



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio experimental y  
caracterización de rompeolas  
híbrido con manglar**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Carlos Antonio Martínez Barradas

**DIRECTORA DE TESIS**

Dra. Paola Elizabeth Rodríguez Ocampo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/010/22

Señor  
CARLOS ANTONIO MARTÍNEZ BARRADAS  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M.I. PAOLA ELIZABETH RODRÍGUEZ OCAMPO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE ROMPEOLAS HÍBRIDO CON MANGLAR"**

- I. INTRODUCCIÓN
- II. OSCILACIONES DEL MAR
- III. USO DE ELEMENTOS VIVOS EN LA PROTECCIÓN DE LA COSTA
- III. GENERALIDADES SOBRE EL MANGLAR Y SU USO COMO ELEMENTO DE PROTECCIÓN
- IV. PROPUESTA DE OBRA DE PROTECCIÓN DE MANGLAR
- V. RESULTADOS
- VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

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

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

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 5 de abril del 2022.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. MARCO TULIO MENDOZA ROSAS

MTMR/gar.



*A mis padres*



## AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Ingeniería** por haberme formado como ingeniero, por ser mi segunda casa.

Al **Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM** por permitirme estos meses de trabajo en sus instalaciones.

A la **Dra. Paola E. Rodríguez Ocampo** por todo el tiempo dedicado, por el trabajo que conllevó ser mi directora de tesis.

Al **Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin** por brindarme todas las facilidades y conocimientos requeridos.

Al **M.I. José Partida Ramírez** por su apoyo incondicional y su paciencia.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería que contribuyeron a mi formación profesional.

A Michelle, Merry y Ricardo... por su amistad.

A Vera, por su cariño.

A mis padres, Carlos e Isabel, gracias por todo.



## RESUMEN

Como respuesta a cómo vincular los planteamientos de la ingeniería ecológica dentro de la ingeniería costera en miras de combatir la pérdida de manglares, un problema ecológico nacional, se propuso un rompeolas de cubípodos sin núcleo con un cajón de concreto en su coronación en el cual tener individuos de mangle. Se caracterizó el comportamiento de dicha estructura de manera experimental y a escala, acotándose a los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación, al rebase y condiciones de rotura; con distintas densidades de individuos de *Rizophora mangle* de cinco años de edad bajo distintas profundidades de mar, distintas intensidades de oleaje y regímenes de oleaje regular e irregular. Se excluyó el comportamiento del suelo y el flujo de agua requerido dentro del cajón. Se encontró una relación entre la densificación del mangle con la disminución del rebase de la estructura y del coeficiente de transmisión. El comportamiento de la reflexión y la disipación no fue constante en sus tendencias como si lo fue el de los anteriores.

## ABSTRACT

In response to how to link the approaches of ecological engineering within coastal engineering in order to combat mangrove loss, a national ecological problem, a coreless cubipod breakwater with a concrete box at its crown in which to grow mangrove was proposed. Was characterized experimentally and at scale, delimiting the analysis to reflection, transmission, dissipation, overtopping and breaking conditions; with five-year-old *Rizophora mangle* individuals under ranges of sea depths, wave intensities and vegetation densities with regular and irregular wave regimes. The soil behaviour inside the box, as well as required water fluxes were excluded. A relation was found between the densification of mangrove with the decrease of the overtopping and the transmission coefficient. Reflection and dissipation behaviour was not as constant in its tendencies as it was in the previous ones.

# ÍNDICE

SIMBOLOGÍA .....	4
FIGURAS .....	5
GRÁFICAS .....	5
TABLAS .....	6
INTRODUCCIÓN .....	15
JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN .....	16
OBJETIVOS.....	17
Objetivos generales.....	17
Objetivos específicos.....	17
ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO .....	18
1. OSCILACIONES DEL MAR .....	19
1.1 Teorías de descripción de oleaje .....	24
1.1.1. Teorías para fondo horizontal .....	24
1.1.2. Teorías para fondo variable .....	28
2. USO DE ELEMENTOS VIVOS EN LA PROTECCIÓN DE LA COSTA .....	31
2.1. Razones para proteger la costa .....	31
2.2. Diques rompeolas para la protección de costas .....	32
2.3. Principios de ingeniería ecológica .....	33
2.4. Ejemplos del uso de elementos vivos.....	35
3. GENERALIDADES SOBRE EL MANGLAR Y SU USO COMO ELEMENTO DE PROTECCIÓN .....	39
3.1. Manglar, tipos y formas.....	39
3.2. Condiciones de supervivencia del manglar.....	40
3.3. Servicios ecosistémicos del manglar.....	42
3.4. El manglar y la protección de la costa .....	43
4. PROPUESTA DE OBRA DE PROTECCIÓN CON MANGLAR .....	45
4.1. Descripción de la estructura .....	45
4.2. Principio de funcionamiento .....	50
4.2.1. Método para escalar el modelo.....	50
4.2.2. Características de niveles de mar, oleaje en ensayos y sobrelevación de tormenta .....	51
4.3. Descripción del modelo experimental .....	54
4.3.1. Método de ubicación de sensores .....	56
4.3.2. Método y programa para análisis de datos de sensores de nivel .....	58
4.4. Resultados esperados.....	59
5. RESULTADOS .....	61

## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE ROMPEOLAS HÍBRIDO CON MANGLAR

5.1.	Diseño de dique en talud.....	61
5.2.	Ascenso máximo y rebase esperado.....	62
5.3.	Desempeño de la obra respecto de la energía de rebase.....	70
5.4.	Rotura de oleaje .....	86
6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	91
7.	ANEXOS .....	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	100



## SIMBOLOGÍA

$B_s$ : Ancho del dique al nivel medio del mar.

$C_0$ : celeridad de ola en aguas profundas

$d$ : profundidad

d.a.p: Diámetro a altura de pecho

$D$ : Diámetro característico de las piezas de la coraza.

$DC$ : coronación control (sin mangle)

$D1$ : coronación con distribución tipo 1 (95 individuos)

$D2$ : coronación con distribución tipo 2 (180 individuos)

$f_e$ : fuerza debida a campos externos

$g$ : gravedad

$H_0$ : altura de ola en aguas profundas

$H_b$ : altura de ola en rotura

$H_r$ : altura de ola reflejada

$H_s$ : altura de ola significativa

$H_i$ : altura de ola incidente

$I_r$ : número de Iribarren

$I_0$ : Iribarren en aguas profundas

$I_b$ : Iribarren local

$k$ : criterio de altura de rotura (0,8)

$K_d$ : coeficiente de disipación

$K_r$ : coeficiente de reflexión

$K_t$ : coeficiente de transmisión

$L$ : longitud de onda

$L_0$ : longitud de onda en aguas profundas

$L_b$ : longitud de onda local

$m$ : Pendiente de talud

$N$ : número de olas

$N.A.T$ : Nivel de aguas tranquilas

$p$ : componente de presión

$R_u$ : Ascenso máximo de rotura de oleaje

$S$ : daño adimensional del manto de un dique.

$T$ : periodo de onda

$\nu$ : la viscosidad cinemática del fluido

$x_b$ : Ancho de zona de rompiente

$\alpha$ : ángulo del talud desde la horizontal

$\xi$ : desplazamiento vertical de la partícula

$\zeta$ : desplazamiento horizontal de la partícula

$\eta$ : elevación de la superficie libre del agua

$\theta_0$ : ángulo de incidencia, considerando  $0^\circ$  la perpendicular.

$\rho$ : densidad

$\sigma$ : esfuerzos normales

$\Phi$ : potencial de velocidad de la onda

$\tau$ : esfuerzos tangenciales

$\nabla p$ : gradiente de presión

## FIGURAS

Figura 1. Onda sinusoidal (Chadwick et al., 2003) .....	20
Figura 2. Trayectoria de una partícula de agua ante las presiones del oleaje (Dean et al., 1984) .....	20
Figura 3. Presiones en el agua ante oleaje (Dean et al., 1984) .....	21
Figura 4. Reflexión de onda ante obstáculo vertical (Chadwick et al., 2003) .....	22
Figura 5. Difracción ante extremo de dique (Sañudo Oria, 2016) .....	22
Figura 6. Transmisión de oleaje a través de un rompeolas.(Van Der Meer, 1995) .....	23
Figura 7. Fotografías de tipos de rotura (Schierreck, Gerrit Jan., Verhagen et al., 2001). .....	24
Figura 8. Comportamiento de oleaje con líneas batimétricas paralelas a la línea de costa (Schierreck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996) .....	28
Figura 9. Esquema general de un rompeolas en talud.(Schierreck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996)32	
Figura 10. Tipo de estructuras flotantes (Schierreck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996) .....	33
Figura 11. Estructuras huecas para fomento de microhábitats direccionadas 45° desde la vertical hacia tierra adentro y hacia mar adentro respetivamente (Waltham et al., 2018). .....	36
Figura 12. Vista lateral de estructura rompeolas del modelo con medidas en metros. ....	45
Figura 13. Proporciones de cubípodo utilizado. ....	46
Figura 14. Dimensiones en centímetros de cubípodos de rompeolas modelo .....	46
Figura 15. Distribución de manglares en ensayos. ....	47
Figura 16. Mangle prototipo para creación de modelos .....	48
Figura 17. Mangle base para individuos modelo con medidas en centímetros.....	49
Figura 18. Elevaciones de mar para ensaye escaladas, medidas en metros, a pie de talud. ....	54
Figura 19. Posiciones de sensores y rampa central respecto a la pala de generación de oleaje en posición centrada. ....	56
Figura 20. Distancias entre sensores próximos al rompeolas.....	56
Figura 21. Distribución de sensores .....	57
Figura 22. Datos demandados por el programa. ....	58
Figura 23. Oleaje Caso 2, rotura por efecto de rampa. ....	63
Figura 24. Oleaje por ensayo para identificar presencia de ascenso máximo y rebase. ....	64
Figura 25. Interlineado para medición de ascenso de olas.....	65
Figura 26. Toma de rebase experimental. ....	67
Figura 27. Estaciones mareográficas a nivel nacional.....	95
Figura 28. Frecuencia de oleaje regular emitida por la pala. ....	96
Figura 29. Frecuencias de oleaje irregular emitida por la pala. ....	97
Figura 30. Porosidad de cubípodos (Medina et al., 2016) .....	97

## GRÁFICAS

Gráfica 1. Rango de compatibilidad de distintas teorías. ....	25
Gráfica 2. Comportamiento de una onda solitaria (Ávila et al., 2003). ....	26
Gráfica 3. Probabilidad conjunta de HS y T medio (Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, 2008). ....	52
Gráfica 4. Peso teórico de piezas por fórmula de Hudson.....	62
Gráfica 5. Ascenso máximo Oleaje Regular. ....	66
Gráfica 6. Ascenso máximo de oleaje irregular Casos 1 y 4. ....	66
Gráfica 7. . Porcentaje de rebase experimental. ....	69
Gráfica 8. Rebase experimental respecto a máximo. ....	70

## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE ROMPEOLAS HÍBRIDO CON MANGLAR

Gráfica 9. Altura de ola registrada en sensores 1,2,3 y 4. ....	72
Gráfica 10. Cambio de HS en sensores 1 y tertia 2,3,4 respecto a HS de pala. ....	72
Gráfica 11. Comparación Métodos Goda y Mansard para ambos tipos de oleaje.....	74
Gráfica 12. Coeficientes de reflexión en diques rebasables de escollera, (Vidal et al., 1995) ....	76
Gráfica 13. Comportamiento de L, Ir, H, d y Kr teórico. ....	77
Gráfica 14. Coeficientes de reflexión.....	78
Gráfica 15. Coeficientes de transmisión.....	80
Gráfica 16. Coeficiente de disipación. ....	82
Gráfica 17. CR, CT, CD en rompeolas control O.R. ....	83
Gráfica 18. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 1 O.R.....	83
Gráfica 19. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 2 O.R.....	84
Gráfica 20. Kr, Kt, Kd en rompeolas control O.I.....	84
Gráfica 21. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 1 O.I.....	85
Gráfica 22. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 2 O.I.....	85
Gráfica 23. Altura de ola teórico-experimental. ....	88
Gráfica 24. Distancia de rotura desde talud de incidencia. ....	89

## TABLAS

Tabla 1. Tipos de ondas de periodo intermedio (CFE, 1981) .....	19
Tabla 2. Valores límite para cada tipo de rotura (Schiereck, Gerrit Jan., Verhagen et al., 2001)24	
Tabla 3. Extensión de distintos tipos de manglar a nivel global .....	40
Tabla 4. Calibres de cobre utilizados y sus diámetros. ....	47
Tabla 5. Diámetros de mangle rojo en prototipo y modelo.....	48
Tabla 6. Longitudes de la planta de mangle rojo en prototipo y modelo. ....	49
Tabla 7. Alturas máximas posibles para cada profundidad. ....	53
Tabla 8. Casos de elevaciones de mar y oleaje.....	53
Tabla 9. Distancias de la pala de generación de oleaje a los sensores de nivel.....	55
Tabla 10. Rangos mínimos y máximos de separación de sensores.....	57
Tabla 11. Tercias de sensores en uso por ensayo.....	57
Tabla 12. Litros de rebase experimental. ....	68
Tabla 13. Reducción de rebase respecto a coronación control. ....	68
Tabla 14. Cambio de HS en sensores previos al talud de incidencia.....	71
Tabla 15. Cambio de HS en aguas tranquilas respecto a tertia rectora.....	73
Tabla 16. HS en tertia de sensores 2,3,4 por métodos Goda y Mansard.....	74
Tabla 17. Coeficientes de reflexión teóricos. ....	76
Tabla 18. Coeficientes de reflexión. ....	77
Tabla 19. Coeficientes de transmisión teóricos.....	79
Tabla 20. Coeficientes de transmisión.....	80
Tabla 21. Coeficiente de disipación.....	81
Tabla 22. Número de Iribarren. ....	87
Tabla 23. Distancia de rotura y altura de ola en rotura teóricas para modelo. ....	87
Tabla 24. Altura de ola antes de romper. ....	88
Tabla 25. Distancia de rotura teórico experimental Casos 1 y 4.....	89
Tabla 26. KD y coeficientes de seguridad implícitos del cubo, Cubípodo, Acropode y Xbloc (Folgado et al., 2010) .....	97

## INTRODUCCIÓN

Sinfín de ciudades se han desarrollado en las proximidades de la línea de costa por los grandes beneficios que existen; Barcelona, Lisboa y Alejandría son ejemplos de ello. Las economías de ciudades y del mundo tienen una fuerte dependencia a las actividades costeras y de transporte marítimo por lo que es relevante la protección de las costas y la infraestructura en estas presente. Siglos atrás esta dependencia se reflejaba principalmente en la pesca y en transporte de alimentos. Con el paso del tiempo y principalmente a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, detonado por la revolución industrial, las actividades que hacían uso de infraestructura portuaria fueron diversificándose. La minería, los hidrocarburos y la comercialización de infinidad de productos juegan actualmente un papel preponderante en las actividades portuarias.

México, a pesar de ser una excepción a la tendencia global y sólo tener 14.7 % de su población (INEGI, 2017) en los municipios costeros, tiene razones de peso para desarrollarse en ingeniería costera: la zona económica exclusiva del país es de 3,150,490 km<sup>2</sup>, 1.6 veces el territorio nacional; se tiene acceso tanto al Océano Pacífico como al Atlántico con tan sólo 200 km entre estos en el istmo de Tehuantepec, sólo 120 km más que en Panamá, siendo una conexión aventajada por su ubicación latitudinal entre Asia y Europa. México es también una opción para el movimiento de mercancía de una costa a la otra de Estados Unidos y cuenta al día de hoy con 102 puertos (SCT, 2017), siendo el de Manzanillo el más importante, tercero en volumen de TEU's comprometidas en América Latina (The Logistics World, 2022). El transporte marítimo de cabotaje representa un alto porcentaje en el movimiento de carga, siendo los puertos puntos estratégicos en las redes nacionales de comunicación y transporte. En la vasta lista de razones para atender la costa no son los puertos los únicos puntos de interés: la protección de playas, de reservas naturales, de municipios costeros y de la infraestructura turística, pesquera y petrolera tienen alto valor social, ambiental y económico.

Indonesia, Australia y Brasil son los únicos países que superan a México en áreas de manglar, con lo que se sobrentiende la responsabilidad de la nación como protector de estas especies. Las 905,086 hectáreas de mangle distribuidas en ambas costas representan el 6 % a nivel global, de las cuales 66,849 hectáreas están en el estado de Nayarit (Sistema de Monitoreo de Manglares de México, 2022). El manglar está siendo atacado por la sociedad: su valor económico está menospreciado y su protección es insuficiente. Desde 1975 a la fecha México ha perdido más del 60% de las áreas de manglar por prácticas no controladas de deforestación y cambio de tipo de uso de suelo (Yáñez-Arancibia et al., 1999).

La erosión costera es un fenómeno que compete al mundo y sus tasas de avance son alarmantes (Marí, 2019), dejando vulnerable a toda actividad que se vincule con la costa de una u otra forma, aunando a la lista de riesgo a los ecosistemas costeros dentro de los que el mangle figura de manera importante. Este fenómeno tiene lugar como consecuencia de los cambios en los procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios en su interacción con la batimetría del fondo marino. Para tratar de minimizar, ralentizar, mejorar o proteger alguna zona costera la implementación de estructuras de protección son la herramienta con que se cuenta, ya sean rompeolas, espigones, escolleras, u alguna otra.

Se presenta en este trabajo los resultados de la caracterización experimental en un canal de oleaje de un rompeolas modelo con manglar en su coronación. Se compararon alturas de ola

significante antes y después de la estructura modificando cinco variables: nivel del agua, régimen de oleaje, densidad del manglar, periodo de onda y longitud de onda. También se reportó el comportamiento del rebase de la estructura y las características de la rotura del oleaje. Se cotejaron los valores experimentales con teóricos, exceptuando algunas condiciones de ensaye para las que las teorías no fueran aplicables. Fue corroborado teóricamente que las piezas con las que se formó el rompeolas fueran estables.

## JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN

La motivación fue proponer una estructura de protección desde la perspectiva de la ingeniería ecológica dado que en México el desarrollo de proyectos costeros proambientales es escaso. Hay tres grandes problemas en las costas: la pérdida de manglares (Yáñez-Arancibia et al., 1999), la erosión costera y la elevación del nivel medio del mar (Marí, 2019); de los cuales se pueden combatir los dos primeros con la propuesta de rompeolas.

Se buscó sentar las bases del comportamiento del manglar sobre un rompeolas, integrándolo al funcionamiento de estructura de disipación de oleaje. Al incluir el manglar en la corona del dique, se buscó aprovechar dicho espacio para reforestación y conservación de manglares.

Aunque se tomaron como base los niveles de mar y oleajes del municipio de San Blas, Nayarit, el proyecto se orientó a mostrar una estructura genérica, que sirve de fundamento para proyectos en el Pacífico mexicano.

Se planteó que la estructura, además de colocarse para generar zonas de aguas tranquilas podría ser utilizada paralela a la línea de costa para protección de los manglares existentes contra la erosión y la energía de posibles huracanes, con previa consideración del transporte de sedimentos.

## OBJETIVOS

### Objetivos generales

- Diseñar, construir, ensayar y caracterizar un modelo de dique rompeolas de cubípodos rebasable, sin núcleo con un cajón de concreto en la coronación de 0.40 metros de ancho dentro del cual en prototipo se pueda colocar sedimento para inducir el crecimiento de individuos de *Rizophora mangle* (mangle rojo) a manera de infraestructura verde.
- Ensayar dicha estructura dentro de un canal de oleaje ante patrones de marea registrados por la Secretaría de Marina (SEMAR) y patrones de oleaje registrados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) para el municipio de San Blas, Nayarit en el Pacífico mexicano con el fin de cuantificar el porcentaje de disipación que aporta el mangle en altura de ola transmitida del lado protegido de la estructura.

### Objetivos específicos

- Proponer las características de los taludes ante las condiciones de oleaje estudiadas con distintas piezas: roca, cubos y cubípodos.
- Analizar el comportamiento de la estructura rompeolas con el cajón de concreto en la coronación con dos distintas distribuciones de individuos de mangle dentro de este y sin ningún individuo a manera de ensayo control, para obtener el aporte del mangle en la disminución de altura de ola una vez transmitida la onda a través de la estructura.
- Analizar las ondas de reflexión que genere la estructura bajo todos los casos de marea y oleaje propuestos.
- Comparar el ascenso teórico con el observado al romper la ola en el talud para cada caso de estudio.
- Medir el volumen de rebase que se presente en la estructura ante los distintos casos de estudio y hacer una comparación con el rebase teórico.
- Proponer recomendaciones de mantenimiento para la estructura y la capa vegetal de acuerdo con las fallas que resulten de la etapa de experimentación.

## ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo está dividido en seis capítulos, llevando al lector desde las bases teóricas que fundamentan los análisis de oleaje, las generalidades de las estructuras de protección, las razones para desarrollar conocimiento en estructuras de protección costera, el estado del arte actual y las nociones básicas requeridas de la especie de mangle en cuestión para poder justificar el porqué del estudio. Como segunda parte del documento se presenta el detalle de la estructura de diseño propuesta, su funcionamiento, las condiciones que se están evaluando, los resultados que se observaron, la comparación con los análisis teóricos y la discusión de estos. Se precisa el contenido de cada capítulo:

1 OSCILACIONES DEL MAR: Trata de las generalidades de las ondas, los fenómenos que estas presentan y las teorías de descripción del oleaje, tanto para fondo horizontal como para fondo variable; se enfoca principalmente en la teoría lineal, que es la utilizada para la obtención de los datos.

2 USO DE ELEMENTOS VIVOS EN LA PROTECCIÓN DE LA COSTA: se integra por cuatro subcapítulos con los que se fundamenta el trabajo, todos en el orden siguiente: las razones por las cuales es importante proteger las costas, los distintos tipos de estructuras “no híbridas” que se utilizan, los principios que deben regirse para que una propuesta ingenieril sea denominada ecológica y algunos casos a nivel mundial en que se ha desarrollado infraestructura costera con estructuras vegetales como enfoque.

3 GENERALIDADES SOBRE EL MANGLAR Y SU USO COMO ELEMENTO DE PROTECCIÓN: Se presenta un panorama con enfoque ingenieril de las especies de manglar, enfatizando la especie de *Rizophora mangle*, ahondando en sus beneficios para la sociedad y el ecosistema, así como las condiciones que requiere para poder desarrollarse.

4 PROPUESTA DE OBRA DE PROTECCIÓN CON MANGLAR: Se detalla el modelo de estructura que se ensayó en el canal de oleaje, las condiciones de marea y nivel de mar para las cuales se evaluó, la descripción y características del equipo utilizado (e.g. canal de oleaje, equipo de medición de niveles de agua, piezas utilizadas, entre otros). Al final de este se plantean los resultados a los cuales se esperaba llegar, como punto de referencia entre la hipótesis que se tenía y las mediciones finales.

5 RESULTADOS: Dividido en cuatro apartados, el primero concerniente al diseño del rompeolas y su comparación con las piezas que se utilizaron, junto con otras que no se compararon experimentalmente. El segundo presenta una comparación teórico-experimental del ascenso máximo y rebase esperado en los casos de oleaje analizados. El tercero reporta el comportamiento experimental que se observó respecto a la energía de rebase; y el cuarto compara de manera teórico-experimental la rotura del oleaje.

6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES: Se plantean los patrones de comportamiento de la estructura y de acuerdo con estos se recomiendan condiciones de uso del manglar. Se resaltan problemáticas presentes a lo largo de la experimentación y se proponen posibles líneas de investigación futuras.

## 1. OSCILACIONES DEL MAR

Los océanos, junto con prácticamente todos los cuerpos de agua se encuentran sujetos a fuerzas que tienden a deformar la uniformidad que lograría la fuerza gravitacional y la tensión superficial sin más intervención. Es cuando otra variable entra en el equilibrio de fuerzas que aparecen las olas, propagándose gracias al intento de las primeras fuerzas por restaurar el nivel homogéneo de la superficie. Las características intrínsecas de las olas son su periodo y su velocidad de propagación, dependientes de la fuerza que las ocasiona (Dean et al., 1984).

Es común clasificar las oscilaciones por su período: aquellas que lo presenten menor a 5 minutos se determinan como de “*período corto*”, menores a 180 minutos se acotan dentro de los de “*período intermedio*”, y si los superan son de “*período largo*”. Las oscilaciones de periodo corto se subcategorizan en ondas capilares, oleaje y grupos de olas. La fricción entre el viento y la superficie de contacto del agua es el factor que genera este tipo de oscilaciones. A su vez, la velocidad, persistencia y estabilidad de dirección del viento son factores determinantes en dicha fricción. El oleaje que se presenta en la zona donde el viento actúa, en alta mar, se conoce como “*sea*” mientras que el oleaje que viaja, ya distante, sobre la plataforma costera y con mayor paralelismo a las líneas batimétricas se denomina como “*swell*” (CFE, 1981).

Los maremotos, meteomaremotos y las pulsaciones barométricas son eventos de “*período intermedio*”, la energía de estas olas depende de la energía de incidencia y se subcategorizan en seis grupos:

Tabla 1. Tipos de ondas de periodo intermedio (CFE, 1981)

Ondas largas vinculadas.	Ondas con variación gradual de altura de ola de grupo, resultando una variación del nivel medio del mar.
Ondas libres y forzadas.	Que se mantienen por sí solas y que dependen de una fuente de generación respectivamente. Las primeras liberadas de un grupo y las segundas vinculadas a este.
Ondas infragravatorias salientes.	Producto de la reflexión en las costas, con dirección mar adentro.
Oscilaciones de periodo intermedio en playas.	Debidas al asomeramiento y amplificación de ondas de periodo intermedio.
Ondas de borde.	Debidas a la reflexión en la costa, atrapadas por efectos de refracción.
Ondas de cizalla.	Causadas por las inestabilidades de las corrientes longitudinales.

Las mareas meteorológicas y astronómicas son fenómenos de oscilaciones de periodo largo, causantes de las variaciones horarias del nivel del mar. Las primeras causadas por vientos intensos en dirección a la costa y por descensos de presión; las segundas son las oscilaciones con mayor longitud de onda, causadas por la atracción gravitatoria de los cuerpos celestes estando la Luna como principal actor seguida del Sol (CFE, 1981).

Para describir olas se requieren tres datos esenciales: su periodo, su amplitud y la profundidad de la batimetría. En la realidad las olas son irregulares, todas con diferencias en sus características entre sí y con variación en sus ángulos de incidencia. Se define el oleaje como la suma de ondas sinusoidales de distintas magnitudes, sin embargo, estas sumas son aleatorias para cada intervalo de tiempo. Es debido a lo anterior que la aplicación de la estadística es una herramienta en el campo de estudio; sin embargo, cuando el análisis es en aguas someras la aleatoriedad disminuye y se pueden caracterizar con un comportamiento sinusoidal de manera razonablemente acertada. A grandes rasgos, lo anterior describe la esencia de la teoría lineal de oleaje (Dean et al., 1984), en la cual se profundiza posteriormente.

La Figura 1 muestra las componentes de una onda sinusoidal, siendo  $H$  la altura de ola,  $\eta$  la elevación de la superficie libre,  $L$  la longitud de onda y  $d$  la profundidad desde el nivel de aguas tranquilas.

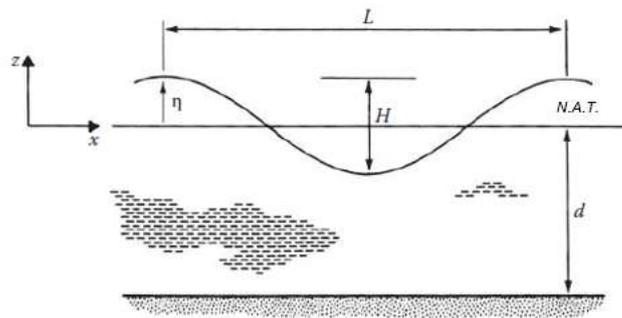


Figura 1. Onda sinusoidal (Chadwick et al., 2003)

Las presiones que inducen las olas en cada partícula de agua provocan que estas últimas se desplacen mostrando una trayectoria elíptica, como puede apreciarse en la Figura 2, donde  $\xi$  es el desplazamiento vertical y  $\zeta$  el desplazamiento horizontal. La forma de la trayectoria varía dependiendo de la longitud y altura de ola, ya que de éstas depende la influencia que el fondo tiene en el movimiento de la partícula. Conforme el fondo pierde influencia se tienen trayectorias más cercanas a una circunferencia (Dean et al., 1984).

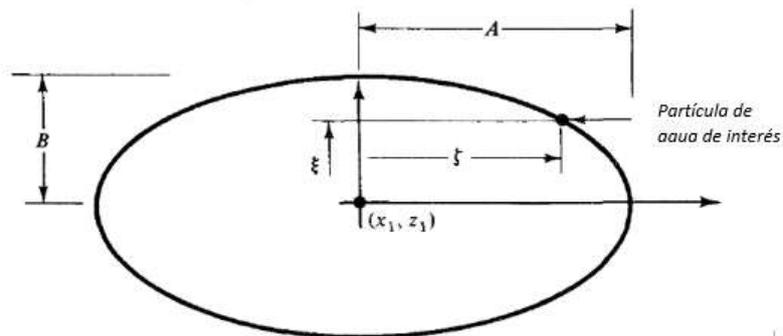


Figura 2. Trayectoria de una partícula de agua ante las presiones del oleaje (Dean et al., 1984)

Las olas causan que los campos de presiones ante oleaje puedan ser clasificados en hidrostáticos y dinámicos, con base en la ecuación de Bernoulli y las condiciones de un fluido ideal. Dean et

al. (1984) definen que en las condiciones en las que no existiera oleaje sólo habría participación del primer tipo de presiones, y en los puntos en los que haya una sobrecarga de presiones respecto a las existentes en el nivel de aguas tranquilas es donde se reflejaría la presencia del segundo tipo de presiones. La Figura 3 ilustra el comportamiento de dichos campos de presiones.

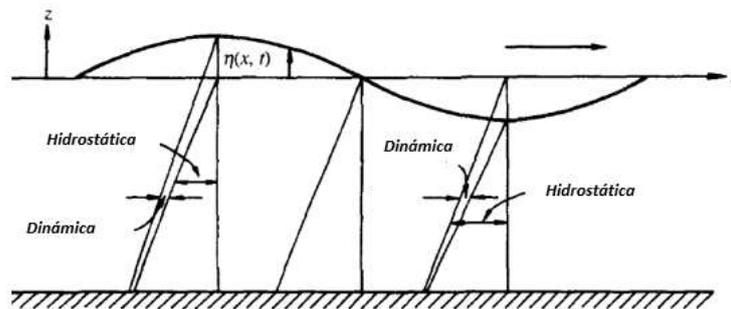


Figura 3. Presiones en el agua ante oleaje (Dean et al., 1984)

La velocidad que pueden tomar las partículas depende de la energía cinética y potencial. En las crestas y valles su movimiento se debe puramente a la potencial y en el nivel de aguas tranquilas todo lo contrario, habiendo un juego en la participación de éstas a lo largo de la longitud de la ola. Las aceleraciones verticales son máximas y las horizontales son nulas cuando la energía es exclusivamente potencial. Por el contrario, las aceleraciones verticales son nulas y las horizontales máximas cuando el total de la energía es cinética.

Las ondas en ocasiones viajan en trenes de ondas, pudiendo presentarse varios de éstos. Debido a esto, un concepto esencial para el análisis es la velocidad de grupo, que no es más que la velocidad calculada a la envolvente de la suma de todos los trenes de onda. Esto se hace para vincular el viajar de la energía con la velocidad y no con la altura de ola, ya que en los puntos en donde ésta es cero, matemáticamente no puede existir una transmisión de energía (Dean et al., 1984).

El comportamiento de las olas siempre está sometido a tres fenómenos presentes en el medio de transmisión: reflexión, refracción, y difracción. Estos fenómenos son causados principalmente por la batimetría, formaciones rocosas y estructuras artificiales construidas por el hombre para beneficio propio tales como los diques y estructuras de protección costera.

Cuando hay reflexión, el comportamiento armónico de la ola desaparece junto con el comportamiento de presiones descrito, volviéndose una suma de ondas con cierto desfase en sus crestas causado por el mismo efecto de reflexión.

Tanto reflexión como refracción van de la mano. Al colisionar un frente de onda con la frontera entre dos medios, una porción de dicha onda rebotará con un ángulo igual al incidente de manera simétrica a la normal de la superficie y en el mismo plano bidimensional, definiéndose así la reflexión. Por otro lado, otro porcentaje de la energía de la onda atravesará al otro medio adoptando otro ángulo, dando lugar a la refracción (Martín Bragado, 2003).

Es común caracterizar la reflexión con un coeficiente  $C_r$  como una relación entre la altura de ola incidente y la reflejada, que en caso de oleaje irregular se consideran alturas de ola significantes (Van Der Meer, 1995).

$$K_r = \frac{H_r}{H_i}$$

Ecuación 1

La ley de Snell relaciona el ángulo de incidencia con el de refracción en el segundo medio:

$$n_1 * \text{sen}\theta_1 = n_2 * \text{sen}\theta_2$$

Ecuación 2

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción en cada uno de los medios, calculados como la velocidad de la luz en el vacío dividido por la velocidad de la luz en dicho medio.

La Figura 4 muestra la reflexión de una onda con cierto grado de pérdida de energía ya que se muestran elevaciones a superficie libre ( $\eta$ ) en los antinodos de la ola reflejada menores a los de la ola incidente.

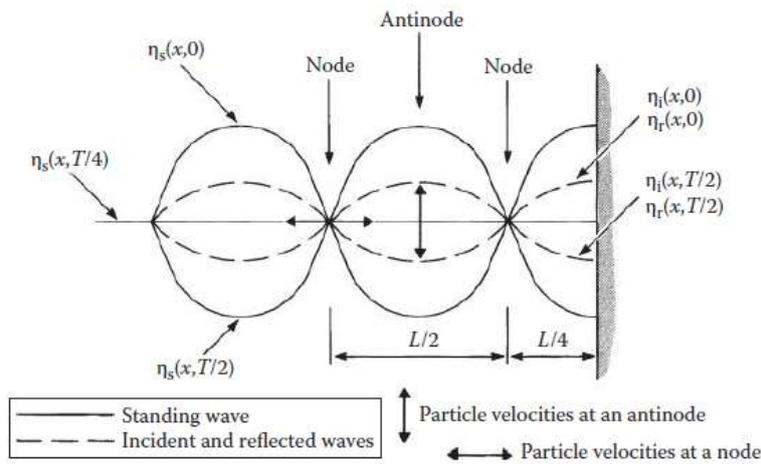


Figura 4. Reflexión de onda ante obstáculo vertical (Chadwick et al., 2003)

La difracción es el resultado de interferencias que presentan las ondas sobre sí mismas dando una propagación en ángulo al estar en las cercanías de algún obstáculo (ver Figura 5) y sucede por una transferencia lateral de energía sobre las crestas de las ondas debido a las diferencias de altura entre puntos de una misma cresta, fenómeno fácilmente apreciable en rendijas o espacios en los que su tamaño sea comparable con la longitud de onda. (Martín Bragado, 2003; Sañudo Oria, 2016) Ejemplo de esto se observa en bahías, ensenadas y morros, entre otros.

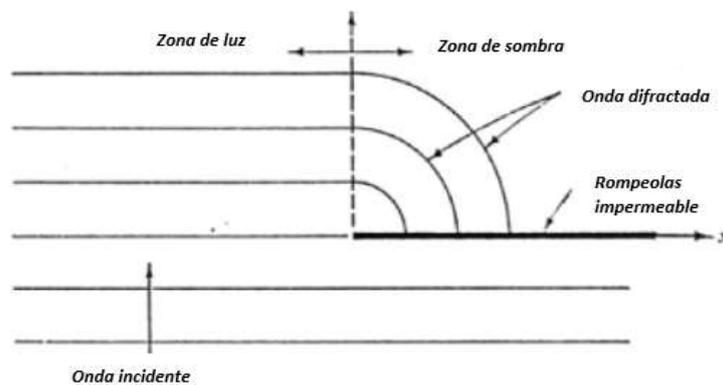


Figura 5. Difracción ante extremo de dique (Sañudo Oria, 2016)

Al haber estructuras de protección, la reflexión y transmisión se presentan de manera conjunta, al incidir una onda sobre su superficie una fracción de la energía va a reflejarse y otra se transmitirá al interior de la estructura, dependiendo de la porosidad de la misma. Al llegar la onda a la cara interior del dique parte será reflejada nuevamente, regresando en sentido contrario hasta la cara exterior, donde inicialmente incidió mientras que la otra será nuevamente transmitida a la zona de aguas tranquilas (ver Figura 6), considerando que los ángulos con que se desvíen las ondas depende también del ángulo de los taludes (M. A. Losada et al., 1990).

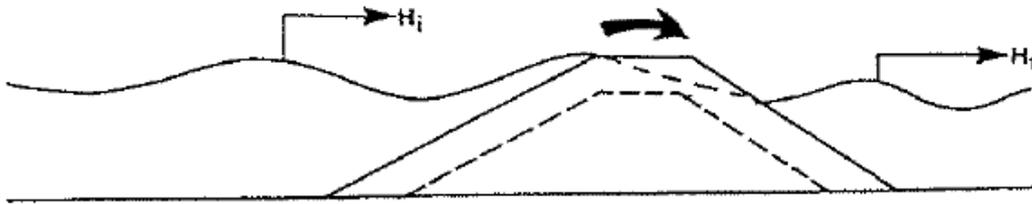


Figura 6. Transmisión de oleaje a través de un rompeolas. (Van Der Meer, 1995)

De acuerdo con Andersen et al., (2014) los efectos de la refracción se observan en el cambio paulatino del ángulo de incidencia de las olas en dirección a la costa debido al asomeramiento y al decremento en la longitud de onda que esto conlleva, ocasionando que la dirección de la ola se posicione de manera prácticamente perpendicular a la línea de costa. En términos generales, la longitud de onda y por ende su velocidad presentan variaciones debidas a los cambios de profundidad. Al tener un fondo con líneas batimétricas paralelas las líneas ortogonales de las ondas tienden a separarse unas de otras dando lugar a la dispersión de la energía en una mayor longitud de cresta. Cuando la batimetría no sea la antes mencionada, las líneas ortogonales podrán divergir o converger. Es importante mencionar que al aumentar las pendientes del fondo aumentarán los efectos de reflexión.

El interactuar de la batimetría con las ondas al viajar de aguas profundas a la costa es lo que se denomina asomeramiento. Este fenómeno cambia en la altura de ola, celeridad, velocidad de propagación, energía y rotura de ola. No debe perderse de vista que el asomeramiento trabaja en conjunto con otros procesos y fenómenos como la disipación ya sea por fricción o percolación, la interacción con vientos y corrientes, el *run-up* y *run-down* y la rotura de ola.

La plataforma marina empieza a interactuar con las ondas cuando la profundidad dividida por la longitud de onda es menor a 0.5, ya que paulatinamente la longitud de onda y la celeridad disminuyen. Por otra parte la altura de ola muestra un ligero decremento al comenzar la interacción, sin embargo, aumenta rápidamente al acercarse al punto de rotura (Davidson Arnott, 2010).

La rotura de ola es otro fenómeno igualmente importante, vinculada al número de Iribarren o parámetro de semejanza (ver Ecuación 3) que es una función entre las variables de longitud, altura de ola y pendiente del fondo o talud, definido por Battjes, (1974). Además de clasificar el tipo de rotura, es un criterio que gobierna muchas de las características del oleaje en la zona de *surf* como la distancia de la línea de costa a la que ocurre la rotura, donde funge como herramienta para su análisis.

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$

La rotura de oleaje es un fenómeno no lineal que por su relativa organización se trata con modelos deterministas en los cuales la profundidad relativa es de poca influencia. La importancia del ángulo  $\alpha$  del talud se refleja en la ausencia de rotura cuando está por debajo del umbral de rotura. Esto permite mayor reflexión de las ondas y por otro lado afecta también la amplitud de la onda, llegando esta a su máximo cuando comienza la rotura por efectos de  $\alpha$ . Al disminuir la relación altura-longitud de ola las ondas se comportarán con mayor semejanza a una sinusoidal reduciendo sus posibilidades de rotura.

La clasificación de tipo de rotura es: descrestamiento, voluta, colapso y oscilación (ver Figura 7), pudiendo distinguirse de acuerdo con el valor del parámetro de semejanza que se tenga como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores límite para cada tipo de rotura (Schierreck, Gerrit Jan., Verhagen et al., 2001)

Descrestamiento	$\xi < 0.5$
Voluta	$0.5 < \xi < 3.3$
Colapso/Oscilación	$3.3 < \xi$



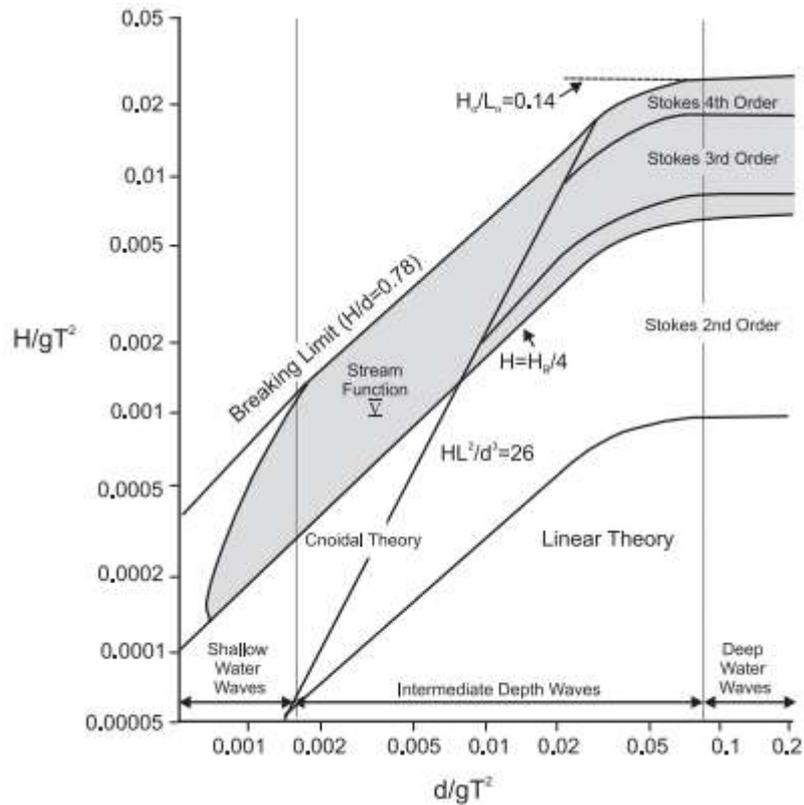
Figura 7. Fotografías de tipos de rotura (Schierreck, Gerrit Jan., Verhagen et al., 2001).

## 1.1 Teorías de descripción de oleaje

### 1.1.1. Teorías para fondo horizontal

Cuando se considera fondo horizontal los principales modelos de caracterización de oleaje son las aproximaciones de Stokes en sus distintos órdenes, la teoría cnoidal y la teoría de onda solitaria, cada una con sus respectivas ventajas y limitantes. Estas teorías no representan ciertos fenómenos como la rotura, la refracción y el asomeramiento dadas las irregularidades batimétricas que desprecian.

Davidson Arnott, 2010 propone una gráfica para identificar cuando una teoría es aplicable, a partir de datos de altura, periodo, profundidad y gravedad (ver Gráfica 1).

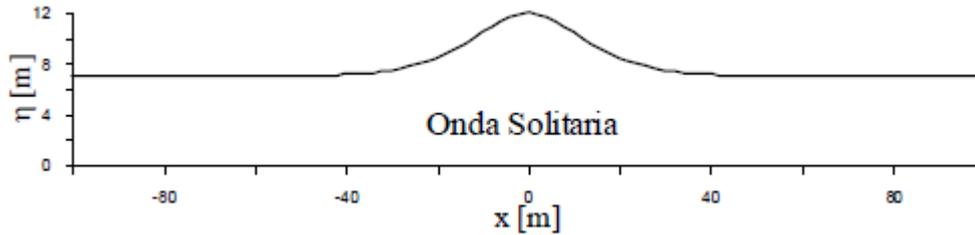


Gráfica 1. Rango de compatibilidad de distintas teorías.

Las aproximaciones de Stokes son modelos que se sustentan con la teoría de flujo potencial. Estos modelos tienen distintos grados de precisión de acuerdo con el orden que se desarrolle a partir de la ecuación de Laplace. Esta teoría considera un potencial de velocidades (función escalar) junto con un flujo irrotacional e incompresible. Lo anterior indica que desprecian efectos de viscosidad, esto por ser prácticamente exclusivos de la superficie y el límite con el fondo. Por medio de la solución analítica del potencial de velocidades se relacionan el período, la longitud de onda y la profundidad entre sí. Cuando la aproximación es de orden 1, se llama también teoría lineal, de Airy o de pequeña amplitud. Al desarrollar aproximaciones de mayor orden la forma sinusoidal de las ondas se deforma cada vez más dando lugar a ondas con valles achatados y crestas más esbeltas. (Ávila et al., 2003).

La teoría cnoidal describe los campos de velocidades y presiones de una onda en un fondo constante y somero. Su solución se basa en funciones jacobianas elípticas, existiendo de varios ordenes, siendo la de primer orden la más utilizada por su capacidad de descripción de ondas finitas en aguas someras.

La teoría de onda solitaria, única entre las teorías de fondo horizontal que no considera ondas periódicas es capaz de representar ondas causadas por tsunamis. Estas ondas tienen la característica intrínseca de ser transitorias, de longitud tan grande y amplitud tan corta de su valle se considera que sólo tiene cresta (ver Gráfica 2), razón por la cual casi cualquier fondo es somero para dichas condiciones.



Gráfica 2. Comportamiento de una onda solitaria (Ávila et al., 2003).

Por su parte, la teoría lineal es una aproximación de Stokes de primer orden, donde las fronteras del área en estudio se establecen asumiendo que las olas se trasladan en un plano. La ecuación diferencial de gobierno que regirá en el fluido para dos dimensiones, garantiza la existencia de una función de corriente con la que se pueden obtener velocidades. El desarrollo detallado de dicha ecuación se puede encontrar en los trabajos de Dean et al., (1984).

Para delimitar las fronteras se considera que no hay intercambio de partículas en las interfaces en el tiempo, teniendo una función en el espacio y en el tiempo igual a cero. Se considera que la superficie cambia de un instante a otro, y así deduciendo que el límite de rapidez de cambio medio será cero.

Para la frontera con el fondo se tiene como origen en el eje vertical ( $z$ ) el nivel de aguas tranquilas del agua y se establece que la velocidad es cero en este si es horizontal, cuando es otra la pendiente su valor es definido como la derivada de la profundidad respecto a  $x$ .

Otra frontera a condicionar es la superficie libre, cuyas limitantes se dividen en dos: la cinemática y la dinámica. La primera de estas define una función a partir del movimiento que se presenta respecto un nivel fijo ( $z$ ), permitiendo soportar variaciones de presión en la superficie. La segunda limitante de esta frontera mantiene la presión uniforme en la superficie y trabaja a primera instancia con la incógnita de posición de la frontera misma, omitiendo las variaciones de presión que el viento y la generación de olas puedan ocasionar.

Respecto a las condiciones de frontera, si existe alguna barrera, cualquier ola tendrá sus efectos cinemáticos reactivos en el volumen a delimitar. Para olas periódicas en el espacio y en el tiempo, propagadas en un plano, se expresan condiciones periódicas de frontera en función de la longitud y periodo de las ondas.

Ya con las condiciones de todas las fronteras definidas puede detallarse la solución de la teoría lineal. En las fronteras laterales se deben asumir la condición de frontera de fondo y las dos condiciones de superficie libre. A partir de estas y con la ecuación de gobierno, Dean & Dalrymple, (1984) proponen una solución para las fronteras de movimiento lineal de olas en fondo horizontal por separación de variables y resolución de ecuaciones diferenciales parciales quedando todo en función de las variables independientes de posición y tiempo. Sabiendo que el potencial de velocidades  $\Phi$  es periódico, encuentran la frecuencia angular  $\sigma$  (ver Ecuación 4).

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}$$

Ecuación 4

Con esto el potencial de velocidades se sustituye en la ecuación de gobierno de Laplace para posteriormente dividir por el mismo potencial de velocidades  $\Phi$ . Para que el resultado de tal operación sea viable la ecuación se separa en dos partes, cada una con su respectiva variable

independiente, y se igualan a la misma constante con distinto signo, arrojando así las ecuaciones diferenciales cuatro resultados reales, 2 para  $K = 0$  y 2 para  $K^2 > 0$ , y 2 imaginarios, lo que puede implicar cambios de altura de ola a la distancia. De las seis soluciones, solo las dos en las que  $K$  es mayor a cero son de interés por ser ahí donde las soluciones son periódicas en el espacio (ver Ecuación 6), quedando la función de Laplace como se indica en la Ecuación 5.

$$\Phi(x, z, t) = (A * \cos(kx) + B * \text{sen}(kx)) * (C e^{kz} + D e^{-kz}) * \text{sen}(\sigma t)$$

Ecuación 5

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Ecuación 6

Con respaldo de los principios de superposición, de la Ecuación 5 se trabaja sin el término  $B \text{sen}(kx)$  para sustituir en la ecuación de condición de fondo. Para que se cumpla en cualquier posición y tiempo, los términos dentro del paréntesis deben igualarse a cero, por lo que se deduce una igualdad entre ambos, quedando la ecuación de potencial de velocidad como:

$$\Phi = G * \cos(kx) * \cosh(k(h + z)) * \text{sen}(\sigma * t)$$

Ecuación 7

donde:

$$G = 2AD e^{kh}$$

En cuanto a la condición dinámica de la superficie, a partir de series de Taylor truncadas se puede plantear la presión en la superficie libre considerando una altura ya conocida  $z = 0$ . La serie se lineariza despreciando los términos cuyas presiones y velocidades son mínimas, relacionando únicamente el desplazamiento instantáneo de la superficie libre con el índice de cambio del potencial de velocidad. En la ecuación de la superficie libre del agua despejada (ver ecuación 8), se tiene que  $\eta$  es cero en el espacio y en el tiempo y que por consecuencia la constante  $C(t)$  es cero.

$$\eta = \frac{H}{2} * \cos(kx) * \cos(\sigma t)$$

ecuación 8

Con la comparación que hacen Dean & Dalrymple, (1984) entre el modelo físico y la representación matemática de la superficie libre del agua se define el potencial de velocidades (Ecuación 9) respecto a la altura de ola, la frecuencia angular, la profundidad y el número de onda.

$$\Phi = \frac{H * g * \cosh[k * (h + z)]}{2 * \sigma * \cosh(k * h)} * \cos(kx) * \text{sen}(\sigma t)$$

Ecuación 9

Para relacionar la frecuencia angular con el número de onda se introduce la condición cinemática de superficie libre del agua junto con la aplicación de series de Taylor. Considerando los términos lineales al igual que para la condición dinámica la condición de frontera se define como una igualdad entre la derivada de  $\Phi$  respecto a  $z$  desde cero y la derivada de  $\eta$  respecto al tiempo. Al sustituirse ambas,  $\Phi$  y  $\eta$ , puede despejarse el cuadrado de  $\sigma$ . Para dicha expresión

existe únicamente un valor de  $k$  para cada par de valores de  $\sigma$  y  $h$ , por lo que conociendo la definición matemática tanto de  $\sigma$  como de  $k$  puede manipularse la expresión para generar expresiones de cálculo para la celeridad de onda  $C$  y la longitud de la misma  $L$  (ver Ecuaciones Ecuación 10 y Ecuación 11) (Dean et al., 1984).

$$\sigma^2 = g * k * \tanh(kh)$$

Ecuación 10

$$C = \frac{L_0}{T} * \tanh(kh)$$

Ecuación 11

### 1.1.2. Teorías para fondo variable

Para aguas profundas existe un método semigráfico basado en la ley de Snell conocido como la teoría del rayo (ver Figura 8), la cual calcula la refracción y el asomeramiento de una onda sinusoidal propagándose sobre pendiente uniforme con líneas batimétricas paralelas. Para llevar a cabo el método se dibujan líneas entre las crestas de la onda en propagación, que son llamadas rayos, desde donde se considere aguas profundas hasta la línea de costa. El espacio delimitado por dos rayos se denomina canal de energía por considerar la conservación de la energía a lo largo de los rayos. También se apoya en conceptos de la teoría lineal para calcular la desviación del frente de onda hacia una posición que tiende a ser perpendicular a la línea de costa. Sus limitantes para considerar fondos irregulares y efectos de difracción han ido dejándolo en desventaja respecto a otras teorías y herramientas de aplicación (Ávila et al., 2003).

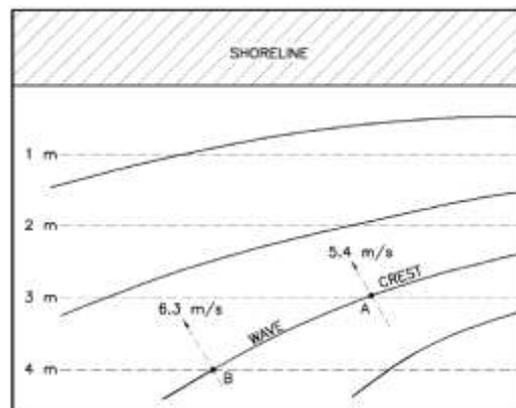


Figura 8. Comportamiento de oleaje con líneas batimétricas paralelas a la línea de costa (Schierreck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996)

Cuando se está en aguas profundas, también se puede analizar el oleaje por medio de la ecuación de la pendiente suave, que aproxima la transformación de oleaje monocromático sobre fondo impermeable gradualmente variado. Entra en juego cuando la teoría lineal ya no es aplicable por haber presencia de rotura y otros efectos no lineales. (Ávila et al., 2003). Las primeras descripciones de propagación de olas sobre una pendiente suave fueron presentadas por Keller, (1958) y por Shen et al., (1968).

Smith & Sprinks, (1975) comparó la dispersión de los resultados en ondas de borde con pendiente con el trabajo de Ursell, (1952) el cual toma la relación de dispersión exacta para ondas de borde.

Trabajos posteriores han desarrollado la ecuación de la pendiente suave para integrar otros factores o condiciones. Massel, (1993) integra el efecto de los modos evanescentes, Porter et al., (1995) incluye tanto los modos evanescentes como mejoras para las condiciones de frontera, Panchang et al., (1991) discretiza el área por medio de volúmenes finitos, Rojanakamthorn et al., (1989, 1991), Losada et al., (1996a, 1996b) y Silva et al., (2002) desarrollaron la ecuación para fondo poroso o impermeable finito y de geometría indistinta con capacidad de describir las propiedades de disipación en el fondo.

Dentro de las simplificaciones de la ecuación de la pendiente suave se encuentran los modelos de refracción-difracción desarrollados a partir de una aproximación parabólica en series de Padé, que omiten los efectos de reflexión impidiendo su uso para análisis de resonancia.

Los modelos de refracción son otra simplificación de la ecuación completa y son convenientes para estudios de refracción y asomeramiento al igual que la teoría del rayo., con la ventaja de su nivel de certidumbre y su sencillez a nivel computacional. También existen los modelos de difracción, que analizan el fenómeno de manera aislada en fondo plano ante obstáculos impermeables y rectos verticales, los cuales son útiles principalmente como complemento junto con modelos de refracción y asomeramiento (Ávila et al., 2003).

Si las características del sitio definen las aguas como someras, las ecuaciones de aguas someras para ondas largas pueden ser funcionales, siempre y cuando las olas superen un  $kd = 0.78$  o que  $d/L > 0.125$ . Para dichas condiciones ya no es válido el uso de las aproximaciones de Stokes dada la condición existente. Ahora hay una mayor dispersión de la amplitud y una menor dispersión de la frecuencia. (Schierack, Gerrit Jan., et al., 1996) La celeridad de las olas es ahora determinada por la profundidad, dejando de lado la influencia del periodo. (Chadwick et al., 2003).

Las ecuaciones tipo Boussinesq, ampliamente conocidas por su alta calidad en la descripción de la hidrodinámica cercana a la zona de rompiente mejorando así modelos de circulación y de transporte de sedimentos, son aproximaciones de ondas gravitacionales. Hay ciertos desarrollos conocidos como débilmente no lineales y otros como completamente no lineales diferenciándose los primeros por suponer la no linealidad y la dispersión en el mismo orden de aproximación. La manera en la que usualmente son presentadas se muestra debajo (Pedrozo Acuña et al., 2005;Whitham, 1967).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU_j)}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + g \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{1}{3} h_0 \frac{\partial^3 h}{\partial x_i \partial t^2} = 0$$

*Ecuación 12*



## 2. USO DE ELEMENTOS VIVOS EN LA PROTECCIÓN DE LA COSTA

### 2.1. Razones para proteger la costa

Los sistemas costeros tienen un cierto nivel de resiliencia que se ha ido mermando por efectos de la actividad humana: contaminación, tala en zonas de manglar, extracción de recursos, turismo sin crecimiento controlado, crecimiento de manchas urbanas costeras y eventos meteorológicos más severos a causa del cambio climático (López Martínez, 2019). El deterioro causado por la actividad humana es notoria: el 50% de los marismas, el 35% de los manglares, el 30% de los arrecifes de coral y el 29% de los pastos marinos han sido dañados o devastados a nivel global (Barbier, 2015).

Los efectos más dramáticos del cambio climático tendrán lugar en las costas: el aumento en los niveles del mar y la creciente intensidad en las tormentas entre los más devastadores, lo que deja en peligro ciudades costeras, comunidades, infraestructura, playas y humedales. Grandes áreas costeras están siendo sujetas a la erosión del suelo y a las inundaciones.

Para comprender más a fondo las razones para proteger las costas hay que tener claro qué son los servicios ecosistémicos: éstos son los servicios que obtiene la gente de los ecosistemas, pero el término “servicios” abarca más allá de lo que la palabra por sí sola invita a pensar, los beneficios culturales, las creencias y las herencias sociales de valores se consideran a la par de los servicios económicamente medibles. En resumen, los servicios ecosistémicos comprenden todo aporte directo o indirecto al bienestar humano (Barbier, 2011). Los servicios ecosistémicos costeros que se han visto profundamente impactados son la pesca, las aguas filtradas (Kuh et al., 2012), el turismo, el almacenamiento de carbono, la migración causada por el cambio climático, las fuentes de alimento, el hábitat de diversas especies, entre otros. La relación entre la pérdida de biodiversidad, vegetación y servicios ecosistémicos es evidente. La mala calidad del agua y la baja resiliencia de la costa contra tormentas e inundaciones influyen directamente en esto. Hay que comprender que el dañar las costas va más allá de dañar un solo ecosistema, es una herida a un gran conjunto de éstos dada la conexión entre la costa, las cuencas y tierra adentro, por lo que también los beneficios ecosistémicos de esta zona son mayores que los de un solo ecosistema (Barbier, 2011).

En zonas tropicales, manglares y arrecifes son dos de los ecosistemas de mayores importancia y vulnerabilidad, siendo relevantes por su aporte a la biodiversidad, su protección al suelo ante la erosión, sus altos niveles de captura de bióxido de carbono y su impacto económico en núcleos urbanos próximos (López Martínez, 2019). De acuerdo con United States Environmental Protection Agency, (2021), de los arrecifes depende el 25% de la biodiversidad marina. Económicamente el bienestar de los arrecifes se refleja en el bolsillo de más de quinientos millones de personas a nivel mundial, ya sea por salud de bancos de peces y otros animales comercializables, turismo o protección de las zonas costeras ya que evitan la pérdida de vida tras el paso de tormentas, inundaciones, tsunamis o erosión de los suelos por ser disipadores naturales de oleaje (United States Environmental Protection Agency, 2021) Los pastos marinos son otro factor a considerar para el bienestar de las costas. Burdamente, estos brindan beneficios similares a los arrecifes, sumando su capacidad de absorción de carbono y de purificación del agua al servir de consumidores de nutrientes, de contaminantes y como fuente de retención de partículas. También son hábitat de especies como camarones, cangrejos, peces

jóvenes y otros. Hay estimaciones que indican que las costas con vegetación aportan casi la mitad del entierro de carbono que se da en los océanos, permitiendo comprender su importancia en la capacidad de absorción de  $\text{CO}_2$  del planeta. Las marismas son otro ecosistema a contemplar que a pesar de que tiene poca diversidad de especies es clave en el control de la estructura de distintas comunidades de especies, además de controlar al igual que manglares y arrecifes la erosión, el bienestar de la pesca, la purificación del agua y otros mencionados con anterioridad. Cabe recalcar que las marismas en cuanto a captura de  $\text{CO}_2$  son más eficientes respecto a otros ecosistemas. Como elementos igualmente importantes están las dunas y las playas de arena que por siglos han sido minadas para obtener sílice y feldespatos para las industrias vidriera y cerámica así como materia prima para la construcción; son zonas que mantienen la vida silvestre y en caso de fenómenos meteorológicos extremos son altamente valoradas por su capacidad de amortiguar el impacto del oleaje y de estabilizar las playas, ambas funciones dependientes también del volumen de vegetación que crezca en estas. Entre sus beneficios está su gran capacidad de retención de agua que llegan a servir de acuíferos y fuente de agua potable en algunos casos (Barbier, 2011).

## 2.2. Diques rompeolas para la protección de costas

Hay una amplia gama de estructuras rompeolas en la ingeniería costera, cuyas funciones y limitantes cambian al igual que sus ventajas y desventajas. Estas estructuras pueden clasificarse en sumergidas o emergidas, rebasables o no rebasables, permeables o no permeables, con talud o vertical, con o sin núcleo, de roca o piezas prefabricadas; pudiendo ahondar aún más en los detalles como el número de capas que se tengan sobre el núcleo, el tipo de piezas prefabricadas que se utilicen en los casos correspondientes, el diámetro nominal de la roca, entre varios otros.

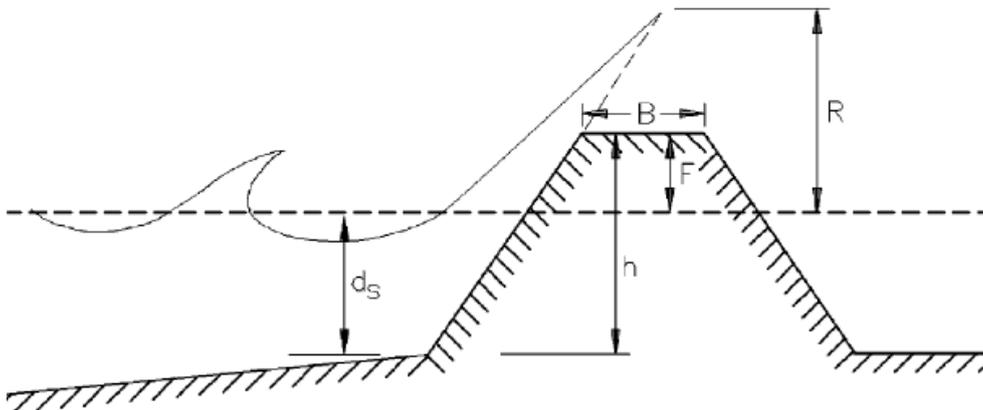


Figura 9. Esquema general de un rompeolas en talud. (Schiereck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996)

La Figura 9 muestra un esquema general de un rompeolas en talud. Cuando el nivel del mar, marcado con línea punteada, está por debajo de la coronación (explanada horizontal de ancho  $B$ ) se considera como estructura emergida, y en caso de sobrepasar ésta, se clasifica como sumergida. Frente a una estructura sumergida el coeficiente de transmisión para oleaje diario puede no ser muy eficiente, sin embargo, al presentarse mayores alturas de ola la eficiencia se incrementa. Cuando el *run-up* ( $R$ ) es mayor en altura que la distancia de francobordo ( $F$ ) se considera rebasable, y en caso contrario será no rebasable. Derivado de lo anterior puede

calcularse también el gasto de rebase a partir de fórmulas existentes que se acoplen a la estructura en cuestión.

En cuestiones de permeabilidad, esta se clasifica con un coeficiente que depende de su porosidad. Cuando se habla de rocas colocadas de manera homogénea (todo el interior del rompeolas por igual) su permeabilidad será mayor a que si se tiene un núcleo de roca fina y capas de roca graduada, dando una respuesta mucho más eficiente para ondas de periodo largo con menor permeabilidad, mientras que para las ondas de periodo corto, aunque se tenga alto nivel de porosidad, el coeficiente de transmisión será bajo (Schierneck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996).

Los rompeolas verticales son otra clasificación, diferenciándose de los rompeolas en talud por el ángulo de 90° que tienen sus paredes verticales. Estos son convenientes donde el oleaje incidente no es muy fuerte, ya que mientras mayor sea este, mayor será el costo de la estructura, y donde el oleaje reflejado no afecte. Si el periodo del oleaje incidente es corto, la transmisión a la zona protegida será baja.

Hay otro tipo de rompeolas: los flotantes, cuyas ventajas principales es su adaptación a cambios en el nivel del mar, dando respuesta a un amplio rango de mareas y beneficiando instalaciones portuarias y otras áreas costeras. Se pueden evidenciar otras ventajas: su bajo coste para aguas profundas, menor impacto en el flujo de corrientes y migración de especies; sin embargo, tienen fuertes desventajas: el desgaste entre piezas por el movimiento libre que les aporta su naturaleza flotante y su disminución de eficiencia cuando el periodo de las ondas incidentes sale de su rango de trabajo. Hay principalmente 3 tipos de estructuras flotantes: tipo prisma, tipo catamarán y tipo flexible (Schierneck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996).

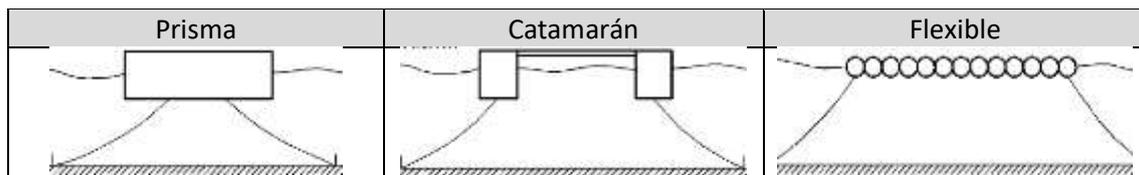


Figura 10. Tipo de estructuras flotantes (Schierneck, Gerrit Jan., Verhagen, 1996)

### 2.3. Principios de ingeniería ecológica

La ingeniería ecológica tiene el enfoque de interconectar la tecnología y los ecosistemas con soluciones económicamente viables y con alto grado de semejanza a procesos naturales para combatir problemáticas actuales vinculadas entre estos y las sociedades. También se puede ver como el diseño de ecosistemas sostenibles que integran a la sociedad humana con el medio ambiente en beneficio de ambas. Los objetivos pueden ser de dos tipos: restaurar ecosistemas previamente dañados por las sociedades o desarrollarlos por completo y es por ello que Mitsch, (2012) hace mención de cinco categorías:

- Ecosistemas usados para reducir contaminación
- Ecosistemas imitados o copiados para reducir problemáticas.
- Ecosistemas existentes modificados en beneficio de la ecología.
- Ecosistemas utilizados para beneficio humano sin destruir el balance ecológico.

Dada la naturaleza de esta rama de la ingeniería, sus soluciones recaen directamente en las bases de la ecología, por lo que entender los procesos naturales de los ecosistemas es fundamental para el planteamiento, el diseño, la construcción y la operación de la solución cualquiera que sea que se proponga. Las aproximaciones a la ecología pueden hacerse a distintos niveles jerárquicos: para organismos individuales, poblaciones, comunidades, ecosistemas hasta llegar a una perspectiva global la cual es muy compleja para su análisis. Para hacer ingeniería ecológica de calidad no solo se debe enfocar el proyecto en el nivel jerárquico en el que se esté planteando, también se debe tener noción de lo que acontece en los otros niveles y ser flexible al momento de diseñar las soluciones.

Hay distintas estrategias aplicables en este campo de ingeniería, una de ellas es convertir a los problemas en soluciones, como puede ser el estabilizar el exceso de contaminantes por medio de las funciones de algún ecosistema y derivar algún subproducto útil. Se tienen dos tipos de herramientas: las especies de flora y fauna y la tecnología existente.

En el diseño de una solución de ingeniería ecológica hay principios que deben tenerse claros: la energía que va a determinar el ecosistema y sus funciones, el proceso con el cual el ecosistema va a lidiar al integrarse en el nuevo ambiente y los fenómenos de preadaptación que puedan existir para favorecer a los individuos que se busque tener. Para favorecer la organización de las especies en su nuevo hábitat y reducir el impacto del cambio es que se debe conocer las posibilidades fisiológicas, morfológicas y de comportamiento de las especies para adaptarse junto con las condiciones de construcción con las que se pueda jugar (Kangas, 2003) es por ello que Mitsch, (2012) enlista los puntos clave de un buen diseño ecológico en cinco principios:

- Auto-organización: es considerar la organización propia de los individuos en el diseño ya que aportan más que el propio diseño ingenieril.
- Comprobación de teorías ecológicas: Los ecosistemas intervenidos y diseñados con base en teorías sirven para darles peso en caso de ser efectiva, más no de confirmarla ya que siempre puede haber debilidades en las soluciones propuestas.
- Pensamiento del sistema: no se debe pensar en las causas y efectos de los daños ya existentes en el medio para su intervención más de pensar en el ecosistema como un todo.
- Uso de energía natural: Debe estar basada en el uso de energía natural como son la solar, la eólica y la hidráulica.
- Conservación de ecosistemas: Es contraproducente afectar los ecosistemas dado que se afectan directamente tanto los productos con y sin valor económico que brinda la naturaleza.

## 2.4. Ejemplos del uso de elementos vivos

Se describen tres investigaciones relativas al uso de elementos vivos en la protección de la costa, La primera relativa a la estabilización de sedimento que favorecen los pastos marinos, realizada en Indonesia por Christianen et al., (2013). La segunda concerniente a la inducción de microhábitats sobre rompeolas, realizada en Australia por Waltham et al., (2018). La última realizada por Chowdhury et al., (2019) en el Golfo de Bengala para medir la efectividad de protección costera con arrecifes de ostras en costas monzónicas.

### *Servicios de protección de los pastos marinos a las costas.*

Christianen et al., (2013) hicieron un estudio en una zona submareal entre un arrecife costero y la costa en la isla de Derawan, Indonesia cubierta por pastos marinos, principalmente por la especie *Halodule uninervis*, con la característica de tener follaje de baja altura a causa de un promedio de consumo por parte de tortugas (*Chelonya midas*) mayor al de crecimiento de los pastos. Los autores buscaron responder a tres cuestionamientos: si los pastos marinos con bajo nivel de follaje contribuían a la estabilización de sedimento evitando la erosión inducida por el oleaje, si el efecto de estabilización causado por los pastos marinos cambiaba dependiendo del perfil batimétrico y por último si la altura del follaje influía en la estabilización de sedimento. El sustrato existente en la zona de estudio era carbonatado con partículas de tamaño mediano ( $591\pm 30\ \mu\text{m}$ ) que no variaban significativamente a lo largo del año.

El proceso llevado a cabo fue mapear el área de estudio desde la zona de arrecifes hasta la línea de costa. A lo largo del perfil de profundidad se midieron presiones en cuatro estaciones: a 10 cm sobre la capa vegetal para las primeras tres y sobre el arrecife la cuarta. Los autores recopilaron datos durante 209 horas repartidas en 44 días de época de lluvias. En cada una de las primeras tres estaciones se monitorearon 5 cuadrantes de 60 x 30 cm sin vegetación para comparar su comportamiento. De manera simultánea, observaron la erosión en cinco cuadrantes en cada estación protegidos por barreras de 15 costales de 50 kg acomodados de manera semi-circular para poder comparar cuadrantes con y sin protección de oleaje para identificar si el oleaje era el causante de la erosión. Para medir el efecto del follaje de los pastos en la estabilización de sedimento recabaron datos en cinco cuadrantes protegidos de las tortugas por cada una de las tres estaciones de medición.

Los resultados reportados fueron varios, respecto a la fuerza hidrodinámica observaron que en general la altura de ola disminuía sobre la capa vegetal mientras se aproximaba a la costa, exceptuando ciertas configuraciones de profundidad y altura de ola. En cuanto a la relación del oleaje y la erosión, se reportaron que las barreras de costales redujeron significativamente la pérdida de suelo. Respecto a la estabilización de sedimento, observaron que los pastos marinos reducen de manera importante la erosión causada por el oleaje, identificando mayor energía y mayor nivel de erosión cerca de la línea de costa y del arrecife. Una última observación fue que los pastos deforestados por las tortugas, y los protegidos de éstas estabilizan el suelo con la misma efectividad, pudiendo interpretar que más que las hojas, son las raíces las que favorecen este comportamiento.

*Ingeniería ecológica aplicada a rompeolas para inducir microhábitats*

Se trata de un proyecto desarrollado en Townsville, Australia por Waltham et al., (2018) sobre un rompeolas de roca sobre geotextil con ubicación  $-19.253^{\circ}$ ;  $146.822^{\circ}$  el cual consistió en unir a los rompeolas estructuras de concreto a semejanza de maceteros con dimensiones  $0.40\text{ m} \times 0.35\text{ m} \times 0.25\text{ m}$  y un peso aproximado de  $50\text{ kg}$  (ver Figura 11) para fomentar la creación de microhábitats. Fueron nueve de estas estructuras las colocadas, 3 con la cara abierta hacia arriba, 3 con la cara abierta a  $45^{\circ}$  en dirección tierra adentro y 3 a  $45^{\circ}$  en dirección al mar como se muestra de tal forma que al bajar la marea más allá de  $1.1\text{ m}$  el agua se retuviera en las cavidades. Las hipótesis para el desarrollo de los microhábitats fueron dos: habría diferencias entre las colonizaciones en las paredes internas y las externas de las cajas, así como entre las cajas con las distintas inclinaciones.



Figura 11. Estructuras huecas para fomento de microhábitats direccionadas  $45^{\circ}$  desde la vertical hacia tierra adentro y hacia mar adentro respetivamente (Waltham et al., 2018).

Este sitio tiene un rango intermareal de  $2.2\text{ m}$  y una temporada de lluvias entre enero y marzo en la que precipita el  $90\%$  del total anual. La observación de los elementos fue semanal los primeros dos meses, momento en el que se detecta colonización, y posteriormente trimestralmente hasta llegar a los dos años de observación (junio 2016). En estas lo que midieron fue el porcentaje de cobertura de las paredes en un cuadrante de  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  al centro de cada pared. Como parte del estudio midieron la capa de sedimento acumulado al interior de las cajas.

Al término del primer bimestre encontraron algas epilíticas y crustosas en las caras internas. Al año se observó en las caras externas influencia de las lapas, percebes y algas epilíticas, mientras que el interior estaba dominado por ostras, gusanos tubícolas (*Riftia pachyptila*), algas crustosas y moluscos. Al segundo año ya se había desarrollado una interacción más fuerte entre las especies del interior y del exterior habiendo siempre diferencia entre las coberturas interior y exterior. La acumulación de sedimento oscilaba entre  $2.5$  y  $5\text{ cm}$  sin distinción de ángulo y haciendo mención de que el periodo de estudio tuvo un promedio de lluvia menor al habitual lo que indica que probablemente cada  $10$  años se requeriría mantenimiento para recuperar superficie al interior.

Demostraron que las estructuras de retención de agua son adecuadas para promover la colonización de especies y que podrían ayudar a la protección de especies contra exposición a bajas temperaturas. Hay evidencia de que ecosistemas biodiversos y complejos superan los beneficios de ecosistemas simples y con mayores superficies; y a pesar de que se desarrollaron

ecosistemas simples también se encontraron que las inclinaciones favorecieron crecimientos en forma de repisa a semejanza de arrecifes de coral que favorecen al crecimiento del hábitat.

### *Protección costera de rompeolas con ostras*

Chowdhury et al., (2019) publicaron los resultados del análisis de un proyecto de rompeolas con ostras, dominados por la especie *Saccostrea cucullata* en marismas intermareales en estado de erosión en la isla Kutubdia, en la costa subtropical del sureste de Bangladesh, en el Golfo de Bengala, para medir la efectividad de protección costera con arrecifes de ostras en costas monzónicas. Hicieron mediciones de: disipación de oleaje, cambios en la línea de costa, patrones de erosión-acumulación, movimiento lateral de marismas y su crecimiento relativo durante cuatro estaciones del año, para comprobar sus hipótesis de que las estructuras disminuyen la erosión del suelo, promueven la estabilidad de las marismas y favorecen el crecimiento lateral de marismas.

Eligieron estructuras para crecimiento de bivalvos por su resiliencia al aumento del nivel del mar y a la erosión que generan los cada vez más intensos temporales, ventajas sobre pastos y otros tipos de vegetación. Para esto se construyeron tres rompeolas de 0.6 m de alto por 20 m de largo y se reportaron también zonas control. Tiene entre otras ventajas el ser hábitat de peces y otros invertebrados.

Los resultados obtenidos respecto a la disipación de oleaje variaron dependiendo de la estación ya que la intensidad del oleaje varía. El oleaje fue bloqueado casi en su totalidad cuando el nivel del mar era menor a 0.50 m y para mayores a 0.60 m la disipación del oleaje variaba dependiendo de la altura de ola y el nivel del mar, siendo siempre mejor disipadas olas con longitud de onda mayor a 40 cm. Respecto a la dinámica de la sedimentación tanto en las zonas control como en las que tenían protección hubo erosión en época monzónica siendo menor la erosión en las zonas con los rompeolas. Por el contrario, en la temporada posterior a los monzones se reportó acreción de sedimento, mayormente en las zonas de marismas aledañas a las estructuras de protección. Las planicies intermareales sufrieron acreción de sedimento de hasta 29 cm con impacto en una distancia de hasta 35 m en dirección a la línea de costa, la cual fue en promedio tres veces mayor a la registrada en las zonas control. Posterior a estos 35 m los niveles se mostraron similares a los sitios control.

En el caso particular de la isla Kutubdia, a lo largo del año de análisis, fue la erosión la que tuvo mayores impactos, siendo casi del doble en magnitud en las zonas sin las estructuras de protección costera. El resultado observado al término del año de estudio en la dinámica de las marismas fue una expansión vegetal lateral de 1.37 en las zonas protegidas y una reducción de 0.2 en las zonas no protegidas.

Los autores concluyeron que los rompeolas con arrecifes de ostras disminuyen la erosión en plataformas intermareales bajas por lograr la estabilización de sedimentos tanto en periodos de oleaje con alta energía como con baja, favoreciendo también el crecimiento de vegetación de marismas que a su vez ayudan también a la estabilidad de los taludes costeros.



### 3. GENERALIDADES SOBRE EL MANGLAR Y SU USO COMO ELEMENTO DE PROTECCIÓN

#### 3.1. Manglar, tipos y formas

La estructura de los manglares puede diferir de un individuo a otro debido a la diversidad de especies que existen dependiendo de su ubicación geográfica ya que el clima, las mareas y las condiciones geomórficas cambian (Worthington et al., 2020). Se detallan las principales especies de mangle a continuación, haciendo énfasis en aquellas que se encuentran en territorio mexicano.

*Rizophora mangle*, también llamado mangle rojo o es un árbol perennifolio y halófito, cuyas características básicas son:

- Altura: Oscila entre 1.5 y 15 m.
- Diámetro: < 0.50 m.
- Copa: Redondeada con las hojas aglomeradas en las puntas de las ramas.
- Hojas: Varían entre 8 y 13 cm de largo y 4 y 5.5 cm de ancho.
- Tronco: Recto.
- Raíces: Adventicias, ramificadas, curvas.
- Ramas: simples o dicotómicas.
- Color: olivo claro.

La forma reproductiva es a través de frutos, que son una baya de 2 a 3 cm de largo en donde se desarrolla una semilla que se dispersa gracias al propágulo que mide de 22 a 40 cm de largo y hasta 2 cm de diámetro. En México tiene presencia en las costas, desde Chiapas en el sureste y Quintana Roo en la península de Yucatán hasta latitudes que sobrepasan el trópico de Cáncer: la Isla de San Esteban, Baja California en el mar de Cortés y Tamaulipas en el Golfo de México son ejemplo de ello. En el mundo se extiende por las costas centroamericanas hasta Ecuador de forma continua, por el contrario, en el atlántico americano tiene presencia de forma discontinua desde Florida hasta Brasil. En África su presencia va desde Angola en el sur hasta Mauritania. (Conabio, 2013).

*Avicennia germinans*, o mangle negro, a diferencia de *R. mangle* es mucho más alto, encontrándose entre los 15 y 30 m con un diámetro que puede llegar a los 60 cm. En las zonas de manglar es la especie que se encuentra en las partes menos susceptibles a inundación y con menores niveles de salinidad. En general crece en las orillas de los esteros y lagunas hacia tierra adentro, con una altitud media de 5 msnm y máximas de 15 msnm. Sus troncos son usualmente huecos y en contraste con otras especies es resistente a la sombra. Sus condiciones fenológicas son similares a las de *R. mangle*, con hojas, flores y frutos todo el año (CONABIO-PRONARE, 2003a).

*Laguncularia racemosa* o mangle blanco es un árbol que llega a los veinte metros de altura y 60 cm de diámetro, con copa redondeada y con corteza de colores gris o rojo oscuro con tronco recto y ramas ascendentes (CONABIO, 2021a). Su reproducción es igual que las anteriores

especies, sin embargo, su floración es de febrero a mayo y la dispersión de los frutos es de agosto a septiembre. (CONABIO-PRONARE, 2003c).

*Conocarpus erectus* o también llamado mangle botoncillo es un árbol que va de los 8 a los 20 m, con d.a.p. de los 30 a los 80 cm, con ramas ascendentes y tronco recto (CONABIO, 2021b), con flores todo el año y con frutos en verano y otoño. En México tiene presencia en los litorales de todos los estados con mayor presencia en las costas del Golfo, y en el mundo se encuentra también en Centroamérica, el caribe y la costa tropical oeste de África (CONABIO-PRONARE, 2003b).

### 3.2. Condiciones de supervivencia del manglar

Siempre asociados a los trópicos, son ecosistemas de las zonas intermareales que subsisten a partir de intercambio de nutrientes con aguas costeras, regido por la geomorfología, el régimen intermareal, el clima y las fuentes de agua provenientes de tierra adentro (Alongi, 1996). En México crecen cuatro distintos tipos de mangle: el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), el mangle negro (*Avicennia germinans*) y el mangle botoncillo (*Conocarpus erecta*).

De acuerdo con Lieth et al., (1990) hay tres categorías medioambientales bajo las cuales puede estar dominada una zona de manglar: los regidos por afluentes de ríos, los regidos por las mareas y los regidos por características de carbonato en la zona. Las primeras dos categorías tienen gran influencia de sedimentos alóctonos, mientras que la última de las mencionadas genera sus sedimentos en la zona, ya sea por el mismo manglar o algún otro factor como pueden ser la sedimentación calcárea o el crecimiento de arrecifes. Los parches de manglar dependientes del afluente de ríos son más propensos a desarrollarse en llanuras deltáicas abandonadas por el río donde los flujos de agua ya no son tan intensos como en deltas activos pudiendo tener más dependencia a las fluctuaciones de mareas. Las corrientes que generan estas fluctuaciones son las que controlan principalmente la sedimentación. Es en islas oceánicas sin fuentes de sedimentos próximas o suelos carbonatados donde los manglares son agrupados en la tercera categoría, donde se encuentran suelos con limos y su fuente de sedimento son los propios que genera el manglar. Las zonas con mangle regidas por el subir y bajar de las mareas se han desarrollado como sistemas en estuarios protegidos por llanuras costeras datadas del holoceno. También hay casos en los que son bahías que han sido gradualmente reducidas en dimensiones por procesos de sedimentación. Basado en las extensiones existentes de manglar para el año 2016, su distribución se encontraba como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Extensión de distintos tipos de manglar a nivel global

Tipo de sistema	Extensión territorial [km <sup>2</sup> ]	Porcentaje
Deltáicos	54,972	40.5
Estuarinos	37,411	27.5
Costeros	28,493	21.0
Lagunares	14,993	11.0

La costa del Pacífico mexicano es notoriamente árida y semi-árida con un período de lluvias corto pero con precipitaciones fuertes causadas principalmente en temporada de huracanes. Los

manglares de esta línea de costa del país, que recorre poco más de 7800 km, están asociados tanto a lagunas costeras con afluentes de agua dulce permanentes o temporales como a bahías abiertas con oleaje de baja energía. Estos además de estar pobremente desarrollados están marcados por la frecuencia de las lluvias y las condiciones extremas a las que el clima llega en invierno (Lieth et al., 1990).

En los ecosistemas de manglar, dondequiera que se encuentren, hay tres variables fuertemente relacionadas: el suelo, el agua de mar y los individuos por sí solos. Siempre habrá un ciclo de inundación, donde las plantas se verán sometidas a mayores niveles de salinidad, los niveles de oxígeno en el agua bajan y se dan condiciones anaerobias que propicia la presencia de ácido sulfhídrico ocasionalmente, o bien, acumulación de sulfuros los cuales influyen en la acidez del sitio en el cual los individuos crecen (Ogino, 1993).

Worthington et al., (2020) exponen y relacionan los factores ecosistémicos de los manglares: los que se desarrollan en suelos carbonatados son los sistemas lagunares y los costeros con bajos niveles de energía incidente ya sea por barreras de arena o coral; mientras que manglares con suelos no carbonatados pueden ser encontrados en cualquiera de los tipos de sistemas nombrados en la tabla 3. Es conveniente hacer mención de que los sistemas deltaicos están dominados por los afluentes de ríos, los estuarinos por las mareas, los lagunares por el oleaje y los costeros se encuentran sobre camas de rocas generalmente ahogadas. Se ha identificado que a mayor actividad de mareas los manglares son más productivos y generan mayor biomasa.

La especie *Rizophora mangle* tiene mayor presencia en zonas intermareales lagunares y esteros con continuo movimiento de agua y una variabilidad salina entre la hipersalinidad y lo salobre. Su mejor crecimiento se da en batimetrías de pendiente suave, protegidas de oleajes fuertes, pero con considerable variación de mareas. Los suelos más convenientes para esta especie son los lodos finos, con arcilla y un contenido orgánico alto, mayor que el requerido por otras especies como *Avicennia*. En el conjunto ecosistémico que forman las distintas especies de mangle, *Rizophora mangle* es el que se desarrolla más cerca del mar por ser la que soporta mayor salinidad. Otras características de adaptabilidad son la presencia de neumatóforos, estructuras para eliminar el exceso de sal, y la capacidad de crecer con niveles de insolación drásticos. Esta especie tiene especial intolerancia a condiciones severas de sombra y a fluctuaciones de temperatura mayores a los 10 °C, al igual que a temperaturas menores a 0 °C. Estudios demuestran que con métodos de siembra directa, estos individuos tienen una tasa de supervivencia al establecerse que ronda el 90 % (Conabio, 2013).

*Avicennia germinans* requiere otras condiciones, aunque su presencia en México es similar, prácticamente a lo largo de ambos litorales excluyendo el estado de Baja California e igualmente requiere suelos arcillosos y limosos, necesita suelos profundos con mucho menor drenaje que *R. mangle*, pudiendo llegar a condiciones de estar permanentemente inundados. En cuanto a temperaturas esta especie es la más resistente a bajas temperaturas soportando hasta los -11 °C sin morir, aunque es notoria su sensibilidad al viento y a las bajas temperaturas siendo su clima ideal entre los 22 y los 28 °C. Su porcentaje de supervivencia al establecerse en suelo fluctúa entre el 90 y 95 % (CONABIO-PRONARE, 2003a).

*Laguncularia racemosa* crece favorablemente en temperaturas de 18 a 27 °C, soportando máximas de 30 °C y su tolerancia a bajas temperatura es la menor entre todas las especies de mangle, siendo tan sólo de 15.5 °C. Su porcentaje de supervivencia es de 80 % (CONABIO, 2021a). Tiene una extensión territorial en México similar a las demás especies y su altitud media

de crecimiento es de 3 msnm. Sus condiciones de suelo deben de ser mayores a los 70 cm, con altos niveles de sedimentación y baja influencia de mareas (CONABIO-PRONARE, 2003c).

*Conocarpus erectus* crece a una media de 3 msnm y a no más de 5 msnm. Requiere de aguas someras y salobres con aguas tranquilas, con características de suelo iguales a las especies ya mencionadas, ricos en materia orgánica. Puede crecer en aguas no drenadas o drenadas estacionalmente y a una temperatura media de entre 22 y 25 °C. De entre las cuatro especies ya mencionadas, que son las existentes en México, ésta es la que requiere zonas menos inundadas y con menores niveles de salinidad (CONABIO-PRONARE, 2003b).

### 3.3. Servicios ecosistémicos del manglar

Son sistemas que pueden ser desarrollados en costas desérticas dado que viven con aguas saladas, dando así zonas maderables alrededor del mundo, como es el caso del río Indo en Pakistán, donde las poblaciones rurales extraen madera como combustible de los manglares de *Avicennia marina*. Al igual que los bosques, los manglares son sistemas que por tener un alto nivel de deposición de biomasa tienen la cualidad de absorber grandes cantidades de CO<sub>2</sub> junto con otros gases de efecto invernadero. Es viable dar pie a su crecimiento en zonas no productivas para compensar emisiones causadas por la sociedad (Lieth et al., 1990). La recuperación de suelos degradados es otra función que dan los manglares: la tasa de descomposición de estos ecosistemas es muy alta, dando una relación carbono-nitrógeno alta, pudiéndose así tener suelos muy fértiles. (Conabio, 2013).

Refugio y sombra son dos servicios que brinda el manglar a gran variedad de especies, tanto acuáticas como terrestres, de distintos niveles tróficos. Estas zonas costeras que cubren el 75 % de las costas tropicales son el sitio de desove de entre el 40% y 70% del total de especies marinas. Otro servicio ecosistémico es la variedad de organismos, siendo la principal fuente de alimento de distintos seres heterótrofos. Entre las especies que tienen alto valor económico y se favorecen de estos ecosistemas se encuentran el ostión, el camarón, entre otros los cuales han sido identificados como pertenecientes de once familias de moluscos, veinte de crustáceos y veintidós de poliquetos (Conabio, 2013).

Para el sistema económico actual el brindar ornato a un sitio y elevar su valor escénico también es considerado un servicio que da el manglar, sobre todo con el auge del ecoturismo y la importancia de los sitios de recreación. Además, el ser barreras de viento en las costas evita la erosión de suelos y permite el desarrollo de zonas urbanas próximas.

Usos del mangle como materia prima, particularmente *R. Mangle*, son: adhesivo (látex) en la fabricación de triplay, madera para artesanías y artículos torneados, colorante azul para fibras de algodón extraído de la corteza, combustible, construcción rural y marina, curtido de pieles con corteza y raíces por el alto nivel de taninos, implementos para herramienta, diversas construcciones de madera como puentes, pilotes, vigas, barcos, remos, uso medicinal y apícola, entre otros (Conabio, 2013). La especie *Avicennia germinans* tiene prácticamente los mismos usos, exceptuando las construcciones dado que su madera es hueca (CONABIO-PRONARE, 2003a). La especie *Conocarpus erectus* es especialmente favorecedor en la conservación de suelos, siendo usado en algunos países como fijador de dunas costeras (CONABIO-PRONARE, 2003b).

### 3.4. El manglar y la protección de la costa

Es un elemento de ayuda para la protección y estabilización de la línea de costa ya que reduce los efectos del oleaje y las corrientes sobre el suelo, así como contra cualquier evento climático-meteorológico o hidrodinámico. Son clave en la variedad genética de las costas para mantener ecosistemas sanos y diversos (Yáñez-Arancibia et al., 1999). En resumen, su contribución en la protección de la costa es mantener productividad biológica, biogeoquímica y diversidad, disipar tanto la energía del oleaje como la del viento, proveer estabilización de sedimento y retención de suelo entre su entramado de raíces, eliminar contaminantes y consumir nutrientes que pueden causar eutroficación (Barbier, 2011). Se detalla a continuación sus beneficios para la costa:

- Productividad biológica, biogeoquímica y diversidad: A consecuencia de la liberación de partículas de carbono y hojarasca la salud de costas próximas a mangle mejora, así como la calidad del agua de ríos o cualquier otro afluente. Salinidad, fósforo, pH, nitrógeno y carbono son factores en la respuesta del mangle y sus ciclos, por lo que cambios en alguno de estos afectará directamente los ecosistemas dependientes, tal es el caso del fósforo, que a mayor concentración, mayor es la hojarasca (Adame et al., 2013).
- Disipación de energía: Las raíces oponen resistencia al agua, disminuyendo la altura de las olas, el sedimento propicia asomeramiento, alejando la zona de rompiente de la línea de costa y los cambios abruptos de altura del manglar reflejan las ondas. Los análisis de Sánchez-Núñez, (2019) en las costas colombianas arrojaron que la altura de ola disminuye entre 5 y 39 % su altura cuando estas son menores a 35 cm
- Erosión de suelos: Efecto que actúa principalmente bajo presencia de alta energía de oleaje. De acuerdo con Sánchez-Núñez, (2019) los manglares disminuyen las tasas de erosión entre 3 y 15 veces comparado con zonas sin la vegetación, y ante condiciones de baja energía del oleaje y buen transporte de sedimentos puede experimentarse progradación. A pesar de que mitigan la erosión también se pierden superficies considerables de manglar por este fenómeno, tal es el caso del delta del río Sinú, Córdoba, Colombia, donde se pierden 2.9 ha. anuales de manglar.



## 4. PROPUESTA DE OBRA DE PROTECCIÓN CON MANGLAR

### 4.1. Descripción de la estructura

Se planteó un rompeolas prototipo desplantado a los 3.00 m de profundidad, tomando como referencia el nivel de bajamar medio inferior (N.B.M.I) de los datos de la estación mareográfica de San Blas, Nayarit correspondientes al periodo de mayo de 1999 a diciembre de 2017 publicados por la SEMAR (*ver anexos*). Cuenta con un cajón de concreto en la coronación de 10.00 m de ancho y 1.50 m de altura, el cual tiene el propósito de acoger sedimento, sembrar manglar en él y simular un humedal; ya sea para crear zonas abrigadas, como estructura de protección paralela a la línea de costa, protegiendo así zonas de manglar ya existentes en la costa o para ganarle terreno al mar (*ver Figura 12*).

El modelo fue construido a escala 1:25, 40 cm de ancho y 0.06 m de altura de caja de coronación. La caja de coronación fue construida con placas de acrílico transparente de 0.60 cm de grosor. Dado que se pensó como una estructura paralela a la línea de costa y las batimetrías naturales de las plataformas marinas tienden a mostrar pendientes que favorecen el asomeramiento se construyó la estructura sobre una rampa con pendiente de 0.02. Las profundidades se midieron a pie de talud de incidencia.

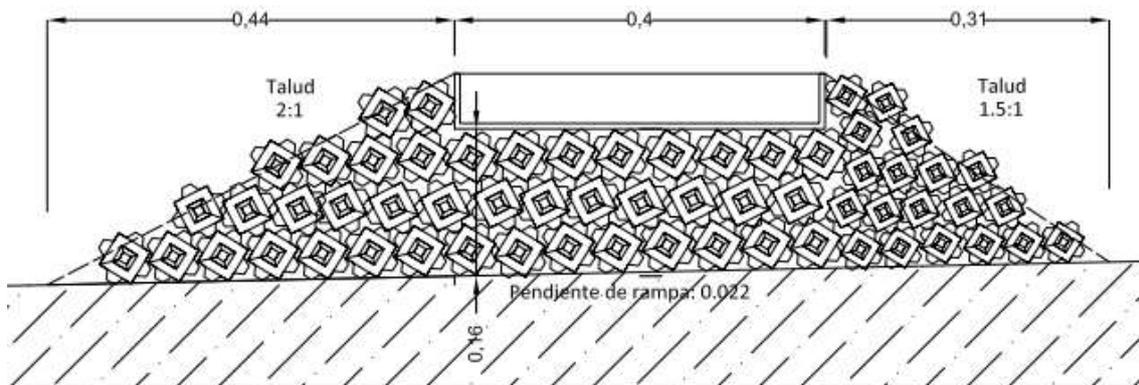


Figura 12. Vista lateral de estructura rompeolas del modelo con medidas en metros.

La estructura ensayada fue diseñada sin núcleo a escala 1:25, con todo el frente y ancho de la coronación cubiertos por la caja de acrílico, con el talud de incidencia 2:1 y el de la zona protegida 1.5:1. Fueron utilizadas dos dimensiones de cubípodos, cuyas proporciones son: un cubo principal de una unidad de longitud cada arista, con protuberancias al centro de cada una de las seis caras en forma de pirámides cuadrangulares truncas con dimensiones de  $\frac{1}{2}$  unidad de longitud en la base,  $\frac{1}{4}$  de unidad en la coronación de estas y  $\frac{1}{4}$  de unidad de altura, como se muestra en la Figura 13.

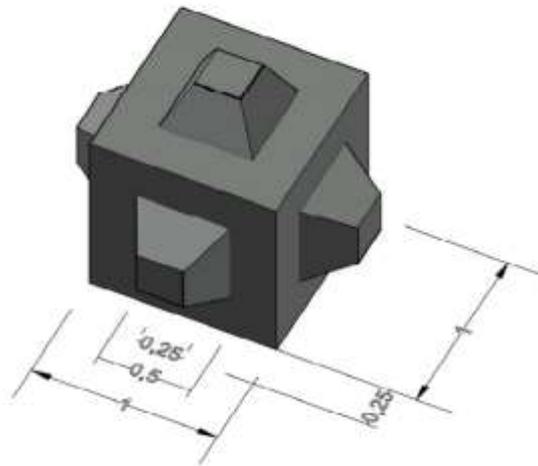


Figura 13. Proporciones de cubípodo utilizado.

El cubípodo de mayores dimensiones se utilizó para construir el talud de incidencia y el cuerpo de la estructura hasta donde termina la caja de acrílico, mientras que el segundo sólo fue colocado en el talud contrario tal como se muestra en la Figura 12. Las dimensiones de estos se muestran en la Figura 14.

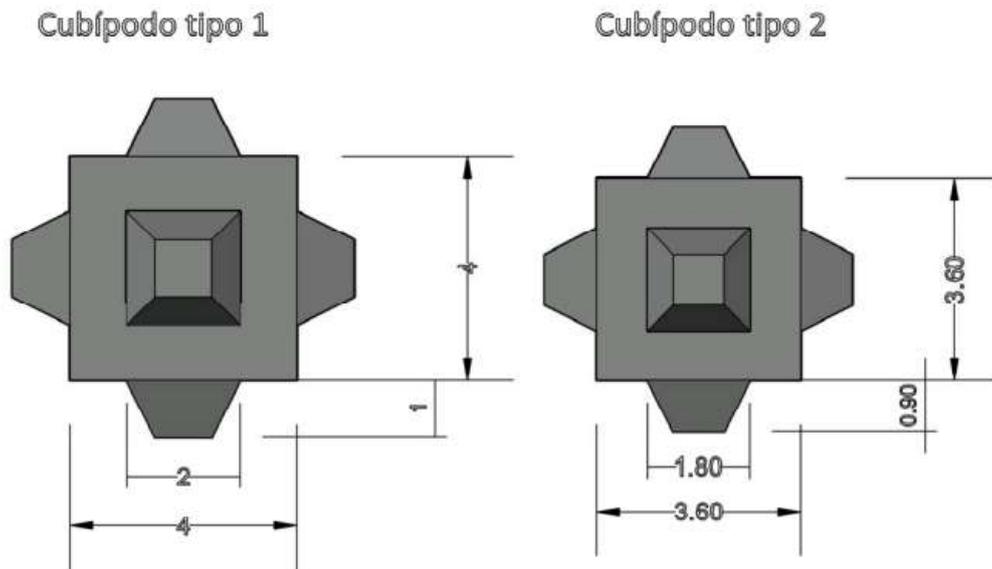


Figura 14. Dimensiones en centímetros de cubípodos de rompeolas modelo.

Para la representación en el modelo de la caja de concreto con el humedal al interior de este se utilizó una caja de acrílico de 40 cm de ancho, 40 cm de largo (10.00 m en prototipo) y 6 cm de altura (1.50 m en prototipo). Dado que no ha sido de interés para este estudio el comportamiento del suelo en la caja se limitó a representarlo con espuma floral, un material polimérico con alta capacidad de absorción y maleabilidad permitiendo incrustar con firmeza los modelos de los individuos de mangle.

## PROPUESTA DE OBRA DE PROTECCIÓN CON MANGLAR

El rompeolas se ensayó con tres distintos arreglos de mangle dentro de la caja de coronación, el control, sin ningún individuo, el cual es el punto de comparación (coronación control), el segundo con 95 individuos y el tercero con 180 individuos como se muestra en la Figura 15. De ahora en más, los tres arreglos serán llamados DC, D1 y D2, respectivamente. La posición de los individuos de *Rizophora mangle* es a cada metro en sentido perpendicular al frente de onda tanto para D1 como para D2. En el sentido paralelo al frente de onda son colocados a cada 2 m en D1 y a cada metro en D2.

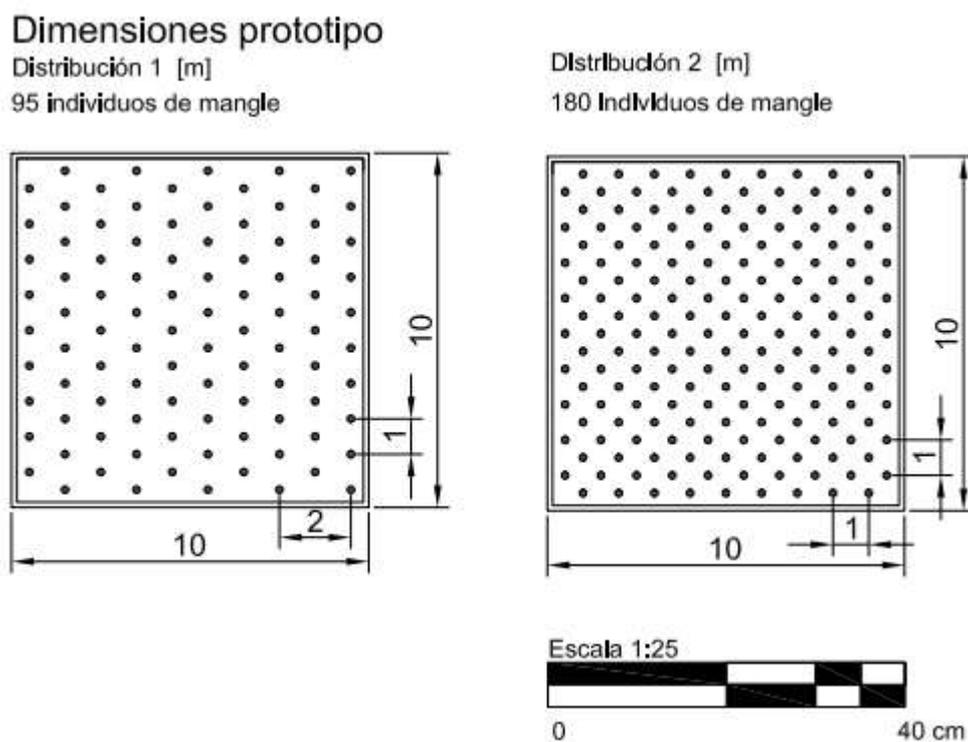


Figura 15. Distribución de manglares en ensayos.

Con base en las dimensiones del canal de oleaje y de los cubípodos escala 1:25, se diseñaron los individuos de *Rizophora mangle* a la misma escala a partir de una planta prototipo de 5 años de edad con 1.20 m de altura. Se decidió elaborar los individuos con alambre de cobre dada la variedad de calibres para representar los grosores de las ramas, troncos y raíces (ver Tabla 4); así como por su maleabilidad y rigidez. La tablas 5 y 6 muestran las dimensiones del individuo prototipo y del modelo a la escala.

Tabla 4. Calibres de cobre utilizados y sus diámetros.

Calibre alambre de cobre	Diámetro [mm]
18	1.245
22	0.771
28	0.356

Para la representación del follaje de cada individuo se utilizaron brotes de brócoli. Se seccionaron de manera manual los fragmentos que se insertaron en las puntas de las ramas del modelo. Un mangle promedio de la edad que se está representando tienen las hojas en los extremos de las rama, por lo que la semejanza que se alcanza con el brócoli es fiel en posición y dimensiones estimadas que varían entre los 15 y 20 cm (*ver Figura 17*). Se abstrajo de la planta prototipo un diseño con seis raíces (*ver Figura 16*) y ocho ramas, cantidad representativa del follaje.

*Tabla 5. Diámetros de mangle rojo en prototipo y modelo.*

	Dimensión prototipo [cm]	Dimensión modelo [cm]	Calibre utilizado	Número de alambres	Dimensión ajustada de modelo [cm]	Dimensión ajustada de prototipo [cm]
Diámetro de tronco	5-7	0.2-0.28	22	6	0.46	11.57
Diámetro de raíz	2-3	0.08-0.12	18	1	0.125	3.11
Diámetro de rama	1	0.04	28	1	0.0356	0.89



*Figura 16. Mangle prototipo para creación de modelos*

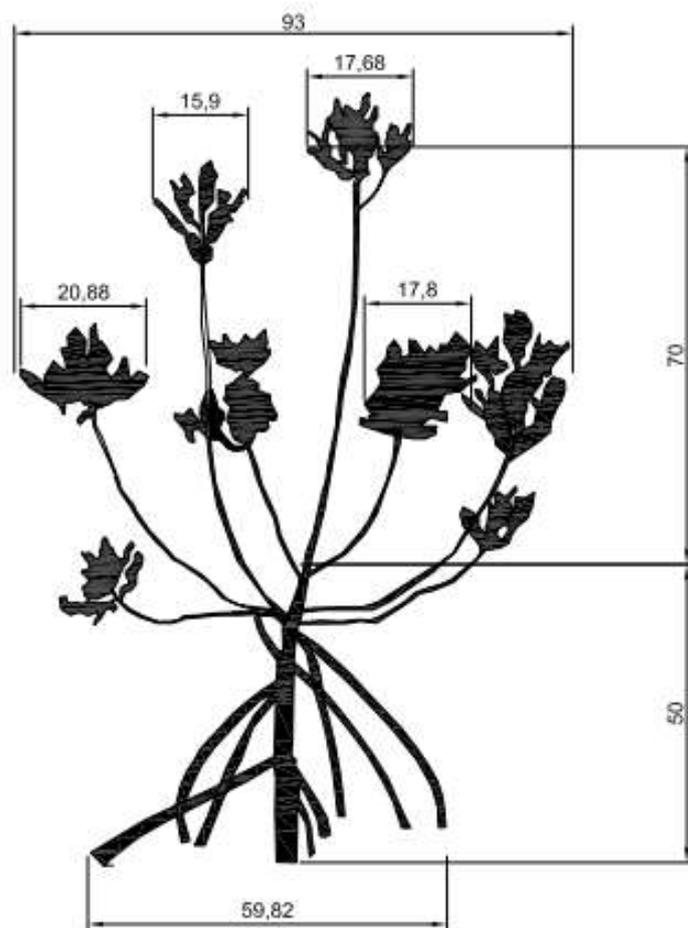


Figura 17. Mangle base para individuos modelo con medidas en centímetros.

Tabla 6. Longitudes de la planta de mangle rojo en prototipo y modelo.

	Dimensión prototipo [cm]	Dimensión en modelo [cm]
Altura total de mangle	120	4.8
Altura de tronco	70	2.8
Altura de follaje	50	2
Diámetro de copa	81-93	3.24 – 3.72
Largo raíz máximo	66	2.64
Largo rama máximo	55	2.2

El procedimiento seguido para su elaboración se detalla en los siguientes incisos:

- Trenzado de 6 alambres calibre 22 de 5 cm para la representación de los troncos.
- Amarre de 4 alambres calibre 28 de 7 cm en el extremo de los troncos para la representación de 8 ramas.
- Amarre de 3 alambres calibre 18 de 7 cm de largo a lo largo de los 3 cm superiores de tronco para representar 6 raíces.
- Colocación de fragmentos de brócoli fresco de aproximadamente 0.5-1 cm en el extremo de cada rama para representar el follaje.
- Espera de 72 horas para el secado del brócoli.

- Aplicación de fijador para cabello comercial al brócoli una vez seco (con tamaño ya encogido al medido originalmente).
- Incruste de 2 cm de cada tronco en el material que representa el sustrato a cada 2 cm o cada 4 cm de acuerdo con cada una de las disposiciones de acomodo mostradas en la Figura 15. Ya en escala 1:25 a manera de retícula.
- Fijación de extremos de raíces al material de sustrato a manera de simular un entramado semejante al que se encuentra en condiciones naturales.

La razón de las longitudes de los alambres de 5 cm para el tronco y 7 cm para raíces y ramas es la siguiente: para el tronco 2 cm penetran en el material, dejando 3 cm fuera que equivalen a los 2.8 cm de altura de tronco. Para las raíces se considera que cada alambre se dobla alrededor del tronco representando dos raíces de longitud máxima (2.64 cm de acuerdo con Tabla 6) restando 1.72 cm para el doblado y para la fijación en el material. Por último, para las ramas se contempló que cada tramo de 7 cm de alambre calibre 28 representa 2 ramas de longitud máxima (2.2 cm de acuerdo con Tabla 6) restando 3.6 cm utilizados en las varias vueltas requeridas para su fijación en el extremo del tronco.

### 4.2. Principio de funcionamiento

Se diseñaron las condiciones de elevación del mar y oleaje oportunos para caracterizar eficazmente la estructura. Se buscó analizar en condiciones de bajamar y pleamar en condiciones de calma y con presencia de dos intensidades distintas de tormenta, basados en fenómenos meteorológicos ocurridos en la zona. Esto llevó a tener seis combinaciones de elevaciones, alturas y periodos, los cuales fueron ejecutados a manera de oleaje regular e irregular lo que duplicó el número de combinaciones.

Cada una de las combinaciones se ejecutó en el canal de oleaje para tres distintos casos: el caso de una coronación sin mangles, el caso de una coronación con una densidad de mangles de 95 individuos y el caso de una coronación con 180 individuos (distribuciones y densidades de los individuos de mangle pueden verse en el subcapítulo 4.1. *Descripción de la estructura*).

#### 4.2.1. Método para escalar el modelo

Para modelar la estructura se adaptaron las dimensiones de las partes que la componen de acuerdo a las dimensiones del canal ya que estas son limitantes, aunado a esto se consideró la escala máxima manejable para la construcción manual de los mangles dado que los grosores de las raíces, ramas y troncos tenían que ser lo suficientemente esbeltos para poder brindar maleabilidad. El escalamiento de las propiedades físicas de las olas y las dimensiones de los mangles fueron decisiones vinculadas para llegar a una propuesta simbiótica. Esto llevó a la elección de escala 1:25. Una vez asignado lo anterior se definieron las dimensiones de los modelos de las piezas prefabricadas. Las dimensiones de la estructura (taludes, alturas, piezas) fueron escaladas geoméricamente, así como las profundidades de agua y alturas de ola, sin embargo, el periodo (T) fue escalado de acuerdo con:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\text{escala}}}$$

#### 4.2.2. Características de niveles de mar, oleaje en ensayos y sobrelevación de tormenta

##### 4.2.2.1. Niveles de marea

A partir de los datos registrados por la Secretaría de Marina (SEMAR) en la estación mareográfica del municipio de San Blás, Nayarit en el periodo comprendido de mayo de 1999 a diciembre de 2017 se extraen dos datos en los cuales se basan los niveles de mar de estos ensayos:

- N.B.M.I.: 0.00 m
- N.P.M.S.: 1.067 m

Para fines prácticos de los ensayos, se consideró el N.P.M.S de 1.00 m el cual será nombrado como sobrelevación de marea. Con estos datos se estableció el nivel de desplante de la estructura a 3.00 m de profundidad a partir del N.B.M.S. Se recordando que la estructura está desplantada sobre una pendiente y que la profundidad de desplante se mide al pie del talud de incidencia.

##### 4.2.2.2. Sobrelevación de tormenta

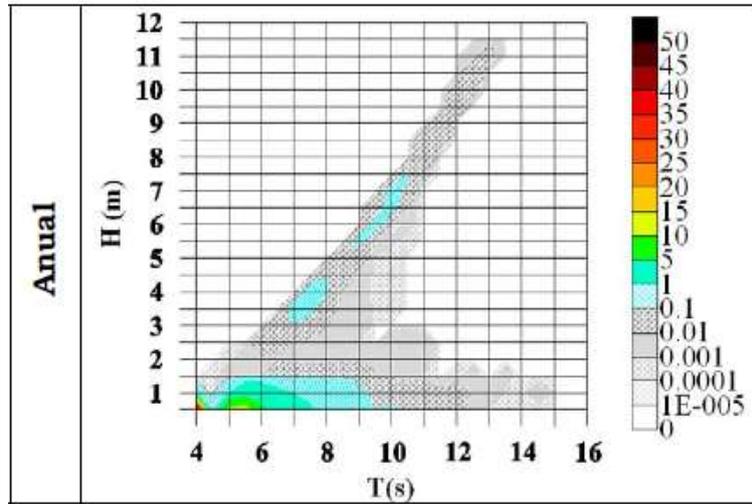
Buscando evaluar dentro de un rango de niveles de ascenso acordes a la zona, con diferencias significativas entre estos, se propusieron tres casos distintos que por cuestiones prácticas se nombran “caso sin tormenta”, “caso de mediana intensidad” y “caso de alta intensidad”, encontrándose así llamadas dichas sobrelevaciones en los apartados subsecuentes del documento.

- + 0.00 m, caso sin tormenta
- +0.50 m, caso de mediana intensidad
- +1.00 m, caso de alta intensidad

No fue de interés tener sobrelevaciones específicas de San Blas dada la naturaleza genérica de la estructura. Sin embargo, se documentó el comportamiento de la costa pacífico-central mexicana para justificar el rango de ascensos elegidos. Fueron principalmente 3 distintos fenómenos meteorológicos los analizados: El huracán Patricia, de categoría 5 ocurrido en 2015: el huracán Nora, de categoría 1 ocurrido en 2021; y el huracán Rick, categoría 2, de los cuales los dos primeros afectaron directamente en Nayarit, mientras que el tercero afectó las costas de Guerrero. De acuerdo con los datos de las estaciones mareográficas del Servicio Mareográfico Nacional, (2020, 2015, 2021), la marea de tormenta con Patricia rondó entre los 0.22 m en la estación de Acapulco, 0.26 m en la de Zihuatanejo, 0.36 m en la de Lázaro Cárdenas, 0.40 m en la de Puerto Vallarta y 0.26 m en la de Mazatlán . Con Nora la marea de tormenta máxima fue en la estación de Manzanillo con 0.50 m seguido de la de Puerto Vallarta con 0.40 m. Rick dio mareas de tormenta máximas de 0.40 m en la estación Lázaro Cárdenas. San Blas se encuentra entre las estaciones de Mazatlán y Puerto Vallarta, por lo que los datos de las estaciones mareográficas permiten suponer un comportamiento similar.

4.2.2.3. Alturas y periodos

A partir de los datos de probabilidad conjunta  $H_s$  y  $T$  anual para la vertiente del pacífico mexicano de Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, 2008 (ver Gráfica 3) se consideraron pertinentes periodos de 8, 10 y 12 segundos dadas sus probabilidades de 0.1, 0.01 y 0.001 puntos porcentuales. Posteriormente se escalaron dichos periodos para que fueran generados por la pala de oleaje (ver apartado 4.3.2.)



Gráfica 3. Probabilidad conjunta de HS y T medio (Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, 2008).

Para proponer alturas de ola se calculó como primera aproximación la altura de ola en rompiente máxima posible  $H_b$ . Se consideraron el método de Goda (1970) y el de Ostendorf y Madsen (1979) mostrados por Cruz Quiroz, (2010) por ser criterios de rotura para oleaje regular que consideran la pendiente de la playa (pendiente de la rampa en este caso).

Goda:

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[ 1 - \exp \left\{ - \frac{1.5\pi h_b}{L_0} \left( 1 + 15 \tan^{4/3} \beta \right) \right\} \right]$$

Ostendorf y Madsen:

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh \left( \frac{(0.8 + 5 \tan \beta) 2\pi h_b}{L_b} \right)$$

Una vez calculadas las alturas de ola, que resultaron iguales por ambos métodos, se ensayaron estas en el canal de oleaje de manera preliminar tanto con presencia de la estructura como sin la misma para verificar que el oleaje no estuviera rompiendo antes del sensor 1 (inicio de la rampa), sino cercanos al talud de incidencia y así tener datos de altura de ola inalterados por el efecto de rompiente. Dado que varios de los casos no cumplían con el requisito se redujeron las alturas de ola hasta evitar la rotura, siendo el caso 3 el más crítico por tener la combinación de mayor altura de ola con menor profundidad. Este fue el rector de dichos cambios. Se buscó también tener alturas de ola considerablemente e igualmente diferenciadas para poder cotejar un mayor espectro de resultados. En la Tabla 7 se muestran las alturas de ola máximas calculadas y las utilizadas a partir de las consideraciones ya mencionadas. El objetivo de esto fue que el

## PROPUESTA DE OBRA DE PROTECCIÓN CON MANGLAR

caso de oleaje más intenso fuera menor y lo más cercano posible a la altura de ola máxima en rompiente.

*Tabla 7. Alturas máximas posibles para cada profundidad.*

d	L0	Lb	H max Goda	H max Madsen	H utilizada
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.12	2.26	1.68	0.09	0.09	0.04
0.14	3	2.29	0.11	0.11	0.08
0.16	3.78	2.95	0.12	0.12	0.11
0.16	2.42	1.92	0.12	0.12	0.04
0.18	3.21	2.58	0.13	0.13	0.08
0.20	4.03	3.28	0.15	0.15	0.11

### 4.2.2.4. Diseño de casos de marea y oleaje a ejecutar

Contemplando la sobreelevación de marea de 1.00 m y las sobreelevaciones de tormenta de 0.50m y 1.00 m, todo a partir del N.B.M.I a 3.00 m de desplante se llega a seis distintas condiciones de oleaje y cinco elevaciones de mar (ver *Tabla 8* y *Figura 18*).

*Tabla 8. Casos de elevaciones de mar y oleaje.*

	Caso	Prototipo			Modelo		
		H	T	d	H	T	d
N.B.M.I		[m]	[s]	[m]	[m]	[s]	[m]
	<b>1</b>	1.00	8	3.00	0.04	1.6	0.12
	<b>2</b>	2.00	10	3.50	0.08	2	0.14
	<b>3</b>	2.80	12	4.00	0.11	2.4	0.16
N.P.M.S	<b>4</b>	1.00	8	4.00	0.04	1.6	0.16
	<b>5</b>	2.00	10	4.50	0.08	2	0.18
	<b>6</b>	2.80	12	5.00	0.11	2.4	0.20

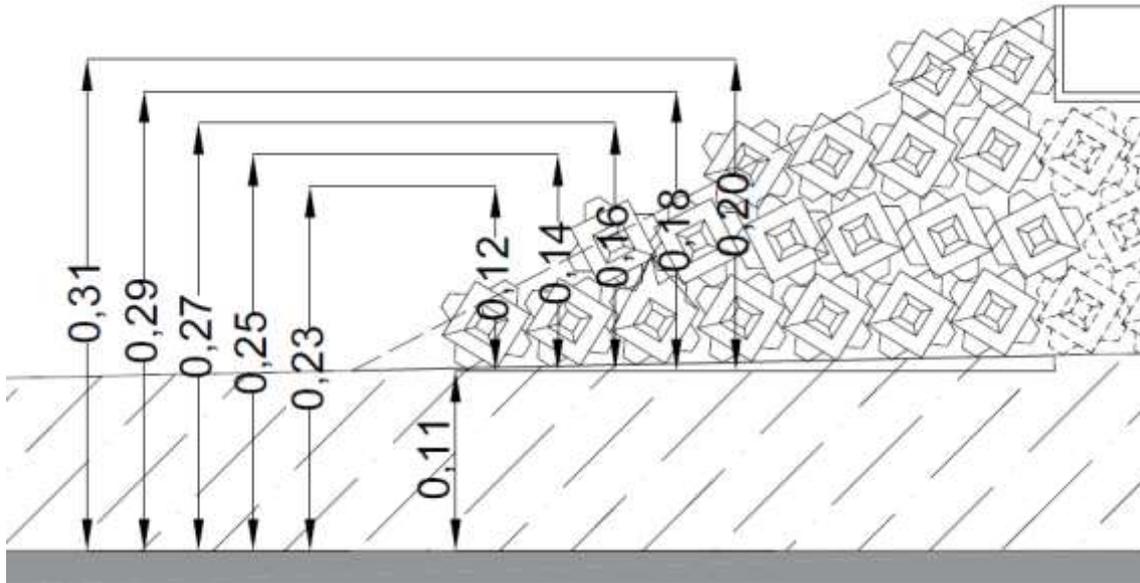


Figura 18. Elevaciones de mar para ensaye escaladas, medidas en metros, a pie de talud.

Los seis casos considerados tanto en oleaje regular como irregular, en combinación con las dos coronaciones de la estructura con distintas densidades de mangle y con la coronación control, arrojan 36 distintas pruebas que deberían haber sido ejecutadas, sin embargo, las condiciones sin tormenta tanto en N.B.M.I. y N.P.M.S. no rebasan la estructura, lo que conlleva que sin importar la densidad de mangle en la coronación la disipación sólo la hará el cuerpo del rompeolas, pudiendo así sólo realizar los ensayos control de dichos casos, reduciendo así a 28 casos.

Mientras las olas no sobrepasen la coronación de la estructura, la totalidad de la disipación de la energía es por parte de los cubípodos y la pared de la caja de concreto; es cuando la altura de estas aumenta que se presenta rebase y el conjunto de individuos de mangle contribuye con un porcentaje de disipación de energía al generar turbulencia con el entramado de raíces, reflejándose directamente con la disminución de la altura de ola del lado protegido por la estructura.

El borde posterior del cajón de concreto junto con los cubípodos del talud de aguas tranquilas, cuando el agua llegue a recorrer los diez metros de ancho de coronación, favorecerá aún más las pérdidas de energía, fenómeno que se refleja de manera separada al mangle con el arreglo control.

### 4.3. Descripción del modelo experimental

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en un canal de oleaje de 19.50 m de largo, 0.60 m de altura y 0.40 m de ancho con paredes de vidrio templado y una estructura de acero inoxidable que lo soporta. El fondo del canal cuenta con dos secciones rectangulares removibles de 0.90 m de largo y 0.30 m de ancho a 13.00 y 15.50 m de distancia de la pala de oleaje respectivamente, las cuales no se utilizaron para efectos de este estudio.

## PROPUESTA DE OBRA DE PROTECCIÓN CON MANGLAR

El sistema de generación de oleaje, a un extremo del canal, es de la compañía HR Wallingford. Sus partes son una pala de tipo pistón de acero inoxidable regida por un transmisor de accionamiento eléctrico apoyado en la parte superior de las paredes. El software de simulación de estados del mar es el HR Merlin con el cual se puede simular oleaje regular, irregular y otros que no fueron planteados para los ensayos aquí reportados, equipado también con un sistema de absorción dinámico de ondas re-reflejadas para emitir con precisión las condiciones de oleaje.

Considerando la posición de la pala de generación de oleaje en su centro como el punto de referencia 0 en el extremo izquierdo del canal, este tiene una rampa ascendente que comienza a los 6.36 m desde el fondo del canal, llegando a su punto más alto a los 13.74 m con 0.16 cm; punto a partir del cual nace una pendiente descendente que termina igualmente en el fondo a los 14.44 m. A 18 m de la pala comienza un talud de roca de río con el objetivo de disipar y disminuir la reflexión que ocasiona la pared de fondo y favorecer un estado de ondas progresivas.

Se colocaron 10 sensores de nivel conectados a monitores de la compañía HR Wallingford para determinar la variación de la superficie libre del agua en los ensayos antes y después del modelo de rompeolas. La medición de estos sensores se hace mediante el flujo de corriente en una sonda sumergida compuesta por un par de barras paralelas de acero inoxidable donde la corriente entre las barras es proporcional a la profundidad sumergida, convirtiendo cada profundidad instantánea en un voltaje. Las mediciones de los voltajes registrados se hacen con el programa imc SPARTAN. Tomando la pala como punto de referencia, las distancias de esta a cada uno de los sensores se muestran en la Tabla 9.

*Tabla 9. Distancias de la pala de generación de oleaje a los sensores de nivel.*

# Sensor (S)	Distancia horizontal a la pala [m]
1	6.06
2	10.62
3	10.93
4	11.16
5	13.27
6	13.5
7	13.81
8	14.58
9	14.81
10	15.12

En la Figura 19 se visualiza la ubicación del rompeolas en canal, así como de los sensores de nivel (identificados con una S), los puntos de inicio y fin de la rampa sobre la cual fue desplantado el rompeolas modelo y la estructura de disipación al final del canal.

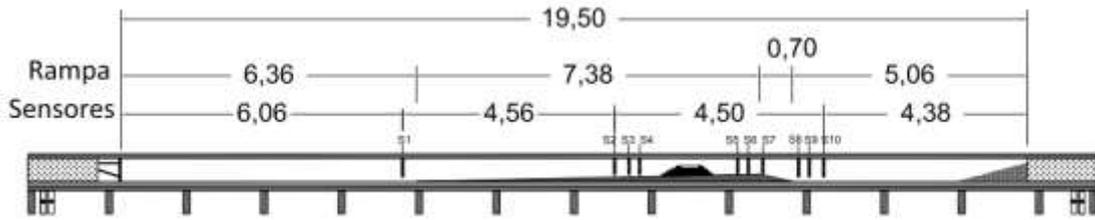


Figura 19. Posiciones de sensores y rampa central respecto a la pala de generación de oleaje en posición centrada.

Un acercamiento en la zona de interés se muestra en la Figura 20 para conocer las distancias a las cuales están los sensores entre sí y respecto a los taludes.

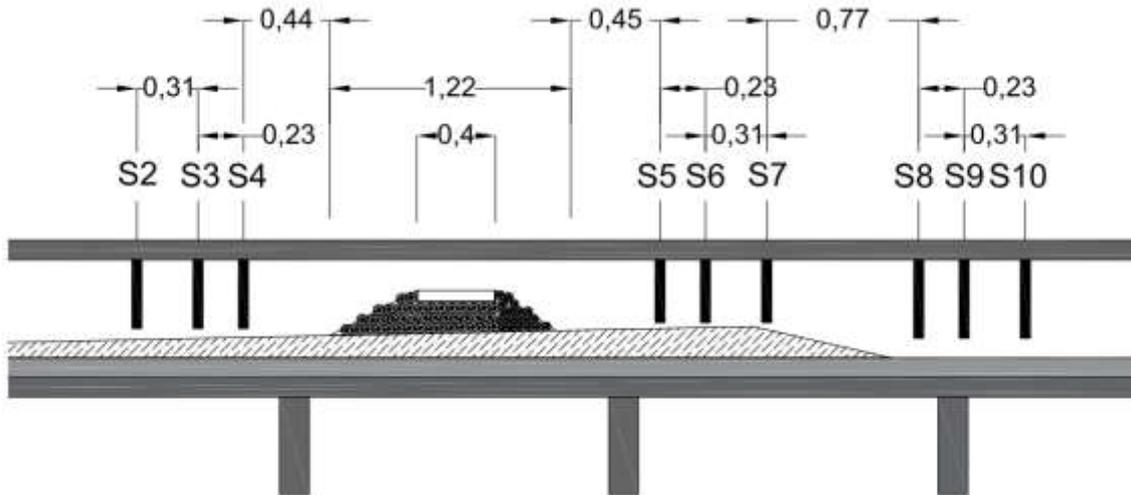


Figura 20. Distancias entre sensores próximos al rompeolas.

#### 4.3.1. Método de ubicación de sensores

De acuerdo con Baquerizo Azofra, (1995) la medición de alturas de ola por medio de tercias de sensores de nivel es conveniente hacerla con separaciones entre estos iguales a  $\Delta X1$ ,  $\Delta X2$  y  $\Delta X3$  (ver Figura 21). Donde  $\Delta X1 \geq \frac{\pi}{10k}$  y  $\Delta X3 \leq \frac{9\pi}{10k}$ . Recordando que  $k = 2\pi/L$  y  $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh)$  dado que las condiciones de profundidad en todos los ensayos son de aguas en transición. Los valores de  $\Delta X1$ ,  $\Delta X2$ ,  $\Delta X3$  no deben ser múltiplos entre sí.

La distancia horizontal  $D1$  entre el talud y el primer sensor varía dependiendo de cada tercia propuesta.

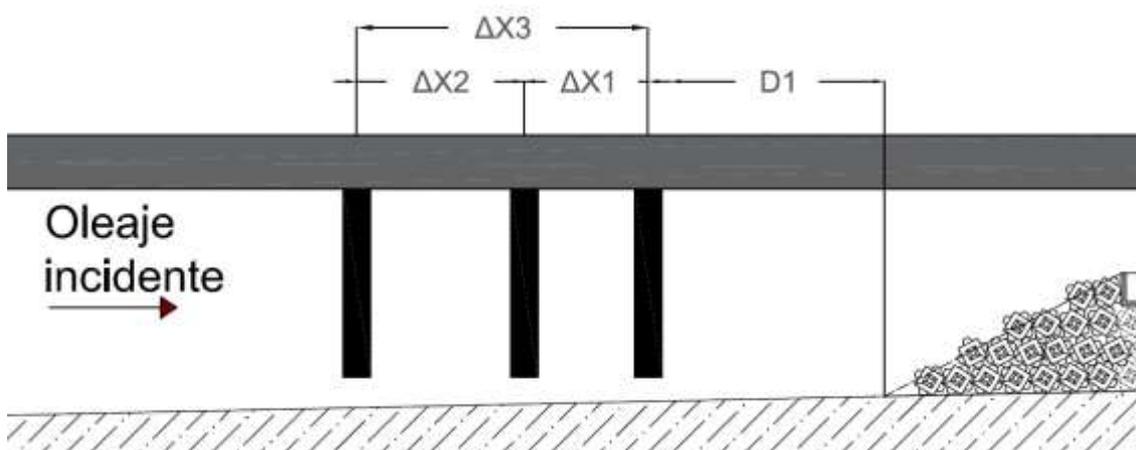


Figura 21. Distribución de sensores

Se obtuvieron los rangos posibles de  $\Delta X1$ ,  $\Delta X2$ ,  $\Delta X3$  para cada una de las seis condiciones de profundidad y oleaje y así se eligió una sola distribución de sensores para todas las pruebas (ver Tabla 10).

Tabla 10. Rangos mínimos y máximos de separación de sensores.

Caso	d [m]	H [m]	T [s]	L [m]	k	$\Delta x1$ [m]	$\Delta x3$ [m]	$\Delta x2$ [m]
BAJAMAR								
1	0.23	0.04	1.6	2.26	2.78	0.11	1.02	0.90
2	0.25	0.08	2	3.00	2.09	0.15	1.35	1.20
3	0.27	0.11	2.4	3.78	1.66	0.19	1.70	1.51
PLEAMAR								
4	0.27	0.04	1.6	2.42	2.60	0.12	1.09	0.97
5	0.29	0.08	2	3.21	1.96	0.16	1.44	1.28
6	0.31	0.11	2.4	4.03	1.56	0.20	1.82	1.61

Con la información de la Tabla 10 se decidió utilizar  $\Delta X1 = 0.23$  m,  $\Delta X2 = 0.31$  m y  $\Delta X3 = 0.54$  m, ninguno múltiplo de otro. La distancia  $D1$  se decidió de 0.44 m y 0.45 m como se aprecia en la Figura 20. En cada caso se evaluaron distintas tercias (ver Tabla 11), siempre con una presente en todos los ensayos antes de la estructura y otra después, denominadas tercias rectoras.

Tabla 11. Tercias de sensores en uso por ensayo.

Tercias de sensores en uso para cada caso				
caso 1	2, 3 y 4	7, 8 y 9	8, 9 y 10	
caso 2	2, 3 y 4	7, 8 y 9	8, 9 y 10	
caso 3	2, 3 y 4	7, 8 y 9	8, 9 y 10	5, 7 y 8
caso 1	2, 3 y 4	7, 8 y 9	8, 9 y 10	5, 7 y 8
caso 2	2, 3 y 4		8, 9 y 10	5, 6 y 7
caso 3	2, 3 y 4		8, 9 y 10	5, 6 y 7

#### 4.3.2. Método y programa para análisis de datos de sensores de nivel.

Los resultados, incluyendo alturas de ola significativa, coeficientes de reflexión y transmisión; datos en los que se centra el análisis del desempeño de la estructura, fueron calculados con el programa RefLab del Dr. Rodolfo Silva Casarín, del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Dicha herramienta computacional, que utiliza métodos de mínimos cuadrados para separar la ola incidente de la reflejada a partir del espectro de oleaje, arrojó los datos ya enlistados obtenidos tanto por el método de Mansard como por el método de Goda. Gracias a Mansard et al., (1980) se sabe que para el estudio de oleaje irregular es el primer método el más acertado, mientras que para oleaje regular es el segundo el más conveniente, razón por la cual todos los datos plasmados en el presente trabajo se rigen por lo anterior:

- Datos de oleaje regular: Método de Goda
- Datos de oleaje irregular: Método de Mansard

El programa trabaja con tercias de sensores, cuyas distancias regidas por el método de Baquerizo Azofra, (1995) ya fueron detalladas. Los datos que demanda el programa concernientes a variables físicas de sensores y canal de oleaje son: los sensores que compondrán la tercia, la distancia a la pala de cada uno, las frecuencias mínimas y máximas de análisis, el tiempo de inicio y final del análisis. Se pueden proponer distintas tercias de estudio siempre que las distancias entre los sensores sean válidas.

```

|          - NUMERO DE CASOS
ResumenE3.txt - FICHERO PARA EL RESUMEN DE RESULTADOS
*** FICHERO 1 *****
Ensayo3a.txt - FICHERO CON LAS SEÑALES (TIEMPO,S4,S5,S6)
Rslt456.dat - FICHERO DE RESULTADOS
0.23 - PROFUNDIDAD EN METROS
9 11 13 15 - SENSORES PARA EL ANALISIS Y NUMERO TOTAL DE SENSORES (NUMERO DE COLUMNA MENOS UNO)FAMOS
10.62 10.93 11.16 - DISTANCIA DEL CERO DE LA PALA AL SENSOR
0.25 2.0 - FRECUENCIAS MINIMAS Y MAXIMAS DE ANALISIS
0 100000 - INICIO Y FINAL DEL ANALISIS
5 - NUMERO DE PUNTOS PARA EL SUAVIZADO
512 - TAMAÑO INDIVIDUAL DEL ANALISIS POR BURST

```

Figura 22. Datos demandados por el programa.

Las frecuencias fueron establecidas de 0.25 a 2 Hz, dado que comprenden el rango en el que el oleaje era emitido para ambos tipos, tanto regular como irregular (*ver anexos*). Las series de datos altura de ola-tiempo del programa imc SPARTAN fueron recortadas en sus extremos previo a su análisis.

#### 4.4. Resultados esperados

Se espera que los individuos de mangle sean disipadores de energía cuando la estructura sea rebasada por el oleaje, disminuyendo la altura de ola del lado de aguas protegidas; con la hipótesis de que a mayor cantidad de individuos por unidad de área mayor sea la disipación. Se plantea también la tendencia a llegar a un porcentaje de disipación máximo aportado por el mangle independientemente de la densificación de la coronación.

El muro impermeable de 6 cm de alto en la coronación de la estructura es una incógnita en la especulación de resultados, es de esperar que refleje más energía que los cubípodos, sin embargo, se desconoce cuál será la relación cubípodos-muro ante los cambios de profundidad e intensidad de oleaje. Es un cambio de permeabilidad para el cual no hay cotejo teórico.

Se espera que se refleje en promedio el 40% de la altura de ola significativa, disminuyendo este a medida que aumenta la profundidad, y a su vez se transmita entre el 10 – 20 % a aguas protegidas.

Las consecuencias del mangle deben ser aumento en el coeficiente de reflexión, siendo mayor el aumento en los casos en que trabajen más los individuos y haya más de estos; Por el contrario, deben aportar una minoración de 15 % aproximadamente en los casos más críticos sobre el coeficiente de transmisión, siendo mayor el aporte a mayor densidad y a mayor profundidad, siempre y cuando no sea sumergida de sobremanera la capa vegetal, ya que su eficiencia se vería limitada.

Dada la naturaleza de los mangles y el entramado de sus raíces, deben funcionar como contención ante presencia de rebase, aminorando el gasto de rebase a mayor densidad. Se espera que la eficiencia sea mayor cuando el oleaje esté en un rango que no rebase la altura de los individuos.



## 5. RESULTADOS

### 5.1. Diseño de dique en talud

Como método de diseño de las piezas del talud se aplicó la fórmula de Hudson para llegar al peso mínimo requerido, que con la densidad del concreto y las proporciones de los elementos prefabricados propuestos para los ensayos (ver Figura 13) se tradujo en las dimensiones mínimas de las piezas.

El coeficiente de estabilidad  $K_D$  se consideró de acuerdo con la información de Medina et al., (2016) donde indica un coeficiente de 28 en presencia de dos capas de estas piezas. Dado que el manual consultado solo cuenta con propuestas de coeficiente de estabilidad para estructuras con una y dos capas, se optó por utilizar la segunda ya que se aproxima con mayor fidelidad a las condiciones simuladas del modelo.

Fórmula de Hudson:

$$\omega = \frac{H^3 \gamma_r}{K_D \left( \frac{\gamma_c}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha}$$

Las aristas del cubípodo, denominadas  $x$ , dependientes del peso calculado con la fórmula de Hudson y la densidad del concreto ( $\gamma_c$ ) se calcularon como:

$$x = \sqrt[3]{\frac{32\omega}{39\gamma_c}}$$

De las tres alturas de ola que se proyectaron para el municipio de San Blas, Nayarit, se evaluó exclusivamente para la condición de  $H:2.80 \text{ m}$  dado que fue la más desfavorable, considerando una densidad del concreto de  $2.3 \text{ t/m}^3$  y del agua de  $1.025 \text{ t/m}^3$ , dando como resultado:

Prototipo:  $468.44 \text{ kg}$

Modelo:  $29.98 \text{ g}$

Lo que llevó a las dimensiones de arista mínimas de las piezas:

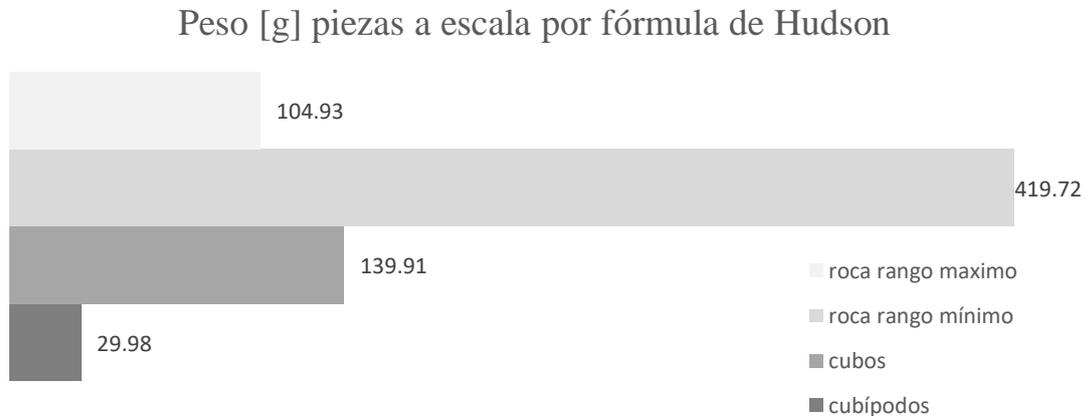
Longitud de arista prototipo:  $0.55 \text{ m}$

Longitud de arista modelo:  $2.2 \text{ cm}$

A partir de las dimensiones de los cubípodos, que son de  $4 \text{ cm}$  en las piezas tipo 1 y  $3.6 \text{ cm}$  en las piezas tipo 2 (ver Figura 14) se observó que estaban sobradas de acuerdo con las dimensiones mínimas calculadas por la fórmula de Hudson. El peso de los cubípodos indicó las mismas conclusiones dado que sus pesos en modelo fueron de  $188.6 \text{ g}$  y  $125.6 \text{ g}$  para las piezas tipo 1 y 2 respectivamente. Las densidades de los cubípodos modelo fueron de  $2.42 \text{ g/cm}^3$  y  $2.21 \text{ g/cm}^3$ , lo que da promediado  $2.31 \text{ g/cm}^3$ , razón por la cual fue elegida esta densidad, además de haber considerado la densidad propuesta en los manuales de las piezas de  $2.35 \text{ t/m}^3$ .

Independiente a la verificación de estabilidad que se hizo del modelo construido en el canal de oleaje fue de interés comparar los pesos y dimensiones que se tendrían entre los cubípodos, los

cubos y la roca. Para esto se utilizó un coeficiente de estabilidad ( $K_D$ ) de 6 para cubos de acuerdo con los datos publicados por Folgado et al., (2010) y un rango de 2 a 8 para roca de acuerdo a lo utilizado por Van Gent, (2013). Para ambos casos el ángulo del talud permitió utilizar dichos coeficientes. Se consideró que la densidad de la roca y de las piezas es la misma para poder visualizar los cambios debidos exclusivamente al coeficiente  $K_D$ .



Gráfica 4. Peso teórico de piezas por fórmula de Hudson.

## 5.2. Ascenso máximo y rebase esperado

En la Figura 24 se ilustra el tipo de rotura que se presentó en cada una de las condiciones ensayadas para un mejor entendimiento de los casos en los que se pudo encontrar rebase y en los que se pudo evaluar ascenso máximo. Las fotografías de oleaje irregular son meramente ilustrativas del tipo de rotura que se presentó en la mayoría de las olas, sin embargo, no representan un oleaje específico del espectro emitido por la pala de oleaje.

De las seis condiciones de oleaje y marea analizados, solamente las condiciones de intensidad media y alta tanto para los casos de bajamar como los de pleamar (casos 2,3,5 y 6 de acuerdo con la Figura 24) derivaron en un rebase de la estructura, mientras que el ascenso máximo se apreció exclusivamente en las condiciones de intensidad baja tanto para bajamar como para pleamar (casos 1 y 4). A pesar de que en el caso 2, condición de intensidad media se apreció rotura y ascenso, estas no fueron significativas dado que su rotura fue por influencia de la rampa, más que del rompeolas. Pudo apreciarse que esta comienza más de 45 cm antes del pie del talud de incidencia (*ver Figura 23*); para el caso de oleaje irregular ocurrió en un alto porcentaje de estas.

RESULTADOS

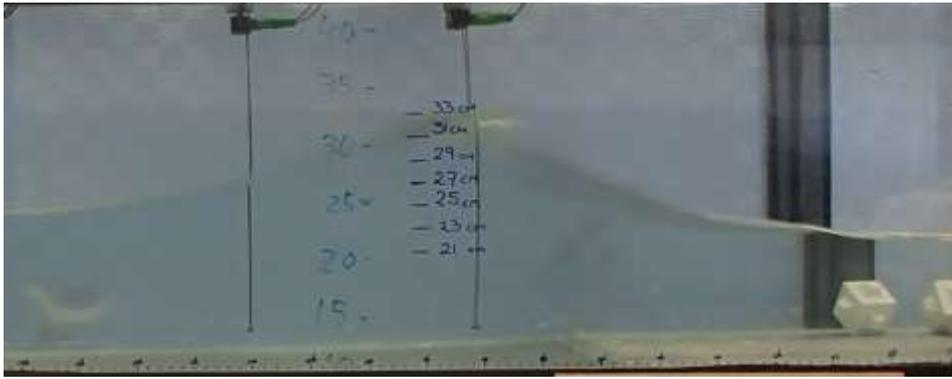


Figura 23. Oleaje Caso 2, rotura por efecto de rampa.



## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE ROMPEOLAS HÍBRIDO CON MANGLAR



Figura 24. Oleaje por ensayo para identificar presencia de ascenso máximo y rebase.

Las mediciones de ascenso experimental se realizaron en pantalla, sobre videos tomados frente a la estructura de manera perpendicular a la misma como se aprecia en todas las fotografías ya mostradas del rompeolas. A partir de un patrón de líneas con separación de 5 mm (ver Figura 25) se tomaron los datos visualmente.

## RESULTADOS

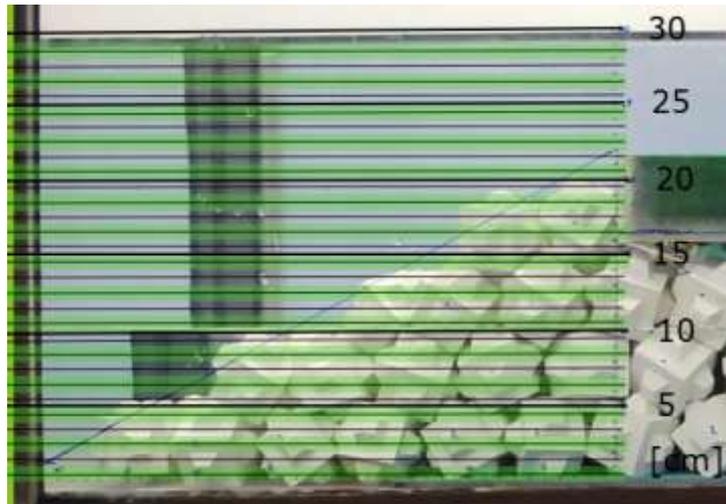


Figura 25. Interlineado para medición de ascenso de olas.

Como se mencionó, el ascenso del oleaje por efecto de la rotura provocada por el rompeolas se presentó exclusivamente en los casos 1 y 4. El caso 2 aunque lo presentó, su rotura era causada por la pendiente de la rampa previo al impacto contra el talud de cubípodos. Los demás casos rebasaban la coronación de manera que el fenómeno no se presentó.

Para el cálculo de oleaje regular teórico se implementó el método de Losada et al., (1980), el cual se expresa como:

$$\frac{R_u}{H} = A_u(1 - e^{B_u I_r})$$

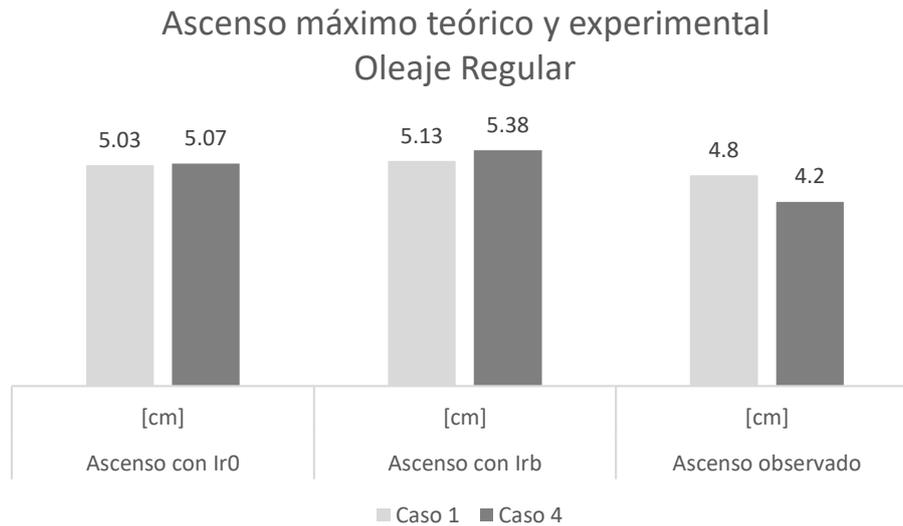
Donde  $A_u$  y  $B_u$  son:

$$A_u = -3.825n + 3.344$$

$$B_u = -1.179n + 0.081$$

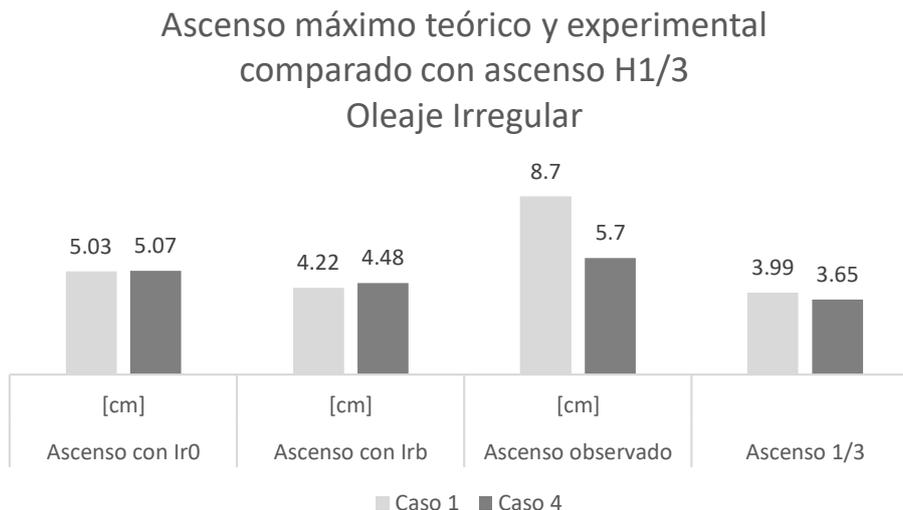
Para aplicar el método se consideró la porosidad de la estructura  $n$  de 0.4, como se indica en Medina et al., (2016) dado que el acomodo de piezas es semejante al mostrado en la cita (ver anexos). Se comparó el resultado teórico calculado con el Iribarren local ( $I_b$ ), con la profundidad en la rompiente, con el calculado con el de pala ( $I_0$ ) operado con la profundidad en la pala de oleaje; y ambos con el resultado de laboratorio.

El oleaje irregular también se calculó teóricamente con el método para oleaje regular sustentado en la metodología de Silva et al., (1999).



Gráfica 5. Ascenso máximo Oleaje Regular.

Se observa como el ascenso teórico calculado con  $I_{rb}$  fue 2% y 6.1% mayor al calculado con el  $I_0$  (datos de pala de oleaje) para ambos casos respectivamente, reflejo directo del efecto de aperaltamiento del oleaje y la reducción de su longitud de onda al reducirse la profundidad; sin embargo, la tendencia del ascenso experimental fue contraria en ambos casos, 4.6% para el caso de bajamar y 17.2% para el oleaje en pleamar, presente aquí el aperaltamiento, que más próximo al fondo mayor fue el efecto y por ende, el ascenso se vio afectado. El comparar el ascenso con los dos  $I_r$  reflejan como la profundidad afecta menos a mayor profundidad.



Gráfica 6. Ascenso máximo de oleaje irregular Casos 1 y 4.

Se consideró en la Gráfica 6, para oleaje irregular, comparar con el ascenso máximo el ascenso de ola 1/3. Los resultados teóricos optaron por evaluarse con el  $I_0$  e  $I_b$ . Se observó como el ascenso experimental se aleja 72 y 12 % respecto al teórico con  $I_0$  en los casos 1 y 4 respectivamente y 106 y 27 % con  $I_b$ , efecto de la rampa previa al rompeolas, razón por la cual el caso de bajamar tuvo una diferencia aún mayor que el caso de pleamar.

## RESULTADOS

En los datos de las Gráfica 5 y Gráfica 6, se observó: el ascenso teórico regular con  $I_b$  fue 21.5% mayor al teórico irregular para el caso de bajamar y 20.1% mayor para pleamar, lo que indica como el oleaje regular está asociado a una mayor destrucción del talud; el ascenso máximo experimental irregular fue 81.3 % mayor al máximo experimental regular para el caso de bajamar y 35.7 % para el caso de pleamar; el ascenso experimental irregular de  $H^{1/3}$  fue 5.5 y 18.5 % menor al ascenso máximo teórico en ambos casos; y por último, se observó que en los dos tipos de oleaje hubo una tendencia de un menor ascenso a mayor profundidad.

A la par del ascenso en el talud se presenta el rebase, con la diferencia de que este existe aunque el anterior no, por lo que se registraron datos de los seis casos de análisis. Este se midió exclusivamente en condiciones de oleaje regular para tener certeza en la ola que generaba el mismo. Se midió con una caja de acrílico de 40\*40 cm de área y 6 cm de altura el gasto que escurría o recorría los 40 cm de coronación y caía sobre el talud de aguas tranquilas durante el periodo de una ola, por lo que, dependiendo del caso, el tiempo de toma de muestra se aproximaba a 1.6, 2 y 2.4 segundos.

La caja que recibía el gasto era colocada como se muestra en la Figura 26 (con un cuadro negro) pasados 2 minutos de haber iniciado el oleaje la pala para que este estuviera ya constante. Para dichas tomas se quitaron las cuatro filas superiores de cubípodos que impedían la inserción de la caja, mismas que se pueden apreciar en la imagen.



Figura 26. Toma de rebase experimental.

Se analizaron 18 casos, cada uno de los seis casos de oleaje y profundidad con la DC, D1 y D2 (ver 4.3.1.). Para cada uno se tomó el gasto cinco veces, pudiendo así encontrar un promedio, el cual es mostrado en la Tabla 12. El procedimiento de aforo fue: sacar la caja con el volumen de agua del canal de oleaje y servirlo con embudo en probetas de 0.5, 1 y 2 litros, dependiendo del volumen captado, para poder aforar con mayor precisión. Para el caso 2 fue requerido el uso de una propipeta dados los bajos volúmenes recolectados.

Se comparó con el volumen de rebase teórico calculado por el método de Pedersen, (1996), considerando  $f_c = 0$  (ver anexos), siendo la ecuación:

$$\frac{qT_m}{L_m^2} = 3.2 * 10^{-5} \left(\frac{H_s}{R_c}\right)^3 \frac{H_s^2}{A_c G c o t \alpha}$$

Donde se despeja  $q$  ( $\frac{m^3}{s}$ ) y se multiplica por el ancho de coronación y el tiempo de captura de agua (un periodo) para poder llegar a valores equiparables con los experimentales.

## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE ROMPEOLAS HÍBRIDO CON MANGLAR

Tabla 12. Litros de rebase experimental.

Caso	Control [l]	Distribución 1 [l]	Distribución 2 [l]	Teórico [l]
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.20	0.08	0.04	0.01
3	1.72	1.23	0.88	0.47
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.84	1.38	0.94	0.38
6	4.16	3.83	3.51	36.80

Los valores teóricos de rebase fueron los mismos para DC, D1 y D2 en los casos en que no hubo rebase experimental, sin embargo, en los casos de oleaje de intensidad media el gasto teórico fue 5 y 20.6 % del experimental control para bajamar y pleamar respectivamente, para el caso de alta intensidad en bajamar fue 27.3 % del experimental y en pleamar se elevó al 884.6 %.

Para el caso 1 y 4, no se presentó rebase por lo que el mangle aún no cumplía su función de barrera natural, el caso 2, el cual tuvo rotura por efecto de la rampa como ya se ha detallado en subcapítulos anteriores apenas presentó rebase. Considerando el rebase en la coronación control como el 100 % de rebase se llegó a los siguientes porcentajes de reducción por caso y distribución de mangle en la coronación.

Tabla 13. Reducción de rebase respecto a coronación control.

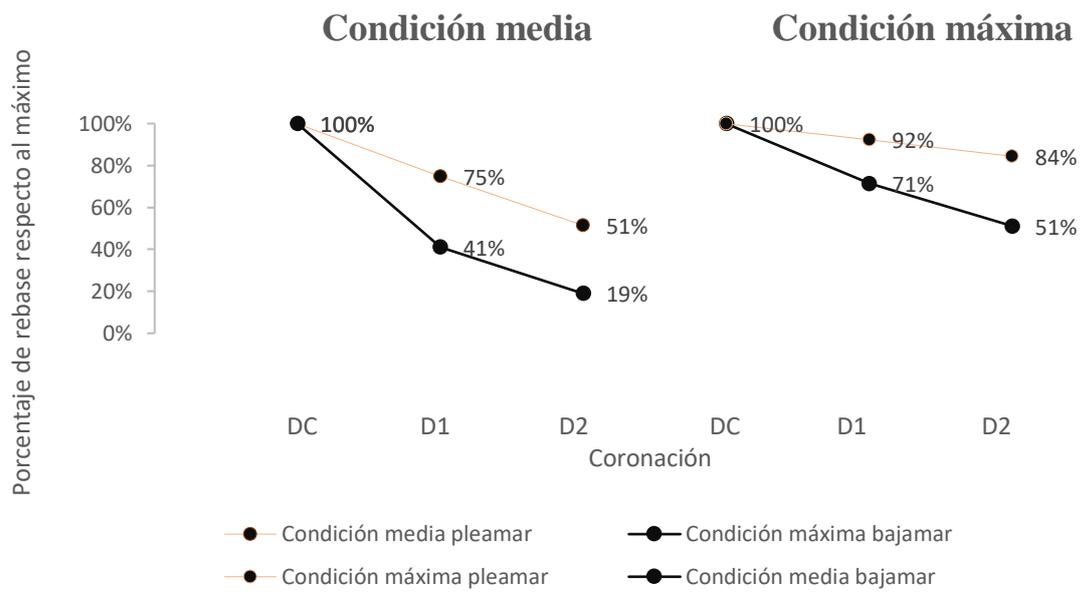
Caso	Distribución 1 [%]	Distribución 2 [%]	Distribución 2 respecto a 1 [%]
2	59	81	22
3	29	49	20
5	25	49	24
6	8	16	8

Lo que llevó al análisis siguiente:

- En las condiciones de bajamar la eficiencia del mangle fue mayor.
- Para el oleaje de H:0.08m y T:2.00s con sobreelevación de tormenta de 0.5, en bajamar se redujo el rebase 34 % más que en pleamar con la D1 y 32 % más con la D2.
- Con el oleaje de H:0.11m, T: 2.4 s y sobreelevación de tormenta de 0.5, en bajamar se redujo 21 % con la D1 y 33 % con la D2.
- Es el caso 6, el más desfavorable, es en el que la efectividad del mangle se vio mermada drásticamente.
- La D2 mantuvo el rebase entre 20 % y 24 % más abajo que la D1, exceptuando el caso 6, en el que el mangle se vio sumergido en su totalidad al pasar la ola.
- En todos los casos se mantuvo la tendencia de a mayor densidad, menor rebase al término de la coronación.

Se presenta en la Gráfica 7 el porcentaje de rebase experimental respecto al rebase control de los casos 2, 3, 5 y 6. El rebase control fue considerado el 100 % de rebase. Se aprecia la tendencia de que la efectividad es menor a mayor profundidad y a oleajes más intensos.

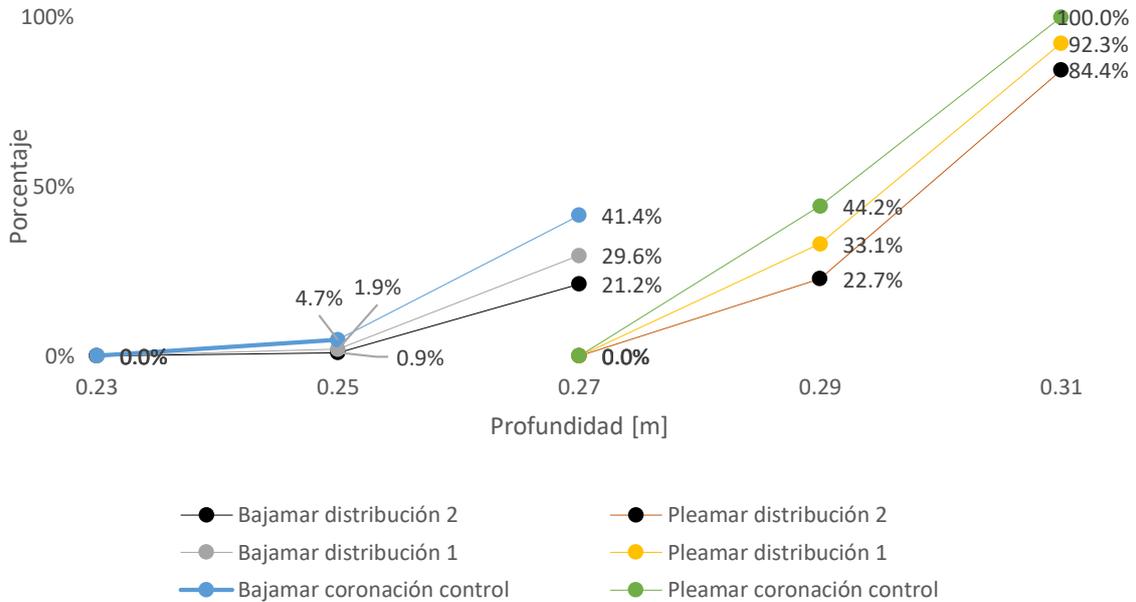
Reducción de rebase respecto a ensayos control



Gráfica 7. . Porcentaje de rebase experimental.

En la Gráfica 8 se muestra el porcentaje de rebase respecto al máximo observado en los seis casos de estudio, que fue el caso 6, donde se leyeron 4.16 litros de rebase en la coronación control, comparando así todas las mediciones de volumen respecto a un dato único.

Rebase con DC, D1 y D2 respecto al máximo rebase observado.



Gráfica 8. Rebase experimental respecto a máximo.

### 5.3. Desempeño de la obra respecto de la energía de rebase

Previo al desempeño del rompeolas se estudió el comportamiento del oleaje desde que fue emitido por la pala hasta llegar al talud de incidencia, tarea para la cual estuvo el sensor 1 al inicio de la rampa y la terna de sensores 2,3 y 4 próxima a la estructura (distancias indicadas en la Figura 19). En la Gráfica 9 está  $H_s$  de los ya mencionados durante los ensayos con la DC. Recordar que, a partir de los datos registrados por los sensores de nivel de la terna, se obtuvo  $H_s$  por el método de Goda para oleaje regular y por el de Mansard para oleaje irregular.

De acuerdo con la Tabla 14, donde se aprecia la diferencia de  $H_s$  en porcentaje respecto a  $H_s$  emitida por la pala para cada caso de estudio, se ve que para el oleaje regular siempre hubo aumento de la altura. A los 6.06 m (inicio de la rampa) en bajamar el máximo aumento (44 %) se dio con la menor altura de ola, disminuyendo este apertamiento a mayor altura de ola hasta un 18-21 %. En condiciones de pleamar la tendencia fue inversa, a mayor intensidad de oleaje, más aumentó  $H_s$  habiendo un máximo con  $H:0.08$  m,  $T:2.00$  s y  $d: 0.29$  m. Al llegar las olas en condición regular a los sensores 2, 3, 4 el comportamiento fue distinto: tanto en bajamar como en pleamar  $H_s$  aumentó respecto la emitida a mayor intensidad de oleaje, entre 13 y 37 % para bajamar y 20 y 43 % para pleamar.

El oleaje irregular se mantuvo con cambios de  $H_s$  considerablemente menos drásticos. En el S1 en bajamar  $H_s$  disminuyó respecto a la generada por la pala, manteniendo una tendencia inversa a la presentada para las mismas condiciones en oleaje regular, que fue desde -15% para oleaje de baja intensidad hasta -3% para oleaje de alta intensidad, mientras que en pleamar la tendencia fue la misma que en oleaje regular: a mayor intensidad, mayor aumento de  $H_s$ ,

## RESULTADOS

habiendo presencia del mismo pico máximo en oleaje de intensidad media más con mucho menor impacto. En la tercia S 2, 3, 4  $H_s$  disminuyó para todos los casos de oleaje irregular; para bajar se presentó un pico de  $H_s$  máxima en el oleaje de intensidad media, comportamiento que no sucedió en oleaje regular; y en pleamar el comportamiento es similar, presentando la máxima  $H_s$  en oleaje de intensidad media.

Tabla 14. Cambio de  $H_s$  en sensores previos al talud de incidencia.

CAMBIO DE $H_s$ EN SENSORES PREVIOS AL TALUD DE INCIDENCIA					
CORONACIÓN CONTROL					
CASO	% $H_{s1}$	Regular		Irregular	
		% $H_s$ 2,3,4	% $H_{s1}$	% $H_s$ 2,3,4	% $H_{s1}$
1	44	13	-15	-14	
2	37	20	-4	-7	
3	21	37	-6	-14	
4	27	20	12	-9	
5	96	41	16	-4	
6	52	43	11	-8	

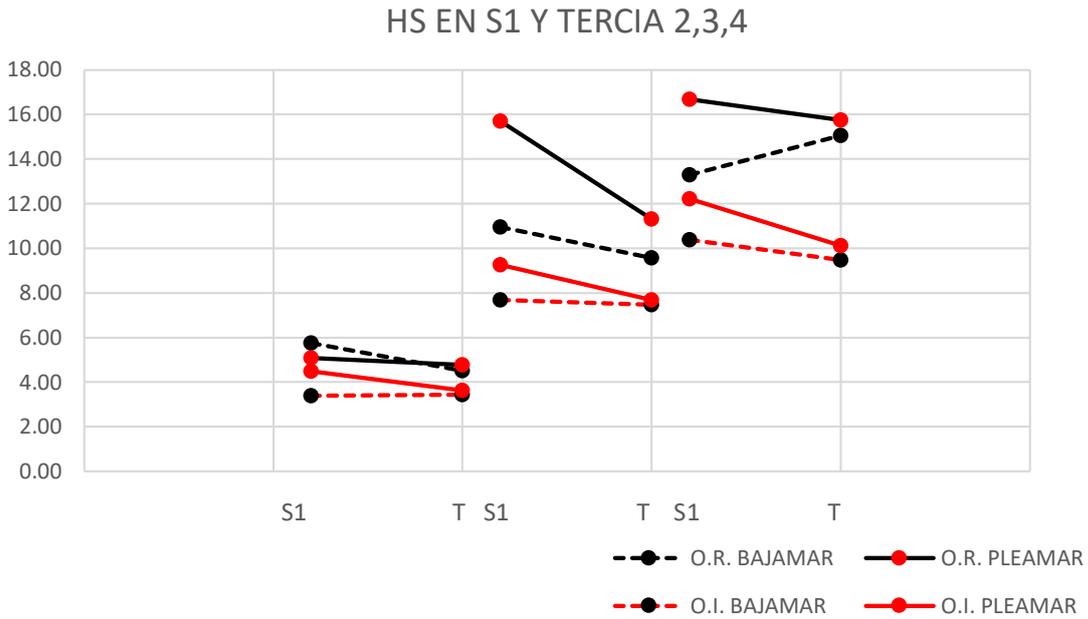
CORONACIÓN CON DISTRIBUCIÓN 1					
CASO	% $H_{s1}$	Regular		Irregular	
		% $H_s$ 2,3,4	% $H_{s1}$	% $H_s$ 2,3,4	% $H_{s1}$
2	34	19	-7	-8	
3	20	37	-7	-14	
5	93	41	15	-1	
6	53	42	10	-7	

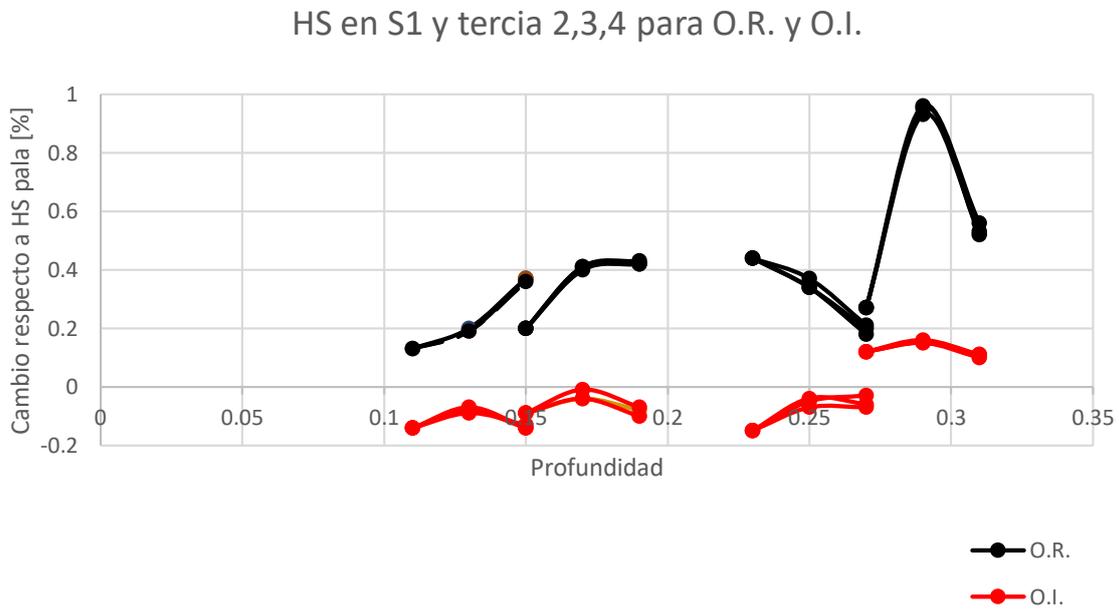
CORONACIÓN CON DISTRIBUCIÓN 2					
CASO	% $H_{s1}$	Regular		Irregular	
		% $H_s$ 2,3,4	% $H_{s1}$	% $H_s$ 2,3,4	% $H_{s1}$
2	34	19	-5	-9	
3	18	36	-3	-13	
5	95	40	15	-4	
6	56	42	11	-10	

Se puede resumir el cambio de  $H_s$  a lo largo de la rampa como:

- Oleaje irregular en bajar fue el más estable, variaciones entre -1 y -10 % al de pala.
- Oleaje irregular se mantuvo próximo a la altura emitida por la pala (-15 a 16 %)
- Exceptuando oleaje irregular de caso 1 y regular de caso 3,  $H_s$  bajó a lo largo de la rampa.
- En oleaje regular aumentó  $H_s$  respecto a irregular siempre, con una diferencia de hasta 51 %.
- Caso 1 en régimen irregular y caso 3 en regular, al subir  $H_s$  a lo largo de la rampa, no se vieron afectados por efectos de asomeramiento por fondo.
- Se registraron máximos de  $H_s$  para los casos de oleaje de intensidad media en régimen irregular.



Gráfica 9. Altura de ola registrada en sensores 1,2,3 y 4.



Gráfica 10. Cambio de HS en sensores 1 y tertia 2,3,4 respecto a HS de pala.

El desempeño del rompeolas se evaluó comparando principalmente los resultados de las tencias de sensores 2, 3, 4 y 8, 9, 10.

Respecto al lado de aguas tranquilas, para algunas de las tencias de sensores existentes, no era posible registrar señal en ellos, razón por la cual se manejaron distintas combinaciones dependiendo de la profundidad. Fue la tencia 8, 9, 10 la rectora del lado de aguas tranquilas por su presencia en todos los ensayos y por la ausencia del factor rampa en su ubicación. Hay que recordar que una vez terminado el rompeolas la rampa sigue subiendo hasta llegar casi a la

## RESULTADOS

posición del sensor 7 (ver Figura 19). El comportamiento de todas las tercias respecto a la rectora se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Cambio de HS en aguas tranquilas respecto a tercia rectora.

Caso	Distribución	HS 8,9,10		HS 7,8,9		HS 5,7,8		HS 5,6,7	
		O.R	O.I.	O.R	O.I.	O.R	O.I.	O.R	O.I.
		[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	control	0.39	0.39	-51	-6				
2	control	1.01	0.91	-17	2				
2	1	0.98	0.90	-17	1				
2	2	0.97	0.90	-17	1				
3	control	1.98	1.15	-23	3	-26	5		
3	1	1.84	1.05	-26	4	-32	7		
3	2	1.75	0.97	-25	4	-30	6		
4	control	1.48	0.66	-35	-6	-54	7		
5	control	3.65	1.38					3	22
5	1	3.16	1.28					9	23
5	2	3.17	1.22					3	23
6	control	4.33	2.88					6	14
6	1	3.59	2.18					13	21
6	2	3.32	1.82					13	24

Se observa que en porcentajes:

- Oleaje regular de intensidad baja aumentó  $H_s$  a medida que se alejó del rompeolas, siendo mayor el aumento a menor profundidad.
- Oleaje regular de intensidad media aumentó  $H_s$  a medida que se alejó en bajamar y disminuyó en pleamar.
- Oleaje regular de intensidad alta aumentó  $H_s$  moderadamente al alejarse del talud en bajamar y disminuyó en pleamar.
- Oleaje irregular se mantuvo cuasi estable en profundidades menores a 0.29 m, presentándose una disminución mínima al distanciarse de la estructura en casos de intensidad media y alta. En profundidades iguales o mayores disminuyó  $H_s$  al alejarse, al igual que para oleaje regular.

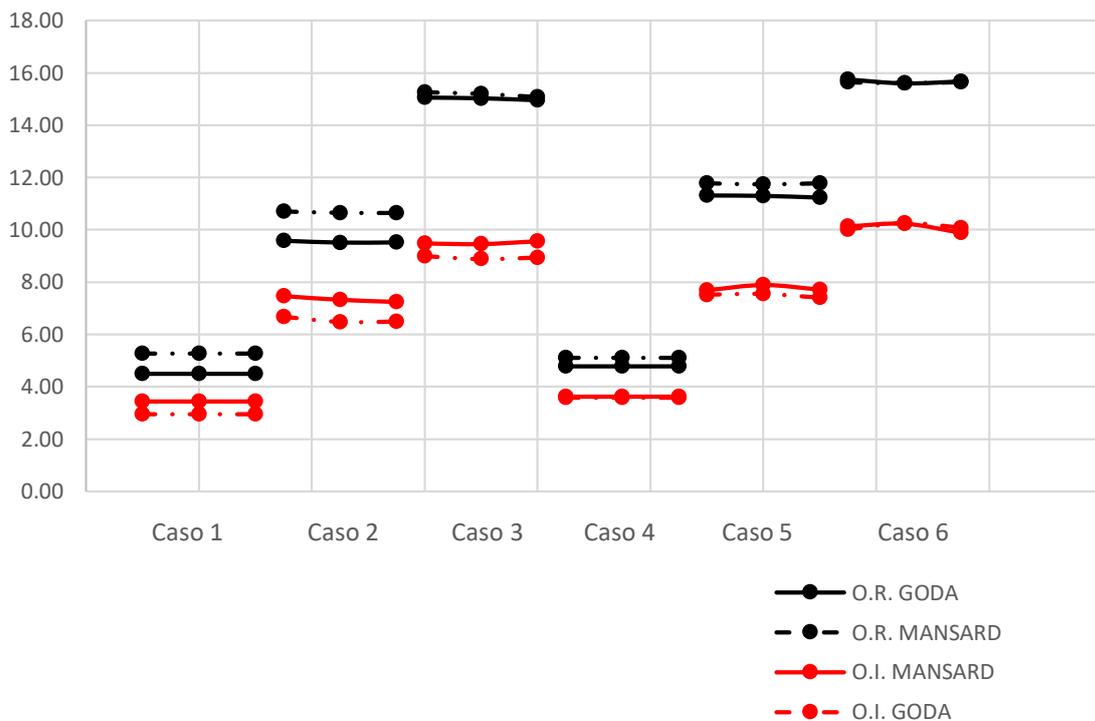
Todos los resultados hasta ahora mostrados fueron obtenidos por el método de Goda para oleaje regular y por el método de Mansard para irregular como ya se definió, sin embargo, se hace una breve comparativa en la Tabla 16 de los resultados de  $H_s$  por ambos métodos para ambos tipos de oleaje y corroborar lo ya concluido por otros autores: el método de Mansard sobrestima los resultados para oleaje regular y el método de Goda subestima los de oleaje irregular (Gráfica 11).

## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE ROMPEOLAS HÍBRIDO CON MANGLAR

Tabla 16. HS en tercia de sensores 2,3,4 por métodos Goda y Mansard.

CASO	DISTRIBUCIÓN	O. IRREGULAR			O. REGULAR		
		MANSARD [cm]	GODA [cm]	[%]	GODA [cm]	MANSARD [cm]	[%]
1	control	3.43	2.96	-13.8	4.50	5.27	17.0
2	control	7.47	6.68	-10.6	9.57	10.69	11.7
2	1	7.32	6.48	-11.6	9.50	10.65	12.0
2	2	7.24	6.49	-10.4	9.51	10.64	11.9
3	control	9.48	8.99	-5.1	15.05	15.26	1.4
3	1	9.46	8.88	-6.1	15.02	15.20	1.2
3	2	9.56	8.94	-6.5	14.95	15.07	0.8
4	control	3.62	3.57	-1.3	4.78	5.11	6.9
5	control	7.69	7.52	-2.3	11.30	11.77	4.2
5	1	7.89	7.54	-4.3	11.29	11.73	3.9
5	2	7.72	7.41	-4.0	11.24	11.77	4.7
6	control	10.12	10.00	-1.2	15.75	15.64	-0.7
6	1	10.23	10.25	0.2	15.60	15.61	0.1
6	2	9.88	10.08	2.0	15.67	15.65	-0.1

### HS POR MÉTODOS DE GODA Y MANSARD PARA OLEAJE REGULAR E IRREGULAR



Gráfica 11. Comparación Métodos Goda y Mansard para ambos tipos de oleaje.

## RESULTADOS

En los ensayos el método de Mansard sobrestimó  $H_s$  del oleaje regular respecto a  $H_s$  del método de Goda en:

- 17 % caso 1
- 11.7 -12 % caso 2
- 0.8 - 1.4 % caso 3
- 6.9 % caso 4
- 3.9 - 4.7 % caso 5
- 0.1 - 0.7 % caso 6

Mostrando una relación de a mayor profundidad y mayor intensidad de oleaje menor la diferencia.

En tanto que para oleaje irregular el método de Goda subestimó en:

- 13.8 % caso 1
- 10.4 - 11.6 % caso 2
- 5.1 - 6.5 % caso 3
- 1.3 % caso 4
- 2.3 - 4.3 % caso 5
- 0.2 - 2 % caso 6

Dejando a la vista la tendencia de que a mayor profundidad y mayor intensidad de oleaje mayor es la precisión del método, con los ensayos del caso 5 como un bemol en la suposición.

De ahora en más se presentan resultados del método de Mansard para oleaje irregular y método de Goda para oleaje regular exclusivamente.

El foco de la caracterización estuvo en los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación, aunado a las alturas de ola significantes convenientes. Se recuerda que los coeficientes se definen como:

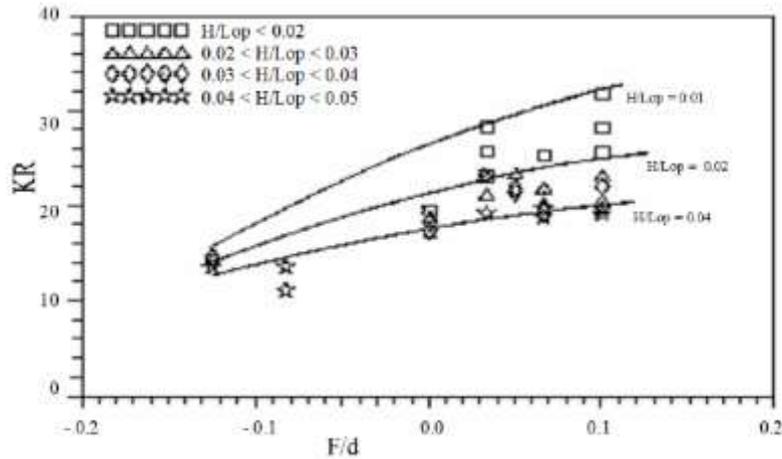
$$K_r = \frac{HS_r}{HS_i} \quad K_t = \frac{HS_t}{HS_i} \quad K_d = 1 - K_r^2 - K_d^2$$

Los resultados de los coeficientes de reflexión experimentales se compararon con aproximaciones teóricas, separando los casos de acuerdo con si el rompeolas fue rebasado o no. Los casos 1, 2 y 4 fueron categorizados como "no rebasables" a pesar de que en el 2 se presentó cierto rebase, y los casos 3, 5 y 6 como "rebasables". De acuerdo con Seelig, (1983), el coeficiente de reflexión para diques no rebasables es:

$$K_r = \frac{aIr^2}{Ir^2 + b}$$

Donde a es 0.6 y b 6.6, propuesta del autor para diques permeables y el valor de Iribarren se calculó con la altura de ola de la tercia de sensores 2, 3, 4 en los casos control y la profundidad a pie de talud.

En los casos rebasables la guía fue la gráfica propuesta por (Vidal et al., 1995) donde se requiere las relaciones francobordo/profundidad y altura de ola/longitud de onda. Es por la primera de estas y las dimensiones físicas del rompeolas que no fue útil para los casos 2 y 3, razón por la cual el caso 2 se evaluó como no rebasable y el 3 no pudo ser comparado.



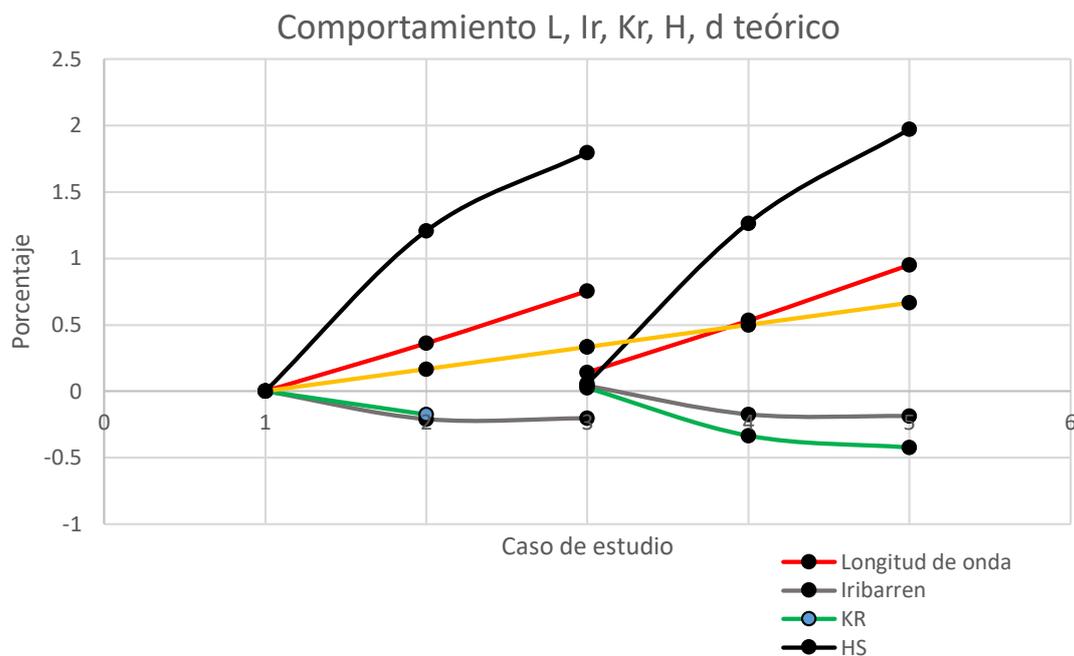
Gráfica 12. Coeficientes de reflexión en diques rebasables de escollera, (Vidal et al., 1995)

Teóricamente a mayor número de Iribarren mayor es el coeficiente de reflexión. A mayor altura de ola menor el parámetro de semejanza y a menor longitud de onda mayor será dicho parámetro. En la Gráfica 13 se presentan los porcentajes de cambio de distintos parámetros a partir de los calculados en el caso 1 con HS de la tercia 2,3,4. Se identificó como el cambio en HS tuvo mayor peso que el cambio en profundidad en el coeficiente de reflexión para las condiciones estudiadas.

Tabla 17. Coeficientes de reflexión teóricos.

Caso	1	2	3	4	5	6
L	1.68	2.29	2.95	1.92	2.58	3.28
Ir local	3.50	2.77	2.79	3.64	2.89	2.85
KR	0.39	0.32		0.40	0.26	0.23
Método	Seelig	Seelig		Seelig	Vidal	Vidal

## RESULTADOS



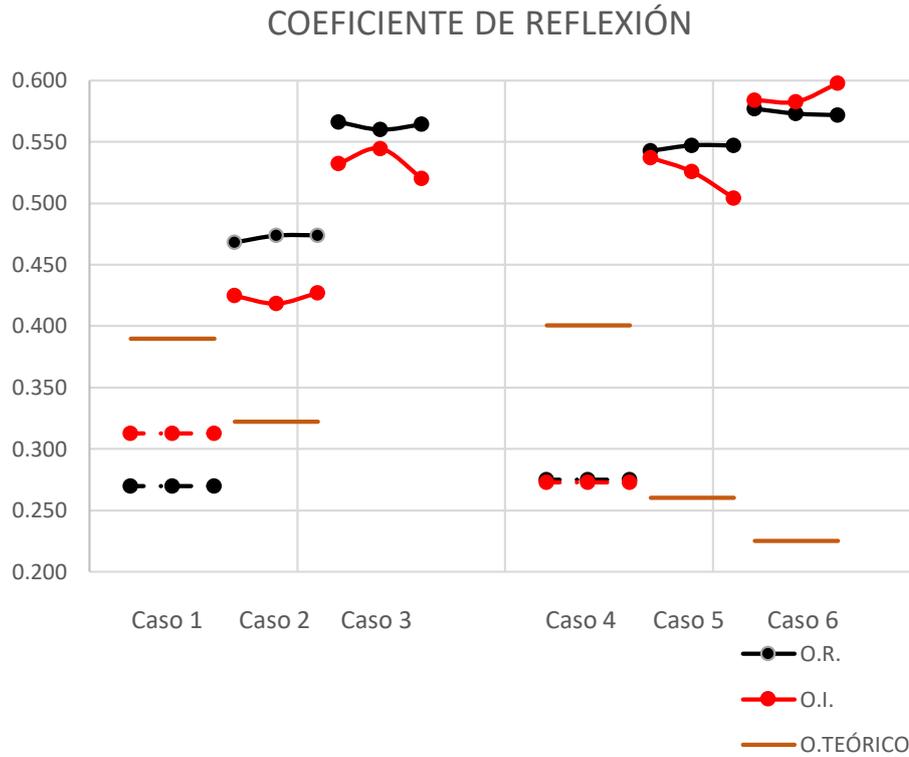
Gráfica 13. Comportamiento de L, Ir, H, d y Kr teórico.

El comportamiento del coeficiente de reflexión durante los ensayos no se apegó del mismo modo (ver Gráfica 14). En los ensayos con oleaje de baja intensidad, estuvo entre 11 y 13 puntos porcentuales por debajo de lo esperado, mientras que en los demás ensayos se mantuvo sobre lo esperado desde 10 puntos porcentuales en el caso 2 hasta 35 puntos en el caso 6. Exceptuando el caso 6, el oleaje irregular fue el que se acercó más a los valores teóricos.

Debe considerarse que la presencia de un muro de 6 cm de peralte como parte de la coronación provocó perturbaciones no consideradas por la teoría, se aprecia como los casos de intensidad baja, donde el agua no rompía ni tocaba la coronación tuvo menor reflexión, indicando una porosidad mayor a la considerada por la teoría. En contraste se deduce que los demás ensayos, que sí rompían contra el muro de coronación presentaban alturas de ola reflejada mayores a las esperadas, siendo mayores las que cubrían más área del muro al rebasarlo, como fue el caso 6.

Tabla 18. Coeficientes de reflexión.

CASO	Control		Distribución 1		Distribución 2	
	O.R	O.I	O.R	O.I	O.R	O.I
1	0.27	0.31				
2	0.47	0.42	0.47	0.42	0.47	0.43
3	0.57	0.53	0.56	0.54	0.56	0.52
4	0.27	0.27				
5	0.54	0.54	0.55	0.53	0.55	0.50
6	0.58	0.58	0.57	0.58	0.57	0.60



Gráfica 14. Coeficientes de reflexión.

En cuanto al comportamiento de  $K_r$  entre los distintos tipos de coronación se observó:

- Oleaje regular, intensidad de oleaje media, tanto en bajamar como en pleamar, aumentó  $K_r$  en valores cercanos a 0.01 entre la DC y la D1. De la D1 a la D2, el coeficiente se mantuvo igual.
- Oleaje regular, intensidad de oleaje alta, tanto para bajamar como pleamar,  $K_r$  disminuyó 0.01 de la DC a la D1. De la D1 a la D2 para bajamar aumentó menos de 0.01 y para pleamar se mantuvo.
- Oleaje irregular, intensidad de oleaje media, tanto en bajamar como en pleamar disminuyó  $K_r$  cerca de 0.01 entre los ensayos con DC y D1, entre la D1 y D2 para bajamar aumentó nuevamente 0.01 y en pleamar disminuyó 0.03.
- Oleaje irregular, intensidad de oleaje alta, entre los ensayos con DC y los D1 aumentó 0.01 y en pleamar disminuyó menos de 0.01. Entre la D1 y D2, en bajamar disminuyó 0.02 y en pleamar aumentó 0.02.

El comportamiento del coeficiente de transmisión, al igual que el anterior se comparó con resultados teóricos; los casos sin rebase (1, 4 y 2 aunque hubo ligero rebase) por la expresión de Numata, (1976):

$$K_t = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_T}{I_r}}$$

Donde:

$$\alpha_T = 1.48 \left( \frac{B_s}{D} \right)^{0.66}$$

## RESULTADOS

Para los casos rebasables (2,3,5,6) con otra expresión de Numata, (1976):

$$K_t = \frac{1}{[1 + \alpha_T \left(\frac{H}{L}\right)^{\beta_T}]^2}$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$ , a pesar de ser expresiones para tetrápodos y escollera clasificada se utilizaron para tener un punto de comparación, se definen como:

$$\text{Escollera: } \alpha_T = 1.26\left(\frac{B}{D}\right)^{0.67} \quad \beta_T = 0.5$$

$$\text{Tetrápodos: } \alpha_T = 1.184\left(\frac{B}{D}\right)^{0.895} \quad \beta_T = 0.5$$

El método de D'Angremond se aplicó también, que por su rango de compatibilidad sólo fue útil para el caso 6, definiéndose como:

$$K_t = -0.4 \frac{F}{H_s} + 0.64 \left(\frac{B}{H_s}\right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5Ir})$$

Siendo los resultados teóricos los mostrados en la Tabla 19, recordando que se utilizó HS de la tercia de sensores 2,3,4 y el Ir local.

Tabla 19. Coeficientes de transmisión teóricos.

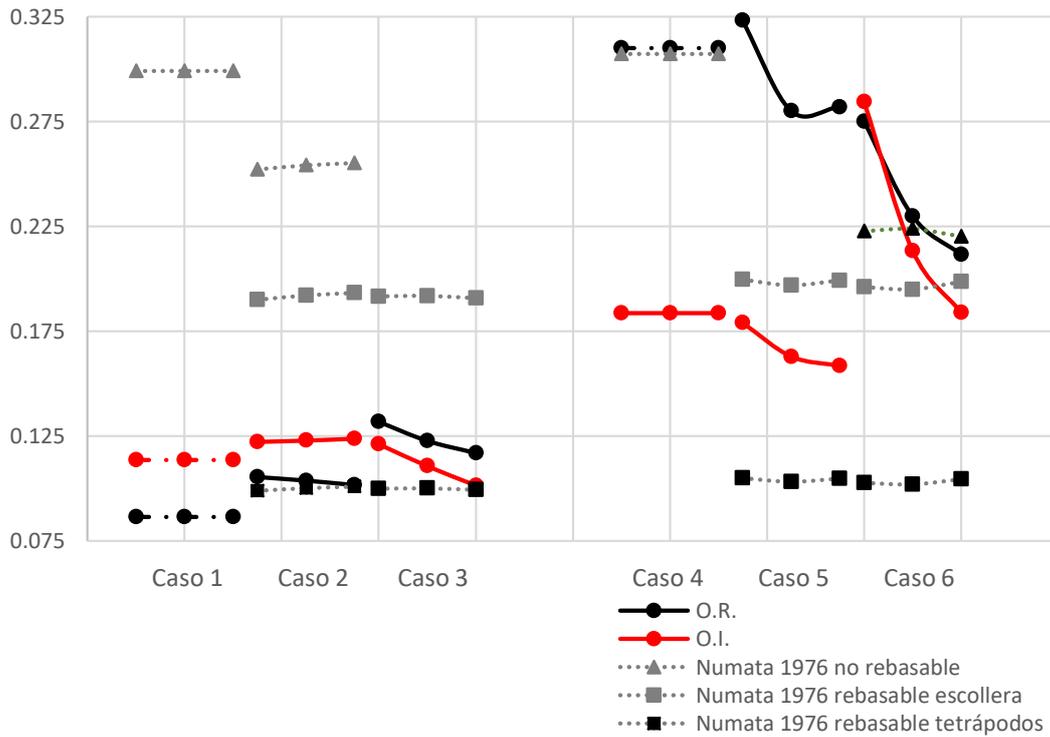
CASO	DISTRIBUCIÓN	Condición	Kt			
			no rebasable	rebasa- ble escollera	rebasa- ble tetrápodos	d'Angremond
1	control	no rebasable	0.30			
2	control	rebasa- ble	0.25	0.19	0.10	
2	1	rebasa- ble	0.25	0.19	0.10	
2	2	rebasa- ble	0.26	0.19	0.10	
3	control	rebasa- ble		0.19	0.10	
3	1	rebasa- ble		0.19	0.10	
3	2	rebasa- ble		0.19	0.10	
4	control	no rebasable	0.31			
5	control	rebasa- ble		0.20	0.10	
5	1	rebasa- ble		0.20	0.10	
5	2	rebasa- ble		0.20	0.10	
6	control	rebasa- ble		0.20	0.10	0.22
6	1	rebasa- ble		0.19	0.10	0.22
6	2	rebasa- ble		0.20	0.10	0.22

Los coeficientes de transmisión experimentales tuvieron comportamiento distinto, mostrados en la Tabla 20.

Tabla 20. Coeficientes de transmisión.

CASO	Control		Distribución 1		Distribución 2	
	O.R	O.I	O.R	O.I	O.R	O.I
1	0.09	0.11				
2	0.11	0.12	0.10	0.12	0.10	0.12
3	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.10
4	0.31	0.18				
5	0.32	0.32	0.28	0.16	0.28	0.16
6	0.28	0.28	0.23	0.21	0.21	0.18

COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN



Gráfica 15. Coeficientes de transmisión.

El comportamiento de  $K_t$  fue el siguiente:

- A menor profundidad, menor el coeficiente de transmisión.
- A partir de la profundidad de 0.16 m,  $K_t$  de oleaje irregular fue menor que el de regular.
- En bajamar y oleaje regular,  $K_t$  fue mayor a mayor intensidad de oleaje.
- En pleamar y oleaje regular,  $K_t$  para el DC fue menor con oleaje de intensidad baja que con oleaje de intensidad alta.
- En bajamar y oleaje irregular,  $K_t$  tendió a mantenerse estable para casos de DC.
- Exceptuando el caso 2 de oleaje irregular por aumento menor a 0.01, todos bajaron el coeficiente de transmisión a mayor densidad de mangle en la coronación.

## RESULTADOS

- A mayor intensidad de oleaje, mayor fue la reducción de las coronaciones con mangle respecto a la DC.
- Las coronaciones con mangle en bajamar y oleaje de alta intensidad lograron menores  $K_t$  que la estructura sin rebase con oleaje de baja intensidad.
- En oleaje de intensidad media, las diferencias de  $K_t$  entre D1 y D2 fueron mínimas, tendiendo a tener la misma eficiencia.
- La diferencia de densidad de mangle fue más significativa a mayor intensidad de oleaje y menor francobordo.

Comparando con los resultados teóricos:

- $K_t$  teórico no rebasable fue prácticamente el mismo valor que el experimental del caso 4, con diferencia de 0.01, siendo la aproximación más exacta de todas, seguida del caso 2, oleaje regular con el método de Numata, (1976) para tetrápodos en condición rebasable.
- En bajamar, los resultados fueron próximos y sobrestimados a los teóricos de Numata para tetrápodos por máximo 0.03. Por otro lado, se encontraron por debajo de los valores de transmisión para escollera por un mínimo de 0.06, indicando más semejanza de los cubípodos al comportamiento del tetrápodo.
- En pleamar, para oleaje irregular todos los métodos subestiman  $K_t$ , siendo Numata, (1976) no rebasable el más preciso con diferencia menor a 0.01.
- Para oleaje irregular, hasta profundidad de 0.18 a pie de talud los valores resultaron entre los calculados para escollera y tetrápodos, aproximándose más a los de escollera ante condiciones de pleamar. El caso 6 sobrepasa todos los valores teóricos con la DC ya que sumerge la estructura por completo. Es con la D2 que  $K_t$  se acerca considerablemente a los valores de escollera por el método de Numata.

El coeficiente de disipación  $K_d$  engloba la influencia tanto de la reflexión como de la transmisión de la estructura. En condiciones de bajamar en ambos tipos de oleaje no se observó un aumento estable en  $K_d$  a medida que se densifica el mangle, siendo además cambios de 0.02 como máximo. En pleamar si se presentó este comportamiento, siendo más notorio con intensidades más altas de oleaje, llegando a diferencias de 0.04.

Tabla 21. Coeficiente de disipación.

CASO	Control		Distribución 1		Distribución 2	
	O.R	O.I	O.R	O.I	O.R	O.I
1	0.92	0.89				
2	0.77	0.80	0.76	0.81	0.76	0.80
3	0.66	0.70	0.67	0.69	0.67	0.72
4	0.83	0.89				
5	0.60	0.68	0.62	0.70	0.62	0.72
6	0.59	0.58	0.62	0.61	0.63	0.61

El comportamiento de la disipación de los seis casos de estudio se resume en los siguientes puntos:

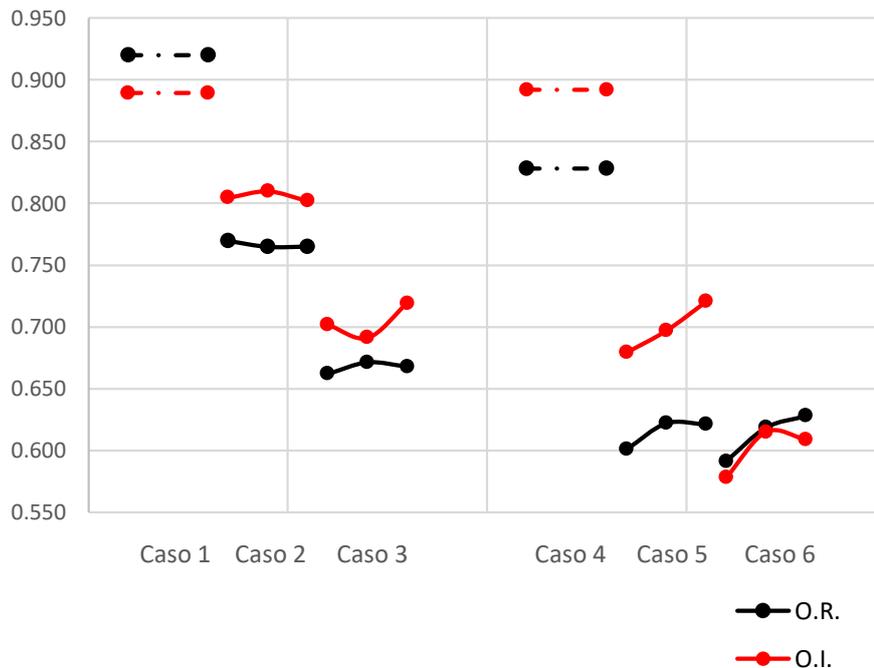
- Para los tres tipos de oleaje, en pleamar se disipó menos que en bajamar:  
Regular:

- 0.09 menos en oleaje baja intensidad.
- 0.14-0.17 menos en oleaje media intensidad.
- 0.04-0.07 menos en oleaje alta intensidad.

Irregular:

- Misma disipación en oleaje baja intensidad.
- 0.08-0.12 en oleaje media intensidad.
- 0.07-0.12 en oleaje alta intensidad.
- Solamente en el caso 1, en oleaje regular se disipó más que en irregular.
- La diferencias en  $K_d$  entre oleaje regular e irregular fueron:
  - Oleaje baja intensidad: 0.03-0.06
  - Oleaje media intensidad: 0.03-0.05 bajamar, 0.08-0.1 pleamar.
  - Oleaje alta intensidad: 0.02-0.05 bajamar, 0.01-0.02 pleamar.
- Ante oleaje regular, a partir de 0.16 m de profundidad a pie de talud hubo aumento de disipación entre la DC y la D1. Entre la D 1 y la D2 tendió a mantenerse, reduciéndose menos de 0.01 para los casos 3 y 5 y aumentando 0.01 en el caso 6.
- Ante oleaje irregular aumentó de 0.01-0.08 en casos 2,5 y 6 entre DC y D1. En caso 3 hubo minoración de 0.01. Entre D1 y D2 aumentó solo en casos 3 y 5 de 0.02-0.03, en casos 2 y 6 hubo descenso mínimo, de 0-0.01.

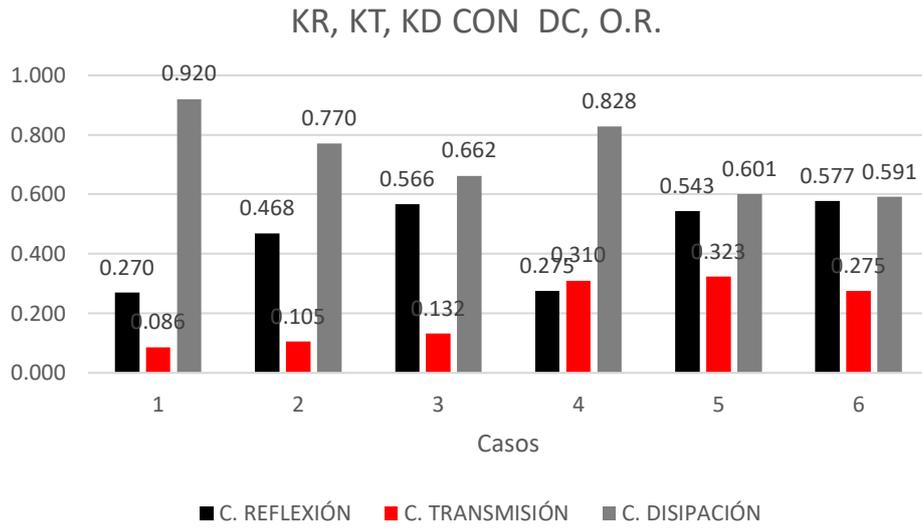
### COEFICIENTE DE DISIPACIÓN



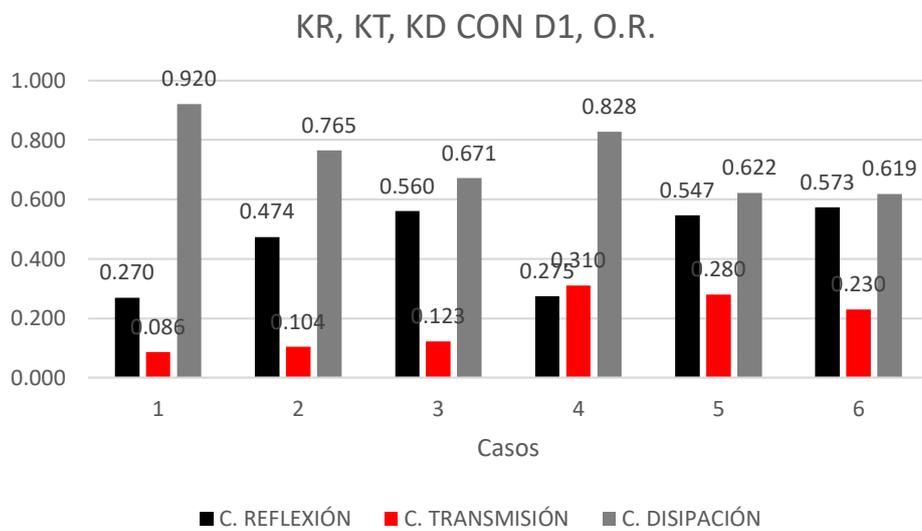
Gráfica 16. Coeficiente de disipación.

Se muestran en la Gráfica 17 y subsecuentes los valores por tipo de oleaje y tipo de coronación de  $K_r$ ,  $K_t$ ,  $K_d$ .

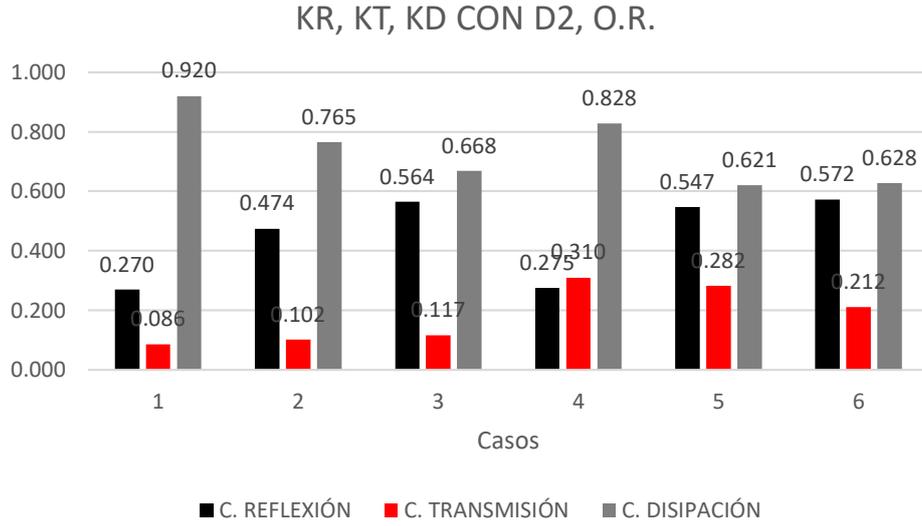
RESULTADOS



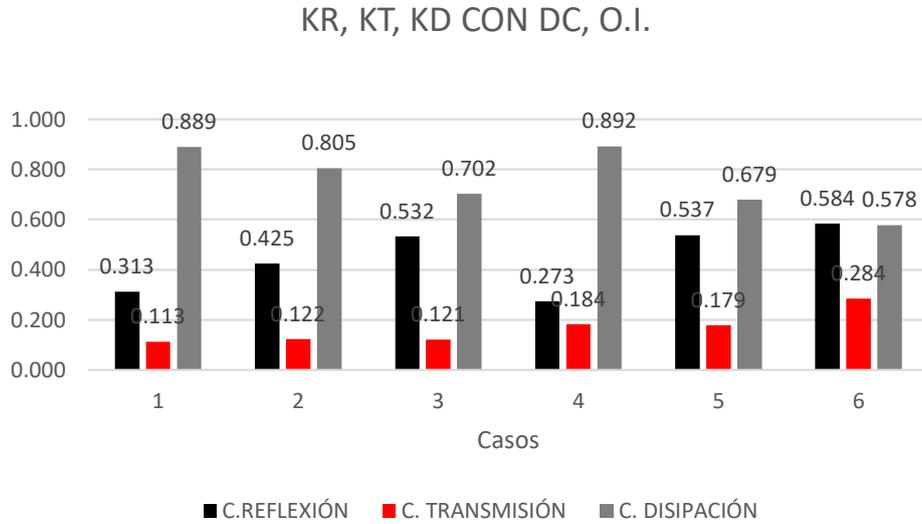
Gráfica 17. CR, CT, CD en rompeolas control O.R.



Gráfica 18. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 1 O.R.

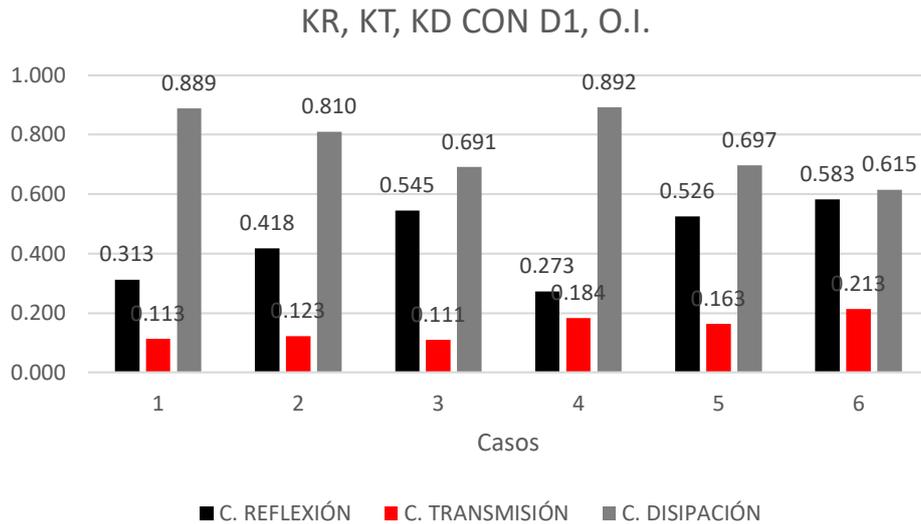


Gráfica 19. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 2 O.R.

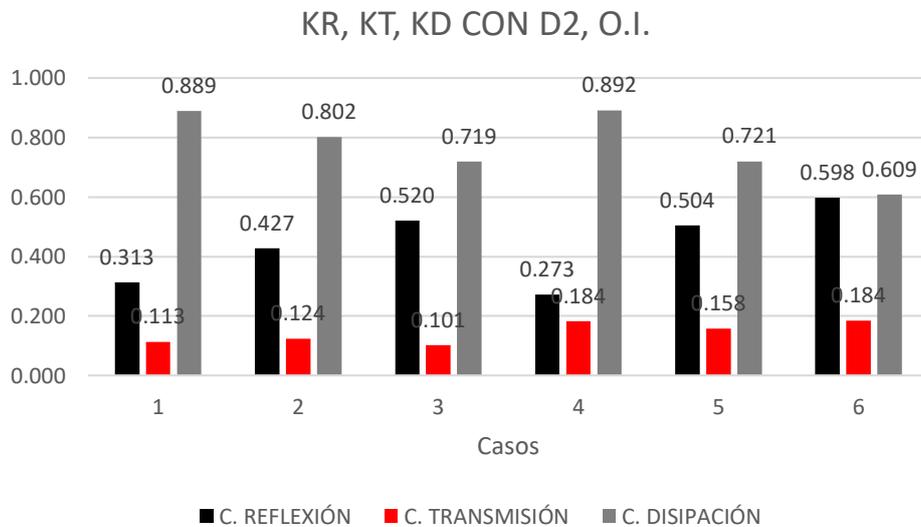


Gráfica 20. Kr, Kt, Kd en rompeolas control O.I.

## RESULTADOS



Gráfica 21. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 1 O.I.



Gráfica 22. Kr, Kt, Kd en rompeolas con distribución 2 O.I.

Patrones de comportamiento (ver gráficas 17 a 22) fueron:

- En los casos con niveles menores de profundidad, donde los cubípodos fueron el principal medio de transmisión hubo tendencia al aumento de esta a medida que se intensificó el oleaje; por el contrario, en los niveles con mayor profundidad y el mangle ya ponderó más dentro del medio de transmisión hubo una tendencia a su disminución. La relación profundidad-intensidad-coronación causó que no se llegara a una constante de disminución o aumento, habiendo casos máximos o mínimos fuera de lo esperado.
- En oleaje irregular de intensidad media en pleamar existió siempre un mínimo, esto puede deberse a que es fue una profundidad en la que el oleaje chocó plenamente contra el muro de acrílico, y volvió a subir su transmisibilidad con 2 cm más de profundidad ya que en esas condiciones las olas no rompieron, sobrepasaron y sumergieron el mangle generando mayor altura de ola del lado protegido.

- Al contrario del oleaje irregular de intensidad media en pleamar, con el regular hubo un máximo de transmisión, las olas fueron constantes sobrepasando considerablemente la coronación, mientras que en el irregular muchas de estas sobrepasaron en menor medida la coronación, dando así en oleaje regular mayor transmisión lo que escurre sobre la coronación. Dicho aumento desapareció ante la presencia del mangle, lo que invita a afirmar que es lo que rebasa el actor de este máximo.
- En bajamar a pesar de que en oleaje regular sí se presentó un aumento constante, en irregular no, hubo un máximo con oleaje de intensidad media y baja con intensidad alta, siendo mayor la reducción a mayor densidad de mangle, indicando así que la transmisión de la estructura aumentó a mayor intensidad, llegando al rebase, el mangle rompió con la energía, razón por la cual con máxima intensidad fue menor  $K_t$ .
- El coeficiente de reflexión fue bastante más estable en su comportamiento, notando siempre, un aumento a medida que se intensificaban las condiciones de mar. Comparando el mismo oleaje con las distintas coronaciones se evidenció que al aumentar la densidad de mangle, el coeficiente de reflexión no variaba considerablemente. La diferencia de  $K_r$  bajo oleaje regular en bajamar con D1 respecto a D2 fue 91.5, 67.7 y 96.7 % menor para cada uno de los tres tipos de oleaje respectivamente (de menor a mayor intensidad), mientras que en pleamar fue 72.3, 45.6 y 26.5 % menor, indicando que en pleamar la diferencia entre ambos tipos de oleaje para una misma intensidad es mayor.
- La disipación, como es de esperarse, disminuyó a mayor intensidad y profundidad. La diferencia de  $K_d$  bajo oleaje regular en bajamar con D1 respecto a D2 fue 100.4, 78.9 y 116.9 % menor para cada una de las tres intensidades de oleaje, mientras que en pleamar fue de 9.9, 3.6 y 6.2 % respectivamente. Se observa como en ambos tipos de oleaje hubo mayor diferencia en los oleajes de intensidad media.

#### 5.4. Rotura de oleaje

En los ensayos se tuvo la influencia de dos pendientes distintas: la referente a la rampa sobre la cual se construyó el rompeolas modelo y la de la estructura misma. Dado que las olas fueron modificadas y verificadas para que no rompieran por causa de la rampa antes de que esta iniciara o en sus inicios (desde la pala generadora de oleaje hasta antes del sensor 2) se consideró que es el talud de incidencia del rompeolas el actor principal en cuanto a la rotura de ola se refiere, por ello en este trabajo se comparó la distancia teórica de rotura para las distintas condiciones de oleaje y elevación del mar calculada con la pendiente del talud de incidencia (2:1) sin considerar la influencia de la rampa con la rotura experimental que se observó en los ensayos de laboratorio.

Se calculó el número de Iribarren para determinar el tipo de rotura considerando L con la profundidad sin considerar la rampa (ver Tabla 22).

$$Ir = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}}$$

Lo que arrojó para cada caso (mismos de la Figura 24) los siguientes resultados:

## RESULTADOS

Tabla 22. Número de Iribarren.

	<b>Ir</b>	<b>Tipo de Rotura</b>
Caso 1	3.76	Oscilación
Caso 2	3.06	Voluta
Caso 3	2.93	Oscilación
Caso 4	3.89	Oscilación
Caso 5	3.17	Oscilación
Caso 6	3.03	Voluta

En los ensayos de los casos 1 y 4, tipo de oleaje de baja intensidad, se apreció la rotura tipo oscilación como se esperaba de acuerdo con los resultados teóricos de la tabla recién mostrada; en los del caso 2, bajamar con intensidad media se logró identificar la rotura tipo voluta, haciendo mención de que la rotura de este caso fue por el efecto de la rampa más que de la estructura. En los demás casos no pudo evaluarse el tipo de rotura ya que por el aumento de profundidad el oleaje no llegó a romper, pasando encima de la coronación sin impedimento notorio.

Para los cálculos teóricos de la distancia de rotura y altura de ola en rotura se utilizaron las ecuaciones de McCowan, (1894). De acuerdo con las menciones del autor, la ecuación de altura de ola subestima los resultados en 12 % aproximadamente (considerando  $k=0,8$ ).

Distancia de rotura desde la línea de costa:

$$x_b = \frac{1}{mg^{\frac{1}{5}}k^{\frac{4}{5}}} \left( \frac{H_0^2 C_0 \cos\theta_0}{2} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Altura de ola en rotura:

$$H_b = kmx_b = \left( \frac{k}{g} \right)^{\frac{1}{5}} \left( \frac{H_0^2 C_0 \cos\theta_0}{2} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Considerando que se calculó la longitud de onda con teoría lineal y con características de aguas en transición, los resultados para las condiciones del modelo son las mostradas en la Tabla 23.

Tabla 23. Distancia de rotura y altura de ola en rotura teóricas para modelo.

	Elevación total	H	T	L	C0	Xb	Hb
	[m]	[m]	[s]	[m]	[m/s]	[m]	[m]
N.B.M.I.	0.23	0.04	1.60	2.26	1.41	0.10	0.040
	0.25	0.08	2.00	3.00	1.50	0.18	0.072
	0.27	0.11	2.40	3.78	1.58	0.24	0.096
N.P.M.S.	0.27	0.04	1.60	2.42	1.51	0.10	0.041
	0.29	0.08	2.00	3.21	1.61	0.18	0.074
	0.31	0.11	2.40	4.03	1.68	0.25	0.098

## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y CARACTERIZACIÓN DE ROMPEOLAS HÍBRIDO CON MANGLAR

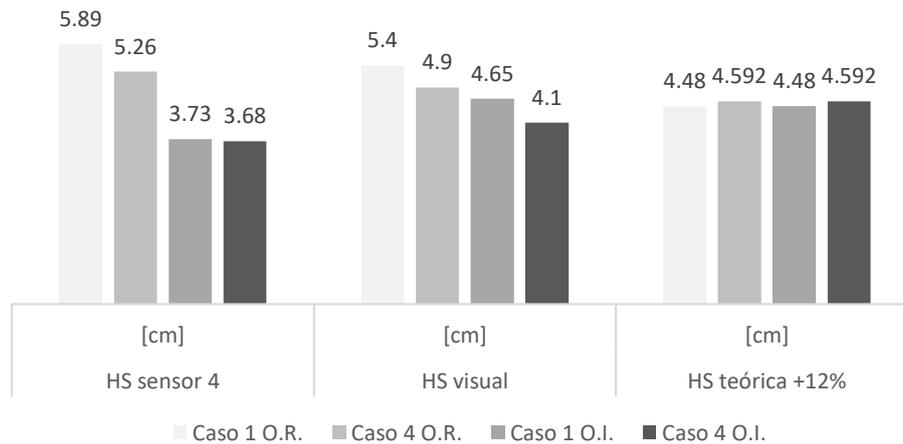
De los resultados teóricos de altura de ola en rotura y distancia de rotura solamente fue posible comparar los casos 1 y 4, que fueron los que experimentalmente presentaron esto.

Tabla 24. Altura de ola antes de romper.

Oleaje Regular							
Caso	HS sensor 4 [cm]	HS visual [cm]	Diferencia [%]	HS teórica [cm]	Diferencia [%]	HS teórica +12% [cm]	Diferencia [%]
1	5.89	5.4	-8	4	-25.9	4.48	-17.0
4	5.26	4.9	-7	4.1	-16.3	4.59	-6.3
Oleaje Irregular							
1	3.73	4.65	25	4	-14.0	4.48	-3.7
4	3.68	4.1	11	4.1	0.0	4.592	12.0

En los 44 cm que había entre el sensor más próximo al talud y el pie del talud hubo una disminución de  $H_s$  para los casos en régimen regular y un aumento en régimen irregular, siendo más contrastantes los cambios en el caso de menor profundidad, lo que reflejó influencia de la rampa. Considerando la altura de ola significativa obtenida visualmente sobre el talud, no hubo ningún caso que la teoría sobrestimara, aplicando un 12 % adicional al resultado fueron el caso 4 con oleaje regular y el 1 con oleaje irregular los más próximos al comportamiento de la experimentación con -6.3 y -3.7 % respectivamente. No se observó correlación directa entre la profundidad y la precisión de los resultados. Comportamiento apreciable en la Gráfica 23.

### HS teórico-experimental



Gráfica 23. Altura de ola teórico-experimental.

## RESULTADOS

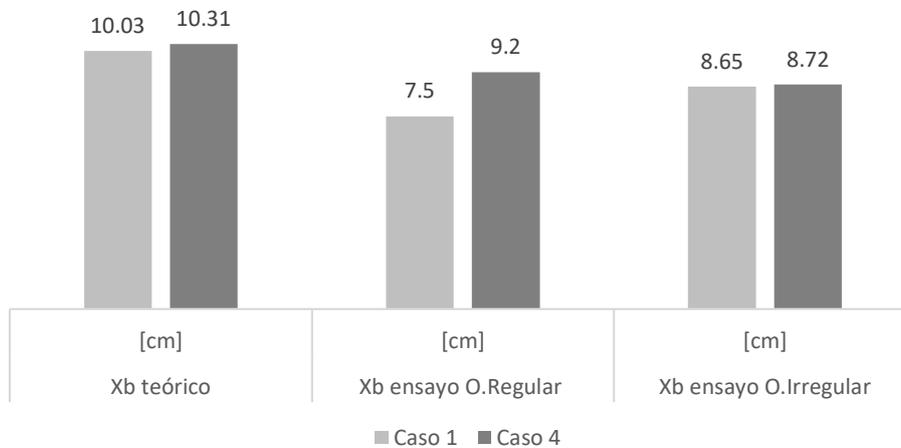
El comportamiento entre la distancia de rotura teórica y experimental fue:

Tabla 25. Distancia de rotura teórico experimental Casos 1 y 4.

Caso	Xb teórico [cm]	Xb ensayo O. Regular [cm]	Diferencia [%]	Xb ensayo O. Irregular [cm]	Diferencia [%]
1	10.03	7.5	-25.2	8.65	-13.8
4	10.31	9.2	-10.8	8.72	-15.4

En oleaje regular, se aproximó más el resultado teórico al experimental para la condición de pleamar, y en régimen irregular lo fue para la condición de bajamar. En ambos casos la teoría sobrestimó la distancia. La distancia de rotura en ambos casos fue casi igual en oleaje irregular mientras que en regular las distancias variaron casi 2 cm. Los resultados indicaron la misma tendencia de la teoría, que a mayor profundidad mayor la distancia de rotura.

### Distancia de rotura desde talud



Gráfica 24. Distancia de rotura desde talud de incidencia.



## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La caracterización de este modelo de rompeolas diseñado con fundamentos de ingeniería ecológica es un primer paso para conocer el comportamiento hidráulico de los individuos de mangle ante oleaje. Los cinco niveles de mar ensayados junto con los tres distintos oleajes a los que fue sometida la estructura, a pesar de no dar información más que de seis posibles condiciones mareográficas, permiten esbozar su comportamiento ante un espectro de intensidades de oleaje variado. A partir de los resultados obtenidos, se presentan conclusiones puntuales de cada fenómeno estudiado.

Rebase:

- Aumentar linealmente la densidad de individuos de mangle en la coronación no se refleja en una reducción lineal del volumen de rebase, comportamiento evidente en profundidades bajas principalmente. Sin embargo, a mayor profundidad y mayor altura de oleaje simultáneamente, más próximo a la linealidad es este.
- A mayor profundidad menor es el aporte del mangle. El mangle impide con mejores resultados el rebase en los casos de mayor intensidad de oleaje. No pudo diferenciarse la disminución de eficiencia del mangle causada por la profundidad del agua y la debida al aumento en la intensidad del oleaje.

Ascenso máximo en rotura:

- Cuando el ascenso del oleaje al romper bajo régimen regular se da sobre los cubípodos, la teoría (de oleaje regular) arrojó resultados muy precisos, (fue solo 4.6% menor el ascenso máximo experimental). Cuando se da sobre el muro de coronación, la disminución es más notoria (fue 17.2% menos experimental que teórico). Estudiando el oleaje irregular con la teoría de oleaje regular, se observó el comportamiento inverso, se subestimaron los resultados y con mayor diferencia a menor profundidad.

Comportamiento de oleaje por rampa:

- $H_s$  a lo largo de la rampa fue similar a la emitida por el generador con oleaje irregular, mientras que bajo oleaje regular tendió a crecer.  $H_s$  fue mayor a inicios de la rampa que a pie de talud bajo oleaje irregular y con mayor diferencia entre estos valores a mayor intensidad, mientras que bajo régimen regular no es progresivo el comportamiento. Los valores de  $H_s$  a pie de talud son casi los mismos que los emitidos bajo régimen de oleaje irregular.

Diseño de piezas:

- Como primera aproximación de diseño (Hudson) los cubípodos tuvieron dimensiones sobradas a las mínimas sugeridas por el método, sobrado su peso en 76% como mínimo.

Desempeño de la obra respecto la energía de rebase:

- En cuanto al coeficiente de reflexión en la estructura, en oleaje regular de intensidad media aumentó entre DC y D1, con intensidad de oleaje alta el comportamiento se invirtió. Entre D1 y D2 tendió a mantenerse el coeficiente. Bajo oleaje irregular disminuyó el coeficiente entre DC y D1 para la mayoría de los casos. Entre D1 y D2 el comportamiento no fue concluyente. La teoría subestimó el valor en casos con rebase y sobrestimo en casos sin rebase.
- En cuanto al coeficiente de transmisión, tuvo comportamiento muy claro, disminuyó a mayor densidad de mangle. A partir de 16 cm de profundidad a pie de talud el oleaje regular transmitió más que el irregular. Con profundidades en las que el muro de coronación no se involucró tanto, la estructura transmitió poco más que los tetrápodos, en profundidades que comprometen más al muro, el rompeolas transmitió más que una estructura de escollera.
- Respecto al coeficiente de disipación, a partir de 16 cm de profundidad a pie de talud, bajo oleaje regular aumentó entre DC y D1, entre D1 y D2 se mantuvo. Bajo oleaje irregular tendió a aumentar entre DC y D1, entre D1 y D2 tendió a mantenerse o a aumentar ligeramente (no concluyente).

Rotura de oleaje:

- La teoría subestimó la altura de ola en rotura, y a menor profundidad mayor fue la diferencia, reflejándose el aperlamiento que provoca la rampa. El oleaje regular se subestimó entre 12 y 16 % más que el irregular (considerando HS). La distancia de rotura se sobrestimó entre 11 y 25 % sin encontrar patrones estables de comportamiento. A mayor profundidad mayor la distancia de rotura.

No se descarta que los resultados del comportamiento del rompeolas con manglar hayan arrastrado cierto grado de error, esto debido a algunos procedimientos manuales o mediciones visuales. Estos fueron:

- Los volúmenes de rebase encontrados fueron captados físicamente, con la caja de acrílico. Los errores sistemáticos posibles podrían ser eliminados con otras técnicas de medición.
- No todos los sensores de medición de altura de ola registraron datos dependiendo de la profundidad del agua, por lo que no pudo seguirse el comportamiento del oleaje después de la estructura en los seis sensores de voltaje.
- Las mediciones de altura de ola en rotura y distancia de rotura hechas sobre el talud a pesar de haber sido medidas con videos ampliados y en 0.25 de velocidad conllevaron el error de la estimación visual.

A partir de lo observado se llegó a ciertas recomendaciones para el diseño y mantenimiento de la estructura, principalmente del mangle sobre la estructura:

- Si se busca proteger la línea de costa, mejorar las condiciones de aguas tranquilas o disminuir el volumen de rebase es claro que una mayor densidad de mangle favorece el objetivo. Con oleajes de baja intensidad la densidad de

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

mangle máxima aquí propuesta se acerca a un máximo aporte en la reducción de la transmisión, con oleajes de alta intensidad no se concluye ninguna tendencia a aproximarse a una densidad máxima, por lo que no se puede concluir un número de individuos recomendable.

- Si es de interés controlar la reflexión se puede considerar lo siguiente: Si se busca disminuir la reflexión, con la menor densidad aquí propuesta ya se llega a lo mismo que con mayor densidad en términos prácticos.
- En caso de pérdida de individuos, es conveniente reforestar las líneas más expuestas al oleaje para permitir el crecimiento y arraigo de los individuos de la parte posterior de la coronación.
- En caso de pérdida de cubípodos, se recomienda verificar que la cimentación de la coronación no se vea dañada.

Este trabajo tiene aún muchas incógnitas que pueden ser investigadas, de tal modo que a futuro se tenga un conocimiento más amplio de las estructuras con manglar para las costas del Pacífico mexicano, llegando así a tener certeza en el comportamiento de soluciones propuestas futuras. Entre las posibilidades de investigación futura están:

- Analizar una variedad de densidades de mangle y definir una curva de comportamiento densidad-altura de ola.
- Investigar el comportamiento con las otras tres especies que crecen en México, a pesar de que sea la aquí analizada la que tenga mayor capacidad de disipación por su tipo de raíces.
- Caracterizar estructuras con mangle de distintas edades, y dado que los primeros metros de coronación frente al mar son más propensos a ser abatidos, se puede proponer manglar más joven en una o varias franjas del lado de incidencia y manglar más crecido en las franjas más resguardadas.
- Hacer una caracterización aislando el rompeolas de los efectos de la rampa.
- Proponer un análisis con estructuras con tetrápodos por tener menor coeficiente de transmisión o con núcleo.
- Caracterizar el comportamiento del suelo del humedal artificial e investigar los flujos de agua a los que estaría expuesta la coronación, viendo así si son condiciones bajo las que el manglar pudiera desarrollarse normalmente.

Generar información que beneficie el desarrollo de la eco ingeniería en infraestructura costera en México es un modo de proteger a los ecosistemas. Los manglares son de manera natural una barrera al oleaje, por lo que utilizarlos de manera consciente y estratégica ante los cambios y fenómenos costeros da lugar a una simbiosis, favoreciendo a las necesidades humanas y a la protección misma de los manglares. El país requiere crecer en estos campos de ecología aplicada a la ingeniería, y los análisis aquí expuestos no son más que una herramienta para justificar razones de diseño o para sentar las bases de investigaciones futuras.



## 7. ANEXOS

### 1. Desarrollo de teoría lineal

Ecuación diferencial de gobierno en el fluido para dos dimensiones.

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0$$

Derivada total en la superficie del agua igual a cero.

$$|\nabla F| = \sqrt{\frac{\partial F^2}{\partial x} + \frac{\partial F^2}{\partial y} + \frac{\partial F^2}{\partial z}}$$

Condición cinemática a condicionar para la superficie libre, resultado de producto punto.

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \Big|_{z=\eta(x,y,z)}$$

Ecuación de Bernoulli para la condición dinámica de la superficie libre.

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} * \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz = C(t) \quad z = \eta(x,t)$$

Condiciones periódicas para fronteras laterales propagadas en un plano en función de la longitud y el periodo de onda.

$$\Phi(x,t) = \Phi(x + L, t)$$

$$\Phi(x,t) = \Phi(x, t + T)$$

### 2. Estaciones mareográficas del Servicio Mareográfico Nacional



Figura 27. Estaciones mareográficas a nivel nacional

3. Planos de mareas de la estación mareográfica de San Blas, Nayarit de la SEMAR

**SAN BLAS, NAY.**

LAT. 21° 32' 16" N

LONG. 105° 17' 17" W

Mayo de 1999 a Diciembre de 2017.

**PLANOS DE MAREAS REFERIDOS AL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR.**

PLEAMAR MÁXIMA REGISTRADA	6.037 pies	1.840 m
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA SUPERIOR	3.506 pies	1.069 m
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA	2.938 pies	0.896 m
NIVEL MEDIO DEL MAR	1.848 pies	0.563 m
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA	0.790 pies	0.241 m
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR	0.000 pies	0.000 m
BAJAMAR MÍNIMA REGISTRADA	-2.280 pies	-0.695 m

**Nota:** La pleamar máxima y bajamar mínima registradas obedecen al periodo de observaciones correspondientes a los años 2002 - 2017.

4. Frecuencias emitidas por la pala de oleaje, ejemplo de caso 2.

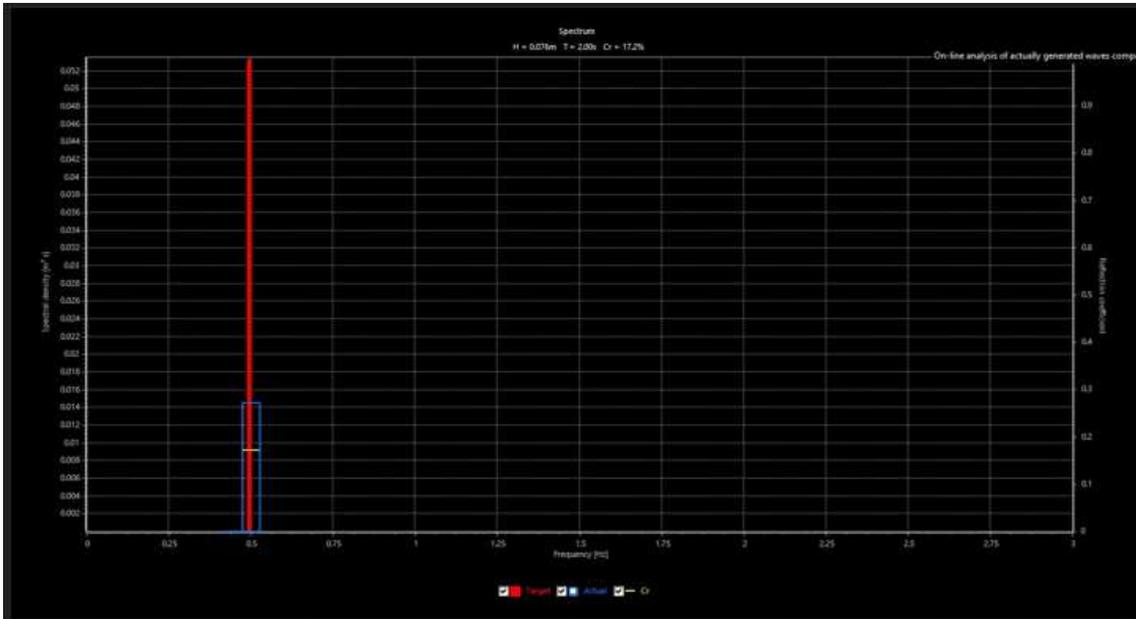


Figura 28. Frecuencia de oleaje regular emitida por la pala.

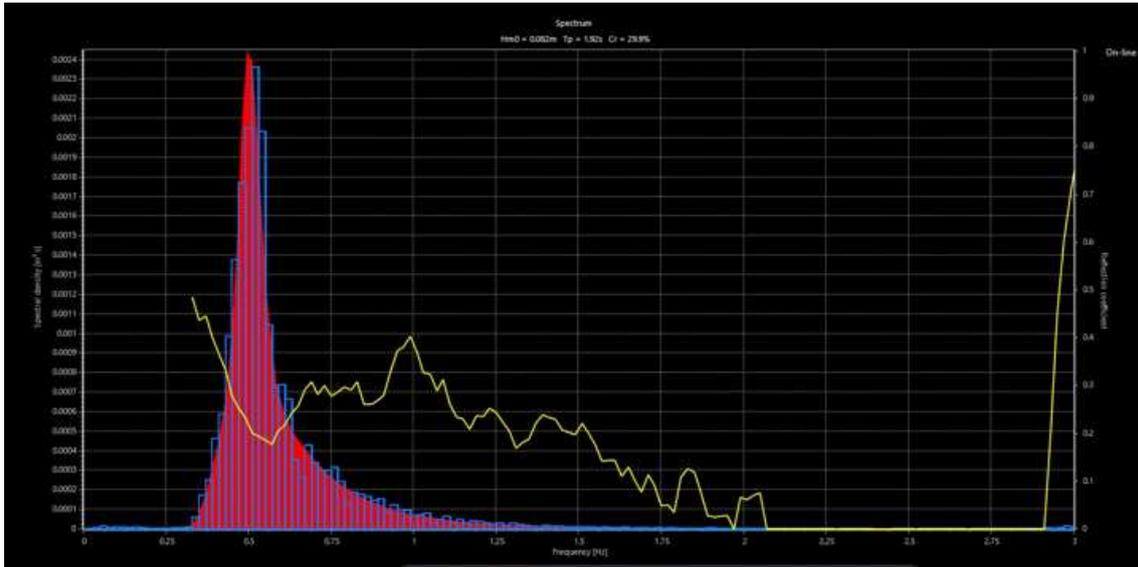


Figura 29. Frecuencias de oleaje irregular emitida por la pala.

5. Datos de coeficiente de estabilidad de cubos

Tabla 1. $K_D$ y coeficientes de seguridad implícitos del cubo, Cubípodo, Accropode y Xbloc								
Tramo	Pieza	KD	n° capas	talud	Inicio de Destrucción (IDe)		Inicio de Averías (IDa)	
					SF(IDe5%)	SF(IDe50%)	SF(IDa5%)	SF(IDa50%)
tronco	cubo	6,0	2	3/2	1,05	1,35	0,67	0,86
	Cubípodo 2	28,0	2	3/2	1,09	1,40	0,82	0,99
	Cubípodo 1	12,0	1	3/2	1,31	1,64	1,06	1,27
	Accropode	15,0	1	4/3	1,05 a 1,40	1,26 a 1,51	0,93 a 1,24	1,15 a 1,38
	Xbloc	16,0	1	4/3	1,17	1,68	1,17	1,32
morro	cubo	5,0	2	3/2	1,17	1,40	0,88	1,13
	Cubípodo 2	7,0	2	3/2	1,19	1,36	0,99	1,18

Tabla 26.  $K_D$  y coeficientes de seguridad implícitos del cubo, Cubípodo, Acropode y Xbloc (Folgado et al., 2010)

6. Porosidad de cubípodos según su acomodo

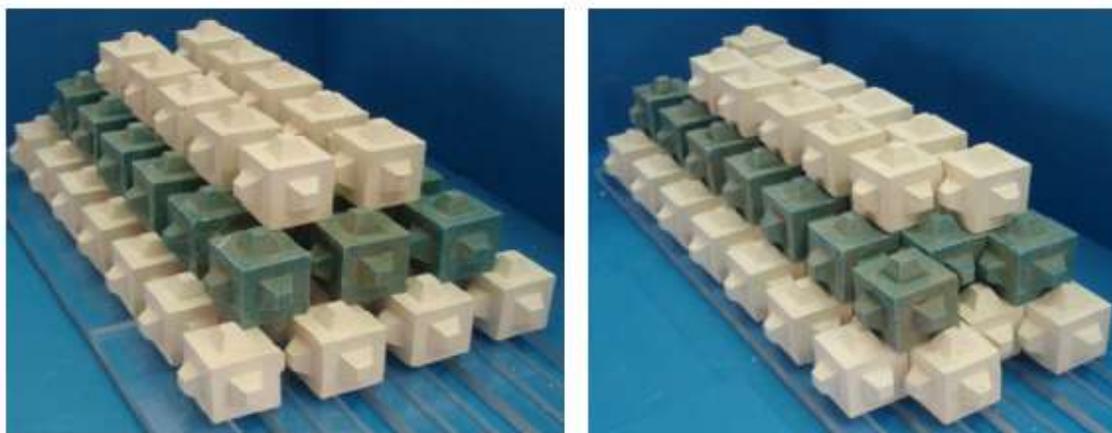


Figura 30. Porosidad de cubípodos (Medina et al., 2016)

7. Método de Van der Meer et al., (1992)

Tabla de coeficientes

Porcentaje de excedencia	A	B	C	D
0.1	1.12	1.34	0.55	2.58
2	0.96	1.17	0.46	1.97
5	0.86	1.05	0.44	1.68
10	0.77	0.94	0.42	1.45
33	0.72	0.88	0.41	1.35
50	0.47	0.6	0.34	0.82

8. Alturas de ola en sensor 1 y tercias utilizadas.

Alturas de ola en Sensor 1 y en tercias de sensores evaluadas.													
Caso	Distribución	H1		HS 2, 3 y 4		HS 7, 8 y 9		HS 8, 9 y 10		HS 5, 7 y 8		HS 5, 6 y 7	
		O.R. [cm]	O.I. [cm]										
1	Control	5.59	3.54	4.36	3.43	0.18	0.36	0.37	0.38				
2	Control	10.73	7.62	9.40	7.46	0.82	0.93	0.99	0.92				
2	1	10.52	7.37	9.31	7.33	0.80	0.91	0.97	0.90				
2	2	10.61	7.52	9.41	7.18	0.79	0.90	0.96	0.89				
3	Control	13.21	10.06	14.69	9.40	1.48	1.19	1.97	1.15	1.42	1.20		
3	1	15.08	10.20	14.69	9.39	1.36	1.09	1.85	1.04	1.27	1.12		
3	2	12.95	10.52	14.63	9.50	1.29	1.00	1.74	0.97	1.18	1.03		
4	Control	5.12	4.35	4.63	3.59	1.03	0.62	1.56	0.66	0.76	0.71		
5	Control	14.88	9.71	11.05	7.69			3.08	1.38			3.31	1.67
5	1	14.92	9.25	11.03	7.88			2.64	1.28			2.84	1.58
5	2	15.08	9.14	11.11	7.69			2.50	1.22			2.65	1.51
6	Control	16.91	12.07	15.55	9.93			4.33	2.80			4.78	3.21
6	1	16.95	12.04	15.53	10.11			3.74	2.15			4.05	2.60
6	2	17.23	12.09	15.55	9.92			3.45	1.82			3.77	2.26

9. Iribarren local y coeficientes teóricos de reflexión a pie de talud

Iribarren local y Coeficiente de reflexión a pie de talud						
H	L	h	t	IR	KR no rebase	Kr rebase
[m]	[m]	[m]	[s]	[1]	[1]	
0.034	1.61	0.11	1.60	3.43	0.38	
0.075	2.21	0.13	2.00	2.72	0.32	
0.073	2.21	0.13	2.00	2.75	0.32	
0.072	2.21	0.13	2.00	2.76	0.32	
0.095	2.86	0.15	2.40	2.75		
0.095	2.86	0.15	2.40	2.75		
0.096	2.86	0.15	2.40	2.74		
0.036	1.86	0.15	1.60	3.59	0.40	

ANEXOS

0.077	2.51	0.17	2.00	2.86	0.26
0.079	2.51	0.17	2.00	2.82	0.26
0.077	2.51	0.17	2.00	2.85	0.26
0.101	3.20	0.19	2.40	2.81	0.23
0.102	3.20	0.19	2.40	2.80	0.23
0.099	3.20	0.19	2.40	2.85	0.23

## BIBLIOGRAFÍA

- Adame, M. F., Zaldívar-Jimenez, A., Teutli, C., Caamal, J. P., Andueza, M. T., López-Adame, H., Cano, R., Hernández-Arana, H. A., Torres-Lara, R., & Herrera-Silveira, J. A. (2013). Drivers of Mangrove Litterfall within a Karstic Region Affected by Frequent Hurricanes. *Biotropica*, 45(2), 147–154. doi: 10.1111/btp.12000
- Alongi, D. M. (1996). The dynamics of benthic nutrient pools and fluxes in tropical mangrove forests. *Journal of Marine Research*, 54(1), 123–148.
- Andersen, T. L., Frigaard, P. B., & Burchart, H. F. (2014). *Lecture notes for the course in water wave mechanics* (Department of Civil Engineering Aalborg University (ed.); 3a ed.). United Kingdom. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/60595992.pdf>
- Ávila, A., Pedrozo, A., Silva, R., & Simmonds, D. J. (2003). Principales teorías para el modelado matemático de la propagación de oleaje. *IV Congreso Internacional: Puertos y Costas, Realidades y Perspectivas, January*.
- Baquerizo Azofra, A. (1995). *Reflexión del Oleaje en Playas*. Universidad de Cantabria.
- Barbier, E. B. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193.
- Barbier, E. B. (2015). Ecosystem services. In *Handbook on the Economics of Natural Resources*. Edward Elgar Publishing.
- BATTJES, J. A. (1974). *Computation of Set-Up, Longshore Currents, Run-Up and Overtopping Due To Wind-Generated Waves*. (1974).
- CFE. (1981). Hidráulica Marítima. In *Manual de Diseño de Obras Civiles*. México: Centro Editorial de CFE.
- Chadwick, A., & Morfett, J. (2003). *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering Solutions Manual*. In *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering Solutions Manual* (5th editio). CRC Press. doi: 10.4324/9780203042861
- Chowdhury, M. S. N., Walles, B., Sharifuzzaman, S., Shahadat Hossain, M., Ysebaert, T., & Smaal, A. C. (2019). Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. doi: 10.1038/s41598-019-44925-6
- Christianen, M. J. A., van Belzen, J., Herman, P. M. J., van Katwijk, M. M., Lamers, L. P. M., van Leent, P. J. M., & Bouma, T. J. (2013). Low-Canopy Seagrass Beds Still Provide Important Coastal Protection Services. *PLoS ONE*, 8(5), 1–10. doi: 10.1371/journal.pone.0062413
- CONABIO-PRONARE. (2003a). *A vicennia germinans* (Issue 4, pp. 1–6). México: SIRE Paquetes Tecnológicos.
- CONABIO-PRONARE. (2003b). *Conocarpus erectus* (Issue 1, pp. 3–7). México.
- CONABIO-PRONARE. (2003c). *Laguncularia racemosa* (Vol. 0, Issue 6, pp. 1–5).
- Conabio. (2013). *Rhizophora mangle* L. Rhizophoraceae. *Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad (CONABIO)*, 1753, 219–223. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/58-rhizo1m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/58-rhizo1m.pdf)
- CONABIO. (2021a). *Enciclovida*. Mangle Blanco. Retrieved from

- <https://enciclovida.mx/especies/163601-laguncularia-racemosa>
- CONABIO. (2021b). *Mangle botoncillo*. Retrieved from <https://enciclovida.mx/especies/163600-conocarpus-erectus>
- Cruz Quiroz, A. C. (2010). *Caracterización del gradiente de presiones inducido por diferentes condiciones de rotura de oleaje*. UNAM.
- Davidson Arnott, R. (2010). *Introduction to Coastal Processes and geomorphology*. New York: Cambridge University Press.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1984). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. doi: 10.1029/eo066i024p00490-06
- Folgado, J. R. M., Esther Gómez Martín, M., Molguero, A. C., & Huertes, M. S. (2010). Diseño de diques en talud con el manto principal de cubípodos. *Revista de Obras Publicas*, 157(3515), 37–52.
- Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos. (2008). *Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Pacífica Mexicana*.
- INEGI. (2017). *Imágenes de sensores remotos para la detección y caracterización de erosión costera*. Retrieved from [https://www.inegi.org.mx/eventos/2017/remota/doc/p\\_ZorayaVazquez.pdf](https://www.inegi.org.mx/eventos/2017/remota/doc/p_ZorayaVazquez.pdf)
- Kangas, P. (2003). *Ecological engineering: principles and practice*. CRC Press.
- Keller, J. B. (1958). Surface waves on water of non-uniform depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 4(6), 607–614.
- Kuh, K., Verchick, R. R. M., & Scheraga, J. D. (2012). *Protecting the Coast THE LAW OF ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE: U.S. AND INTERNATIONAL ASPECTS* (pp. 1–51).
- Lieth, H., & Mooney, H. a. (1990). *Towards the rational use of high salinity tolerant plants*. Emiratos Árabes Unidos: Springer Science+ Business Media Dordrecht.
- López Martínez, R. M. (2019). Hablemos de restauración: mares y costas. *Revista de Biología Tropical*, Blog-Blog. Retrieved from <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/38361>
- Losada, I. J., Silva, R., & Losada, M. A. (1996a). 3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 28(1–4), 229–248.
- Losada, I. J., Silva, R., & Losada, M. A. (1996b). Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 28(1–4), 249–266.
- Losada, M. A., & Giménez Curto, L. A. (1980). Mound breakwaters under wave attack. *Department of Oceanographical and Ports Engineering*.
- Losada, M. A., Medina, R., & Losada, I. J. (1990). Reflexión y transmisión en diques verticales de escollera. *Revista de Obras Públicas*, 11–12. Retrieved from [http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1990/1990\\_febrero\\_3288\\_01.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1990/1990_febrero_3288_01.pdf)
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In *Coastal Engineering 1980* (pp. 154–172).
- Marí, C. (2019). *México responde tarde y mal contra la erosión costera*. CONNECTAS. Retrieved from <https://www.connectas.org/mexico-respondio-tarde-y-mal-contra-la-erosion-costera-cientificos/>

- Martín Bragado, I. (2003). *Física general* (1st ed.). Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Retrieved from <https://fisicas.ucm.es/data/cont/media/www/pag-39686/fisica-general-libro-completo.pdf>
- Martín, F. L., Vidal, C., Losada, M. Á., & Medina, R. (1995). Un método para el cálculo de las acciones del oleaje sobre los espaldones de los diques rompeolas. *Ingeniería Del Agua*, 2(3), 37–52.
- Massel, S. R. (1993). Extended refraction-diffraction equation for surface waves. *Coastal Engineering*, 19(1), 97–126. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90020-9)
- McCowan, J. (1894). XXXIX. On the highest wave of permanent type. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 38(233), 351–358.
- Medina, J. R., & Gómez-Martín, M. E. (2016). *Cubipod Manual 2016*.
- Mitsch, W. J. (2012). What is ecological engineering? *Ecological Engineering*, 45(October), 5–12. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.04.013
- Numata, A. (1976). Laboratory formulation for transmission and reflection at permeable breakwaters of artificial blocks. *Coastal Engineering in Japan*, 19(1), 47–58.
- Ogino, K. (1993). Mangrove ecosystem as soil, water and plant interactive system. *Towards the Rational Use Of high Salinity Tolerant Plants*, 1, 135–143.
- Panchang, V. G., Pearce, B. R., Wei, G., & Cushman-Roisin, B. (1991). Solution of the mild-slope wave problem by iteration. *Applied Ocean Research*, 13(4), 187–199.
- Pedersen, J. (1996). *Wave Forces and Overtopping on Crown Walls of Rubble Mound Breakwaters - An Experimental Study* -. Dinamarca.
- Pedrozo Acuña, A., Simmonds, D. J., & Silva Casarín, R. (2005). Descripción de la cinemática del oleaje con ecuacionestipo Boussinesq. *Ingeniería Hidráulica En México*, XX, 69–75. Retrieved from [http://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1017/pdf\\_1](http://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1017/pdf_1)
- Porter, D., & Staziker, D. J. (1995). Extensions of the mild-slope equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 300, 367–382.
- Rojanakamthorn, S., Isobe, M., & Watanabe, A. (1989). A mathematical model of wave transformation over a submerged breakwater. *Coastal Engineering in Japan*, 32(2), 209–234.
- Rojanakamthorn, S., Isobe, M., & Watanabe, A. (1991). Modeling of wave transformation on submerged breakwater. In *Coastal Engineering 1990* (pp. 1060–1073).
- Sánchez-Núñez, D. A. (2019). *Influence of mangrove structural complexity on coastal erosion control processes and drivers of mangrove ecosystem dynamics*. Universidad Nacional de Colombia.
- Sañudo Oria, T. (2016). *Estudio de la difracción en modelos de propagación del oleaje*.
- Schiereck, Gerrit Jan., Verhagen, H. J. (1996). Coastal Engineering Manual. *Coastal Engineering Manual, August 2001*, 1–62.
- Schiereck, Gerrit Jan., Verhagen, H. J., Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2001). Coastal Engineering Manual. In *Coastal Engineering Manual* (Issue August 2001). doi: 10.1029/eo066i024p00490-06
- SCT. (2017). *Sistema Portuario Nacional*.

- Seelig, W. N. (1983). Wave reflection from coastal structures. *Proceedings, Coastal Structures' 83, ASCE*.
- Servicio Mareográfico Nacional. (2020). *Registro de la marea de tormenta producida por el huracán Nora*. 1–13.
- Shen, M. C., Meyer, R. E., & Keller, J. B. (1968). Spectra of water waves in channels and around islands. *The Physics of Fluids*, 11(11), 2289–2304.
- Silva, R., Govaere, G., & Martin, F. (1999). A statistical tool for breakwater design. In *Coastal Engineering 1998* (pp. 1920–1933).
- Silva, R., Salles, P., & Palacio, A. (2002). Linear waves propagating over a rapidly varying finite porous bed. *Coastal Engineering*, 44(3), 239–260.
- Sistema de Monitoreo de Manglares de México. (2022). *Extensión y distribución de manglares*. Retrieved from <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/extensionDist>
- Smith, R., & Sprinks, T. (1975). Scattering of surface waves by a conical island. *Journal of Fluid Mechanics*, 72(2), 373–384. doi: 10.1017/S0022112075003424
- The Logistics World. (2022). *Principales puertos de américa latina*. Retrieved from <https://thelogisticsworld.com/comercio-internacional/principales-puertos-de-latinoamerica/>
- United States Environmental Protection Agency. (2021). *Basic Information about Coral Reefs*. Retrieved from <https://www.epa.gov/coral-reefs/basic-information-about-coral-reefs>
- Ursell, F. (1952). Edge Waves on a Sloping Beach. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 214(1116), 79–97. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/99161>
- Van Der Meer, J. W. (1995). Conceptual design of rubble mound breakwaters. *Advances In Coastal And Ocean Engineering*, 1, 221–315.
- Van der Meer, J. W., & Stam, C.-J. M. (1992). Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(5), 534–550.
- Van Gent, M. R. A. (2013). Rock stability of rubble mound breakwaters with a berm. *Coastal Engineering*, 78, 35–45. doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.03.003
- Waltham, N. J., & Sheaves, M. (2018). Eco-engineering rock pools to a seawall in a tropical estuary: Microhabitat features and fine sediment accumulation. *Ecological Engineering*, 120(June), 631–636. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.010
- Whitham, G. B. (1967). Variational Methods and Applications to Water Waves. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 299(1456), 6–25. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2415780>
- Worthington, T. A., zu Ermgassen, P. S. E., Friess, D. A., Krauss, K. W., Lovelock, C. E., Thorley, J., Tingey, R., Woodroffe, C. D., Bunting, P., Cormier, N., Lagomasino, D., Lucas, R., Murray, N. J., Sutherland, W. J., & Spalding, M. (2020). A global biophysical typology of mangroves and its relevance for ecosystem structure and deforestation. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. doi: 10.1038/s41598-020-71194-5
- Yáñez-Arancibia, A., & Lara-Aomínguez, A. L. (1999). Los Manglares de América Latina En la Encrucijada. *Ecosistemas de Manglar En América Tropical*, 7(October), 9–16.





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO