



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

OPTIMIZACIÓN MECÁNICA E HIDRÁULICA DE UN DIQUE SUMERGIDO  
HOMOGÉNEO TIPO ARRECIFE ARTIFICIAL

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
DEA MARIBEL CÁRDENAS ROJAS

TUTOR PRINCIPAL  
EDGAR G., MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CDMX. MARZO 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dr. Gracia Sánchez Jesús  
Secretario: Dr. Escalante Sandoval Carlos A  
1er Vocal: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo  
2do. Vocal: Dr. Silva Casarín Rodolfo  
3er Vocal: Dra. Reyes Chávez Lilia

Instituto de Ingeniería, UNAM. CDMX, México.

## **TUTOR DE TESIS**

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias Dios por haber puesto en mi camino todos los recursos necesarios para poder lograr esta meta.

Gracias a los Doctores Edgar Mendoza y Rodolfo Silva, por ser mis mentores, compartir sus conocimientos, apoyarme y guiarme, por abrirme las puertas del instituto desde hace ocho años y cobijarme hasta el día de hoy que culmina esta etapa en mi vida.

Gracias CONACYT por los recursos brindados.

Gracias a mis compañeros del laboratorio Ana, Geovanic, Manuel, Alejandro, Erik, David, quienes me brindaron su apoyo durante la elaboración de este trabajo. Gracias Daniel y Ponciano, por su invaluable trabajo en equipo, por hacer muy divertidas y productivas, cada una de las horas que se requirieron para realizar las pruebas y por brindarme su amistad. Gracias Anahí, Cesia y Regina por su amistad, por soportarme y estar ahí cuando más las necesitaba.

Gracias a mi familia, quienes siempre en cada momento y etapa están a mi lado, apoyándome y soportándome en cada sueño, en cada éxito y cada fracaso, gracias porque me han dotado de amor y fortaleza, sin ustedes no sería la persona que soy hoy, ni habría llegado hasta aquí, no tengo palabras que me alcancen para demostrar cuan agradecida estoy con ustedes.

## RESUMEN

En la actualidad las costas alrededor del mundo sufren problemas de erosión, por abordar de manera integral este problema se tiene la necesidad de estudiar y comprender los procesos morfodinámicos de las playas. Como parte de la solución a dichos problemas, se ha recurrido al uso de distintos tipos de obras de protección, con la finalidad de conservar la línea de costa. Las playas además de la riqueza ambiental que posee, son importantes desde el punto de vista económico, por todas las actividades que ahí se desarrollan, como el turismo, la pesca, el sector portuario, por mencionar algunas.

Por lo mencionado anteriormente, este trabajo se enfocó en analizar el comportamiento de un dique sumergido construido a base de piezas modulares con orificios, que sirva como protección a la costa y además sea una solución amigable con el ambiente. Se realizaron modelos físicos en el estanque de olas de la Facultad de Ingeniería Civil, UNAM y en el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, UNAM. Con los cuales se obtuvieron parámetros hidrodinámicos como el coeficiente de transmisión, reflexión y disipación, tanto de la estructura completa, como de la sección transversal. En el canal de oleaje se estudió la respuesta del perfil de playa ante condiciones de oleaje de tormenta con presencia del dique homogéneo.

Las conclusiones principales fueron que las estructuras tienen un mejor funcionamiento fuera de la zona de rompiente y la coronación del dique coincide con el nivel de superficie libre. Se observó que al incrementar el peralte de la ola ( $H/L$ ) el valor de  $K_r$  disminuye, mientras que si disminuye los valores de  $K_t$  aumentan. En cuanto a las velocidades se encontraron mayores rangos en la sección de los morros, además se comprobó que detrás de la estructura las velocidades son menores, lo que ayuda a establecer condiciones propicias para el inicio de una nueva cadena trófica.

## Índice

Introducción .....	12
Objetivos .....	14
Objetivo general.....	14
Objetivos particulares .....	14
1    Protección de playas. ....	15
1.1    Morfología de playas.....	15
1.1.1    Forma de perfil de playa. ....	15
1.1.2    Características de la zona de rompiente. ....	15
1.1.3    Forma en planta de las playas. ....	17
1.1.4    Transporte de sedimentos. ....	19
1.2    Perfil de equilibrio en condiciones de tormenta.....	20
1.3    Interacción del oleaje con el sistema playa – duna. ....	21
1.4    Métodos tradicionales de protección de playas. ....	23
1.4.1    Relleno de playas.....	23
1.4.2    Espigones.....	24
1.4.3    Seawalls. ....	25
1.4.4    Revestimientos. ....	25
1.4.5    Drenado de playas.....	25
2    Rompeolas sumergidos. ....	27
2.1    Hidrodinámica del oleaje con estructura sumergida. ....	28
2.1.1    Corrientes y efectos de la marea. ....	28
2.1.2    Cambios morfológicos.....	29
2.2    Efecto de los rompeolas sumergidos en las formas en planta.....	29
2.3    Tipos de rompeolas sumergidos. ....	31
2.4    Ejemplos mundiales de restauración de playas por medio de rompeolas sumergidos....	36
3    Arrecifes artificiales como solución basado en ecosistemas. ....	38
3.1    Beneficios de los arrecifes artificiales. ....	38
3.1.1    Generación de espacios para nueva vida.....	38
3.1.2    Disminución de la pesca ilegal con redes de arrastre. ....	38
3.1.3    Absorción de CO <sub>2</sub> de la atmósfera. ....	38
3.1.4    Disminución de presión sobre arrecifes naturales.....	39
3.2    Uso de los ecosistemas como parte del manejo integral de la zona costera. ....	39

4	Representación en pequeña escala de los fenómenos físicos de oleaje. ....	41
4.1	Fundamento del modelo físico en pequeña escala.....	41
4.2	Pruebas en planta del modelo de rompeolas modular.....	43
4.3	Pruebas de la sección transversal del rompeolas modular.....	50
4.3.2	Análisis de datos.....	55
5	Resultados y Discusiones. ....	61
5.1	Resultados de modelo en planta.....	61
5.1.1	Coeficientes hidráulicos. ....	61
5.1.2	Velocidades. ....	68
5.2	Resultados del modelo sección transversal. ....	74
5.2.1	Funcionamiento hidráulico. ....	74
5.2.2	Respuesta morfológica.....	88
6	Capítulo. Conclusiones. ....	98
6.1	Futuras líneas de investigación .....	99
7	Bibliografía. ....	101

Figura 1 Perfil dinámico de la playa (imagen adaptada de Monroy,2013), pg. 25).	17
Figura 2. Vista en planta de una playa. (imagen obtenida de IINGEN,2011. (Pág. 37)).	18
Figura 3. Regímenes de erosión en una tormenta según Salleger.	22
Figura 4. Perfil de un sistema interdunar.	22
Figura 5. Ejemplo de relleno de playa (imagen obtenida de (Pranzini, Wetzel, & Williams, 2015 .pág.453).	24
Figura 6 Espigones.	25
Figura 7. Seawalls.	25
Figura 8 Drenado de playas.	26
Figura 9 Rompeolas sumergido. $h$ es la profundidad, $d$ = altura del rompeolas, $b$ = el ancho de la corona del rompeolas, $B$ es el ancho de la base del rompeolas, $Fr$ es el francobordo, $NM$ se refiere al Nivel Medio (elaboración propia).	27
Figura 10. Esquema de dique y sistema de diques exentos. (Silva, et al., 2018)	29
Figura 11. Tipos de respuesta de la costa ante la presencia de un dique exento (Silva, et al, 2018).	30
Figura 12. Block de concreto, dimensiones en cm.	32
Figura 13. Geotubos (imagen obtenida de <a href="http://geoygeo.com">http://geoygeo.com</a> )	32
Figura 14. Reef ball, (Imagen obtenida de <a href="http://www.reefball.org">http://www.reefball.org</a> .)	33
Figura 15. Sistema interconectado bloque modular.	33
Figura 16. Elemento para controlar la erosión.	34
Figura 17. Diseño de F. Atkison,	34
Figura 18. Diseño de M. Cambell.	35
Figura 19. WADs.	35
Figura 20. Diseño de arrecife artificial por E. Engler.	36
Figura 21. Geometría de la pieza. a) Vista frontal, b) Vista lateral y c) vista isométrica de la pieza modular (orificios de 20 cm y 40 cm, superior e inferior respectivamente).	43
Figura 22 Dimensiones en cm y diámetros en pulgadas.	43
Figura 23. Dique modular vista en planta.	44
Figura 24. Proceso de colado a) mezcla, b) cimbra, c) cimbra completa, d) piezas coladas.	45
Figura 25.dimensiones del estanque de olas, ubicado dentro del laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería, en la UNAM.	46
Figura 26. Estanque de olas ubicado en el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería, en la UNAM. Se observa el motor con las diferentes poleas que reproducen varios periodos de ola, la pala generadora de olas se observa de color azul	46
Figura 27 Rompeolas sumergido construido con cubos de concreto.	47
Figura 28. Dique modular.	47
Figura 29. Vectrino sonda vertical flexible(fuente: <a href="https://www.nortekgroup.com">https://www.nortekgroup.com</a> )	48
Figura 30. Posición de los vectrinos en el estanque de olas.	49
Figura 31. Canal de Oleaje, permite reproducir oleaje regular e irregular mediante el software HR Wallingford (fuente: Instituto de Ingeniería UNAM).	50
Figura 32. Perfil A Características geométricas.	51
Figura 33. Perfil B. Características geométricas.	51
Figura 34. Dique modular sumergido (sección transversal, a) vista en planta, b) vista isométrica).	52
Figura 35. Perfil A. Ubicación de los sensores de nivel y UVP.	53



Figura 36. Perfil B, Ubicación de los sensores de nivel y UVP.....	53
Figura 37. Transductor UVP (Fuente: <a href="https://www.met-flow.com">https://www.met-flow.com</a> ).....	53
Figura 38. Nivel automático y estatal.....	55
Figura 39. Ejemplo de obtención de niveles de perfil mediante el uso de nivel automático y estatal (Imagen obtenida de Puig, R.(2014), pag.46).....	55
Figura 40. Coeficientes de transmisión obtenidos para un rompeolas construido con cubos, la imagen izquierda representa los coeficientes de transmisión en la sección transversal del rompeolas y la imagen derecha los coeficientes en la sección del morro.....	62
Figura 41. Coeficientes de transmisión obtenidos para un rompeolas construido con piezas modulares, la imagen izquierda representa los coeficientes de transmisión en la sección transversal del rompeolas y la imagen derecha los coeficientes en la sección del morro.....	63
Figura 42. Vista en planta del patrón de difracción para un obstáculo único. Obtenido de (SHARIF AHMADIAN, 2016, pág. 20).....	64
Figura 43. Reflexión provocada por el dique sumergido construido con cubos, se muestra del lado derecho la difracción producida por el obstáculo. ....	65
Figura 44. Transmisión y difracción del oleaje, producido por el dique sumergido construido con cubos. ....	66
Figura 45. Reflexión y difracción provocada por el dique modular sumergido con piezas modulares. ....	67
Figura 46. Oleaje transmitido y difractado por el dique modular sumergido. ....	67
Figura 47. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m, T=0.78s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	68
Figura 48. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m, T=0.62s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	69
Figura 49. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m, T=0.78s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	69
Figura 50. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m, T=0.62s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	70
Figura 51. Velocidades obtenidas con profundidad 0.35m, T=0.78s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	70
Figura 52. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m, T=0.62s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	71
Figura 53. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m, T=0.78s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	71
Figura 54. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m, T=0.62s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	72

Figura 55. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m, T=0.78s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	72
Figura 56. Velocidades obtenidas con profundidad 0.35m, T=0.78s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	73
Figura 57. Velocidades obtenidas con profundidad 0.35m, T=0.62s, P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.....	73
Figura 58. Interacción del oleaje con la estructura en diferentes posiciones del perfil bajo condiciones de Tormenta 1.....	75
Figura 59. Interacción del oleaje con la estructura en diferentes posiciones del perfil bajo condiciones de Tormenta 2.....	76
Figura 60. Interacción del oleaje con la estructura en diferentes posiciones del perfil bajo condiciones de Tormenta 3.....	76
Figura 61. Evolución de alturas de ola, en diferentes zonas del perfil, bajo condiciones de tormenta 1 (H=0.10m, T=0.894s, h=0.45m) con diferentes posiciones de la estructura. ....	77
Figura 62. Evolución de alturas de ola, en diferentes zonas del perfil, bajo condiciones de tormenta 1 (H=0.10m, T=1.118s, h=0.48m) con diferentes posiciones de la estructura ....	77
Figura 63. Evolución de alturas de ola, en diferentes zonas del perfil, bajo condiciones de tormenta 1 (H=0.10m, T=1.118s, h=0.48m) con diferentes posiciones de la estructura ....	78
Figura 64. Espectro incidente (negro) y transmitido (rojo), obtenidos en condiciones de Tormenta a) T1, b) T2, c) T3. ....	79
Figura 65. a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con un peralte de la estructura de 0.30m. ....	80
Figura 66 a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con presencia de la estructura sumergida 0.15m.....	81
Figura 67 a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con presencia de la estructura a NM. ....	82
Figura 68. Espectro en condiciones de tormenta T'3, b) Espectros en condiciones de T'2, c) Espectro den condiciones de T2 obtenidos con estructura de 0.30m de peralte. ....	83
Figura 69. a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con presencia de la estructura sumergida. ....	84
Figura 70. Coeficientes $K_r$ y $K_t$ perfil A. ....	85
Figura 71. Coeficientes $K_r$ y $K_t$ perfil B. ....	86
Figura 72. Hidrodinámica de la estructura con el nivel de la corona a nivel de superficie libre. ....	87
Figura 73. Respuesta de la estructura en condiciones de oleaje de tormenta. ....	87
Figura 74. Comportamiento del perfil A bajo condiciones de tormenta, sin estructura. ....	88
Figura 75. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap H=0.05m, T=1.118s, h=0.45m. ....	89
Figura 76. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap H=0.10m, T=1.118s, h=0.48h, respuesta morfodinámica sin estructura de protección.....	89
Figura 77. Respuesta del perfil A, ante condiciones de tormenta con la estructura a NM. ....	90

Figura 78. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap $H=0.10\text{m}$ , $T=1.118\text{s}$ , $h=0.48\text{m}$ .....	91
Figura 79. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap $H=0.10\text{m}$ , $T=1.118\text{s}$ , $h=0.48\text{m}$ . Respuesta del perfil de playa con presencia de la estructura. ....	91
Figura 80. $H=0.05\text{m}$ $T=1.118\text{s}$ , $h=0.45\text{m}$ .....	92
Figura 81. Perfil A bajo condiciones PES. ....	92
Figura 82. $H=0.10\text{m}$ $T=1.118\text{s}$ , $h=0.48\text{m}$ .....	93
Figura 83. Respuesta del Perfil A, bajo las condiciones de tormenta con una estructura de mayor peralte. ....	94
Figura 84. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap $H=0.10\text{m}$ , $T=1.118\text{s}$ , $h=0.48\text{m}$ . respuesta morfodinámica con estructura de protección con peralte de $0.30\text{m}$ . ....	94
Figura 85. Respuesta del perfil B, ante condiciones de tormenta con la estructura a NM. ....	95
Figura 86. Perfil B bajo condiciones PES. ....	96
Figura 87. Respuesta del Perfil B, bajo las condiciones de tormenta con una estructura de mayor peralte. ....	96

Tabla 1. Semejanza de Froude. ....	42
Tabla 2 Dosificación de materiales para la elaboración de mezcla.....	44
Tabla 3. Configuración de ensayo dentreo del estanque de olas. ....	49
Tabla 4. Configuración del programa experimental Nombre del caso, H altura de Ola, T periodo, h profundidad, duración. ....	54
Tabla 5. Cálculo del volumen de material removido, sin estructura. ....	88
Tabla 6. Volúmenes de acreción y erosión en el perfil A bajo distintas condiciones de tormenta, con presencia de la estructura.....	90
Tabla 7. Volumen de material removido en presencia de oleaje de tormenta, con la estructura sumergida.....	93
Tabla 8. Volúmenes de sedimento removido bajo las condiciones de oleaje de tormenta con estructura de 0.30 m. ....	94
Tabla 9 . Volúmenes de sedimento removido bajo las condiciones de oleaje de tormenta con estructura colocada a Nivel.....	95
Tabla 10. Comparación de volúmenes de erosión y acreción en los ensayos PES. ....	96
Tabla 11. Volúmenes de erosión y acreción en los ensayos PE30N.....	97

## Introducción

El medio costero constituye uno de los ambientes naturales más dinámicos y cambiantes de la superficie terrestre. Este aspecto, unido a la creciente ocupación humana de los litorales para diferentes usos, impulsó el desarrollo de técnicas para la protección de la línea costera (Sánchez, 1994).

En la actualidad, diferentes playas del mundo están siendo afectadas por serios procesos de erosión (Pilkey & Thieler, 1992). Dichos procesos son originados por diferentes causas, entre ellas se cuentan: el incremento del nivel del mar que resulta en mayores áreas de inundación (Donnelly, Cleary, Newby, & Ettinger, 2004), los cambios en intensidad y dirección del oleaje debidos al cambio climático y la construcción de obras de protección para áreas de navegación y de abrigo que modifican el transporte de sedimentos. Existen otros cambios naturales a los que se ven sometidas las costas, por ejemplo, el efecto de huracanes al pasar cerca de tierra y otros fenómenos relacionados con el oleaje enérgico (Barragán & de Andrés, 2015).

Una condición fundamental para el desarrollo costero sostenible en una escala nacional, regional o local es el diagnóstico y la implementación adecuada de estrategias de gestión costera (RIKZ et al., 2004). Disciplinas como ciencias ambientales, ingeniería civil y socio economía han creado grupos interdisciplinarios para encontrar soluciones conjuntas a los problemas y asegurar que las actuaciones en la costa se llevan a cabo en el marco de las mejorar prácticas disponibles.

La ingeniería costera tiene como objetivo resolver conflictos que se plantean en la franja costera a las escalas de tiempo y espacio manejadas por el hombre, con los medio técnicos y económicos que éste posee (Sánchez, 1994). Es decir, se buscan diferentes soluciones para los problemas de erosión costera que a la vez sean amigables con el medio ambiente, que cumplan con una función de estabilizar el perfil de playa, que disipen energía y a su vez puedan funcionar como zonas de refugio para algunos tipos de especies. Para ello se ha recurrido a la construcción de rompeolas sumergidos con función de arrecifes artificiales.

Los rompeolas sumergidos son estructuras de protección que funcionan como un obstáculo disipando energía, algunas veces son contramedida a la erosión de playas cuando la disponibilidad de sedimento es deficiente para reestablecer el perfil en condiciones normales. Estos elementos funcionan reflejando, transmitiendo y disipando energía y producen difracción alrededor de los bordes los cuales favorecen a la formación de hemi-tómbolo o con el tiempo un tómbolo si hay suficiente transporte litoral disponible en la zona.

Existen diferentes elementos para construcción de rompeolas, que a su vez pueden servir como arrecife artificial. Estas piezas tienen en común la característica de trabajar bajo el funcionamiento de fricción, en seguida se mencionan algunos: el rompeolas permeable de Harvey J. Humphery, el sistema interconectado de R. Pey, el diseño de W.Lenson para controlar la erosión, el rompeolas permeable creado por F. Atkinson, el arrecife modular artificial M. Campbell, los Reef balls, WADs, el diseño de Engler con piezas modulares, la pieza hecha por You Ok Yang rompeolas sumergido, Aquareef, Oysterbreak (Monroy, 2013), por mencionar algunos, todos estos elementos tienen la capacidad de disipar energía y funcionar como zonas de refugio, sin embargo en alguno de ellos sus

piezas se conectan por trabazón, por lo que puede presentar problemas en la estabilidad de la estructura ya que las piezas pueden ser removidas fácilmente bajo condiciones de oleaje extremo.

Con el diseño de las piezas anteriormente descritas se buscó la función de utilizarlas como protección a la línea de costa y mejorar las áreas recreativas, como el ancho de la playa, la zona de disipación, área de refugio de especies, entre otras, además que reducen el impacto del oleaje por medio de la rotura (Black & Mead, 2001). Este tipo de soluciones han sido valiosas y viables para ciertas situaciones, sin embargo, la preocupación global por el manejo adecuado de las zonas costeras ha buscado soluciones ecológicas como los arrecifes artificiales (Ng et al., 2015).

Los arrecifes artificiales son adecuados para un hábitat alterado, con el objetivo de obtener beneficios, puesto que, cambian las condiciones físicas y se establezca una abundancia local y la distribución de los peces y otros organismos, mejorando así los recursos para fines pesqueros y creando oportunidades de pesca y buceo (Bohnsack, 1991). Particularmente en Japón y Estados Unidos se construyeron miles de arrecifes artificiales, estos pueden establecerse en diferentes materiales como, escombros de concreto, embarcaciones abandonadas, concreto, fibra de vidrio, etc.

Los arrecifes artificiales favorecen a recrear sitios con ambientes propicios para que diversas especies puedan establecerse, ayuda a restar presión a los arrecifes naturales, protegen el suelo de las prácticas de pesquería por medio de arrastre, al ser estructuras sumergidas ayudan a la protección de la línea de costa de los problemas de erosión. El crear rompeolas sumergidos con todas las ventajas descritas anteriormente, obliga a pensar en una solución para la construcción de este tipo de estructuras, es por ello que este trabajo está enfocado en demostrar que una estructura sumergida puede cumplir con tres funciones:

**Hidráulica:** disipa el oleaje mediante la rotura del mismo, o por fricción la cual se genera cuando el oleaje pasa a través de la estructura, permitiendo así, cierta transmisión de la energía sin que esta sea significativa, dando como resultado una menor altura de oleaje incidente en la costa, ayudando de esta manera a proteger el perfil de playa.

**Morfológica:** al producir difracción en los bordes de la estructura favorece a formación de hemitómbolos, desempeñándose como una trampa de sedimento, lo que se traduce en una regeneración de playas y recuperación de espacios.

**Ecológica:** Al ser una estructura sumergida la cual reduce el impacto del oleaje y produce una rotación en la dirección de las corrientes, propicia también la colonización de organismos primarios, lo cual establece condiciones para generar abundancia y distribución de los peces y otros organismos (Sherrard et al., 2016).

Por lo antes descrito, se observa la necesidad de diseñar estructuras de protección que ayuden a mitigar los problemas que afectan al medio costero. La naturaleza de este trabajo, radica en mostrar que una estructura de baja coronación puede ser capaz de proveer al menos dos soluciones al mismo tiempo. A lo largo del documento se describe la dinámica de la línea de playa, la metodología utilizada para conocer el funcionamiento de la nueva estructura propuesta, así como sus resultados.

# Objetivos

## Objetivo general

Analizar experimentalmente el potencial desempeño hidráulico, morfodinámico y ecológico de un rompeolas sumergido fabricado a base de una pieza modular para determinar la factibilidad de utilizar la obra como arrecife artificial.

## Objetivos particulares

- Evaluar en laboratorio el funcionamiento hidráulico de la sección transversal de la estructura.
- Evaluar la respuesta morfológica de un perfil de playa ante la presencia de una estructura de rompeolas sumergido.
- Revisar la geometría y características de la pieza modular para evaluar indirectamente su desempeño como promotora de hábitat y otros servicios ambientales.
- Diseñar la sección del morro con las características geométricas de las piezas modulares, para asegurar la estabilidad del rompeolas sumergido.

## 1 Protección de playas.

Las playas son la transición entre el ambiente marino y terrestre, que se encuentran directamente bajo la influencia de los procesos hidrodinámicos marinos (Ahrens, 1987). Se pueden definir también como ambientes costeros de baja elevación, formados originalmente por un proceso de sedimentación y frecuentemente asociadas a ecosistemas como dunas o humedales (Silva, *et al.*, 2011).

Uno de los mayores problemas que enfrentan las playas en la actualidad es la erosión, por ello es importante estudiar y comprender su morfodinámica. Así, como los distintos métodos existentes para la protección de la playa.

### 1.1 Morfología de playas.

El estudio de la morfología de playa tiene como objetivo describir la forma que adquieren las playas a lo largo del tiempo, lo que permite su descripción a partir de su forma en perfil y en planta. Se suele describir a la forma del perfil de playa cuando es modificada por fenómenos cuya acción es visible en poco tiempo; mientras que los fenómenos de largo plazo se suelen identificar con la forma en planta.

#### 1.1.1 Forma de perfil de playa.

Se pueden identificar tres secciones dadas por procesos hidrodinámicos que ocurren en un perfil de playa:

**Zona de rompiente:** es la zona en la cual el oleaje proveniente de aguas más profundas, se peralta y finalmente rompe.

**Zona de transición:** comprende entre la zona de rompiente y la zona de *estrán*. En esta zona predomina la turbulencia generada por la rotura de las olas.

**Zona de *estrán*:** es la zona de la playa que se encuentra intermitentemente mojada y seca por el ascenso y descenso del oleaje sobre el perfil.

#### 1.1.2 Características de la zona de rompiente.

A medida que las olas viajan hacia aguas menos profundas, interactúan con la batimetría, generando fricción de fondo. La velocidad de la ola depende de la profundidad, la cual va disminuyendo hacia la costa. Por lo tanto, al estar en aguas someras las olas aumentan su altura y disminuye su longitud, este proceso se conoce como *asomeramiento*. La altura de las olas aumenta acorde se acerca la playa, por tanto, a cierta distancia las olas alcanzan una altura, se vuelven inestables y rompen.

La combinación de *rapid shoaling* y aguas someras crean una zona rompiente (Walker & James, 1974). El oleaje no es influenciado solamente por asomeramiento, también lo es por procesos como la refracción, difracción, reflexión, disipación y otro proceso de transformación de energía no lineal con periodos de oleaje altos y bajos.



Las variaciones en la velocidad a lo largo del frente de onda, debidas al fondo, hacen que el frente se alinee con la batimetría; a este fenómeno se le conoce como refracción.

Las condiciones de rompiente por fondo se presentan cuando las olas incrementan su esbeltez y por diferencia de velocidad, la cresta se precipita sobre la parte baja de la ola.

#### *1.1.2.1 Variaciones del perfil: playa disipativa y reflejante.*

El perfil de playa puede adquirir un sin número de formas, sin embargo, existen dos extremos, el perfil disipativo y el perfil reflejante.

El perfil disipativo es característico de las playas compuestas por sedimentos finos y en las cuales el nivel de consumo de energía de oleaje es elevado. En general, la playa presenta una pendiente muy suave la cual tiene una alta capacidad para disipar el oleaje. Las bermas no se distinguen del frente de playa y tienden a formarse barras longitudinales con crestas no muy marcadas.

El perfil reflejante se presenta en playas compuestas por arenas medias a gruesas, las cuales el nivel de consumo de energía del oleaje es bajo. La berma marca claramente el inicio del frente de playa, y en la playa seca se pueden llegar a observar restos de bermas y escarpes correspondientes a perfiles más retrasados, creados bajo condiciones de oleaje más fuerte.

#### *1.1.2.2 Dinámica del perfil de playa.*

La interacción entre el medio marino y terrestre mantiene influencia directa sobre la forma del perfil de playa, la cual es producto de las diferentes fuerzas que interactúan con el sedimento que compone la playa. Si el oleaje no estuviera presente, las playas mantendrían un perfil ideal correspondiente al ángulo de reposo de la arena. No obstante, en la realidad y bajo la acción del oleaje la playa presenta concavidades hacia arriba y pendientes más suavizadas respecto al ángulo de reposo de la arena.

Durante una tormenta se presenta un estado de mar inestable dentro de la zona de rompiente y el oleaje llega a la playa con diferentes direcciones. Al alcanzar el oleaje la superficie de la playa, una gran cantidad de sedimento puesto en suspensión, removido y arrastrado mar adentro, favorece la generación de barras en aguas relativamente profundas. Conforme estas barras crecen, la zona de rompiente se traslada mar adentro, de manera que las olas rompen cada vez más lejos de la costa, disipando una considerable cantidad de energía antes de llegar a la playa. Esta pérdida de material continúa hasta alcanzar un pseudo-equilibrio. Al finalizar la tormenta, las barras que se formaron mar adentro por el sedimento arrastrado, con el tiempo es regresado a su ubicación original por la acción del oleaje en condiciones de régimen medio, con niveles de energía menores.

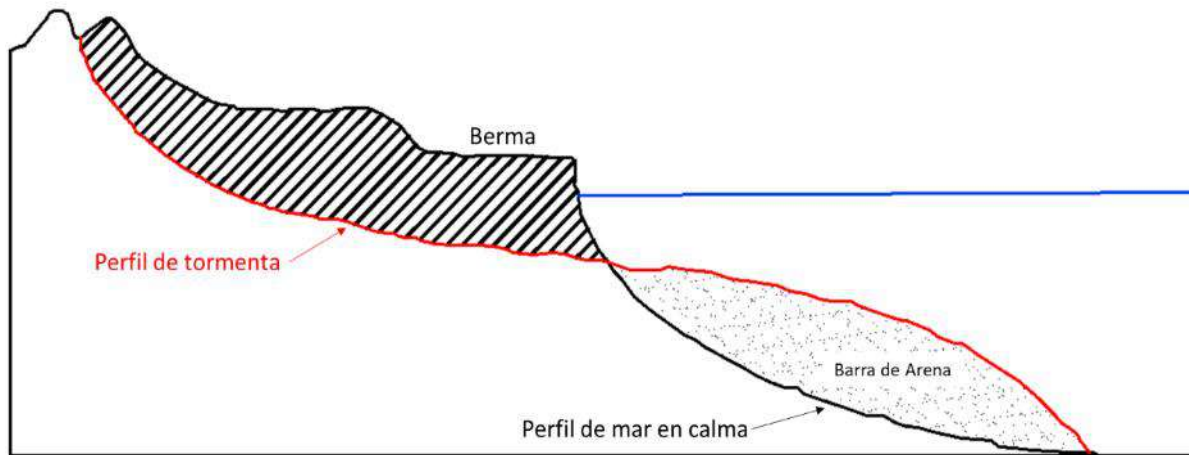


Figura 1 Perfil dinámico de la playa (imagen adaptada de Monroy, 2013), pg. 25).

Cuando la zona de playa seca queda temporalmente lejos del oleaje, la arena se seca por la acción del sol, y es removida, por acción del viento tierra adentro formando dunas o regresa a la playa.

Durante los procesos anteriores intervienen diferentes fuerzas que se conservan en balance y a su vez, mantienen un perfil de playa correspondiente al estado de equilibrio. Dicho estado puede llegar a verse afectado si se alteran las condiciones hidrodinámicas tales como incrementos en el nivel medio del mar, o cambios en la altura y periodo de ola, así como alteraciones en el transporte de sedimentos. Bajo estas circunstancias la playa sufrirá cambios continuos hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio.

### 1.1.3 Forma en planta de las playas.

Una playa puede ser descrita por su forma en planta cuando se pretende observar los cambios que ha sufrido la línea de costa en un periodo de tiempo considerado largo. Por lo tanto, puede tener lugar en diferentes escalas de tiempo y espacio, como se describe a continuación.

- Formas de pequeña escala: estas formas son el resultado de la dinámica en escalas de tiempo de segundos a minutos y escalas de longitud del orden de decímetros a metros.
- Formas de mediana escala: su longitud característica va del orden de las decenas a las centenas de metros y tiempo de evolución entre horas y años.
- Formas de gran escala: son formaciones en planta con escalas que van de los cientos a los miles de metros, y escalas de tiempo con variaciones desde estaciones hasta años.

En la descripción en planta de una playa, destacan procesos que tienden a alinear la línea de costa, esto es la formación de barras en los cambios bruscos de orientación, formación de barras en la entrada de bahías que eventualmente se cerrarán, erosión de salientes y relleno de curvaturas, relleno de sinuosidades formando planicies, y formación de cadenas de islas. Los procesos que tienden a mantenerla irregular son: la formación de salientes, tómbolos y sinuosidades en zona de abrigo de estructuras, bajos o islas (principalmente cuando existen dos direcciones distintas de oleaje); acumulación de material como respuesta a la variación en la dirección de incidencia del oleaje.

El oleaje y la marea son agentes dinámicos que afectan directamente a la playa, cuyo perfil también será dinámico y presentará variaciones en su forma, por ello se puede admitir la existencia de una playa en equilibrio aun cuando su forma presente variaciones en función del clima marítimo existente.



Figura 2. Vista en planta de una playa. (imagen obtenida de IINGEN,2011. (Pág. 37)).

#### 1.1.3.1 Perfil de equilibrio.

El perfil de equilibrio es un concepto dinámico, pues las condiciones del oleaje y marea se encuentran en constante cambio. En este estado existen algunas relaciones conocidas entre la forma del perfil y las condiciones hidrodinámicas:

- Tamaño de sedimento: el sedimento más fino tendrá una mayor movilidad, ya sea en dirección a la playa o mar adentro, mientras que el sedimento más grueso pondrá mayor resistencia a los forzamientos hidrodinámicos, especialmente al oleaje.
- Altura de ola: en zonas donde la altura de las olas es elevada, la playa tendrá una pendiente más suave, pues una altura elevada ejercerá mayor fuerza y esta sólo podrá ser disipada con una pendiente suave para llegar a un estado de equilibrio.
- Periodo de ola: cuando el periodo es elevado, el sedimento tiende a ser transportado hacia la playa, por lo que la línea de costa avanza hacia el mar, generando una pendiente más pronunciada en el perfil de playa. En cambio, con un periodo de ola menor, la pendiente de la playa es más suavizada y la línea de costa tiende a avanzar tierra adentro.
- Nivel de marea: cuando el nivel de marea es elevado, el sedimento puede ser transportado mar adentro con mayor facilidad. Un incremento en el nivel medio del mar necesitará un nuevo perfil de equilibrio para la nueva condición.

#### 1.1.3.2 Planta de equilibrio.

Debido a que la forma en planta está definida a través del transporte longitudinal de sedimento, es necesario establecer dos tipos de equilibrio estático y equilibrio dinámico. Se define la playa en equilibrio estático cuando la forma permanece constante en el tiempo y el transporte litoral es nulo. Para que esto ocurra es necesario que las corrientes longitudinales se anulen.

Este tipo de playas se encuentran frecuentemente en zonas donde la energía incidente del oleaje tiene una dirección bien definida. Dichas playas muestran una orientación perpendicular a la dirección de incidencia produciéndose rotura simultánea del oleaje a lo largo de la playa, lo que implica la formación de una única línea de rotura.

Por otra parte, se describe como equilibrio dinámico, cuando la forma de la playa se mantiene invariable, bajo la presencia de transporte longitudinal de arena, pero sin cambio en el volumen global de arena.

#### 1.1.4 Transporte de sedimentos.

La playa es una zona cuya dinámica está íntimamente ligada a la acumulación de sedimento. El material que compone una playa proviene de diferentes fuentes como pueden ser: descargas fluviales, desintegración de formaciones rocosas, erosión eólica, erosión en los arrecifes de coral o material transportado desde más adentro por efectos del oleaje, corrientes o mareas. Una vez que el sedimento ha sido transportado y depositado, éste no permanece estático, sino que se moverá sobre la playa como respuesta a las condiciones hidrodinámica, bajo las cuales esté sometida.

El transporte del sedimento se da por tres conceptos básicos, que son: incorporación, transporte y deposición (Helene, 2006). Se puede presentar predominantemente en dos direcciones: transporte transversal y transporte longitudinal de sedimentos; y puede ser de tres modos: transporte por fondo, por suspensión o por saltación.

En el transporte longitudinal se observa que, el sedimento se mueve en una dirección que tiende a ser paralela a la línea de costa, bajo la acción del oleaje y corrientes litorales. puede darse en dos direcciones, dependiendo de la dirección del oleaje y la dirección que se adquieran las corrientes. Por convención, un observador mirando hacia el mar considera como transporte positivo si el sedimento se mueve hacia la derecha y como negativo se mueve hacia la izquierda.

Por su parte, el transporte transversal mueve el sedimento en una dirección que tiende a ser perpendicular a la línea de costa. La arena se mueve con dirección hacia el mar por efecto del oleaje de tormenta, la arena transportada en grandes volúmenes se deposita mar adentro, formando barras de arena fuera de la zona litoral, generando así cambios en la línea de costa durante la tormenta.

##### 1.1.4.1 Erosión de playas.

La forma de la playa se mantiene en constante cambio debido al influjo de las condiciones hidrodinámicas presentes en la zona. Existen temporadas en las que la playa parece perder volumen de arena, sin embargo, bajo condiciones normales es capaz de regenerarse por sí sola siendo un ciclo que se presenta a lo largo del tiempo.

A pesar de existir ese equilibrio, puede llegar a verse afectado por factores externos que pueden ocasionar daños a la playa. Algunos cambios son consecuencia de procesos naturales, como los cambios en el nivel medio del mar, o por la intervención del hombre.

Debido a la explosión del turismo existe un aumento sostenido en las construcciones dentro de la zona de playa. La mala planeación de estas edificaciones podría interrumpir el transporte transversal de sedimento. Así mismo, la expansión de las zonas urbanas hacia la costa favorece la construcción de estructuras para la creación de zonas de abrigo para embarcaciones; igualmente una mala planeación de estas estructuras podría favorecer la acumulación de sedimento en lagunas costeras, impidiendo que éste regrese hacia la playa. Otras acciones que alteran el equilibrio de una playa es la construcción de represas aguas arriba que impidan el transporte de sedimento en los ríos, extracción de arena, contaminación del agua que extermine posibles fuentes de sedimento orgánico, entre otros.

Es de vital importancia evitar problemas de erosión causados por la intervención del hombre, a través de una planeación y regulación integral de las construcciones realizadas en las zonas costeras.

## 1.2 Perfil de equilibrio en condiciones de tormenta.

A medida que el oleaje cambia, el perfil de playa evoluciona a través de diferentes estados de equilibrio, pues existen variaciones de condiciones hidrodinámicas hacia un régimen extremo, por ende, la morfología de la playa evoluciona a través de diferentes estados de equilibrio que se presentan de manera sucesiva; por ello, el proceso puede considerarse cuasi-estático, apareciendo entonces las llamadas barras submarinas, que no son más que elevaciones del fondo que se forman a determinada distancia de la costa. Las barras submarinas se describen a partir de modelos dinámicos que simulan los cambios de estado a partir de unas condiciones iniciales dadas.

Se han realizado trabajos para describir el proceso de formación de las barras. Lehmann, 1884 señaló la acción que tiene la ola rompiente produce la suspensión de la arena y encontró que los cambios en el perfil podían ocurrir de manera rápida, refiriéndose al movimiento de la barra hacia el mar. Por su parte, Hartnack (1924) mencionó la importancia de la rompiente de las olas en el proceso de formación de barras y puntualizó que la distancia entre crestas y su profundidad correspondiente, incrementa con la distancia a la costa para múltiples barras. Waters (1939) a su vez, realizó los primeros trabajos para medir la respuesta del perfil de playa ante la acción del oleaje y clasificó los perfiles como de tipo ordinario o de tormenta.

(Dean, 1973) enfatizó el fenómeno de turbulencia causado por la rotura del oleaje, la cual provoca que el sedimento se ponga en suspensión y puedan ser transportados por las corrientes. Los cambios en el perfil son altamente estocásticos a microescala, pues implican el movimiento colectivo e individual de los granos de arena y varios tipos de fluidos organizados. Si se analiza desde la perspectiva macroescala los cambios en el perfil son asombrosamente regulares y consistentes con respecto a características macroscópicas tales como barras y bermas.

Se determinó que existen varios criterios para determinar si un perfil se encuentra en estado acumulativo (berma) o erosivo (barra), algunos parámetros son el paso del oleaje ( $H/L$ ), la velocidad de caída de la arena ( $H_0/\omega T$ ). Estos parámetros adimensionales tienen distintos sentidos físicos. El peralte del oleaje es una medida de la asimetría del oleaje lo cual influye en la dirección del fluido en la columna de agua. La velocidad de caída adimensional constituye una medida del tiempo que un grano de arena permanece suspendido en la columna de agua. La relación más aceptada de estos parámetros es la propuesta por (Larson, Kraus, & Sunamura, 1988) según el cual si  $H_0/L_0$

$<0.0007(H_0/\omega T)^3$  el perfil es de barras si por el contrario  $H_0/L_0 >0.0007(H_0/\omega T)^3$  entonces es de berma.

La formación de un perfil con barras o berma se encuentra estrechamente relacionada con la dirección del transporte perpendicular a la costa, por lo cual para distinguir si un perfil es de barra o de berma se emplean los mismos criterios que para determinar las direcciones de transporte.

Varios investigadores como Kajima et al. 1983; Shimizu et al. 1985; (Van Hijum, 1977); Watanabe et al. 1981, determinaron la distribución de las tasas de transporte perpendicular a la costa, por medio de la integración de la ecuación de conservación de masa entre perfiles consecutivos en el tiempo. Los cambios en el perfil de playa pueden calcularse a partir de la distribución del transporte perpendicular a la costa y la ecuación de conservación de la masa de arena a partir de

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial q(x)}{\partial x}$$

La tasa de transporte de sedimentos perpendicular a la costa  $q(x)$  puede calcularse entonces por medio de la integración de la ecuación de masa entre dos mediciones consecutivas del perfil de playa con la siguiente expresión

$$q(x) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{x_0}^x (Y_2 - Y_1) dx$$

donde

$t_1, t_2$  tiempo en que se midieron los perfiles

$x_0$  es la distancia a la costa donde  $q=0$

$Y_1, Y_2$  profundidad en las mediciones 1 y 2 del perfil

Se desarrollaron diferentes fórmulas para predecir las tasas de transporte de arena perpendicular a la costa, considerando la velocidad local del fluido, otras en función de la disipación local de energía por unidad de volumen.

### 1.3 Interacción del oleaje con el sistema playa – duna.

La interacción del oleaje con el sistema playa – duna, modifica la morfología de manera que se genera una adaptación a las condiciones de clima marítimo hasta que se alcanza la forma más eficiente para disipar energía. Este sistema sigue un modelo de proceso – respuesta y evoluciona mediante el intercambio de sedimentos.

El perfil playa- duna, es muy flexible y dinámico; alturas de ola de gran magnitud pueden alcanzar distancias mayores en dirección de tierra, por lo que tienen la capacidad de acarrear material desde zonas altas hacia el mar, el cual se deposita en la playa sumergida formando barras. El perfil originado por este proceso se denomina disipativo, la energía se pierde por rotura y fricción, la zona de transición es amplia, presencia de barras, cusps y bajos, ocurren en playas con materiales medios y finos. En contraste, en el perfil reflejante, la energía es reflejada por una playa de pendiente

pronunciada, no existen formaciones ya que son erosivas, se presentan en playas abiertas con material grueso.

La interacción del oleaje playa – duna se presenta en condiciones de temporal.(Salleger, 2000) describió cuatro regímenes de erosión en una tormenta en el sistema playa – duna, en función del máximo y mínimo run up y de la altura de la duna, son los siguientes:

- régimen *swash* con ascenso máximo en la zona intermareal, se presenta erosión en la playa y en la parte baja de la cara expuesta de la duna
- colapso con *swash* y ascenso máximo en la cara de la duna, se produce un escarpe en la cara de la duna.
- *overwash* en donde la lámina de la ola pasa por la cresta de la duna, la lámina de agua supera la duna y hay transporte de sedimento hacia la costa.
- breaching e inundación, la duna se destruye y se produce inundación.

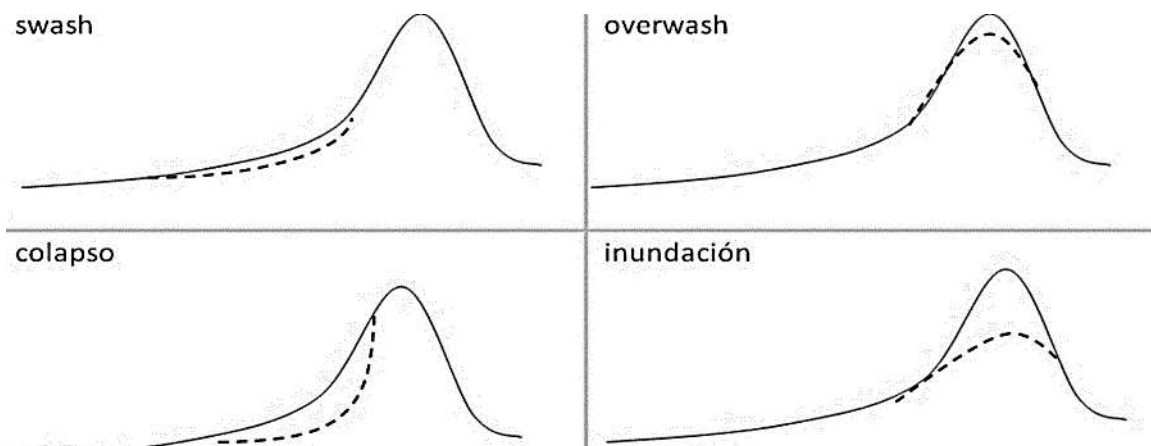


Figura 3. Regímenes de erosión en una tormenta según Salleger.

En cuanto al sistema dunar se pueden desarrollar diferentes tipos de estas, en un sistema según su posición relativa a la costa.



Figura 4. Perfil de un sistema interdunar.

Cada una de ellas se describe de la siguiente manera:

- duna embrionaria: es la más joven y cercana a la línea de costa está situada en una zona más hostil para la vegetación debido a la alta salinidad.
- anteduna: se sitúa inmediatamente detrás de la duna embrionaria. tienen una orientación paralela a la línea de costa.

- depresiones interdunares: se sitúan en las zonas más bajas del sistema de dunas. durante la temporada de mayor precipitación, el manto freático puede emerger a la superficie, formándose entonces lagos interdunarios.
- duna secundaria: se sitúa hacia tierra de la depresión interdunar. están más protegidas del viento y el ambiente contiene menos salinidad.
- duna terciaria: se encuentran por lo general cubiertas de pastizales, arbustos e incluso árboles

Es necesario comprender a detalle la interacción del oleaje con el perfil de playa y las dunas, puesto que son las protecciones naturales que tiene la costa, si se presenta un fenómeno de erosión y se requiere una propuesta ingenieril, se debe considerar dentro del diseño, la interacción de estos, pues son factores que estarán presentes en la recuperación de la playa, además si no se tiene cuidado, pueden resultar aún más dañados de lo que se encuentran, si se opta por una mala práctica.

## 1.4 Métodos tradicionales de protección de playas.

### 1.4.1 Relleno de playas.

El relleno de playas puede ser una solución para la regeneración del perfil, bajo ciertas condiciones. Cuando la arena se remueve de la playa y se coloca en zonas cercanas, al no contar con la capacidad de restaurarse por sí misma a causa de algún obstáculo, puede transportarse por medios artificiales como acarreo y bombeo. El material para relleno es obtenido de la zona costa afuera, la zona intermareal, de lagunas costeras que han sido azolvadas por la acumulación de sedimento o desde paleodunas.

El uso de relleno de playas funciona como protección a la costa contra las tormentas. Al rellenarse una playa, el material removido corresponde al material de relleno, protegiendo así el original de la playa, además éste generalmente no se pierde, sino que se transporta mar adentro formando barras de arena y por acción del oleaje de régimen medio es redistribuido a lo largo de la playa.

Una debilidad importante asociada al diseño de relleno de playas es plantear el proyecto a largo plazo. Durante la planeación y ejecución del relleno la playa continuará erosionándose, ante esta situación el relleno sólo será una forma de volver a un estado anterior de la playa, y la erosión no será detenida, por lo tanto, es necesario saber cuánto tiempo llevará el proceso de restauración.

Para el diseño del relleno es de suma importancia conocer las características físicas del sedimento, con la finalidad de que tenga el mismo comportamiento a la playa original bajo las condiciones hidrodinámicas de la zona. Si no se cuenta con la similitud se corre el riesgo de acelerar el proceso de erosión del relleno y la playa original.





Figura 5. Ejemplo de relleno de playa (imagen obtenida de (Pranzini, Wetzel, & Williams, 2015 .pág.453).

#### 1.4.2 Espigones.

Un espigón es una barrera vertical que se construye perpendicular a la línea de costa o formando un ángulo con la misma. Estas estructuras generan cambios importantes en la dirección de las corrientes litorales, su función principal es prevenir la erosión de la línea de costa en zonas donde existe un transporte longitudinal de sedimentos considerable.

Este tipo de estructura crea una franja de arena corriente arriba (considerando la dirección y sentido de las corrientes longitudinales) al provocar un déficit de material corriente abajo de esta. La tasa de acumulación de material en el espigón corriente arriba corresponde a la tasa de erosión corriente abajo, por lo que estas estructuras deben utilizarse con extremo cuidado. Los espigones no deben exceder cierto tamaño en la altura y longitud para que no impidan la libre circulación de las corrientes longitudinales, lo que altera por completo los procesos de la zona costera.

Para disminuir la erosión asociada a un solo espigón, por lo general se construye una serie de espigones a lo largo de la playa. Su separación está dada de tal forma que parte de la arena acumulada corriente arriba del espigón pueda extenderse y depositarse corriente arriba del siguiente espigón.

El diseño de espigones está basado en los registros referentes al transporte de sedimentos, su uso se recomienda para playas con suficiente transporte longitudinal que aminore la erosión; no son recomendables en zonas donde el rango de marea sea elevado, en playas cortas o donde el transporte neto sea bajo o en playas cuyo perfil sea reflejante (USACE, 2002).



*Figura 6 Espigones.*

#### 1.4.3 Seawalls.

Son estructuras verticales cuyo objetivo es proteger el área de tierra dentro de la playa cuando la erosión de la línea de costa es muy grande. El uso de seawalls no es muy recomendable ya que puede favorecer la erosión de la playa en lugar de prevenirla o detenerla.



*Figura 7. Seawalls.*

#### 1.4.4 Revestimientos.

Los revestimientos son construidos en zonas donde se tiene un interés específico de mantener una línea de costa, evitando así su erosión debida al oleaje. Buscan limitar la reflexión del oleaje que hay en la costa, evitando así dañar playas cercanas.

#### 1.4.5 Drenado de playas.

El drenado de playas radica en la construcción de un sistema de tuberías que permiten disminuir la cantidad de agua atrapada en la arena. Las tuberías destinadas a captar el agua, cuentan con perforaciones que permiten el libre flujo de agua, la cual es conducida por la acción de la fuerza de gravedad hacia el mar.



*Figura 8 Drenado de playas.*

## 2 Rompeolas sumergidos.

El uso de estructuras de protección costera se ha incrementado como consecuencia del aumento del nivel medio del mar, cambio en los patrones sedimentarios y modificaciones en el clima marítimo. Con la conciencia de que la infraestructura ribereña no puede perderse o ser removida, se ha investigado sobre formas en que las estructuras de protección puedan ser construidas para satisfacer los requerimientos ingenieriles, mientras también ofrecen un servicio al ecosistema donde son colocadas (Firth et al., 2014).

Los rompeolas sumergidos son aquellos que se diseñan de forma que parte importante de la energía del oleaje se transmite a través o por encima de ellos y cuya cota de coronación se encuentra por debajo del nivel medio del mar. El mecanismo principal de transmisión de energía a la zona de sombra es el rebase sobre la coronación. Este tipo de estructuras trabaja disipando la energía del oleaje mediante la rotura del mismo o al generar la pérdida de energía por fricción al pasar sobre la corona. Al permitir la transmisión, la reflexión es muy baja, lo que favorece a la protección de organismos que se encuentren cerca de la línea de costa.

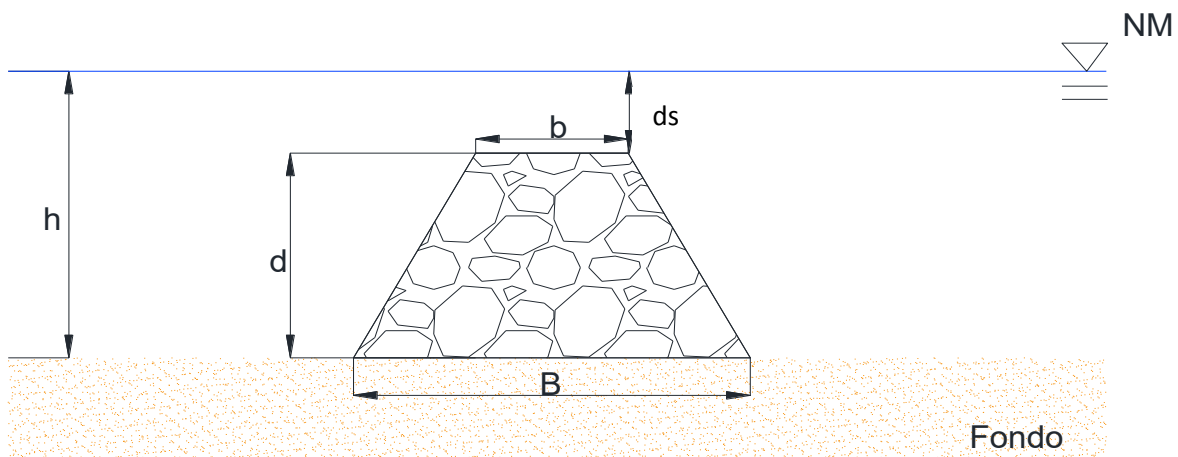


Figura 9 Rompeolas sumergido.  $h$  es la profundidad,  $d$ = altura del rompeolas,  $b$ = el ancho de la corona del rompeolas,  $B$  es el ancho de la base del rompeolas,  $Fr$  es el francobordo,  $NM$  se refiere al Nivel Medio (elaboración propia).

Este tipo de rompeolas cuenta con varias ventajas, una de ellas es no impactar visualmente el sitio donde es construido, permitiendo así, mantener la estética del lugar. Si fuera el caso de algún lugar turístico, donde la conservación del paisaje es importante para los usuarios de las playas, sería una solución muy útil. Además, al ser sumergidos el volumen de material que se requiere para su construcción es mucho menor. Aspecto el cual se ve reflejado directamente en la inversión que se requiere para construirlos.

Actualmente se ha buscado tener soluciones ambientalmente amigables que resuelvan los problemas de erosión de playas y, a la vez, establezcan sitios de abrigo donde se presenten condiciones hidrodinámicas propicias para que ciertos tipos de especies puedan habitar. Los arrecifes artificiales hechos a partir de rompeolas sumergidos cumplen con esas condiciones. (Baine, 2001) encontró el uso global de los rompeolas sumergidos colocados en el sustrato (fondo del mar),

como una herramienta que puede utilizarse deliberadamente, para imitar algunas características de un arrecife natural.

Estas estructuras pueden utilizarse para diferentes propósitos, por ejemplo: evitar la pesca por el método de arrastre, restar presión a los arrecifes naturales, para focalizar zonas de oleaje o como protección costera. Para decidir si una solución permanente es óptima en lugares donde recurrentemente se presentan tormentas intensas, se debe tomar en cuenta las características de oleaje, propiedades de sedimentos, aspectos sociales y económicos.

## 2.1 Hidrodinámica del oleaje con estructura sumergida.

Cuando el oleaje incide en una estructura sumergida, parte de la energía se refleja nuevamente en el mar y parte es transmitida a la zona de estrán (Silva, *et al.*, 2006). La reflexión es una característica importante de las estructuras sumergidas, porque generalmente son estrechas y están construidas con pendientes relativamente pronunciadas (Losada, *et al.*, 1996). Las interferencias entre el oleaje incidente y las ondas reflejadas dan lugar a patrones de ondas estacionarias que afectan el flujo en la estructura y zonas aledañas (Lara, *et al.*, 2006).

A medida que las olas se inciden en el frente de la estructura, se producen efectos no lineales, que resultan en la amplificación de las olas, lo que puede ocasionar rotura tipo *surging* en la playa. La mayor parte de la energía del oleaje se disipa en la cresta de la estructura, provocando la rotura (Gourlay, 1996). Parte de la energía se disipa por fricción del oleaje con la estructura, además de los huecos entre las rocas formados por su colocación, o agujeros artificiales creados para este fin o para crear elementos ecológicamente compatibles. En el caso de las olas que no rompen, la resistencia al flujo en los medios porosos son el principal mecanismo de disipación. Además de la interacción del oleaje con la estructura sumergida se da lugar a varios fenómenos como la difracción, la rotura del oleaje y la generación de corrientes.

### 2.1.1 Corrientes y efectos de la marea.

Las estructuras sumergidas con un pequeño francobordo típicamente inducen a la rotura del oleaje sobre la cresta o sobre su pendiente lo cual produce una nueva generación de patrones de corriente (H. K. Johnson *et al.*, 2005).

En el caso de rompeolas sumergidos o cualquier serie de estructuras que proporcionen refugio, la rotura del oleaje y transmisión, pueden impulsar la circulación de corrientes alrededor de las estructuras y también inducir corrientes de mayor velocidad alrededor de los morros de los rompeolas, donde se genera un esfuerzo considerable sobre la estructura, por lo que se debe poner mayor atención en el diseño de estas secciones.

Aspectos importantes a considerar en el diseño de las estructuras cercanas a la costa, son las variaciones de mareas y aumento del nivel de mar, ya que determinan la profundidad a la cual estará sumergida la estructura. Así como también las fuerzas de la onda de marea y las corrientes superficiales que interactúan con la estructura (Dean, *et al.*, 1997).

### 2.1.2 Cambios morfológicos.

En general se entiende que el oleaje pone el sedimento en suspensión y su transporte es gobernado por las corrientes. Por lo tanto, la colocación de una estructura o alguna barrera no sólo cambiará las corrientes existentes y la zona de rotura, sino que afectará las circulaciones de la sedimentación y las áreas de erosión deposición (Stauble, 2008).

La refracción sobre el sedimento en suspensión refuerza el patrón para la deposición, puesto que el oleaje se difracta alrededor de la estructura acercándose de manera oblicua a la línea de costa, donde rompe y el sedimento es suspendido. Por tanto, siguiendo este comportamiento hidrodinámico, las barras de arena como las salientes, dobles salientes, tómbolos, entre otros, crecen desde la línea de costa, puesto que la difracción los lleva a seguir la línea ya existente.

## 2.2 Efecto de los rompeolas sumergidos en las formas en planta.

Los rompeolas sumergidos son estructuras de protección costera cuyo diseño imita el funcionamiento morfo-hidrodinámico de formaciones naturales como arrecifes, barras o islas próximas a la orilla, que constituyen singularidades dinámicas costeras. Generalmente estas estructuras se construyen de forma rectilínea, sensiblemente paralela a la línea de costas y ubicadas a una cierta distancia de la orilla con el objeto de proteger de la acción del oleaje una determinada zona litoral.

Estas estructuras generan reducción del oleaje en el área protegida, lo que provoca alteraciones en el transporte litoral de sedimentos y genera la sedimentación de materiales, así como su acumulación den dicha zona a resguardo de la estructura. Si la cantidad de material depositado es suficiente, se formará una punta de arena o saliente, de manera que puede desarrollarse hasta alcanzar la obra, ese caso la formación se llamará tómbolo.

Los diques pueden ser construidos aisladamente o formando sistemas de estructuras en serie, dependiendo principalmente de la longitud del tramo de costa sobre el que se pretende actuar. En el caso de tener una zona determinada, de dimensiones relativamente reducidas, se optará por utilizar un único dique, si por el contrario las dimensiones de la costa son extensas se opta por un sistema de diques exentos.

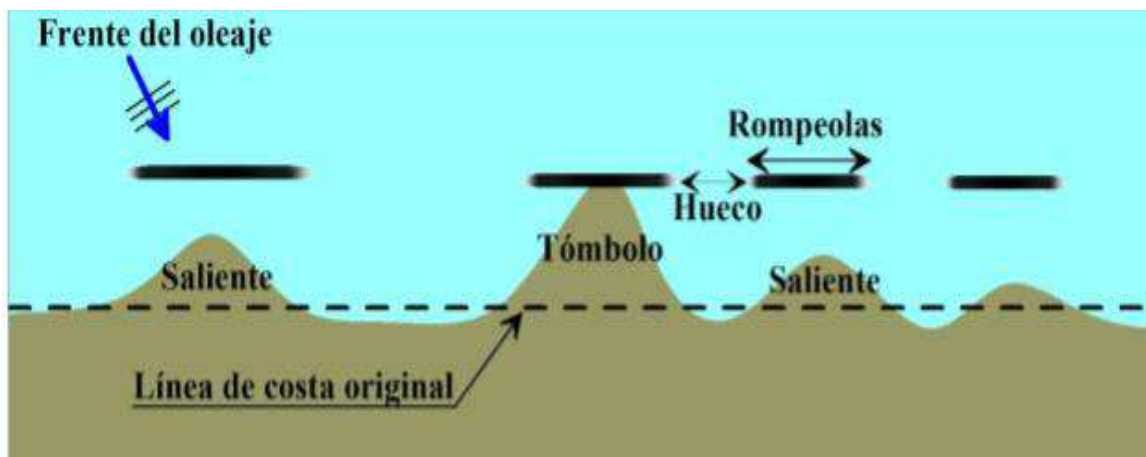


Figura 10. Esquema de dique y sistema de diques exentos. (Silva, et al., 2018)

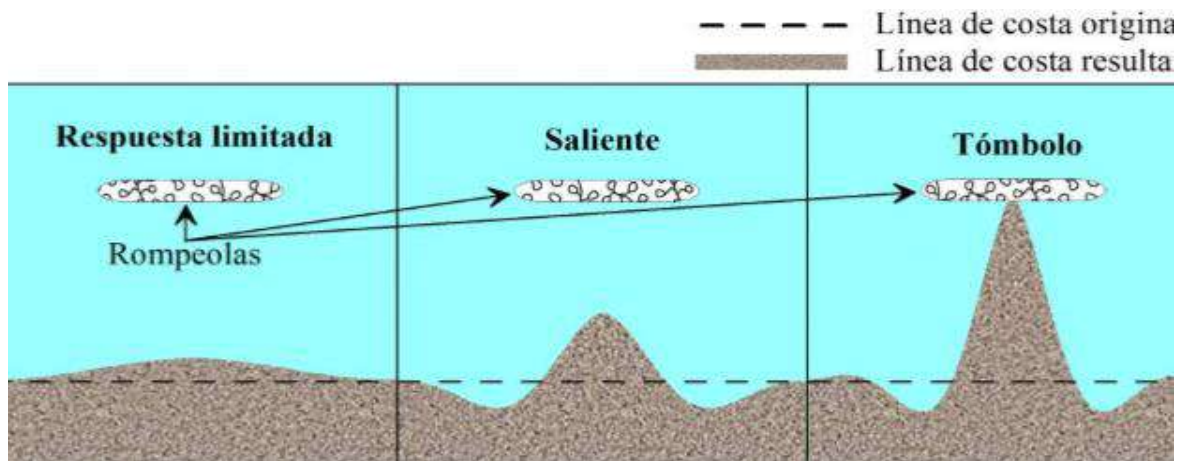


Figura 11. Tipos de respuesta de la costa ante la presencia de un dique exento (Silva, et al, 2018).

El tipo de respuesta depende, básicamente, de la cantidad de energía que penetra en el área protegida. De acuerdo a (Hans Hanson, 1989) estas formas tienen las siguientes características:

- respuesta limitada: si la acumulación máxima es inferior a cuatro metros con respecto a la posición inicial de la línea de orilla
- saliente: si la acumulación máxima es superior a cuatro metros con respecto a la posición inicial de la línea, pero, no alcanza el dique exento, siendo inferior su dimensión a 90% de la distancia existente entre la línea inicial de orilla y el dique exento.
- tómbolo: si el saliente alcanza el dique exento, sobrepasando por tanto la acumulación de material sedimentario 90% de la distancia entre la línea inicial y el dique exento.

Un aspecto importante a destacar es que los rompeolas sumergidos, no siempre inducen cambios morfológicos en el litoral que son acumulativos, sino que la respuesta puede ser también erosiva, en función de la distancia del dique exento a la orilla. Diversos estudios sobre diques sumergidos describen la importancia de la posición relativa del dique con respecto a la zona donde se produce el transporte, pues se determinó que, al encontrarse la estructura dentro de la zona de transformación del oleaje, si aumenta la relación entre la distancia del dique a la costa y el ancho de la zona de transformación, los flujos de agua que pasan sobre la corona y salen hacia el exterior del área protegida por ambos lados de ésta aumentan. Como resultado se obtiene una mayor turbulencia en el interior del área protegida, un mayor transporte de sedimentos hacia el exterior y, por consecuencia, domina la erosión. Por otra parte, el dique se localiza fuera de la zona de transformación del oleaje, al aproximar la estructura a la línea de rompientes gana importancia el efecto de difracción y se produce un incremento de los gradientes de altura de ola, resultando un aumento de las tasas de transporte hacia el interior del área protegida.

Habitualmente, la formación de una saliente es la respuesta más deseable cuando se construye un dique, ya que permite el transporte longitudinal de sedimentos entre la estructura y la orilla, así como la circulación y renovación del agua en el área protegida. Además de ello, las salientes son las formaciones más comunes siempre y cuando los diques exentos estén lo suficientemente alejados de la costa, sean cortos con respecto a la longitud de onda del oleaje incidente y permitan cierta transmisión de energía.

Por lo tanto, Los principales factores que condicionan la eficiencia morfo-dinámica de un dique son:

- climáticos: altura de ola,  $h$ ; período del oleaje,  $t$ ; dirección de propagación del oleaje,  $\theta$ ; y sobreelevación del nivel del mar (marea astronómica más marea de tormenta).
- geométricos: distancia del dique exento a la línea inicial de orilla,  $x$ ; longitud del dique exento,  $b$ ; franco bordo,  $d_b$ ; ancho de coronación del dique,  $g$ ; profundidad de desplante,  $h$ ; orientación del dique exento con respecto a la costa,  $\theta_s$ ; permeabilidad de la estructura,  $p$ ; separación entre extremos de los diques exentos,  $\delta g$ .
- material sedimentario: transportes potencial y real de sedimentos en el tramo, pendiente media de la playa, diámetro nominal medio del sedimento, peso específico del material sedimentario.

El estudio de la influencia de los factores geométricos en los cambios morfológicos que experimenta la costa tras la construcción de un dique es fundamental, ya que éstos son los únicos parámetros susceptibles de ser controlados por los ingenieros, y de los que depende el modo y grado de afección al oleaje incidente, la cantidad de energía en el área protegida y, en definitiva, el tipo de respuesta dada por la costa.

### 2.3 Tipos de rompeolas sumergidos.

Hasta el día de hoy se conocen distintos tipos de rompeolas sumergidos, lo cuales se han ido implementando de manera global. El diseño del rompeolas es muy flexible, puesto que puede ser construido para cada necesidad específica. Algunos tienen como objetivo proteger la playa de la erosión, en algunos sitios los toman como solución, puesto que no arruinan la estética de la playa. En otros casos son utilizados para que actúen como ayuda para restaurar sistemas coralinos, como ya se ha mencionado anteriormente algunas de las ventajas de estas estructuras son su bajo costo y que son amigables al medio ambiente. El diseño de estos es diferente, debido a que los parámetros de oleaje y las condiciones de la playa son diferentes para cada sitio. Se han propuesto diferentes tipologías de rompeolas sumergidos, en seguida se describen algunos diseños.

#### *Block de concreto perforado.*

Este elemento se propuso con la finalidad que disminuir el impacto del oleaje sobre el talud expuesto de la estructura, además al considerar los orificios se tendrá un menor volumen de material y podría ser utilizado como refugio para la biota marina. Una de las ventajas que se obtuvieron fue la reducción de la reflexión, así como la reducción de las alturas de ola.



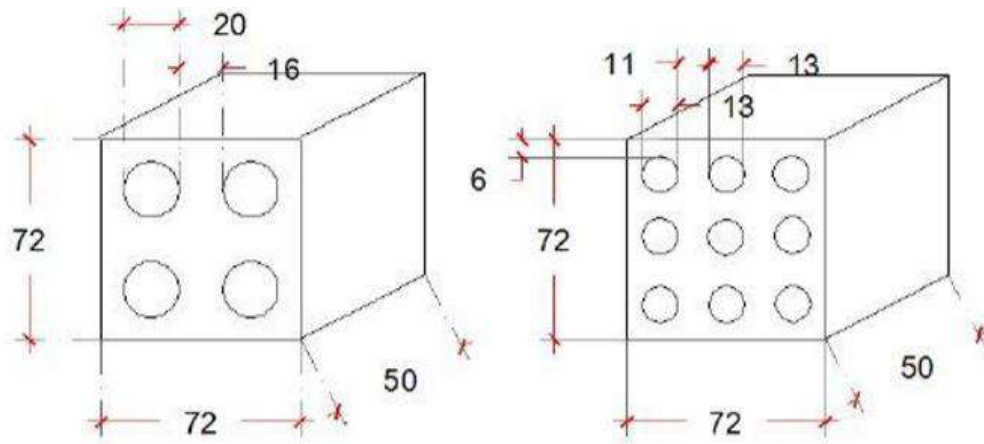


Figura 12. Block de concreto, dimensiones en cm.

### Geotubos.

Son contenedores de suelo encapsulado, los cuales son utilizados para reemplazar la roca como material convencional en estructuras de ingeniería hidráulica. Los Geotubos son estables hidráulica y geotécnicamente ya que son unidades pesadas y de gran tamaño, con una relación ancho a alto mayor y tienen además un área de contacto entre unidades mayor. Estas han mostrado ser soluciones competitivas de corto plazo en la ingeniería marítima, porque permite el uso de materiales finos y cercanos al sitio de la obra (arena, material del sitio o dragado) y por ello pueden ser utilizados como elementos de construcción de estructuras marinas. Son usados como la generación de núcleos de dunas de arena, humedales y otros hábitats, además en escolleras, estructuras submarinas, para ganar terreno al mar. Tienen ventajas como su fácil instalación, ayuda a prevenir el transporte de sedimentos, reducido impacto ambiental, son resistentes a las variaciones de marea y su diseño es muy flexible, ya que se diseñan de acuerdo a las necesidades específicas del sitio.



Figura 13. Geotubos (imagen obtenida de <http://geoygeo.com>)

### Reef balls™

Son unidades artificiales con forma esférica con huecos, su diseño es para promover el crecimiento biológico y restauración de arrecifes de coral, el cual a su vez funciona como estructuras de protección a la costa. Estos son construidos con Ph alrededor de 8.3, para asemejarse al mar. Esto permite que se puedan mezclarse con el ambiente marino para reducir potencialmente impactos y disturbios en el desarrollo, para los ecosistemas existentes (Reef Beach).



Figura 14. Reef ball, (Imagen obtenida de <http://www.reefball.org>.)

### Sistema interconectado R.Pey 1977

Son piezas cuya geometría es triangular o circular, esta provista de extensiones en los extremos con la finalidad de poder ser enlazadas entre ellas y con ello, obtener una altura de estructura tan alta como se requiera, además las mismas extensiones provee trabazón entre ellas.

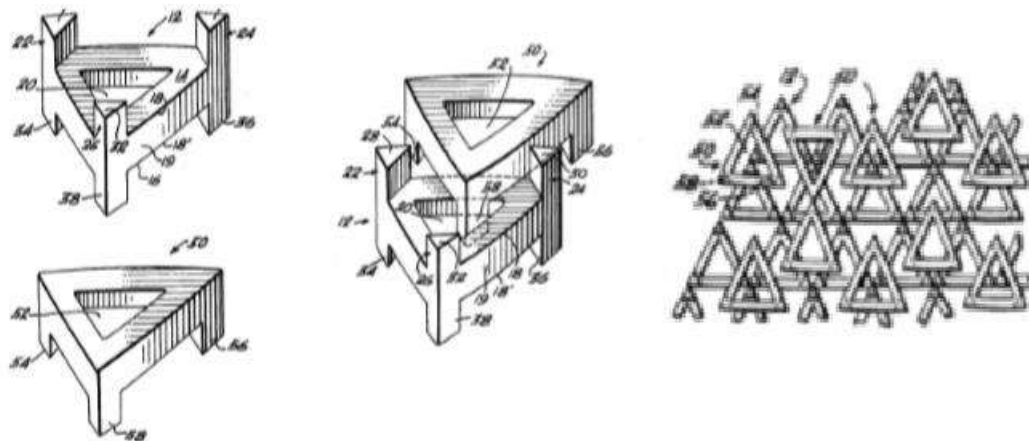
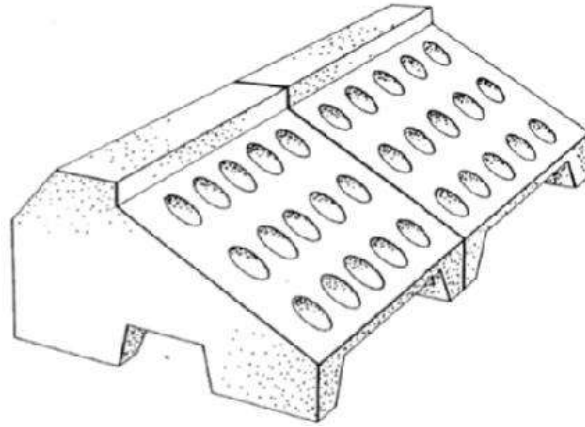


Figura 15. Sistema interconectado bloque modular.

*Elemento para controlar la erosión. W Lenson (1990).*

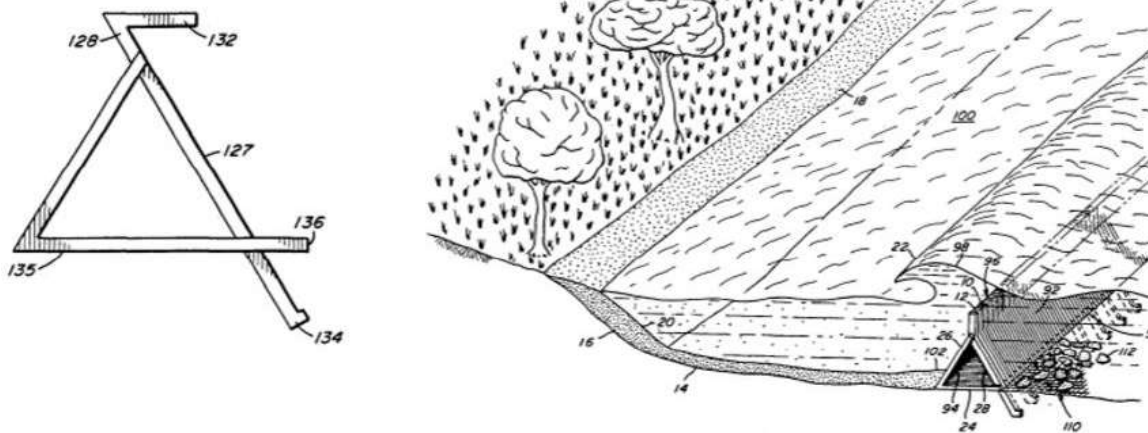
Este es un rompeolas con características modulares, el cual crea una especie de muro, cuenta con orificios que permiten la transmisión del oleaje y a su vez reducen el peso de la estructura. Su colocación se realiza por medio de las 4 esquinas inferiores las cuales quedan fijas en el terreno. Su forma es trapezoidal, la pendiente de la cara expuesta forma un ángulo de  $30^\circ$  con respecto a la horizontal, su acomodo es lateral y tiene una altura predeterminada, ya que su diseño no permite apilar las piezas.



*Figura 16. Elemento para controlar la erosión.*

*Rompeolas permeable por F. Atkinson 1991.*

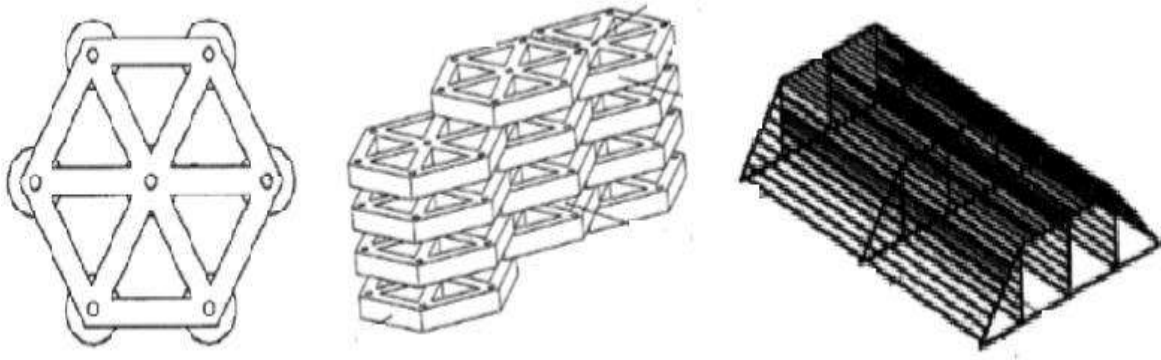
Esta estructura se conforma por piezas triangulares sujetas por sus tres ejes, uno de ellos cuenta con una longitud mayor, con la finalidad de que sea anclado, al colocar varias piezas de forma un rompeolas permeable, el oleaje se disipa al rebasar la estructura, este tipo de diseño puede ser tan largo como se requiera, sin embargo, su peralte es limitado por la altura de la pieza, pues estas al igual que el caso anterior, no pueden ser apiladas.



*Figura 17. Diseño de F. Atkinson,*

*Arrecife modular artificial M. Campbell 2011.*

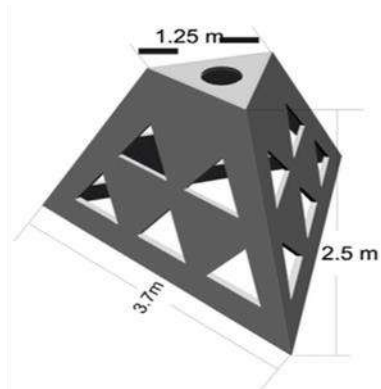
Es un bloque modular en forma de hexágono con huecos que permite la población de fauna marina y ayuda a disipar el oleaje, debido a su geometría es capaz de crear estructuras a talud por ejemplo y puede cargar varias capas de piezas hasta obtener el peralte necesario



*Figura 18. Diseño de M. Cambell.*

*WADs*

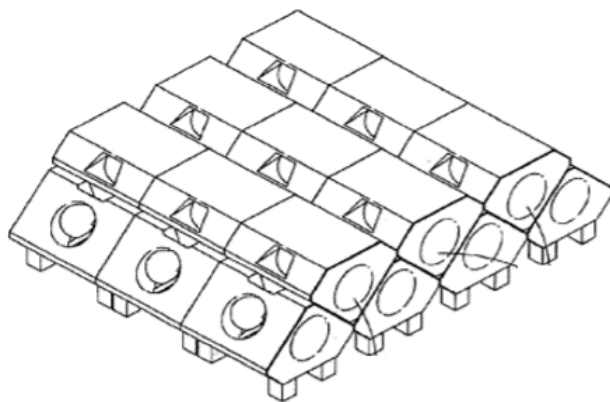
Son piezas con forma piramidal, se pueden encontrar dos formas en planta puede ser en paralelepípedo o triangular, cuenta con cavidades para permitir la transmisión del oleaje y la intrusión de diversas especies marinas. En el diseño de estas piezas debe tomarse en cuenta diversos factores, ya que en condiciones de tormenta su efectividad se reduce considerablemente. Su estabilidad, la socavación y las corrientes deben considerados en su diseño. Ocasionalmente ocurre deslizamiento en algunas piezas debido al oleaje intenso y efectos de las corrientes, en algunos casos las piezas pueden golpearse entre ellas, lo cual eventualmente podría producir la ruptura de estas.



*Figura 19. WADs.*

*Arrecife modular artificial. E. Engler (2005)*

Este diseño se basa en la forma de un pentágono, con el objetivo de funcionar como arrecife artificial, cuenta con un hueco circular al centro, pueden ser colocadas a manera que su altura no se ve limitada. Las piezas que conforman la base de la estructura tienen apoyos que dan sujeción a la estructura.



*Figura 20. Diseño de arrecife artificial por E. Engler.*

*Rompeolas sumergido. You Ok Yang (2011).*

El diseño de este rompeolas se basa en piezas cúbicas, son huecas y tienen perforaciones circulares que favorecen la transmisión del oleaje son colocadas a volteo, por lo que funcionan por medio de trabazón, puesto que en cada una de sus esquinas tiene dos salientes.

## 2.4 Ejemplos mundiales de restauración de playas por medio de rompeolas sumergidos.

Los geotubos se convirtieron en una solución de ingeniería costera. El Este de la costa de India, se ve afectada constantemente por tormentas intensas, las de mayor impacto fue Thane en 2011, Nilam 2012, Madi en 2013, y Hud Hud en 2014. El instituto nacional de oceanografía tecnológica (NIOT), propuso la construcción de un rompeolas sumergido a cuatro metros de profundidad, en Kadalur Pariyakuppam (KPK). Los investigadores, creen que la costa se encuentra con grandes daños y la acreción en las temporadas de calma no son suficientes para restaurar la playa.

Por otra parte, en el Norte de las costas de Yucatán, México, sufren de erosión, el problema se intensificó gradualmente desde hace 15 años. Los cambios en la dinámica del litoral, en su mayoría son generados por actividades humanas, se ha producido regresión de la línea de costa, además de ello la zona es afectada continuamente por huracanes que se forman en el Golfo de México. El riesgo por daños debido a condiciones extremas de oleaje es severo. Debido a estas ocurrencias se propuso el diseño de un rompeolas de baja coronación con geotubos. El objetivo fue reducir la energía del oleaje incidente, regulando el proceso de rotura. El proyecto se monitoreó por 18 meses, en los cuales se evaluó la eficiencia desde las perspectivas de la respuesta de los procesos costeros y los materiales del geotubos. Mostró un buen funcionamiento paralelo a la costa, la turbulencia

generada induce a la acumulación, sin interrumpir el proceso litoral de sedimento de manera longitudinal

En la actualidad la costa Este de Corea, sufre de erosión debido a varios procesos dinámicos, como la energía del ataque de las olas, las mareas periódicas y las corrientes que se originan por el efecto de los vientos estacionales. La corriente cálida de Corea del Este (EKWC) y la corriente fría de Corea del Norte (NKCC) son la causa dominante que afecta los patrones de circulación de las aguas superiores en la cuenca de Ullung. Cuando las alturas significantes rebasan los cuatro metros, los procesos de la línea de costa son representados durante la temporada de invierno, sin embargo, la erosión permanece aún en temporada de primavera, así la línea de costa tiene mayor energía y alturas más altas, además de las corrientes y las tormentas que siguen azotando la playa. Se colocaron cuatro geotubos sumergidos separados, se instalaron en varios lugares a lo largo del área de la playa de Young-Jin. El tamaño de un solo tubo de geotextil es de 50 m de largo y 1,8 m de alto. La observación muestra que las algas marinas han colonizado la superficie del tubo y la arena se ha acumulado en su superficie superior. Una vez que se completaron los trabajos de instalación, se monitorearon los cambios en la costa y la profundidad del agua cerca de la costa durante un período de 12 meses.

En cuanto a reef ball, se construyó un rompeolas sumergido en el Suroeste de Seven Mile, Islas Caimán, con el objetivo de estabilizar la línea de costa y mejorar la flora y fauna del sitio. Esta playa se dañó severamente debido a la erosión, el cual fue causado por el transporte longitudinal del sedimento. Esta solución fue necesaria para proteger el hotel Marriott Beach Resort, ya que, la playa retrocedió aproximadamente 30.5 m desde 1997 a 2002. En el 2002 se colocaron cinco filas de reef ball a 49 m de distancia con respecto a la costa. Se colocaron además dos arrecifes uno de 43.9 m de largo y 7.62 m de alto y otro de 29.26 m de largo y 9.14m de alto. Con una sumergencia de 0.10 y 0.55 m respectivamente.

Entre noviembre del 2002 a febrero de 2003, sufrió un incremento promedio de 14.5 m, se observó que la playa. Después de la temporada de huracanes y tormentas tropicales en 2003, se observó que la playa alcanzaba un ancho de 5.8 m, mientras que playas adyacentes, disminuyeron su frente. Tres meses después de haber terminado el proyecto de los rompeolas creció significativamente la diversidad de especies marinas, lo que ayudó a la restauración del ambiente en el sitio del hotel.

Por otra parte, los WADs han sido utilizados para solventar el problema de erosión en Puerto Morelos, pues la principal actividad económica es el turismo, y la playa es un servicio muy importante en este ámbito. Después del huracán Dean, la costa de Puerto Morelos quedó seriamente dañada, siendo incapaz de regenerar su perfil de playa, puesto que las construcciones no permitieron la reposición de sedimentos, ya que están construidos sobre la duna. Por lo tanto, se pensó en una solución, la cual ayudara a estabilizar la línea de costa y además fuera amigable con el medio ambiente. Así que se propuso construir un rompeolas sumergido con WADs. Después de haber construido la estructura la playa se volvió a mostrar estable, pues a pesar de tener cambios estacionales, en los que de mayo a octubre se presentaba un crecimiento, el resto del año había erosión, pero siempre con un área de playa lo suficientemente amplia para seguir con las actividades de turismo, además ayudó a promover las bases para la colonización de coral y se instalaron diferentes especies como *Gorgonia flabellum*, *Palythoa caribaeorum* y *Diploria labyrinthiformis*.

## 3 Arrecifes artificiales como solución basado en ecosistemas.

### 3.1 Beneficios de los arrecifes artificiales.

La construcción de arrecifes artificiales genera grandes beneficios en el mundo, no sólo en términos económicos sino también ecológicos. A continuación, se describen algunos beneficios importantes.

#### 3.1.1 Generación de espacios para nueva vida.

Cada arrecife es capaz de sostener una determinada cantidad de vida según su tamaño y las condiciones de su ambiente, a medida que se erosionan los arrecifes disminuye su capacidad de sustentar vida, afectando directamente a la pesca y recursos marinos que se pueden explorar. La construcción de arrecifes artificiales genera un nuevo espacio de vida y refugio para cierta cantidad de flora y fauna. La colonización de estos depende de la profundidad y del medio en el que se coloquen, por lo general son colonizados por algunos tipos de algas, corales, anemonas y algunas especies de peces (Pérez del Toro, 2011).

#### 3.1.2 Disminución de la pesca ilegal con redes de arrastre.

La pesca de arrastre es una de las principales causas de degradación de la biodiversidad submarina y sus hábitats. El uso de estas redes provoca la erosión de suelos submarinos y ecosistemas que lo habitan, además de realizar una pesca no selectiva, lo cual implica que muchas especies sean descartadas y por lo tanto desaprovechas (Fernández- Muerza, 2010).

La pesca de arrastre destruye todo tipo de vida por donde pasa. Una vez que los recursos de cierta zona se terminan, las pesquerías se mueven a otra zona, lo que afecta a las pesquerías ribereñas y regionales que utilizan técnicas sustentables de pesca. Los arrecifes artificiales impiden este tipo de pesca, debido a que las redes quedan atoradas en los arrecifes.

#### 3.1.3 Absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

La pérdida de arrecifes tiene un impacto significativo en el ambiente, ya que son considerados como uno de los principales sumideros de CO<sub>2</sub>, lo cual ayuda a tratar el calentamiento global y los efectos nocivos del cambio climático (Bird y Molinelli, 2001). Debido al cambio climático global se incrementaron los eventos de blanqueamiento coralino y con ello la mortandad de corales. Entre estos efectos, la acidificación de los océanos se ha convertido en una amenaza para su supervivencia. La habilidad de los arrecifes de recuperarse de eventos anormales de calentamiento, tormentas tropicales y otras perturbaciones fuertes se afectó por los impactos antropogénicos. Por tanto, en los arrecifes artificiales se busca una solución para coadyuvar a los arrecifes naturales en la intervención del ciclo del carbono.

Un arrecife natural puede llamarse saludable cuando es capaz de recuperarse rápidamente (entre 5 a 10 años). Tienen la capacidad de resiliencia, puesto que regresan a un estado similar al original, antes de que ocurriera un disturbio. Los arrecifes que se encuentran perturbados por actividades humanas ya no son resilientes (Edwards & Gómez, 2007).

#### 3.1.4 Disminución de presión sobre arrecifes naturales.

Un factor destructivo para los arrecifes naturales es la sobre explotación. Esto sucede cuando un gran número de pescadores o buzos utilizan un solo arrecife para obtener sus recursos. En este caso los arrecifes artificiales presentan un sitio alternativo de buceo además de otros recursos, por lo que se disminuye la presión sobre un solo arrecife, lo que permite a su vez la regeneración de vida en los arrecifes naturales y otorga descanso a los ecosistemas sobre explotados (Pérez del Toro Rivera, 2001).

### 3.2 Uso de los ecosistemas como parte del manejo integral de la zona costera.

Dentro del manejo integral de la zona costera es necesario contar con una visión general y clara de las partes y propiedades que la componen, es decir realizar una descripción completa de la zona. Derivado de esa descripción es necesario determinar características particulares, aquellas que la distinguen claramente de otras áreas, realizando así su caracterización. Por consiguiente, al tener descrita y caracterizada la zona en cuestión, será posible distinguir claramente las problemáticas a las cuales se enfrenta y determinar de manera adecuada las estrategias y alternativas de regulación de actividades y obras.

Espejel & Bermúdez (2009), proponen una metodología en la cual, se realice en el proceso de clasificación y regionalización de la costa, desde el punto de vista geográfico, de tal forma que el espacio se clasifique utilizando atributos geomorfológicos, hidrodinámicos y ecológicos. Dentro de la caracterización ecológica se encuentran diferentes ecosistemas como: manglares y pastos marinos, humedales, dunas, lagunas costeras, macro algas y arrecifes, todos son de suma importancia debido a que presentan una serie de servicios de gran valor económico y ecológico. Bajo esta clasificación ecológica se describen los arrecifes:

Los arrecifes de coral son ambientes costeros de mayor riqueza biológica y tienen gran influencia en la reproducción y protección de fauna marina muy importante (Sarukhán et al., 2009). Por su parte los ambientes de fondo rocoso, también son substrato donde se desarrollan comunidades de arrecife de roca (Castañeda *et al*, 2007). Los arrecifes coralinos son formaciones particularmente biodiversas que se desarrollan en la parte marina de las regiones costeras. Se encuentran en un amplio rango de condiciones hidrodinámicas en términos de oleaje, aunque no se encuentran en zonas con rangos mareales grandes o altos niveles de turbidez.

Los arrecifes de coral son organismos cuyo esqueleto consiste en acumulación de carbonato de calcio en forma de aragonito, lo que les ha permitido convertirse en los principales constructores de estructuras de arrecifes en el trópico. Los corales tienen muchas funciones en el manejo del proceso de erosión, pero la más importante es la disipación de la energía y la producción de sedimentos (Gracia, et. al., 2018).

Tomando en cuenta las consideraciones del manejo integral costero, el cual se basa en el adecuado aprovechamiento de los recursos y en estrategias de preservación, los arrecifes artificiales pueden formar parte de las soluciones de prevención o recuperación de playas. Enfocado a tener una estructura amigable con el ecosistema, se diseñó un dique modular sumergido. Éste cuenta en su geometría con una cierta rugosidad y porosidad, la profundidad a la cual está colocada la estructura y la dirección de la propagación del oleaje, son características similares que comparte con los



arrecifes de coral, los cuales son puntos clave en el proceso de la disipación de la energía. Es por ello que, al aplicar un ecosistema basado en el aprovechamiento, es necesario entender aspectos particulares de la relación entre servicios de protección de costa de algunos ecosistemas, así como variables críticas que determinan la efectividad en el manejo de la erosión costera.

## 4 Representación en pequeña escala de los fenómenos físicos de oleaje.

Los modelos físicos pueden definirse como la representación de un problema dado, al utilizar instrumentos de medición y generadores de fenómenos a escala. Con el resultado de las mediciones obtenidas se logra alcanzar efectos similares con relación a lo que pasaría con el prototipo real, además de poder comprender la funcionalidad, estabilidad y economía de los fenómenos asociados (Dalrymple, 1984).

En este capítulo se describirán el fundamento de los modelos físicos, las características geométricas de las piezas, su elaboración, y la construcción de los rompeolas sumergidos con cubos y las piezas modulares, dentro del estanque de olas. Se describe además los instrumentos de medición utilizados en los ensayos.

En el apartado siguiente, se describen los ensayos de la sección transversal del dique homogéneo, en el canal de oleaje.

### 4.1 Fundamento del modelo físico en pequeña escala.

Para proceder a desarrollar las pruebas tanto en planta como de la sección transversal del dique sumergido es necesario comprender el fundamento de los modelos físicos, pues es de esencial importancia obtener las escalas correctas.

La teoría de los modelos físicos se basa en que, a partir de las magnitudes fundamentales, longitud (L), tiempo (t) y masa (M), las restantes que intervienen en la mecánica de fluidos quedan predeterminadas (magnitudes derivadas) y en que en este sistema (L-t-M) las ecuaciones hidrodinámicas del fluido son adimensionales y por lo tanto se mantienen invariantes frente a una transformación del tipo:

$$L_p = \lambda L_m ; \quad t_p = \lambda^2 t_m ; \quad M_p = \lambda^3 M_m \quad [m : \text{modelo}, p : \text{prototipo}]$$

De esta manera, si al conocer el comportamiento en el modelo (sistema  $L_m-t_m-M_m$ ) de un determinado fenómeno, teóricamente es posible deducir el de dicho fenómeno en el prototipo (sistema  $L_p-t_p-M_p$ ), sin más que utilizar para cada magnitud el cambio de escala según valores de los parámetros  $\lambda$ ,  $\lambda^2$  y  $\lambda^3$  adoptados en la transformación anterior. En dicha transformación cada ecuación representa lo que en teoría de modelos físicos se conoce como “semejanzas modelo – prototipo”. La primera de ella es la “semejanza geométrica”, la segunda la “semejanza cinemática” y la tercera la “dinámica”.

La semejanza geométrica determina que la relación de dimensiones homólogas modelo -prototipo es constante, denominándose a dicha relación escala. En esta semejanza sólo influyen aspectos de forma, destacándose los detalles geométricos y la rugosidad superficial, los cuales representan una primera dificultad para que la semejanza modelo -prototipo sea completa.

La semejanza cinemática implica la similitud de movimientos modelo-prototipo, lo que junto a la semejanza geométrica determina que las trayectorias de partículas homólogas modelo – prototipo sean semejantes. En este caso, la relación de semejanza se conoce como escala de tiempos.

La semejanza dinámica entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente semejantes supone la constancia de la relación de masas y por lo tanto, de fuerzas en elementos homólogos. La relación entre masas es la escala de masas.

Como se ha indicado, las ecuaciones de la hidrodinámica permanecen invariantes en la transformación modelo prototipo, pero no ocurre lo mismo con el fluido, que no se puede reproducir a escala. Sus características físicas (densidad, viscosidad, etc.), a efectos del modelo, cambian respecto a las que tienen en el prototipo de acuerdo con las escalas elegidas ( $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ).

Anteriormente, ya se indicó la imposibilidad de lograr una semejanza geométrica completa por la dificultad de reproducir plenamente forma y rugosidad. Con la semejanza dinámica este problema aumenta, pues la relación entre las fuerzas que actúan en el prototipo (gravedad, viscosidad, tensión superficial, elásticas y de presión) y en el modelo no se mantienen constante, ni su importancia en ambos sistemas es la misma.

Sin embargo, en la práctica, una semejanza dinámica parcial, basada en las fuerzas predominantes en cada caso es suficiente para que el modelo facilite la solución del problema que con el ensayo se busca, surgen así los diversos criterios de semejanza dinámica parcial o simplemente de semejanza parcial existentes. En esta semejanza parcial dos de sus escalas, tiempo y masa, quedan prefijadas al determinar la fuerza preponderante en el fenómeno y el fluido a utilizar, por lo que la única escala a elegir es la geométrica. Ello se realiza de forma que el modelo tenga las dimensiones necesarias para que los ensayos sean representativos de la realidad, habida en cuenta, entre otros factores, del tamaño del prototipo, del espacio disponible de las presentaciones de los equipos.

Ya elegida la escala geométrica y la semejanza parcial, al utilizar el análisis dimensional, puede determinarse las otras dos escalas de tiempo y masa, así como sus magnitudes derivadas. Las semejanzas parciales, según lo indicado, se establecen analizando cuál es la fuerza dominante en el fenómeno a estudiar, a fin de su reproducción fidedigna en el modelo. Ello determina en el resto de fuerzas desviaciones con el prototipo, aparecen así los “efectos escala”, que deben ser analizados en cada caso para asegurar la validez de los resultados. Para ello conviene que la escala sea la mayor posible.

En la mayoría de los ensayos hidráulicos las fuerzas de tensión superficial o elásticas son pequeñas, por lo que pueden obviarse sin errores significativos. En cambio, predominan las de gravedad y viscosidad, en especial las primeras, por ello la semejanza que adopta esta fuerza como principal semejanza de Froude, es la de mayor aplicación en la hidráulica, mostrándose en la siguiente tabla las escalas de tiempo y masa y de las magnitudes derivadas en función de la escala geométrica.

Tabla 1. Semejanza de Froude.

MAGNITUD	DIMENSIÓN	CRITERIO DE SEMEJANZA
Tiempo	T	T <sup>1/2</sup>
Masa	M	M <sup>3</sup>
Velocidad	LT <sup>-1</sup>	LT <sup>1/2</sup>
Velocidad angular	T <sup>-1</sup>	T <sup>1/2</sup>
Aceleración	LT <sup>-2</sup>	LT <sup>-2</sup>
Caudal	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>	(LT) <sup>5/2</sup>
Fuerza	MLT <sup>-2</sup>	MLT <sup>3</sup>
Presión	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>

## 4.2 Pruebas en planta del modelo de rompeolas modular.

En ingeniería de costas los modelos físicos ayudan a tener un diseño óptimo de las obras de protección, tomando en cuenta el diseño hidrodinámico y mecánico de las estructuras. En este trabajo se realizó la comparación de un rompeolas sumergido construido con cubos y dique modular para obtener los coeficientes de reflexión y transmisión de las estructuras, los ensayos se realizaron en el estanque de olas ubicado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El rompeolas objeto de esta tesis se fabricó con piezas modulares prefabricadas que corresponden a una modificación de las estudiadas por Monroy, 2013. Esta pieza modular consiste en (Figura 21): en una parte frontal presenta una inclinación de  $45^\circ$  respecto a la horizontal, para posteriormente dar paso a una superficie plana sobre la cual se encuentra un trapecio con ángulos de  $45^\circ$  respecto a la horizontal. En los costados cuenta con dos salientes las cuales sirven como guía para los elementos que se coloquen a los lados y como apoyo para las unidades de las capas superiores. Se colocaron cinco orificios, tres en la parte inferior de 0.40m de diámetro y dos en la parte superior de 0.20m de diámetro, los cuales ayudarán a tener una mayor disipación y se pretende que funjan como refugio para las especies que inicien la colonización del arrecife artificial.

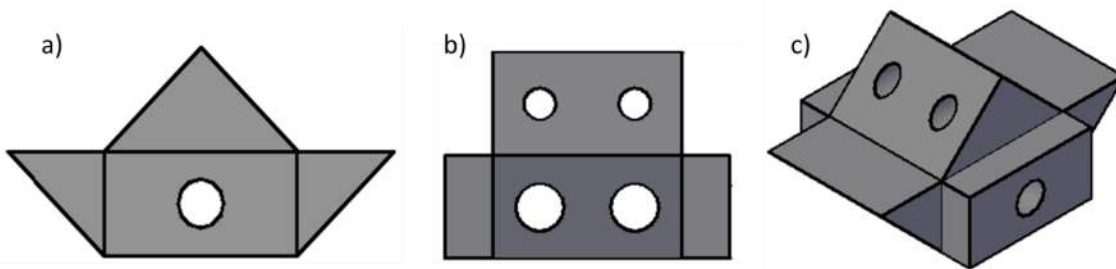


Figura 21. Geometría de la pieza. a) Vista frontal, b) Vista lateral y c) vista isométrica de la pieza modular (orificios de 20 cm y 40 cm, superior e inferior respectivamente).

Una vez obtenida la geometría y dimensiones del prototipo, se seleccionó la escala 1:20, considerando las dimensiones del estanque de olas, así como el canal de oleaje donde se realizó la modelación física de la estructura. Por tanto, las dimensiones en pequeña escala son las siguientes (Figura 22):

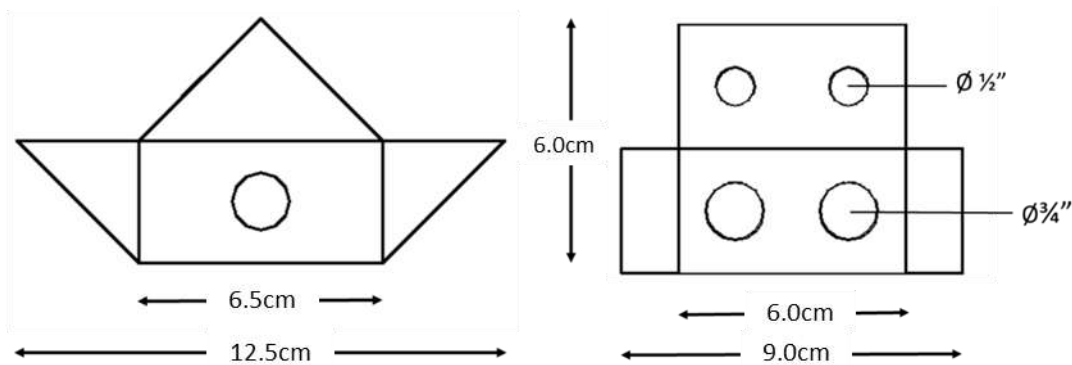


Figura 22 Dimensiones en cm y diámetros en pulgadas.

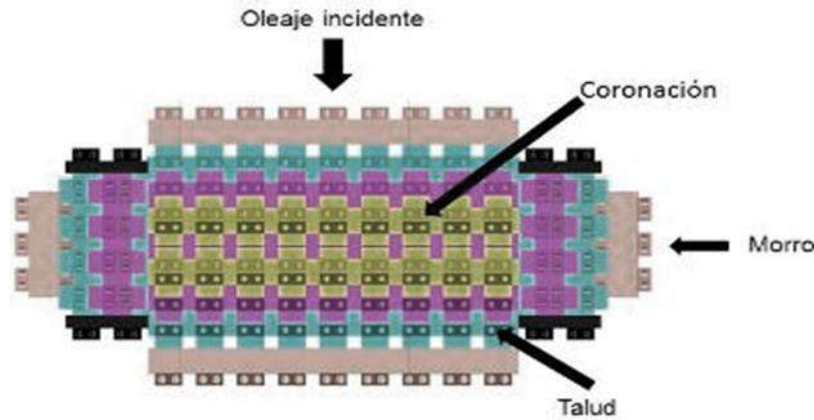


Figura 23. Dique modular vista en planta.

Las piezas fueron fabricadas dentro del laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con mezcla de concreto. Se utilizaron diferentes materiales para obtener la resistencia y el peso de las piezas a escala (Tabla 1). Esto, conforme a la dosificación para concretos de alta resistencia propuesta en los manuales de CEMEX.

Tabla 2 Dosificación de materiales para la elaboración de mezcla.

MATERIAL	VOLUMEN PARA 15 PZAS.
CEMENTO	1.266 kg
AGUA	0.570 kg
ARENA	2.436 kg
FIBRA	0.020 kg
LIMADURA DE HIERRO	2.400 kg

Por otra parte, la cimbra se fabricó de madera. Se optó por este material debido a su resistencia a la deformación, ya que fue necesario su reutilización numerosas veces hasta obtener el número total de piezas. Al contar con 15 cimbras se procedió a fabricar las piezas.

Se mezclaron los materiales (Tabla 2) de manera homogénea para obtener el concreto, seguido de ello se procedió a colocar el concreto en la cimbra, se golpearon los moldes con la finalidad de sacar el aire del concreto y obtener un colado íntegro. Las piezas se dejaron fraguar cinco días, el quinto día se sacaron del molde y se colocaron en agua tres días para curar el concreto.



Figura 24. Proceso de colado a) mezcla, b) cimbra, c) cimbra completa, d) piezas coladas.

Se procedió con la construcción del rompeolas sumergido, para realizar los ensayos en el estanque de olas ubicado dentro del laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería, el cual tiene las siguientes medidas: 12.32m de largo, 5.00m de ancho y 0.95m de profundidad. Cuenta un sistema de generación de oleaje el cual está constituido por un motor, un sistema de poleas y una paleta tipo bisagra (*flap*), esta paleta cuenta con una distancia de empuje regulable a través de un brazo mecánico.

Se construyó una playa de grava, como disipador pasivo, con pendiente 1:3 y ancho de 1.50 m. El motor se localiza al final del estanque en un espacio de 0.85m de ancho, en este espacio igualmente se colocaron rocas para absorber energía (Figura 25).

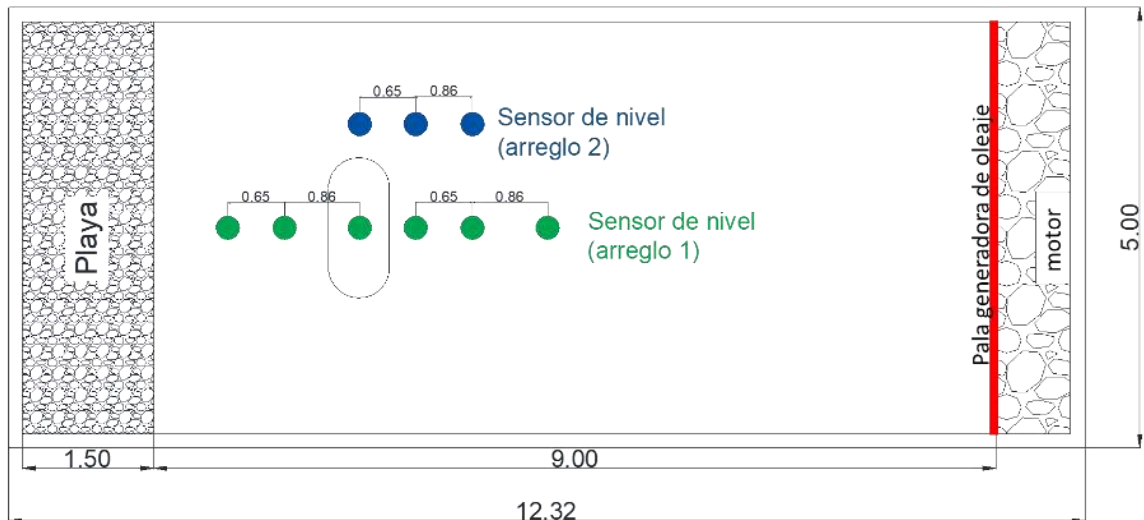


Figura 25. dimensiones del estanque de olas, ubicado dentro del laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería, en la UNAM.

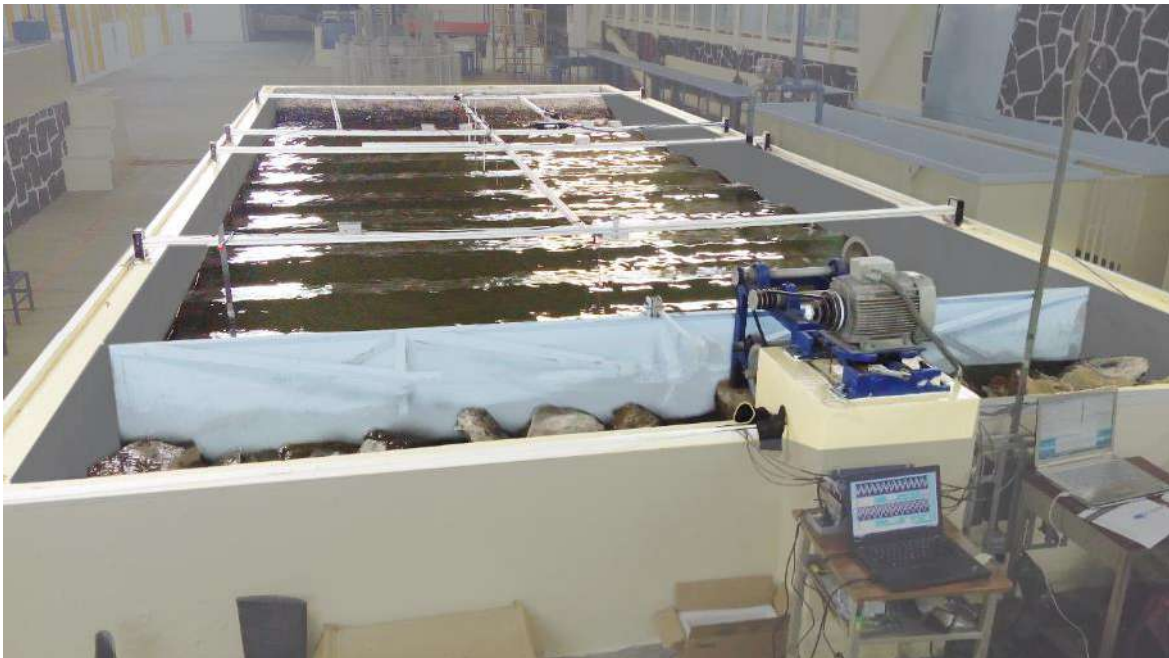


Figura 26. Estanque de olas ubicado en el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería, en la UNAM. Se observa el motor con las diferentes poleas que reproducen varios periodos de ola, la pala generadora de olas se observa de color azul

#### 4.2.1.1 Construcción de rompeolas sumergidos con cubos y con piezas modulares.

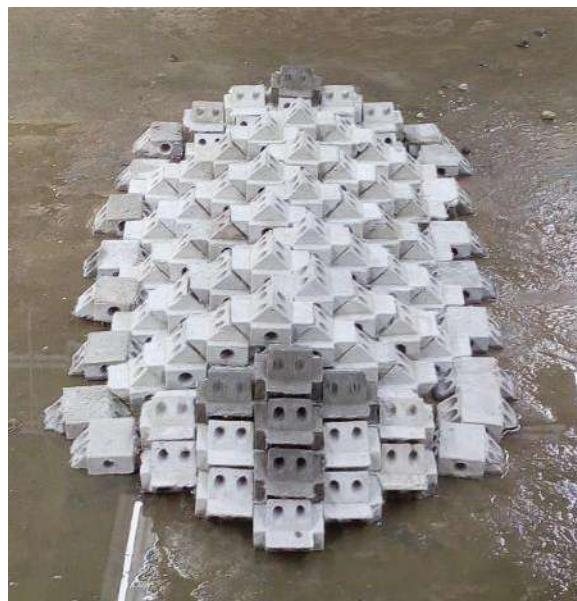
Se construyó un rompeolas sumergido con cubos de concreto los cuales miden 0.03 m por lado. La longitud del rompeolas es de 1.60 m y ancho de 0.70 m. Las piezas fueron colocadas a volteo (Figura 27). La posición del rompeolas fue dibujada en el fondo del estanque, para seguir la geometría al momento de construirlo y mantener las distancias propuestas con respecto a la línea de la playa. El dique se colocó al centro del estanque en el eje Y, con una separación de 2 m con respecto al final

del talud de la playa. Se colocó en ese sitio con la finalidad de que el oleaje tuviera la distancia necesaria para lograr desarrollarse y tener el oleaje regular esperado.



*Figura 27 Rompeolas sumergido construido con cubos de concreto.*

Para la construcción del rompeolas sumergido con piezas modulares, se tomaron las mismas consideraciones mencionadas para el rompeolas sumergido con cubos. Se colocaron las piezas de manera manual sobreponiendo una con otra, para crear tres capas. La longitud de la estructura fue de 1.60 m y 0.70 m de ancho, con los respectivos morros y las piezas (Figura 28).



*Figura 28. Dique modular.*



#### 4.2.1.2 Instrumentación.

Se utilizaron ocho sensores para medir la superficie libre, con el fin de obtener los parámetros de reflexión y transmisión de las estructuras. Los sensores tienen una precisión de 1mm y rango de 0.60m, pueden medir de manera simultánea hasta una frecuencia de 200 Hz (Mendoza et al., 2014). Se buscó que la posición de los sensores cumpliera con las siguientes restricciones:

- las separaciones entre sensores no deberán ser múltiplos o submúltiplos de la longitud de onda;
- que se cumpliera la relación de Mansard & Funke (1980)  $\frac{\pi}{10k} \leq \Delta x \leq \frac{9\pi}{10k}$

donde  $\pi$  representa el número pi,  $k$  es igual al número de onda y  $\Delta x$  es la distancia que se debe cumplir entre cada uno de los sensores.

Se colocaron tres medidores de velocidad por efecto Doppler “vectrinos”, los cuales son instrumentos para la medición de velocidades 3D a pequeña escala.



Figura 29. Vectrino sonda vertical flexible(fuente: <https://www.nortekgroup.com>).

Se colocaron dos arreglos de sondas para registrar la velocidad “vectrinos”, el primero (P1) se colocó frente a la estructura a 6.64 m a partir de la pala generadora de oleaje, el segundo vectrino (P2) se colocó a 0.65m de P1 y el tercero (P3) en la parte posterior de la estructura esto es a 1.31 m de P1.

En el segundo arreglo se mantuvieron las mismas distancias entre los vectrinos sólo cambió su posición hacia el costado izquierdo de la estructura a 0.30 m del eje exterior del morro. Estas posiciones fueron elegidas con la finalidad de obtener los perfiles de velocidad antes y después de la sección transversal del rompeolas sumergido; así como las velocidades generadas a partir de la difracción en la zona del morro.

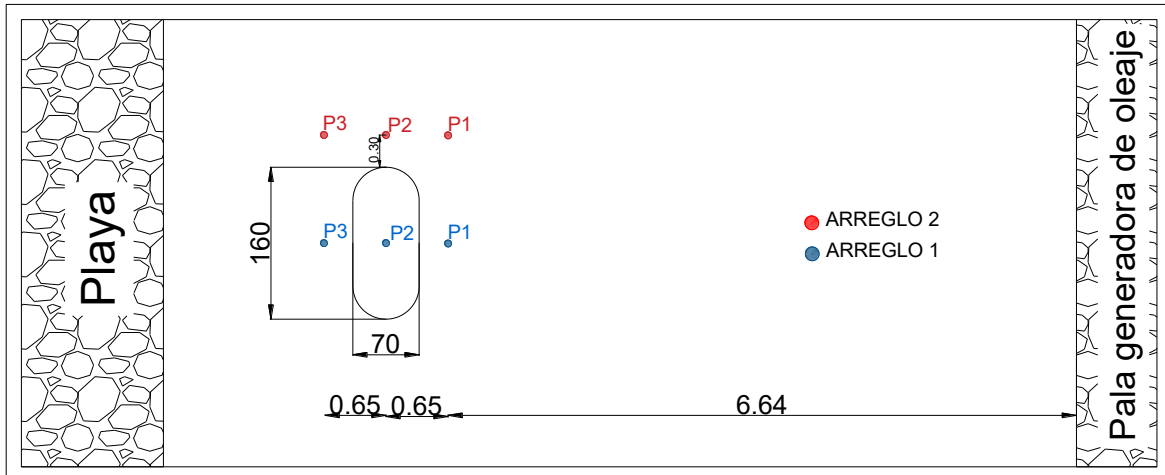


Figura 30. Posición de los vectrinos en el estanque de olas.

#### 4.2.1.3 Ensayos.

Se realizaron 192 pruebas dentro del estanque de olas para ambas estructuras, se probaron cuatro alturas de ola, con dos periodos, los vectrinos fueron colocadas en diferentes posiciones en Z para obtener el perfil de velocidades en la columna de agua, por lo que las pruebas fueron repetitivas para cada una de las posiciones del vectorino. La siguiente tabla muestra todas las combinaciones utilizadas para cada posición de la estructura. En la profundidad de 0.17 m, el nivel de la corona coincide con el nivel de superficie libre (ENM), en la profundidad 0.27 m la corona de la estructura quedó 0.10 m por debajo de la superficie libre (ES1), mientras que en la profundidad 0.35 m quedó sumergida 0.17 m (ES2).

Tabla 3. Configuración de ensayo dentro del estanque de olas.

Posición de la estructura	Profundidad (h) (m)	Altura de ola (m)	Periodo (T) (s)	Posición de Vectrino (Z)
E NM	0.17	0.02	0.78	0.03
		0.03		0.06
		0.07		0.09
		0.09		0.12
ES1	0.27	0.02	0.62	0.05
		0.03		0.10
		0.07		0.15
		0.09		0.20

		0.02		
		0.03		0.07
ES2	0.35	0.07	0.78	0.14
		0.09	0.62	0.21

---

### 4.3 Pruebas de la sección transversal del rompeolas modular.

Los ensayos de la sección transversal del rompeolas modular sumergido se realizaron dentro del canal de oleaje de laboratorio del grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Las dimensiones del canal de oleaje son: 37 m de largo, 0.80 m de ancho y 1.20 m de profundidad. El canal se llena por medio de tres bombas conectadas en paralelo, hasta un nivel máximo de 0.80 m.

La generación del oleaje se realizó por medio del software *HR Wallingford*. El sistema consiste en una placa montada sobre un pistón que tiene un recorrido máximo de 0.80 m, a este sistema se le conoce como pala generadora. Esta pala se encuentra sujeta a una viga especial que cuenta con cuatro soportes, los cuales reposan sobre el suelo sin tocar el canal y está conectada directamente con el motor eléctrico del sistema de movimiento de la pala, cuenta con un engranaje sencillo y de bajo mantenimiento. La pala generadora es operada mediante un software proporcionado por el fabricante llamado *HR WaveMaker*, esta aplicación permite reproducir el oleaje regular introduciendo parámetros tales como frecuencia (Hz) y altura de ola (m), o bien, permite reproducir el oleaje irregular a través de un archivo de datos con el espectro deseado.



Figura 31. Canal de Oleaje, permite reproducir oleaje regular e irregular mediante el software *HR Wallingford* (fuente: Instituto de Ingeniería UNAM).

Para los ensayos se construyeron dentro del canal de oleaje dos perfiles de playa con diferente geometría. Longitudinalmente el canal se dividió en dos secciones con la finalidad de medir la respuesta de playa simultáneamente en ambos perfiles (A y B). En seguida se describe cada uno de ellos.

El perfil A tiene una duna con altura de 0.21 m con una anchura en la base de 0.77 m, la pendiente en la cara expuesta es de  $26^\circ$  y la cara protegida de  $32^\circ$ . La berma es horizontal, tiene una longitud de 0.35 m, desde ahí la pendiente media de la playa es de  $8^\circ$  hasta los 6.00 m (Figura 32).

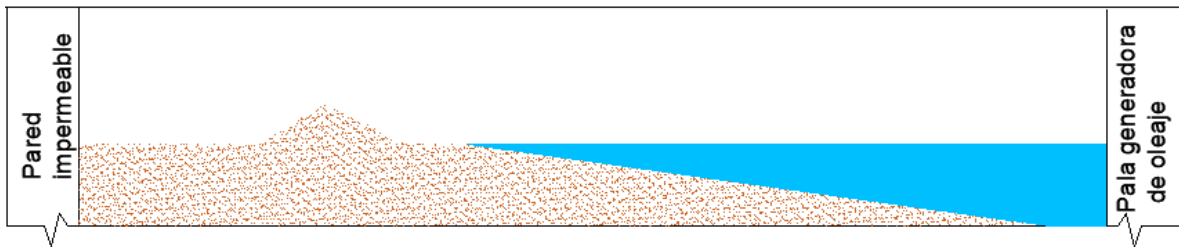


Figura 32. Perfil A Características geométricas.

El perfil B se compone por una duna de 0.20 m de alto, 1.23 m de ancho de base,  $9^\circ$  en la pendiente de la cara expuesta de la duna y  $20^\circ$  en la cara protegida, la pendiente de la playa es de  $5^\circ$ , desde el pie de la duna hasta los 6.00 m (Figura 33).

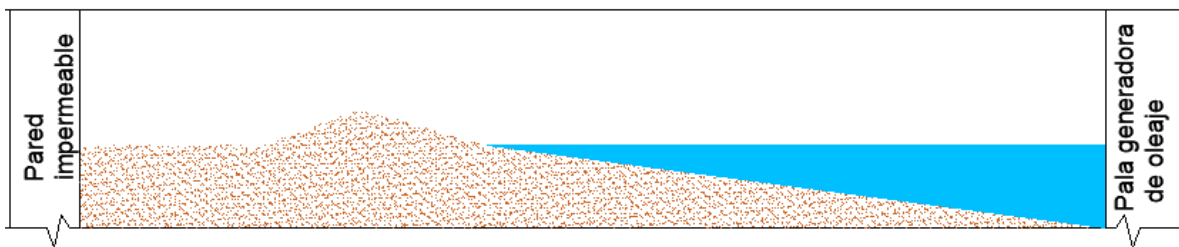


Figura 33. Perfil B. Características geométricas.

Ambos perfiles se construyeron con arena Dn50 de 0.142 mm, con porcentaje de finos de 6.035 y un coeficiente de uniformidad de 1.422.

Al terminar la construcción de los perfiles de playa. Se colocó la sección transversal de la estructura con cada una de las piezas fabricadas. Se pusieron las piezas manualmente sobre el perfil de playa, se ubicó en tres posiciones diferentes según el ensayo que se fuera a realizar. Al término de cada prueba, la estructura se retiró y construyó nuevamente en la nueva posición que se indicara en el programa.

La sección transversal del dique modular tuvo un ancho de 0.32 m, 0.58 m de largo y una altura de 0.17 m (Figura 34).

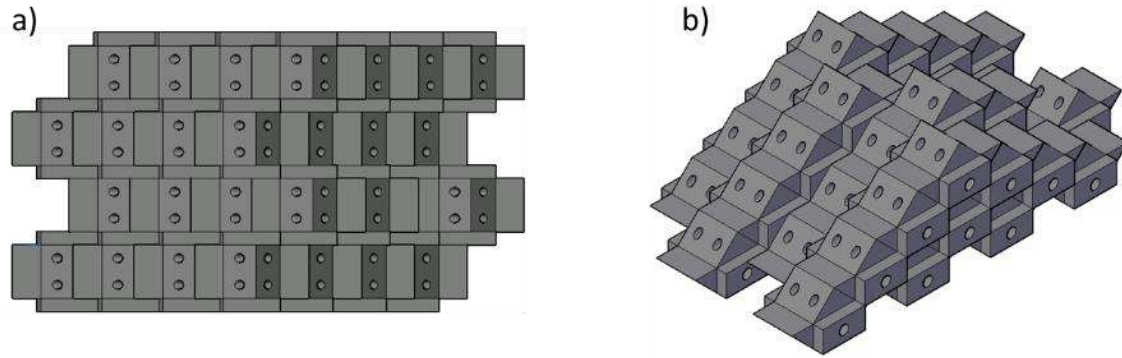


Figura 34. Dique modular sumergido (sección transversal, a) vista en planta, b) vista isométrica).

#### 4.3.1.1 Instrumentos de medición.

Para medir el oleaje generado a lo largo de las pruebas, se utilizaron 11 sensores resistivos para obtener la superficie libre, los cuales trabajan con un voltaje de  $\pm 10$  V, registran las variaciones en el voltaje durante el ascenso y descenso de la superficie libre. Esta diferencia de voltaje, se relaciona con la profundidad de desplante del sensor, se interpreta como la posición instantánea de la superficie libre del agua. El límite de operación de estos sensores está dado por su propia longitud,  $L=0.60$  m, y ofrecen una precisión de 0.01 mm.

Para las pruebas realizadas en este trabajo, los sensores se montaron en soportes metálicos diseñados especialmente para este propósito. Se utilizaron dos grupos de sensores, se verificó que se cumpliera una separación mínima de  $\pi/10k$  y una máxima de  $9\pi/10k$  donde  $k$  es el número de onda, dado por  $k = 2\pi/L$  siendo  $L$  la longitud de onda.

Los sensores se calibraron cada inicio de prueba o al registrarse una variación en el nivel de agua. Esta consistió en establecer un nivel de referencia,  $n_m=0$ , que normalmente se sitúa en un punto medio entre el fondo del canal y la superficie libre del agua. Una vez colocados todos los sensores en el nivel de referencial, se estableció un voltaje 0 V. Una vez establecido el nivel cero y el voltaje cero, se indican los valores en el programa desarrollado por el GIC y P para la calibración de los sensores.

Al tener registrados los niveles de referencia, se varía la profundidad de desplante de los sensores a distancias conocidas, las cuales se registran en el programa de calibración; este proceso se realiza dos veces, para tener un total de tres niveles de referencia y tres voltajes. Con este conjunto de datos, el programa ajusta una recta por regresión simple. Finalmente, el programa escribe en un archivo la pendiente, ordenadas al origen y coeficientes de correlación ( $R^2$ ) de los ajustes lineales que se realizan. La calibración se considera aceptable cuando el valor de  $R^2$  se encuentre entre 0.9999 y 1.0.

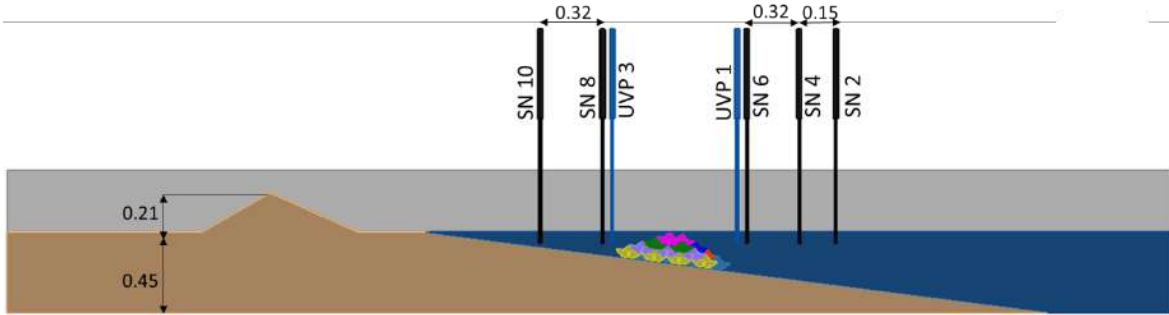


Figura 35. Perfil A. Ubicación de los sensores de nivel y UVP.

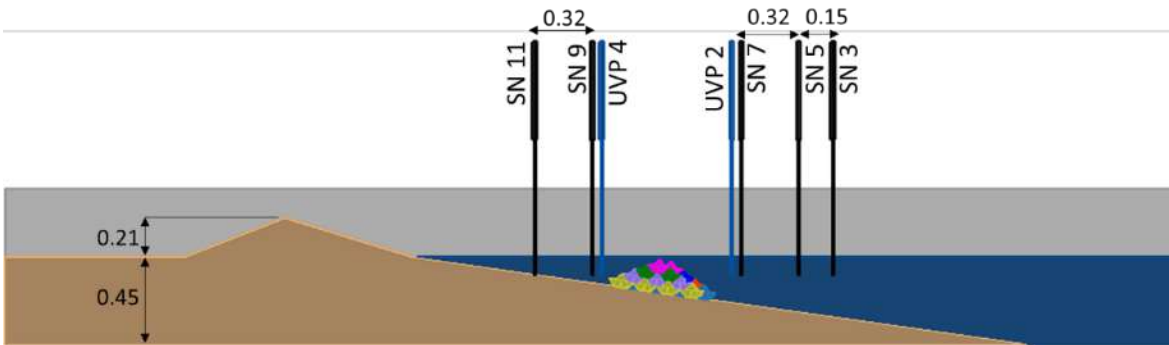


Figura 36. Perfil B, Ubicación de los sensores de nivel y UVP.

Por otra parte, con el objetivo de conocer las velocidades cerca de la estructura, se utilizaron cuatro UVP. Estos sensores miden el perfil instantáneo de velocidad unidimensional en el fluido que contiene partículas a través del eje del haz ultrasónico, por ello se colocó uno frente a la estructura y el segundo en la parte posterior, en ambos perfiles (Figura 35 y Figura 36).



Figura 37. Transductor UVP (Fuente: <https://www.met-flow.com>).

#### 4.3.1.2 Ensayos.

Se realizaron 15 ensayos correspondientes al perfil A con cuatro escenarios (Perfil Sin Estructura (PSE), Perfil con Estructura a Nivel medio (PEN), Perfil con Estructura de 0.30m a Nivel Medio

(PE30NM) y Perfil con Estructura Sumergida 0.15m (PES)) y cuatro diferentes condiciones de oleaje (régimen medio RM y tormentas T1, T2, T2', T3, T3'). Las mismas condiciones fueron probadas para el perfil B, dando un total de 30 ensayos por ambos perfiles. Las pruebas se reprodujeron con oleaje irregular de espectro JONSWAP con  $\gamma=3.3$ , se utilizó un sistema de absorción activa para compensar las ondas reflejadas por el modelo, el nivel medio del agua se situó a 0.45 m, para simular la sobre elevación de marea se aumentó 0.03 m. La siguiente tabla muestra la configuración de las pruebas realizadas.

Tabla 4. Configuración del programa experimental Nombre del caso, H altura de Ola, T periodo, h profundidad, duración.

ENSAYO		H (m)	T (s)	H (M)	DURACIÓN (MIN)	
<b>PERFIL A y B</b>	RM	0.05	0.894	0.45	45	
	PSE	T1	0.10	0.894	0.45	45
		T2	0.10	1.118	0.48	45
		T3	0.05	1.118	0.45	45
		RM	0.05	0.894	0.45	45
	PEN	T1	0.10	0.894	0.45	45
		T2	0.10	1.118	0.48	45
		T3	0.05	1.118	0.45	45
		T3'	0.05	1.118	0.48	45
	PE30N	T2'	0.10	1.118	0.45	45
		T2	0.10	1.118	0.48	45
		RM	0.05	0.894	0.45	45
PES	T1	0.10	0.894	0.45	45	
	T2	0.10	1.118	0.48	45	
	T3	0.05	1.118	0.45	45	

#### 4.3.1.3 Levantamiento de perfiles.

Una vez terminado el ensayo, se procedió a realizar el levantamiento altimétrico de ambos perfiles. Se colocó un nivel automático (Figura 39) en un punto estratégico que permitió visualizar todas las lecturas necesarias para la representación del perfil. Las lecturas fueron tomadas cada 0.20 m en la zona protegida de la duna y a cada 0.05 m en la cara expuesta de la duna y en la pendiente del perfil, hasta después de la estructura.



Figura 38. Nivel automático y estadal

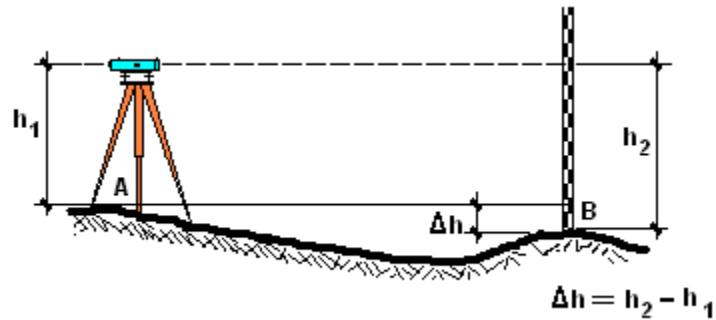


Figura 39. Ejemplo de obtención de niveles de perfil mediante el uso de nivel automático y estadal (Imagen obtenida de Puig, R.(2014), pag.46)

Una vez obtenidos todos los puntos de ambos perfiles, se procedió a calcular la altimetría de cada perfil para graficarlos posteriormente.

#### 4.3.2 Análisis de datos.

Al terminar las pruebas en planta y los ensayos de la sección transversal de rompeolas sumergido, se procedió a realizar la descripción estadística de las señales. Se obtuvo la altura de ola cuadrática media definida por la siguiente ecuación (Ec. 1)

Ec. 1

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2}$$

##### 4.3.2.1 Determinación de coeficiente de reflexión.

Para el cálculo del coeficiente de reflexión se recurrió al método de (Mansard & Funke, 1980), con la finalidad de cuantificar correctamente la altura de ola reflejada y la altura incidente, con ello obtener el valor del coeficiente de reflexión del rompeolas sumergido. el método consiste en suponer la medida simultánea de tres sensores de nivel, en tres puntos conocidos durante un tiempo, T a manera que  $0 \leq t \leq T$ .



Este método asocia una función a las series de datos proporcionadas por los sensores, para ello, se aplica un análisis de Fourier, donde cualquier función puede ser expresada de la siguiente forma:

Ec. 2

$$f(t_i) = \frac{A_0}{2} = \Sigma \left[ A_n \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \right]$$

Ec. 3

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

Ec. 4

$$A_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t$$

Ec. 5

$$B_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t$$

La fórmula se expresa en función de la amplitud y la fase de forma, siendo una reformulación de la ecuación general de Fourier y diferenciándose así del método de Goda y Suzuki (1976). La fórmula se expresa de la siguiente forma:

Ec. 6

$$f(t_i) = \frac{E_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T} - \alpha_n\right)$$

donde:

$$E_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\alpha_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n}$$

Nuevamente, el oleaje generado  $f(t)$  utiliza el nivel medio del canal con la medida de pasos ascendentes por cero, esto hace que el coeficiente  $E_0$  sea nulo. Así, las áreas positivas y negativas en función de  $f(t)$  deben compensarse y su integral en todo su dominio es nula. Por tanto, la función de Fourier general será:

Ec. 7

$$f(t_i) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T} - \alpha_n\right)$$

Para efecto que la ecuación sea válida, debe poseer un periodo constante, T.

Una vez obtenido el espectro energético, se calculó la descomposición de la señal del oleaje. La ecuación de la superficie libre del agua de un tren de ondas registradas por un sensor, s, se describe como:

Ec. 8

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi x}{L_n} + \epsilon_{s,n}\right)$$

Se consideró un sensor, s, situado en una posición  $x=x_1$  se puede expresar una señal como la superposición de un oleaje incidente con un oleaje reflejado, de la forma

Ec. 9

$$\eta_s(x_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{In} \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi x_1}{L_n} + \epsilon_{1,n}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} a_{Rn} \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1)}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t)$$

donde:

$\Omega_1(t)$  representa las posibles interferencias que existan en la señal, y por tanto, posibles errores dentro de la formulación;

$\epsilon_{1,n}$  y  $\gamma_{1,n}$  representan los desfases de las ondas incidentes y reflejadas

$x_1$  es la distancia que existe entre la pala de oleaje y el primer sensor

$r_1$  es la distancia que existe entre el primer sensor y la estructura que refleja el oleaje.

Los dos sensores siguientes, se colocan en una posición  $x=x_1+x_{1s}$  con respecto a la pala; y en una posición  $r_s=2r_1+x_{1s}$  con respecto a la estructura reflejante, siendo  $x_{1s}$  la distancia entre el primer sensor y el siguiente sensor 's'.

La expresión de la superficie libre para este nuevo sensor queda como:

Ec. 10

$$\eta_{s=1}(x_{1s}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{In} \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + x_{1s})}{L_n} + \epsilon_{1,n}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} a_{Rn} \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1 - x_{1s})}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t)$$

Igualando las ecuaciones de superficie libre de ambos sensores, con las formulaciones de superposición de ondas, se tiene:

Ec. 11

$$a_{In} = \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi x_1}{L_n} + \epsilon_{1,n}\right) + a_{Rn} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1)}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) = A_n \sin\left(\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + \alpha_n\right)$$

Ec. 12

$$a_{In} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + x_{1s})}{L_n} + \epsilon_{1,n}\right) + a_{Rn} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1 - x_{1s})}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) = A_n \sin\left(\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + \alpha_n\right)$$

Siguiendo la metodología de Mansard y Funke, se desarrollan las ecuaciones anteriores en forma polar, de tal manera que:

Ec. 13

$$B_{1,n} = a_{I,n} \exp i \left[ \frac{2\pi x_1}{L_n} + \epsilon_{1,n} \right] + a_{Rn} \exp i \left[ \frac{2\pi(x_1 + 2r_1)}{L_n} + (\epsilon_{1,n} + \gamma_{1,n}) \right] + \gamma_{1,n} \exp i(\rho_{1,n})$$

Ec. 14

$$B_{s,n} = a_{I,n} \exp i \left[ \frac{2\pi(x_1 + x_{1s})}{L_n} + \epsilon_{s,n} \right] + a_{Rn} \exp i \left[ \frac{2\pi(x_1 + 2r_1 - x_{1s})}{L_n} + (\epsilon_{s,n} + \gamma_{s,n}) \right] + \gamma_{1s,n} \exp i(\rho_{s,n})$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser agrupadas como:

Ec. 15

$$B_{1,n} = Z_{I,n} + Z_{R,n} + Z_{E1,n}$$

Ec. 16

$$B_{s,n} = Z_{I,n} \exp \left[ i \frac{2\pi x_{1s}}{L_n} \right] + Z_{R,n} \exp \left[ -i \left( \frac{2\pi x_{1s}}{L_n} \right) \right] + Z_{E1,n}$$

Las ecuaciones anteriores son resueltas por el método del error de mínimos cuadrados, por lo tanto, se simplifican las ecuaciones tal que:

Ec. 17

$$C_{s,n} = \frac{2\pi x_{1s}}{L_n} = k_n(x_{1s})$$

Con ello, las ecuaciones quedan de la siguiente forma:

Ec. 18

$$-Z_{E1,n} = Z_{I,n} \exp[iC_{1,n}] + Z_{R,n} \exp[-iC_{1,n}] - B_{1,n} \text{ para el sensor 1}$$

$$-Z_{Es,n} = Z_{I,n} \exp[iC_{s,n}] + Z_{R,n} \exp[-iC_{s,n}] - B_{s,n} \text{ para el sensor 's'}$$

A estas ecuaciones, se aplica el método de mínimos cuadrados de tal forma que los valores de  $Z_{E1,n}$  y  $Z_{Es,n}$  sean mínimos para cumplir la condición:

$$\sum_{s=1}^m (-Z_{Es,n}) = \text{mínimo}$$

De esta forma es como se obtienen los valores de  $Z_{I,n}$  y  $Z_{R,n}$ . El sistema se resuelve de forma matricial:

Ec. 19

$$\begin{pmatrix} \sum_{s=1}^M B_{s,n} \exp[-iC_{s,n}] \\ \sum_{s=1}^M B_{s,n} \exp[iC_{s,n}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M & \sum_{s=1}^M \exp[-2iC_{s,n}] \\ \sum_{s=1}^M \exp[2iC_{s,n}] & M \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} Z_{I,n} \\ Z_{R,n} \end{pmatrix}$$

Por tanto, la solución queda de la siguiente forma:

Ec. 20

$$\begin{pmatrix} Z_{I,n} \\ Z_{R,n} \end{pmatrix} = \frac{1}{M^2 - [\sum_{s=1}^M \exp(2iC_{s,n}) * \sum_{s=1}^M \exp(-2iC_{s,n})]} \begin{pmatrix} M & -\sum_{s=1}^M \exp[-2iC_{s,n}] \\ -\sum_{s=1}^M \exp[2iC_{s,n}] & M \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sum_{s=1}^M B_{s,n} \exp[-iC_{s,n}] \\ \sum_{s=1}^M B_{s,n} \exp[iC_{s,n}] \end{pmatrix}$$

Donde  $Z_{I,n}$  y  $Z_{R,n}$  representan el movimiento de la superficie del agua del oleaje incidente  $\eta_I(x1, t)$ ; y el reflejado  $\eta_R(x1, t)$  para cualquier  $f_n$ , con lo cual se obtiene la descomposición de la señal de oleaje incidente y reflejado.

#### 4.3.2.2 Determinación del coeficiente de transmisión.

La transmisión del oleaje se puede caracterizar por medio de un coeficiente que se determina a partir del cociente de la altura transmitida entre la altura de la ola incidente, tal que:

Ec. 21

$$K_T = \frac{H_{Transmitida}}{H_{Incidente}}$$

En la transmisión se pueden observar dos tipos de factores que influyen, se pueden agrupar en hidráulicos y geométricos. En los primeros se encontrará la altura de ola incidente  $H_I$  y el periodo de onda incidente  $T_I$ . Para el estudio de este trabajo, se utilizó la ola cuadrática media incidente, medida en los sensores colocados antes de la estructura, calculados mediante los métodos de Mansard y Funke.

En los factores geométricos se encuentran el francobordo, el cual entre mayor sea este mayor será la transmisión. La disipación de la energía también estará en función del ancho de la cresta, entre mayor sea la anchura, mayor área de disipación tendrá el oleaje incidente, por tanto, después de la estructura se tendrá menos energía. La pendiente de la estructura además de brindar estabilidad, disipa energía por la disminución gradual en la profundidad del agua, lo que provoca la rotura de las olas. Por último, se tiene la rugosidad de la estructura, la cual disminuye la energía por medio de la fricción.

El coeficiente de disipación, bajo la hipótesis de conservación de la energía, se calculó con la siguiente fórmula

$$D = \sqrt{1 - T^2 - R^2}$$

En la cual  $T^2$  y  $R^2$  son los coeficientes de transmisión y reflexión respectivamente.

## 5 Resultados y Discusiones.

### 5.1 Resultados de modelo en planta.

El objetivo principal de un rompeolas sumergido es forzar la rotura de las olas más altas, lo cual induce la disipación de la energía por medio de turbulencia (Del Vita, 2016). Sin embargo, la rotura de las olas determina las corrientes al pie de la estructura y pone en suspensión al sedimento que es arrastrado por las corrientes costeras, lo que puede llegar a provocar erosión. Por esta razón es importante definir las condiciones de un diseño adecuado de la estructura. Para entender el fenómeno de la rotura diferentes investigadores han analizado datos experimentales en 2D. Se han distinguido tres parámetros de los cuales depende la interacción de la ola con la estructura: el peralte de la ola ( $H/L$ ), la sumergencia ( $d_s$ ) la cual se define como la diferencia entre la profundidad del agua,  $h$ , y la altura de la estructura, además el ancho de la estructura y la sumergencia entre la longitud de onda. Por otra parte, cuando son considerados procesos en 3D, se toman en cuenta algunos parámetros adimensionales, como la longitud del rompeolas y la distancia hacia la costa.

Diversos investigadores realizaron trabajos previos en dos dimensiones, en los cuales (Bruce Tom, & Van der Meer, 2006), trataron fenómenos como rebase, (Zanuttigh, *et al.*, 2008) por su parte estudiaron reflexión, mientras que (Calabrese, *et. al.*, 2008) examinó el *set-up*, y las corrientes de oleaje inducidas fueron analizadas por Tajziehchi and Sharif Ahmadian, (2009). Usualmente el impacto de las estructuras ha sido expresado en términos de coeficiente de transmisión del oleaje, porque representa una variable dominante en la respuesta de la línea de costa con respecto a la posición de la estructura.

#### 5.1.1 Coeficientes hidráulicos.

En esta sección se describen los resultados de los coeficientes de transmisión obtenidos con los rompeolas sumergidos probados en el estanque de olas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Se hizo la comparación con diferentes peraltes de ola, así como con diferentes profundidades relativas ( $d_s$ ) a las cuales estuvo colocado el rompeolas sumergido. Los resultados se presentan en dos secciones, la primera muestra los coeficientes obtenidos con la estructura construida con cubos y la segunda; los resultados del rompeolas de piezas modulares.

##### 5.1.1.1 Dique de Cubos.

Se observó que al colocar el talud expuesto del rompeolas en profundidades relativas ( $d_s$ ), la cual se define como la diferencia entre la profundidad del agua,  $h$ , y la altura de la estructura, con valores de 0.17 y 0.10 se produce mayor transmisión, mientras que en la sección del morro se obtuvo menor transmisión. Para  $d_s=0$  la sección del talud expuesto la estructura permitió la transmisión entre el 0.55 y 0.70 por ciento de la energía, sin embargo, en la sección del morro con las diferentes pendientes de ola con el periodo de 0.78 s se transmitió mayor energía que en periodos de 0.62 s (Figura 40).

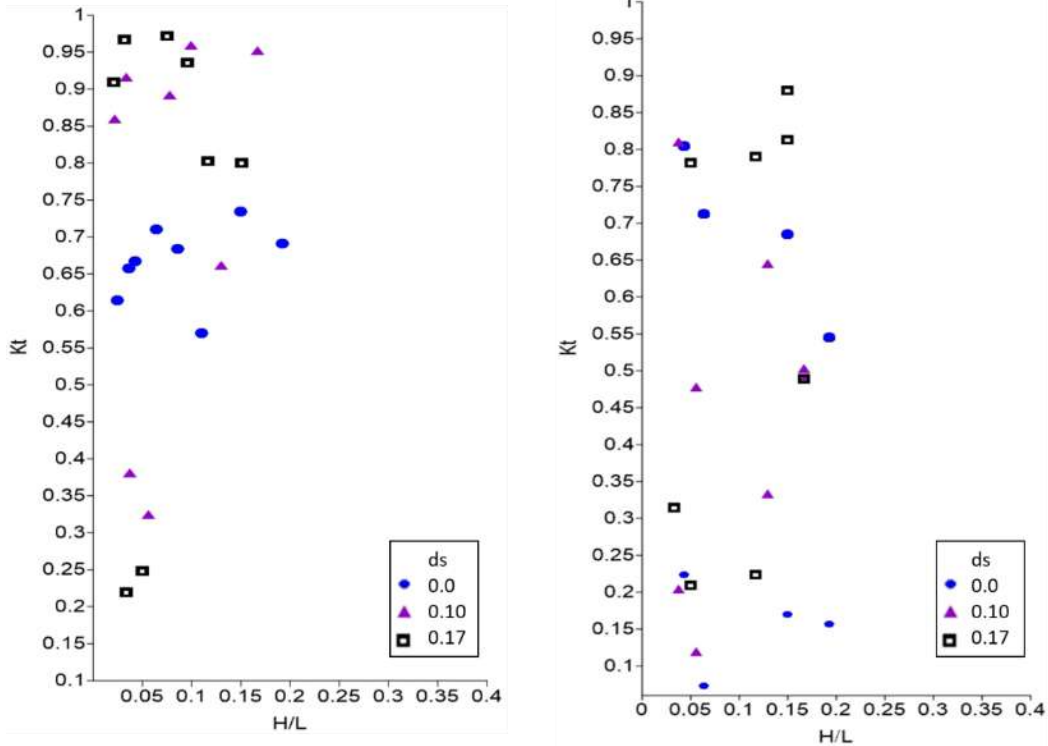


Figura 40. Coeficientes de transmisión obtenidos para un rompeolas construido con cubos, la imagen izquierda representa los coeficientes de transmisión en la sección transversal del rompeolas y la imagen derecha los coeficientes en la sección del morro.

#### 5.1.1.2 Dique con piezas modulares.

Al hacer la comparación del funcionamiento del rompeolas sumergido construido con cubos y con piezas modulares, el segundo, muestra un mejor funcionamiento en cuanto al grado de transmisión que se obtiene en la sección del talud expuesto en las profundidades relativas de 0.10 y 0.17, con valores de  $K_t$  entre 0.65 a 0.85, comparado con el rompeolas de cubos que los valores se tienen entre 0.55 y 0.95. sin embargo, en la sección del morro con  $ds=0.10$  se observa que el morro permite menos transmisión comparado con una profundidad menor (Figura 41).

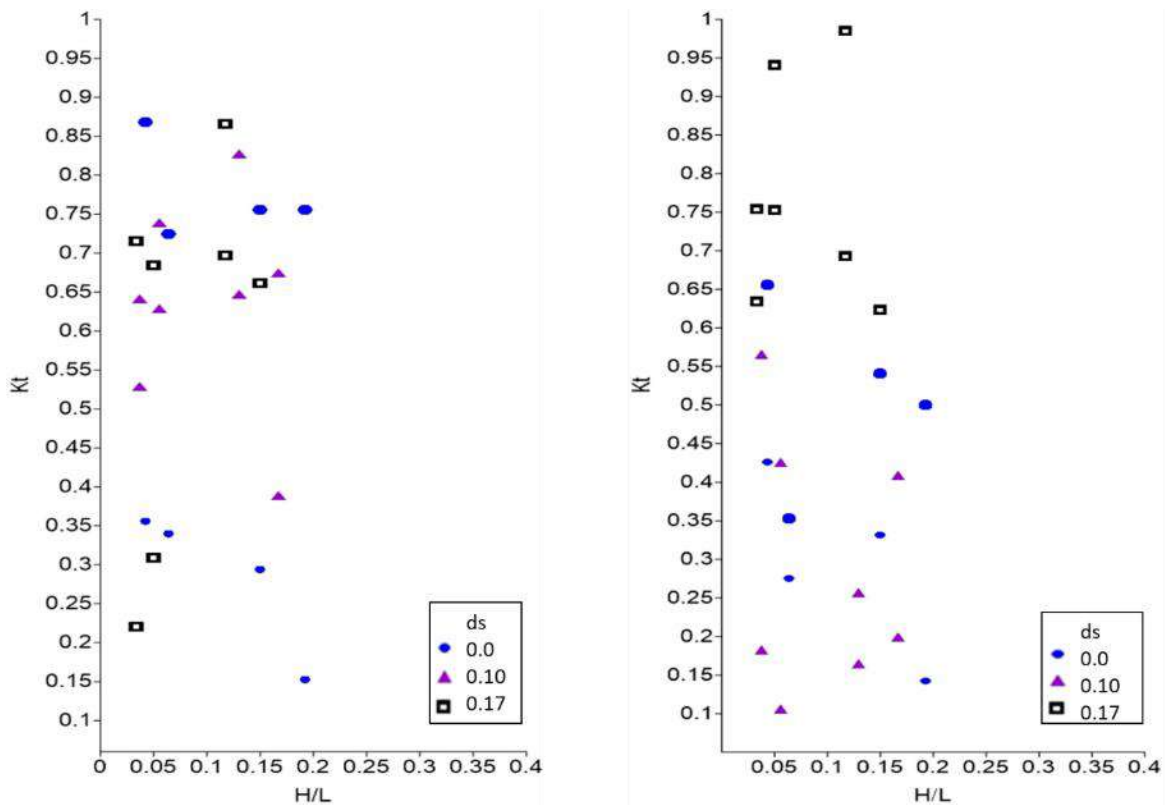


Figura 41. Coeficientes de transmisión obtenidos para un rompeolas construido con piezas modulares, la imagen izquierda representa los coeficientes de transmisión en la sección transversal del rompeolas y la imagen derecha los coeficientes en la sección del morro.

En ambos casos se observa que el coeficiente de transmisión aumenta cuando se tiene una profundidad ( $d_s$ ) mayor, además cuando el peralte de la ola disminuye a pesar de tener un francobordo mayor la transmisión también disminuye. En este caso debe ponerse especial atención a los peraltes de ola, para proponer la distancia a la cual será colocada la estructura, pues a pesar de que se tenga un francobordo menor, si el peralte de la ola es grande se tendrá un mayor porcentaje de transmisión. En el trabajo realizado por (Dattatri, Raman, & Shankar, 1979). Se observó que el coeficiente de transmisión disminuyó al incrementar la relación del ancho de la estructura,  $B$ , con respecto a la longitud de onda,  $L$ , ( $B/L$ ).

Por otra parte, los trabajos de (Goda & Suzuki, 1977) y (J. W. Johnson, et al., 1951), observaron que el peralte de la ola no es un parámetro que influye significativamente en la transmisión cuando los valores de éste fluctúan entre 0.03 a 0.08. Sin embargo, en este trabajo se puede observar que aun con valores de  $H/L$  entre 0.02 a 0.05, dependiendo del francobordo puede llegar a influir en la transmisión. Así mismo (Gomez Pina & Fernandez de Alarcon, 1991), mostraron la relación de  $K_t$  con respecto al ancho de la estructura y la longitud de onda, además del parámetro adimensional  $H/L$ , el cual influye en la amplitud de coeficiente de transmisión,  $K_t$  aumenta al aumentar  $H/L$ .

(Alagan Chella, et al., 2015) por su parte, observaron que la profundidad de rotura incrementa con  $H/L$  y cuando la  $d_s$  también incrementa. Por lo tanto, las olas sobre la estructura rompen más lejos de la costa a mayor profundidad a medida que  $H/L$  es más grande. Lo cual significa que las olas



alcanzan el punto de rotura antes con menor deformación en su cresta que las ondas con menor valor de  $H/L$ . Como se puede ver en los resultados (Figura 41)  $d_s$  afecta directamente a la profundidad de rotura, por lo tanto, entre mayor sea el francobordo de la estructura y mayor sea  $H/L$  la transmisión será menor. Sin embargo, se debe considerar el tipo de elemento con el cual está construido el rompeolas, pues para el caso del rompeolas con cubos, no se cumple totalmente la relación del peralte del oleaje con respecto al francobordo, lo que nos lleva a considerar otro factor como la porosidad, la cual también es un parámetro que influye de manera directa en la transmisión, no obstante, en menor grado comparado con los parámetros mencionados anteriormente.

(Chyon, M. S. A., *et al.*, 2017) realizó la comparación del funcionamiento hidrodinámico con un rompeolas sumergido poroso con uno no poroso, los ensayos se realizaron con tres porcentajes de porosidad, y se relacionó con los coeficientes de transmisión y reflexión, los resultados mostraron que entre mayor porcentaje de porosidad tenga la estructura, la transmisión aumenta, por lo tanto, se puede considerar ese parámetro en la diferencia que se encontró entre el funcionamiento del rompeolas sumergido construido con cubo y con piezas modulares, puesto que este último tiene una mayor porosidad debido a la naturaleza de las piezas.

Por otra parte, se sabe que hay numerosos procesos físicos que se ven involucrados en la transformación del oleaje en presencia de rompeolas sumergidos, como se mostró anteriormente la reflexión y transmisión son algunos de ellos, además de manera simultánea a estos también se genera difracción.

La reflexión a su vez es otro fenómeno que envuelve un cambio de dirección del oleaje incidente, cuando el oleaje es reflejado hacia aguas profundas, por lo tanto, una parte de la energía del oleaje incidente se regresa. El porcentaje de reflexión depende de la pendiente del talud expuesto del dique sumergido y de la profundidad de inmersión de éste. Con respecto a la difracción, ésta ocurre cuando el oleaje percibe la presencia de una barrera. La energía del oleaje viaja a lo largo de la cresta hacia aguas protegidas, debido a los cambios en la elevación de la superficie libre el oleaje tiende a girar. Dando lugar a la difracción, refracción y someramiento simultáneamente, esto ocurre cuando el oleaje encuentra un obstáculo o un cambio repentino en su batimetría. La Figura 42 muestra la modificación del oleaje en presencia de un dique sumergido (Sharif Ahmadian, 2016).

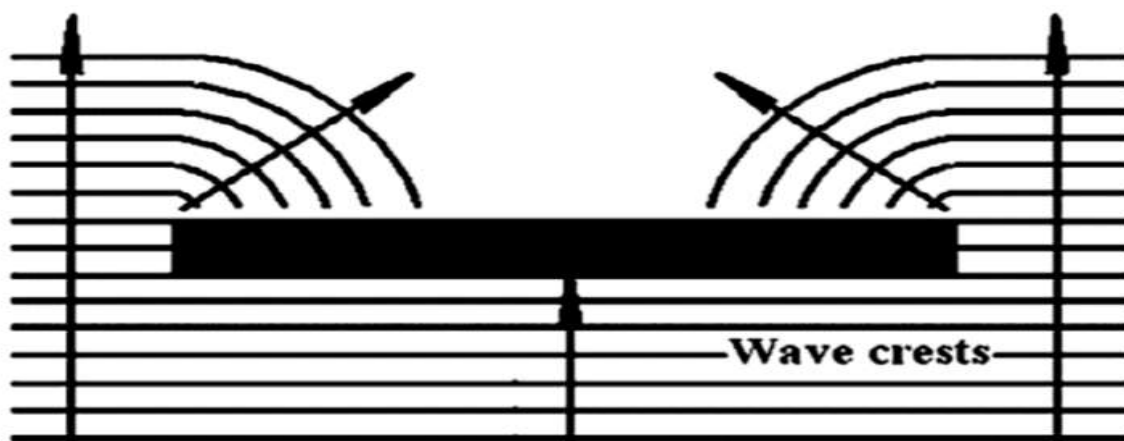


Figura 42. Vista en planta del patrón de difracción para un obstáculo único. Obtenido de (SHARIF AHMADIAN, 2016, pág. 20)

La Figura 43 se observa el efecto visual de la reflexión del oleaje frente al dique y la distorsión que se produce en la superficie libre debido a ello, provocado por la interacción del oleaje en presencia del dique sumergido construido con cubos, además, se logra apreciar el cambio de dirección que sufre el oleaje en la zona de aguas protegidas.



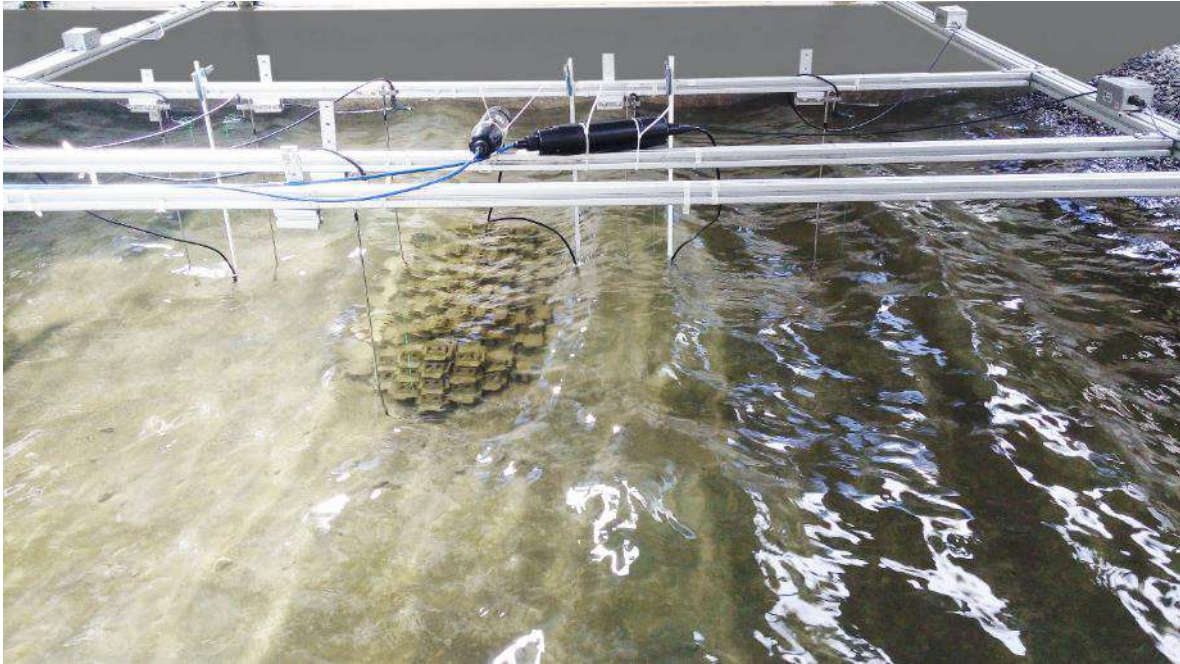
*Figura 43. Reflexión provocada por el dique sumergido construido con cubos, se muestra del lado derecho la difracción producida por el obstáculo.*

En la siguiente imagen (Figura 44), se logra apreciar como el oleaje viaja hacia la costa, y llega a difractarse al modificarse por la presencia de la estructura sumergida, produciendo un cambio de dirección del oleaje incidente. Si se presta atención hacia la parte posterior del estanque, se puede ver la amplitud inicial con la cual viajan las ondas, y al sentir el cambio de profundidad y verse modificada la superficie libre se produce el giro de la onda, la cual se observa al pasar la estructura, además el oleaje transmitido presenta una amplitud menor.



*Figura 44. Transmisión y difracción del oleaje, producido por el dique sumergido construido con cubos.*

En el caso del dique sumergido con piezas modulares, se encontró el mismo fenómeno de difracción, sin embargo, debido a la geometría de las piezas y del rompeolas, se presentó una mayor reflexión en el talud externo de la estructura. Los morros del dique generaron cambios en la dirección del oleaje, por la distancia no se alcanzó a definir una onda clara, como en el caso del dique construido con cubos. Sin embargo, en el cuerpo del dique el oleaje transmitido es menor y se puede percibir el cambio de dirección de las ondas, producidas por el obstáculo (Figura 45).



*Figura 45. Reflexión y difracción provocada por el dique modular sumergido con piezas modulares.*

En la Figura 46 se observa el cambio de dirección del oleaje inducido por el dique sumergido y el oleaje transmitido con amplitud menor a la incidente, en la sección de los morros se logra apreciar una entorno caótico, esto debido a la geometría de los morros, los cuales produjeron un mayor cambio de dirección en el oleaje y se generó una aumento la amplitud de las ondas en los extremos del dique, mientras que la parte frontal de la estructura disminuyó.



*Figura 46. Oleaje transmitido y difractado por el dique modular sumergido.*

Con la representación de los ensayos se logró constatar los fenómenos físicos que se experimenta simultáneamente el oleaje ante la presencia de un rompeolas sumergido, que fueron descritos por Sharif Ahmadiand,(2016) anteriormente. Se observó que el oleaje transmitido a través del dique sumergido con piezas modulares muestra mayores cambios de dirección en comparación con la estructura de cubos. Esto debido a geometría de la estructura, pues debido a los escalones y orificios de la pieza es capaz de reproducir mayor turbulencia, lo que ayuda a la disipación del oleaje, en las zonas protegidas.

### 5.1.2 Velocidades.

Dentro del diseño de las estructuras costeras puede ser importante conocer las velocidades a las cuales estará sometida dicha obra, ya que, al presentarse velocidades altas a pie de dique se puede causar algún tipo de daño como deslizamiento o vuelco provocado por la socavación.

#### 5.1.2.1 Dique de cubos.

Como se mencionó en la sección descripción del modelo en planta, se colocaron tres vectrinos en dos arreglos de posiciones diferentes para registrar las velocidades incidentes, sobre, detrás y para la sección del morro del rompeolas.

Al igual que los coeficientes de transmisión se representaron gráficamente los perfiles de velocidad con respecto a las diferentes pendientes de ola, derivadas de los distintos periodos y profundidades utilizadas en los ensayos. Con la pendiente 0.04 y 0.06 las velocidades disminuyen en el fondo. En la sección del talud se observa que las velocidades sobre el rompeolas disminuyen al estar sobre la estructura y con las pendientes 0.14 y 0.19 aumentan en el fondo de la estructura. Se observa que las velocidades en la sección del morro son mayores comparadas con las del talud (Figura 47).

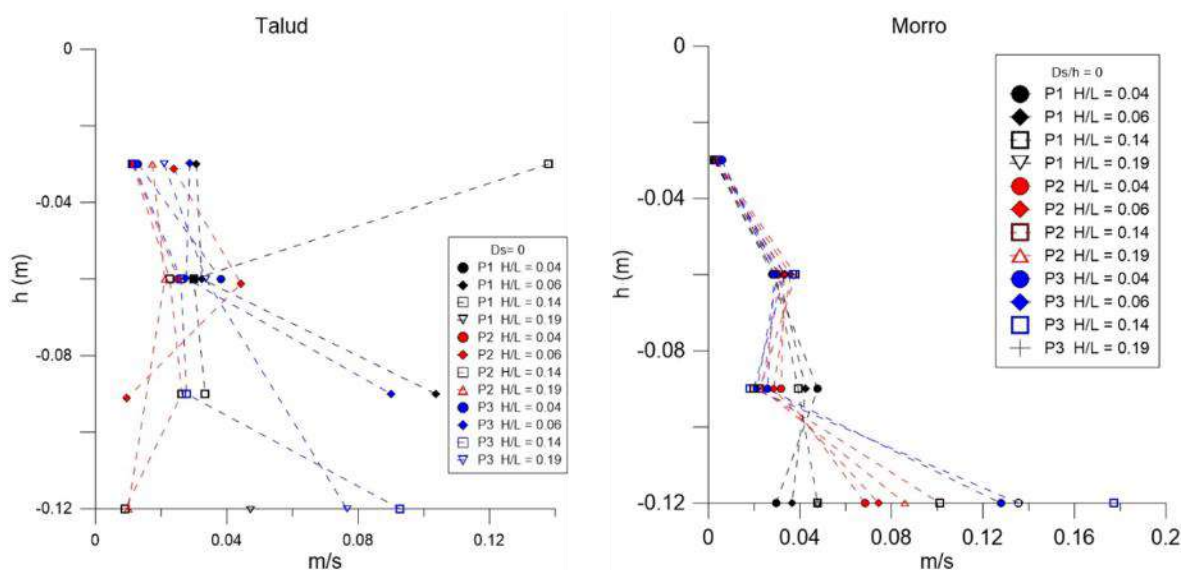


Figura 47. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m,  $T=0.78s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

Con el periodo de 0.62s se observa que los valores de las velocidades aumentan en el fondo, las mayores velocidades se identificaron detrás del rompeolas, en la sección del talud se observa una disminución de velocidades sobre la corona del rompeolas. Los rangos de velocidades en el morro 0.01 a 0.10 m/s, mientras que en el talud están entre 0.01 hasta 0.06 m/s, siendo las mayores velocidades con un peralte de ola de 0.19 (Figura 48).

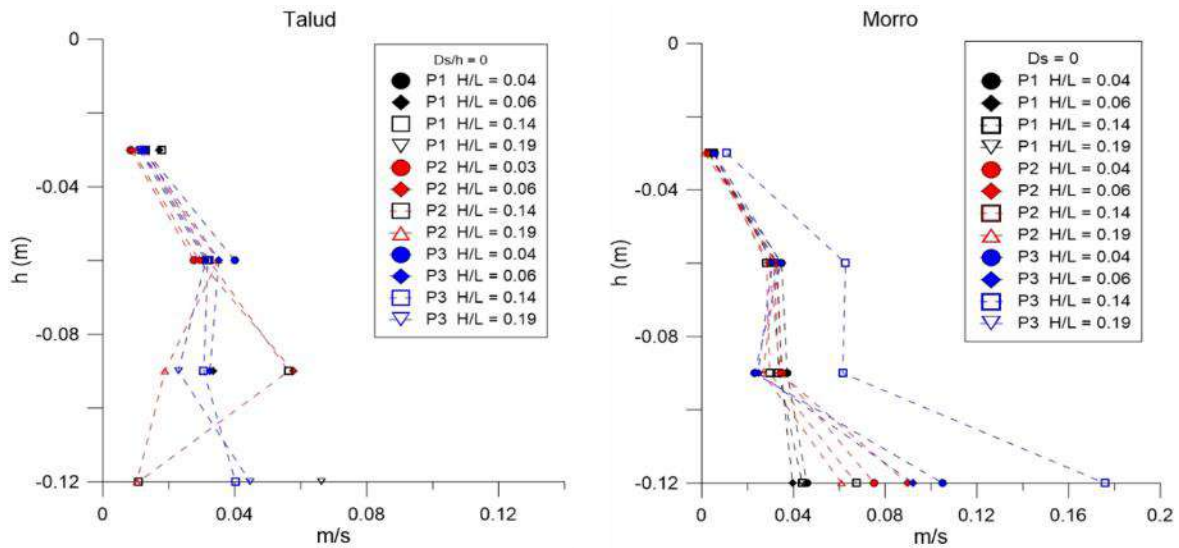


Figura 48. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m,  $T=0.62s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

En la profundidad de 0.25m, se observó que las velocidades en la parte del talud expuesto en el área de la corona son mayores que las presentadas frente y después del rompeolas, mientras que en la sección del morro la mayor velocidad registrada fue antes de la estructura con H/L de 0.19.

Con esta profundidad los rangos del perfil de velocidad fluctúan entre 0.02 a 0.06 m/s y 0 a 0.05 m/s en el talud y el morro, respectivamente (Figura 49).

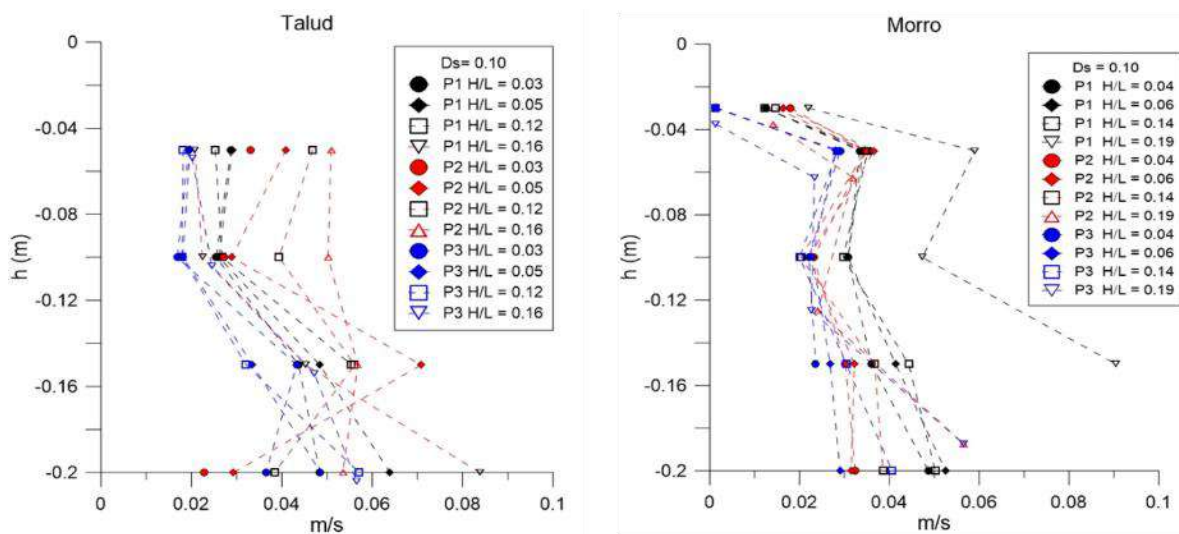


Figura 49. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m,  $T=0.78s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

Con periodo de 0.62s se obtuvieron mayores velocidades en el fondo, con valores de 0.05 a 0.08 m/s mientras que en el talud expuesto los rangos van de 0.04 a 0.6 m/s, sin embargo, se puede observar que las menores velocidades se presentaron detrás de la estructura (Figura 50).

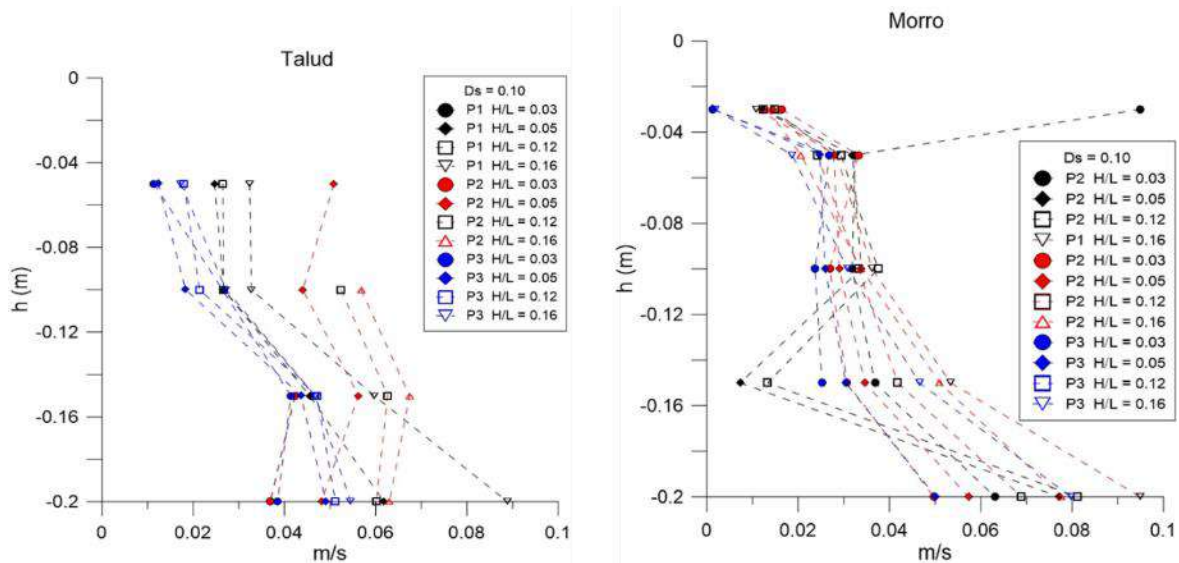


Figura 50. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m,  $T=0.62s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

En la profundidad 0.35m se observa alrededor de la estructura mayores variaciones en el perfil de velocidades con ambos periodos, en el morro se presenta un incremento en la parte central de este, sin embargo puede notarse que la estructura en ambos ensayos generó una disminución de las velocidades después de ésta, las cuales se encuentran en el rango de 0.02 a 0.06 m/s (Figura 51 y Figura 52).

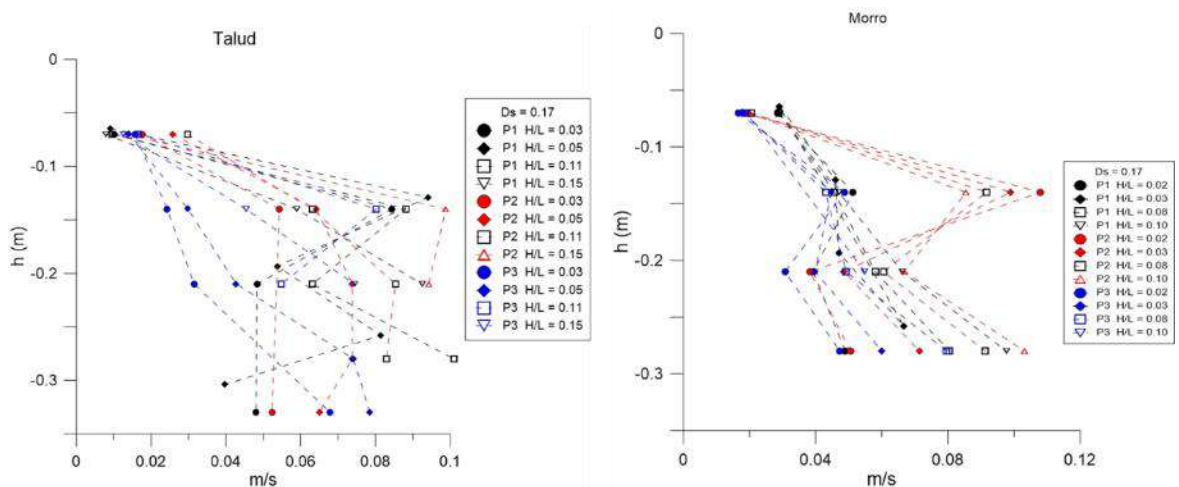


Figura 51. Velocidades obtenidas con profundidad 0.35m,  $T=0.78s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

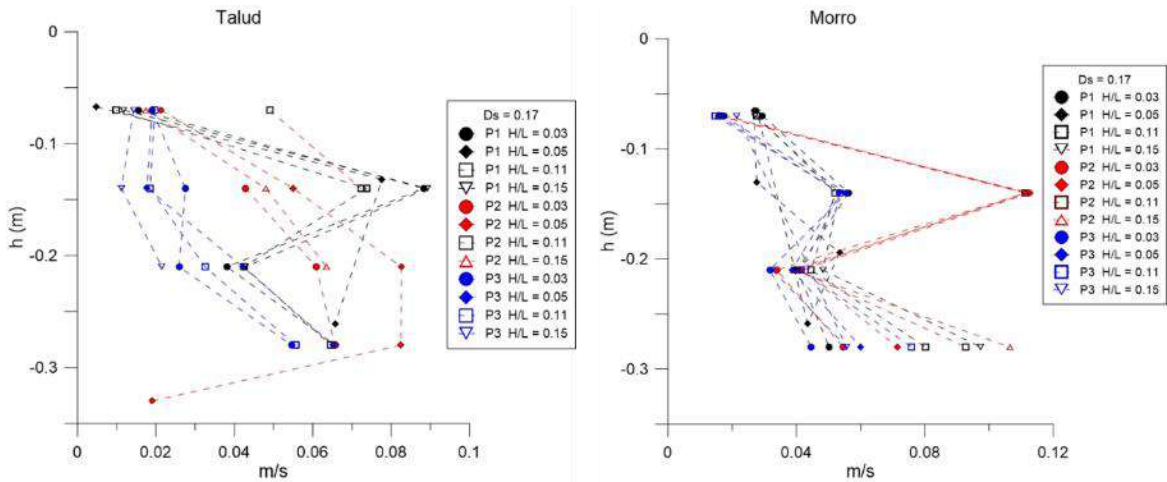


Figura 52. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m,  $T=0.62s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

### 5.1.2.2 Dique con piezas modulares.

Las velocidades obtenidas en el rompeolas con piezas modulares son menores comparadas con el rompeolas de cubos, se observa que en la profundidad de 0.17 m las velocidades se mantienen entre 0.03 a 0.04 m/s sobre el talud expuesto, mientras que en el morro se presenta un incremento en el fondo de 0.04 a 0.12m/s para ambos periodos, la máxima velocidad se obtuvo después de la estructura con peralte de ola de 0.14 (Figura 53 y Figura 54).

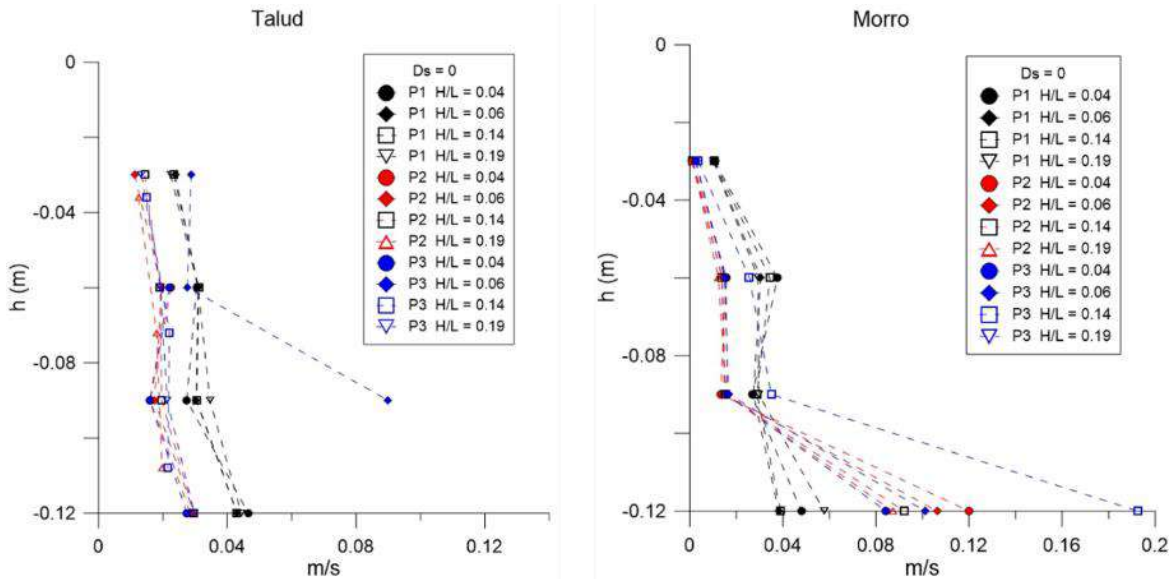


Figura 53. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m,  $T=0.78s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.



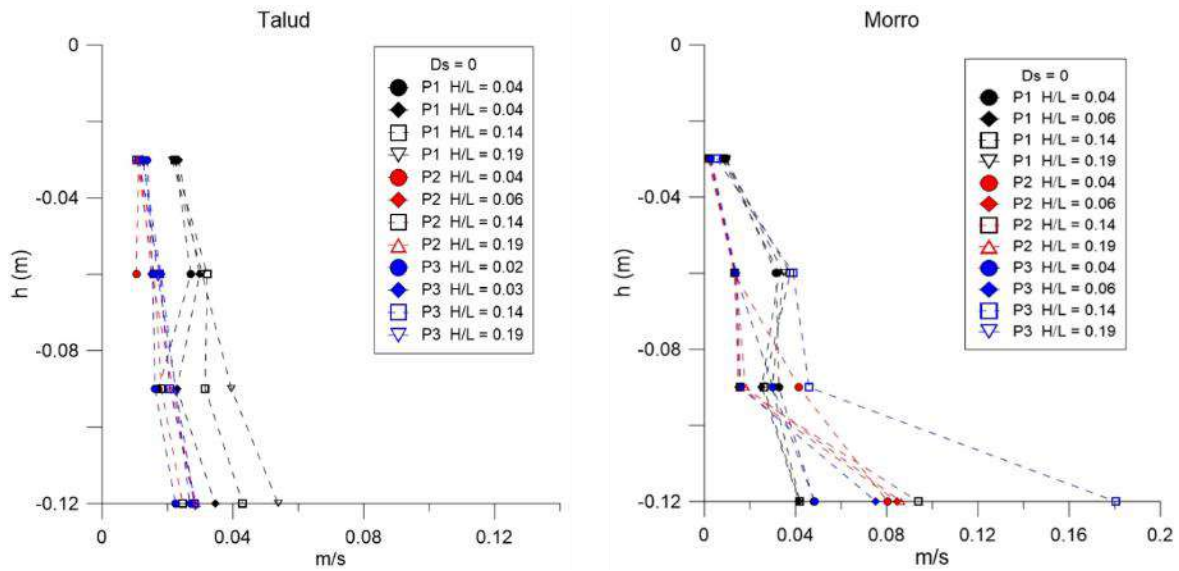


Figura 54. Velocidades obtenidas con profundidad 0.17m,  $T=0.62s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

En la profundidad de 0.25m, en el morro se observan variaciones en las velocidades a lo largo de la profundidad. En el talud expuesto, con  $H/L=0.03$  y  $0.05$  las velocidades se incrementan hasta 0.12 m/s y en fondo disminuyen drásticamente hasta 0.04 m/s. Sin embargo, en la longitud del rompeolas del lado protegido, las velocidades son menores que las incidentes (Figura 55).

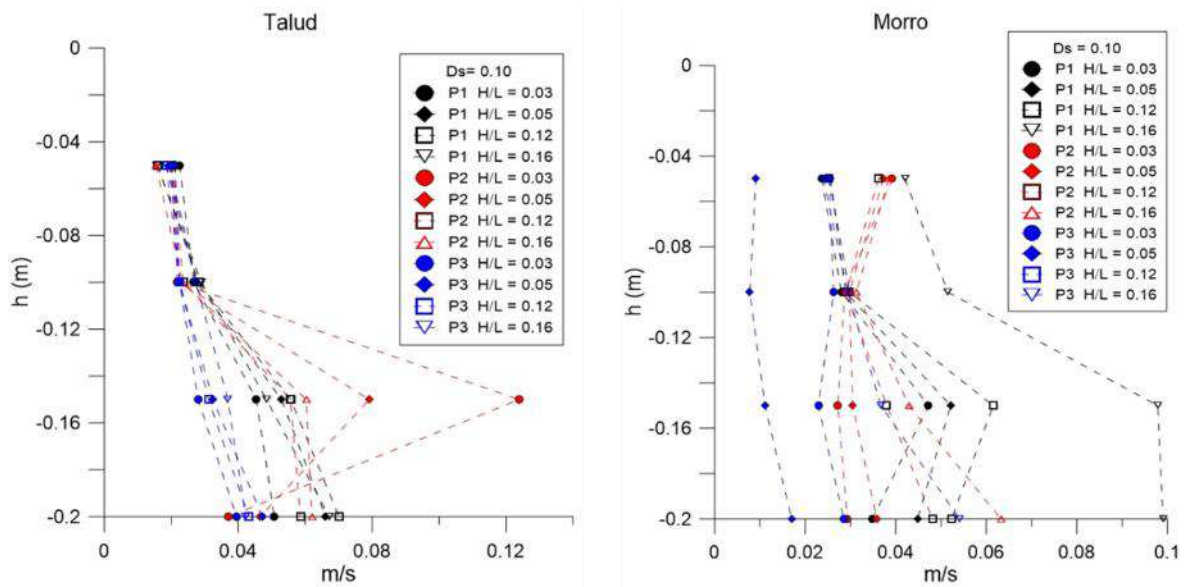


Figura 55. Velocidades obtenidas con profundidad 0.25m,  $T=0.78s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

En la profundidad 0.35 m se observa al igual que en los ensayos con el rompeolas de cubos, incrementos en las velocidades conforme aumenta la profundidad, tanto en el periodo de 0.78s como en 0.62s, las velocidades más altas se encontraron enfrente y sobre el eje central del rompeolas. Sin embargo, las velocidades comparadas con el rompeolas de cubos son menores, lo que permite generar una zona de calma (Figura 56 y Figura 57).

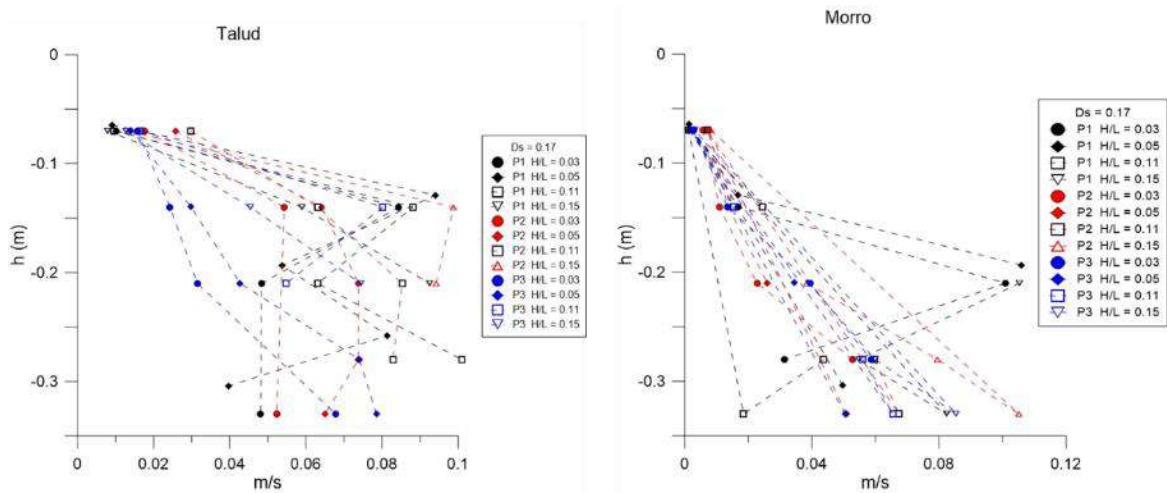


Figura 56. Velocidades obtenidas con profundidad 0.35m,  $T=0.78s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

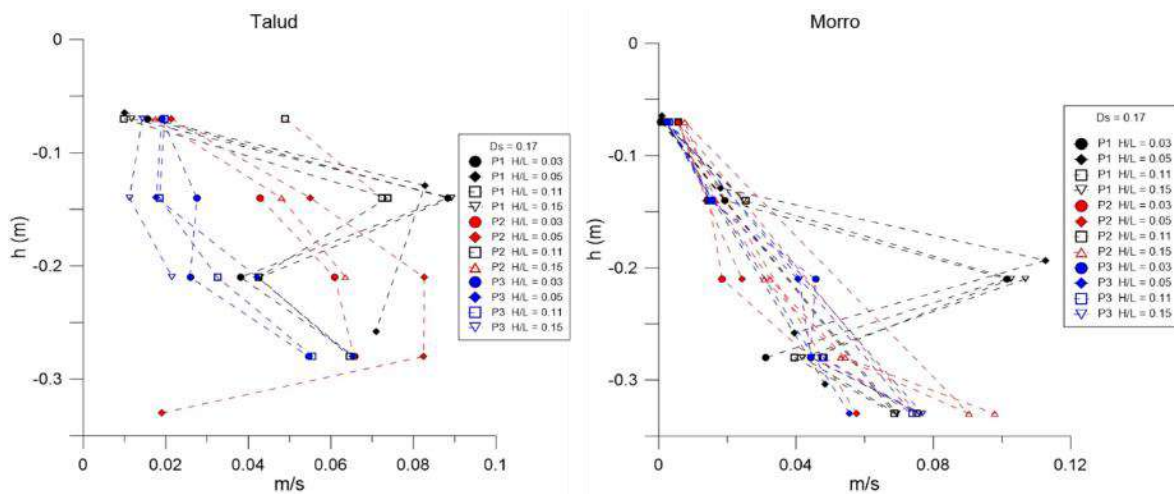


Figura 57. Velocidades obtenidas con profundidad 0.35m,  $T=0.62s$ , P1 color negro representan las velocidades antes de la estructura, P2 color rojo las mediciones sobre la estructura y P3 azul después del rompeolas.

Las velocidades obtenidas en ambas estructuras presentaron un incremento en la sección del morro, esto pudo verse influenciado por el fenómeno de difracción que sufrieron las estructuras, además de la reflexión ocasionada por las paredes del estanque, sin embargo, logró observarse que las velocidades transmitidas siempre eran menores que las incidentes, las piezas modulares disminuyeron aún más, comparadas con los cubos. Esto produce una zona en calma que permite tener condiciones para favorecer el depósito de sedimentos después de la estructura y formar una saliente o un tómbolo, esto dependiendo de la distancia a la cual sea colocada la estructura.

(Burcharth & Lamberti, 2007), mencionan que los cambios morfodinámicos pueden ser inducidos por las corrientes locales generadas por la interacción del oleaje con la estructura. El oleaje pasa sobre la estructura sumergida tiene un mayor transporte neto de agua en la cara expuesta de la estructura, lo que produce una transferencia de agua a través de la estructura porosa, por ello las piezas modulares muestran velocidades menores comparadas con los cubos, las corrientes

horizontales y los vórtices, juegan un papel importante pues crean gradientes hacia los morros de la estructura. Debido a ello los perfiles de velocidades en la sección del morro muestran tantas variaciones.

Las estructuras sumergidas, además de lograr que su funcionamiento hidrodinámico pueda ser considerado para dar solución a problemas de erosión, también se les puede relacionar con su efecto ecológico. Existen diversos trabajos en los cuales se ha estudiado los efectos de la fuerza hidrodinámica en los organismos marinos. (Kontaxi & Memos, 2015), realizó un estudio en el cual midió las velocidades y presiones en tres zonas diferentes de un rompeolas sumergido, en donde las velocidades obtenidas indicaron que, velocidades entre 2.31 m/s a 3.79 m/s del lado expuesto de la estructura, la especie *PERCEBE Balanus Crenatus*, no puede sobrevivir de ese lado del rompeolas, el gasterópodo *Astraea undosa* puede sobrevivir bajo velocidades de 3.48 m/s los erizos *strongylocentrotus droebachiensis* así como las estrellas de mar *Asterias forbesi* no pueden ser desalojadas bajo velocidades de 7.5 m/s a 9.9 m/s por lo tanto, en este trabajo se puede deducir que bajo las velocidades obtenidas convertidas a escala real, dichas especies pueden instalarse en la zona de refugio creada por la estructura. En otros experimentos se ha medido la sensibilidad de la tasa de crecimiento de 3 especies alimentadoras de suspensión bentónica, *Balanus glandula*, *Semibalanus cariosus* y *Pollicipes polymerus*, comparando su crecimiento en ambientes de alta energía con flujo turbulento a velocidades alrededor de 2 a 15 cm/s, esto indica que las tasas de crecimiento son relativamente insensibles al flujo turbulento (Eckman & Duggins, 1993). Por consiguiente, las velocidades obtenidas en el rompeolas sumergido con piezas modulares, ofrecen las condiciones de velocidad propicias para que estas especies también puedan ser albergadas por la estructura.

## 5.2 Resultados del modelo sección transversal.

### 5.2.1 Funcionamiento hidráulico.

En las siguientes figuras se muestra la evolución de las alturas de ola cuadrática media asociada a la interacción de la estructura con el oleaje sobre los dos perfiles de playa. Cabe mencionar que en las gráficas, tanto los perfiles y las estructuras, se indican de manera representativa para ilustrar sus posiciones con respecto a las alturas de ola, por lo tanto, estos dos dibujos no se encuentran a escala. Otro punto que vale la pena aclarar para evitar algún mal entendido, es que en los ensayos solamente se colocó una estructura, en la gráfica se muestran dos, porque en la condición PEN el dique se encuentra más cerca de la playa, mientras que PES y PE30N comparten la misma ubicación.

La Figura 58 muestra la evolución de las alturas de ola cercanas a la estructura y la playa. Se puede observar que, en las condiciones PSE las alturas de ola disminuyen ligeramente conforme el oleaje se modifica por la presencia del perfil. Bajo la condición PEN, se puede ver que en la misma distancia del perfil las olas transmitidas son menores, esto se debe en parte a la reflexión provocada por la estructura, pues al estar la corona al nivel de la superficie, el talud de la estructura aumenta su reflexión, además al actuar como obstáculo cerca de la playa, disminuye el peralte de las olas y con ello modifica la rotura, dando como resultado una ola transmitida menor. En el caso de PES, donde la estructura tiene una sumergencia  $d_s=0.15m$ , no se aprecia una gran disminución en entre las

alturas de ola incidente y las transmitidas. No obstante, si se observan las alturas con PSE, se muestra que el dique en esa posición no genera un cambio notable en el comportamiento del oleaje, sin embargo, metros después de la estructura se puede percibir la variación, pues se tiene una menor altura incluso que en las condiciones PSE, además al sumar la disipación debido a la pendiente del perfil de playa, el oleaje que llegue a la costa será menos energético.

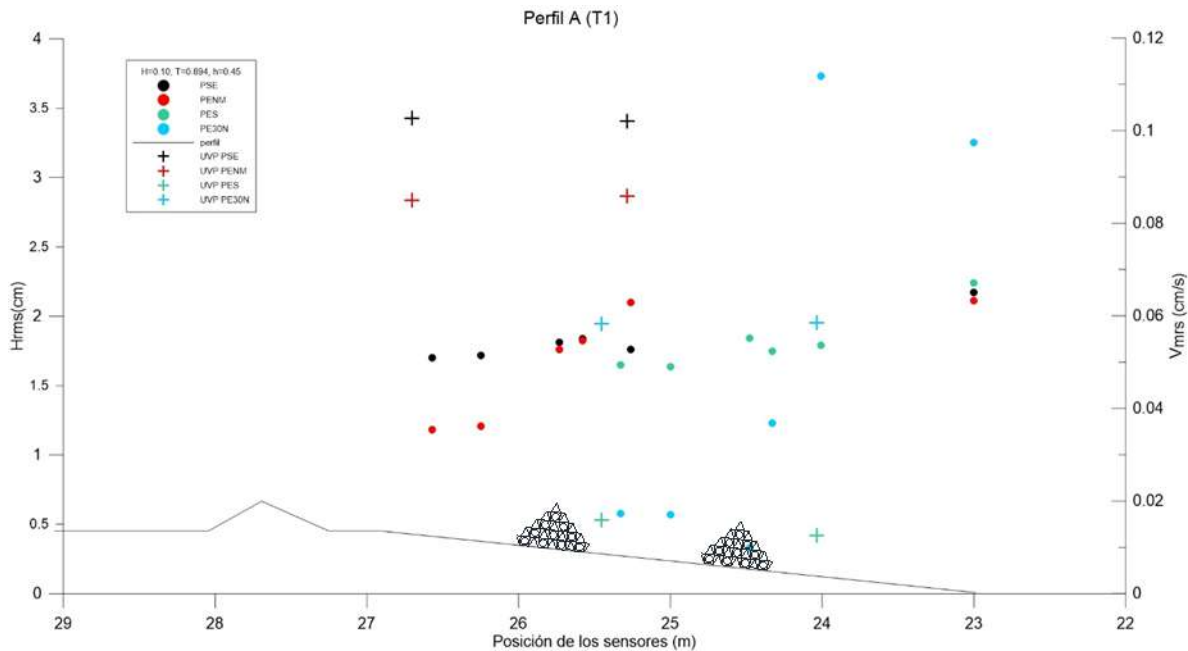


Figura 58. Interacción del oleaje con la estructura en diferentes posiciones del perfil bajo condiciones de Tormenta 1.

En la siguiente figura, se observa un comportamiento similar en PSE y PEN a las condiciones de la Tormenta 1, sin embargo, con T2, donde se tiene un periodo más grande y una profundidad mayor puesto que se representó el incremento de la superficie libre por marea de tormenta, la estructura sumergida PES, no genera un cambio sobre el oleaje pues se obtuvieron valores similares a cuando el perfil no tiene estructura, en el caso PE30N se observa que las alturas de ola transmitidas son mayores a las incidentes, esto debido al fenómeno de someramiento el cual se produce por la posición de la estructura sumergida la cual origina una reducción notable de la profundidad, siendo esta menor a la mitad de la longitud de onda, esto disminuye la velocidad de propagación y aumenta la altura de ola (Figura 59).

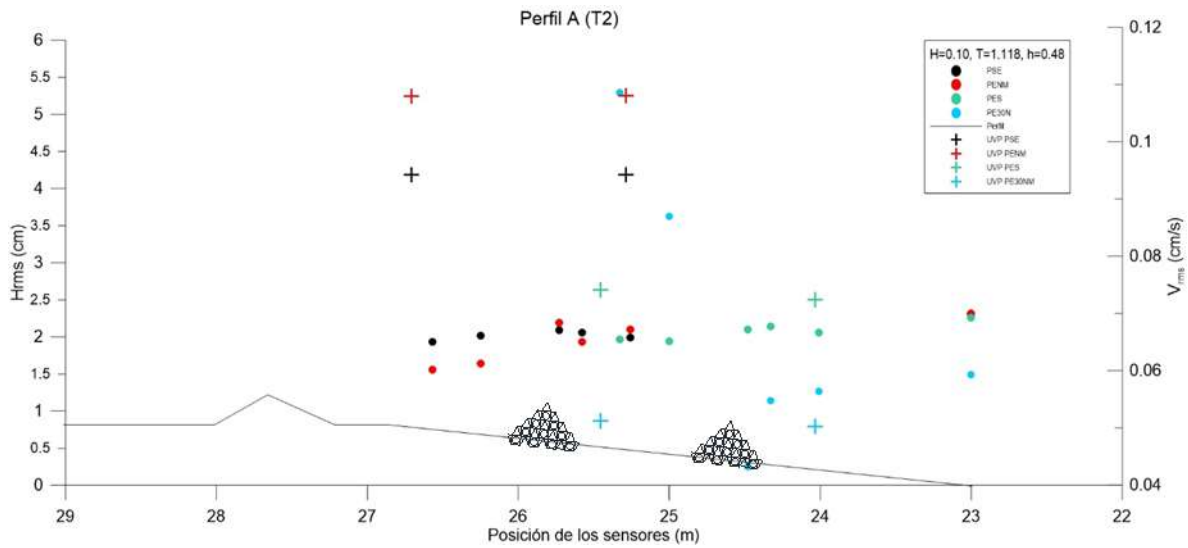


Figura 59. Interacción del oleaje con la estructura en diferentes posiciones del perfil bajo condiciones de Tormenta 2.

Debido a la diferencia de profundidades, bajo las condiciones de la tormenta 3 se presentaron menores alturas de ola comparado con T2. Bajo estos parámetros de oleaje, se muestra en las posiciones PEN y PES, en el lado protegido inmediatamente después de la estructura, que la altura disminuye, sin embargo, la siguiente altura sufre un incremento, esto quizás está asociado a la energía cinética turbulenta. En PE3ON las alturas transmitidas son menores a las olas incidentes, esto se puede explicar porque la corona del dique está a nivel de la superficie libre y el peralte es más grande, por lo tanto, superpone una barrera al oleaje, lo cual provoca la reducción de la ola.

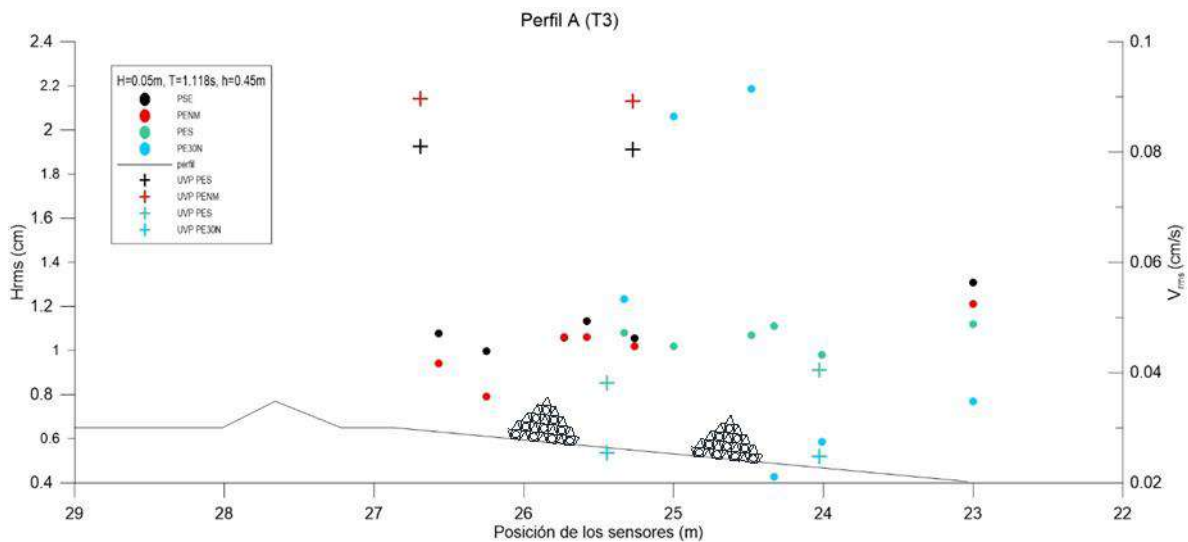


Figura 60. Interacción del oleaje con la estructura en diferentes posiciones del perfil bajo condiciones de Tormenta 3.

En el perfil B, bajo condiciones de tormenta 1, se observa que tanto para PEN y PES las alturas de ola disminuyen al pasar la estructura, sin embargo, en PES se percibe un descenso en las alturas transmitidas, comparado con las alturas presentadas al no tener estructura. Con PE3ON se aprecia que la altura justo antes de la estructura disminuye y al pasar el rompeolas, se crea un efecto que propicia el aumento de la altura de ola

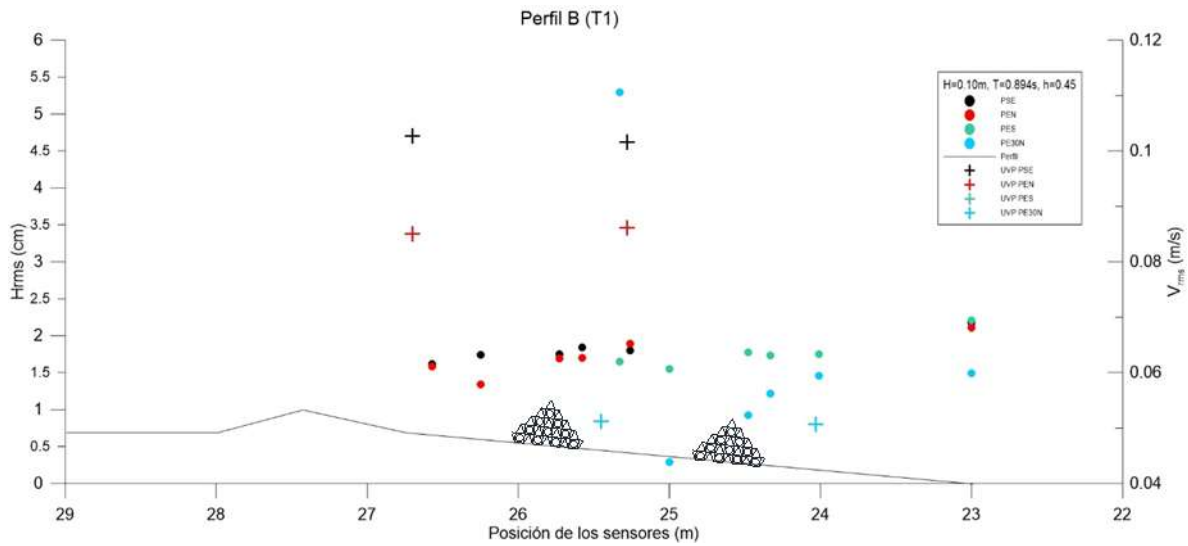


Figura 61. Evolución de alturas de ola, en diferentes zonas del perfil, bajo condiciones de tormenta 1 ( $H=0.10m, T=0.894s, h=0.45m$ ) con diferentes posiciones de la estructura.

En PSE y PEN las alturas obtenidas son del mismo rango, por lo que en esta posición de la estructura no disipa el oleaje. Caso contrario a PES donde las alturas de ola si son menores pasando la estructura. Además, en PE30N mostró una mejor eficiencia al reducir el oleaje después de la estructura, ya que las alturas se redujeron considerablemente, lo cual indica que, en condiciones de oleaje más severo, es recomendable que la estructura se encuentre más alejada de la playa y tenga un mayor peralte.

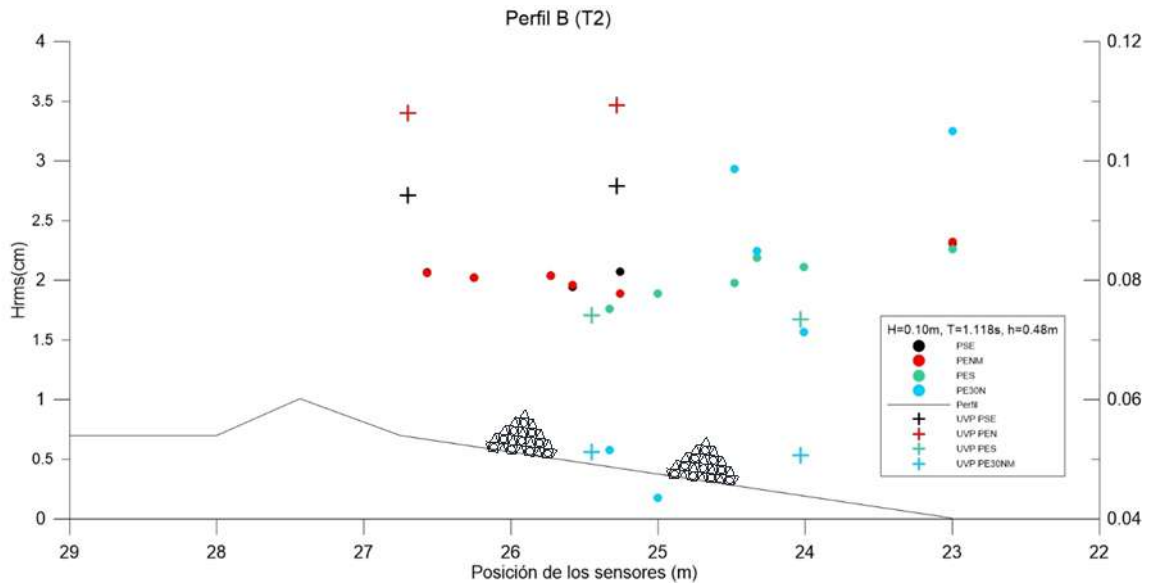


Figura 62. Evolución de alturas de ola, en diferentes zonas del perfil, bajo condiciones de tormenta 1 ( $H=0.10m, T=1.118s, h=0.48m$ ) con diferentes posiciones de la estructura

Comparado con las diferentes tormentas, se observa que la posición de la estructura juega un papel fundamental en la disipación de la energía. El caso de la tormenta 3, los ensayos PE30N señalan que, las alturas incidentes a la estructura disminuyeron, al igual que en el perfil A. Esto se puede explicar

con la relación que existe entre la corona del dique y el nivel de la superficie libre, ya que los dos se encuentran en uno mismo, además al ser mayor la altura de la estructura, superpone una barrera al oleaje, lo cual provoca la reducción de la ola y produce que el oleaje se peralte después del dique, por lo que se presenta un incremento inmediatamente y posteriormente vuelve a reducir la altura de ola. Por otro lado, el rompeolas sumergido no modifica de manera drástica el oleaje, puesto que las alturas de ola transmitidas no muestran una gran diferencia con respecto a las olas incidentes.

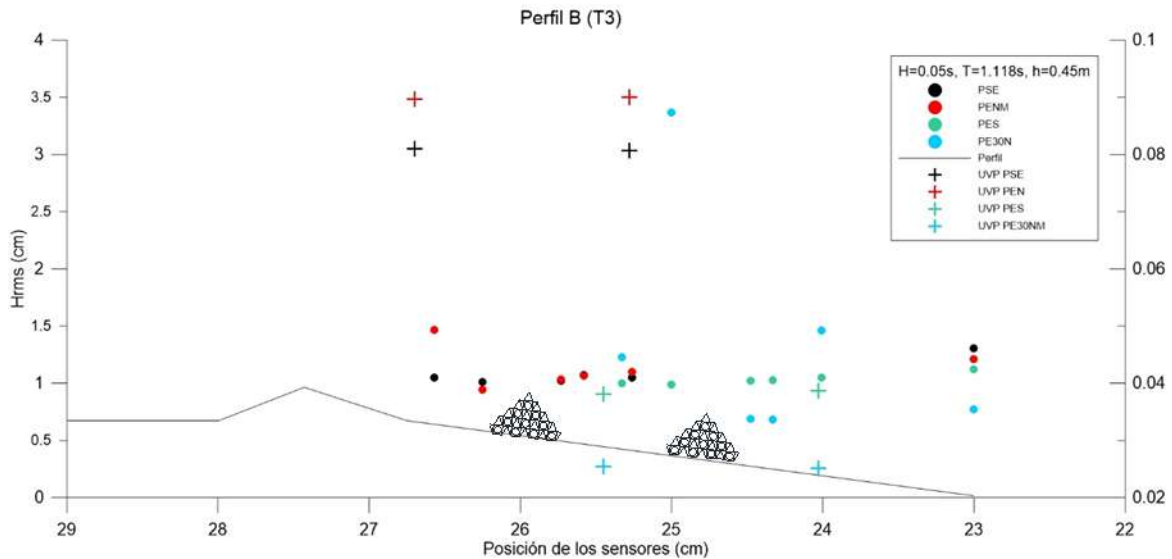


Figura 63. Evolución de alturas de ola, en diferentes zonas del perfil, bajo condiciones de tormenta 1 ( $H=0.10m$ ,  $T=1.118s$ ,  $h=0.48m$ ) con diferentes posiciones de la estructura

Como se observó en los resultados anteriormente descritos, el oleaje sufre transformaciones debido al someramiento, lo cual sucede cuando las ondas comienzan a sentir el fondo o se encuentran con algún obstáculo, por lo tanto, la velocidad y la longitud disminuyen. Si, se asumen que el flujo de energía se mantiene constante, la energía por unidad de área cambia y en aguas someras la altura de ola aumenta siempre y cuando el periodo del oleaje se mantenga constante (Sharif Ahmadiand, 2016).

Estos efectos pueden comprenderse claramente por medio de espectros, pues además del someramiento, el oleaje presenta otros fenómenos como la transmisión y la reflexión. Para continuar con la descripción de los resultados de la interacción del oleaje y la estructura, en seguida se describen los espectros de energía incidentes, transmitidos, reflejados y disipados obtenidos en los diferentes ensayos, con la finalidad de tener una mayor comprensión del oleaje.

En el perfil A bajo condiciones PEN T1 se observó que cerca de la playa se tiene una mayor energía, sin embargo, en esta posición de la estructura se observa que la energía transmitida es menor después de la estructura, esto debido a la fricción que se produce al pasar el oleaje través de ella, lo cual indica que el oleaje llega a romper con mucho menor energía, además de ser disipado por la propia pendiente del perfil ( ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. a)). En condiciones PEN T2, se nota un incremento en la energía comparada con el ensayo T1, esto debido a la sobre elevación que existe, el oleaje al sentir el obstáculo provoca que se peralte, por lo tanto, se tiene más energía al pasar la estructura, por ello dependiendo de la profundidad, la ola romperá antes de

llegar a la playa, protegiendo así el perfil (Figura 64 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** b)). Bajo condiciones PEN T3 se observa que la energía es mucho menor a las condiciones de T1 y T2, esto debido a que la altura de ola es de 0.05 [m] y no se presentan sobreelevaciones.

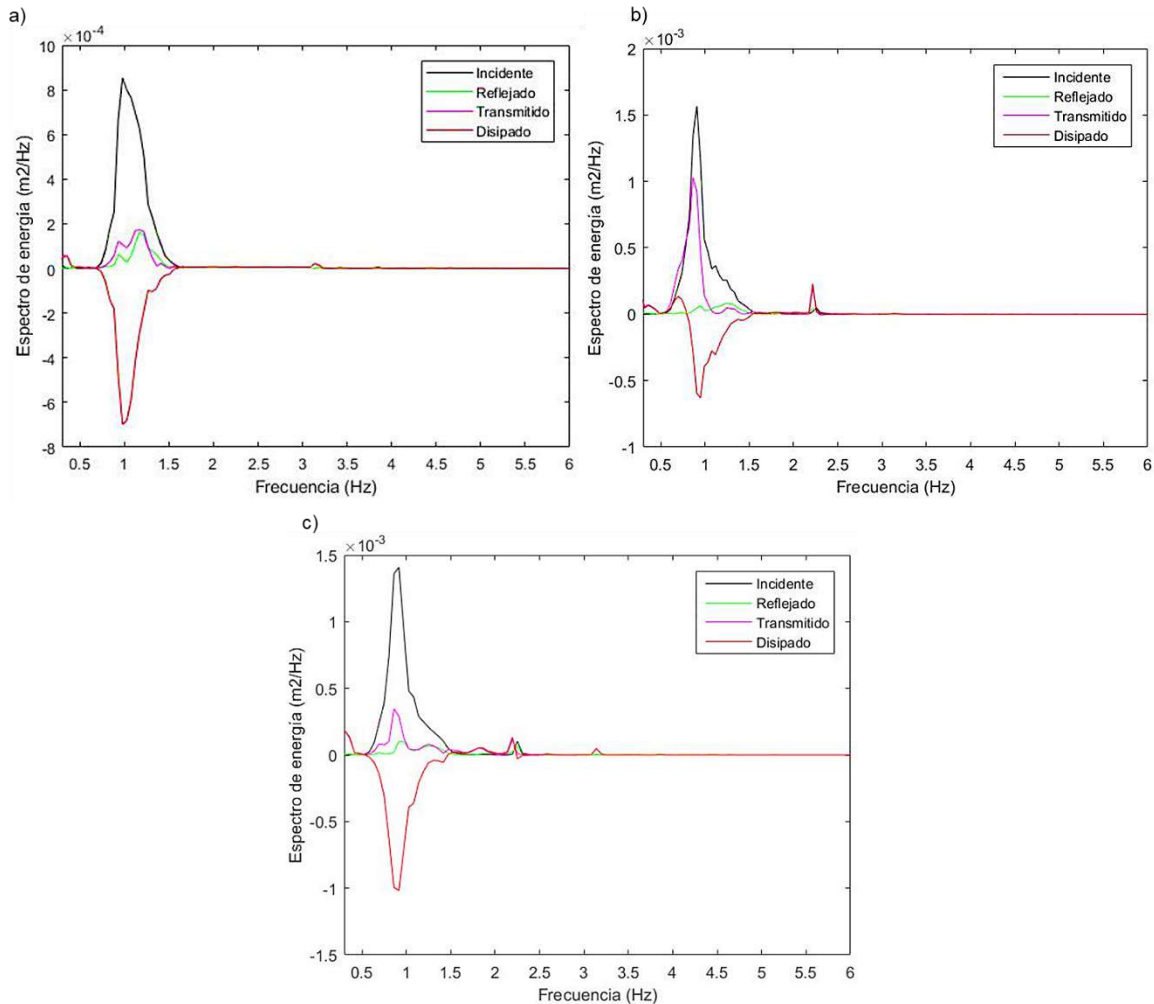


Figura 64. Espectro incidente (negro) y transmitido (rojo), obtenidos en condiciones de Tormenta a) T1, b) T2, c) T3.

Bajo las condiciones del oleaje de tormenta T1, con la estructura de 0.30 [m] y la corona colocada a NM, se observa que la estructura logra disipar la energía transmitida (Figura 65 a)), sin embargo para condición de tormenta T2 se observa que la energía transmitida es mucho mayor a la incidente, el efecto se ve producido por el peraltamiento y la rotura de la ola provocado por la estructura, es por ello que la energía después de la estructura se incrementa, no obstante, la altura de ola y energía que llega a la playa es menor. Para las condiciones de tormenta T3 sucede el mismo efecto, sin embargo, al ser una altura de ola menor a las otras dos tormentas, la energía es mucho menor, aun así, se produce el mismo efecto donde el oleaje transmitido es más enérgico que el incidente (Figura 65 c)).



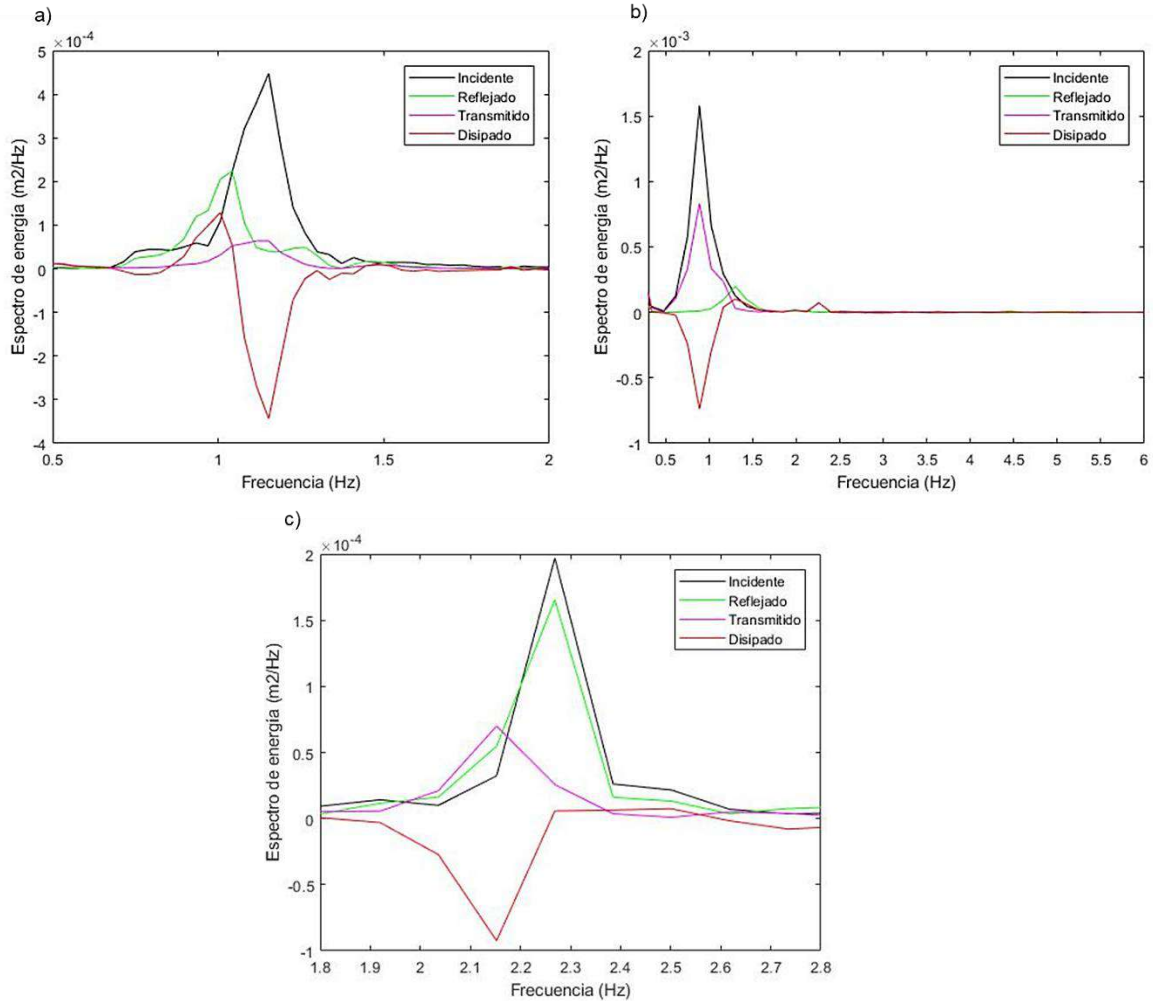


Figura 65. a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con un peralte de la estructura de 0.30m.

En los ensayos de la estructura sumergida sometida a diferentes condiciones de tormenta, se observa que la disipación de la energía es producida por el rompimiento de la estructura, ya que el oleaje al llegar a la playa tiene una menor altura a la profundidad que se encuentra sumergida la estructura, se observa que el oleaje percibe ligeramente el obstáculo, peraltando la ola (Figura 66 a) ), cuando se presentan condiciones de tormenta con sobreelevación, se nota que la energía transmitida es menor, esto debido a la fricción que produce la estructura (Figura 66 b) ), para las condiciones de tormenta T3 el espectro transmitido es similar al incidente, esto debido a que la altura de ola es menor, además la profundidad a la cual se encuentra el obstáculo no es percibido por el oleaje.

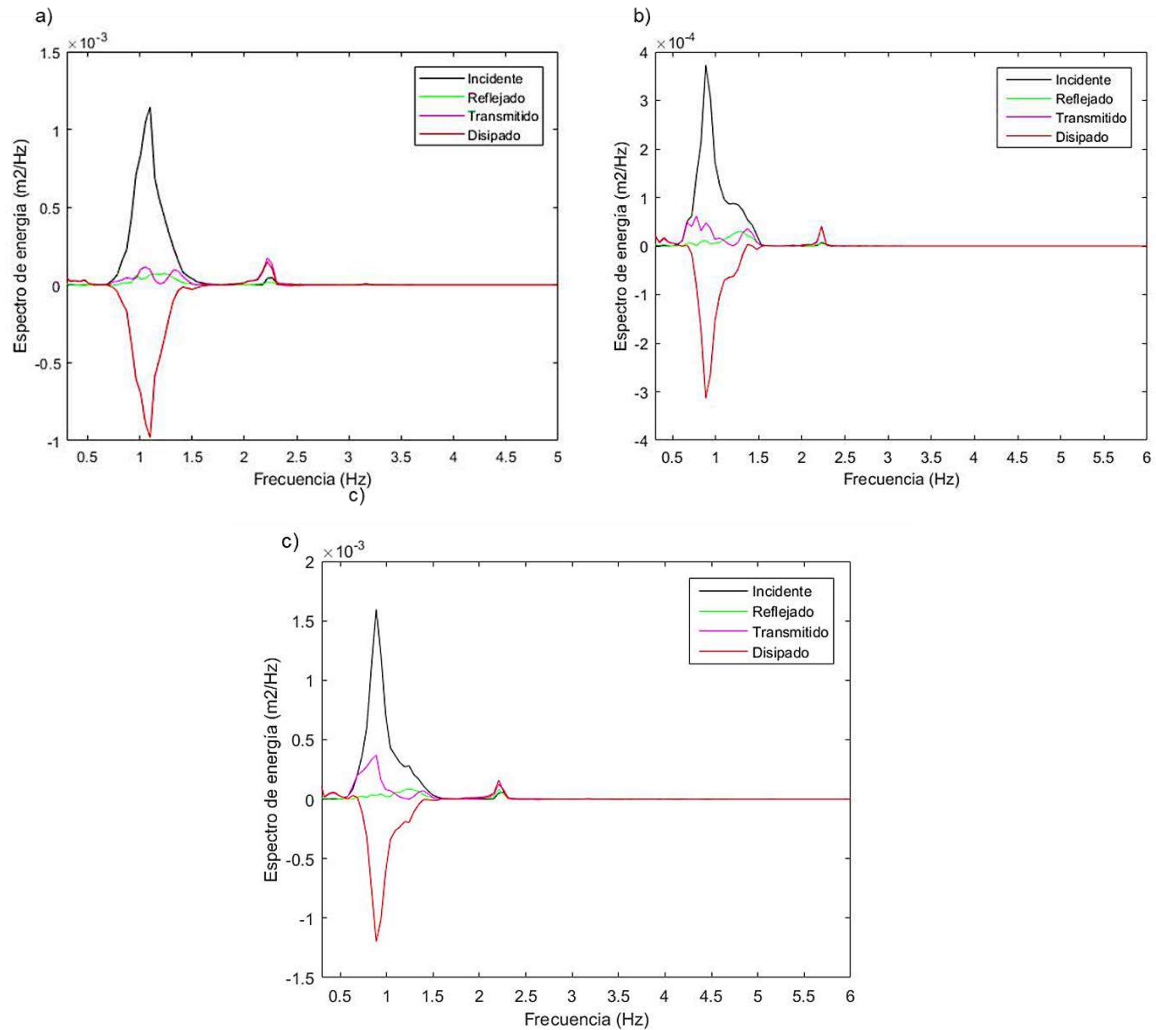


Figura 66 a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con presencia de la estructura sumergida 0.15m.

En los ensayos del perfil B PEN T1 se observa que en la posición que se encuentra la estructura, la energía incidente ya es baja, además la energía transmitida disminuye al sobrepasar el obstáculo, esto debido a la pendiente que tiene el perfil y a la fricción que produce el rompeolas sumergido. Las condiciones T2 son más enérgicas comparadas con la T1, en este ensayo se logra observar el incremento de energía transmitido debido al peraltamiento de la ola. En las condiciones T3, la energía incidente y transmitida son poco energéticas, sin embargo, el rompeolas causa el mismo efecto donde se amplifica la energía transmitida.

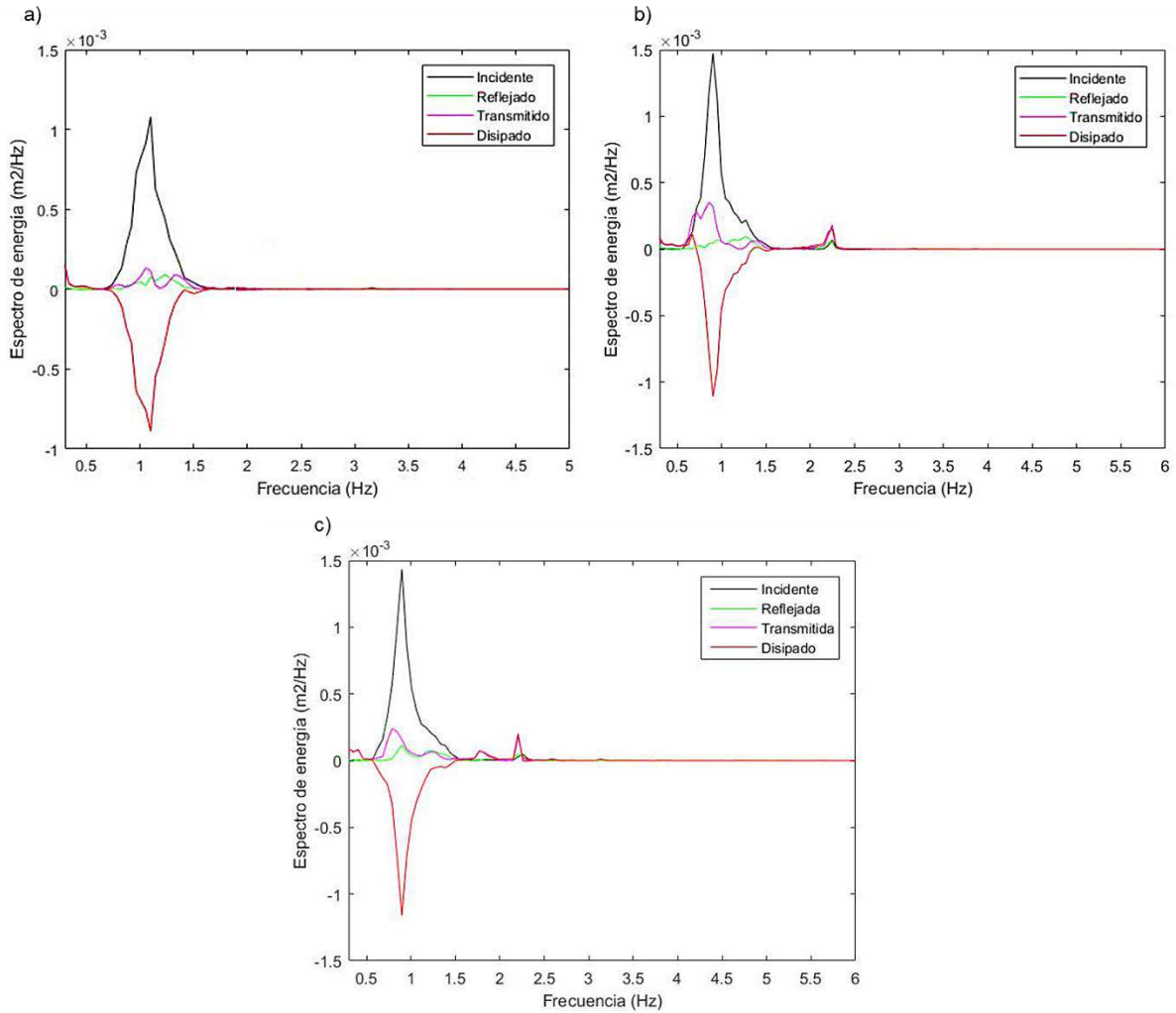


Figura 67 a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con presencia de la estructura a NM.

En los ensayos PE30NM T'3 y T2 (Figura 68 a) y c)) la estructura produce una amplificación de la energía, en los dos casos existe una sobre elevación del NM lo cual produce que el oleaje sea peraltado y provoque la rotura. Para la condición T'2 (Figura 68 c)) la estructura disipa la energía por medio de la fricción y turbulencia provocada al pasar a través de ella.

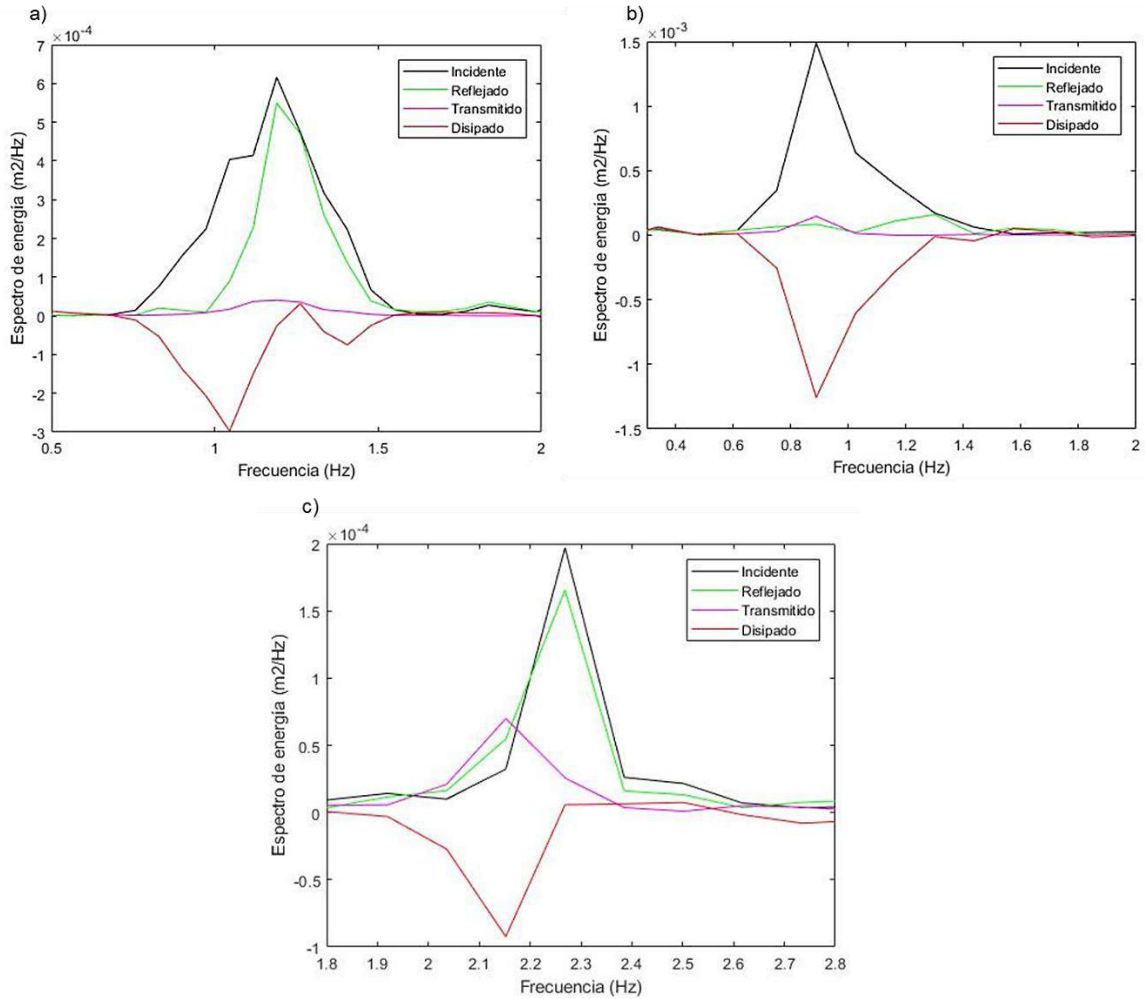


Figura 68. Espectro en condiciones de tormenta T'3, b) Espectros en condiciones de T'2, c) Espectro den condiciones de T2 obtenidos con estructura de 0.30m de peralte.

En los ensayos perfil B PES se observa el funcionamiento de la estructura como un disipador de energía, esto debido a su función de crear fricción y permitir cierta transmisión. En las condiciones T3, el cambio que produce el rompeolas en el oleaje es imperceptible.

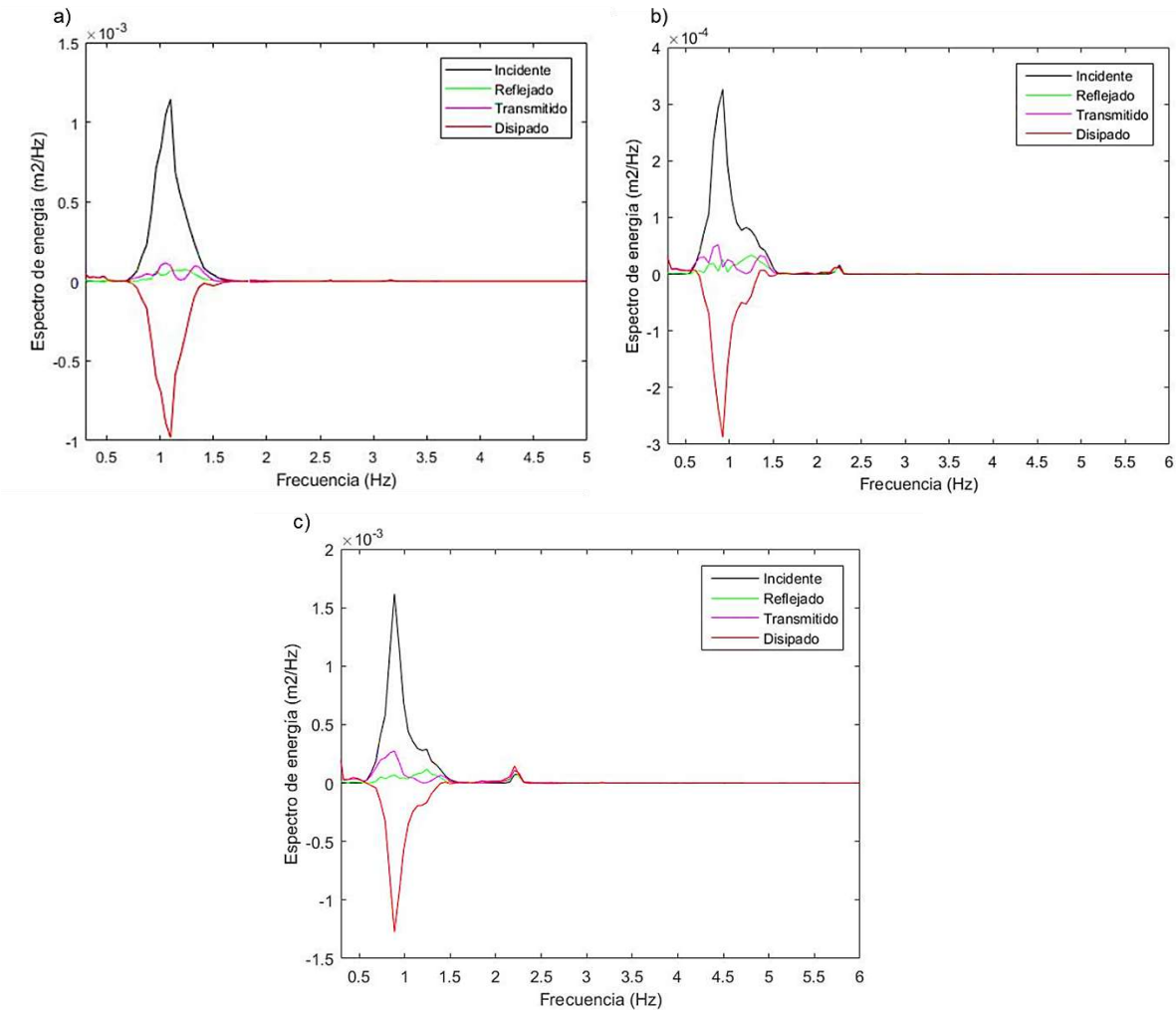


Figura 69. a) Espectro en condiciones de tormenta T1, b) Espectros en condiciones de T2, c) Espectro den condiciones de T3 obtenidos con presencia de la estructura sumergida.

En la interacción del oleaje con la estructura, se conoce que, sobre la corona del dique, se transfiere la principal energía de la onda hacia frecuencias armónicas más altas, sin embargo, esto podría verse modificado en algún grado por la reflexión y la ruptura de las olas, así como la disipación de la energía por medio de la fricción, permeabilidad y flujo a través de la estructura.

Si se observa con detenimiento los resultados de los espectros transmitidos y disipados del perfil A y B, puede notarse que entre la frecuencia 2 y 2.5 se presenta un incremento de energía. Esto puede ser debido a que después de la corona del dique se desarrollan frecuencias altas, los componentes del oleaje se separan de los fundamentales y viajan con su propia celeridad (Funke & Mansard, 1979).

El espectro transmitido usualmente es diferente al incidente, la rotura del oleaje sobre la estructura puede generar dos ondas o más en aguas protegidas. Esto debido a que se encuentra mayor energía en frecuencias altas que para el oleaje incidente, cuando la disipación de energía está dirigido principalmente por la fricción que genera la estructura al ser atravesada (van der Meer, Briganti, et. al., 2005).

### 5.2.1.1 Coeficientes.

En la Figura 70 se observa que los valores de coeficiente de reflexión más bajos corresponden cuando la corona de la estructura está a nivel de la superficie libre y  $H/L$  es de 0.03, se puede observar que la estructura con mayor peralte (PE30N), mostró porcentajes de reflexión entre 0.30 a 0.40, sin embargo, con  $H/L=0.08$  la reflexión fue aún mayor, mientras que la estructura sumergida presentó una relación donde al incrementar  $H/L$  el valor de  $K_r$  disminuye. Mientras que los coeficientes de transmisión más bajos se presentaron cuando el nivel de la corona se encontraba a nivel de superficie libre, y con un peralte  $H/L$  entre 0.02 y 0.06, por supuesto al estar la estructura sumergida  $K_t$  aumentó, sin embargo, se observó que mientras  $H/L$  disminuye la transmisión aumenta.

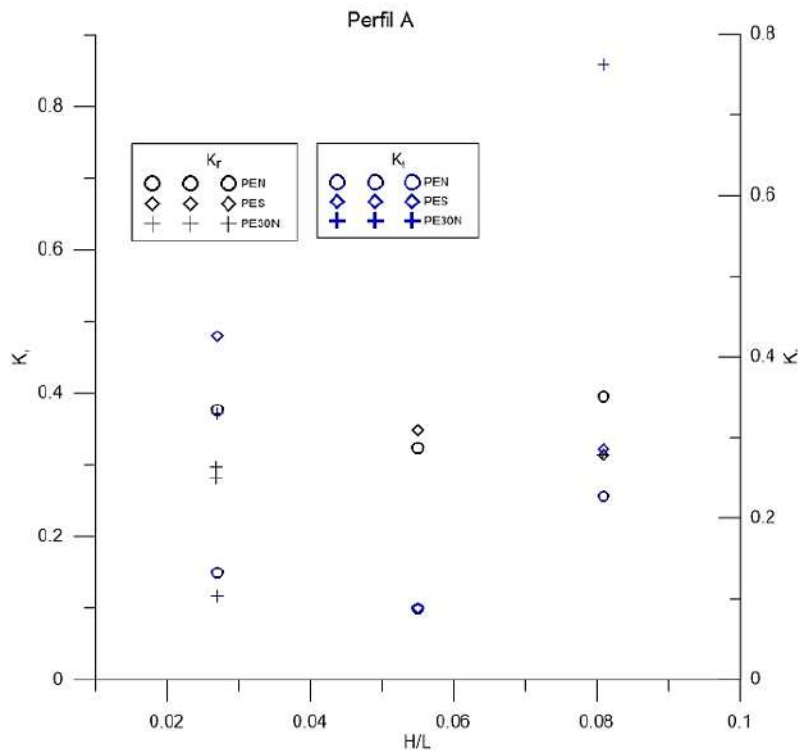


Figura 70. Coeficientes  $K_r$  y  $K_t$  perfil A.

En el perfil B se obtuvieron valores de reflexión más altos comparados con el perfil A, se observó en el ensayo PE30N, valores altos entre 0.6 y 0.9 aún con un peralte de ola  $H/L=0.02$ , por otra parte, los ensayos PEN se obtuvieron coeficientes de reflexión entre 0.30 a 0.40 en  $H/L=0.02$ , 0.05, 0.08, lo que cual indica que en esa profundidad el rompeolas funciona como amortiguador del oleaje, mientras que en los ensayos con la estructura sumergida los valores de reflexión fueron menores. En cuanto a los coeficientes de transmisión los valores más bajos se presentaron con el peralte de ola  $H/L=0.05$  y la estructura colocada a una profundidad de sumergencia  $d_s=0$ . Como se puede observar los coeficientes además de relacionarse con el peralte de ola, también son influidos por la sumergencia de la estructura.

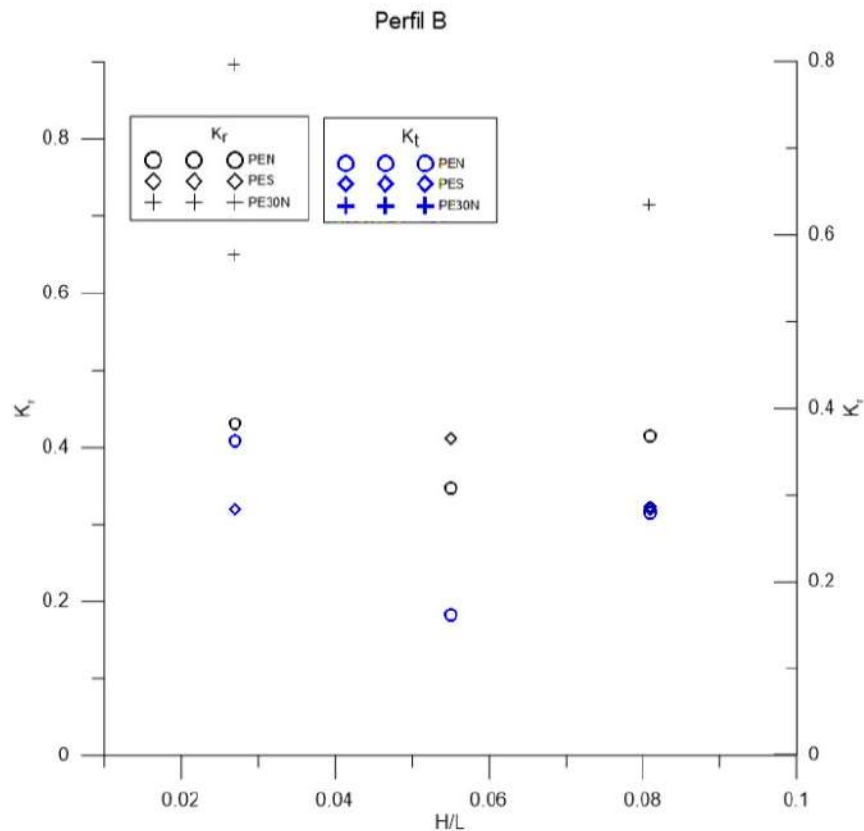


Figura 71. Coeficientes  $K_r$  y  $K_t$  perfil B.

Monroy (2013), en sus ensayos sobre rompeolas sumergido con piezas modulares, observó una cierta tendencia a la disminución del coeficiente de reflexión conforme el parámetro adimensional  $F_b/H_i$  aumenta, es decir, conforme la sumergencia de la estructura tiende a aumentar y la altura de ola a disminuir. Además los ensayos mostraron una mayor influencia de la estructura sobre el oleaje cuando el nivel de la corona se encuentra más cerca del nivel de superficie libre, esto debido a que la mayor parte del oleaje incide sobre el talud de la estructura lo cual refleja gran parte de la energía, los resultados obtenidos en este trabajo con los perfiles A y B son similares a los de Monroy, sin embargo, se debe tener en cuenta que la pendiente del perfil de la playa tiene una influencia sobre el oleaje además de la estructura.

En los resultados obtenidos por (Blenkinsopp & Chaplin, 2008), muestra los coeficientes de transmisión con respecto a los valores del peralte de ola entre  $0.0174 \leq H_o/L_o \leq 0.0691$ , los cuales caen aproximadamente en una sólo línea, lo que sugiere en su caso que la transmisión depende sólo de la relación de la profundidad de la cresta del arrecife con la altura de ola. Sin embargo, para pendientes menores a 0.0174,  $K_t$ , disminuye cuando el peralte de la ola es menor para una sumergencia dada. La mayoría de los ensayos dieron por resultados valores de  $K_t$  bajos, particularmente para los casos en los que se tuvo una baja cota de sumergencia. Así mismo para los resultados obtenidos en este trabajo en ambos perfiles se encontró que los valores más bajos de  $K_t$  son cuando la corona del dique se encontró a nivel de la superficie libre, es decir la sumergencia ( $d_s$ ) = 0. Esto podría ser debido al cambio en la profundidad debido al rompeolas sumergido y el oleaje siente el fondo se peralta y la rotura de las olas. Por lo tanto, una vez que la rompiente fue

modificada, el oleaje pierde su capacidad de recrearse nuevamente y la energía después de la estructura es menor, por ende, también la transmisión. La siguiente Figura 72 muestra la turbulencia creada a partir de la estructura, además la imagen intermedia permite observar la reflexión que produce el talud de la estructura, por su parte, la imagen izquierda se observa el oleaje transmitido, además se percibe claramente la interacción de la altura de ola con el dique.



*Figura 72. Hidrodinámica de la estructura con el nivel de la corona a nivel de superficie libre.*

Durante los ensayos se observó que la estructura no sufrió ningún tipo de daño, ya que no se presentó deslizamiento, vuelco o piezas averiadas. Por lo anterior, se considera que el dique modular sumergido es una estructura estable. La Figura 73 muestra la estabilidad de la estructura al ser sometida a condiciones extremas como lo es una tormenta con sobreelevación de marea.



*Figura 73. Respuesta de la estructura en condiciones de oleaje de tormenta.*



### 5.2.2 Respuesta morfológica.

El transporte de sedimentos es un proceso esencial en la morfodinámica de la costa. El sedimento puede ser transportado por el viento, el oleaje las corrientes y las interacciones existentes de estos agentes. La estabilidad de la zona costera depende principalmente del movimiento de sedimentos (Felix Delgado, 2014). Por consiguiente, es importante conocer el comportamiento del perfil de playa, para entender los cambios en la evolución de la línea de costa y tener una mejor comprensión sobre los problemas que pueden presentarse en la playa. Uno de los problemas más comunes como ya se ha mencionado anteriormente es la erosión. Por ello, en este trabajo se buscó conocer la respuesta dos perfiles de playa, ante diferentes escenarios de oleaje con y sin la presencia de la estructura sumergida. En los siguientes apartados se describirán los resultados obtenidos a partir de los ensayos.

#### 5.2.2.1 Perfil A

A continuación, se describen los resultados del comportamiento del perfil con las condiciones de oleaje propuestas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 4). Se puede observar que el perfil sufrió grandes variaciones en la sección de la duna bajo las condiciones T3, las condiciones T1 y T2 la duna aportó material a lo largo de la berma y el talud, donde se formaron pequeñas barras antes de la estructura.

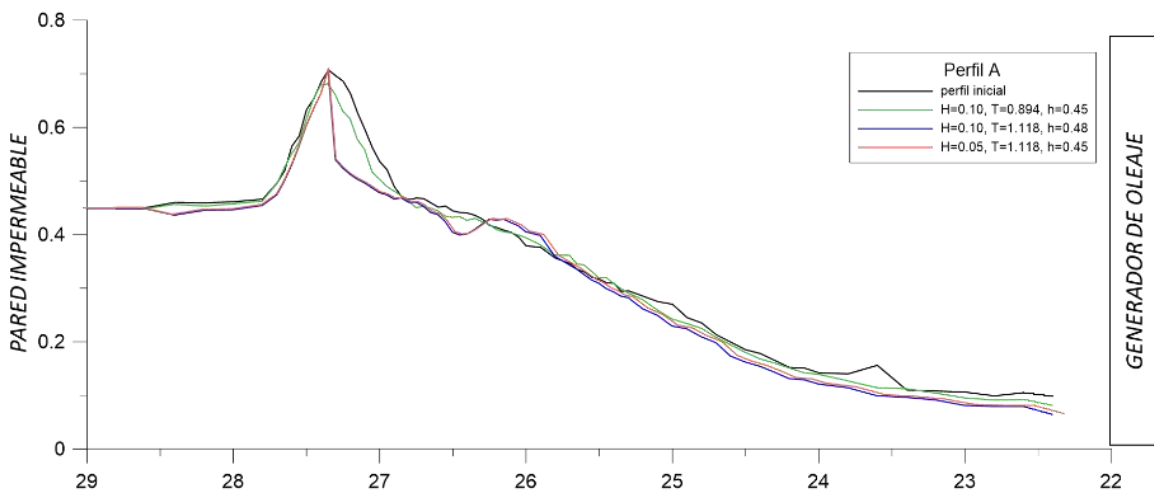


Figura 74. Comportamiento del perfil A bajo condiciones de tormenta, sin estructura.

Se calculó el volumen de sedimento removido y depositado en la longitud de perfil, con la finalidad de conocer el transporte de sedimentos y con ello su equilibrio. La Tabla 5 muestra los volúmenes para cada tipo de ensayo, se observa que bajo las condiciones de T2 se presentó un mayor movimiento de sedimentos.

Tabla 5. Cálculo del volumen de material removido, sin estructura.

ENSAYO		ACRECIÓN(m <sup>3</sup> )	EROSIÓN (m <sup>3</sup> )
PSE	T1	0.006	0.011
	T2	0.026	0.070

| T3            0.001            0.008

En las siguientes figuras se muestra la respuesta del perfil de playa sin la presencia del dique sumergido, antes de realizar el ensayo. Se optó por presentar las imágenes de los cambios más representativos, en estos casos serán los ensayos con condiciones de tormenta.



Figura 75. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap  $H=0.05m$ ,  $T=1.118s$ ,  $h=0.45m$ .

La Figura 76 muestra la interacción del oleaje playa –duna bajo condiciones de tormenta, la cual mostró un régimen de erosión tipo colapso, puesto que se produjo un escarpe en la cara expuesta de la duna.

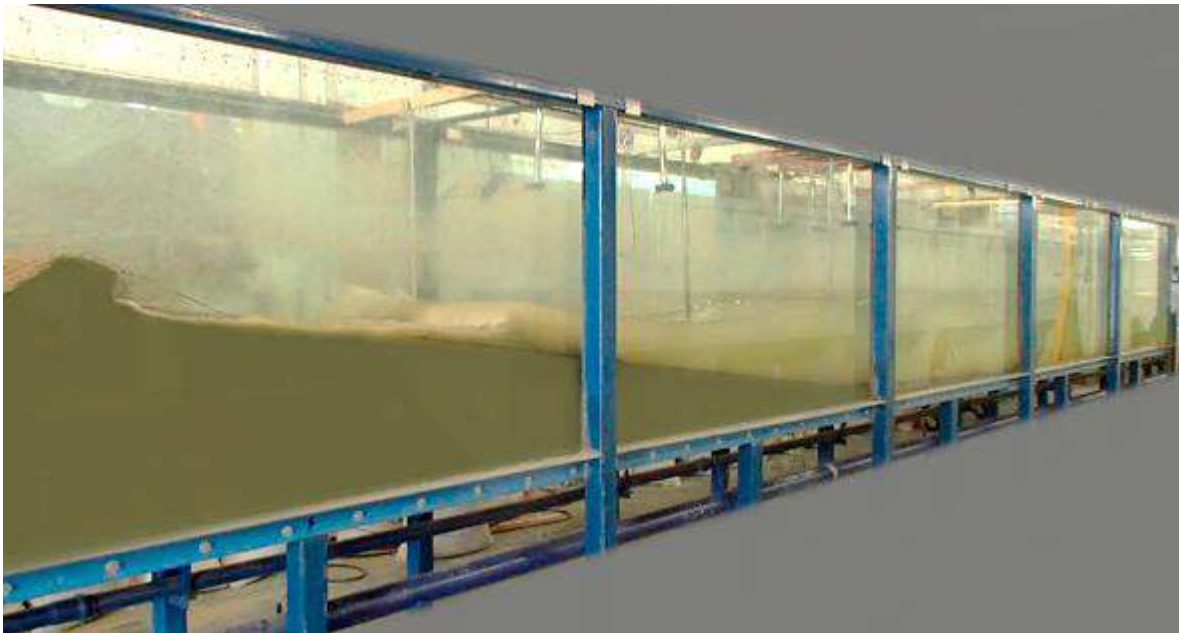


Figura 76. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap  $H=0.10m$ ,  $T=1.118s$ ,  $h=0.48h$ , respuesta morfodinámica sin estructura de protección

El Perfil A con la estructura colocada a NM (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), en condiciones de tormenta T2 y T3 se observa que la duna pierde material, el cual es depositado en la pendiente antes de la estructura, por lo tanto, la posición de la estructura permite retener sedimento. Comparado con los ensayos PSE se observa que gran cantidad de material es retenido frente a la estructura y no a lo largo de todo el talud del perfil, situación la cual ayudaría en caso de presentarse un desequilibrio en el perfil y la playa sufriera de erosión, puesto que, al formarse las barras por presencia de la estructura de lugar se va generando una zona de amortiguamiento, la cual proveerá de sedimentos al perfil cuando las condiciones de oleaje sean de régimen medio, dando la oportunidad en un periodo largo de tiempo a que se estabilice.

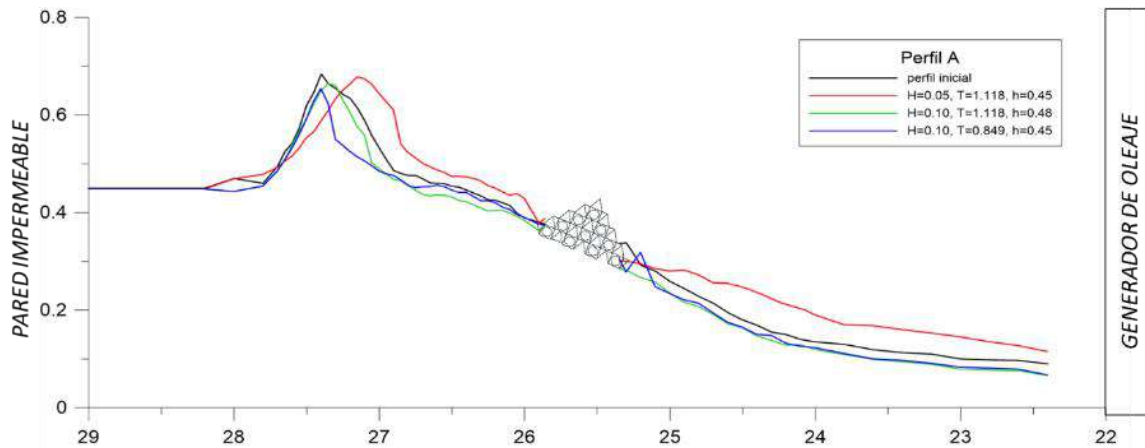


Figura 77. Respuesta del perfil A, ante condiciones de tormenta con la estructura a NM.

En este ensayo se logra observar que las condiciones T2 provocaron mayor erosión en el perfil de playa. Mientras en las condiciones de T1 se observa un depósito importante sobre la parte baja del perfil después de la estructura, esto se pudo deber a un movimiento de sedimento por medio de los orificios de las piezas, las cuales al presentarse velocidades más bajas comparadas con T2 y T3 lograron depositarse (Tabla 6).

Tabla 6. Volúmenes de acreción y erosión en el perfil A bajo distintas condiciones de tormenta, con presencia de la estructura.

ENSAYO		ACRECIÓN(m <sup>3</sup> )	EROSIÓN (m <sup>3</sup> )
PENM	T1	0.047	0.002
	T2	0.009	0.132
	T3	0.004	0.008

Por otra parte, la interacción del oleaje de la playa con presencia del dique sumergido, mostró menor daño erosivo en la cara expuesta de la duna, puesto que el resultado del escarpe tiene menor altura comparado con el ensayo PSE.



Figura 78. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap  $H= 0.10m$ ,  $T=1.118s$ ,  $h=0.48m$

La siguiente imagen permite observar los múltiples procesos que se presentan en la playa, la interacción del oleaje con la estructura sobre el perfil y la dinámica de la rotura del oleaje con la duna (Figura 79).

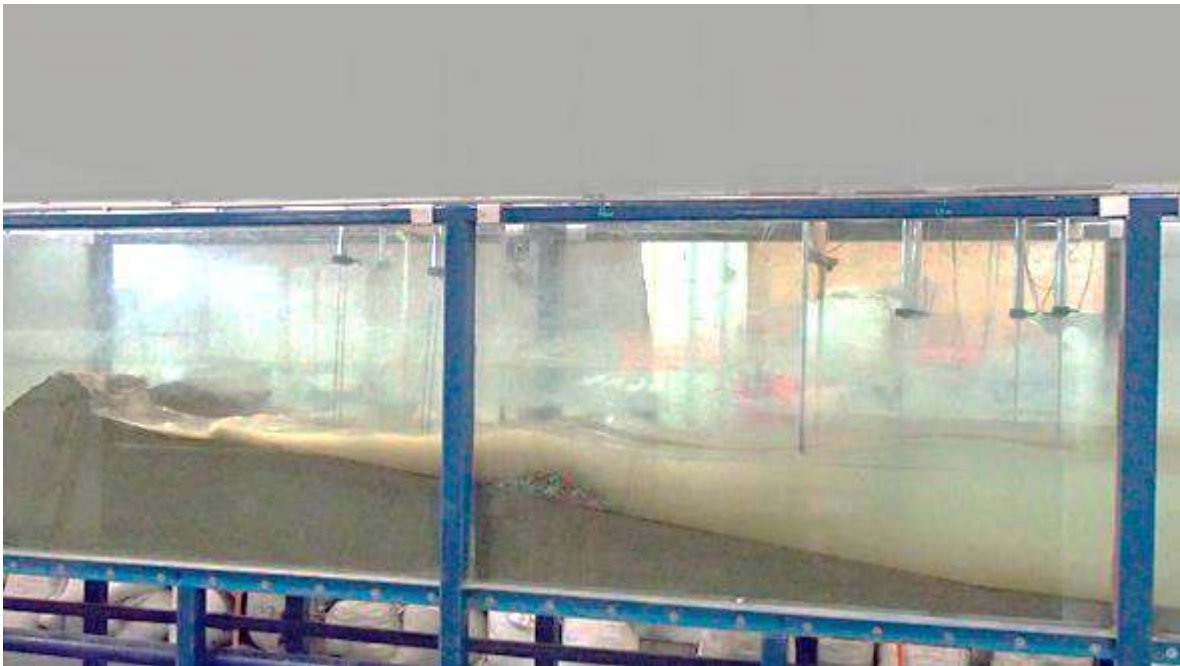


Figura 79. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap  $H=0.10m$   $T=1.118s$ ,  $h=0.48m$ . Respuesta del perfil de playa con presencia de la estructura.

Se muestra la respuesta final del perfil ante las condiciones de oleaje de tormenta, comparado con el ensayo PES, se observa que el perfil de daño erosivo es swash ya que sólo se dañó la parte baja de la cara expuesta de la duna.



Figura 80.  $H=0.05m$   $T=1.118s$ ,  $h=0.45m$

En los ensayos PES se observan grandes variaciones a lo largo del perfil de playa, sin embargo, material de la duna, se depositó en la zona de rompiente formando una barra, además de ello, parte del volumen de sedimentos se depositó detrás de la estructura, esto debido al francobordo, pues no representa completamente una barrera, ya que permite la transmisión del oleaje y está trabajando sólo como un amortiguador de este. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

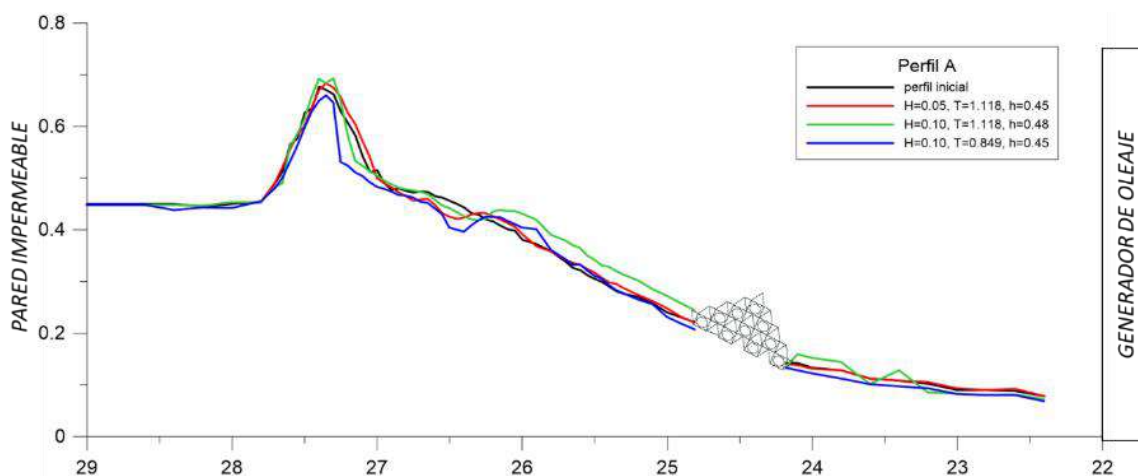


Figura 81. Perfil A bajo condiciones PES.

En la relación de volúmenes se percibe que el volumen de material aportado por la duna es mayor al erosionado en las condiciones T1 Y T2, sin embargo, en T3 hubo más erosión que acreción (Tabla 7).

Tabla 7. Volumen de material removido en presencia de oleaje de tormenta, con la estructura sumergida.

ENSAYO		ACRECIÓN (m <sup>3</sup> )	EROSIÓN (M <sup>3</sup> )
PES	T1	0.020	0.007
	T2	0.022	0.010
	T3	0.002	0.015

La Figura 82 permite observar la modificación de la duna derivada de la interacción del oleaje con el perfil, parte de los sedimentos removidos se depositaron antes del dique y cierto porcentaje de sedimentos en suspensión se depositaron a lo largo del perfil después de la estructura. El tipo de daño erosivo que se presentó sobre la duna fue colapso. Comparado con el ensayo anterior, se puede señalar que la estructura tiene un mejor funcionamiento como protección a la duna, cuando se encuentra ubicada más cerca de la zona de rompiente y la corona del dique coincide con el nivel medio del mar.



Figura 82.  $H=0.10m$   $T=1.118s$ ,  $h=0.48m$

En los ensayos PE30N el perfil mostró una mejor respuesta ante las diferentes condiciones de tormenta comparada con la respuesta obtenida en los ensayos PEN Y PES. Esto se debe a la altura del dique y la relación de franco bordo (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Con

una estructura más alta la transmisión del oleaje se redujo considerablemente, creando condiciones de menor energía.

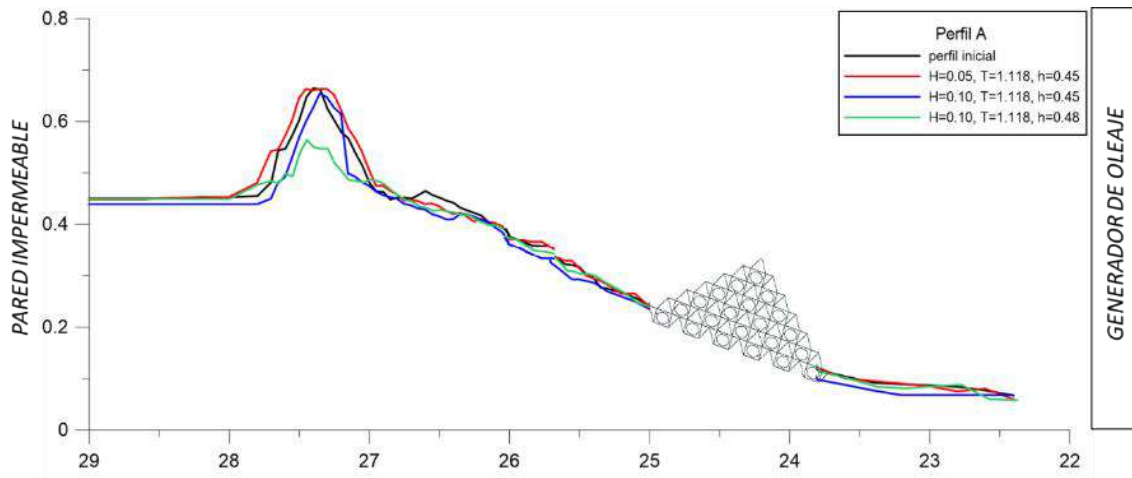


Figura 83. Respuesta del Perfil A, bajo las condiciones de tormenta con una estructura de mayor peralte.

Se puede observar que solamente bajo la condición de tormenta más severa, la duna perdió un poco de su material, sin embargo, se redistribuyó en la zona de la berma (Tabla 8).

Tabla 8. Volúmenes de sedimento removido bajo las condiciones de oleaje de tormenta con estructura de 0.30 m.

ENSAYO		ACRECIÓN (m <sup>3</sup> )	EROSIÓN (m <sup>3</sup> )
PE30N	T'3	0.020	0.002
	T'2	0.005	0.007
	T2	0.005	0.110

Colocar la estructura más lejos de la zona de rompiente, ayuda para amortiguar el oleaje transmitido a la costa, sin embargo, enfocándose en la protección de la duna, se observó que la posición en la cual se colocó el dique en los ensayos PE30N, permitió un daño erosivo tipo inundación en la parte central de la duna. Se puede observar en la Figura 84.



Figura 84. Perfil A, construido con arena, sometido a oleaje irregular con espectro Jonswap  $H=0.10\text{m}$ ,  $T=1.118\text{s}$ ,  $h=0.48\text{m}$ . respuesta morfodinámica con estructura de protección con peralte de  $0.30\text{m}$ .

#### 5.2.2.2 Perfil B.

En los ensayos del perfil B bajo las condiciones PEN, se observa que la configuración de la duna cambió por acción del oleaje, sin embargo, parte de ese material al acomodarse formó una duna, disminuyendo la pendiente original, permitiendo así tener una mayor zona de estrán.

Los ensayos PEN en el perfil B, presentaron variaciones en la configuración de la duna, ya que gran parte de su material fue removido, lo que permitió la formación de una berma antes de la estructura, por lo que respecta al perfil después del dique se observó que los niveles se mantuvieron (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

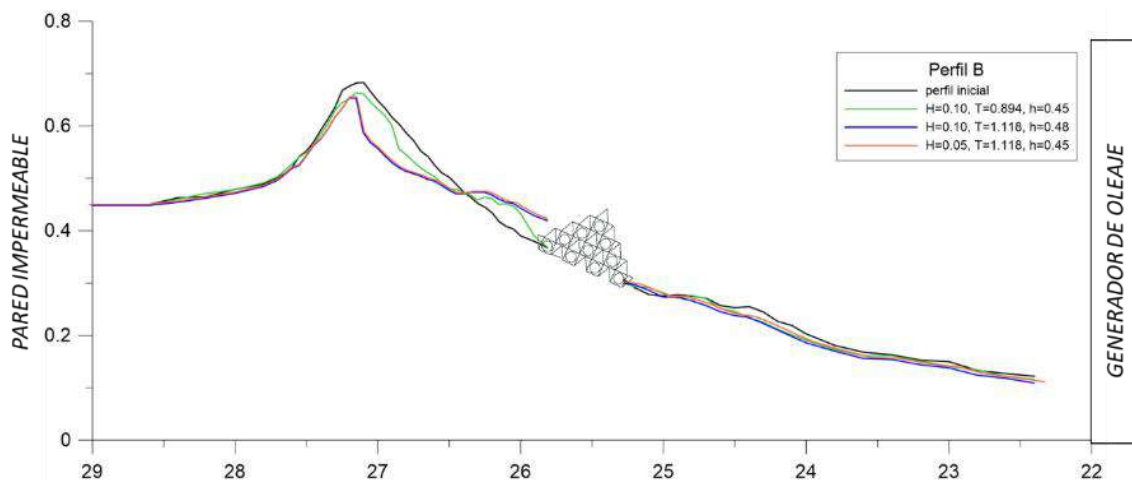


Figura 85. Respuesta del perfil B, ante condiciones de tormenta con la estructura a NM.

En el cálculo de volumen se aprecia que se tuvo más erosión que acreción en el perfil de playa, ante las diferentes condiciones de tormenta presentadas.



Tabla 9 . Volúmenes de sedimento removido bajo las condiciones de oleaje de tormenta con estructura colocada a Nivel.

ENSAYO		ACRECIÓN (m <sup>3</sup> )	EROSIÓN (m <sup>3</sup> )
PEN	T1	0.003	0.055
	T2	0.010	0.021
	T3	0.0004	0.011

Para los ensayos PES se observa que la duna sufre una mayor pérdida de sedimentos, esto es debido a que la estructura sumergida solo disipa una parte de la energía del oleaje, se observa claramente que el oleaje puesto en suspensión se deposita antes del dique formando una barra, después de esta, los niveles se mantuvieron sin variaciones significativas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

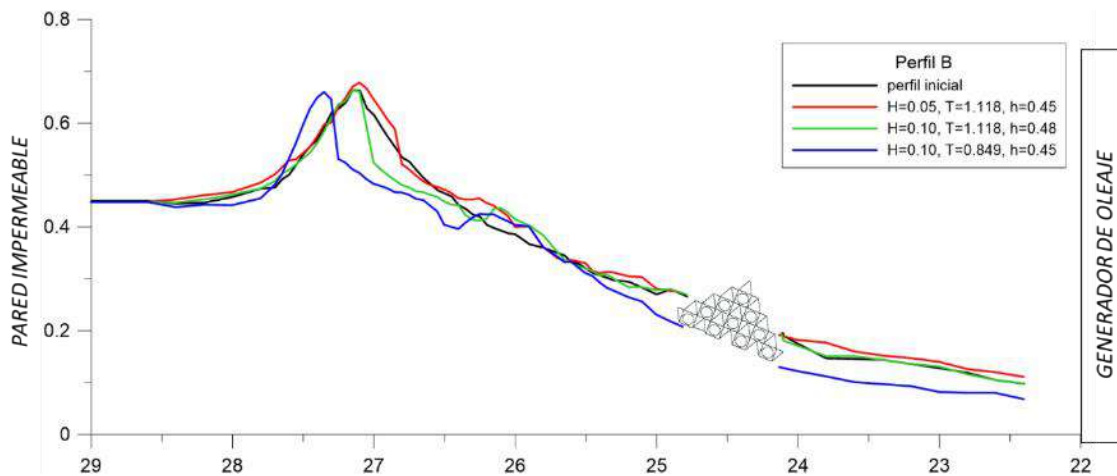


Figura 86. Perfil B bajo condiciones PES.

Tabla 10. Comparación de volúmenes de erosión y acreción en los ensayos PES.

ENSAYO		ACRECIÓN (m <sup>3</sup> )	EROSIÓN (m <sup>3</sup> )
PES	T1	0.009	0.013
	T2	0.013	0.027
	T3	0.001	0.013

El perfil B con la estructura de 0.30 m a nivel medio mostró menores cambios en su nivel, lo cual indica que a esa distancia de la costa y en esa posición, el perfil se encuentra protegido y le permite mantener su pendiente original, sin embargo, bajo la condición más adversa de tormenta la duna llega a perder material, mismo que es depositado antes de la estructura (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

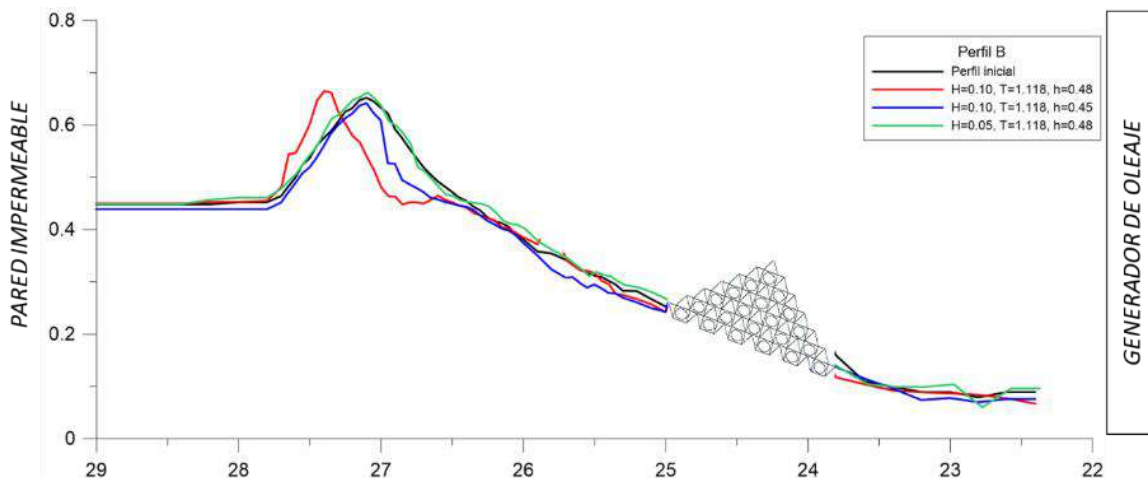


Figura 87. Respuesta del Perfil B, bajo las condiciones de tormenta con una estructura de mayor peralte.

En estos ensayos se observa un menor volumen de sedimento en erosión, comparado con los resultados obtenidos en los ensayos anteriores.

Tabla 11. Volúmenes de erosión y acreción en los ensayos PE30N.

ENSAYO		ACRECIÓN (m <sup>3</sup> )	EROSIÓN (m <sup>3</sup> )
PE30N	T'3	0.005	0.002
	T'2	0.006	0.008
	T2	0.007	0.009

El transporte de sedimentos se da como resultado de las corrientes inducidas por el oleaje, principalmente en la zona de rompientes y es el principal proceso que determina el perfil de playa. También se puede presentar fuera de la zona de rompientes, ya sea hacia la costa o hacia el mar, lo cual permite la generación de bermas en tierra y las barras sumergidas en el mar (Silva et al., 2011), tal como se observó en los ensayos PEN y PES de ambos perfiles, en los cuales se formó de una barra antes del dique. Esto es un resultado positivo, pues en condiciones severas de oleaje, tanto bermas como barras son de suma importancia para el transporte de sedimento y el desarrollo de los sistemas de dunas, ya que vuelven a poner el sedimento en circulación dentro de la zona de surf. Por lo tanto, el dique sumergido con piezas modulares, puede funcionar como estrategia de preservación en el manejo integral costero frente a los problemas de erosión.

Por otra parte, se puede afirmar que las condiciones representadas en los ensayos y con los resultados obtenidos, este tipo de estructura ayuda a mantener el equilibrio del perfil, bajo el concepto de (Komar, Paul D., 1997). Este autor menciona que el equilibrio de una playa depende del balance que existe entre la acreción y la erosión que se dé en ella. Pues los resultados muestran una relación entre el volumen erosionado de la duna con el volumen de acreción (formación de barra).

Para el diseño y la ubicación de las estructuras sumergidas es de vital importancia comprender los procesos locales de transporte de sedimento y el impacto esperado en la morfología costera con la construcción de estas. Sin embargo, no se debe limitar la observación del área en la cual será construida la estructura, debe ser estudiado por lo menos la longitud de la costa en la cual es relativamente autónoma en lo que respecta al movimiento de arena y otros sedimentos y donde la interrupción de tales movimientos no tendrá algún efecto significativo en el transporte de sedimentos en zonas aledañas (Zyserman, *et al.*, 2005).

## 6 Capítulo. Conclusiones.

La rotura del oleaje es el proceso de disipación de energía turbulenta más importante en los procesos dinámicos de la costa. Este fenómeno desempeña un papel central en la reducción de las alturas de ola, así como en la creación de corrientes cercanas a la costa, lo cual es un factor importante en el transporte de sedimentos (Del Vita, 2016). Los ensayos PE30N provocaron un aumento de energía al pasar la estructura, esto debido a la turbulencia producida por la pendiente de ésta, sin embargo, se observó que la posición y peralte del rompeolas logró proteger mejor el perfil de playa, comparado con las otras dos posiciones del dique, puesto que el perfil final mantuvo su forma inicial y los volúmenes tanto de acreción como de erosión fueron similares, lo cual indica que se mantuvo en equilibrio.

Cuando la corona de la estructura se encuentre a NM se sugiere que la estructura se posicione alejada de la playa, esto con el fin de que el oleaje pueda romper antes de llegar a la playa y su energía pueda ser disipada, de lo contrario si la estructura se encuentra demasiado cerca, el oleaje romperá con mayor energía provocando que la pendiente del perfil sea modificado o erosionado. Al presentarse condiciones extremas, como tormentas, la estructura produce un incremento de energía, esto por la influencia de la sumergencia del dique, como consecuencia, con mayor profundidad, mayor concentración de energía cerca de la superficie, por lo que fácilmente es transmitida a través de la estructura (Del Vita, 2016). Algunos trabajos se han enfocado en diseñar rompeolas sumergidos multifuncionales, donde se busca la focalización de la energía o para generar zonas de Surf, así como también una solución ambiental (Black & Mead, 2001).

Usualmente, para la protección de costas es frecuente el uso de estructuras rígidas y aún es percibida como una de las mejores estrategias de gestión para atacar el problema de erosión, sin embargo se ha visto que no necesariamente es la mejor opción, se han encontrado problemas a consecuencia de ello, como aceleración de la erosión frente a la estructura, alteración en el suministro de sedimento, modificación al transporte longitudinal (Gracia et al., 2018), sin embargo, ese resultado negativo no es solamente por el uso de soluciones rígidas, se observó que la distancia de la estructura y su nivel de sumergencia con respecto a la playa debe de tomarse en cuenta dentro del diseño de los rompeolas sumergidos, con la finalidad de no incrementar la energía que llega a la línea de costa. En los ensayos PES y PENM aun en condiciones de tormenta, el dique modular sumergido ayudó a la formación de una pequeña barra después de la berma, esta condición podría permitir en un periodo de tiempo la recuperación del equilibrio del perfil y evitar así su erosión.

El dique modular sumergido puede ser utilizado para solventar diferentes soluciones en la costa. Cuando se busca disipar energía y recuperar el sedimento con el objetivo de crear barras o semi tómbolos entonces la corona de la estructura debe estar a NM y ser posicionada cerca de la línea de costa, esta condición no podría ser una solución ecológica para la colonización de especies bentónicas puesto que la rotura pone en suspensión los sedimentos y el exceso de éstos es desfavorable para algunas especies, como por ejemplo los corales. Si se busca disipar la energía y estabilizar el perfil entonces la estructura debe ir sumergida, así la energía es disipada por la fricción, el oleaje rompe con menor intensidad y se crea gradualmente una barra la cual con el tiempo permitirá volver a un perfil en equilibrio, además de ello se proporcionarán condiciones en el flujo para la distribución de organismos autótrofos y bentónicos, favoreciendo así la riqueza de especies

y la protección de la línea de costa. Si el objetivo principal es la restauración de un hábitat o evitar la presión de las pesquerías en el fondo marino por métodos de pesca de arrastre, el dique modular sumergido funcionaría como zona de refugio cuando se encuentre sumergida lejos de la zona de rompiente.

Existen casos tan graves en los cuales la solución más viable y rápida es la construcción de estructuras rígidas, sin embargo, éstas deben ser diseñadas de manera que modifiquen lo menos posible las condiciones del entorno en el cual serán construidas. Además, se deberá tomar en cuenta factores ecológicos y proponer una solución amigable al medio ambiente.

Por otra parte, el funcionamiento hidráulico del dique sumergido homogéneo, se encontró que con pendientes de ola menores la transmisión disminuye, mientras que en los coeficientes de reflexión influyen más la sumergencia del dique, entre mayor sea  $d_s$  la reflexión es menor. Se observó que gran parte de la energía disipada se obtuvo por fricción, pues los orificios y la configuración de las piezas crean turbulencia, permitiendo tener zonas de calma después del dique homogéneo. El dique mostró gran estabilidad, puesto que no se generaron deslizamientos o se encontraron piezas removidas, aún en las condiciones de oleaje más adversas que se probaron en los ensayos.

Con los resultados de los modelos físicos se concluye que el dique sumergido homogéneo puede actuar tanto como protección para la regeneración de playa como para crear zonas de abrigo a la vez, pero no podría funcionar como arrecife artificial. Si se utiliza como herramienta del manejo integral costero para inducir el inicio de nuevas cadenas tróficas en ciertas áreas de restauración, como consecuencia disipará cierta energía del oleaje, pero no ayudará a proteger el perfil de playa.

## 6.1 Futuras líneas de investigación

Este trabajo es una primera aproximación hacia conocer el funcionamiento hidrodinámico y morfológico de la pieza modular con orificios. Hace falta realizar más ensayos de laboratorio para lograr comprender de mejor manera los parámetros de reflexión, transmisión y difracción, generados a partir del dique.

Para lo anterior, se propone llevar a cabo más pruebas de laboratorio, modificando el ancho de la corona del dique para determinar la transmisión después de la estructura, ya que es uno de los parámetros que está relacionado con ésta. En este trabajo se mantuvo un ancho de corona constante, sin embargo, se tiene la limitante que la altura del dique siempre estará en función del ancho de la corona, puesto que, para hacerlo más alto se requiere una base más amplia, lo que podría generar un sobre costo a la hora de construir el dique. Aun con ello, la estructura puede ser tan alta como se requiera sin que el dique falle por tensión.

Continuando con la línea de investigación se puede trabajar en encontrar el número de estabilidad ( $K_d$ ) de la pieza, puesto que en este trabajo no se analizó la estructura hasta llevarla a la falla, y conocer así sus límites. Además, puede trabajarse sobre ajustar la fórmula para la obtención de los coeficientes de transmisión con la pieza modular.

Considerando que usualmente, el suelo en el cual se colocan las estructuras de protección costera, (en este caso un dique sumergido con piezas modulares), está conformado principalmente por arenas, se requiere desarrollar la propuesta del método constructivo, con la finalidad de describir el proceso de colocación de las piezas invertidas ( $180^\circ$ ) en los ejes externos de la estructura. Pues la parte superior de la pieza quedaría enterrada en el suelo, para funcionar como contención para las piezas inferiores que conforman la base y a partir de ahí se desplante la estructura. Puesto que al ser piezas con geometría regular y tener una superficie lisa, no se tendría fricción entre el suelo y la estructura, sino que se mantendría en sitio por su propio peso, sin embargo, se podría producir algún deslizamiento de las piezas debido a la acción del oleaje y provocar la falla de la estructura. En los espacios que quedan entre las piezas externas se pueden producir vórtices los cuales generan socavación en las esquinas de las piezas, se recomienda que en la capa de desplante todas las piezas queden alineadas, es importante no dar lugar a la creación de estos vórtices para evitar dicho fenómeno, puesto que podría llegar a generar la falla del dique. Es importante dar una solución integral, para asegurar el éxito del funcionamiento del dique. Pues tanto el diseño hidráulico y estructural como su construcción determinan que una obra sea eficiente, estable y cumpla con su periodo de vida útil, a su vez esto se traduce en menores costos de mantenimiento y por lo tanto en ahorros a largo plazo.

Otros puntos a observar en futuros trabajos, sería la respuesta morfológica del perfil de playa ante el dique sumergido en todo un ciclo donde se pase de régimen medio a oleaje de tormenta y nuevamente a régimen medio para comprobar que el dique sumergido efectivamente ayudaría a conseguir el perfil de equilibrio, además se podría ampliar el estudio hacia la respuesta de la duna, también podrían modelarse casos en los cuales las condiciones de oleaje lleguen a destruir la berma y analizar de qué manera influye la presencia de la estructura para encontrar la estabilidad del perfil de playa.

En lo referente a cuestiones ecológicas, se propone realizar ensayos con peces para observar su comportamiento frente al oleaje y contemplar si efectivamente encuentran un refugio en el dique, si las velocidades son adecuadas para las especies propuestas.

## 7 Bibliografía.

- Ahrens, J. P. (1987). CHARACTERISTICS OF REEF BREAKWATERS. In *Technical Report CERC (US Army Engineer Waterways Experiment Station Coastal Engineering Research)*.
- Alagan Chella, M. et al. (2015). Characteristics and profile asymmetry properties of waves breaking over an impermeable submerged reef. *Coastal Engineering*, 100, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.03.008>
- Baine, M. (2001). Safety Effectiveness of Highway Design Features: Cross Sections. Volume III. *Ocean & Coastal Management*, 44, 19. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=368401>
- Barragán, J. M., & de Andrés, M. (2015). Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean and Coastal Management*. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.004>
- Bird, L. y J. Molinelli, 2001. El calentamiento global y sus consecuencias Los arrecifes de coral. pp. 5 Revisado junio 2014
- Black, K., & Mead, S. (2001). Design of the Gold Coast reef for surfing, public amenity and coastal protection: surfing aspects. *Journal of Coastal Research*, (29), 115–130. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/10.2307/25736210>
- Blenkinsopp, C. E., & Chaplin, J. R. (2008). The effect of relative crest submergence on wave breaking over submerged slopes. *Coastal Engineering*, 55(12), 967–974. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.03.004>
- Bohnsack, J. A. (1991). Habitat structure and the design of artificial reefs. *Habitat Structure*, (Chapter 1), 412–426. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3076-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3076-9_20)
- Bruce Tom, Van der Meer, J. (2006). *a Comparison of Overtopping Performance of*. 1–14.
- Burcharth, H. F., & Lamberti, A. (2007). Summary of the DELOS Project. *Environmental Design Guidelines for Low Crested Coastal Structures*, (Chapter 12), XV–XVIII. <https://doi.org/10.1016/b978-008044951-7/50020-8>
- Calabrese, M., Vicinanza, D., & Buccino, M. (2008). 2D Wave setup behind submerged breakwaters. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.03.005>
- Castañeda, F. et al., 2007. Importancia de los arrecifes rocosos del norte del golfo de california
- Chyon, M. S. A., Rahman, A., & Rahman, M. A. (2017). Comparative study on hydrodynamic performance of porous and non-porous submerged breakwater. *Procedia Engineering*, 194(December), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.136>
- Dattatri, J., Raman, H., & Shankar, N. J. (1979). PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SUBMERGED BREAKWATERS. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.130>
- DEAN, R. G. (1973). *HEURISTIC MODELS OF SAND TRANSPORT IN THE SURF ZONE*.
- Dean, R. G., Chen, R., & Browder, A. E. (1997). Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/S0378->

3839(96)00028-2

- Del Vita, I. (2016). *Hydraulic response of submerged breakwaters*. 258. <https://doi.org/Report No. 80-1>
- Donnelly, J. P., Cleary, P., Newby, P., & Ettinger, R. (2004). Coupling instrumental and geological records of sea-level change: Evidence from southern New England of an increase in the rate of sea-level rise in the late 19th century. *Geophysical Research Letters*, 31(5), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2003GL018933>
- Eckman, J. E., & Duggins, D. O. (1993). Effects of Flow Speed on Growth of Benthic Suspension Feeders. *The Biological Bulletin*, 185(1), 28–41. <https://doi.org/10.2307/1542128>
- Edwards A. J., E. D. Gómez. 2007. Restauración Arrecifal. Conceptos y recomendaciones. Revisión 2013. <http://www.gefcoral.org>
- Espejel, I. y Bermúdez, R., 2009. Propuesta metodológica para la regionalización de los mares mexicanos, Regionalización de los mares mexicanos para el ordenamiento ecológico marino, pp. 145-224.
- Felix Delgado, A. (2014). *Gestion de zonas costeras contécnicas estocásticas multicriteerio*. Universidad de Granda.
- Fernández-Muerza, A. 2010. Arrecifes artificiales para proteger la vida marina. Actualizado el 15 de marzo de 2010. Revisado 2013
- Firth, L. B., Thompson, R. C., Bohn, K., Abbiati, M., Airoldi, L., Bouma, T. J., ... Hawkins, S. J. (2014). Between a rock and a hard place: Environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures. *Coastal Engineering*, 87, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.015>
- Funke, E. R., & Mansard, E. P. D. (1979). *On the synthesis of realistic sea states in a laboratory flume*.
- Goda, Y., & Suzuki, Y. (1977). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. IN: *PROC. FIFTEENTH COASTAL ENGNG. CONF. (HAWAII UNIV. U.S.A., JUL.11-17,1976)*. <https://doi.org/10.9753/icce.v15.47>
- Gomez Pina, G., & Fernandez de Alarcon, V. J. M. (1991). Experiments on coastal protection submerged breakwaters. A way to look at the results. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*. <https://doi.org/10.1061/9780872627765.121>
- Gourlay, M. R. (1996). Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealised two dimensional horizontal reef. *Coastal Engineering*. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(96\)00008-7](https://doi.org/10.1016/0378-3839(96)00008-7)
- Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J. A., & Williams, A. T. (2018). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean and Coastal Management*, 156, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.009>
- Hans Hanson, N. C. K. (1989). GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. *Coastal Engineering Research Center Vicksburg Ms*. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2010.01428.x>
- Helene, B. (2006). Introduction to Coastal Processes & Geomorphology. *Journal of Coastal Research*.



[https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2006\)22\[1589:br\]2.0.co;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2006)22[1589:br]2.0.co;2)

- Johnson, H. K., Karambas, T. V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D., & Caceres, I. (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.011>
- Johnson, J. W., Fuchs, R. A., & Morison, J. R. (1951). The damping action of submerged breakwaters. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. <https://doi.org/10.1029/TR032i005p00704>
- Kajima, R., Saito, S., Shimizu, T., Maruyama, K., Hasegawa, H. y Sakakiyama, T., 1983. Sand transport experiments performed by using a large water wave tank, Central Research Institute for Electric Power Industry, Civil Engineering Division.
- Komar, Paul D., M. R. J. (1997). Handbook of Coastal Processes and Erosion. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kontaxi, C., & Memos, C. D. (2015). Submerged Breakwaters as Artificial Habitats. *XXXI IAHR CONGRESS*, (April).
- Lara, J. L., Garcia, N., & Losada, I. J. (2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.11.003>
- Larson, M., Kraus, N. C., & Sunamura, T. (1988). *Beach profile change: Morphology, transport rate, and numerical simulation*. <https://doi.org/10.9753/icce.v21.96>
- Losada, I. J., Silva, R., & Losada, M. A. (1996). Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 28(1–4), 249–266. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(96\)00020-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(96)00020-8)
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980). *S~Ates*. 154–172.
- Monroy Barales, J. E. (2013). *Desarrollo De Una Nueva Tipología De Dique Sumergido a Partir De Piezas Homogéneas*.
- Ng, K., Thomas, T., Phillips, M. R., Calado, H., Borges, P., & Veloso-Gomes, F. (2015). Multifunctional artificial reefs for small islands: An evaluation of amenity and opportunity for São Miguel Island, the Azores. *Progress in Physical Geography*, 39(2), 220–257. <https://doi.org/10.1177/0309133314567581>
- Pérez del Toro Rivera T., R. 2001. Arrecifes Artificiales. Una nueva forma de conservación de ecosistemas marinos. México. pp. 8. Revisión mayo 2013
- Pilkey, O. H., & Thieler, E. R. (1992). Erosion of the United States shoreline. *Quaternary Coasts of the United States*. <https://doi.org/10.2110/pec.92.48.0003>
- Pranzini, E., Wetzel, L., & Williams, A. T. (2015). Aspects of coastal erosion and protection in Europe. *Journal of Coastal Conservation*, 19(4), 445–459. <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0399-3>
- Sallenger, J. (2000). Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*.
- Sánchez-Arcilla Conejo, A., & Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería Del Agua*, 1(2), 97–114. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2639>

- Sánchez Agustín, J. J. A. (1994). *Ingeniería de Playas (I): Conceptos de Morfología Costera* (pp. 97–114). pp. 97–114. Ingeniería del Agua.
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., ... de la Maza, J. (2009). Capital natural de México. Síntesis : Conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. In *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*.
- Sharif Ahmadiand, A. (2016). Numerical Models for Submerged Breakwaters. In *Numerical Models for Submerged Breakwaters*. <https://doi.org/10.1016/c2014-0-02038-2>
- Sherrard, T. R. W., Hawkins, S. J., Barfield, P., Kitou, M., Bray, S., & Osborne, P. E. (2016). Hidden biodiversity in cryptic habitats provided by porous coastal defence structures. *Coastal Engineering*, 118, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.005>
- Shimizu, T., Saito, S., Maruyama, K., Hasegawa, H. y Kajima, R., 1985. Modeling of onshore-offshore sand transport rate distribution based on the large wave flume experiments, Abiko City, Japan.
- Silva, R., Losada, M. A., & Salles, P. (2006). Modelling linear wave transformation induced by dissipative structures-Random waves. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.11.008>
- Silva, Rodolfo, Lacouture, M. M. V., Durón, F. J. R., Paez, D. P., Pérez, M. A. O., Baldwin, E. G. M., ... Escudero, C. (2011). *Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*.
- Stauble, D. K. (2008). Coastal Engineering Project Impact Assessment Using Long-Term Morphodynamic Change Analysis. *U.S. Army Engineer Research and Development Center Coastal and Hydraulics Laboratory*, 1(4), 53.
- Tajziehchi, M., Sharif Ahmadian, A., 2009. Artificial Neural Network Modeling of Wave-Induced Current Over Submerged Breakwaters, *Coastal Dynamics 09*, vol. 14. World Scientific, Tokyo, pp. 1\_10. Available from: [http://dx.doi.org/10.1142/9789814282475\\_0017](http://dx.doi.org/10.1142/9789814282475_0017).
- USACE, 2002. Coastal sediment processes, Coastal engineering manual-part iii. American Society of Civil Engineers, Washington, DC.
- Van der Meer, J. W., Briganti, R., Zanuttigh, B., & Wang, B. (2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering*, 52(10–11), 915–929. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.005>
- Van Hijum, E. (1977). Equilibrium profiles and longshore transport of coarse material under oblique wave attack. IN: *PROC.FIFTEENTH COASTAL ENGG.CONF.(HONOLULU,HAWAII: JUL.11-17,1976)*. <https://doi.org/10.9753/jicce.v15.73>
- WALKER, J. R., & JAMES, K. K. (1974). RECREATIONAL SURF PARAMETERS. *LOOK LAB. OCEANOGRAPHY. HAWAII UNIV., U.S.A., TECH. REP.*
- Waters, C.H., 1939. Equilibrium slopes of sea beaches, University of California, Berkeley, CA.
- Watanabe, A., Riho, Y. y Horikawa, K., 1981. Beach profiles and on-offshore sediment transport. Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference Sydney, Australia, pp. 1106-1121.
- Zanuttigh, B., Martinelli, L., & Lamberti, A. (2008). Wave overtopping and piling-up at permeable low crested structures. *Coastal Engineering*.

<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.01.004>

Zyserman, J.A., Johnson, H.K., Zanuttigh, B., Martinelli, L., 2005. Far-field erosion and morphological effects. *Coast. Eng.* 52 (10/11), 977—994, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.013>.