciones de esbeltez de ola mayores a 0.1 son inusuales y este valor generalmente disminuye cuando la longitud de onda aumenta. Por lo tanto la relación H/L , da la condición de iniciación de movimientos de los materiales del fondo.



La dirección de las olas que rompen en las playas de la costa yucateca, proviene del noreste en más de un 45 %, dominando la ocurrencia de olas no mayores de 0.5 m, seguida por la ocurrencia de olas con alturas mayores de 2 m.

Con más del 25 %, en segundo lugar tenemos a las olas que provienen del norte, presentando alturas de olas mayores de 2 m; si bien esta es menor que la anterior, casi el 18 % vienen en dirección este y poco menos del 5 % las que provienen del noroeste [SCT, 1986].

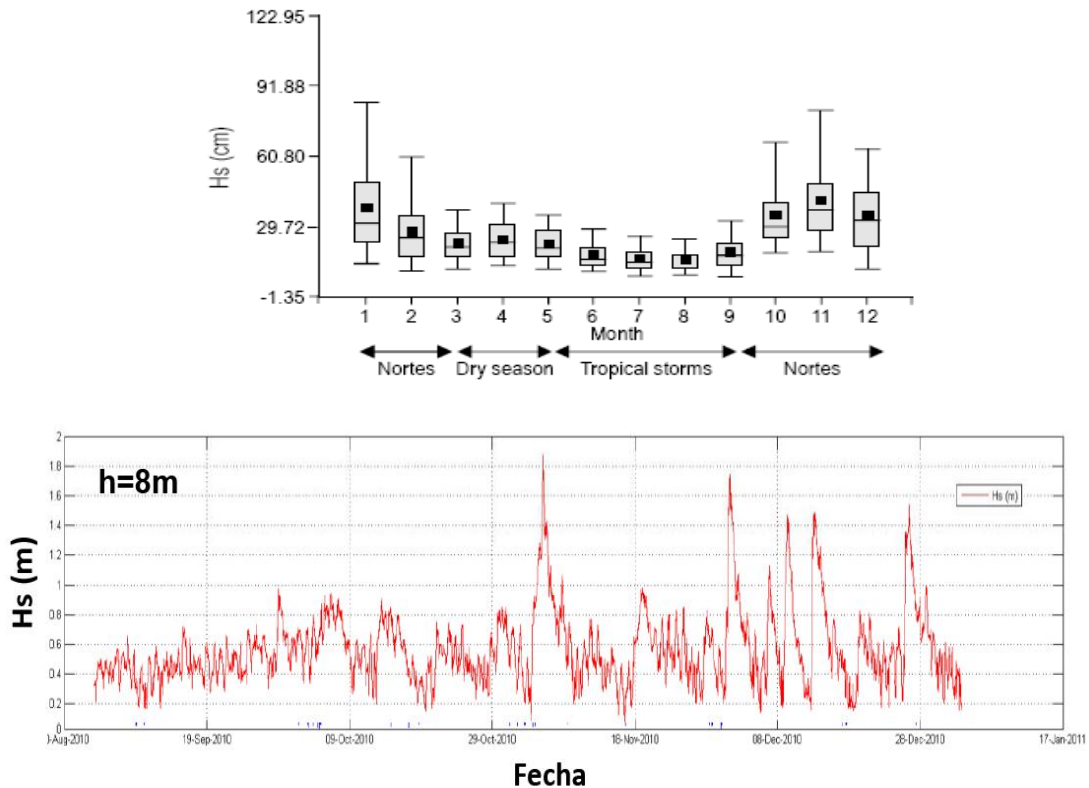


Fig. 2.4. Promedio mensual de la altura significativa del oleaje en Progreso y datos de oleaje en Chuburná [SCT, 1986].



2.2.4. Marea de la zona.

La marea en Yucatán es diurna (un pleamar y un bajamar en un día); sin embargo, esto solo es evidente en períodos de marea viva (con luna llena o nueva) donde se presentan las mayores oscilaciones o amplitudes, ya que durante la marea muerta, cuando las amplitudes son pequeñas, en ciertas épocas del año su comportamiento es semidiurno (dos pequeñas pleamares y una bajamar). Durante el equinoccio el patrón descrito se desfasa y las mareas vivas corresponden a cuarto creciente y menguante.

La pleamar máxima registrada es de + 0.916 msnm y la bajamar es de - 0.913 msnm, el nivel de bajamar media de -0.308 msnm.

La marea presenta su nivel más bajo en los meses de abril, mayo, junio y julio, con las más intensas bajamares o vaciantes **[SCT, 1986]**.

El nivel más alto de la marea se registra en los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero, con las pleamares extremas o crecientes.

Anualmente ocurren alrededor de 20 a 25 nortes al año **[Meyer-Arendt, 1993]**, los cuales elevan el nivel medio del mar en un metro afectando de 15 a 20 metros de playa.

Las variaciones en el viento y en la presión barométrica pueden causar cambios en los niveles diarios predichos del mar. Los vientos con incidencia continua hacia la costa y/o baja presión barométrica tienden a elevar el nivel del mar. Los vientos con acción hacia el mar y/o la alta presión barométrica tienden a bajarlo. Los huracanes y las tormentas pueden provocar que el nivel del mar aumente aún más que el nivel predicho de marea.

Desde el año 1952 hasta 1984, a partir de datos de nivel medio de marea de la zona costera yucateca (fig. 2.5), se han observado variaciones de hasta 0.09 metros en algunos años, sin embargo se muestra una tendencia a elevarse el nivel medio del mar aproximadamente 3 mm/año en dicho período.

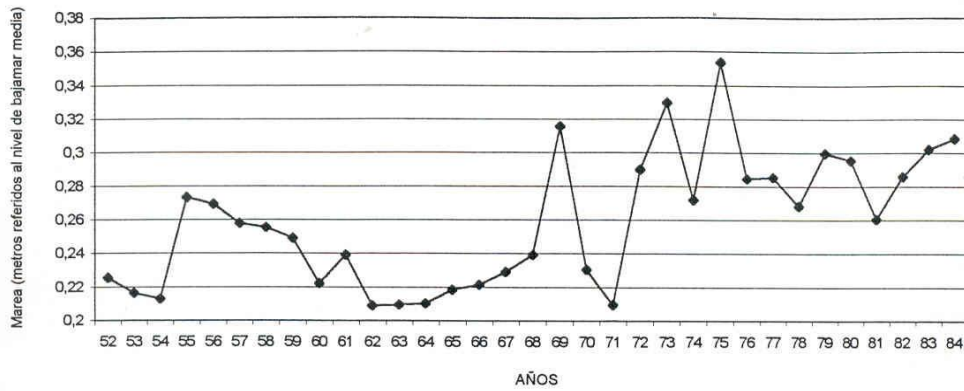


Fig. 2.5. Valor promedio de marea de la costa yucateca [UNAM, 1999].

El servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM, ha realizado pronósticos de marea basados en registros de un mareógrafo colocado en el Puerto de Progreso de Castro desde el año 1952 (fig. 2.6). El rango de marea oscila de 0.1 a 0.8 metros en mareas muertas y vivas, respectivamente.

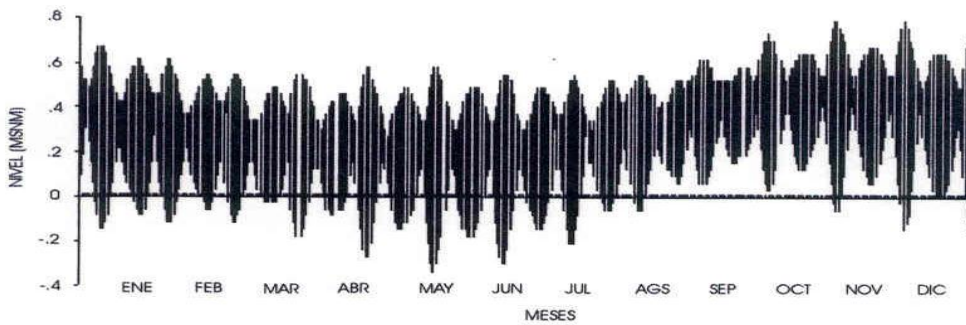


Fig. 2.6. Predicción de marea, Progreso, Yucatán [UNAM, 1993].

Para el caso de Progreso de Castro los planos de marea referidos al nivel medio del mar se resumen en la tabla 2.1 a continuación:

Tabla 2.1. Planos mareales de Progreso [UNAM, 1993].

Pleamar máxima registrada	0.916 m
Nivel de pleamar media	0.259 m
nivel medio del mar	0.000 m
Nivel de media marea	-0.020 m
Nivel de bajamar media	-0.308 m
Bajamar mínima registrada	-0.913 m



2.2.5. Corrientes de la zona.

El sistema de corrientes litorales que incide en la costa yucateca se origina de la circulación costera del Mar Caribe y de aquellas que pasan entre puerto Morelos y Cozumel [Merino, 1986]. Lo anterior es producido por la interacción de la morfología, topografía de la zona y la corriente de Yucatán, generándose un flujo paralelo a la costa, que va en dirección poniente, tanto en el litoral Oriental como en el norte de la Península.

Las corrientes superficiales que provienen del mar Caribe, normalmente se dirigen hacia el norte en el estrecho (fig. 2.7). La velocidad de estas corrientes se ve incrementada desde un nudo (0.51 m/s) cerca de la costa oriental del Canal de Yucatán, hasta más de 5 nudos (2.57 m/s) a una distancia de 20 a 30 millas náuticas al Este de la punta de la Península de Yucatán. La velocidad de corriente máxima se presenta durante los meses Julio, Agosto y Septiembre, siendo mínimas durante los meses de Enero y Febrero.

El eje de la corriente se estrecha cuando su velocidad es máxima y se ensancha a medida que la velocidad de la corriente disminuye. Al pasar a través del Canal de Yucatán, paulatinamente la corriente se ensancha y se ramifica a medida que entra al Golfo.

En el invierno se presentan fuertes vientos provenientes del norte los cuales, acentúan las contracorrientes que pasan generalmente en la parte occidental y meridional del Golfo, y pudiendo causar una corriente que se dirige hacia el Sur en toda el área del Golfo [Secretaría de Marina, 1974].

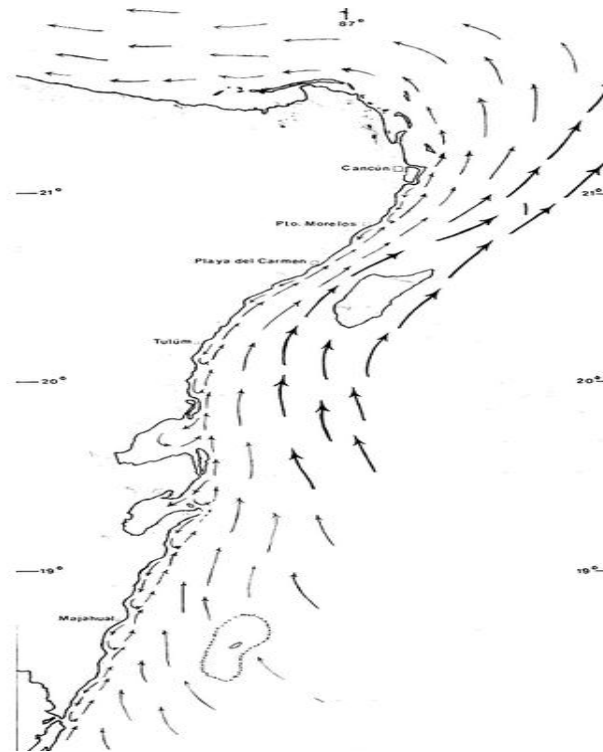


Fig. 2.7. Esquema idealizado de la Circulación superficial de corrientes en el Caribe Mexicano [Merino, 1986].

El material arenoso es conducido a través del litoral norte de la Península desde la margen oriental, donde la corriente del Canal de Yucatán se acompaña de un fuerte acarreo de sedimentos suspendidos y por camas sedimentarias, desplazándose por el fondo del lecho marino. Dichas corrientes lavan el arrecife de barrera que se prolonga desde el estado de Quintana Roo hasta Centroamérica, donde las olas impactan continuamente las playas rocosas con pequeños cantiles, depositando los sedimentos sobre la extensa plataforma costera y cambiando su dirección hacia el oeste. Mediante un estudio de corrientes litorales con tarjetas de deriva, se ha descubierto que las más cercanas a la costa van en dirección oeste cuando llegan al margen nororiental de la Península, a una velocidad media mínima de 0.55 nudos (0.28 m/s) [Merino, 1986].



Mediante los estudios de corrientes que se han realizado a diferentes profundidades en la costa yucateca, se ha podido definir que en temporada de nortes (Enero), las velocidades máximas de las corrientes se encontraban en la fosa formada detrás de la rompiente (0.32 m/s), presentando aquí el mayor transporte de sedimentos en suspensión, mientras que en la línea batimétrica de -1.0 mbnm y -2.0 mbnm las corrientes no superaban los 0.24 m/s. Por otro lado, durante la temporada seca (mayo), las velocidades máximas se presentaban en la batimétrica de -2.0 mbnm con 0.20 m/s y las más bajas en la fosa con 0.12 m/s, facilitando un transporte de sedimentos hacia la playa. Por lo tanto las velocidades de las corrientes son menores en temporada de secas que en temporada de nortes, coincidentes con lo que sucede en el Canal de Yucatán.

Esto demuestra que se tiene un mayor transporte de sedimentos en la zona de la fosa, donde se llegan a tener velocidades de corrientes tan altas que arrastran el sedimento, formando barras internas que se presentan durante la temporada de fuerte agitación, con oleajes que provienen del Norte y Noroeste. En temporada de menor agitación del mar, el transporte de sedimentos en la zona de la fosa se ve disminuido notablemente.

Los estudios realizados sobre los cambios en la línea de playa de Chelem-Yucalpetén, muestran que existe un transporte litoral en la zona de 40,000 a 60,000 m³/año [SCT, 1986].

2.3. Antecedentes.

En las costas de Yucatán, la zona arenosa es constituida por una isla de barrera de 350 Km de longitud y 0.5 km de ancho en promedio, con un área de casi 200 km².

En la zona Norte de Yucatán, las playas han tenido una constante erosión costera, que ha ido incrementando desde hace aproximadamente 15 años a la fecha, causando en este tiempo un retroceso de un metro por año de línea de costa.



El cambio climático, así como la construcción inmoderada de infraestructura en la costa, han modificado la dinámica natural del litoral, alterando el transporte de sedimentos que alimentaba y estabilizaba a las playas en la antigüedad. Además la península de Yucatán está permanentemente afectada por los huracanes que entran al Golfo de México desde el canal de Yucatán que se encuentra entre la península y Cuba [Del Río, 2005].

En prácticamente toda la costa de Yucatán, se tiene un intenso crecimiento poblacional, contando con más de 15 localidades y una explotación intensa de la costa alojando infraestructura diversa, en más del 50% de su extensión [Battlori, 2007].

Ante la grave erosión de la costa, se ha empeñado en construir obras de protección, sin una planificación en su distribución. Estas acciones no han sido suficientes para mitigar la erosión, ya que en algunas zonas el deterioro tiene un avance acelerado, en tanto que en otras aún se pueden aplicar medidas de prevención en vez de mitigación. En algunas poblaciones de la costa yucateca, el efecto de la erosión se considera crítico por la pérdida de playa con decenas de viviendas derrumbadas, de las cuales los predios que han sido invadidos por el mar han quedado en Zona Federal Marítimo Terrestre, que es de 20 metros de ancho de área transitable entre el mar y las edificaciones [www.yucatan.com].

2.3.1. Causas de erosión en la región.

La costa Yucateca, particularmente ha sido afectada tanto por causas naturales como por antropogénicas. Respecto a las causas antropogénicas, se puede citar que, en los últimos 20 años, existe un acelerado crecimiento poblacional en la zona, lo que ha generado la construcción desmesurada de complejos habitacionales; casas y hoteles de todo tipo que se encuentran invadiendo las dunas de arena, lo que ha incrementado la erosión costera, problema que es más notable en la zona que va de Chelem a Chuburná (fig. 2.8).



Fig.2.8. Dunas erosionadas y patios de predios veraniegos invadidos por el mar en Chuburná Puerto [www.sipse.com].

La erosión natural en la costa Yucateca, la produce las mareas de tormenta. La península de Yucatán, es la más afectada por este factor el cual se define como la sobre elevación del nivel medio del mar, resultado de los vientos sobre su superficie, y de la disminución de la presión atmosférica cerca del centro del ciclón tropical. Esta sobre elevación produce inundaciones en la costa y, al mismo tiempo, las olas impactan y arrastran grandes cantidades de la arena de las playas, causando erosión costera [semarnat.gob.mx].

2.3.2. Orígenes de la problemática.

El problema se origina por diversos factores a partir del año 1900, cuando el puerto de Progreso comenzó a urbanizarse al iniciar la construcción de casas de verano frente al mar y sobre la primera duna costera. Con los años, la ocupación urbana del litoral se extendió hacia Chelém y Chuburná Puerto, al occidente. En 1947 se termina la construcción de un muelle de 2 km de largo y 5.5 m de profundidad, financiado con recursos obtenidos durante el auge efímero de la segunda guerra mundial y el conflicto de Corea. (fig. 2.9).

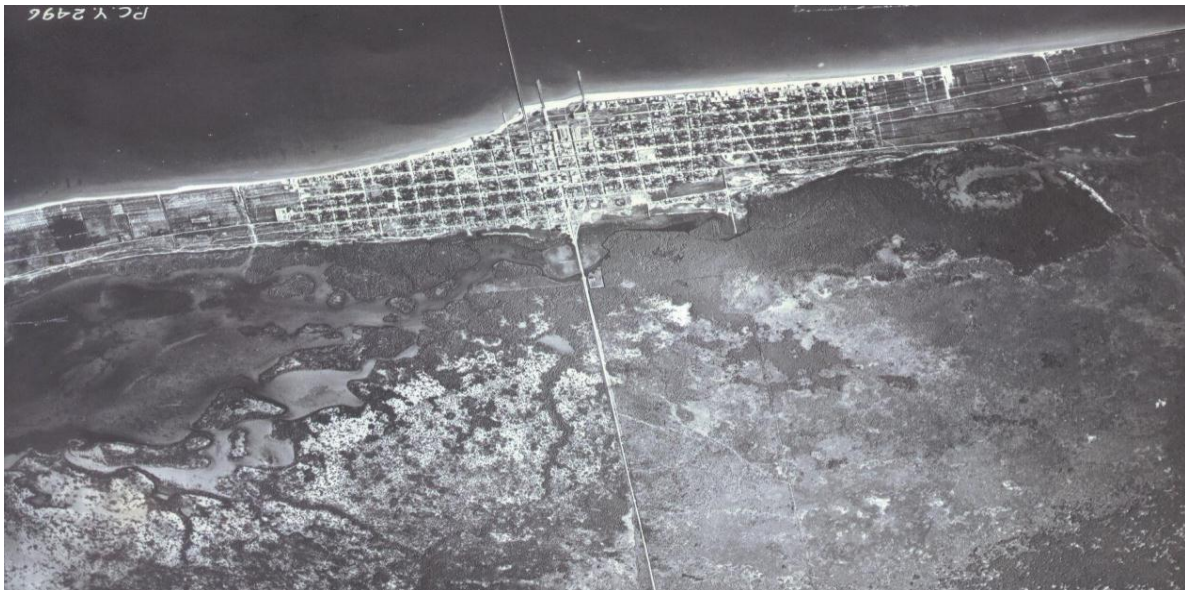


Fig. 2.9. Fotografía de 1948 en donde se aprecia la infraestructura del Puerto de Altura antiguo, cuyo viaducto está constituido por arcos, previo a la existencia del Puerto de Abrigo de Yucalpetén. Se distingue una zona urbana pequeña, grandes extensiones de vegetación. Presenta una línea de playa estable, con anchos aproximados de 30 a 50 metros [Pérez, 1977].

Para apoyar la pesca comercial, en 1964 se construye en el malecón de Progreso la primera serie de espigones, para evaluar el transporte de sedimentos con intenciones de construir el Puerto de Abrigo de Yucalpetén, el cual fue terminado en 1968 (fig. 2.10).

Entre los años 1974-1980, el Gobierno del Estado de Yucatán decide construir los puertos de Dzilam de Bravo, Telchac Puerto, El Cuyo y Celestún, todos ellos con grandes escolleras que modifican el patrón de corrientes litorales y el transporte litoral. Asimismo se presenta un cordón de casas de verano, asentadas en la primera duna costera, para las que se instalaron aproximadamente 178 espigones para controlar los problemas de erosión en playas, desde Chuburná Puerto hasta Chicxulub Puerto.



Fig. 2.10. Fotografía de 1979 en donde se encuentran las escolleras del Puerto de Abrigo de Yucalpetén, el cual se inauguró en 1968. Se observa una zona urbana en expansión con casas veraniegas sobre la playa y una fuerte disminución de áreas verdes y rellenos en ciénagas modificando la línea de playa y promoviendo la erosión en el sitio. Hay una fuerte ganancia de arena en la porción occidental (Yucalpetén) con 300 metros de ancho, con respecto a la línea de playa de 1948 [Pérez, 1977].

2.3.2.1. Intemperismos severos.

La región está posicionada en la trayectoria de tormentas tropicales y huracanes que se originan en el Atlántico y el Caribe Oriental (fig. 2.11), los cuales ocurren en el mes de julio y terminan en noviembre. Debido a su ubicación frente a la sonda de Campeche, se encuentra sujeta al efecto de marejadas y tormentas tropicales que ahí se originan [Beltrán, 1958].

Los huracanes de gran potencia se generan durante los meses de Agosto, Septiembre y Octubre cuando el caldeamiento invade la región insular de las Pequeñas Antillas; algunos llegan a atravesar la Península de Yucatán, por Cozumel y Cancún o por la costa norte, para golpear los Estados de Tamaulipas y Veracruz así como las costas suroccidentales de los Estados Unidos.

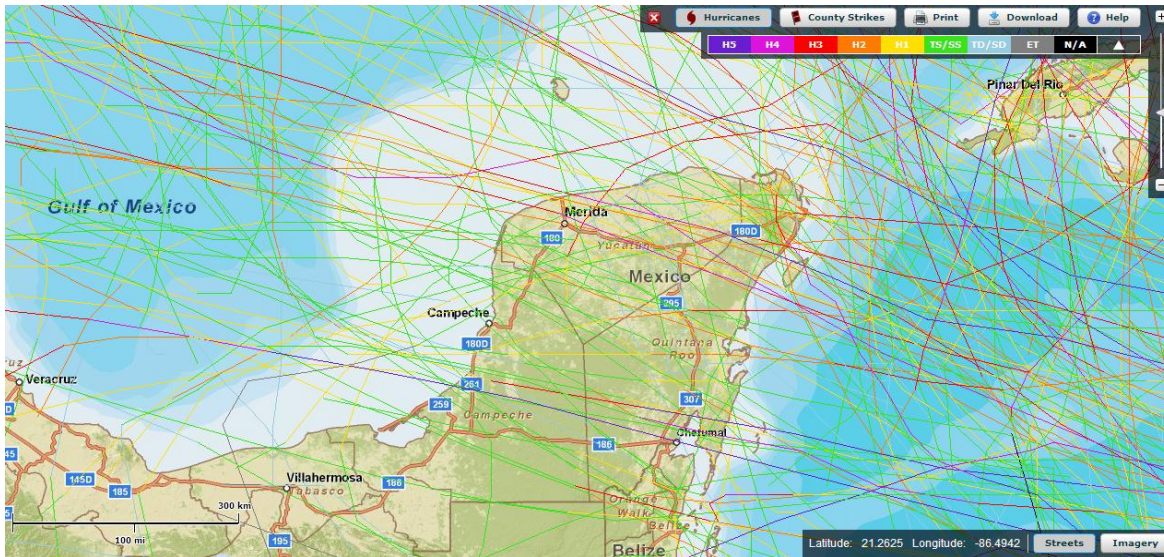


Fig.2.11. Trayectoria de huracanes y tormentas tropicales en la Península de Yucatán [NOAA, 2011].

2.3.2.2. Huracán “Gilberto”.

Se originó el 10 de septiembre de 1988, formándose primeramente como tormenta tropical, al sur de la Isla de Puerto Rico. Este huracán es considerado como el más potente del siglo que haya golpeado a la Península de Yucatán. Causó una marea creciente de más de 3 metros en Chuburná Puerto (observación de campo en la zona).

El huracán impactó la ciudad de Mérida con vientos dominantes de hasta 19.6 m/s y rachas de 34.7 m/s. El viento y la baja de presión originaron una gran entrada de agua por Celestún, y por la zona de bajos en El Palmar causando inundaciones de grandes extensiones de terreno cenagoso, invadiendo las carreteras perpendiculares a la costa, como la de Sisal, Chuburná Puerto y Progreso. Adicionalmente la contracorriente litoral formada sobre la margen costera, y las fuertes olas produjeron grandes arrastres de material arenoso sobrepasando la línea de playa por 20 o 30 metros. La lluvia saturó el subsuelo produciendo súbitamente fuertes flujos de agua dulce.



2.3.2.3. Huracán “Isidoro”.

Otro poderoso Huracán que afectó un importante número de localidades de la costa norte, así como localidades del interior incluyendo la capital de Mérida fue el huracán Isidoro. Toco la península de Yucatán el 22 de Septiembre de 2002 alcanzando vientos de más de 240 km/h, provocando una sobreelevación del mar de más de tres metros. Isidoro ocasionó grandes costos económicos y sociales para la población. El impacto del huracán tuvo una particular afectación en las zonas costeras afectadas debido a que no cuentan con protecciones naturales (fig. 2.12), [Dominguez - Battlori, 2008].



Fig.2.12. Destrucción del huracán Isidoro en el año 2002 [Euán, 2011].

2.4. Reconocimiento de la problemática.

Los factores erosivos mencionados anteriormente, han provocado que la costa pierda la capacidad para estabilizarse naturalmente y por lo tanto, progresivamente se han perdido metros de frente de playa significativos, hasta el grado de llegar a una situación crítica.



En las playas del litoral yucateco, los procesos costeros naturales se encuentran en conflicto con el desarrollo de la costa, ya que los problemas de erosión no se tratan considerando la dinámica natural del sistema, sino que se confrontan principalmente con estructuras reflectivas sujetas a socavaciones, las cuales no tiene la resiliencia y flexibilidad de las dunas de arena para moverse y ajustarse, ante una tormenta o huracán absorbiendo estas fuerzas.

Estabilizar artificialmente la playa, podría incrementar el proceso erosivo, tanto en el sitio como a varios kilómetros de distancia y en diferente tiempo.

En la franja arenosa costera de Yucatán se proyecta un crecimiento continuo de población y por consiguiente, la ocupación desmedida de las dunas costeras. Se prevee un aumento de los impactos como son:

- 1.- Disminución de la capacidad del sistema natural para absorber grandes energías.
- 2.- Incremento de la vulnerabilidad de la zona costera ante incrementos del nivel del mar.
- 3.- Afectaciones a propiedades públicas, sociales y privadas.
- 4.- Impacto ecológico negativo a zonas de anidación de tortugas marinas y aves acuáticas
- 4.- Impacto económico severo, particularmente a aquel cuya principal base de infraestructura productiva se encuentre en la zona.

De 1948 a 1978 la recesión en la barra arenosa en la costa tuvo un fluctuación de 0.3 a 0.9 m/año en zonas cercanas al puerto de Progreso de Castro, y existen antecedentes que reportan tasas de erosión costera hasta de 1.8 m/año en un periodo de 110 años. Actualmente se registran retrocesos de la línea de playa de hasta 5 m/año **[Meyer-Arendt, 1993]**.



La erosión de playa en las costas de Yucatán se encuentra en una situación preocupante, debido a que su impacto cobra vital importancia relacionada por la vocación turística y recreativa de la zona. El litoral yucateco debido a su ubicación geográfica, se encuentra continuamente expuesto al impacto de tormentas y huracanes, los cuales intensifican los efectos de los procesos de transporte de sedimento causando cambios importantes en la morfología de las playas.

Ante tal situación, las medidas tomadas en la región son la construcción de escolleras y espigones, y recientemente la alimentación de playas.

La longitud total de línea de costa erosionada es aproximadamente de 100 km desde Chuburná Puerto hasta Dzilám de Bravo. Sin embargo la tasa de erosión no ha sido uniforme en toda su extensión; existen zonas con mayor erosión que otras.

La erosión se acentúa donde la barra costera es angosta, con pocas dunas y donde la infraestructura social es mayor. La construcción de estructuras de protección como los espigones, tienden a incrementar la erosión en la zona y además no han logrado retener el sedimento litoral y proteger la playa [Meyer-Arendt, 1993] (fig. 2.13).



Fig.2.13. Espigones de madera.



Con el cambio climático se proyecta que los efectos erosivos de estos procesos, se incrementen debido a la elevación del nivel del mar y a eventos extremos como los huracanes [Forbes *et al.* 2004], [Curtis y Hodell, 1996], [Hooke *et al.* 1995].

A su vez, cuando se modifican los patrones del transporte de sedimentos el riesgo de erosión aumenta sobre todo cuando se construye inadecuadamente infraestructura de protección, y cuando existe deforestación del área de duna.

Cuando se pierde el material sedimentario de la playa, ésta se deteriora originando una recesión, y por consiguiente pierde su efecto amortiguador, poniendo en riesgo propiedades y bienes. Además de la pérdida económica y de servicios ecológicos que origina el deterioro de la playa, también afecta a los ecosistemas costeros contiguos.

La costa es considerada como el sistema físico natural, más dinámicos en el planeta [Short, 1999] [Bird, 2003], de alta fragilidad y con alto atractivo para el desarrollo costero; la cual requiere de una correcta planeación para su desarrollo sustentable.

2.5. Caso de estudio.

2.5.1. Localización de la zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra en la costa norte de la península de Yucatán (fig.2.14), localizada a 20 km al poniente del puerto de Progreso y a 50 km de la ciudad de Mérida, capital del estado de Yucatán.



Fig. 2.14. Ubicación de la península de Yucatán dentro del territorio mexicano.

Comprende un tramo de costa de 15 kilómetros entre el puerto de Chelem y el de Chuburná (fig. 2.15), en donde la erosión costera es más severa que en otras partes de la costa yucateca, aquí los predios prácticamente han quedado invadidos por el mar.

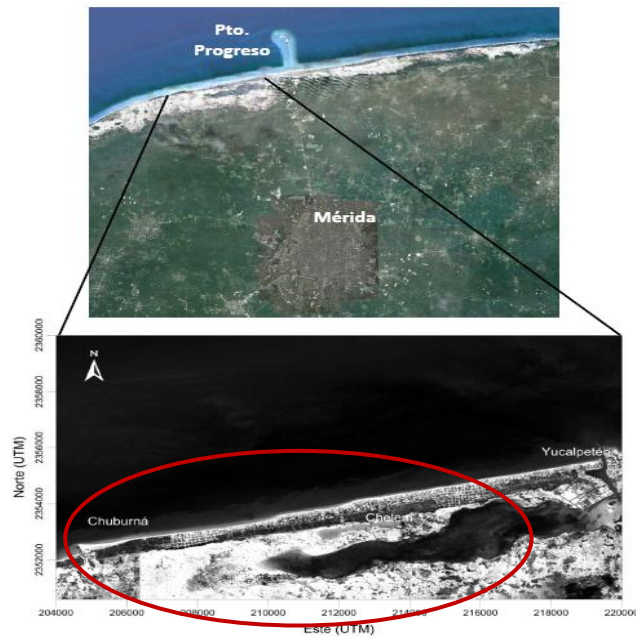


Fig 2.15. Localización de la zona de estudio [SEDUMA, 2011].



2.6. Diagnóstico preliminar.

Según recientes estudios del CINVESTAV y del Instituto de Ingeniería de la UNAM se ha llegado a tener un diagnóstico preliminar en la zona de estudio.

Además de las causas de erosión en la región ya mencionadas, uno de los factores importantes que afectan la zona de estudio, es que no se cuenta con un aporte continental de sedimentos importante. Esto hace que solamente se dependa del sedimento que el mar trae desde aguas profundas a la playa [López, 2011].

Puesto que en la mayoría del tiempo, la circulación de la corriente litoral que transporta el sedimento es de Oriente a Poniente [Merino, 1986], el material sedimentario se queda atrapado en las estructuras de protección marginal de los puertos de la región poniente del estado [López, 2011].

La ampliación del puerto de altura de Progreso causa un gradiente de velocidad longitudinal debido a la difracción, disminuye la capacidad del oleaje para recuperar la playa naturalmente durante el verano además que puede afectar los procesos naturales de restitución transversal del material erosionado durante los nortes (fig.2.16), [Torres, 2011].

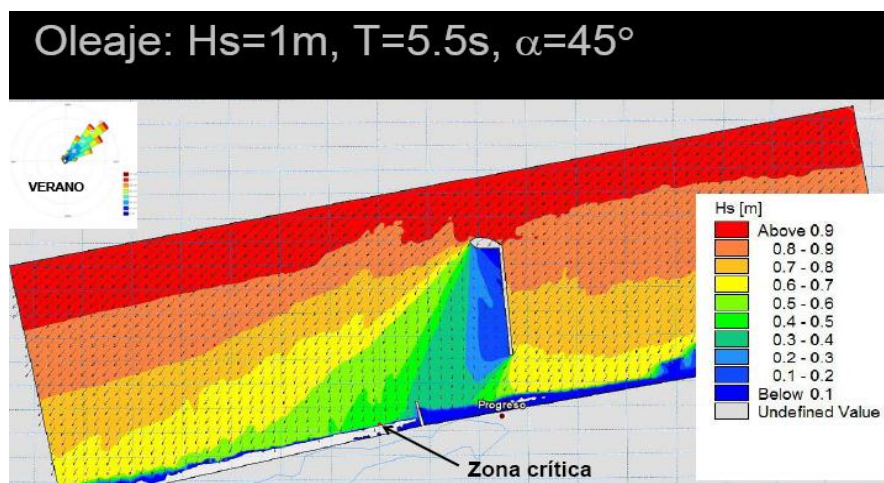


Fig. 2.16. Afectación del Puerto de Progreso [Torres, 2011].



La escollera Este de Yucalpetén ha sido la causa principal del proceso erosivo en la zona ya que bloquea el paso de los sedimentos reteniéndolos y disminuyendo el aporte de arena que debiera alimentar a Chelem y a Chuburná (fig. 2.17).



Fig. 2.17. Escollera Este de Yucalpetén [López, 2011].

De igual manera la colocación de espigones para atrapar el sedimento, y de estructuras para intentar mitigar el problema. (Piedras, muros verticales, espigones de madera etc.), muchos de ellos reflectivos han causado socavación donde eran colocados, incrementando el problema (fig. 2.18).



Fig. 2.18. Estructuras para intentar mitigar el daño.

Por último existe una pérdida de arena por arrastre hacia playa afuera y redistribuida a lo largo de la playa en el límite de la capa arenosa es decir, existe una fuga de arena hacia el mar (fig. 2.19).

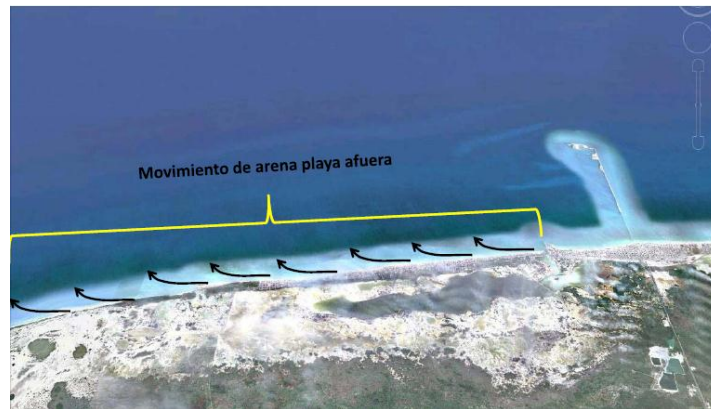


Fig. 2.19. Fuga de arena hacia el mar.

2.7. Evolución de la costa y análisis de la situación actual.

En los años 70's a pesar de que había ya pérdidas de playa por las causas ya mencionadas, todavía se podía observar un frente de playa aceptable (fig. 2.20) el cual fue disminuyendo hasta tal grado que a partir del año 2000, empezó a causar preocupación tanto en particulares como en autoridades para empezar a tratar de mitigar el problema.



Fig. 2.20. Fotografía de los 70's de la línea de costa de Chelem [Pérez, 1977].



En el 2005 el gobierno del estado ejecutó un programa de recarga artificial de arena, a la zona mediante el cual se recuperaron artificialmente 15 km de frente de playa, con lo que momentáneamente se solucionó el problema [www.yucatán.com].

En el mes de julio del mismo año, el huracán Emily pasó por el Caribe lo que ocasionó que su marea y oleaje de tormenta afectaran la recarga de alimentación artificial. En octubre de 2005 el huracán Wilma también contribuyó a la erosión de la playa [Avelar, 2006].

Ya para el 2006, se quitaron algunos espigones, se terminó la recarga artificial de la zona y la playa intentaba estabilizarse por sí sola con la arena suministrada. Desde entonces la línea de costa ha ido retrocediendo hasta llegar a un estado crítico en donde los predios de las zonas se encuentran invadidos por el mar (fig. 2.21 y 2.22) y debido a esto en algunos lugares de la zona, las construcciones se encuentran destruidas o derrumbadas.

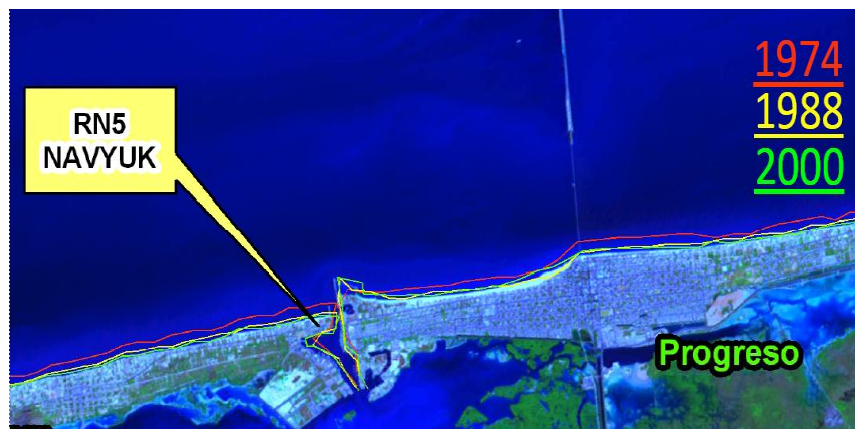


Fig.2.21. Evolución de la línea de costa en imagen multiespectral [López, 2011].



Fig. 2.22. Fotografía satelital del 1/6/2010 [Google Earth, 2011].

Organismos ambientalistas de Yucatán pronostican que en 100 años el mar podría subir alrededor de seis metros, lo que implicaría entre 5 y 10 kilómetros en zonas bajas, causando graves daños ecológicos, económicos y sociales [WWW.SEMARNAT.GOB].

2.8. Acciones realizadas.

Entre el año 2003 y 2005 empezó a atenderse el problema realizando una recarga artificial de arena extraída de las escolleras existentes en la costa del estado, en 15 kilómetros de la costa al noreste de la capital yucateca, entre el puerto de Chelem y Chuburná, los cuales presentaban problemas críticos de erosión. Inicialmente se recargaron 5 kilómetros de la playa, y gradualmente se continuó hasta terminar los 15 kilómetros.

Originalmente no se contaba con el material suficiente para rellenar la zona erosionada, debido a que solo se tenían 11 escolleras de donde se podrían extraer aproximadamente 400 mil metros cúbicos de arena y eso resultaba insuficiente, por lo que se tuvo que extraer el material arenoso en otros bancos. Tampoco se contaba con un estudio pertinente para diagnosticar la situación real del problema ya que tenía un costo de 1.5 millones de pesos.

La SEMARNAT ordenó quitar los espigones, para colocar Geotubos (fig. 2.23), lo que aceleró el proceso de erosión en esa parte de la costa.



Fig. 2.23. Instalación de Geotubos en Chelem, Yucatán [Alvarez - Ricalde, 2006].

Sin embargo todo este avance que se tuvo en los años 2002 al 2005, mediante este programa de recuperación de playas se abandonó, por lo que el mar nuevamente se llevó el material depositado en la playa.

Desde el año 2010, la SEDUMA tiene vigente un proyecto de recuperación de playas en la zona crítica, en el que se contempla recuperar 30 metros de playa, mediante una recarga artificial de 210 mil m³ extraídos principalmente de 3 sitios: 70 mil m³ del playón del puerto de Chuburná, 40 mil m³ de la marina de Yucalpetén y 110 mil m³ del puerto de abrigo de Yucalpetén. El proyecto también incluye la construcción de 131 espigones a lo largo del litoral entre los puertos de Yucalpetén y Chuburná (fig. 2.24), [SEDUMA, 2011].



Fig. 2.24. Recuperación de playa mediante alimentación artificial en Chelem Yucatán [www.progresoahoy.com].

En 2002, la SEMARNAT llevó a cabo un proyecto piloto de manejo de playas que tenía como propósito recuperar una playa erosionada en una zona frente al malecón de Progreso, de gran importancia recreativa (figura 2.25), realizando para ello una recarga artificial y la colocación experimental de varios “reef balls”.



Fig. 2.25. Estado de la línea de costa en el año 2002 previo al manejo de playas.

La pérdida de material arenoso que sufrió esta playa puede corroborarse en un registro aéreo de 1997, en donde se observa un mayor ancho de playa. El retroceso de playa puso en evidencia la existencia de restos de espigones a medida que la erosión avanzaba. Esto indica que antiguamente se instalaron estructuras de protección, ante la amenaza de erosión de playas en la zona, sugiriendo la existencia de posibles ciclos erosivos de largo plazo.



El programa de recuperación de playas se fue extendiendo hacia el Este y al Oeste de Progreso entre los poblados de Chelem y Chuburná y posteriormente entre YucaPetén y Chelem, en este último caso con la instalación de Geotubos.

Todos los programas de recuperación de playas han recurrido a recargas artificiales de arena, extraída de zonas de acumulación que se crearon en las escolleras de los puertos de abrigo de Telchac, YucaPetén y Chuburná, las que en parte han contribuido en los cambios de la morfología de otras playas.

Actualmente se realizan investigaciones acerca de la dinámica costera y calidad del agua en la zona, se realiza modelación numérica de procesos y la estructuración de un Comité interdisciplinario e interinstitucional en la zona de Chelem- Chuburná. También existen 10 sitios de monitoreo de acuerdo a como se muestra en la figura 2.26, [Batllori et al, 1999].



Figura 2.26. Localización del sitio ECCA 3 entre Chuburna y Chelem un sitio donde se realizaron obras para retirar un gran espigón [Batllori et al, 1999].



CAPÍTULO 3. OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.

3.1. Generalidades.

La forma ideal de proteger la costa es que sea de forma natural, para no entorpecer el equilibrio y el ciclo ecológico, como es la conservación de las dunas de arena, que constituye la última defensa que protege la post playa del oleaje de tormenta que ha rebasado la línea exterior de protección, que es la pendiente y berma de la playa en donde se disipa la mayor energía de las olas.

Después de una tormenta la playa se debe estabilizar con el tiempo gradualmente hasta reconstruir sus dunas y configuración que protegerá contra futuras tormentas.

Cuando las tormentas son muy severas y no se alcanza a reconstruir las dunas de manera natural, la segunda opción sería: ya sea la reconstrucción de las dunas de forma artificial, o la alimentación playera de arena. De esta forma se mantiene una protección costera flexible suficientemente efectiva contra los fenómenos oceanográficos. Sin embargo, si se experimenta una erosión crónica debido a la falta de aportes de sedimentos al litoral o a la sobreelevación del nivel del mar, entonces con el objetivo de estabilizar y proteger la costa se tendría que recurrir a las obras hechas por el hombre comúnmente denominadas obras marítimas de protección.

Según [MANLEY, 1998], las obras marítimas de protección costera se definen como aquellas estructuras, que son destinadas a proteger una zona específica de la costa contra la acción destructiva de los fenómenos oceanográficos.



Se pueden presentar en 2 clases:

- Estructuras que protejan del oleaje incidente como lo son rompeolas, diques, muros de contención y revestimientos.
- Estructuras para atrapar material, o para retardar el acarreo del litoral a lo largo de la costa como son los espigones y las escolleras.

Las obras de protección varían respecto a su geometría, tamaño y tipo de material con el cual se construyen, por su función específica, entre otras.

3.2. Recarga artificial de arena.

Cuando los sistemas de protección natural fallan durante largas tormentas, la primera solución que a menudo es seleccionada, es la solución suave que consiste en el suministro artificial playero así como la construcción de dunas de arena artificiales. Estas soluciones mantienen a la playa como un disipador de energía de oleaje, y a las dunas como la última línea flexible de defensa. Sin embargo, estos métodos proveen de soluciones temporales, cuando se trata de una erosión crónica de largo plazo, causada por disminución de suministro de sedimentos al sistema litoral y por un pequeño incremento en el nivel del mar [USACE, 1984].

La alimentación artificial de las playas es un método usado para restaurar momentáneamente las dunas costeras, remediando la causa básica de muchos problemas de erosión como la disminución del suministro de arena, y radica en colocar arena directamente en la playa (fig. 3.1) para incrementar el suministro natural al área, amontonándola en áreas aisladas para dejar que las olas naturales moldeen la arena a lo largo de la superficie de la playa, sin ser necesario remover la materia orgánica del material, porque la acción natural de las olas remueve las partículas finas y deja las fracciones más gruesas en la playa.



Para tener éxito en el relleno artificial de arena, se debe considerar con cuidado el material a utilizar. Si es demasiado fino, con facilidad el oleaje lo quitará de la playa y si es demasiado grueso, se formarán pendientes muy pronunciadas creando peligro para los bañistas de la playa.



Fig. 3.1. Alimentación artificial de arena [www.yucatan.com.mx].

El material de recarga ideal, es aquel de granulometría ligeramente más gruesa que el de la playa que se pretende proteger, con esto se asegura la pendiente de la playa y la permanencia del material en ésta [**Hattersley – Fostert, 1968**].

Para restaurar y estabilizar una playa erosionada, se llena de material el sector directamente y la playa es suministrada artificialmente por métodos de almacenamiento en pilas.

Cuando las condiciones son propicias para un suministro artificial, largas zonas de costa pueden ser protegidas por este método con un costo por metro lineal relativamente bajo. Una ventaja con igual importancia es que el suministro artificial remedia directamente la causa básica de la mayoría de los problemas de erosión, además que beneficia el ancho de la playa el cual se ha valorado como un elemento recreativo.



Las playas pueden disipar efectivamente la energía del oleaje, y ser consideradas como estructuras de protección costeras flexibles, para la infraestructura adyacente. Las playas que no han sido intervenidas por la acción del hombre, se encuentran en un sistema playero estable que disipan el oleaje, sin la aparición de efectos ambientales adversos. La mayoría de los problemas de erosión en la playa ocurren donde hay una deficiencia en el suministro natural de arena, la localización de material de préstamo en la costa puede ser considerado como una medida de estabilización en la costa.

Es importante mencionar que el reemplazo de la arena erosionada de la playa no resuelve totalmente el problema de erosión, por lo tanto el reemplazo periódico será requerido en la misma proporción que la pérdida causada por la erosión. El reemplazo a lo largo de un segmento de playa erosionada se puede efectuar por medio de un acarreo directo de material a la zona, almacenándolo permitiendo que el proceso longitudinal a la costa sirva para redistribuir el material a lo largo de la playa sobrante.

La alimentación playera mantiene la línea de costa en una posición restablecida. Cuando las condiciones son favorables para la alimentación artificial, grandes alcances de la costa pueden ser protegidos a un costo relativamente bajo en comparación a los costos de otras estructuras de protección. Una consideración adicional es que una playa con línea de costa ancha, puede tener beneficios adicionales como instalaciones recreativas.

El uso de material de llenado, más grueso que el natural es por consecuencia más estable en la restauración original y puede reducir las necesidades de suministro, no obstante puede reducir las condiciones del hábitat de vida silvestre o de recreación humana. La introducción de material no natural puede tener otros efectos no deseables a largo plazo, respecto a las líneas de costa adyacentes.

[USACE, 1984].



Según el Manual de Protección Costera de la Armada de Estados Unidos la planeación de una playa protectora mediante alimentación artificial requiere lo siguiente:

- (a) La determinación de las características del transporte longitudinal a la costa, en el sitio del proyecto y costas adyacentes, y la deficiencia de abastecimiento de material al área problema.
- (b) La determinación de las características de composición promedio del material playero existente o de la arena nativa en la zona de movimiento litoral activo.
- (c) La evaluación y selección del material de préstamo para el relleno playero inicial y para la alimentación periódica, incluyendo la determinación de cualquier cantidad de material de préstamo adicional requerido para su colocación con base en la comparación de la arena playera nativa y el material de préstamo.
- (d) La determinación de la elevación y ancho de la berma playera.
- (e) La determinación de las pendientes de la anteplaya para ola-ajustada
- (f) Determinación de la transición del llenado de playa.
- (g) Determinación de la localización de la playa alimentadora (apilamiento).

Donde las playas y dunas protegen desarrollos costeros, trabajos adicionales de protección pueden no ser necesarios. Sin embargo, cuando las fuerzas naturales crean erosión, el oleaje de tormenta puede rebasar la playa y dañar estructuras en la post-playa. Las estructuras hechas por el hombre pueden proveer protección **[USACE, 1984]**.



3.3. Infraestructura de protección costera.

Generalmente se clasifican en:

a) Obras paralelas a la costa.

Su función es la de fijar la línea de playa y son colocadas paralelamente a la línea de costa en lo alto de la playa justamente, en la zona de influencia del mar, de esta manera se forma un obstáculo entre la playa y el mar. Dentro de estas se pueden encontrar muros reflejantes y no reflejantes, revestimientos rígidos y flexibles y estabilización de dunas.

b) Obras normales a la costa.

Su función es la de reducir el transporte que se desplaza a lo largo de la zona activa de la playa y el transportado por la corriente litoral, propiciando que la dinámica litoral genere un tramo de costa adicional en donde ha habido erosión o bien, en donde nunca ha existido. Entre estos se encuentran los rompeolas, escolleras y espigones. **[Frías - Moreno, 1986]**. Pueden dividirse en 2 tipos: las obras sobre la línea de costa y las obras separadas de la costa. La función del primer tipo es la de proteger la línea de costa y las instalaciones detrás de ella contra la acción del oleaje.

La función del segundo tipo, además que protección directa también favorece el acumulamiento del sedimento detrás de la zona protegida. En la tabla 3.1 se muestra la clasificación de las estructuras de protección costera de acuerdo al tipo de estructura, objetivo y función principal.



Tabla 3.1. Clasificación de las estructuras de protección costera [Salles y Silva, 2004].

Tipo de Estructura	Objetivo	Función Principal
Dique	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas costeras bajas	Separación entre la línea de costa y las zonas bajas en tierra
Muro vertical (espaldones)	Proteger tierra y estructuras contra inundaciones y rebase	Refuerzo de parte del perfil de playa
Revestimiento	Proteger la línea de costa contra erosiones	Refuerzo de parte del perfil de playa
Malecón de retención	Retener suelo y evitar deslizamiento de tierra al mar	Refuerzo y relleno del banco de tierra costero
Espigón	Prevenir erosión playera	Reducción de transporte longitudinal a la playa
Rompeolas no ligado a la playa	Prevenir erosión playera	Reducción de la altura de ola en la sombra de la estructura
Dique o rompeolas arrecife	Prevenir erosión playera	Reducción de la altura de ola en la playa
Rompeolas sumergido	Prevenir erosión playera	Retardar el movimiento del sedimento mar adentro
Rompeolas	Proteger puertos y obras de toma contra oleaje y corrientes	Disipación de energía de oleaje y/o reflexión del oleaje hacia mar adentro
Dren de playa	Prevenir erosión playera	Acumulación de material playero en la porción drenada de la playa
Relleno artificial de playa y dunas	Prevenir erosión playera y proteger contra inundaciones	Relleno artificial de la playa y duna para que sea erosionado en lugar del material naturalmente depositado
Rompeolas flotante	Proteger puertos y zonas de atraque contra oleaje de alta frecuencia	Reducción de alturas de ola por reflexión y atenuación
Escollera	Estabilizar canales de navegación en desembocaduras y bocas	Confinar corrientes y flujos de marea. Proteger contra aguas pluviales y corrientes cruzadas
Muro de conducción	Prevenir azolve o erosión no deseados y proteger atraques contra corrientes	Direccionamiento de corrientes forzando el flujo a lo largo de las estructuras
Barreras para marea de tormenta	Proteger estuarios contra mareas de tormenta	Separación del estuario y el mar por medio de compuertas móviles
Protección contra socavación	Proteger estructuras costeras contra inestabilidad producida por erosión de fondo marino adyacente	Aumento de la resistencia contra erosión causada por oleaje y corrientes

En el caso de México no se han implementado todas las mencionadas en la tabla, ya sea porque no ha sido necesario, porque no ha habido presupuesto para construirlas, por falta de planeación, o por falta de visión y/o motivación para probar técnicas diferentes [Salles - Silva, 2004], aunque las estructuras más comunes, que se describen a continuación, sí se han estado implementando alrededor de la costa mexicana.



3.3.1. Espigones.

Este tipo de estructuras son normales a la playa y puede ser construidos en diferentes formas y de diversos materiales, como pueden ser los espigones hechos de tipo artesanal con madera y piedra de la región (fig. 3.2), caracterizados por no ser de gran longitud en su sección y hechos principalmente para atrapar el sedimento de la playa de las casas veraniegas.



Fig. 3.2. Espigones de tipo artesanal.

También son construidos de materiales de alta resistencia (fig. 3.3), con el fin de evitar la erosión ocasionada por el transporte litoral, o para la protección de una zona destinada a un puerto, que solo necesite protección en una sola dirección del oleaje por encontrarse en una zona de semi resguardo natural [Dace, 1984].

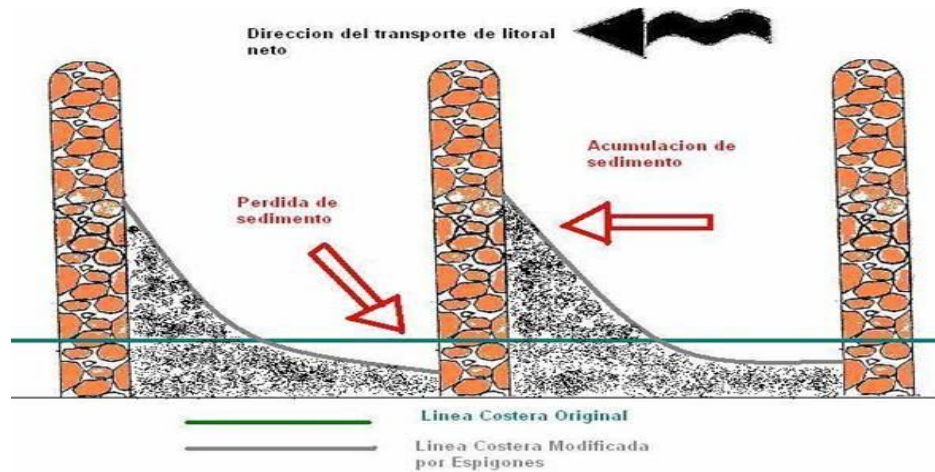


Fig. 3.3. Esquema del funcionamiento de los espigones

3.3.2. Rompeolas.

Su función principal es proporcionar defensa y abrigo (fig. 3.4), mitigando el oleaje y de esta forma disipar su energía, resultando una zona de calma al interior de la estructura, así como también evitar o reducir el azolvamiento en las zonas de acceso, disminuyendo el transporte de litoral en esas zonas. Por lo general son construidos a base de roca sobre todo en su última capa, aunque también pueden ser de elementos artificiales [Peña, 2005].

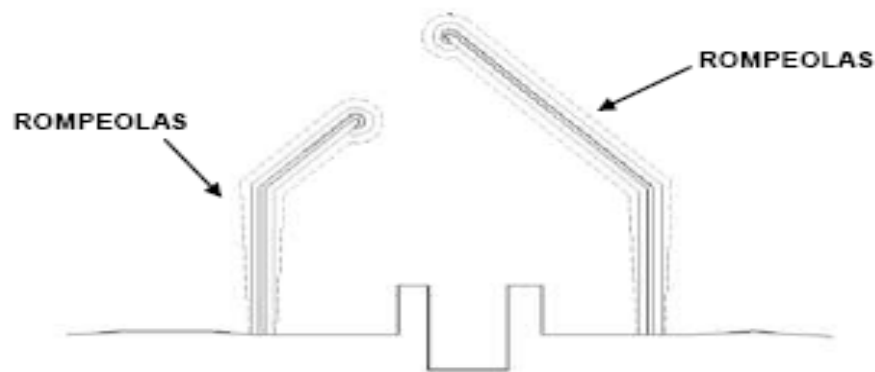


Fig.3.4. Abrigo generado por rompeolas [SCT, 2001].



3.3.3. Escolleras.

Estas estructuras son construidas y diseñadas sobre la costa, para encausar o mantener en contacto algún cuerpo de agua (río, laguna o estuario) con el mar, y controlar el transporte litoral (azolve), así como también proteger de la acción del oleaje (fig. 3.5), [Dace, 1984].

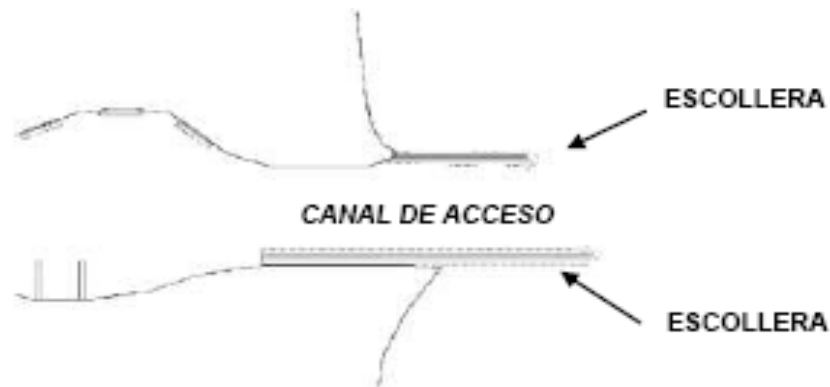


Fig.3.5. Escolleras en canal de acceso [SCT, 2001].

La implementación de estas estructuras junto a la playa, modifican la acción de las corrientes sobre el sedimento litoral, por lo tanto pueden ayudar a la retención de arena.

Estas estructuras pueden ser construidas de distintos tipos de materiales ya sea de enrocamiento en su forma más simple y económica, o de elementos artificiales como son cubos, dolos, tetrápodos, etc.; o de la combinación de algunos de estos (fig. 3.6).

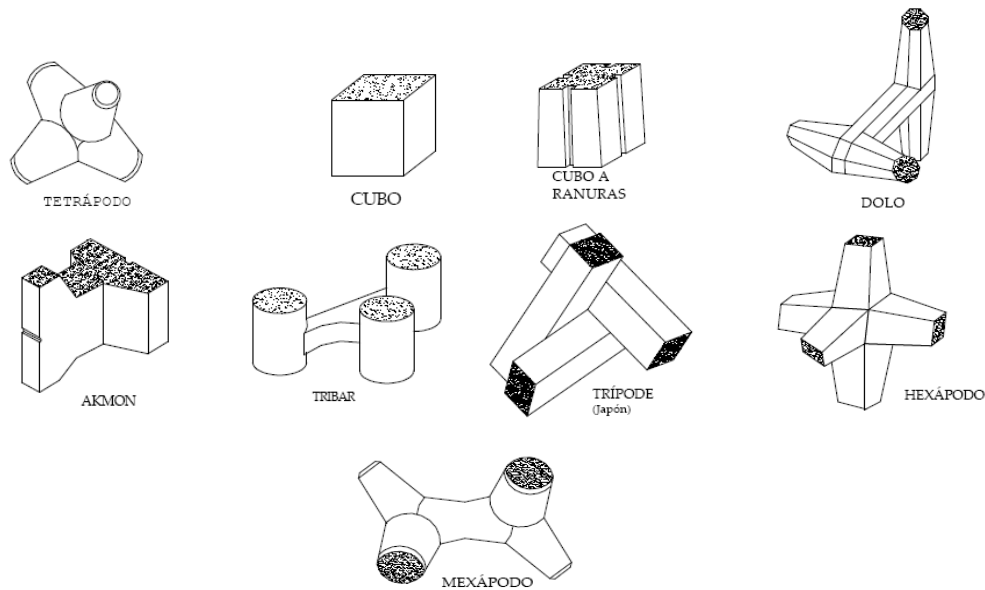


Fig. 3.6. Elementos artificiales preconstruidos [Morales – Jimenez, 2006].

3.3.4. Arrecifes artificiales y rompeolas sumergidos.

El origen del concepto “Arrecife Artificial” se atribuye a Japón y se data en el siglo XVIII, aunque desde mucho antes el hombre ha modificado las condiciones naturales del medio marino en su provecho.

Debido a la situación estratégica de los arrecifes naturales entre el mar abierto y la zona costera, sirven de barrera protectora a la costa disipando parcialmente la energía de las olas. Debido a que pueden amortiguar de forma efectiva la energía de las olas, conlleva a que se comporten como rompeolas sumergidos debido a su permeabilidad, que ayuda mucho a la disipación de la ola sin generar reflexiones.

Pretender generar una formación natural de arrecifes naturales para proteger la zona costera, no tiene ningún sentido práctico debido a que tardaría muchísimo tiempo en desarrollarse una formación de ese tipo, por lo que se ha buscado obtener las características de protección y beneficio de los arrecifes de manera artificial [López, 2007].



Las primeras formas para lograrlo era arrojar elementos de desecho al mar, tales como autos, barcos y chatarra en general con lo que se logra rápidamente la protección a la erosión, aunque en sitios turísticos resultaban poco atractivos, además de la contaminación que pudieran generar, por lo que hoy en día se han construido de materiales diferentes y de formas variadas.

Los elementos para construir arrecifes artificiales pueden dividirse en dos grupos:

- a) Construidos a base de geocontenedores que se rellenan de arena o de mezcla de arena y cemento. En este grupo podemos mencionar los geotubos y el bolsacreto, ambas marcas comerciales.

- b) Construidos con roca o elementos de concreto simple y que se agrupan como estructuras similares a los rompeolas de talud. Como elementos de concreto se cuentan desde los bloques, hasta los que resultan de la experimentación como los tetrápodos, los dolos o el Core - Loc*, todos ellos usados en la coraza en rompeolas convencionales. Se pueden mencionar también los Reef Ball [López, 2007].

3.3.4.1. Bolsacreto.

Los bolsacretos son bolsas de polipropileno, que se llenan de concreto mediante bombeo o por gravedad cuando se dispone de una buena altura. Pueden proteger la línea de costa y protección de puentes (pilas estribos espolones, etc.) Debido a su gran peso se fabrican en el sitio donde se van a colocar pues su peso limita su transporte.



3.3.4.2. Geotubos.

Los geotubos son sacos, bolsas o tubos, formados por geotextiles tejidos de alta resistencia, diseñados para soportar las condiciones extremas del medio ambiente como agua salada, altas temperaturas, exposición prolongada a la luz solar y la intemperie. Se fabrican a la medida, con técnicas de costura que resisten la presión del bombeo mientras se instalan.

Los fabricantes señalan que entre las aplicaciones de estos elementos es la de utilizarlos para generar arrecifes artificiales o como rompeolas. En el primer caso la función del geotubo es construir el núcleo del arrecife, y dejar a la naturaleza hacer el resto. En el segundo caso, funcionando como rompeolas, se coloca fuera de la playa para evitar el efecto erosivo que tiene el mar sobre la playa, haciendo que el oleaje rompa sobre él y generando así, entre el geotubo y la playa, una zona de agua relativamente tranquila, similar a una laguna arrecifal [López, 2007].

Según [López, 2007], el bolsacreto y los geotubos, debido a sus características físicas y comportamiento para realizar la protección de costas, difícilmente podrían catalogarse como arrecifes artificiales en el amplio sentido de la denominación, aunque es posible que como en el caso de los geotubos, al usarlos como rompeolas pueden generar una zona de aguas tranquilas, la impermeabilidad de su estructura también puede causar reflexión del oleaje, además de que al no tener en su cuerpo agujeros como en los arrecifes naturales, la posibilidad de estimular el desarrollo de vida marina es nulo (fig. 3.7).

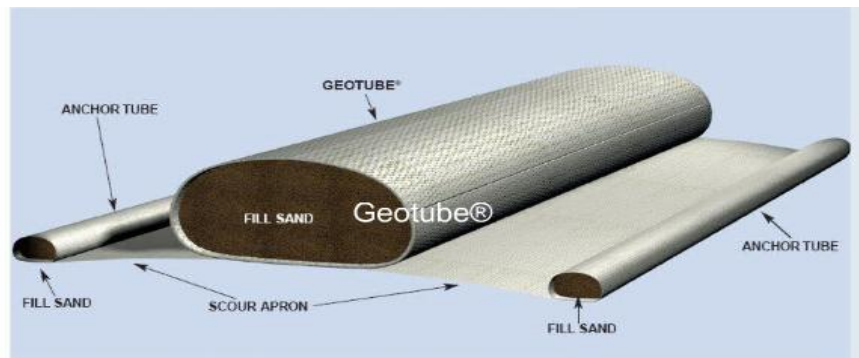


Fig.3.7. Componentes del Geotubo [Aceituno, 2010].

3.3.4.3. Reef Balls.

Los Reef Balls, fueron creados por la organización Reef Ball Development Group en 1993, y se caracterizan por tener forma de semiesferas con agujeros, contenidas en su cuerpo con distintos tamaños para propiciar, una amplia circulación del agua a través de dichas perforaciones lo que propicia el desarrollo de la biomasa animal o vegetal (fig. 3.8). El Reef Ball es un módulo de concreto que simula arrecifes artificiales y una vez puestos en el mar forman un hábitat natural. Su uso pareciera más orientado a servir de sustento para el crecimiento de comunidades coralígenas de manera artificial, que a una función protectora de la costa, ya que se menciona que en el caso de arrecifes colocados a baja profundidad o cercanos a la costa, los elementos son anclados convenientemente para evitar ser arrastrados por la acción del oleaje. [www.reefball.org].



Fig. 3.8. Reef Ball [www.reefball.org].



3.4. Análisis General.

Los implementos propuestos para detener la erosión costera deberían seleccionarse desde un punto de vista integral, y además deberían ser de bajo impacto como por ejemplo la alimentación artificial con arena, de tal forma que se conserve el paisaje, no se alteren los ecosistemas y puedan desarrollarse actividades náuticas propias del turismo. La alimentación artificial con arena y la instalación de geotubos parecen ser alternativas aceptables, no obstante requieren evaluarse a detalle ya que puede producir efectos secundarios sobre todo en temporada de huracanes.

La infraestructura de protección costera debería en lo posible evitarse (Construcción de espigones, escolleras etcétera), sobre todo las estructuras reflectivas, tal como lo han afirmado algunos investigadores [**Bijker – Van de Graff, 1983**]. Además las soluciones deben involucrar la experiencia adquirida no solo por ingenieros de costas sino también por geólogos, geógrafos, biólogos, ecologistas entre otros especialistas [**Guilcher, 1974**].

La alimentación artificial de playas no provee una solución permanente al problema de la erosión [**USACE, 1984**], y aunque los costos de inversión iniciales no son tan altos, el costo de mantenimiento si lo es.

La capacidad de recuperación de las playas después de los huracanes y el oleaje distante persiste en forma oblicua sobre las mismas y son los factores más importantes que gobiernan la durabilidad de los proyectos de alimentación artificial de playas [**Silvester - Hsu, 1997**].

Las dunas naturales son de formas muy diversas y son frecuentemente estabilizadas por la vegetación que crece en ellas. Esta vegetación disminuye el poder erosivo del oleaje y del viento, de esta manera las dunas ofrecen protección natural en contra de la erosión.



Es por eso que la ocupación humana en esta zona, causan el rompimiento de esta protección al quitar total o parcialmente la vegetación de la duna y las dunas mismas. **[Hattersley - Foster, 1968]**.

La mejor forma de protección a la erosión y a los daños que provoca esta es, manteniendo una franja amplia de playa protegida por una duna frontal que reciba las olas de tormenta, de esta forma habrá suficiente material para alimentar la barra arenosa que se forma durante la tormenta aguas adentro, por lo cual se debe de mirar hacia la legislación para impedir que se construya en esa zona, garantizando de ese modo la estabilidad de playa **[Guido et al, 2009]**.

Una playa estable ofrece protección contra la acción del mar, funcionando como una defensa amortiguadora, ajustando su forma durante la época de huracanes (perfil de invierno) y además que provee para su propia recuperación en temporada normal (perfil de verano). Muchas veces la preservación de las playas se confunde con la necesidad de proteger alguna propiedad, edificio o estructura.

Se debe considerar que un frente de playa estable otorga una protección máxima a aquellas estructuras construidas cerca de la costa, que no estén ocupando la zona móvil de la playa. Es por esto que las construcciones situadas en las dunas costeras ocasionan variación y la pérdida de material modificando la línea de costa, hasta que se alcance estabilizar de nuevo la playa pero con una nueva configuración. El efecto nocivo del hombre en la costa no se alcanza a ver sino hasta largo plazo, en donde muchas veces el daño es irreparable, por lo cual se debe de tener un análisis profundo de las consecuencias si se decide construir obra civil en la costa.



CAPÍTULO 4. TRANSMISIÓN DEL OLAJE.

4.1 Definición de la transmisión del oleaje.

Los arrecifes artificiales sumergidos representan una alternativa de solución ingenieril que pueden ayudar a mantener el equilibrio dinámico de la costa; sin embargo un mal diseño puede provocar impactos negativos.

Por esta razón, es necesario conocer los parámetros que están asociados con la transmisión del oleaje, permeabilidad de la estructura, ancho del coronamiento entre otros, de tal forma que se obtenga un método de diseño económico y funcional. No obstante, el papel que desempeñan estos parámetros, no han sido totalmente resueltos.

La transmisión del oleaje se puede describir como la porción de la altura de ola, que logra pasar a través de una estructura de protección al lado protegido

En el estudio de la transmisión del oleaje, un considerable número de fórmulas empíricas han sido propuestas a partir de diferentes trabajos de laboratorio.

Las diferentes fórmulas de diseño convergen indicando, que las diferentes variables están asociadas directamente con la transmisión del oleaje sobre la estructura.

La transmisión del oleaje se interpreta a través del coeficiente de transmisión del oleaje K_t el cual se define como la relación de la altura de ola incidente H_i , entre la altura de ola transmitida H_t representado por la siguiente ecuación.

$$K_t = \frac{H_i}{H_t} \quad (4.0)$$



La cual es reflejada por variables físicas identificadas como:

B - Ancho del coronamiento de la estructura.

R_c - Bordo libre o sumergencia.

d – Profundidad.

m – Talud o parámetro de forma de la estructura.

n - Permeabilidad.

D_{50} - Diámetro nominal del material o espesor de la coraza de la estructura.

H_s - Altura de ola incidente.

T_i - Período de la ola incidente.

L – Longitud de ola incidente.

H_i/L – Relación de esbeltez de ola incidente.

d/L – Profundidad relativa.

B/L – Ancho de coronamiento relativo.

R_c/H_s – Profundidad de sumergencia relativa

4.2 Estudios experimentales de transmisión del oleaje.

Saville (1963), probó un gran número de estructuras similares variando los taludes de sus lados con el objetivo de proponer un rompeolas para las costas de Loma, California. La mayoría de sus pruebas en rompeolas tuvieron una sumergencia al ras del nivel de la superficie del agua, así que la mayor parte de la transmisión del oleaje en las pruebas se debió primordialmente al rebase de la ola. Algunos de los rompeolas probados primeramente en un tanque largo de olas en el Centro de Investigación de Ingeniería Costera (CERC), fueron luego reevaluados en estudios a una escala menor para examinar los efectos de escala.



Lamarre (1967), midió la transmisión del oleaje por rebase en una estructura con un ancho de coronamiento relativamente estrecho y con un talud de 1 a 1.5. Las condiciones y alturas de oleaje sobre la estructura con las que realizó sus experimentos fueron variadas.

Goda (1969), evaluó rompeolas verticales lisos e impermeables para analizar la transmisión del oleaje por rebase. Experimentó con diferentes anchos de coronamiento, sumergiendo y emergiendo las estructuras a diferentes alturas y en condiciones de oleaje variables. Sus investigaciones le llevaron a desarrollar una ecuación empírica no lineal, para predecir el coeficiente de transmisión del oleaje al que consideró función de la sumergencia relativa del rompeolas, de la ola incidente y de dos coeficientes empíricos relacionados con la geometría de la estructura y la profundidad relativa.

Davidson (1969), realizó pruebas en un modelo a escala 1:40 para un rompeolas propuesto para el puerto de Monterrey, California.

Cross y Sollitt (1971), desarrolló un modelo semiempírico para la transmisión del oleaje por rebase (overtopping) sobre rompeolas emergidos. El modelo fue comparado con los resultados de Lamarre (1967), para una estructura impermeable con taludes de 1 a 1.5. Los autores sugirieron que la transmisión del oleaje por overtopping es una función no lineal de la sumergencia relativa para el runup.

Keulegan (1973), Midió la transmisión del oleaje a través de cierto número de rompeolas verticales permeables usando una gran variedad de materiales y condiciones de oleaje. La comparación de sus resultados condujo al desarrollo de un método de diseño de modelos que consideraran los efectos de escala.



Sollit y Cross (1976), evaluó la transmisión del oleaje a través de rompeolas permeables de enrocamiento para desarrollar un modelo empírico-analítico.

Madsen y White (1976), desarrollaron un modelo empírico- analítico para la predicción de la transmisión del oleaje y el coeficiente de reflexión analizando la transmisión del oleaje a través de un rompeolas superficial de enrocamiento.

Los resultados fueron comparados con los de los experimentos de Keulegan (1973) and Cross and Sollitt (1976), mostrando que el coeficiente de transmisión puede ser predicho de forma más confiable que el coeficiente de reflexión.

Goda et al (1969), realizaron experimentos de laboratorio en un canal de oleaje de tipo monocromático sobre rompeolas verticales, demostrando que el coeficiente de transmisión depende de las condiciones de la profundidad de sumergencia relativa R_c/H_s , y que para un ancho de coronamiento mayor el coeficiente de transmisión disminuye. Por otro lado, las características adimensionales de la ola como H/L y H_s/h , no tienen influencia en la relación entre la sumergencia relativa y el coeficiente de transmisión de la ola. Considerando todo esto se propuso la siguiente ecuación:

$$K_t = 0.5 \left[1 - \sin \frac{\pi}{2\alpha} \left(\beta - \frac{R_c}{H_s} \right) \right] \quad (4.1)$$

En donde las variables $\alpha= 2$ y β tiene valores de 0.1 (alto), 0.3 (medio) y 0.5 (bajo) para rompeolas de enrocamiento.

Abdul Khader and Rai (1980), realizaron una serie de pruebas de laboratorio de dos dimensiones sobre rompeolas sumergidos lisos, impermeables con diferentes formas y geometrías. Los autores mostraron que la disipación de la energía depende del ancho de coronamiento relativo d/h y que la cantidad de energía disipada por rompeolas rectangulares o trapeciales es mayor, cuando se presentan valores grandes de esbeltez de la ola.



Seelig (1980), Llevó a cabo una serie de pruebas con rompeolas impermeables, evaluando su rebase con oleaje irregular y monocromático. Respecto a Goda (1969), el manifestó que la profundidad de sumergencia relativa R_c/H_s es el parámetro principal que influye en el coeficiente de transmisión. Igualmente evidenció que la fórmula de Goda (1969), también es válida para oleaje irregular. Otros factores que evaluó incluyen: altura de ola, período, diseño de la sección transversal del rompeolas, materiales y características.

Para estudiar la estabilidad de la estructura, el rebase del oleaje y el coeficiente de transmisión **Allsop (1983)** llevó a cabo una serie de experimentos sobre rompeolas sumergidos de enrocamiento de bajo coronamiento. Las pruebas se llevaron a cabo usando oleaje irregular con diferentes tipos de altura y período. Sugirió una modificación en la fórmula de Goda (1969) para el cálculo del coeficiente de transmisión del oleaje, multiplicándola por el coeficiente “0.5” e introduciendo el parámetro R^* en lugar de R_c/H_s con el objeto de adaptar el modelo para datos medidos:

$$K_t = 0.5 \left[1 - \text{seno} \frac{\pi}{2\alpha} (\beta - R^*) \right] \quad (4.2)$$

donde:

$$R^* = \frac{R_c}{H_s} \left(\frac{s}{2\pi} \right)^{0.5} \quad (4.2.1)$$

Más adelante en base a estas investigaciones **Powell y Allsop (1985)**, desarrollaron una guía de diseño en base a curvas empíricas para estimar el coeficiente de transmisión del oleaje en rompeolas permeables sumergidos con 40% de porosidad.

Ahrens (1987), realizó estudios de estabilidad, transmisión y reflexión del oleaje sobre arrecifes artificiales de enrocamiento sumergidos, en el Centro de Investigación e Ingeniería Costera de la Estación Experimental del Cuerpo de la



Armada de los EEUU (USA Army Engineer Waterways Experiment Station's Coastal Engineering Research Centre).

Basado en los resultados de su investigación presentó una fórmula empírica para rompeolas sumergidos, en donde incluye la mayoría de los parámetros físicos mencionados anteriormente:

$$K_t = \frac{1.0}{1.0 + \left(\frac{H_s A_r}{L D_{50}^2}\right)^{0.592}} \quad \text{para} \quad \frac{R_c}{H_s} < -1 \quad (4.3)$$

$$K_t = \frac{1.0}{\left\{1.0 + \left(1 - \frac{b}{h}\right)^{1.188} \left(\frac{A_r}{hL}\right)^{0.261} \exp\left[0.529 - \frac{b}{H_s} + 0.00551 \left(\frac{A_r^{3/2}}{D_{50}^2 L}\right)\right]\right\}} \quad \text{para} \quad \frac{R_c}{H_s} > -1 \quad (4.3.1)$$

donde:

A_r = Área de la sección transversal de la estructura.

H_s = Altura de ola significativa incidente

D_{50} = Dimensiones de la roca.

L = Longitud de onda

b = Ancho de coronamiento de la estructura.

h = Profundidad de desplante de la estructura

R_c = Distancia entre la superficie del agua y el coronamiento de la estructura (sumergencia).

Sin embargo más tarde se demostró que esta fórmula no es muy adecuada para anchos de coronamiento muy grandes.

Analizando datos de experimentos de laboratorio, **Gómez y Valdés (1990)** encontraron que el coeficiente de transmisión del oleaje muestra una tendencia oscilatoria respecto al ancho del coronamiento relativo B/L . También demostraron que para condiciones de oleaje cuando existe rompiente y cuando no, para ambas el coeficiente de transmisión se encuentra asociado con el parámetro de similitud



de rompiente o número de Iribarren ξ , que puede ser calculado conociendo el talud lado tierra del rompeolas α y la relación H_s/L , relación de esbeltez de la ola.

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L_0}} \quad (4.4)$$

Van der Meer (1988, 1990 y 1991), analizó datos previos de pruebas realizadas por Seelig (1980), Powell y Allsop (1985), Daemrich y Kahle (1985), Ahrens (1987) para proponer una nueva fórmula para el cálculo del coeficiente de transmisión del oleaje, basada en su relación con la profundidad de sumergencia relativa R_c/H_s .

$$K_t = 0.46 + 0.3 \frac{R_c}{H_s} \quad (4.5)$$

Donde el coeficiente de transmisión K_t está limitado a valores entre 0,8 y 0,1, respectivamente para una profundidad de sumergencia relativa $R_c/H_s < 1.13$, y $R_c/H_s > 1.2$. Aquí la fórmula no toma en cuenta directamente los efectos de ancho del coronamiento, pendiente del talud, longitud de onda, rugosidad de la superficie por lo tanto su aplicación se limita solamente a determinadas condiciones.

Una deducción similar fue usada por **Daemen (1991)**, realizando para ello pruebas de laboratorio en el canal de oleaje irregular del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Delf Holanda, y recolectando datos de pruebas realizadas por Seelig (1980), Powell y Allsop (1985), Daemrich y Kahle (1985).

Presentó su fórmula empírica de transmisión del oleaje, agregando ciertos parámetros adimensionales como son: la sumergencia y el tamaño de los elementos de la coraza de la estructura.

$$k_t = A \frac{-R_c}{D_{50}} + B \quad (4.6)$$

Donde A es un coeficiente angular expresado por:



$$A = 0.031 \frac{H_s}{D_{50}} - 0.24 \quad (4.6.1)$$

Asimismo B representa el coeficiente de transmisión para estructuras sin sumergencia ($d = 0$), y depende de la altura de ola relativa H_s/D_{50} , ancho del coronamiento b , y período pico de la ola incidente T_p :

$$B = -5.24s_{op} + 0.0323 \frac{H_s}{D_{50}} - 0.0017 \left(\frac{R_c}{D_{50}} \right)^{1.84} + 0.51 \quad (4.7)$$

Donde s_{op} representa la relación de esbeltez de la ola expresado por:

$$s_{op} = 2\pi H_s / g T_{pi}^2 \quad (4.7.1)$$

Y para rompeolas sumergidos de tipo arrecife el coeficiente B es igual a:

$$B = -2.6 \left(\frac{H_s}{L_o} \right) - 0.05 \left(\frac{H_s}{D_{50}} \right) + 0.85 \quad (4.7.2)$$

Se asume que el coeficiente de transmisión para rompeolas convencionales no sea menor de 0.075 y no mayor de 0.75 y para rompeolas de tipo arrecife la fórmula está limitada a valores de K_t entre 0.15 y 0.6.

Davies y Kriebel (1992), realizaron un gran número de experimentos 2D sobre rompeolas de enrocamiento e impermeables, bajo el régimen de oleaje monocromático y oleaje irregular. Propusieron un nuevo parámetro adimensional, la sumergencia relativa, para predecir el coeficiente de transmisión en rompeolas de tipo arrecife. Este nuevo parámetro está en función del número de Iribarren:

$$\frac{R_u}{H_s} = \frac{a\xi}{1+b\xi} \quad (4.8)$$

Donde a y b son coeficientes empíricos con valores de: $a= 0.775$ y $b= 0.361$



Van der Meer y Daemon (1994), propusieron una ecuación para el cálculo del coeficiente de transmisión:

$$K_t = \delta \frac{R_e}{Dn_{50}} + b \quad (4.9)$$

donde:

$$\delta = 0.031 \frac{H_s}{Dn_{50}} - 0.024 \quad (4.9.1)$$

$$b = -5.42s_{op} + 0.0323 \frac{H_s}{Dn_{50}} - 0.017 \left(\frac{B}{Dn_{50}} \right)^{1.84} + 0.51 \quad (4.9.2)$$

D'Angremond, Van Der Meer y de Jong (1996), se basaron en análisis de datos experimentales realizados por Seeling (1980), Allsop (1983), Daemrich y Kahle (1985), Powel y Allsop (1985), Van der Meer (1988), Daemen (1991), previamente filtrados suprimiendo datos con relaciones de esbeltes elevados ($s_{op} \geq 0.6$) y con altura de ola relativa H_s/h , en estructuras altamente sumergidas $R_c/H_s < -2.5$, o emergidas con $R_c/H_s > 2.5$, para presentar una fórmula diferente de transmisión de oleaje para estructuras emergidas y sumergidas con sumergencia relativa bajo las limitantes:

$$\left(-2.5 < \frac{R_c}{H_s} < 2.5 \right) \quad (4.10)$$

$$K_t = -0.4 \left(\frac{R_c}{H_s} \right) + \left(\frac{b}{H_s} \right)^{-0.31} (1 - \exp^{-0.5\xi})c \quad (4.10.1)$$

Dónde: ξ es el parámetro de similitud de corriente o número de Iribarren expresado por:

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{(S_{op})^{0.5}} \quad (4.10.2)$$

$$S_{op} = \frac{2\pi H_i}{gT_p^2} \quad (4.10.3)$$

El coeficiente $C = 0.8$, para estructuras impermeables y $C = 0.64$, para estructuras permeables.



Seabrook y Hall (1997 y 1998), demostraron que la fórmula de transmisión de oleaje sugerida por Ahren (1987) y Van der Meer (1991), no es adecuada cuando el ancho del coronamiento del rompeolas es muy grande. Realizaron pruebas con oleaje irregular para evaluar la transmisión del oleaje sobre rompeolas sumergidos de enrocamiento, usando para ello diversas condiciones de sumergencia, profundidad, y altura de ola incidente, por lo que concluyeron que los factores más importantes para determinar el coeficiente de transmisión del oleaje son: la sumergencia, y el ancho del coronamiento, presentando la siguiente ecuación para rompeolas sumergidos:

$$K_t = 1 - \left[\exp \left((-0.65) \left(\frac{R_c}{H_s} \right) - 1.09 \left(\frac{H_s}{b} \right) \right) + 0.047 \left(\frac{b \cdot R_c}{L \cdot D_{50}} \right) - 0.067 \left(\frac{R_c \cdot H_s}{b \cdot D_{50}} \right) \right] \quad (4.11)$$

Los autores recomiendan la aplicación de la fórmula dentro de los rangos:

$$0 \leq \frac{(b \cdot R_c)}{(L \cdot D_{50})} \leq 7.08 \quad (4.11.1)$$

$$0 \leq \frac{(R_c \cdot H_s)}{(b \cdot D_{50})} \leq 2.14 \quad (4.11.2)$$

Gironella y Sanchez-Arcilla (1999), reanalizaron experimentos sobre transmisión y reflexión del oleaje sobre rompeolas sumergidos desarrollando su propia ecuación en base a la relación R_c/L y al número de Iribarren, aplicando una regresión multilínea y encontraron esta ecuación:

$$K_t = C_1 \left(\xi \frac{R_c}{L} \right) + C_2 \frac{R_c}{L} + C_3 \quad (4.12)$$

Donde los coeficientes empíricos $C_1=6.43$, $C_2=14.63$ y $C_3=0.52$



Las limitantes de aplicación de la fórmula son:

$$\begin{aligned} 3.2 &\leq \xi \leq 5.5 \\ o &\leq \frac{R_c}{L} \leq 0.04 \\ 0.015 &\leq \frac{H_s}{L} \leq 0.04 \end{aligned}$$

Van der Meer et al (2000), analizaron estructuras impermeables variando los anchos del coronamiento, observando que el oleaje se transmitía libremente, por lo que en este tipo de estructuras el ancho del coronamiento no influye directamente en la reducción del coeficiente de transmisión.

Dividieron su fórmula en dos partes, para oleaje rompiente y para oleaje que no rompe. Sus limitantes son para valores de K_t entre 0.075 y 0.8.

$$K_t = -0.3 \frac{R_c}{H_s} + 0.75[-0.5\xi] \quad \text{para } \xi < 3 \quad (4.13)$$

$$K_t = -0.3 \frac{R_c}{H_s} + \left[\frac{B}{H_s} \right]^{-0.31} [1 - \exp^{-0.5\xi}] 0.75 \quad \text{para } \xi \geq 3 \quad (4.13.1)$$

Bleck y Oumeraci, (2002), Investigaron la transmisión del oleaje realizando pruebas sobre un arrecife sumergido de sección transversal rectangular, definiendo al parámetro H_s más crítico como “parámetro no lineal de aguas someras”.

Los resultados arrojados en su investigación sirvieron de base para formular la siguiente ecuación para encontrar el coeficiente de transmisión de ola:

$$K_t = 1 - 0.83 \exp\left(-0.72 \frac{R_c}{H_s}\right) \quad (4.14)$$



Roul y Faedo (2002), realizaron su investigación experimental en el canal de oleaje del laboratorio de la Universidad de Padova, Italia analizando los rompeolas sumergidos bajo oleaje rompiente para poder entender su comportamiento. Para calcular la transmisión del oleaje desarrollaron una ecuación empírica relacionándola con las dimensiones de la profundidad de sumergencia relativa propuesta anteriormente por Davies y Kriebel (1992).

$$K_t = -0.0928 \left(\frac{R_c + R_u}{H_s} \right)^2 + 0.1862 \left(\frac{R_c + R_u}{H_s} \right) + 0.1176 \quad (4.15)$$

Friebel y Harris, (2003), tomaron los datos experimentales obtenidos por Seeling (1980), Daemrich y Kahle (1985), Van Der Meer (1988), Daemen (1991), Seabrook (1997) y desarrollaron una nueva fórmula empírica considerada como la “mejor ajustada”. El estudio de Friebel y Harris confirmó que el coeficiente de transmisión es altamente dependiente del parámetro no lineal de sumergencia R_c/H_s .

Otras variables adimensionales consideradas en la fórmula de Friebel y Harris son: ancho relativo de la cresta B/L o B/h , emergido de la estructura sobre el lecho marino, así como el parámetro de ancho de coronamiento respecto a la profundidad de sumergencia.

La fórmula propuesta es:

$$K_t = -0.4969 \exp \left(\frac{d}{H_{si}} \right) - 0.0292 \left(\frac{b}{h} \right) - 0.4257 \left(1 - \frac{d}{h} \right) - 0.0696 \cdot \log \left(\frac{b}{L} \right) + 0.1359 \left(\frac{d}{b} \right) + 1.0905 \quad (4.16)$$

Siladhama y Hall (2003), desarrollaron la ecuación 4.17 usando métodos de análisis estadísticos basados en un estudio experimental 3-D de transmisión de oleaje en arrecifes sumergidos, ejecutado en la Universidad de Queen’s, Kingston, Canadá.



$$K_t = -0.86 \exp\left(-\frac{R_c}{H_s}\right) + 1.049 \cdot \exp\left(-0.003 \frac{R_c}{H_s}\right) - 0.026 \frac{H_s}{b} \cdot \frac{d}{D_{50}} - 0.005 \frac{b^2}{L \cdot D_{50}}$$

(4.17)

En esta ecuación se observa que la profundidad de sumergencia relativa R_c/H_s , es nuevamente el parámetro principal.

Calabrese, Vicinanza y Buccino (2003), realizaron estudios experimentales a gran escala en el canal de oleaje “Grosse Wellen Kanal” en Hanover Alemania, y propusieron una versión modificada de la fórmula de Daemen (1991), combinando algunos parámetros utilizados en la fórmula de d'Angremond et al (1996), para aguas someras.

$$K_t = A \cdot \frac{R_c}{b} + B \quad (4.18)$$

Los datos experimentales obtenidos, fueron analizados siguiendo las relaciones funcionales para parámetros A y B definidos en las siguientes ecuaciones.

$$A = \beta \exp\left(0.2568 \frac{b}{H_s}\right) \quad (4.18.1)$$

$$B = \alpha \exp\left(-0.0845 \frac{b}{H_s}\right) \quad (4.18.2)$$

donde:

$$\alpha = 1 - 0.562 \exp(-0.0507\xi) \quad (4.18.3)$$

$$\beta = 0.6957 \frac{H_s}{h} - 0.7021 \quad (4.18.4)$$



Van der Meer et al (2005), primeramente utilizaron para tener un soporte inicial, la más reciente base de datos europea DELOS (Environmental Design of Low Crested Coastal Defence Structures), la cual consiste en un cúmulo de información de investigadores, que llevaron a cabo experimentos extendiendo y complementando entre todos la base de datos existente.

Sin embargo tuvieron que desarrollar su propia serie de datos ya que las estructuras de enrocamiento, lisas e impermeables no se comportaban de manera similar bajo diferentes profundidades. Basaron el desarrollo de su modelo para el cálculo de la transmisión del oleaje en las fórmulas provistas por Van der Meer (1991) y d'Angremond et al (1996), asociando el ancho del coronamiento con la altura de ola incidente B/H_s lo que les arrojó la fórmula 4.19 para rompeolas sumergidos de enrocamiento.

$$K_t = 0.35 \frac{R_c}{H_s} + 0.51 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0.65} * (1 - \exp^{-0.41\xi}) \quad (4.19)$$

Los autores proponen un máximo valor para K_{tu} en función del radio de B/H_i (como fue propuesto por d'Angremond et al, 1996)

Para valores de K_t altos, la formula K_{tu} podría incurrir a la ecuación 4.19.1.

$$K_{tu} = - \frac{0.006B}{H_s} + 0.93 \quad (4.19.1)$$



CAPÍTULO 5. EXPERIMENTACIÓN POR MEDIO DE UN MODELO FÍSICO REDUCIDO.

5.1. Generalidades.

La experimentación es la investigación dirigida a la solución de un problema específico y que emplea el método científico, el cual indica el procedimiento y técnicas para llevar a cabo la experimentación, cuyos resultados sean aceptados por la comunidad científica [Vergara, 1993].

Un elemento fundamental en la experimentación es el uso del experimento, el cual supone una observación directa y ordenada con la finalidad de estudiar los fenómenos y principios que indujeron a la investigación. El experimento es el recurso para llevar a la observación al más alto grado de perfección [Heredia, 1984].

5.1.1. Definición.

Los modelos son estructuras ya sea materiales o conceptuales, en donde se representan en forma análoga, similitudes de las características importantes del fenómeno de estudio, es decir que el modelo debe tener propiedades semejantes a las que se desean estudiar en el sistema original.

El objetivo del modelo no es únicamente reproducir con exactitud los fenómenos observados, sino la de convertirlos a un plano conveniente, para poder manipular y seleccionar los parámetros esenciales, representándolos de forma simplificada con la finalidad de describirlos y predecirlos [Heredia, 1984].

Los modelos físicos son usualmente necesarios para el diseño óptimo de las estructuras marítimas, ya que proporcionan información confiable sobre interacción de las olas en la estructura, por lo que se recomienda su utilización en el campo marítimo-portuario [Isobe, 2002].



5.1.2. Tipos de modelos.

Dentro de los diferentes tipos de modelos se encuentran:

Modelos matemáticos: Conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno, que conducen a una resolución por medio de técnicas matemáticas apropiadas.

Modelos Analógicos: Dos fenómenos físicos de diferente naturaleza se llaman analógicos si las ecuaciones que los describen se expresan con formas matemáticas idénticas, aun cuando los símbolos de cada una de ellas tengan significado diferente [Vergara, 1983].

Modelos físicos: Son representaciones de un elemento real en forma reducida, al que se le denomina prototipo en modelos hidráulicos. Se debe cumplir una semejanza geométrica, cinemática y dinámica de tal forma que pueda permitir que la observación, resultados y conclusiones del objeto de estudio, sean válidos [Marín, 2007].

5.1.3. Modelo hidráulico.

En la naturaleza muchos de los fenómenos que ocurren dentro del campo de la hidráulica, son complicados de analizar por medio de modelos matemáticos, debido a su complejidad, por lo que conviene recurrir a los modelos hidráulicos.

La modelación hidráulica corresponde a un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, que mediante su estudio en el modelo se obtiene cierta información que se procesa y se presenta en forma adecuada, con el fin de emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería civil [Vergara, 1983].

Los modelos hidráulicos guardan una semejanza física con el prototipo en el cual se reproduce el mismo fenómeno de estudio, pero a escala reducida. Se refieren a la representación fiel de los factores determinantes del fenómeno como son las fuerzas, características físicas, fronteras entre otros [Marín, 2007].

Cabe mencionar que en el presente estudio se realizó un modelo de este tipo.



Los modelos hidráulicos se pueden dividir en:

Modelos de fondo fijo: Son empleados para la reproducción de fenómenos en los cuales la variación de niveles y velocidades del flujo son parámetros determinantes.

Modelos de fondo móvil: Son empleados en el estudio de problemas relacionados con la estabilización de cauces de ríos o canales y playas por lo que es importante reproducir las variables del flujo combinadas con las del sedimento y de la mecánica del transporte.

Sin distorsión: Es cuando el modelo se presenta similarmente geométrico, es decir que la escala de magnitudes lineales horizontales, verticales e inclinadas sean iguales.

Con distorsión: Es cuando el modelo presenta distorsión geométrica, es decir cuando existen por lo menos dos escalas de líneas diferentes, por ejemplo cuando tiene una escala para sus longitudes horizontales y otra para longitudes verticales [Vergara, 1993].

5.2. Escalas.

Para la realización del modelo se debe seleccionar y establecer la escala de líneas conveniente para su representación, considerando que sea la más grande posible que así lo permitan las instalaciones y equipo, con la finalidad de que sean despreciables algunos efectos de escala como lo es la tensión superficial, ya que es imposible satisfacer todas las condiciones de similitud en el modelo.

La selección de la escala de líneas se efectúa dependiendo del tipo de fenómenos a estudiar, de las limitaciones existentes y de las instalaciones y equipo disponibles.

Las escalas recomendables para modelos de estabilidad de estructuras de protección costera son de 1:20 a 1:60 para modelos sin distorsión, de fondo fijo de dos dimensiones.



Para modelaciones de tres dimensiones en un tanque de olas, se recomienda una escala de 1:40 hasta 1:80 [Vergara, 1993].

En la tabla 5.1 se presentan las escalas lineales que se emplean en los diferentes modelos hidráulicos, tanto de fondo fijo como de fondo móvil.

Tabla 5.1. Diferentes tipos de escalas para distintos proyectos hidráulicos [Vergara, 1993].

MODELOS DE:	ESCALAS LINEALES	OBSERVACIONES
1. Obras hidráulicas		
1.1 Vertedores, tanques, amortiguadores rápidos y túneles.	1:20 a 1:70	Modelos sin distorsión y fondo fijo.
1.2 Cárcamos de bombeo y compuertas.	1:5 a 1:30	
1.3 Conductos cerrados con flujo a superficie libre.	1:10 a 1:25	
1.4 Flujo alrededor de estructuras.	1:5 a 1:25	
2. Penetración de oleaje (agitación).		
2.1 Con olas de corto periodo (oleaje).	1:60 a 1:200	Modelos sin distorsión y fondo fijo. Escala recomendada 1:100.
2.2 Con olas de corto periodo intermedio y largo	1:100	Modelos sin distorsión y fondo fijo.
	(escala recomendada 1:50 a 1:100)	Para modelos con distorsión, el valor usual de ésta de 3 a 5 de fondo fijo.
3. Estabilidad de estructuras bajo la acción de olas.		
3.1 A dos dimensiones	1:20 a 1:60	Modelos sin distorsión y fondo fijo.
3.2 A tres dimensiones	1:40 a 1:80	Escala recomendable 1:30. En grandes canales se han empleado escalas de hasta 1:1. Es recomendable usar oleaje irregular.
4. Maniobras de embarcaciones		
4.1 Atracadas y libres	1:100 a 1:150	Modelos sin distorsión y fondo fijo. Es recomendable usar oleaje irregular.

Para el presente estudio se tiene que las fuerzas que predominan en el fenómeno son las gravitacionales y de inercia, por lo tanto se utilizará la condición de similitud de Froude, la cual rige los fenómenos que involucran flujos de agua a superficie libre permitiendo que exista una relación entre las fuerzas de gravedad y de inercia en el modelo, con sus correspondientes en el prototipo.



Para nuestro modelo, son las dimensiones del canal de oleaje y los requerimientos del generador de oleaje los que intervienen directamente en la selección de la escala. En base a lo anterior y tomando en cuenta las características del oleaje, las dimensiones del canal y el tipo de fenómeno a modelar en el presente estudio se requerirá de un modelo de fondo fijo, sin distorsión (misma escala de líneas horizontal y vertical) proponiendo para esto una escala de líneas de 1:20, que en función de la ley de Froude y la escala propuesta se obtienen las siguientes relaciones (tabla 5.2):

Tabla 5.2. Tipos de escalas y sus diferentes valores

TIPO DE ESCALA	NOTACION	RELACION	ESCALA
Escala de líneas horizontales	E_{LH}	$E_{LH} = E_L$	1:20
Escala de líneas verticales	E_{LV}	$E_{LV} = E_L$	1:20
Escala de longitudes de ola	E_{LO}	$E_{LO} = E_L$	1:20
Escala de altura de ola	E_H	$E_H = E_L$	1:20
Escala de celeridades de ola	E_C	$E_C = E_L^{1/2}$	1:4.47
Escala de períodos de ola	E_T	$E_T = E_L^{1/2}$	1:4.47
Escala de pesos	E_W	$E_W = E_L^3$	1:8000
Escala de fuerzas	E_F	$E_F = E_L^3$	1:8000



5.3. Condiciones de similitud.

De acuerdo al prototipo, es necesario que el modelo satisfaga 3 condiciones de similitud para sean válidas las observaciones resultados y conclusiones:

Similitud Geométrica: Es la que debe presentar el modelo de acuerdo a la forma del prototipo en la que se definen puntos homólogos, en los que se precisan magnitudes de velocidad, presión entre otros, determinando del mismo modo los lados, superficies y volúmenes homólogos. La similitud geométrica implica una relación constante para cualquier longitud, es decir:

$$\frac{X_p}{X_m} = \frac{Y_p}{Y_m} = \text{constante}$$

Esto es que los cocientes entre magnitudes geométricas de los lados homólogos guarden una relación constante:

$$\frac{a_{1p}}{a_{1m}} = \frac{a_{2p}}{a_{2m}} = \frac{a_{3p}}{a_{3m}} = \text{constante}$$

Si esto se cumple entonces existe similitud geométrica.

Similitud Cinemática: Se refiere a la similitud en el movimiento de los sistemas entre el prototipo y el modelo; y se cumple cuando los patrones de flujos homólogos son iguales en cualquier tiempo. Para esto la relación de las velocidades entre estos puntos debe ser constante, a lo que se le denomina escala de velocidades.

Por lo tanto si:

$$\frac{v_{1p}}{v_{1m}} = \frac{v_{2p}}{v_{2m}} = \frac{v_{3p}}{v_{3m}} = \text{Constante}$$

Entonces habrá similitud cinemática.



Similitud Dinámica: En la similitud dinámica se considera la acción de las fuerzas sobre las partículas de un fluido, como lo es la fricción, gravedad, inercia, coriolis, tensión superficial entre otros. La relación de fuerzas homólogas también debe ser constante, estableciéndose de este modo la escala dinámica de fuerzas.

La condición de la similitud dinámica establece que: el cociente de dos fuerzas cualesquiera del prototipo debe ser igual al cociente de las dos fuerzas correspondientes al modelo, de tal forma que si:

$$\frac{F_{1p}}{F_{1m}} = \frac{F_{2p}}{F_{2m}} = \frac{F_{3p}}{F_{3m}} = \frac{F_p}{F_m} = \frac{P_p}{P_m} = Constante$$

Entonces si existe similitud dinámica.

De donde F1 hasta Fn se refieren a las fuerzas debidas a la gravedad, viscosidad, elasticidad, tensión superficial, Coriolis etcétera.

La condición de similitud dinámica se expresa como la igualdad entre dos números adimensionales en donde uno es del prototipo y el otro del modelo. [Vergara, 1993].

5.4. Instalación.

Las instalaciones son parte fundamental en la modelación física ya que es el lugar donde se elaborará y se experimentará con el modelo, por lo que deben ser adecuadas y convenientes.

Para el caso de nuestro estudio la instalación con la que se cuenta están en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

En dicho laboratorio se ocupará el canal de oleaje irregular que tiene 24.5 metros de largo por 0.66 metros de ancho y 0.90 metros de alto (fig. 5.1), en donde se simulará la incidencia de las olas a la estructura.

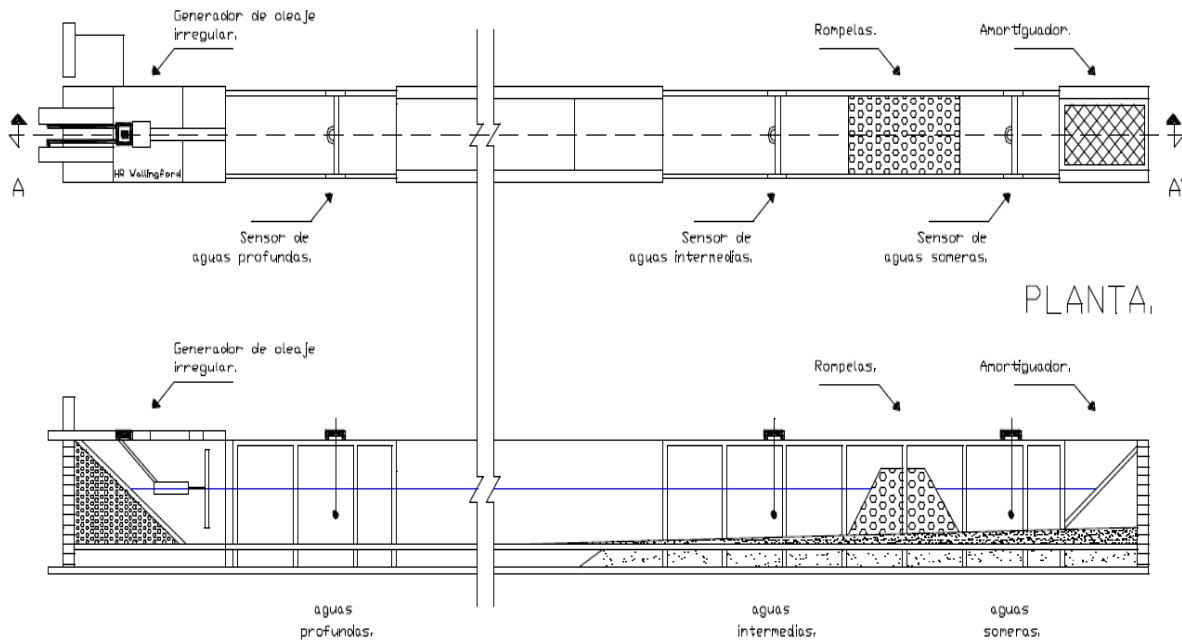


Fig. 5.1. Plano en corte y planta del generador de oleaje [Ramírez, 2009].

5.5. Equipo.

Para reproducir olas como las de la naturaleza (oleaje irregular), el canal cuenta con un generador de oleaje irregular y regular (fig. 5.3), el cual es gobernado por un software a través de un equipo de cómputo (fig. 5.4), que envía señales de oleaje al generador, que por medio de su sistema hidráulico acciona una paleta que mueve el agua depositada dentro del canal (fig. 5.2).



Fig. 5.2. Canal de oleaje.



Fig. 5.3. Vista de la paleta y el generador de oleaje.

Para esto el software que se utiliza es el denominado “Wavegen”, el cual permite la simulación de las condiciones del mar de la naturaleza, dependiendo del tipo de oleaje que se necesite para el estudio.

El software WAVEGEN se utiliza junto con el equipo de cómputo, para generar las señales para simular las condiciones de oleaje por el generador, de acuerdo a los requerimientos del estudio. El oleaje irregular se puede generar de dos formas: el ruido blanco filtrado digitalmente de registro simple o múltiple (Filtered White Noise Generator), y el método de la transformada rápida de Fourier (Fourier Method Wave Generator); también se puede generar oleaje regular (Regular Wave Generator) y la onda solitaria (Solitary Wave) [Beresford,1994].



Fig. 5.4. Equipo de cómputo de control.



Las señales de oleaje irregular se crean a través del mismo programa de cómputo, guardando los archivos con los datos de oleaje que se pretenden simular.

El equipo cuenta con las siguientes opciones:

1. Generación de estados de mar de ruido blanco filtrado de registro simple (FilteredWhite Noise Sea State).
2. Generación de estados de mar de ruido blanco filtrado de registro múltiple (Filtered White Noise Sea State).
3. Generación de estados de mar Fourier (Fourier Sea State).

Con cualquiera de las opciones mencionadas anteriormente se pueden utilizar los siguientes espectros de oleaje:

1. Espectro de JONSWAP.
2. Espectro de Pierson-Moskowitz.
3. Espectro del Congreso Internacional de Estructuras de Barco (ISSC).
4. Espectro del Congreso Internacional de Remolque de Buques de Tanque (ITTC).
5. Espectro de ola BTTP.
6. Espectro de ola Costera Darbyshire.
7. Espectro de ola Oceánica Darbyshire.
8. Espectro de ola de Neumman [**Beresford, 1994**].

De los cuales el que se utiliza para los ensayos, es el espectro de Pierson-Moscowitz, debido a que es el que más se asemeja a las condiciones del mar de las costas mexicanas [**Ruiz, 2011**].

Para la medición de las alturas y períodos del oleaje en cualquier sección a lo largo del canal se requiere de sensores de oleaje de tipo resistivo (fig. 5.5), los cuales transmiten señales analógicas hacia un ológrafo (fig. 5.6) que se encarga de amplificarlas y que a su vez transmite a una tarjeta o convertidor de señales de



tipo analógico/digital dentro del equipo de cómputo, pasando al programa de cómputo HR Waves para su proceso, para finalmente enviar los resultados a impresión.



Fig. 5.5. Colocación de los sensores



Fig. 5.6. Ológrafo y controlador

Los equipos de cómputos digitales y analógicos se encuentran resguardados en una caseta de control (fig. 5.7), desde donde se operan los equipos de cómputo sensores y generador.



Fig. 5.7. Caseta de control.

5.6. El modelo.

Las actividades realizadas para la construcción del modelo son las que se describen a continuación.

5.6.1. Preliminares.

Se procedió a realizar la demolición de la estructura del estudio anterior construida dentro del canal del oleaje. Posteriormente se realizó el mantenimiento respectivo al amortiguador del canal de oleaje irregular procediendo a lijarlo, limpiarlo con diesel y a pintarlo con esmalte acrílico (fig. 5.8).



Fig.5.8. Mantenimiento del amortiguador de oleaje.

Con la finalidad de tener una profundidad referida al Nivel de Bajamar Media Inferior de 3 metros al pie de la estructura (fig. 5.11), se realizó el trazo del perfil de playa (fig. 5.9), para construir el firme donde se desplantará la estructura a probar, de tal forma que se reproduzca el fondo marino en una longitud de 6.00 metros, con pendiente 1:20 que se une, a un tramo de transición de 9.00 metros con una pendiente de 1:100 (fig.5.10).

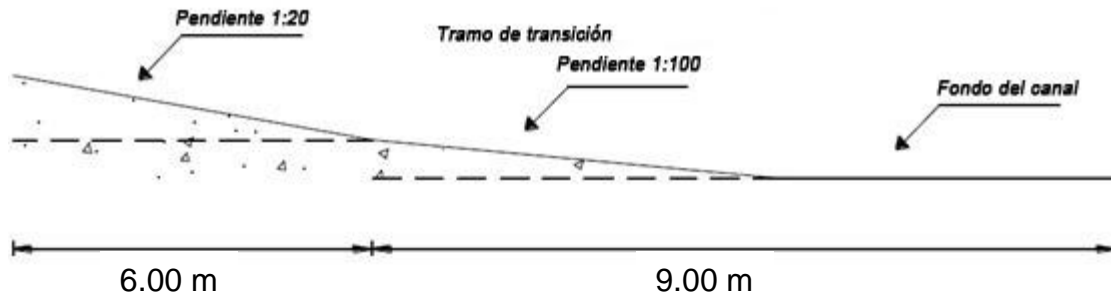


Fig. 5.9. Configuración del perfil de playa en el canal de oleaje irregular

Se construyó el firme colocando para ello, una pared de retención por medio de 2 bovedillas cortadas al mismo nivel de la línea trazada del perfil. Posteriormente se rellenó con granzón y se apisonó respetando el trazo de la pendiente y cuidando dejar una franja de 1.5 cm de espesor, para el colado de un firme de mortero cemento - arena del perfil playero (fig. 5.10).



Fig. 5.10. Trazo de la línea de apoyo con nivel láser, relleno, compactación y nivelación.



En forma intercalada por tramos, se procedió a colar el firme con mortero cemento- arena en proporción 1:3, al que fue necesario pulir y pintar, con el fin de disminuir la rugosidad que a escala, pudiera alojar algún fenómeno parásito en el modelo, y por consiguiente alterar las mediciones (Fig. 5.11).



Fig.5.11. Colado y tratamiento del firme.

Se diseñó la estructura a ensayar de acuerdo a lo siguiente:

- Paralela al fondo del canal del oleaje.
- Sumergida con 2 variaciones: de 0.5 m y de 1 m (prototipo).
- Taludes 2:1.
- 2 capas: Núcleo y coraza.
- 4 variantes de la estructura:
17 metros de ancho de coronamiento, de 34 metros de ancho coronamiento, 50 metros de coronamiento y 2 rompeolas de 17 metros de ancho coronamiento con un espaciamiento de 7 metros (prototipo).

El peso de los elementos en prototipo, se determinó con la fórmula de Hudson modificada:

$$W_B = \frac{1}{10} W \frac{H_d}{d} \quad (5.1)$$



donde:

W_B = Peso de la coraza en toneladas.

H_d = Altura de ola de diseño en metros (3.47).

d = sumergencia (0.50 m y sobreelevación por tormenta de 1.00 m)

W = Peso de la coraza en toneladas calculado con la fórmula de Hudson:

$$W = \frac{\gamma_s H_d^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (5.2)$$

donde:

γ_s = Peso específico de la roca, en ton/m³ (2.57)

H_d = Altura de ola de diseño, en metros (3.47).

K_d = Coeficiente de estabilidad de acuerdo al tipo de elemento, adimensional (3.5 para enrocamiento, con oleaje rompiente).

S_r = Densidad relativa de la roca, adimensional (2.57).

α = Angulo formado por el talud de la estructura con la horizontal, en grados (2:1).

En base a la escala de líneas, se obtienen los pesos de los elementos correspondientes al modelo que se presentan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Pesos de los elementos.

PESOS DE ROCA	
PROTOTIPO(kg)	MODELO (gr)
Núcleo: 320 - 640	40 - 80
Coraza: 1400 - 2320	175 - 290



5.6.2. Construcción del Modelo.

Con la finalidad de tener una guía para la correcta construcción del modelo, se elaboró un escantillón con la geometría de la estructura (modelo), que se colocó dentro del canal en la posición requerida, procediendo con el trazo de la sección sobre el acrílico en ambos lados del canal (fig. 5.12).



Fig.5.12. Implementación del escantillón para la correcta construcción de la estructura.

A continuación se colocó el núcleo y la coraza de la estructura (fig. 5.13).



Fig. 5.13. Construcción de la estructura.

5.6.3. Calibración del modelo.

En el canal de oleaje con el nivel requerido de agua, se colocaron 2 sensores de oleaje de tipo resistivo, que están conectados a un ológrafo. El sensor correspondiente a *aguas someras* colocado en la parte posterior de la estructura medirá la altura y período de la ola transmitida. El sensor correspondiente a *aguas intermedias* colocado en la parte anterior de la estructura medirá la altura y período de ola incidente (fig. 5.14).



Fig. 5.14. Calibración de los sensores en aguas someras y aguas intermedias

Posteriormente se procedió a realizar la respectiva calibración con 2 diferentes sumergencias: de 0.50 m y de 1.00 m respectivamente. Para ello se corre el programa "HR Waves 2.1" y se selecciona la subrutina "CAL", procediendo a seleccionar los canales que se utilizaran para el intercambio de datos. (Canales: 1, 2,8 y 9).

En el cuerpo de cada uno de los sensores se encuentran unos orificios con los que se ajusta la altura requerida para las pruebas los cuales se encuentran a una distancia de 2 cm en modelo (40 cm en prototipo). Para nuestro caso ajustamos a 2 orificios el sensor de aguas intermedias, y a 1 orificio el sensor de aguas reducidas. Esta posición se registra como el nivel cero de referencia. A continuación se bajan los sensores un orificio y se registra la distancia de + 2 cm.



Esto simula el paso de la cresta de la onda por el sensor. Posteriormente se suben un orificio regresando al cero de referencia. Luego se suben los sensores otro orificio, y se registra -2 cm simulando el valle. Y para finalizar se bajan los sensores un orificio quedando posicionados nuevamente en el cero inicial de referencia. De esta forma se obtienen las rectas de calibración con coeficientes de correlación muy cercanos a la unidad.

Este proceso de calibración se repite para la sumergencia de 1.00 m.

Los registros se almacenan en 2 archivos de calibración nombrados de la siguiente forma (serie 1):

Para 0.50 m de sumergencia: **11ABR12**

Para 1.00 m de sumergencia: **10ABR12**

Para reproducir las condiciones del mar que se asemejan a las requeridas utilizamos el programa Wavegen el cual puede reproducir las condiciones de oleaje por dos métodos:

- Generación de oleaje por ruido blanco filtrado digitalmente.
- Generación de oleaje por transformada rápida de Fourier.

Para este caso, generamos el oleaje seleccionando el método de la transformada rápida de Fourier, y escogiendo uno de los siguientes espectros de energía contenidos en el paquete:

- **Espectro de Jonswap.**
- **Espectro de Pierson-Moscowitz.**
- **Espectro ISSC.**
- **Espectro ITTC.**
- **Espectro BTTP.**
- **Espectro de Darbyshire**
- **Espectro de Neumann.**



Los cuales se describen en el capítulo 3 sección 3.2.7. “Modelos espectrales de estado de mar.” Por lo tanto escogemos del menú el espectro de Pierson – Moskowitz que es de fetch largo y que se asemeja mejor a las características de mar en la zona de estudio. Indicamos la escala 1:20, seleccionada para el modelo (sección 5.2. “Escalas”) e introducimos las señales que se utilizarán en los ensayos según tabla 5.4.

Tabla 5.4. Señales de oleaje a reproducir en el modelo.

	Señal	Sumergencia	Período T (seg)	Altura H (mts)
1	PREEF01	0.5 m	6 seg	1.42 m
2	PREEF02	0.5 m	7 seg	1.94 m
3	PREEF03	0.5 m	8 seg	2.54 m
4	PREEF04	0.5 m	9 seg	3.22 m
5	PREEF05	0.5 m	10 seg	3.97 m
6	PREEF11	1.0 m	6 seg	1.42 m
7	PREEF12	1.0 m	7 seg	1.94 m
8	PREEF13	1.0 m	8 seg	2.54 m
9	PREEF14	1.0 m	9 seg	3.22 m
10	PREEF15	1.0 m	10 seg	3.97 m

Posteriormente se probaron estas señales con el generador de oleaje irregular, reproduciendo el fenómeno, con el objeto de verificar si existiera alguna situación no prevista en el funcionamiento, y para tener la confiabilidad requerida en las mediciones. Adicionalmente se colocó tezontle en la cavidad del amortiguador para disminuir la reflexión que se genera al final del canal.

5.7. Ensayos.

5.7.1. Programa de ensayos.

Con el fin de tener un orden en la ejecución de los ensayos se elaboró un programa que se muestra en la tabla 5.5.



Tabla 5.5. Programa de ensayos

Serie	Ensayo	Coronamiento (m)	Sumergencia (m)	Señal	Período(seg)	Altura(m)
1	1	Calibración	0.5	Calibración	Calibración	Calibración
1	2	Calibración	1	Calibración	Calibración	Calibración
2	1	17	0.5	PREEF01	6	1.42
2	2	17	0.5	PREEF02	7	1.94
2	3	17	0.5	PREEF03	8	2.54
2	4	17	0.5	PREEF 04	9	3.22
2	5	17	0.5	PREEF05	10	3.97
3	1	17	1	PREEF11	6	1.42
3	2	17	1	PREEF12	7	1.94
3	3	17	1	PREEF13	8	2.54
3	4	17	1	PREEF14	9	3.22
3	5	17	1	PREEF15	10	3.97
4	1	34	0.5	PREEF01	6	1.42
4	2	34	0.5	PREEF02	7	1.94
4	3	34	0.5	PREEF03	8	2.54
4	4	34	0.5	PREEF 04	9	3.22
4	5	34	0.5	PREEF05	10	3.97
5	1	34	1	PREEF11	6	1.42
5	2	34	1	PREEF12	7	1.94
5	3	34	1	PREEF13	8	2.54
5	4	34	1	PREEF14	9	3.22
5	5	34	1	PREEF15	10	3.97
6	1	50	0.5	PREEF01	6	1.42
6	2	50	0.5	PREEF02	7	1.94
6	3	50	0.5	PREEF03	8	2.54
6	4	50	0.5	PREEF 04	9	3.22
6	5	50	0.5	PREEF05	10	3.97
7	1	50	1	PREEF11	6	1.42
7	2	50	1	PREEF12	7	1.94
7	3	50	1	PREEF13	8	2.54
7	4	50	1	PREEF14	9	3.22
7	5	50	1	PREEF15	10	3.97
8	1	2E X 17 m	0.5	PREEF01	6	1.42
8	2	2E X 17 m	0.5	PREEF02	7	1.94
8	3	2E X 17 m	0.5	PREEF03	8	2.54
8	4	2E X 17 m	0.5	PREEF 04	9	3.22
8	5	2E X 17 m	0.5	PREEF05	10	3.97
9	1	2E X 17 m	1	PREEF11	6	1.42
9	2	2E X 17 m	1	PREEF12	7	1.94
9	3	2E X 17 m	1	PREEF13	8	2.54
9	4	2E X 17 m	1	PREEF14	9	3.22
9	5	2E X 17 m	1	PREEF15	10	3.97



5.7.2. Condiciones de los ensayos y procedimiento experimental.

Se establecieron las condiciones para la ejecución de los ensayos, mismas que se utilizarán en todo el proceso.

- I. En todos los ensayos invariablemente se utiliza oleaje irregular.
- II. Para generar el oleaje se hace uso del espectro de Pierson-Moskowitz en todas las pruebas.
- III. En cada uno de los ensayos se reproducen 300 olas. (**Jensen, 1996**).
- IV. Cada estructura se prueba bajo una sumergencia 0.50 m y una sobreelevación por tormenta de 1.00 m.
- V. Cada estructura es sometida a la incidencia de 3000 olas.
- VI. En todos los ensayos se mide el oleaje en Aguas Intermedias (Antes de la estructura), y en Aguas Bajas (después de la estructura).
- VII. En todos los ensayos se mide el coeficiente de reflexión.
- VIII. El coronamiento de las estructuras a probar es paralelo a la pendiente de fondo.

El procedimiento experimental se realizó de la siguiente manera:

- I. Se colocan 2 sensores de oleaje, uno antes del rompeolas y otro después del rompeolas con el objeto de medir la altura de ola incidente y la transmitida.
- II. En cada una de las pruebas se genera oleaje irregular durante el tiempo suficiente para reproducir 300 olas.
- III. En base a los datos de oleaje medidos y transmitidos por los sensores al equipo, se calculan las alturas y períodos de ola significativa para cada ensayo.
- IV. Se calcula el coeficiente de transmisión.



5.7.3 Observaciones de los ensayos.

Se determinó que los ensayos se realizarán en estructuras con el siguiente coronamiento:

- 1 estructura con 17 metros de coronamiento.
- 1 estructura con 34 metros de coronamiento
- 1 estructura con 50 metros de coronamiento
- 2 estructuras de 17 metros de coronamiento espaciadas 7.00 metros.

Todas serán probadas bajo una sumergencia de 0.50 m y de 1.00 m.

Las observaciones de cada uno de los ensayos se describen a continuación.

Estructura de 17 metros de ancho de coronamiento con sumergencia de 0.50 m, serie 2.

Ensayo 1, $d_s = 0.50$ m, $T = 6$ seg, $H = 1.42$ m.

Las olas empiezan a disiparse en el talud posterior de la estructura. Se nota una disminución en la energía de la ola a pesar de que ésta, continúa parcialmente su camino.

Ensayo 2, $d_s = 0.50$, $T = 7$ seg, $H = 1.94$ m.

Se empieza a presentar una rompiente parcial la cual inicia a partir de la parte media del coronamiento de la estructura hacia el talud posterior continuando su camino para romper nuevamente.

Ensayo 3, $d_s = 0.50$ m, $T = 8$ seg, $H = 2.54$ m.

Se presenta una rompiente total a partir de la parte media del coronamiento de la estructura, en aproximadamente una cuarta parte de las olas que inciden. Se observa una rompiente parcial en el talud posterior de la estructura, en un promedio de tres cuartas partes de las olas que inciden.

Ensayo 4, $d_s = 0.50$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.



La rompiente de la ola se ha recorrido hacia el talud anterior, con un ancho de barrido que va desde la mitad del coronamiento hacia el talud posterior. La ola rompe por completo (plunging) (fig. 5.15).

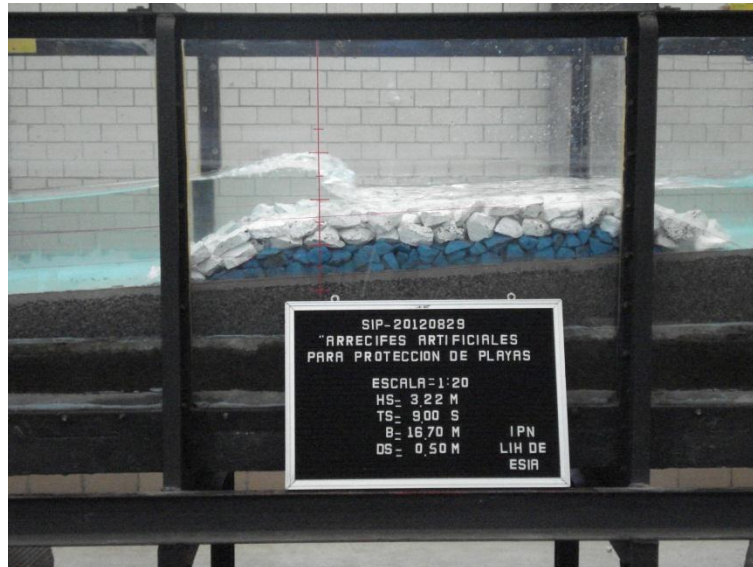


Fig.5.15. Rompiente total sobre el talud, ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 0.50 m.

Ensayo 5, $ds = 0.50$ m, $T = 10$ seg, $H = 3.97$ m.

La rompiente de la ola se recorrió aún más al hacia el talud anterior rompiendo desde allí y barriendo en todo el coronamiento de la estructura. La rompiente se presenta totalmente y encima de la mitad del coronamiento de la estructura. Se observa el movimiento de algunas rocas debido a la energía transmitida (fig. 5.16).



Fig. 5.16. Rompiente total sobre la mitad del ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 0.50 m.

En esta serie se pudo observar que mientras más alta sea la altura de la ola, su rompiente se va recorriendo del talud posterior de la estructura, hacia su talud anterior. Esto se debe posiblemente a que la estructura es paralela al fondo. En estudios anteriores con una estructura paralela al nivel de agua, la rompiente ocurre en un solo lugar independientemente de la altura de la ola, y ocurre en el talud anterior.

Estructura de 17 metros de ancho de coronamiento con sumergencia de 1.00 m, serie 3.

Ensayo 1, $ds = 1.00$, $T = 6$ seg, $H = 1.42$ m.

Generación de olas con sobreelevación por tormenta. La ola pasa por la estructura, sin embargo no se aprecia visiblemente una disminución en su energía.

Ensayo 2, $ds = 1.00$ m, $T = 7$ seg, $H = 1.94$ m.

Altura de ola mayor pero con observaciones similares al ensayo anterior.



Ensayo 3, $d_s = 1.00$ m, $T = 8$ seg, $H = 2.54$ m.

Se presenta una rompiente parcial a partir del talud anterior, rompiendo totalmente en el talud posterior. La zona de barrido ocupa el ancho de corona de la estructura.

Ensayo 4, $d_s = 1.00$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.

Se presenta una rompiente total a partir de la mitad de la estructura y hacia el talud posterior. Algunas olas rompen totalmente en el talud posterior de la estructura (fig. 5.17).



Fig. 5.17. Rompiente total sobre la parte media del ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 1.00 m.

Ensayo 5, $d_s = 1.00$ m, $T = 10$ seg, $H = 4.97$ m.

La ola rompe parcialmente con mucha energía a partir del talud posterior, siguiendo su camino para volver a romper en el amortiguador (doble rompiente). Se observa una disminución de la altura de ola aproximadamente de la mitad (fig. 5.18).



Fig. 5.18. Reducción considerable de la altura de ola sobre un ancho de coronamiento de 17 m, sumergencia 1.00 m.

Estructura de 34 metros de ancho de coronamiento con sumergencia de 0.50 m, serie 4.

Ensayo 1, $ds= 0.50$ m, $T= 6$ seg, $H= 1.42$ m.

Se puede observar que la ola detecta el coronamiento de la estructura y comienza a formarse una rompiente parcial, intentando romper totalmente en el talud posterior.

Ensayo 2, $ds= 0.50$ m, $T= 7$ seg, $H= 1.94$ m.

La rompiente se empieza a formar en el talud anterior logrando una rompiente total en el talud posterior.

Ensayo 3, $ds= 0.50$ m, $T= 8$ seg, $H= 2.54$ m.

La ola rompe totalmente a partir de la mitad de la estructura mientras más alta sea la ola rompe más lejos del talud posterior.



Ensayo 4, $d_s = 0.50$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.

La ola siente el coronamiento del arrecife, rompiendo a partir del primer tercio de la estructura (zona azul); la rompiente es total y se sigue recorriendo mientras más alta sea la ola (fig. 5.19).



Fig. 5.19. Rompiente total sobre un ancho de coronamiento de 34 m, sumergencia 0.50 m.

Ensayo 5, $d_s = 0.50$ m, $T = 10$ seg, $H = 3.97$ m.

Aquí la rompiente total se recorrió aún más presentando una gran fuerza y abarcando una franja de barrido equivalente al segundo tercio de la estructura (entre las franjas de color azul y blanco) (fig. 5.20).

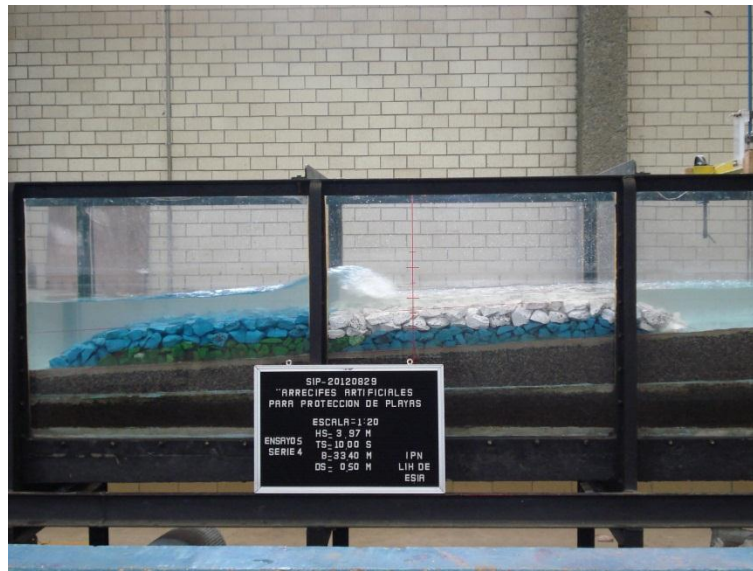


Fig. 5.20. Rompiente total a la mitad del arrecife con ancho de coronamiento de 34 m, sumergencia 0.50 m.

Estructura de 34 metros con sumergencia de 1.00 metro, serie 5.

Ensayo 1, $ds = 1.00$ m, $T = 6$ seg, $H = 1.42$ m.

Se recorta la longitud de onda, no obstante la ola no rompe.

Ensayo 2, $ds = 1.00$ m, $T = 7$ seg, $H = 1.94$ m.

A diferencia de la sumergencia de 0.50 m la ola aquí no rompe. Se observa un recorte de la longitud de onda. La ola no rompe supuestamente porque la sumergencia es mayor debido a la sobreelevación.

Ensayo 3, $ds = 1.00$ m, $T = 8$ seg, $H = 2.54$ m.

Se empieza a observar una rompiente parcial en las olas pequeñas, y una rompiente total en las olas más altas, rompiendo en el talud posterior. Se observa una reducción en la longitud de onda.

Ensayo 4, $ds = 1.00$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.

Se presenta una rompiente total. Se ha recorrido la rompiente hacia la mitad de la estructura (fig. 5.21).



Fig. 5.21. Ancho de coronamiento de 34 m. sumergencia 1.00 m.

Ensayo 5, $ds = 1.00$ m, $T = 10$ seg, $H = 3.97$ m.

Se presenta una rompiente total de gran energía con mayor desplazamiento (fig. 5.22).



Fig. 5.22. Disminución de la energía de la ola sobre un ancho de coronamiento de 34 m, sumergencia 1.00 m.



Cabe mencionar que en las primeras 3 señales la estructura no disminuyó considerablemente la altura de ola. En las últimas 2 señales disminuyó aproximadamente en un cuarto la altura de ola.

Estructura de 50 metros de ancho de coronamiento con sumergencia de 0.50 metros, serie 6.

Ensayo 1, $d_s = 0.50$ m, $T = 6$ seg, $H = 1.42$ m.

Se recorta considerablemente la longitud de onda, no se presenta rompiente.

Ensayo 2, $d_s = 0.50$ m, $T = 7$ seg, $H = 1.94$ m.

A pesar de tener una altura de ola mayor, todavía no se presenta rompiente. Se observa una disipación considerable de la energía de las olas sobre el coronamiento de la estructura.

Ensayo 3, $d_s = 0.50$ m, $T = 8$ seg, $H = 2.54$ m.

Además de lo observado en los ensayos anteriores, se hace notable la presencia de una rompiente parcial en el talud anterior, al principio de la estructura.

Ensayo 4, $d_s = 0.50$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.

Se empieza a presentar una rompiente total pasando el talud anterior, se observa una disminución considerable en la altura de ola (fig. 5.23).



Fig. 5.23. Ancho de coronamiento de 50 m. sumergencia 0.50 m.

Ensayo 5, $d_s = 0.50$ m, $T = 10$ seg, $H = 3.97$ m.

La rompiente se recorre hacia el centro del coronamiento de la estructura y además se puede observar que las olas rompen parcialmente, desde la mitad del rompeolas hacia el talud posterior. Rompen totalmente en menor frecuencia que las rompientes parciales, sobre el talud posterior (fig. 5.24).



Fig. 5.24. Rompiente parcial sobre un ancho de coronamiento de 50 m, sumergencia 0.50 m.



A través de los 5 ensayos se pudo observar, que el período de la ola disminuye considerablemente a causa de la fricción con la estructura. Mientras más altas son las olas, la rompiente se recorre hacia el centro de la estructura.

Se observó que las olas no rompen con una gran energía ya que la fricción con la estructura incide preponderadamente.

Estructura de 50 metros de ancho de coronamiento con sumergencia de 1.00 metros, serie 7.

Ensayo 1, $d_s = 1.00$, $T = 6$ seg, $H = 1.42$ m.

Se observa un recorte significativo de la longitud de onda.

Ensayo 2, $d_s = 1.00$ m, $T = 7$ seg, $H = 1.94$ m.

Aquí además de lo observado en el ensayo anterior, se notó que la ola se frena debido a la fricción que tiene con la estructura.

Ensayo 3, $d_s = 1.00$ m, $T = 8$ seg, $H = 2.54$ m.

Las olas comienzan a romper parcialmente en el talud posterior de la estructura.

Ensayo 4, $d_s = 1.00$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.

Se ha recorrido la rompiente aún más. Se presenta una rompiente total en menos frecuencia que la rompiente parcial (fig. 5.25).



Fig. 5.25. Fricción entre la ola y el arrecife de 50 m de ancho de coronamiento. sumergencia 1.00 m.

Ensayo 5, $d_s = 1.00$ m, $T = 10$ seg, $H = 3.97$ m.

Aquí la rompiente total se ha recorrido a la parte posterior de la estructura. En medio de la estructura la rompiente que se presenta es parcial (fig. 5.26).



Fig. 5.26. Inicio de la formación de una rompiente total sobre un ancho de coronamiento de 50 m, sumergencia 1.00 m.



Estructuras de 17 metros de ancho de coronamiento (2) espaciadas 6.8 metros con sumergencia de 0.50 metros, serie 8.

Ensayo 1, $d_s = 0.50$ m, $T = 6$ seg, $H = 1.42$ m.

No se presenta rompiente ni se observa un recorte importante del período.

Ensayo 2, $d_s = 0.50$ m, $T = 7$ seg, $H = 1.94$ m.

Se observa una rompiente parcial sobre la primera estructura hacia el espaciamiento.

Ensayo 3, $d_s = 0.50$ m, $T = 8$ seg, $H = 2.54$ m.

La rompiente parcial se recorre rompiendo sobre el espaciamiento entre las dos estructuras.

Ensayo 4, $d_s = 0.50$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.

Al pasar la ola por el espaciamiento hacia la segunda estructura, se forma un fenómeno en forma de látigo, presentándose una rompiente total sobre la segunda estructura (fig. 5.27).



Fig. 5.27. Fenómeno que se forma entre el espaciamiento y la segunda estructura.



Ensayo 5, $d_s = 0.50$ m, $T = 10$ seg, $H = 3.97$ m.

Algunas olas rompen totalmente sobre el espaciamiento y sobre el talud posterior de la segunda estructura y las olas más altas rompen totalmente, afuera de la segunda estructura (fig. 5.28).



Fig. 5.28. Rompiente total sobre el espaciamiento de las estructuras.

Durante los ensayos se pudo observar que mientras más alta sea la ola, más se ve disminuida su energía. La celeridad de la ola tiende a disminuir cuando atraviesa la primera estructura, y cuando atraviesa el espaciamiento se acelera y súbitamente, se encuentra con la segunda estructura disminuyendo la celeridad de la cresta, y es por eso que las que tienen mayor energía rompen después del talud posterior de la segunda estructura, y las demás rompen encima de la estructura pero parcialmente.



Estructuras de 17 metros de ancho de coronamiento (2) espaciadas 7.00 metros con sumergencia de 1.00 metros, serie 9.

Ensayo 1, $d_s = 1.00$, $T = 6$ seg, $H = 1.42$ m.

Se observa un recorte de la longitud de onda, no se presenta rompiente alguna.

Ensayo 2, $d_s = 1.00$ m, $T = 7$ seg, $H = 1.94$ m.

Se presenta una rompiente parcial sobre la primera estructura.

Ensayo 3, $d_s = 1.00$ m, $T = 8$ seg, $H = 2.54$ m.

Se presenta un recorte de la longitud de onda aún más notable, se observa una rompiente total sobre el espaciamiento entre las 2 estructuras.

Ensayo 4, $d_s = 1.00$ m, $T = 9$ seg, $H = 3.22$ m.

La ola se comporta en una especie de látigo al pasar por el espaciamiento rompiendo totalmente sobre la segunda estructura (fig. 5.29).



Fig. 5.29. Estructuras (2) de 17 m de ancho de coronamiento, con 7 m de separación, sumergencia 1.00 m.



Ensayo 5, $d_s = 1.00$ m, $T = 10$ seg, $H = 3.97$ m.

Se observa la presencia de dobles rompientes, una entre la zona de espaciamiento de las 2 estructuras, y la otra adelante del talud posterior de la segunda estructura. Se presenta una rompiente total delante de la segunda estructura (fig. 5.30).



Fig. 5.30. Estructuras (2) de 17 m de ancho de coronamiento, sumergencia 1.00 m

Lo más relevante durante los 5 ensayos de esta serie, es que la ola llega a romper fuera de las estructuras disminuyendo así el daño en la estructura.



CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.

6.1. Análisis y procesamiento de resultados.

Habiendo concluido los ensayos realizados en el canal de oleaje irregular, se obtuvieron los resultados de las mediciones efectuadas, entre los que destacan las alturas de ola significativa incidente (H_i) y transmitida (H_t), el período de ola incidente (T_i) y transmitida (T_t), procediendo a realizar una serie de hojas de cálculo de Excel, relacionando los parámetros correspondientes con el objetivo de obtener los coeficientes de transmisión (tabla 6.1).

Posteriormente los coeficientes de transmisión medidos, se validaron (tabla 6.2) comparándolos con criterios de otros investigadores localizados en el estado del arte, que tienen condiciones similares a las del presente estudio, mismos que son:

- ✓ Goda et al (1969).
- ✓ Van der Meer (1991).
- ✓ D'Angremond, Van Der Meer y de Jong (1996).
- ✓ Van der Meer et al (2000).
- ✓ Van der Meer et al (2005).

Los cuales se describen en el capítulo 4 "Transmisión del oleaje".



Capítulo 6. Análisis y procesamiento de resultados.

Tabla 6.1. Datos medidos y calculados de acuerdo a los ensayos.

Serie	Ensayo	Nombre	Periodo (seg)	Altura (m)	Sumergencia (m)	Ancho de corona (m)	Observaciones	Altura de ola incidente (m)	Altura de ola transmitida (m)	K_t	% de reducción	Periodo de ola incidente (seg)	Periodo de ola transmitida (seg)	% de reducción
2	1	PREEF 01	6.00	1.42	0.50	17.00	Estructura 1. B= 17 m DS = 0.50 m.	0.6892	0.2581	0.37	63%	4.8746	3.6408	25%
	2	PREEF 02	7.00	1.94				0.8601	0.3357	0.39	61%	5.5410	3.6533	34%
	3	PREEF 03	8.00	2.54				0.9913	0.4488	0.45	55%	6.2923	4.6779	26%
	4	PREEF 04	9.00	3.22				1.2100	0.6287	0.52	48%	7.2136	5.5589	23%
	5	PREEF 05	10.00	3.97				1.5350	0.7894	0.51	49%	8.1303	7.1688	12%
3	1	PREEF 11	6.00	1.42	1.00	17.00	Estructura 1. B= 17 m DS = 1.00 m.	0.6655	0.2790	0.42	58%	4.9730	4.5884	8%
	2	PREEF 12	7.00	1.94				0.8309	0.3830	0.46	54%	5.6662	4.8075	15%
	3	PREEF 13	8.00	2.54				1.0940	0.5546	0.51	49%	6.4354	4.7539	26%
	4	PREEF 14	9.00	3.22				1.2750	0.6888	0.54	46%	7.3924	5.9703	19%
	5	PREEF 15	10.00	3.97				1.4950	0.8782	0.59	41%	7.9202	6.6411	16%
4	1	PREEF 01	6.00	1.42	0.50	34.00	Estructura 2 B= 33.5 m DS = 0.50 m.	0.4877	0.3169	0.65	35%	4.8657	4.0925	16%
	2	PREEF 02	7.00	1.94				0.6389	0.4164	0.65	35%	5.6036	4.2257	25%
	3	PREEF 03	8.00	2.54				0.8192	0.4652	0.57	43%	6.1447	4.5482	26%
	4	PREEF 04	9.00	3.22				1.1430	0.5558	0.49	51%	7.2538	5.4336	25%
	5	PREEF 05	10.00	3.97				1.4620	0.6416	0.44	56%	8.0811	6.6858	17%
5	1	PREEF 11	6.00	1.42	1.00	34.00	Estructura 2 B= 33.5 m DS = 1.00 m.	0.4156	0.3827	0.92	8%	5.1877	5.1072	2%
	2	PREEF 12	7.00	1.94				0.5618	0.5071	0.90	10%	5.4873	5.0580	8%
	3	PREEF 13	8.00	2.54				0.7978	0.6370	0.80	20%	6.3817	5.1072	20%
	4	PREEF 14	9.00	3.22				0.9685	0.7278	0.75	25%	7.2270	5.6394	22%
	5	PREEF 15	10.00	3.97				1.2800	0.8441	0.66	34%	7.8441	6.3728	19%
6	1	PREEF 01	6.00	1.42	0.50	50.00	Estructura 3 B= 50.0 m DS = 0.50 m.	0.4893	0.2989	0.61	39%	4.8791	4.2373	13%
	2	PREEF 02	7.00	1.94				0.6312	0.3942	0.62	38%	5.5946	4.3219	23%
	3	PREEF 03	8.00	2.54				0.8139	0.4658	0.57	43%	6.1760	4.5616	26%
	4	PREEF 04	9.00	3.22				1.1430	0.5577	0.49	51%	7.1152	5.2369	26%
	5	PREEF 05	10.00	3.97				1.4160	0.6250	0.44	56%	7.9515	5.9614	25%
7	1	PREEF 11	6.00	1.42	1.00	50.00	Estructura 3 B= 50.0 m DS = 1.00 m.	0.4214	0.3735	0.89	11%	4.9820	4.9462	1%
	2	PREEF 12	7.00	1.94				0.5614	0.4925	0.88	12%	5.5276	5.1251	7%
	3	PREEF 13	8.00	2.54				0.8084	0.6492	0.80	20%	6.3638	5.2726	17%
	4	PREEF 14	9.00	3.22				0.9807	0.7727	0.79	21%	7.3477	5.7243	22%
	5	PREEF 15	10.00	3.97				1.2820	0.8507	0.66	34%	7.6518	6.2118	19%
8	1	PREEF 01	6.00	1.42	0.50	2E B=17.00	Estructura 4 2E B= 50.0 m Esp= 6.8 m DS = 0.50 m.	0.4946	0.3180	0.64	36%	4.9193	4.0428	18%
	2	PREEF 02	7.00	1.94				0.6377	0.4003	0.63	37%	5.5186	3.9954	28%
	3	PREEF 03	8.00	2.54				0.8609	0.4811	0.56	44%	6.3415	4.4811	29%
	4	PREEF 04	9.00	3.22				1.1700	0.5640	0.48	52%	7.0391	5.2682	25%
	5	PREEF 05	10.00	3.97				1.4210	0.6848	0.48	52%	7.9470	6.2968	21%
9	1	PREEF 11	6.00	1.42	1.00	2E B=17.00	Estructura 4 2E B= 50.0 m Esp= 6.8 m DS = 1.00 m.	0.4148	0.3972	0.96	4%	4.9596	4.8791	2%
	2	PREEF 12	7.00	1.94				0.5634	0.4958	0.88	12%	5.4471	4.8120	12%
	3	PREEF 13	8.00	2.54				0.8158	0.6677	0.82	18%	6.4399	4.9864	23%
	4	PREEF 14	9.00	3.22				0.9828	0.7836	0.80	20%	7.2225	5.4828	24%
	5	PREEF 15	10.00	3.97				1.2740	0.9059	0.71	29%	7.6652	6.3638	17%



Capítulo 6. Análisis y procesamiento de resultados.

Tabla 6.2. Datos medidos, calculados y validación de coeficientes de transmisión.

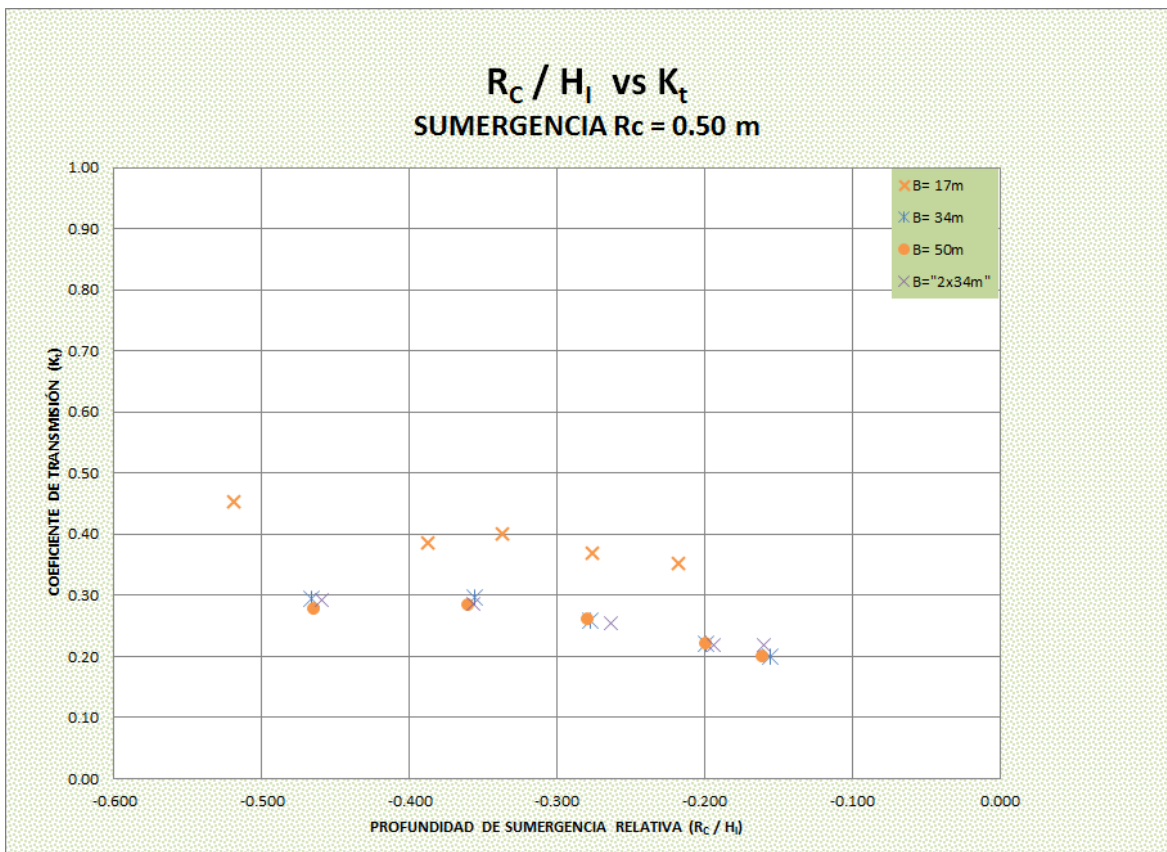
Table with columns: Serie, Ensayo, Nombre, Periodo (seg), Altura (m), H1 (m), H2 (m), T1 (seg), T2 (seg), % de reducción, Rc, B, d, L, d/L, K1, % de reducción, B/L, Rc/H1, B/H1, Rc/B, H1/d, Sop, xop, K1 Goda (1969), K1 Van der Meer (1991), K1 d'Angremond et al (1996), K1 Van der Meer et al. (2000), K1 Van der Meer et al. (2004)



Para un mejor entendimiento e interpretación de los resultados, a continuación se presentan en gráficas de acuerdo al tipo de parámetros considerados.

En la gráfica 6.1 se observa la tendencia del coeficiente de transmisión en las 4 estructuras para una sumergencia de 0.50 metros. Se hace manifiesto que la estructura de 17 metros de ancho de coronamiento tiene un mayor coeficiente de transmisión, mientras que la estructura de 50 metros de ancho de coronamiento tiene un K_t ligeramente menor que la de estructura de 34 metros de coronamiento.

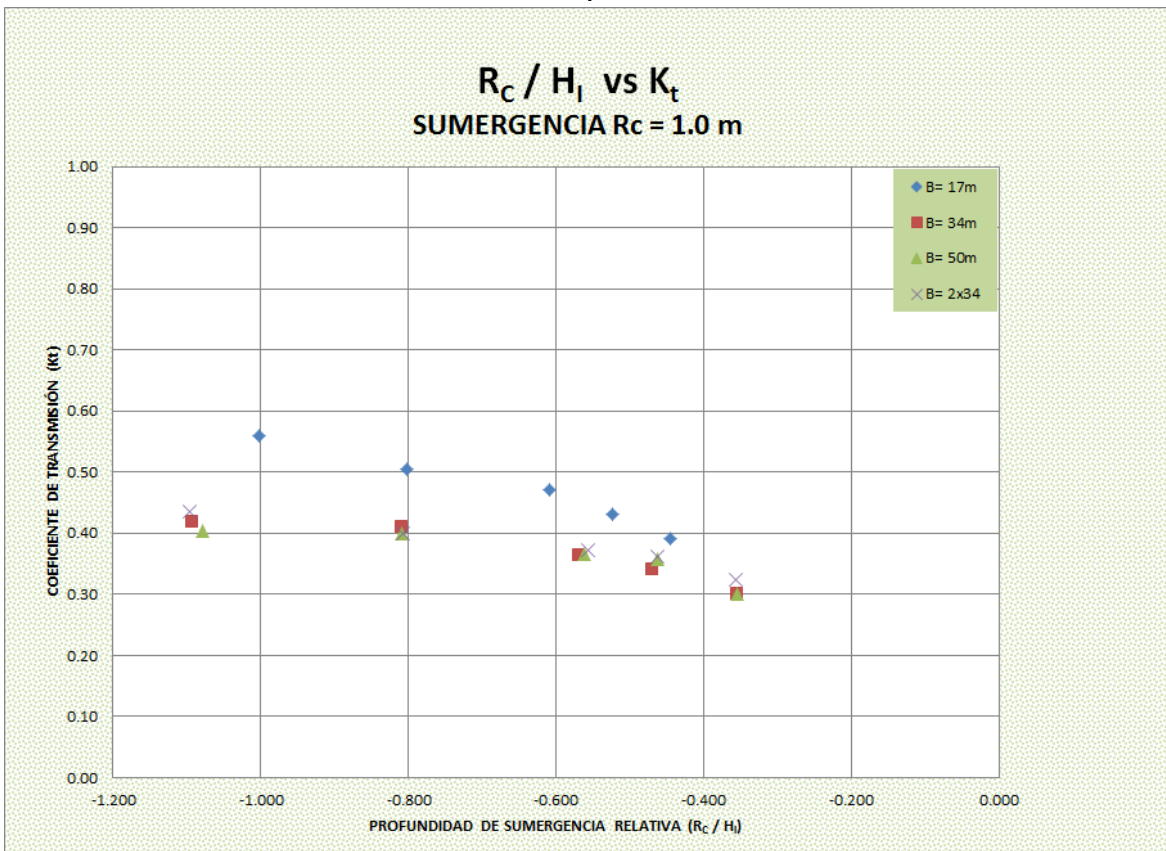
Gráfica 6.1. Profundidad de sumergencia relativa (R_c/H_i) contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras para una sumergencia de 0.50 m.





En la gráfica 6.2 podemos observar el comportamiento del coeficiente de transmisión respecto a la profundidad de sumergencia relativa de coronamiento de las 4 estructuras, para una sumergencia de 1.0 metros. Para un ancho de coronamiento de 17 metros, sigue habiendo un mayor coeficiente de transmisión que va desde 0.40 hasta 0.56. Adicionalmente se observa un coeficiente de transmisión similar en anchos de coronamiento de 34 y de 50 metros.

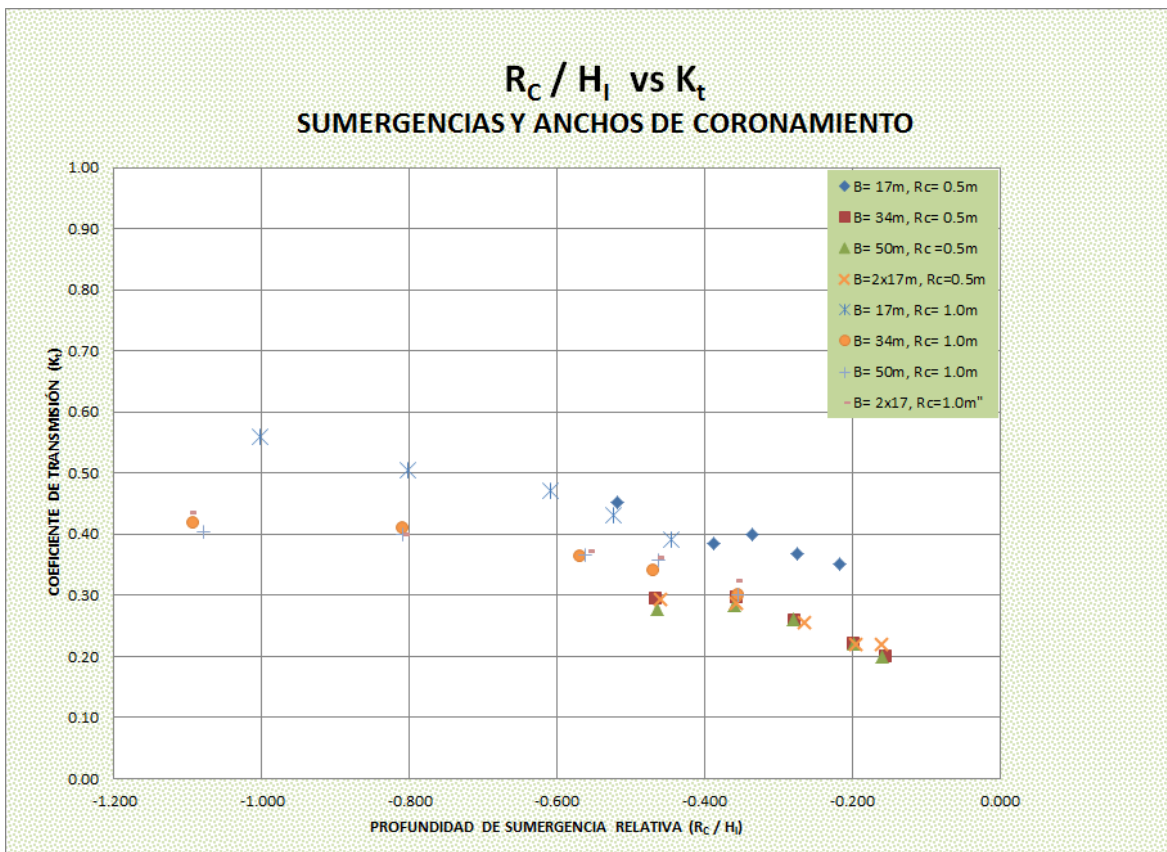
Gráfica 6.2. Profundidad de sumergencia relativa (R_c/H_i) contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras para una sumergencia de 1.0 m.





En la gráfica 6.3 se presenta el coeficiente de transmisión en relación a la profundidad de sumergencia relativa del coronamiento, para las 4 estructuras ensayadas con su correspondiente sumergencia R_c . Se puede observar que el mayor coeficiente de transmisión lo tiene la estructura con un ancho de coronamiento de 17 metros y una sumergencia de 1.00 metro, alcanzando un K_t desde 0.39 hasta 0.56. Por otro lado se tiene que 3 tipos de estructuras en relación con su sumergencia, tienen entre ellas valores muy cercanos de K_t de 0.20 a 0.56.

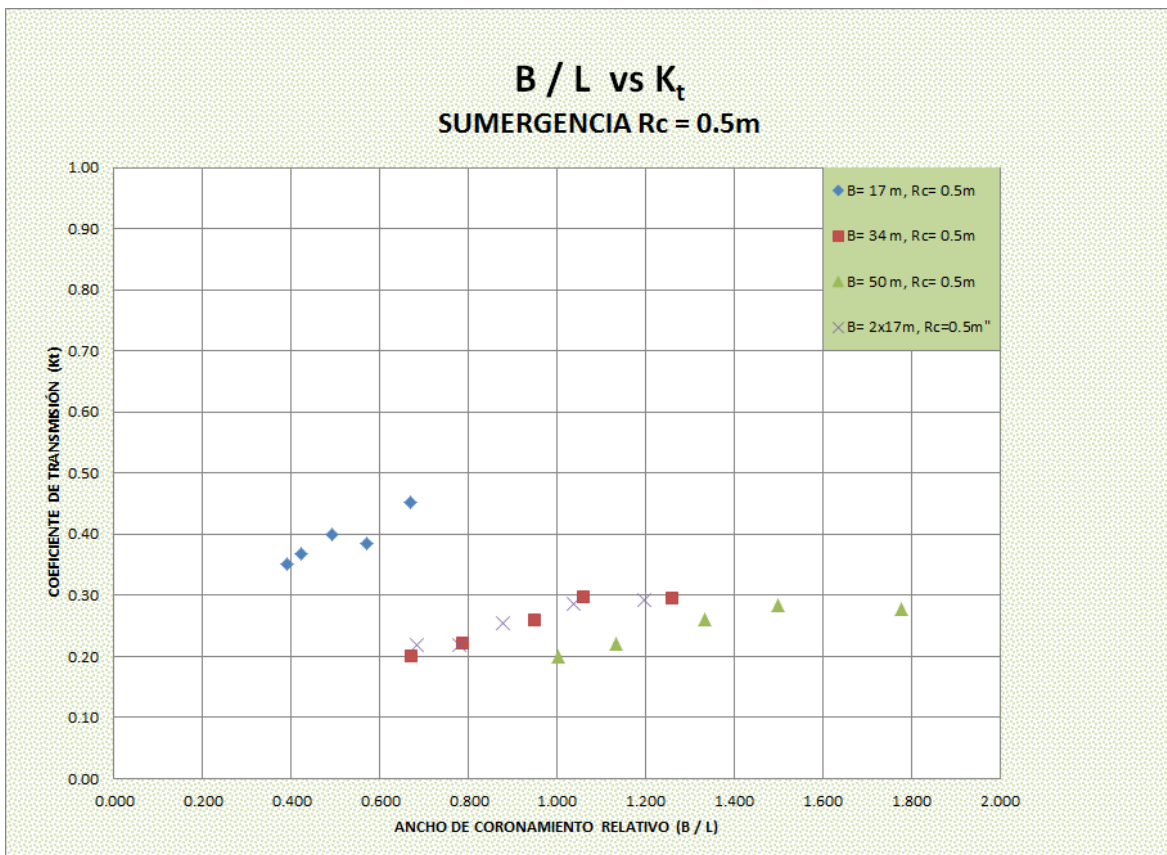
Gráfica 6.3. Profundidad de sumergencia relativa (R_c/H_i) contra coeficiente de transmisión (K_t) para ancho de coronamiento y sumergencia de las 4 estructuras.





En la gráfica 6.4 se tienen los valores del coeficiente de transmisión en relación al ancho de coronamiento relativo B/L , para todos los anchos de coronamiento ensayados, sumergidos 0.50 metros. A simple vista se observa que el mayor coeficiente de transmisión se presenta en la estructura con 17 metros con valores de 0.35 hasta 0.45. En los 3 anchos de coronamiento restantes, se observa que para un coronamiento de 50 metros se tiene un menor K_t que va de 0.20 hasta 0.28.

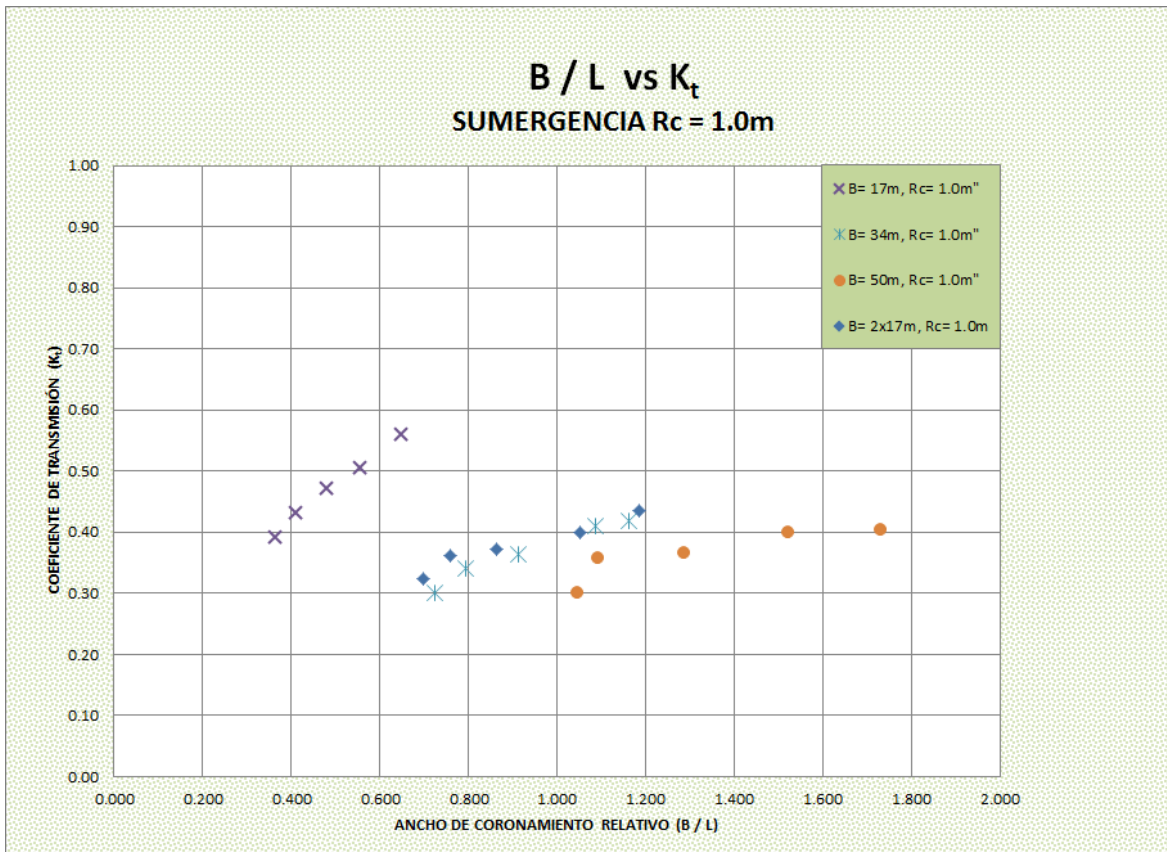
Gráfica 6.4. Ancho de coronamiento relativo B/L contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras, para una sumergencia de 0.5 m.





En la gráfica 6.5 se obtienen los valores del coeficiente de transmisión relacionando al ancho de coronamiento relativo B/L para todos los anchos de coronamiento ensayados, sumergidos 1.00 metro. Por mucho, la estructura de 17 metros, presenta los mayores coeficientes de transmisión. La estructura de 50 metros de ancho de coronamiento presenta el menor K_t con valores de 0.30 a 0.40.

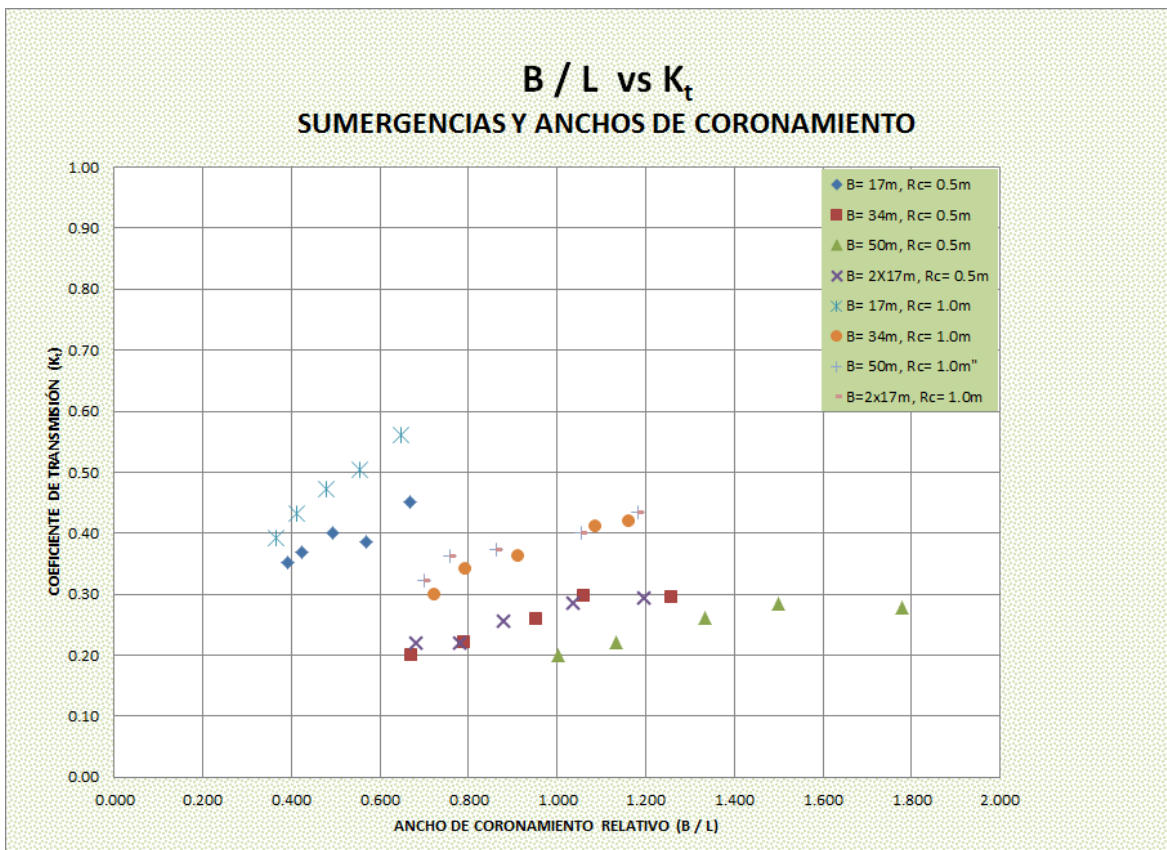
Gráfica 6.5. Ancho de coronamiento relativo (B/L) contra coeficiente de transmisión (K_t) de las 4 estructuras, para una sumergencia de 1.00 m.





En la gráfica 6.6 se presentan los valores de transmisión K_t de las 4 estructuras ensayadas, contra el ancho de coronamiento relativo B/L . Se puede observar que para un ancho de coronamiento de 17 metros con una sumergencia de 1.0 metro se tiene el mayor coeficiente de transmisión. Por otro lado, para las estructuras con ancho de coronamiento de 50 metros y sumergencia de 0.5 metros, ancho de coronamiento de 34 metros y sumergencia de 0.5, coronamiento de 2 estructuras de 17 metros espaciadas 7.00 metros, se nota un menor coeficiente de transmisión y que además, la de ancho de coronamiento de 50 metros y sumergencia de 0.5 metros, es ligeramente menor que las demás.

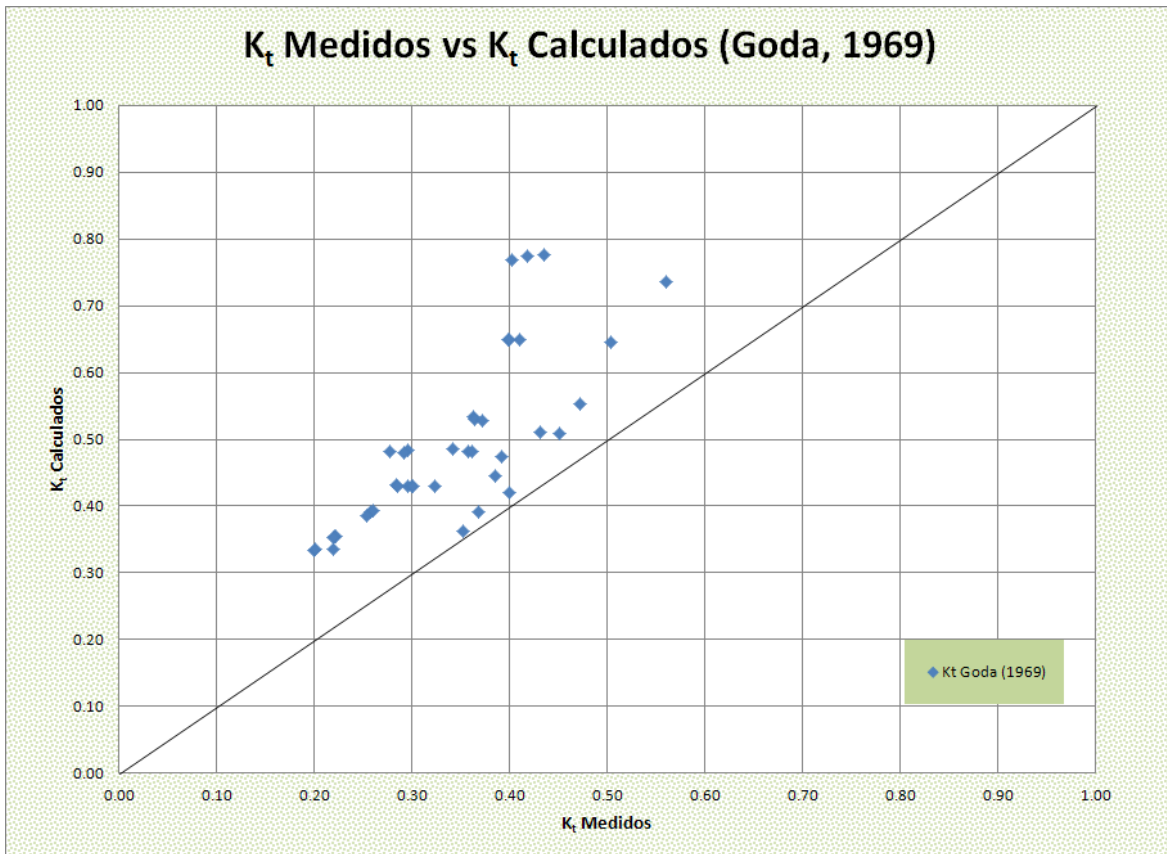
Gráfica 6.6. Ancho de coronamiento relativo (B/L) contra coeficiente de transmisión (K_t) para ancho de coronamiento y sumergencia de las 4 estructuras.





En la gráfica 6.7 se denota una validación de los coeficientes de transmisión obtenidos en laboratorio, en relación a los calculados con la formulación de Goda (1969), arrojando una dispersión regular, cercana a la línea de tendencia.

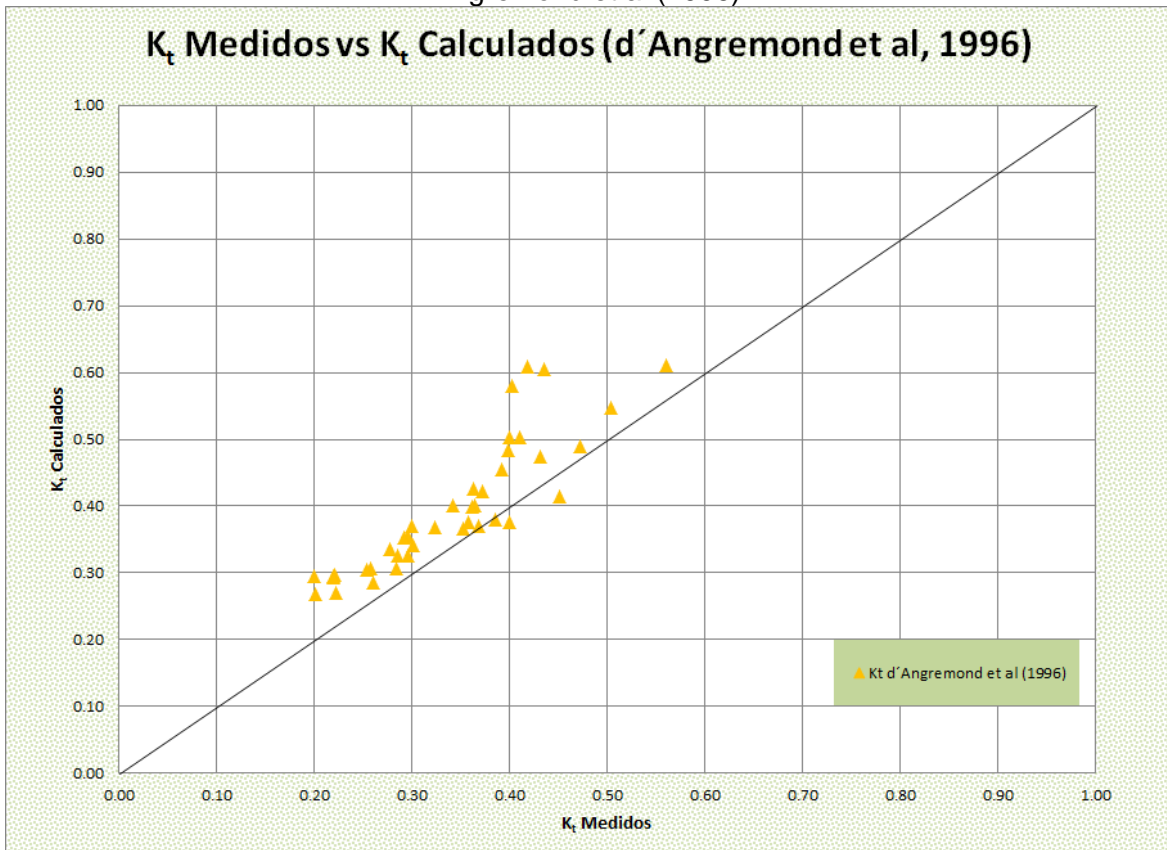
Gráfica 6.7. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Goda (1969).





En la gráfica 6.8 se muestra una dispersión baja de valores de coeficientes de transmisión obtenidos en laboratorio, contra los calculados de acuerdo a la fórmula de d' Angremond et al (1996). Dichos valores se encuentra muy cerca de la línea de tendencia.

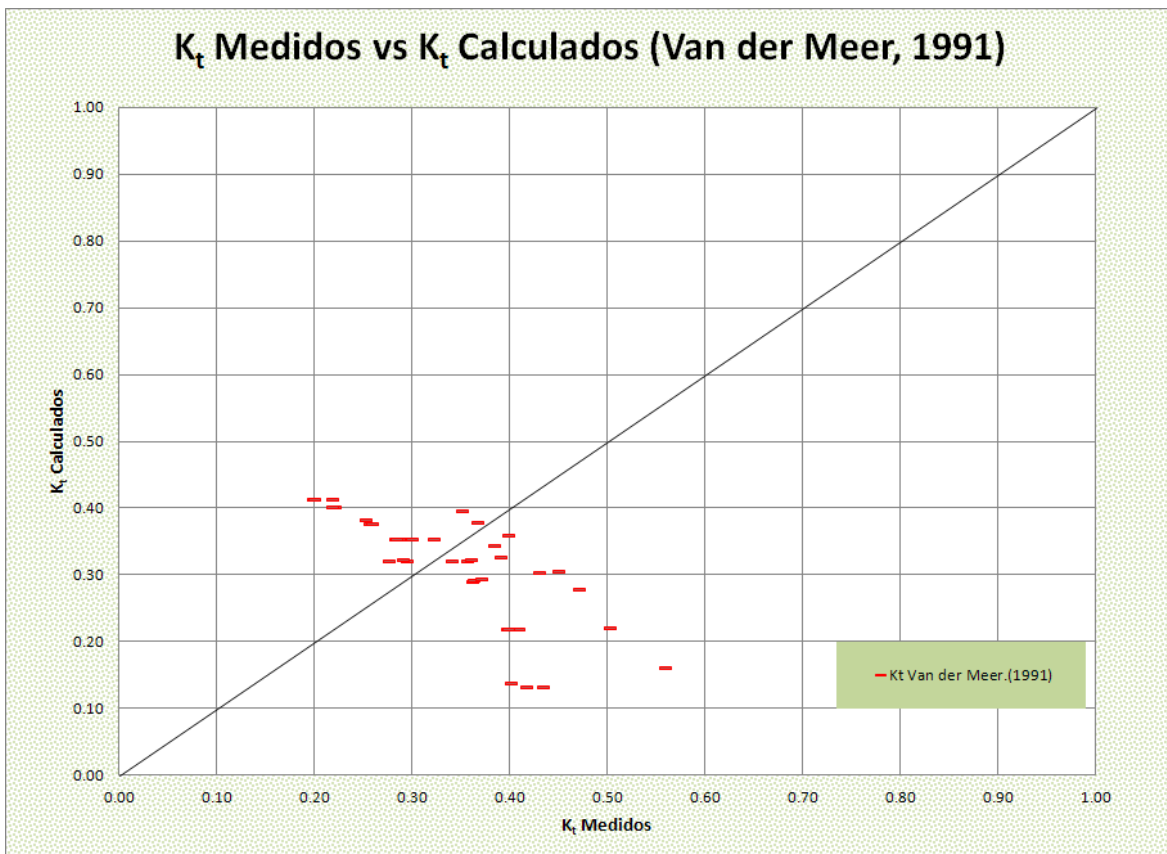
Gráfica 6.8. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a d' Angremond et al (1996).





En la gráfica 6.9 se tienen los datos desplegados tendientes a una dispersión baja respecto a la línea de tendencia. En este caso los valores obtenidos en laboratorio se validaron con los calculados de acuerdo a la fórmula de Van der Meer (2000).

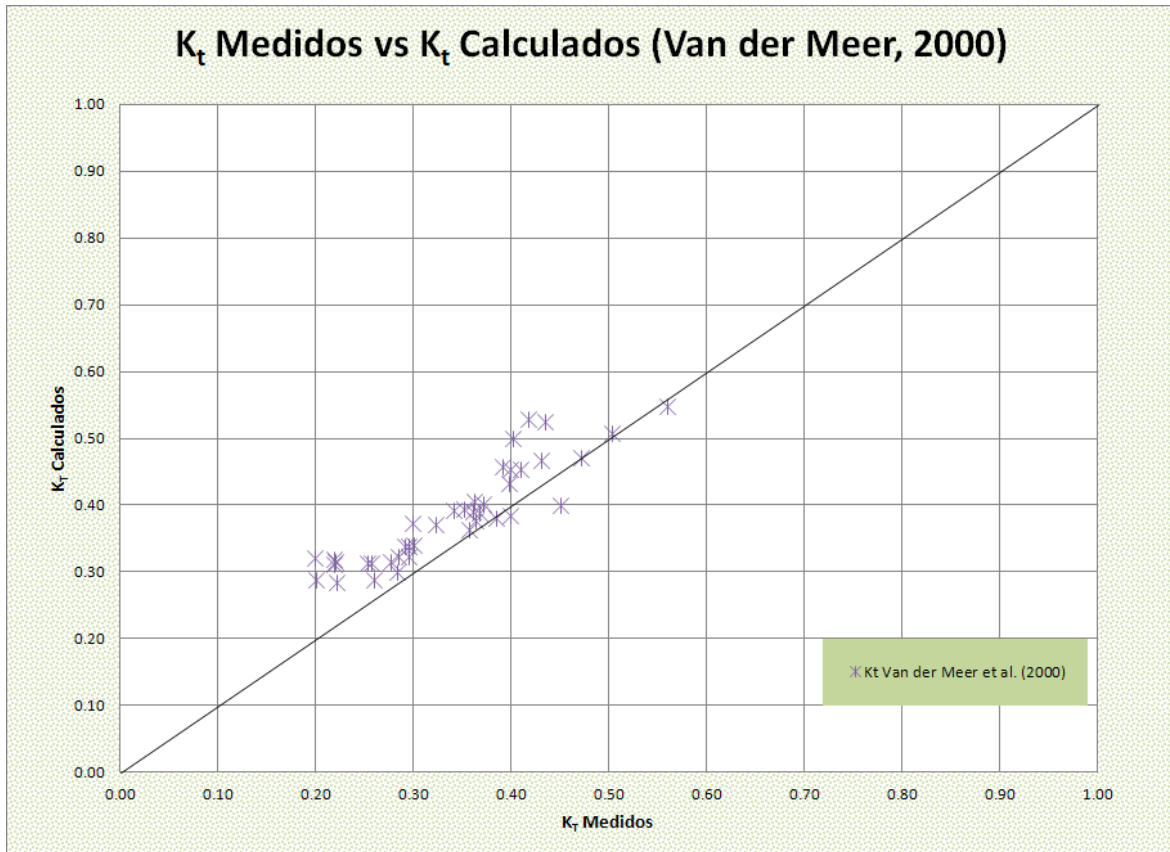
Gráfica 6.9. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Van der Meer (1991).





La menor dispersión se presenta en la gráfica 6.10 en donde, se relacionan los datos obtenidos en laboratorio en relación a los calculados con la fórmula de Van der Meer (2000).

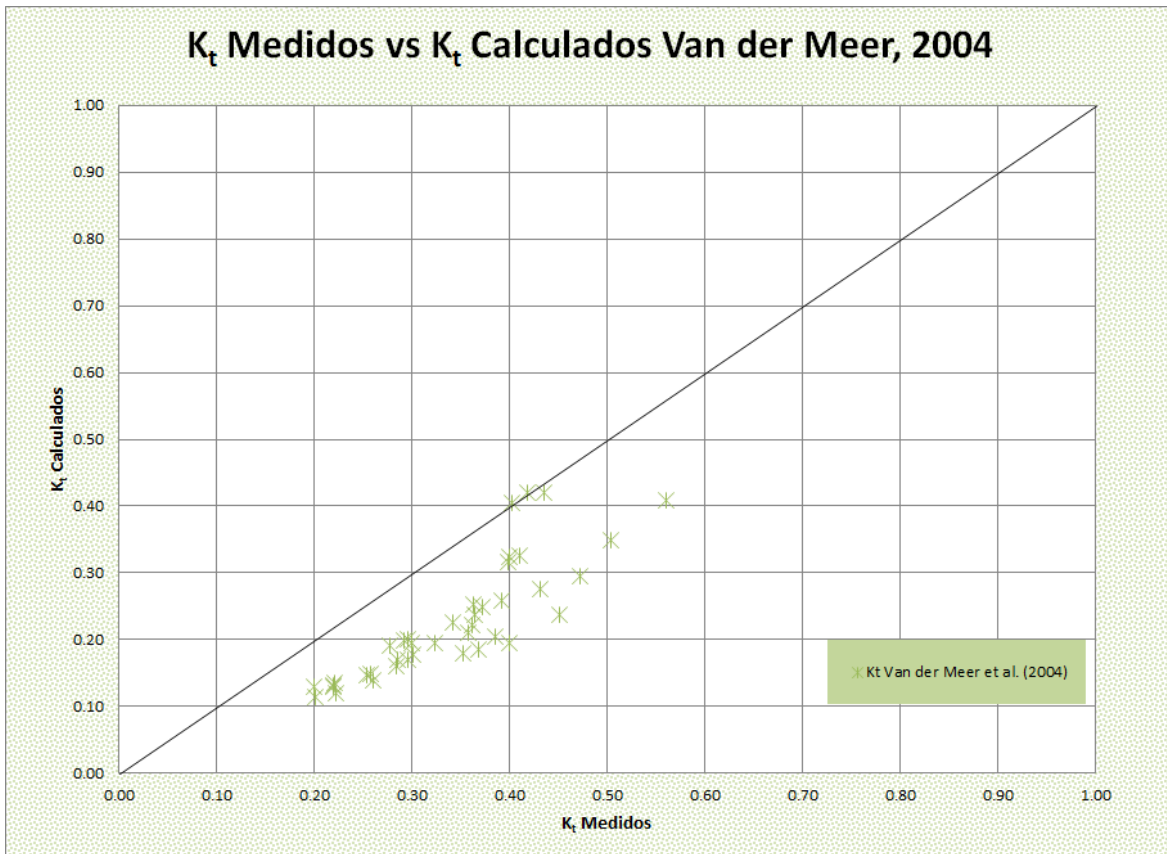
Gráfica 6.10. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Van der Meer (2000).





En la gráfica 6.11 se presenta una dispersión regular, en donde se relacionan los datos obtenidos en laboratorio en relación a los calculados con la fórmula de Van der Meer (2004).

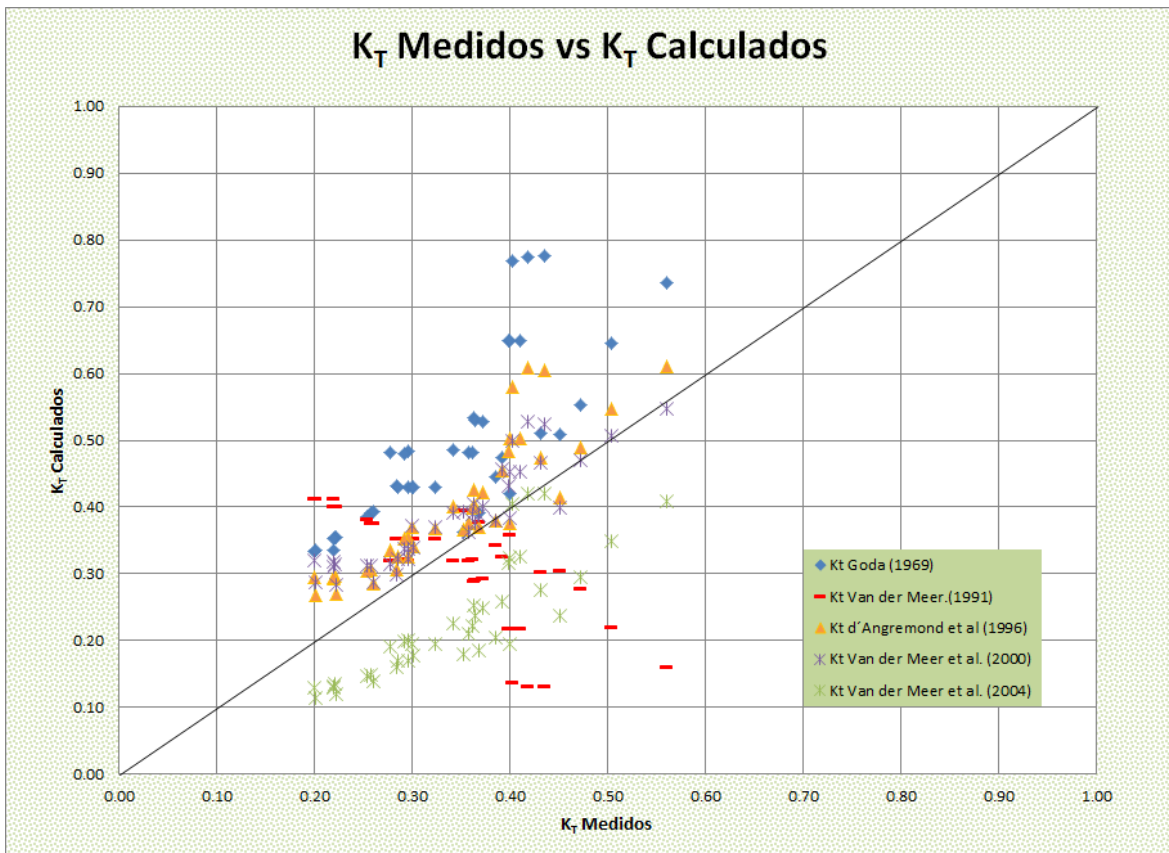
Gráfica 6.11. Coeficientes de transmisión K_t medidos contra calculados respecto a Van der Meer (2004).





En la gráfica 6.12 se tiene una superposición de las dispersiones para los diferentes criterios considerados, en la cual se observa que las formulaciones de Van der Meer et al (2000) y la d' Angremond et al (1996) presentan mejores correlaciones respecto a la línea de tendencia.

Gráfica 6.12. Coeficientes de transmisión medidos contra calculados respecto a los investigadores seleccionados.





CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Al concluir esta tesis dedicada a la transmisión del oleaje en arrecifes de enrocamiento sumergidos, se obtuvieron resultados que correspondieron considerablemente con la hipótesis que se planteó preliminarmente: *“Mediante el estudio experimental en un modelo hidráulico físico reducido de arrecifes artificiales de enrocamiento, se puede obtener una estructura alternativa a las implementadas en la región de Chelem-Chuburná Yucatán, con la que se logre disminuir la energía del oleaje incidente en la costa, y de esta forma contribuir a la restitución de la línea costera erosionada en la zona”*. Por lo que a continuación se precisan las conclusiones y recomendaciones derivadas de la presente tesis.

7.1.1. Conclusiones.

- I. Se decidió ensayar con arrecifes de enrocamiento sumergidos, debido a que no se han aplicado en la zona de estudio, además de ser amigables en su implementación ya que al estar sumergidos no modifican el ambiente visual playero, y además podrían ser aptos para albergar flora y fauna marina.
- II. El mayor coeficiente de transmisión del oleaje se presentó en la estructura con 17 metros de coronamiento y 1.00 metro de sumergencia (gráfica 6.5 y 6.8).
- III. El menor coeficiente de transmisión del oleaje se presentó en la estructura con 50 metros y 0.50 metros de sumergencia (gráfica 6.5 y 6.8).
- IV. La transmisión del oleaje se incrementa en estructuras sumergidas a mayor profundidad.



- V. En anchos de coronamiento mayores a 17 metros, se reduce la diferencia de los coeficientes de transmisión para las 2 diferentes sumergencias (0.5 m y 1.00 m).
- VI. En anchos de coronamiento mayores a 17 metros, la ola sufre una disminución considerable en su energía, no obstante comparando la disminución de la transmisión del oleaje entre las estructuras de anchos de coronamiento de 34, 50 y 2 estructuras de 17 metros espaciadas 7.00 metros, no existe una diferencia preponderante de por medio, por lo tanto si se implementara alguna de las estructuras probadas se recomendaría la de 34 metros de coronamiento, ya que resultaría más económica de construir.
- VII. En la presente tesis, los coeficientes de transmisión obtenidos en el laboratorio, fueron validados de acuerdo a las fórmulas de Goda (1969), D'Angremond *et al.* (1996), Van der Meer (1991, 2000, 2004), siendo las que mejor se adaptan: Van der Meer *et al.* (2004) y la d' Angremond *et al.* (1996).
- VIII. De acuerdo al estudio desarrollado en esta tesis y a los resultados de los diferentes investigadores que han estudiado la transmisión del oleaje, se puede concluir que los factores predominantes en la disminución de la transmisión del oleaje son, el ancho de coronamiento B y la sumergencia R_c de los arrecifes.



7.2. Recomendaciones.

De acuerdo a las conclusiones del presente estudio, es necesario considerar las siguientes recomendaciones:

- I. El estudio experimental podría ampliarse llevándolo a un modelo de fondo móvil en un tanque de oleaje irregular multidireccional, para evaluar otras variables como son: la difracción del oleaje sobre las estructuras bajo la incidencia del oleaje en diferentes direcciones, y el transporte de sedimentos para analizar la evolución de la línea de costa.

- II. Continuar las pruebas sobre estructuras de enrocamiento con elementos de mayor tamaño, para evaluar la influencia de la relación de vacíos y de la rugosidad en la disminución del coeficiente de transmisión.

- III. Continuar las pruebas sobre estructuras construidas con elementos artificiales, para analizar y comparar resultados.

- IV. Para la aplicación del presente estudio para diferentes zonas de la costa, se recomienda contar con mediciones de oleaje reales para mejores resultados.



BILIOGRAFÍA CONSULTADA.

1. **[Aceituno, 2010]** Juan B. Aceituno Mendoza. "Sistema de protección costera y rompeolas separados de la línea de costa". Ingeniería AYS CA. Caracas, Venezuela. 2010.
2. **Abdul Khader and Rai (1980)** Abdul Khader, M.H., Rai, S.P., 1980, A Study of Submerged Breakwaters, Journal of Hydraulic Research, pp. 113–121.
3. **Ahrens (1987)** Characteristics of reef breakwaters. CERC, Vicksburg, Technical Report CERC-87-17.
4. **Allsop (1983)** Allsop N.W.H.(1983). Low-crest breakwaters:Studies in random waves. Proc.Conf. on Coastal Structures 1983, Arlington, March 1983, ASCE, New York.
5. **[Álvarez - Ricalde, 2006]** Enrique Álvarez, Ramiro Rubio, Herbert Ricalde. "Geosynthetics, Yucatán: Shore line restaured with geotextiles tubes". Revista Volumen 24, No.3. Julio 2006.
6. **[Álvarez, 2005]** Enrique Álvarez del Rio. "Saving Yucatan's Coast". Revista Ger Engineering Solutions. Volumen 23, No.7. 2005.
7. **[Arellano, 2012]** Vania Itzel Arellano Llamas. "Arrecifes Artificiales de enrocamiento para protección de playas". IPN. México DF. 2012.
8. **[Avelar, 2006]** Carlos Avelar Frausto. "Daños causados por Wilma en Cancún". ERN, Ingenieros Consultores. México, 2006.
9. **[Bagnold, 1942]** Bagnold R.A. "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes". William, Morrow, and Company. Inc. New York. 1942.
10. **[Bagnold, 1963]** Bagnold R. A. "Mechanics of marine sedimentation in the Sea: Ideas and observations". M.N Hill Ed. Volumen III. Intersciencie, New York,.U.S.A. 1963.
11. **[Battlori et al, 1999]** Eduardo Battlori Sampedro, P.P.Dzib, R. Tuyub y J.L. Febles-Patrón. "Dinámica de playas en la región costera del Estado de Yucatán". CINVESTAV-IPN. Unidad Mérida. Departamento de Ecología Humana. Junio, 1999.



12. **[Battlori, 1995]** Eduardo Battlori Sampedro. "Hidrología de la Región Costera Noroccidental del Estado de Yucatán". Tesis de Doctorado en Ciencias Geográficas (Física. Esp. Hidrología). Universidad de la Habana. Cuba, 1995.
13. **[Battlori, 2007]** Eduardo Battlori Sampedro. "Vulnerabilidad urbana en la región costera del Estado de Yucatán" 2007.
14. **[Beltrán, 1958]** Beltrán G 1958. "Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento". E.d. IMERNAR Ac. 2:215-271, México. 1958.
15. **[Beresford-A, 1994]** (Generador) Beresford P. J., "WAVEGEN-Wave Generator Control Software Program", User Manual (1994), Report IT 411, HR-Wallingford.
16. **[Beresford-B, 1994]** (Equipo de medición) Beresford P. J., "HR-WAVES-Data Acquisition and Analysis Software Program", User Manual (1994), Report IT 410, HR-Wallingford.
17. **[Bijker- Van de Graff, 1983]**. Bijker E.W y Van De Graff. "Lottoral drift in relation to shoreline protection". Shoreline protection, Proc. Instn. Civil Engrs. p.p. 81-86. Thomas Telford London.
18. **[Bird, 2003]** Bird E. 2003. Coastal Geomorphology. An Introduction. John Wiley & Sons, The Atrium Gate, Chichester, UK, 321pp.
19. **[Bleck, 2003]** Mathias Bleck. "Wave attenuation by Artificial reefs". PIANC, Alemania. 2003 <http://www.pianc.org/downloads/dwa/winner2006-bleck.pdf>.
20. **Bleck y Oumeraci, (2002)** Bleck, M. and Oumeraci, H. (2002). "Hydraulic performance of artificial reefs: Global and local description." Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 1778-1790. Bleck, M. and Oumeraci, H. (2004). "Analytical model for wave transmission at artificial.
21. **[Bretschneider, 1959]** Bretschneider, C. L., 1959, "Wave variability and waves spectra for wind-generated gravity waves", Beach Erosion Board Technical Memo, N° 113, US Army Corps of Engineers, p. 192.
22. **[Bretschneider, 1967]** Bretschneider, C. 1958. Revisions in wave forecasting: deep and shallow water. Proceeding of the 6nd Coastal Engineering Conference. American Society of Civil Engineers. New York.



23. **[Burke et al, 2001]** Burke L, Kura Y, Kassem K, Revenga C, Spalding M, McAllister. 2001. "Pilot analysis of global ecosystems: coastal ecosystems", World Resources Institute, Washington DC. http://pdf.wri.org/page_coastal.pdf
24. **Calabrese et al, (2002)** Calabrese, M., Vicinanza, V., Buccino, M., 2002. "Large scale experiment on the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves". Proc 28 th Int. Conf. on Coastal Engineering. ASCE, pp. 1900-1912.
25. **[Carranza, 2009]** Arturo Carranza Edwards. "Causas y consecuencias de la erosión en playas". Instituto de ciencias del mar y Limnología. UNAM. México. [http://www.tuobra.unam.mx/obrasPDF/96:\)1890:\)c.PDF](http://www.tuobra.unam.mx/obrasPDF/96:)1890:)c.PDF).
26. **[Castro, 2007]** Mariana Alejandra Marín Castro. "Evaluación de la Interacción del Período del Oleaje en el Diseño de Rompeolas bajo el Concepto de Oleaje Irregular. IPN. México D.F.
27. **[CCO – COI, 2008]** Comisión Colombiana del Océano. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (COI). Dirección General Marítima (DIMAR). "La erosión en las playas del Caribe, alternativas para su control". Taller sobre la erosión costera en la región de América latina y el Caribe. Cartagena Colombia. Noviembre de 2008. http://www.slidefinder.net/c/cuba_jose_20luis_20juan_20marti/18988231.
28. **[CFE, 1983]** Comisión Federal de Electricidad. "Manual de Diseño de Obras Civiles". A2.13.Hidrotecnia Marítima. México.
29. **[Chakrabartis y Cooley, 1977]** Chakrabartis S. K. y Cooley, R. P. (1977), "Statistical Distribution of Periods And Heights of Ocean Waves", Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 9, pp 320-735
30. **Cross y Sollitt (1971)** Cross, R. and Sollitt, C. 1971. "Wave Transmission by Overtopping". Technical Note No. 15, Massachusetts Institute of Technology, Ralph M. Parsons Laboratory.
31. **[Curtis et al, 1996]** Curtis JH, Hodell DA. "Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya cultural evolution". Quatern. Res. 46: 37–47.



32. **[Dace, 1984]** U.S. Army Corps of Engineers. Shore Protection Manual. Vol 1 4ta edición. Washington. 1984.
33. **Davies y Kriebel (1992)** Davies, B. and Kriebel, D.L. (1992). "Model testing on wave transmission past low crested breakwaters." Proc. 23th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 1115-1128.
34. **D'Angremond, Van Der Meer y de Jong (1996)** D'Angremond K., J.W. Van der Meer and R.J. de Jong (1996). Wave transmission at low crested structures. Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 3305-3318.
35. **Daemen (1991)** Deamen I.F.R. 1991. Wave Transmission at Low-Crested Structures, M. Sc. Thesis Delft University of Technology, Delf Hydraulics Report H462.
36. **Davidson (1969)** Davidson, D. D. 1969 (Sep). "Stability and Transmission Tests of Tribar Breakwater Section Proposed for Monterey Harbor, California", Miscellaneous Paper H-69-11, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
37. **[Del olmo, 2009]** Berta Cavia del Olmo. "Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores". Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental. Junio del 2009. España.
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/8720/1/00.pdf>.
38. **[Del Río, 2005]** Enrique Alvarez del Rio. "Ecotubos de geotextil para estabilización de playas y control de erosión costera". GFR Magazine, Engineering Solutions, 2005.
39. **[Dominguez- Batlori 2008]** Mauricio Dominguez y Eduardo Batllori. "Vulnerabilidad de la infraestructura habitacional costera ante incrementos acelerados del nivel medio del mar". SEDUMA. Diciembre 2008.
40. **[Euan, 2011]** Jorge Euán Avila. "Fenómenos Naturales y Acciones humanas que modifican la costa de Yucatán". Departamento de Recursos del Mar Unidad Mérida del Cinvestav-IPN. Foro: Erosión Costera en Yucatán, Organizado por el



Movimiento para la Recuperación de Playas de Chelem y Chuburná, Yucatán, Junio 25 del 2011.

41. **[Fernández, 2004]** Fernández Diez Pedro. "Modificación de la Energía de las olas". Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2004.
42. **[Field et al, 2002]** Brendan D. Field, Arlene M. Fiore, Daniel J. Jacob. "Linking ozone pollution and climate change". Department of Earth and Planetary Sciences and Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University Cambridge, American Geophysical Union. 2002.
43. **[Forbes et al, 2004]** Forbes DL, Parkes GS, Manson GK, Ketch LA. "Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. Mar". Geol. 210: 169–204.
44. **[Frias - Moreno, 1988]** Armando Frías Valdez y Gonzalo Moreno Cervantes. "Ingeniería de Costas". Edit. LIMUSA, México.
45. **Friebel y Harris, (2003)** Re-evaluation of Wave Transmission Coefficient Formulae from Submerged Breakwaters Physical Models, (<https://ocean.marine.fit.edu/papers/FriebelHarris.pdf>)
46. **[Gerstner, 1802]** Gerstner, F. "Theorie der wellen: Abhandlungen der Koniglichen Bohmischen Gesellschaft der Wissenschaften, Prague; also, Gilbert's - Annalen der Physik, vol. 32, pp. 412-445.
47. **[GESAMP, 2001]** Joint Group of experts on the scientific aspects of marine environmental protection, 2001.
48. **Gironella y Sanchez-Arcilla (1999)** Gironella, X., Sanchez-Arcilla, A. (1999). "Hydrodynamic behaviour of submerged breakwaters. Some remarks based on experimental results." Proc. Coastal Structures'99, ASCE, 891-896.
49. **Goda (1969)** Goda, Y., 1969, "Reanalysis of Laboratory Data on Wave Transmission Over Breakwaters," Rpt. of Port and Harbor Research Institute, Japan, Vol. 18, No. 3.
50. **[Goda, 1988]** Yoshimi Goda, 1988, "Statistical variability of sea state parameter as a function of wave spectrum". Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 31, 2, 39-52.



51. **Gómez y Valdés (1990)** Gregorio Gomez Pina J.M. Valdes Fernandez de Alarcon, "Experiments on Coastal Protection Submerged Breakwaters: a way to look at the results". CCE No 22 (1990): Proceedings of 22nd Conference on Coastal Engineering, Delft, The Netherlands, 1990.
52. **[Guido et al, 2009]** Pedro Guido Aldana, Adriana Ramírez Camperos, Lucio Godínez Orta, Sergio Cruz León, Arturo Juárez León, "Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México, Avances en Recursos Hidráulicos, Número 20, Octubre 2009, Medellín Colombia, ISSN0121-5701,pp 41-56..
53. **[Guilcher, 1974]** Guilcher A., "Studies in coastal geomorphology contributing to coastal engineering", Proc. 14 th inter. Conf. Coastal Eng., ASCE I, p.p 1-19. Eng.
54. **[Hasselmann et al, 1973]** Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., et al., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP), Dtsch. Hydrogh. Z, Suppl., 12, A8.N 12,95P.
55. **[Hattersley-Foster, 1968]**. Hattersley y D.N. Foster. "Problems of beach erosion and some solution". Australian Civil Engineering, Vol. 9, Agosto 1968, Australia.
56. **[Heredia,1984]** Bertha Heredia Ancona. "Introducción al Método Científico". edit. Continental, 1era publicación, México D.F.
57. **[Hooke et al, 1995]** Hooke J, Bray M, Carter D. 1995. "Sediment transport, sea level rise and shoreline management: Advising decision makers on the south coast of England". Proc. Int. Conf. on Coastal Change 95, Bordomer-IOC, Bordeaux, p. 978.
58. **[Houghton et al, 2001]** Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. Van Der Linden, and D. Xiaosu. "Climate Change, The Scientific Basis". Contributions of Working Group to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 881 p Eds., 2001.
59. **[INE-SEMARNAT, 2006]** Instituto nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
60. **[INMAR, 2002]** Ingeniería Marítima, "Interacción olas-estructura". ETSECCPB, España. <http://assig-camins.upc.es/op/omc/Olas - Estructuras.pdf>.



61. **[IPCC, 2011]** Intergovernmental panel on climate change El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
62. **[Isobe, 2002]** Isobe Masahiko, Hanahara Yusuke, Yu Xiping and Takahashi Shigeo. "Numerical Simulation of waves overtopping a Breakwater", pp. 2273-2285.
63. **[ISSC, 1967]** International Ship Structures Congress, 1967, Report Committee 1 on Environmental Conditions, 3rd ISSC, Oslo, 42-48.
64. **[Jensen, 1996]** Jensen T., Andersen H., Gronbech J., Mansard, E.P.D. and Davis, M.H. 1996, "Breakwater stability under regular and irregular wave attack". ICCE, Orlando, Fl. Pp.1679-1692
65. **[Keulegan, 1951]** Garbis H. Keulegan, "Hydrodynamical Evaluation of Storms on Lake Erie". Chapter 4, Physicist, National Hydraulics Laboratory National Bureau of Standards, Washington, D. C. ICCE No 2 (1951): Proceedings of Second Conference on Coastal Engineering, Houston, Texas, 1951.
66. **Keulegan (1973)** Keulegan G. H. 1973 "Reflection Characteristics of Screen Wave Absorbers", Research Report H-73-3, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
67. **[Kinsman, 1965]** KINSMAN, B., "Wind Waves". Theip Generation and Propagation on the Ocean Surface, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1965.
68. **[Komar, 1983]** Komar, P. 1983. "Rhythmic Shoreline Features and their Origins", Mega Geomorphology, R. Gardner and H.G. Scoging, eds, Clarendon Press, Oxford, U.K., pp 92-112.
69. **[Komar, 1988]** Komar, P. 1988, "Environmental Control son Littoral Sand Transport", 21st International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, pp 1238 1252.
70. **[Korteweg- De Vries, 1895]** Korteweg, D.J. and de Vries, H. 1895. "On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves". Philosophical Magazine, 39: 422-443.



71. **Lamarre (1967)** Lamarre, P. (1967). "Water-Waves Transmission by Overtopping of an Impermeable Breakwater", M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
72. **[Le Mehaute, 1969]** Le Mehaute B, "An introduction to hydrodynamics and water waves, Water Wave Theories", Vol. II, TR ERL 118-POL-3-2, U.S. Department of Commerce, ESSA, Washington, DC.
73. **[Logan et al. 1969]** LOGAN, B.W., J.L. JARDING, and W. SHEAD Am Assoc. Petroleum Geologist Memoir Carbonate sediments and reefs, Yucatan shelf, Mexico, Part 1. Late Quaternary carbonate sediments of Yucatan shelf, Mexico 1969.5-120.1.
74. **[Lopez, 2007]** Héctor López Gutiérrez. "Arrecifes artificiales como obras de reconstrucción y preservación de playas". Asociación Mexicana de Infraestructura Portuaria, Marítima y Costera.
<http://www.amip.org.mx/htm/RevAMIP/A3NUM09/AMIP30906c.pdf>.
75. **[Lopez, 2011]** Héctor López Gutiérrez. "La historia del proceso evolutivo de erosión y posibles soluciones". Primer foro sobre la erosión costera en Yucatán. Mérida Yucatán, 25 de Junio de 2011.
76. **[Lozada - Tejedor, 1977]** Miguel Angel Losada y Luis Tejedor Martínez. "Métodos Espectrales de Previsión de Oleaje". Revista de obras públicas, España.
77. **Madsen y White (1976)** Madsen, O. S. and White, S. M. 1976. "Reflection and Transmission Characteristics of Porous Rubble-Mound Breakwaters", MR 76-5, U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA.
78. **[Manley, 1998]** Manley Kirk C. "Descripción General de Estructuras de Protección". Related Oceanographic Information- Beach Protection, Breakwaters, Jetties, Bulkheads and Seawalls, Pile Buck. 1998.
79. **[Marin, 2007]** Mariana Alejandra Marín Castro. "Evaluación de la interacción del período del oleaje en el diseño de rompeolas, bajo el concepto de oleaje irregular". IPN, México D.F.



80. **[McCarthy et al., 2001]** McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) (2001) Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/001.htm
81. **[Medina, 2009]** José María Medina Villaverde. "Apuntes del curso Ingeniería Marítima y Costera". Universidad Europea de Madrid, España. <http://es.scribd.com/doc/16289653/Apuntes-de-oleaje>
82. **[Merino, 1986]** Merino, I.M. 1986. "Aspectos de la Circulación Costera superficial del Caribe Mexicano con base en observaciones utilizando tarjetas a la deriva". A. Inst. Cienc. del Mar y limnol. UNAM, 13 Z : 31-46.
83. **[Meyer- Arendt, 1993]** Meyer-Arendt K J. "Shoreline Changes Along The North Yucatán". Coast In. Coast lines of the gulf of the Eighth. Simposium on Coastal and Ocean Management Coastal Zone 93. July 19-23, Neu Orleans, pp. 103-117.
84. **[Mitsuyasu, 1970]** Mitsuyasu, H., 1970, "On the growth of wind-generated waves – spectral shape of wind waves at finite fetch", Proc. 17th Japanese Conf. Coastal Eng., JSCE, 1-7.
85. **[Morales – Jimenez, 2006]** Anayansi Morales Muñoz y Jorge Jiménez Mendieta. "Construcción de rompeolas, bordos y rellenos para la ampliación del puerto de Progreso Yucatán". IPN, México D.F. 2006.
86. **[NASA, 2009]** <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2009-107>
87. **[Neumann, 1953]** Neumann, G., 1953. "On ocean wave spectra and new method of forecasting Wind-Generated Sea". Beach Erosion Board, Corps of engineers, Tech. Memo., No. 43.42 P.
88. **[NOAA, 2011]** National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.csc.noaa.gov>
89. **[Ocaña, 2001]** Karina G. Ocaña Espinosa de los Monteros. "Modelación Física de Rompeolas Sumergidos con Oleaje Irregular". IPN, México, DF. 2001.
90. **[OECD, 2001]** La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2001 <http://www.oecd.org>



91. **[Oerlemans y Fortuin, 1992]** Oerlemans, J. y Fortuin, J.P.F. (1992). Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming. *Science*, 258: 115-117.
92. **[Ortiz, 2003]** Nicolás Ortiz Tarroija. "Caracterización espectral de tormentas intensas en la costa Catalana y su aplicación a la predicción de oleaje". Universidad Politécnica de Catalunya, Junio 2003, España. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5970/5/04.pdf>.
93. **[Peña, 2005]** Peña Trigueros Luis Antonio. "Ascenso del oleaje Máximo (Run-up) sobre Rompeolas superficiales permeables a talud". ESIA-Zacatenco. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.
94. **[Pérez, 1977]** Pérez, Toro A. Enciclopedia Yucatenense. Introducción. Geografía Física. Fauna Flora. 2a. edición oficial del Gobierno del Edo. Tomo 1.
95. **[Pierson, 1952]** Pierson W.J "A unified mathematical theory for the analysis, propagation and refraction of storm generated ocean surface waves, parts I and II. Technical report, New York University, College of Engineering, Res. Div Dept; of Meteorol and Oceanogr. Prepared for the Beach Erosion Board, Dept. of the Army, and Ocean of Naval Res. Dept. of the Army, and Ocean of Naval Res., Dept. of navy, 461. Pierson, W.J. y Marks W. 1952. The power spectrum analysis of ocean wave records. *Trans. Amer. Geophys. Union*. 33, pp.834-844.
96. **[Pierson, 1953]** Pierson W.J "A unified mathematical theory for the analysis, propagation and refraction of storm generated ocean surface waves, parts I and II, N.Y.U., Coll. Of Eng., Res. Div., Dept, Meteorol. And Oceanogr., 461 P.
97. **[Pierson, 1964]** Pierson, W.J. y Moskowitz., L., 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69(24), pp. 5,181-5,190.
98. **Powell y Allsop (1985)** Powell, K.A and Allsop, N.W.H. Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability. *Hydraulics Research, Wallingford, 1985, Report SR 57.*
99. **[Ramírez, 2009]** José Ramírez Cuevas. "Estudio experimental de rompeolas superficiales permeables con ampliación de berma". IPN, México, D.F.



100. **[Rosales, 1999]** Víctor Rosales Sierra. "Caracterización del oleaje aplicada a Tuxpan Veracruz". IPN, México D.F.
101. **Roul y Faedo (2002)** Roul, P. and Faedo, A. (2002). "Physical model study on low-crested structures under breaking wave conditions." Proc. Int. MEDCOAST Workshop on Beaches of the Mediterranean & the Black Sea, Kusadasi, Turkey, 83-96.
102. **[Ruiz, 2011]** Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores. "Apuntes del curso Hidrodinámica Marítima". IPN, México.
103. **[Russell, 1845]** Russell, J. S. 1845. Report on waves. Rep. Meet. Brit. Assoc. Adv. Sci., 14th, pages 311-390.
104. **[Salles - Silva, 2004]** Salles, P. & Silva, R., Capítulo 13 "Infraestructura de protección costera" del libro "El Manejo Costero en México". ISBN 968-5722-12-9. Editores Rivera, E., Villalobos, G., Rosado, F. & Azuz, I. EPOMEX, México, pp 179-189. <http://etzna.uacam.mx/epomex/paginas/pdf/mancos/cap13.pdf>.
105. **[Salmon et al, 1982]** Salmon J., D. Henningsen y T. McAlpin, "Dune restoration and revegetation manual", Coastal Zone Studies. Report No. 48, Florida Sea Grant College, Fla., U.S.A, 1982.
106. **[Savage - Woodhouse, 1968]** SAVAGE, R.P., and WOODHOUSE, W.W., "Creation and Stabilization of Coastal Barrier Dunes," Proceedings of the 11th Coastal Engineering Conference, London, Sept. 1968. <http://journals.tdl.org/ICCE/article/view/2546/2211>
107. **Saville (1963)** Saville, T. Jr. (1963) Hydraulic Model Study of Transmission of Wave Energy by Low—Crested Breakwater. US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington DC.
108. **[SCT, 1986]** Secretaría de Caminos y Transportes, Dirección de Obras Marítimas, "Estudio de Evolución de la Línea de Playa entre Progreso y Chelem". Yucatán, México, 1986.
109. **[SCT, 2001]** Secretaría de Caminos y Transportes, "Manual de dimensionamiento portuario", 2001, México.



110. **Seabrook y Hall (1997, 1998)** Seabrook, S. and K. Hall. 1998. Wave transmission at submerged rubble-mound breakwaters. In: Proceedings of the 26th Coastal Engineering Conference (ASCE, Copenhagen, Denmark),. pp.2000–2013.
111. **[Secretaría de Marina, 1974]** Secretaría de Marina, 1974. Atlas de Corrientes Superficiales del Océano Atlántico y Golfo de México.
112. **[SEDUMA, 2011]** Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, "Proyecto: Estudio topobatimétrico de la zona entre las escolleras de Chuburná y Yucalpetén", Yucatán, 2011.
113. **[Seelig,1980]** Seelig William N., "Two-Dimensional Test of Wave Transmission and Reflection Characteristics of Laboratory Breakwaters", Technical Report No. 80.1 U.S Army, Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center.
114. **[Short, 1999]** Short A.D. 1999, "Beaches. In: Short AD (Ed.), Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. John Wiley & Sons, West Sussex, UK, pp. 3–20.
115. **Siladhama y Hall (2003)** Diffraction Effect on Wave Transmission at Sumerged Breakwaters, Index paper, Internet Version.
116. **[Silvester-Hsu, 1997]** Silvester R. and Hsu, "Coastal Stabilization". Advanced Series on Ocean Engineerin, World Scientific Publishing Co, Pte.Ltd, London Eng.
117. **[SNET, 2009]** Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Servicio Oceanográfico Nacional, El Salvador. . <http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/pronostico/oleaje/>
118. **Sollit y Cross (1976)** Sollitt, C. K., and R. H. Cross, "Wave Reflection and Transmission at Permeable Breakwaters", TP 76-8, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1976.
119. **[Steffen et al, 2004]** Steffen, W., A. Sanderson, P. D. Tyson, J. Jager, P. M. Matson, B. Moore, III, F. Oldfield, K. Richardson, H. J. Schnellhuber, B. L. Turner, II, and R. J. Wasson, "Global change and the Earth system: a planet under pressure", Springer-Verlag, New York, New York, USA. 336 pp., 2004.
120. **[Stokes, 1880]** Stokes, G. G. 1880. Math. Phys. Papers, Vol 1, Camb. Univ. Press., Coastal Engineering Manual.



121. **[Suarez, 2001]** Jaime Suárez Días, "Control de erosión en zonas tropicales", Universidad Industrial de Santander, Instituto de investigación sobre erosión y deslizamientos, cap.14, p.p 526-545, Colombia.
http://erosion.com.co/index.php?option=com_docman&task=doc..
122. **[Sudgen y John, 1976]** Sugden, D.E. y John, B.S. (1976). Glaciers and landscape. A geomorphological approach. Edward Arnold, London.
123. **[Sverdrup - Munk 1947]** Sverdrup, H.U., and Munk, W.H. (1947). Wind, sea, and swell: Theory of relations for forecasting. Hydrographic Office, U.S. Navy, Publ. No. 601.
124. **[Torres, 2011]** Alec Torres Freyermuth, "Dinámica costera en Yucatán: hacia un estudio integral", Primer foro sobre la erosión costera en Yucatán. Mérida Yucatán, 25 de Junio de 2011.
125. **[Tucker, 1994]** Tucker M.J, "Near Shore Wave height during storms", Coastal Engineering Vol. 24 p.p 111-136.
126. **[Turk, 1996]** Turk, G.F. Melby, J.A, "Unidades de Armadura de Concreto CORE-LOC Lineamientos Técnicos", Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, Vicksburg, MS, U.S.A. 1996
127. **[UAMAE, 2010]** Unidad Administrativa de Medio Ambiente del Excmo. Ayuntamiento de Las Palmas de gran Canaria España.
<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>
128. **[UNAM, 1993]** El servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM. Datos mareográficos desde 1993.
<http://www.mareografico.unam.mx/Mareografico/>
129. **[UNAM, 1999]** El servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM. Datos mareográficos desde 1999.
<http://www.mareografico.unam.mx/Mareografico/>
130. **[USACE, 1984]** United States Army Corps of Engineers , "Shore Protection Manual", Coastal Engineering Research Centre, Department of the Army, U.S.A.
131. **Van der Meer (1988)** Van der Meer, J.W. "Rock Slopes and Gravel Beaches Under Wave Attack", Delft Hydraulics Communication No. 396, 1988.



132. **Van der Meer (1990 y 1991)** Van der Meer, J.W. and Pilarczyk, K.W. "Stability of Low-Crested and Reef Breakwaters", Coastal Engineering '90, American Society of Civil Engineers, New York, 1990, pp. 1375- 13 88. y 1991).
133. **Van der Meer (1991)** Van der Meer J.W. and d'Angremond, K. "Wave transmission at low-crested structures, Coastal structures and breakwaters", Proceedings of the conference organized by the institution of Civil Engineers, London, 6-8 Nov. 1991.
134. **Van der Meer et al (2000)** Jentsje W. Van der Meer, Riccardo Briganti, Barbara Zanuttigh, Baoxing Wang. (2000), "Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change.
135. **Van der Meer et al (2004)** Van der Meer, J.W., R. Briganti, B. Wang and B. Zanuttigh. Wave transmission at low-crested structures, including oblique wave attack. ASCE, ICCE 2004, Lisbon pp. 4152 - 4164.
136. **Van der Meer y Daemen (1994)** Van der Meer, J.W., and Daemen, F.R. "Stability and Wave Transmission at Low-Crested Rubblemound Structures", Journal of Waterway, Port and Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, 120: 1, 1994, pp. 1 - 19.
137. **[Van Dorn, 1953]** Van Dorn, W.C. (1953), "Wind Stress on an Artificial Pond," Journal of Marine Research, Volume 12, 1953.
138. **[Vazquez, 2010]** Alfonso Vazquez Botello, "Vulnerabilidad de las zonas costeras del "Pacífico Mexicano (Sinaloa- Nayarit) ante el cambio climático", Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 2010.
139. **[Vergara, 1993]** Miguel Angel Vergara Sánchez, "Técnicas de Modelación en Hidráulica", 1993, Ediciones Alfaomega, Ciudad de México.
140. **[WRI, 2000]** World Resources Institute, <http://www.wri.org/>, 2000. "Statistical Distribution of Periods And Heights of Ocean Waves", Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 9, pp 320-735.



ANEXOS.

I. ANÁLISIS DIMENSIONAL.

El análisis dimensional es una herramienta conceptual empleada constantemente en el desarrollo de modelos con la finalidad de poder identificar, comprender y relacionar las variables involucradas en el comportamiento de los fenómenos, por medio de la obtención de expresiones adimensionales también denominadas números o parámetros adimensionales.

De esta forma se reduce el número de las variables agrupándolas en números o parámetros adimensionales los cuales nos permiten manejar de forma más simplificada, las variables involucradas en el fenómeno de estudio. [Vergara, 1995].

I.I. Magnitudes físicas.

Conocer las variables y las magnitudes físicas involucradas en el fenómeno es la base para el análisis dimensional.

Las magnitudes físicas se clasifican en dos grupos.

El primer grupo se constituye por las magnitudes físicas básicas o fundamentales como son: longitud (L), masa (M) y tiempo (T). El segundo grupo se compone por las magnitudes físicas secundarias que se derivan de las fundamentales como son: el área (A), volumen (V), velocidad (v), gasto (Q), fuerza (F), entre otras.

Para nuestro estudio, el sistema de dimensiones que se emplea es el [M,L,T] masa, longitud y tiempo; en su forma equivalente, fuerza, longitud y tiempo [F,L,T], ambas ligadas a la segunda Ley de Newton, que en función de dimensiones se escribe como:

$$[F] = [MLT^{-2}]$$

En la siguiente tabla se presentan las magnitudes físicas de las variables que intervienen en nuestro fenómeno de investigación.



VARIABLES	SIMBOLO	MAGNITUDES FUNDAMENTALES
<i>De flujo</i>		
Altura de ola incidente	H_i	[L]
Altura de ola transmitida	H_t	[L]
Período	T	[T]
Longitud de ola en Aguas profundas	L_o	$[LT^2]$
Aceleración de la gravedad	g	$[LT^2]$
<i>De fluido</i>		
Viscosidad cinemática	ν	$[L^2T^{-1}]$
Peso específico	γ	$[ML^{-2}T^{-2}]$
<i>De frontera</i>		
Pendiente del talud de la estructura	α	[ad]

Tabla A-1. Magnitudes fundamentales de las variables involucradas en el fenómeno de estudio.

I.II. Teorema π de Buckingham.

Como el número de variables implicadas en nuestro estudio es mayor de cuatro, empleamos el Teorema π de Buckingham, mediante el cual pueden agruparse magnitudes de estas variables, en un número menor de grupos adimensionales significativos, a partir de los cuales puede establecerse una ecuación homogénea adimensional. A estos grupos adimensionales se les conoce como números π .

El teorema π de Buckingham, establece "que dada una relación física expresable mediante una ecuación en la que están involucradas n variables, las cuales se expresan en términos de k cantidades físicas dimensionalmente independientes, entonces la ecuación original puede escribirse equivalentemente como una ecuación con una serie de $n - k$ números adimensionales construidos con las variables originales".

Los pasos a seguir para la aplicación del teorema es el siguiente:

1. Se escriben las n magnitudes físicas q , que intervienen en el fenómeno de estudio, anotando sus dimensiones y el número k de dimensiones fundamentales. Existirán $(n-k)$ números π .
2. Seleccionar k de estas magnitudes, sin que haya ninguna sin dimensiones, ni dos magnitudes que tengan las mismas dimensiones. Todas las dimensiones fundamentales deben incluirse colectivamente en las magnitudes seleccionadas.
3. El primer grupo π puede expresarse como el producto de las magnitudes escogidas, elevada cada una a un exponente desconocido y una de las otras magnitudes elevada a una potencia conocida (normalmente se toma igual a uno).
4. Mantener las magnitudes escogidas en (2) como variables repetidas y escoger una de las restantes variables para establecer el nuevo número π . Repetir el procedimiento para obtener los siguientes números π .
5. En cada uno de los grupos π , determinar los exponentes desconocidos mediante el análisis dimensional.



Se recomienda considerar las siguientes relaciones.

- a) Si una magnitud es adimensional constituye un grupo π sin necesidad de aplicar el procedimiento anterior.
- b) Si dos magnitudes físicas cualesquiera tienen las mismas dimensiones su cociente será un número adimensional π .
- c) Cualquier número π puede ser sustituido por una potencia del mismo, incluida π^{-1} .
- d) Cualquier número π puede sustituirse por su producto por una constante numérica.
- e) Cualquier número π puede expresarse como función de otros números π .

[Giles, 2002].

Aplicando y sustituyendo estas variables en la ecuación homogénea del teorema π se obtienen los siguientes parámetros:

El **Número de Euler** relaciona las fuerzas de inercia con las de presión.

$$E_u = \frac{F}{\rho V^2 L^2} = \frac{\rho}{\rho V^2} \dots\dots (A1)$$

Para flujos en general donde predomina la presión.

El **Número de Froude** relaciona las fuerzas de inercia con las de gravedad.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \dots\dots (A2)$$

Se aplica a canales con flujo a superficie libre.

El **Número de Reynolds** relaciona las fuerzas de inercia con las de viscosidad.

$$R_e = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \dots\dots (A3)$$

Aplicado a flujos viscosos, laminares, en transición y turbulentos.

El **Número de Weber** relaciona las fuerzas de inercia con las de tensión superficial.

$$W_e = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \dots\dots (A4)$$

Aplicable cuando predomina la tensión superficial.



El **Número de Cauchy** relaciona las fuerzas de inercia con las de elasticidad.

$$C_a = \frac{\rho V^2}{E} \dots\dots(A5)$$

Aplicable en flujos compresibles. Si el módulo de elasticidad volumétrica se asocia a la velocidad, se transforma en v/c , denominándose número de Mach.

En donde:

ρ = Densidad de masa

V = Velocidad

L = Longitud

μ = Coeficiente de viscosidad dinámica

ν = Coeficiente de viscosidad cinemática

g = Aceleración de la gravedad.

F = Fuerza

p = Presión

σ = Tensión superficial

E = Módulo de Elasticidad

C = Velocidad del sonido

Si se considera que para el fenómeno de estudio, las fuerzas actuantes de verdadero interés son las de inercia y viscosidad, entonces el número adimensional a emplear será únicamente el de Reynolds (Re). De manera semejante, considerando solamente la existencia de las fuerzas de inercia y elasticidad, las de inercia y tensión superficial, las de inercia y gravitación, el modelo se regirá bajo el criterio de Cauchy, de Weber o de Froude respectivamente.

I.III. Condiciones de similitud.

La similitud se logra cuando todos los factores que influyen de manera importante en el fenómeno se encuentran en proporción adecuada entre el modelo y el prototipo.

Para que los datos obtenidos en el modelo físico puedan ser válidos y transferibles al prototipo o viceversa se requiere que ambos sistemas cumplan con tres condiciones de similitud: *geométrica*, *cinemática* y *dinámica*.

La *similitud geométrica*, se cumple cuando las dimensiones homologas entre el prototipo y el modelo son iguales, obteniendo para ello la escala de líneas.

La *similitud cinemática* se cumple cuando las curvas de distribución de trayectorias y velocidades en secciones homólogas en ambos sistemas deben ser geoméricamente semejantes, por lo que se debe cumplir con una escala de líneas de tiempos que cumpla con esta condición.



En la similitud *dinámica* las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo están relacionadas entre sí mediante un valor fijo, el cual se denomina escala de fuerzas. [C.F.E., 1983].

Las condiciones requeridas para el total cumplimiento de la similitud se obtienen a partir del segundo principio del movimiento de Newton $F = Ma$. Las fuerzas que actúan pueden ser cualquiera o una combinación de las mismas: fuerzas viscosas, fuerzas debidas a la presión, fuerzas gravitacionales, fuerzas debidas a la tensión superficial y fuerzas elásticas.

I.IV. Análisis dimensional del estudio.

Las variables consideradas en nuestro fenómeno de estudio son: la pendiente del canal (β), pendiente del talud del rompeolas (α), peso específico del agua (γ) y su viscosidad cinemática (ν), altura de la ola incidente (H_i), longitud de ola en aguas profundas (L_o), período (T), celeridad (C), profundidad (h), frecuencia (f), aceleración de la gravedad (g).

De lo anterior, las variables de flujo y la profundidad de medición son constantes en todos los ensayos, la celeridad depende del periodo y de la longitud de ola en aguas profundas, y la frecuencia es la inversa del período; así mismo la pendiente del canal para todos los ensayos es la misma. Por lo tanto estas variables se consideran excluidas para el análisis dimensional [Hughes, 1993].

A continuación por medio del teorema de Buckingham, se presenta el análisis dimensional realizado para la ejecución de este estudio:

$$f(H_i, T, L_o, g, \alpha, \nu, \gamma) = 0 \dots \dots \dots (A6)$$

El número de parámetros adimensionales z se obtiene de restar el número de variables físicas y el número de magnitudes fundamentales (masa, longitud y tiempo).

$$n = 7 \quad k = 3; \quad q = n - k = 7 - 3 = 4 \dots \dots \dots (A7)$$

Por lo que, se tendrán 4 parámetros adimensionales π .

$$f(\pi) = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \dots \dots \dots (A8)$$

A continuación se enuncian las variables respecto a sus magnitudes fundamentales:

$$f(L, T, L, L T^2, M^0 L^0 T^0, L^2 T^{-1}, M L^{-2} T^{-2}) = 0$$

sustituyendo :

$$\pi_1 = (L)^{x1, i} (T)^{x2, i} (L)^{x3, i} (L T^{-2})^{x4, i} (L^2 T^{-1})^{x5, i} (M L^{-2} T^{-2})^{x6, i} \dots \dots \dots (A9)$$

$$\pi_1 = (L)^{x1, i + x3, i + x4, i + 2x5, i - 2x6, i} (M)^{x6, i} (T)^{x2, i - 2x4, i - x5, i - 2x6, i} \dots \dots \dots (A10)$$



$$\text{Longitud (L)} = x_{1,i} + x_{3,i} + x_{4,i} + 2x_{5,i} - 2x_{6,i}$$

$$\text{Masa (M)} = x_{6,i}$$

$$\text{Tiempo (T)} = x_{2,i} - x_{4,i} - x_{5,i} - 2x_{6,i}$$

Se obtienen los parámetros π :

$$\pi_1 = H^{x_{1,1}} T^{x_{2,1}} \gamma^{x_{6,1}} Lo \dots (A11)$$

$$\pi_2 = H^{x_{1,2}} T^{x_{2,2}} \gamma^{x_{6,2}} g \dots (A12)$$

$$\pi_3 = H^{x_{1,3}} T^{x_{2,3}} \gamma^{x_{6,3}} v \dots (A13)$$

$$\pi_4 = \alpha \dots (A14)$$

Resolviendo los números π :

$$\pi_1 = H^{x_{1,1}} T^{x_{2,1}} \gamma^{x_{6,1}} Lo \dots (A15)$$

$$\pi_1 = (L)^{x_{1,1}} (T)^{x_{2,1}} (M L^{-2} T^{-2})^{x_{6,1}} (L) \dots (A16)$$

$$\pi_1 = (L)^{x_{1,1} - 2x_{6,1} + 1} (M)^{x_{6,1}} (T)^{x_{2,1} - 2x_{6,1}} \dots (A17)$$

Desarrollando para cada magnitud se tiene:

$$\text{Longitud (L)} = x_{1,1} - 2x_{6,1} + 1 = 0; x_{1,1} = -1$$

$$\text{Masa (M)} = x_{6,1} = 0; x_{6,1} = 0$$

$$\text{Tiempo (T)} = x_{2,1} - 2x_{6,1} = 0; x_{2,1} = 0$$

$$\pi_1 = H^{-1} T^0 \gamma^0 Lo^1$$

$$\pi_1 = \frac{Lo}{H}$$

$$\pi_2 = H^{x_{1,2}} T^{x_{2,2}} \gamma^{x_{6,2}} g \dots (A18)$$

$$\pi_2 = (L)^{x_{1,2}} (T)^{x_{2,2}} (M L^{-2} T^{-2})^{x_{6,2}} (L T^{-2}) \dots (A19)$$

$$\pi_2 = (L)^{x_{1,2} - 2x_{6,2} + 1} (M)^{x_{6,2}} (T)^{x_{2,2} - 2x_{6,2} - 2} \dots (A20)$$

Desarrollando para cada magnitud se tiene:

$$\text{Longitud (L)} = x_{1,2} - 2x_{6,2} + 1 = 0; x_{1,2} = -1$$

$$\text{Masa (M)} = x_{6,2} = 0; x_{6,2} = 0$$

$$\text{Tiempo (T)} = x_{2,2} - 2x_{6,2} - 2 = 0; x_{2,2} = -2$$

$$\pi_2 = H^{-1} T^{-2} \gamma^0 g^1$$

$$\pi_2 = \frac{T^2 g}{H}$$

$$\pi_3 = H^{x_{1,3}} T^{x_{2,3}} \gamma^{x_{6,3}} v \dots (A21)$$

$$\pi_3 = (L)^{x_{1,3}} (T)^{x_{2,3}} (M L^{-2} T^{-2})^{x_{6,3}} (L^2 T^{-1}) \dots (A22)$$

$$\pi_3 = (L)^{x_{1,3} - 2x_{6,3} + 2} (M)^{x_{6,3}} (T)^{x_{2,3} - 2x_{6,3} - 1} \dots (A23)$$



Desarrollando para cada magnitud se tiene:

$$\text{Longitud (L)} = x_{1,3} - 2x_{6,3} + 2 = 0; x_{1,3} = 2$$

$$\text{Masa (M)} = x_{6,3} = 0; x_{6,3} = 0$$

$$\text{Tiempo (T)} = x_{2,3} - 2x_{6,3} - 1 = 0; x_{2,2} = -1$$

$$\pi_3 = H^2 T^{-1} \gamma^0 v^1$$

$$\pi^3 = \frac{Tv}{H^2}$$

Como π_4 está en función de la pendiente del talud de la estructura, entonces: $\pi_4 = \alpha$
Una vez obtenidos los valores para cada π , se sustituirán en la ecuación 8.

$$f(\pi) = f\left(\frac{Lo}{H}, \frac{T^2 g}{H}, \frac{Tv}{H^2}, \alpha\right) \dots (A24)$$

Resolviendo la ecuación 9, tenemos:

$$\frac{1}{\pi_1} = \frac{H}{L}; \dots (A25)$$

Debido a que un número puede sustituirse por una potencia del mismo, da como resultado la relación de esbeltez de la ola.

$$\frac{1}{\pi_3} = \frac{H^4}{Tv} = \frac{HH}{Tv} = \frac{VH}{v} = Re; \text{ obteniendo un parámetro del número de Reynolds.}$$

Realizando el producto de los números π_1 y π_2 se obtiene:

$$\pi_1 * \pi_2 = \frac{Lo}{H} * \frac{T^2 g}{H} = \frac{LoT^2 g}{H^2}; \dots (A26)$$

obteniendo un parámetro del tipo del número de Froude:

$$\frac{H^2}{LoT^2 g} = \frac{V^2}{Log} = \frac{V^2}{\sqrt{Log}} = Fr; \dots (A27)$$

Se plantea una ecuación con los parámetros generados.

$$f\left(\frac{H}{L}, Fr, Re, \alpha\right) \dots (A28)$$

De acuerdo con la relación de esbeltez se tiene lo siguiente:

$$\left(\frac{H}{Lo}\right)_m = \left(\frac{H}{Lo}\right)_p$$



donde

$$\left(\frac{H_m}{H_p}\right) = \left(\frac{L_{Om}}{L_{Op}}\right); EH = ELo \dots\dots(A29)$$

La escala de líneas vertical es igual a la escala de líneas horizontal, ya que se trata de un modelo sin distorsión, observando que se cumple al tener la escala de altura incidente igual a la escala de longitud de ola en aguas profundas.

Para el número de Reynolds obtenido se tiene:

$$\left(\frac{VH}{\nu}\right)_m = \left(\frac{VH}{\nu}\right)_p \dots\dots(A30)$$

donde

$$\frac{\left(\frac{V_p}{V_m}\right)\left(\frac{H_p}{H_m}\right)}{\frac{\nu_p}{\nu_m}} = 1; \frac{EVEH}{Ev} = 1; EV = \frac{Ev}{EH} \dots\dots(A31)$$

Teniendo como resultado la escala de velocidades y de viscosidad cinemática, y tomando en cuenta el número de Froude, se tiene:

$$\left(\frac{V^2}{\sqrt{Log}}\right)_m = \left(\frac{V^2}{\sqrt{Log}}\right)_p \dots\dots(A32)$$

donde:

$$\frac{\frac{V_p}{V_m}}{\left(\frac{L_{Op}}{L_{Om}}\right)^{1/2} \left(\frac{g_p}{g_m}\right)} = 1; \frac{EV}{(ELo)^{1/2} (Eg)^{1/2}} = 1; \dots\dots(A33)$$

$$EV = (ELo)^{1/2} (Eg)^{1/2} \dots\dots(A34)$$

obteniendo la escala de aceleración de la gravedad y de longitud en aguas profundas, al tener esta forma se considerara igual a la unidad.

$$EV = (EH)^{1/2} \dots\dots(A35)$$

Igualando las ecuaciones A31 y A35, tenemos las condiciones de similitud de Reynolds y Froude:

$$Ev (EH)^{-1} = (EH)^{1/2}$$

$$EH = Ev^{2/3}$$



DATOS DE CALIBRACIÓN Y ENSAYOS

A continuación se presentan una serie de datos obtenidos de la calibración y de dos ensayos.

```

HR Cal Version HR Cal 2.1 Written In June 1992.
CALIBRATION VALUES FOR FILE 10ABR12 on 10/ 4/12 at 13:37:11

Channel Voltage Range Calibration-Factor Zero Level GOODFIT
0 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
1 10.0 1.317451e-003 2047 9.986276e-001 - Sensor A.I.
2 10.0 4.082921e-003 2047 9.992945e-001 - Sensor A.R.
3 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
4 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
5 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
6 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
7 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
8 10.0 8.582149e-002 2047 9.869419e-001 - No label
9 10.0 1.323918e-001 2047 9.929382e-001 - No label
10 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
11 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
12 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
13 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
14 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
15 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
16 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
17 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
18 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
19 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
20 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
21 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
22 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
23 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
24 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
25 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
26 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
27 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
28 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
29 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
30 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
31 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
32 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
33 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
34 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
35 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
36 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
37 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
38 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
39 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
40 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
41 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
42 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
43 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
44 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
45 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
46 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
47 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label

MPSCALE = 1.000000e+000
DEPTH = 1.000000e+000 m
X1 = 1.000000e+000 m
X2 = 1.000000e+000 m
X3 = 1.000000e+000 m
    
```

Fig. A-1. Calibración para 1.00 metro de sumergencia.



```

HR Cal Version HR Cal 2.1 Written In June 1992.
CALIBRATION VALUES FOR FILE 11ABR12 on 11/ 4/12 at 11:51:49

Channel Voltage Range Calibration-Factor Zero Level GOODFIT
0 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
1 10.0 9.998131e-004 2047 9.998129e-001 - Sensor A.I.
2 10.0 4.087864e-003 2047 9.953958e-001 - Sensor A.R.
3 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
4 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
5 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
6 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
7 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
8 10.0 8.778775e-002 2047 9.876122e-001 - No label
9 10.0 1.201753e-001 2047 9.914424e-001 - No label
10 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
11 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
12 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
13 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
14 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
15 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
16 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
17 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
18 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
19 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
20 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
21 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
22 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
23 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
24 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
25 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
26 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
27 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
28 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
29 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
30 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
31 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
32 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
33 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
34 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
35 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
36 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
37 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
38 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
39 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
40 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
41 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
42 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
43 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
44 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
45 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
46 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label
47 10.0 1.000000e+000 2047 0.000000e+000 - No label

MPSCALE = 1.000000e+000
DEPTH = 1.000000e+000 m
X1 = 1.000000e+000 m
X2 = 1.000000e+000 m
X3 = 1.000000e+000 m
    
```

Fig. A-2. Calibración para 0.50 metros de sumergencia.



```

HR Warp Version 2.0a  Written In April 1993.
Results for real time wave analysis run on 17/ 5/12 at 12:42:57

ENSAYO 5 SERIE 5 T=10.00 s y H=3.97 m

Calibration file used           = 10ABR12 - 10/4/2012  13:37:6
Number of data batches         = 10
Number of waves per batch      = 30
Time interval between samples  = 0.2795  Prototype Seconds
Model/Prototype scale ratio    = 1.0000

Crossing level for channel  1 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel  2 = RUNNING MEAN

*** Calibration data ***

Calibration factor for channel  1 = 0.00131745 - Sensor A.I.
Calibration factor for channel  2 = 0.00408292 - Sensor A.R.

Digital zero level for channel  1 = 2047
Digital zero level for channel  2 = 2047

Note 1. A wave is counted if it passes through the crossing level.
Note 2. +ve value for min v. or max v. means above zero level.
Note 3. +ve value for min disp. or max disp. means above crossing level.
Note 4. Crossing level is relative to the zero level.
Note 5. Mean is relative to the zero level.

CHAN  BATCH  BAD  H MAX      H3      H BAR      TBAR
1      1      0  9.196e-01  7.471e-01  4.779e-01  1.258e+00
2      1      0  1.735e+00  1.184e+00  7.326e-01  1.658e+00
1      2      0  1.241e+00  8.876e-01  5.737e-01  1.500e+00
2      2      0  1.923e+00  1.260e+00  7.511e-01  1.724e+00
1      3      0  1.105e+00  8.089e-01  5.347e-01  1.509e+00
2      3      0  1.711e+00  1.320e+00  8.840e-01  1.835e+00
1      4      0  1.115e+00  8.691e-01  5.131e-01  1.370e+00
2      4      0  1.617e+00  1.253e+00  8.431e-01  1.724e+00
1      5      0  1.042e+00  8.587e-01  5.564e-01  1.472e+00
1      6      0  1.087e+00  7.312e-01  4.794e-01  1.332e+00
2      5      0  1.609e+00  1.279e+00  8.079e-01  1.696e+00
1      7      0  1.353e+00  9.783e-01  6.178e-01  1.658e+00
2      6      0  1.809e+00  1.596e+00  1.084e+00  1.901e+00
1      8      0  1.096e+00  8.524e-01  5.230e-01  1.398e+00
2      7      0  1.511e+00  1.160e+00  8.260e-01  1.798e+00
1      9      0  1.151e+00  8.698e-01  5.438e-01  1.220e+00
2      8      0  1.768e+00  1.240e+00  7.924e-01  1.714e+00
1     10      0  1.103e+00  8.429e-01  5.320e-01  1.528e+00
2      9      0  1.645e+00  1.191e+00  7.704e-01  1.658e+00
2     10      0  2.323e+00  1.342e+00  9.037e-01  1.835e+00
    
```

```

RUN RESULTS

CHAN  BAD  MEAN OF      MEAN OF      MEAN OF      TBAR
      0  H MAX      H3      H BAR
1      0  1.121e+00  8.441e-01  5.352e-01  1.425e+00
2      0  1.765e+00  1.280e+00  8.395e-01  1.754e+00
    
```

Fig. A-3. Ensayo para ancho de coronamiento de 34 metros y sumergencia de 1.00 metro.



```

HR Warp Version 2.0a  Written In April 1993.
Results for real time wave analysis run on 27/ 4/12 at 13:18:57

ENSAYO 5 SERIE 3 T=10.00 s y H=3.97 m

Calibration file used           = 10ABR12 - 10/4/2012  13:37:6
Number of data batches         = 10
Number of waves per batch      = 30
Time interval between samples  = 0.2795  Prototype Seconds
Model/Prototype scale ratio    = 1.0000

Crossing level for channel  1 = RUNNING MEAN
Crossing level for channel  2 = RUNNING MEAN

*** Calibration data ***

Calibration factor for channel  1 =  0.00131745 - Sensor A.I.
Calibration factor for channel  2 =  0.00408292 - Sensor A.R.

Digital zero level for channel  1 =  2047
Digital zero level for channel  2 =  2047

Note 1. A wave is counted if it passes through the crossing level.
Note 2. +ve value for min v. or max v. means above zero level.
Note 3. +ve value for min disp. or max disp. means above crossing level.
Note 4. Crossing level is relative to the zero level.
Note 5. Mean is relative to the zero level.

  CHAN  BATCH  BAD  H MAX      H3      H BAR      TBAR

  2      1      0  1.833e+00  1.370e+00  8.840e-01  1.332e+00
  1      1      0  1.038e+00  8.422e-01  5.525e-01  1.910e+00
  2      2      0  2.242e+00  1.716e+00  1.070e+00  1.602e+00
  1      2      0  1.502e+00  8.649e-01  5.241e-01  1.686e+00
  2      3      0  1.862e+00  1.588e+00  9.784e-01  1.509e+00
  1      3      0  1.196e+00  8.668e-01  5.918e-01  1.901e+00
  2      4      0  1.988e+00  1.511e+00  8.755e-01  1.491e+00
  1      4      0  1.072e+00  9.072e-01  5.823e-01  1.668e+00
  2      5      0  2.201e+00  1.430e+00  9.867e-01  1.463e+00
  2      6      0  2.564e+00  1.471e+00  9.749e-01  1.547e+00
  1      5      0  1.281e+00  1.006e+00  6.691e-01  1.929e+00
  2      7      0  2.209e+00  1.680e+00  1.080e+00  1.593e+00
  1      6      0  1.184e+00  9.661e-01  6.439e-01  1.696e+00
  2      8      0  1.731e+00  1.306e+00  8.992e-01  1.425e+00
  1      7      0  1.049e+00  6.871e-01  4.746e-01  1.649e+00
  2      9      0  1.747e+00  1.411e+00  9.979e-01  1.444e+00
  1      8      0  1.352e+00  8.548e-01  5.425e-01  1.714e+00
  2     10      0  1.731e+00  1.479e+00  9.334e-01  1.444e+00
  1      9      0  1.559e+00  9.714e-01  6.369e-01  1.742e+00
  1     10      0  1.020e+00  8.227e-01  5.734e-01  1.817e+00

RUN RESULTS

  CHAN  BAD  MEAN OF  MEAN OF  MEAN OF  TBAR
         0  H MAX    H3      H BAR

  1      0  1.225e+00  8.782e-01  5.791e-01  1.771e+00
  2      0  2.011e+00  1.495e+00  9.680e-01  1.485e+00

```

Fig. A-4. Ensayo para ancho de coronamiento de 50 metros y sumergencia de 1.00 metro.