



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

DESARROLLO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ECUACIÓN DE FROUDE-
KRILOFF PARA EMPUJE HORIZONTAL Y SU APLICACIÓN EN UN PROYECTO DE
RECUPERACIÓN DE PLAYAS

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

PRESENTA:
MUSMÉ ALCÁNTAR GAMA

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., JUNIO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Jesús Gracia Sánchez
Secretario: Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles
Vocal: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin
1^{er.} Suplente: Dr. Rodolfo Silva Casarín
2^{d o.} Suplente: Dra. Lilia Reyes Chávez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

FIRMA

(Segunda hoja)

AGRADECIMIENTOS

A Aída, Fátima, Medardo, Salvador I, Salvador II y Luis. Lo que soy es por ustedes; lo que seré, para ustedes.

Al Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin y al Dr. Rodolfo Silva Casarín por su apoyo, confianza y paciencia, por sus enseñanzas y retos. Toda mi gratitud, admiración y cariño para ustedes.

A mis compañeros del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM por sus explicaciones, comprensión, ayuda y motivación en toda esta etapa académica.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de formar parte de su comunidad educativa.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo de beca (706566) para la realización de mis estudios de posgrado.

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo General	4
Objetivos Particulares.....	4
Organización del trabajo	4
1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SITIO EN ESTUDIO	5
1.1 Justificación y planteamiento del problema	8
2 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FROUDE-KRILOFF	11
2.1 Desarrollo analítico	12
2.1.1 Sección rectangular	12
2.1.2 Sección trapecial	14
2.2 Ecuaciones de carga horizontal máxima.....	19
2.2.1 Ecuaciones simplificadas de carga horizontal máxima.....	19
2.2.2 Rango de aplicación de las ecuaciones simplificadas	22
2.3 Validación experimental	23
2.3.1 Metodología	24
2.3.2 Procesamiento de datos.....	27
2.4 Resultados y discusión.....	32
2.5 Recomendaciones de aplicación para la formulación Froude-Kriloff	35
2.6 Comparativa de desempeño estructural entre ambas secciones.....	35
3 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE MODELADO.....	39
3.1 Estadística del oleaje.....	39
3.1.1 Estación 1	40
3.1.2 Estación 2.....	44
3.1.3 Estación 3.....	49
3.1.4 Estación 4.....	52
3.1.5 Determinación de valores representativos en régimen medio.....	55
3.1.6 Determinación de valores representativos en régimen extremal.....	55
3.1.7 Condiciones de oleaje para modelado numérico.....	57

4	PROPUESTA DE ACTUACIÓN ESTRUCTURAL PARA LA RECUPERACIÓN DE LAS PLAYAS.....	59
4.1	Modelación hidrodinámica de la condición actual sin estructuras.....	59
4.2	Propuesta de estructuración.....	66
4.3	Modelación hidrodinámica de la actuación estructural	68
4.4	Diseño geométrico y mecánico de las estructuras.....	72
4.5	Relleno de playa	78
4.5.1	Identificación del problema de erosión	78
4.5.2	Diseño del relleno	78
4.6	Propuesta Integral de restauración	81
5	CONCLUSIONES.....	83
	REFERENCIAS	85

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.1. Localización general del sitio.....	5
Figura 1.2. Ubicación del desarrollo Grand Sirenis. Coordenadas UTM.....	5
Figura 1.3. Estado de Quintana Roo (http://cuentame.inegi.org.mx).....	6
Figura 1.4. Municipios del estado de Quintana Roo.....	6
Figura 1.5. Retroceso den la línea de costa 2000-2016.....	8
Figura 1.6. Fotografía del sitio de restauración de playa.....	9
Figura 2.1. Cuerpo de sección rectangular a evaluar.....	12
Figura 2.2. Cuerpo de sección trapecial a evaluar.....	14
Figura 2.3. Ejes auxiliares de sección trapecial.....	15
Figura 2.4. Puntos para definir la ecuación de la recta que forman los taludes de la sección	15
Figura 2.5. Rango de aplicación de ecuaciones simplificadas.....	23
Figura 2.6. Esquema de parámetros.....	23
Figura 2.7. Dimensiones de las estructuras: rectangular (izq.), trapecial (der.).....	24
Figura 2.8. Estructura de sección rectangular.....	24
Figura 2.9. Estructura de sección trapecial.....	25
Figura 2.10. Esquema general de los experimentos, sección rectangular (arriba) y sección trapecial (abajo).....	26
Figura 2.11. Imágenes de experimento para sección rectangular.....	27
Figura 2.12. Imágenes de experimento para sección trapecial.....	27
Figura 2.13. Diagrama general de carga horizontal para sección rectangular.....	31
Figura 2.14. Diagrama horizontal para sección trapecial.....	31
Figura 2.15. Correlación entre la carga horizontal teórica y experimental.....	32
Figura 2.16. Correlación entre la carga horizontal teórica final y experimental.....	33
Figura 2.17. Correlación entre la carga horizontal teórica y experimental.....	34
Figura 2.18. Variando periodo.....	36
Figura 2.19. Variando altura de ola.....	36
Figura 2.20. Variando la altura de la estructura.....	37
Figura 2.21. Variando la base mayor.....	37
Figura 2.22. Variando la base menor de la estructura.....	38
Figura 3.1. Localización de las estaciones con datos de oleaje.....	39
Figura 4.1. Condición topo-batimétrica actual.....	60
Figura 4.2. Propagación de oleaje: Caso 1.....	61
Figura 4.3. Propagación del oleaje: Caso 2.....	61
Figura 4.4. Propagación del oleaje: Caso 3.....	62
Figura 4.5. Propagación del oleaje: Caso 4.....	62
Figura 4.6. Propagación del oleaje: Caso 5.....	63
Figura 4.7. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 1 (izq.), Caso 2 (der.).....	64
Figura 4.8. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 3 (izq.), Caso 4 (der.).....	65
Figura 4.9. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 5.....	65
Figura 4.10. Condición topo-batimétrica con estructuras.....	67
Figura 4.11. Propagación de oleaje con la actuación propuesta: Caso 1.....	68
Figura 4.12. Propagación de oleaje con la propuesta de actuación: Caso 2.....	68

Figura 4.13. Propagación de oleaje con la propuesta de actuación: Caso 3.....	69
Figura 4.14. Propagación de oleaje con la propuesta de actuación: Caso 4.....	69
Figura 4.15. Propagación de oleaje con la actuación propuesta: Caso 5.....	70
Figura 4.16. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 1 (izq.), Caso 2 (der.)	70
Figura 4.17. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 3 (izq.), Caso 4 (der.)	71
Figura 4.18. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 5.....	71
Figura 4.19. Estimación de pesos mínimos recomendables, estructura S1.....	73
Figura 4.20. Estimación de pesos mínimos recomendables, Estructura 2	73
Figura 4.21. Estimación de pesos mínimos recomendables, estructura S3.....	74
Figura 4.22. Estimación de pesos mínimos recomendables, Estructura C1	74
Figura 4.23. Estimación de pesos mínimos recomendables, Estructura N1	75
Figura 4.24. Condiciones de oleaje para diseño.....	75
Figura 4.25. Gráficas comparativas: Estructura N2 (izq.), Estructura N3 (der.).....	76
Figura 4.26. Casos elegidos; Estructura N2 (izq.), Estructura N3 (der.).....	76
Figura 4.27. Dimensiones: Estructura N2 (izq.), Estructura N3 (der)	76
Figura 4.28. Cambio en la línea de costa.....	79
Figura 4.29. Perfil modificado para estructura S2	80
Figura 4.30. Perfil modificado para estructura C1	80
Figura 4.31. Condición topo-batimétrica de la solución integral	81
Tabla 2.1. Coordenadas de los vértices del trapecio.....	16
Tabla 2.2. Casos de validación experimental	26
Tabla 2.3. Parámetros de oleaje de los ensayos para sección rectangular.....	28
Tabla 2.4. Parámetros de oleaje de los ensayos para sección trapecial.....	28
Tabla 2.5. Carga horizontal teórica sobre estructura de sección rectangular	29
Tabla 2.6. Carga horizontal teórica sobre estructuras de sección trapecial.....	29
Tabla 2.7. Carga horizontal registrada en los sensores de presión, sección rectangular.....	30
Tabla 2.8. Carga horizontal registrada en los sensores de presión, sección trapecial.....	30
Tabla 2.9. Carga horizontal experimental sobre estructura de sección rectangular.....	31
Tabla 2.10. Carga horizontal experimental sobre estructura de sección rectangular.....	31
Tabla 2.11. Comparativa entre valores teóricos y experimentales de sección rectangular	32
Tabla 2.12. Comparativa entre valores teóricos, aplicando coeficiente de validación experimental, y experimentales de sección rectangular	33
Tabla 2.13. Comparativa entre valores teóricos y experimentales en sección trapecial	34
Tabla 3.1. Coordenadas de las estaciones de oleaje	39
Tabla 3.2. Resultados del análisis extremal para condición de Huracán.....	56
Tabla 3.3. Resultados del análisis extremal para condición de Norte.....	56
Tabla 3.4. Condiciones de oleaje modeladas	57
Tabla 4.1. Coordenadas de las estructuras propuestas	67

SIMBOLOGÍA

A	Amplitud de onda
a_z	Aceleración horizontal de las partículas
$a_{x\max}$	Aceleración horizontal máxima de las partículas
F_x	Componente horizontal de la fuerza de Froude-Kriloff
F_{xM}	Componente horizontal máxima de la fuerza de Froude-Kriloff
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de ola
H_s	Altura de ola significativa
h	Profundidad
k	Número de onda
L	Longitud de ola
ν	Fase angular
ω	Frecuencia angular
$P(x,y,z)$	Presión total
$p(z)$	Presión hidrostática
$p(x,y,z)$	Presión hidrodinámica
ρ	Densidad
T	Periodo de ola
T_p	Periodo pico de ola
u	Velocidad horizontal de las partículas
$\Phi_w(x,y,z)$	Potencial de velocidades
θ	Ángulo de incidencia del oleaje

RESUMEN

El motivo principal del trabajo desarrollado en esta tesis es elaborar una alternativa para la recuperación de playas frente al complejo turístico “Grand Sirenis”, ubicado en el municipio de Solidaridad, Quintana Roo. La ejecución de los trabajos y análisis del sitio derivó en la propuesta de una opción de actuaciones estructurales; del diseño de las cuales se encontró que no existía una ecuación para determinar el empuje debido al oleaje sobre un cuerpo sumergido de sección trapecial y que la ecuación existente, para sección rectangular, no contaba con una validación experimental. De manera que, vista la necesidad de generación de conocimiento, se plantearon las actividades de: desarrollar la ecuación teórica para el empuje que ejerce el oleaje sobre un cuerpo de sección trapecial, validar ambas ecuaciones mediante ensayos de laboratorio, realizar una comparativa del comportamiento entre ellas para diferentes condiciones hidráulicas y geométricas, y a partir de esto emitir recomendaciones para su implementación en el diseño estructural costero para finalmente aplicarlo al caso del desarrollo Grand Sirenis.

Se presenta, entonces, una alternativa de protección y recuperación de playas que contempla la construcción de 7 estructuras, las cuales favorecen la estabilidad de las playas dentro de las caletas que conforman el frente costero de dicho complejo, acompañado de colocación artificial de arena para que la operación turística se vea beneficiada de inmediato. Del análisis de los resultados obtenidos se puede concluir que la propuesta que se plantea armoniza adecuadamente con los procesos y ciclos físicos del Caribe Mexicano así como con la biota que actualmente habita el sistema.

Entre las principales virtudes de la propuesta analizada se cuentan 1) que no interrumpe el transporte litoral, por lo que no inducirá un déficit sedimentario a otras playas; 2) seis de las siete estructuras cumplen con la función de soportar la playa o disminuir la cantidad de arena que pudiera ser arrastrada por tormentas pero no de controlar la energía del oleaje, esto hace que su diseño sea menos exigente, menos costoso y menos agresivo con el medio marino y 3) los trazados de las estructuras se han hecho de manera que modifiquen lo menos posible los ecosistemas y respetando cuidadosamente las áreas con presencia de corales a fin de minimizar el impacto sin dejar de cumplir con sus funciones primordiales.

INTRODUCCIÓN

El turismo en México se ha identificado como un impulsor del crecimiento económico del país (INEGI, 2015), contribuyendo con un 8.7 % del producto interno bruto.

La actividad turística en zonas con litoral es de especial importancia, no sólo por los empleos y la derrama económica que brinda, sino por la compleja dinámica que presentan los ecosistemas costeros y las acciones que deben llevarse a cabo para mantener las playas en condiciones óptimas para el turismo sin descuidar su equilibrio natural.

Uno de los problemas más frecuentes a los que se enfrenta la zona costera es la pérdida de material terrestre, disminuyendo la playa seca y reduciendo así su aprovechamiento; atender este fenómeno es de vital importancia para la actividad turística de la zona litoral del país.

La recuperación de playas en sitios en los que se ha detectado un proceso de erosión permanente ha de atenderse considerando no sólo la posición original o histórica de la línea de costa, sino los procesos regionales y los eventos extraordinarios que han dado lugar al retroceso litoral. Así, el escenario de playa recuperada se ajusta a una nueva condición estable cuyas nuevas dimensiones son resultado de una combinación de los procesos naturales de mediano y largo periodo presentes en el área costera y del funcionamiento de las actuaciones que se ejecuten para mantener, sea la posición de la línea de costa o el volumen de material acumulado en la playa.

Las estructuras costeras sumergidas son una medida de uso frecuente para la protección y recuperación de playas, y de su correcto diseño depende la eficiencia con la que desempeñen su función. Es por esto que las metodologías existentes para su análisis deben ser continuamente revisadas y actualizadas.

Es el caso de la ecuación de Froude-Kriloff, que constituye una primera aproximación para estimar la carga horizontal inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido y es determinada de forma analítica a partir del campo de presiones del fluido, pudiendo ser validada a través del campo de velocidades del mismo (Hudspeth, 2006). Dicha ecuación se encuentra limitada por la geometría del obstáculo, siendo sólo expresada para cuerpos con sección rectangular; uno de los propósitos de esta investigación es desarrollar la ecuación para una sección trapecial, validar experimentalmente ambas ecuaciones y realizar una comparativa del comportamiento entre ellas para diferentes condiciones hidráulicas y geométricas, con el fin de emitir recomendaciones de diseño para posteriormente emplear esta metodología en el diseño de algunas de las estructuras de la propuesta de actuación.

En conjunto con las estructuras costeras, en proyectos de recuperación de playa, es recomendable realizar rellenos, ya sean reciclando o rellenando artificialmente de arena para que el aprovechamiento turístico se vea reflejado de forma inmediata. Tanto el relleno de playa como las estructuras deben trabajar de forma conjunta y atender a una estrategia que contemple los ciclos y biota del sitio, modificando lo menos posible los procesos naturales de la zona.

Objetivo General

Presentar una propuesta integral de recuperación de la playa frente al complejo turístico “Grand Sirenis”, realizando el diseño de algunas de las estructuras mediante la modificación de la ecuación de Froude-Kriloff para la estimación de la carga horizontal inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido.

Objetivos Particulares

- Analizar las necesidades de protección del sitio de estudio
- Derivar matemáticamente la expresión para el cálculo del empuje horizontal sobre cuerpos sumergidos con sección trapecial
- Validar experimentalmente las ecuaciones para el empuje horizontal sobre secciones rectangulares y trapezoidales
- Emitir recomendaciones sobre el uso de las ecuaciones para empuje para diseño de estructuras sumergidas
- Diseñar geométrica y mecánicamente los elementos estructurales de la propuesta
- Estimar los volúmenes de arena necesarios para el relleno de playa

Organización del trabajo

En el primer capítulo de este documento se describen las condiciones generales de la zona, se realiza el planteamiento y se justifica la actuación ingenieril en este proyecto.

El segundo capítulo contiene el desarrollo matemático derivado de la formulación de Froude-Kriloff para cuerpos de secciones trapecial y rectangular, la descripción de los ensayos experimentales para su validación, el procesamiento de datos realizado y los resultados obtenidos; a partir de esto se presentan las recomendaciones de diseño.

En el tercer capítulo se establecen las condiciones hidrodinámicas para modelado numérico, a partir de la estadística realizada a los datos de oleaje de las estaciones de medición representativas de la zona.

En el capítulo cuarto se presentan la condición actual topo-batimétrica del sitio en estudio y las modelaciones hidrodinámicas de éste, a partir de las cuales se plantea una propuesta de actuación estructural y su correspondiente modelación hidrodinámica, incluye también el diseño de las estructuras (empleando para dos de ellas las recomendaciones de cálculo establecidas en el segundo capítulo) y la propuesta de relleno de arena. Finalmente, se muestra la propuesta integral de restauración de playas frente al complejo turístico “Grand Sirenis”.

El quinto capítulo contiene las conclusiones de este trabajo de investigación y, para finalizar, se presentan las referencias que se emplearon en su elaboración.

1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SITIO EN ESTUDIO

El sitio de interés es la región costera ubicada frente al complejo turístico “Grand Sirenis”, Figura 1.1 y Figura 1.2, ubicado en el estado de Quintana Roo, municipio de Solidaridad.

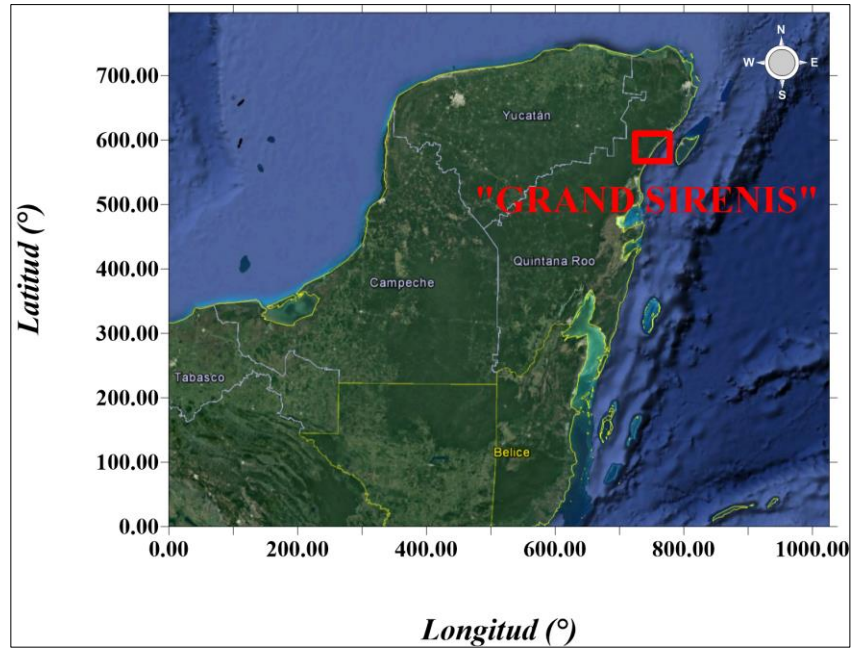


Figura 1.1. Localización general del sitio

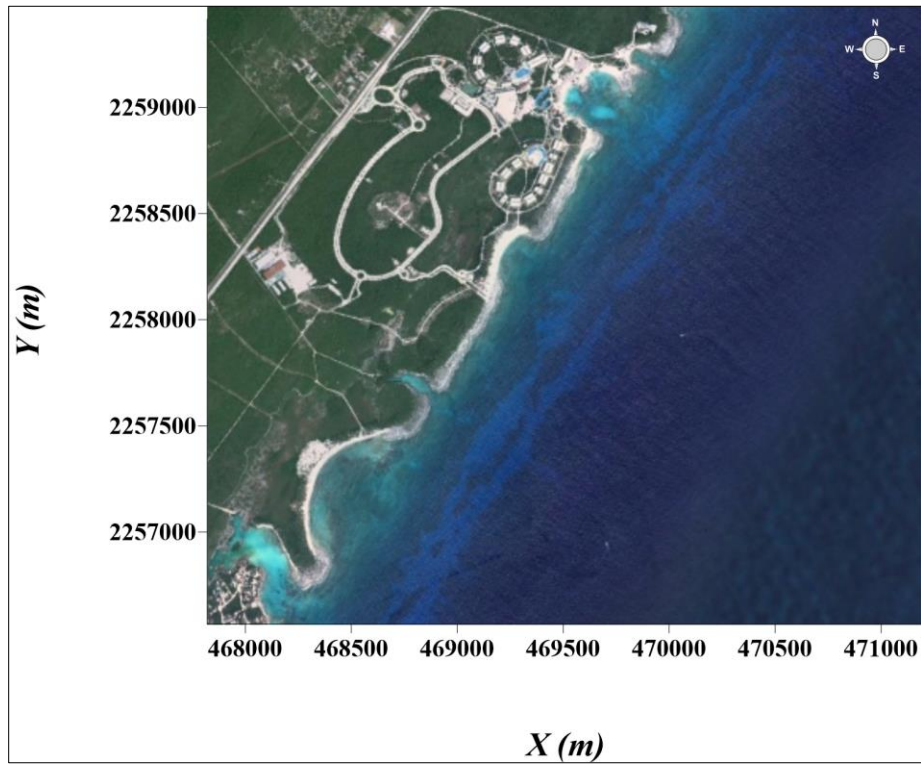


Figura 1.2. Ubicación del desarrollo Grand Sirenis. Coordenadas UTM

El estado de Quintana Roo (ver Figura 1.3) se encuentra en el extremo Este del país, en la Península de Yucatán. La extensión de la entidad es de 50 843 km² (<http://www.inafed.gob.mx>) que corresponde a 2.26 % del territorio nacional.



Figura 1.3. Estado de Quintana Roo (<http://cuentame.inegi.org.mx>)

Quintana Roo se divide en 11 municipios (ver Figura 1.4): Cozumel (001), Felipe Carrillo Puerto (002), Isla Mujeres (003), Othón P. Blanco (004), Benito Juárez (005), José María Morelos (006), Lázaro Cárdenas (007), Solidaridad (008), Tulum (009), Bacalar (010), Puerto Morelos (011).

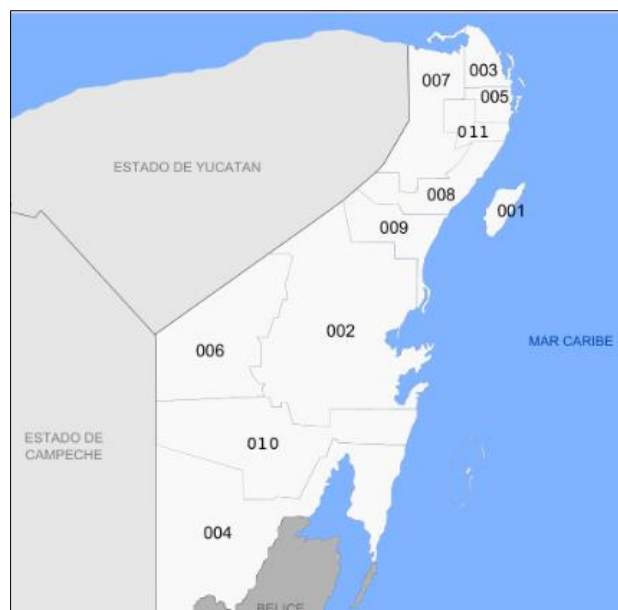


Figura 1.4. Municipios del estado de Quintana Roo

Existe una llanura que domina el Oriente y Norte del estado y al occidente un lomerío conformado por rocas sedimentarias, al Sur, en los límites con Campeche y Guatemala se localizan las mayores elevaciones; la máxima elevación en el territorio estatal es el Cerro El Charro con 200 msnm.

El 99 % de la superficie del estado presenta clima cálido subhúmedo y el 1 % cálido húmedo, que corresponde a la isla de Cozumel.

La temperatura media anual del estado es de 26 °C, la temperatura máxima promedio es de 33 °C y se presenta en los meses de abril a agosto, la temperatura mínima promedio, que se presenta en el mes de enero, es de 17 °C.

La precipitación media es alrededor de 1,300 mm anuales, las lluvias se presentan durante todo el año, siendo más abundantes en los meses de junio a octubre.

Predomina la selva en 90 % de la entidad, se extrae madera como caoba y cedro rojo. Le sigue en importancia la vegetación acuática, cuya superficie se ha reducido por las actividades antrópicas en la zona. La agricultura ocupa 5 % del territorio estatal.

Quintana Roo tiene una población de 1,501,562 habitantes, el 1.3 % del total del país; 67 % de estas personas forman la población económicamente activa en la entidad (INEGI, 2015); 79% de las personas ocupadas trabajan en el comercio y los servicios; 14 %, en la industria; y 7% en la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza.

El producto interno bruto estatal es de 214,311 millones de pesos, lo que significa 1.6 % del total nacional; 86% de este importe es debido a las actividades comerciales y de servicios, 13%, por las industriales y 1% por la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza.

El Sector de actividad que más aporta al PIB estatal son los Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas; tiene el primer lugar nacional de personal ocupado en actividad hotelera y de servicios integrados con 71,435 empleos, y produce el 33% de PIB del país en esta área (<http://cuentame.inegi.org.mx>).

El municipio de Solidaridad fue creado el 28 de julio de 1993, su cabecera municipal es Playa del Carmen (<http://www.municipiodesolidaridad.gob.mx>). Tiene una extensión de 2,205 km², colinda al Norte con los municipios de Puerto Morelos y Lázaro Cárdenas, al Este con el Mar Caribe, al Sur con el municipio de Tulum y al Oeste con el estado de Yucatán. El municipio se encuentra sobre una planicie costera, las máximas elevaciones son inferiores a los 25 m sobre el nivel del mar.

El clima en Solidaridad es cálido subhúmedo con lluvias en el verano. La temperatura media anual es de 26 °C. Los vientos predominantes son los del sureste. La precipitación pluvial anual oscila entre los 1,300.00 y los 1,500.00 mm con estación de lluvia de marzo a octubre. El clima se ve afectado por los ciclones (Huracanes cuando sus vientos superan el umbral de 119 km/h), que aumentan la precipitación sobre todo en el verano. La temporada de Huracanes se extiende del 1 de junio al 30 de noviembre de cada año.

La vegetación se conforma de selva mediana y baja, que son particularmente valiosas para la explotación forestal gracias a la presencia de maderas preciosas como la caoba y el cedro.

Tiene una población 209,634 habitantes. La actividad económica principal es el turismo y los servicios relacionados, el PIB de Solidaridad es el segundo más alto del estado, después del municipio de Benito Juárez (<http://www.ugroo.mx/cemopre/pib-municipal/>).

1.1 Justificación y planteamiento del problema

Para determinar si las playas frente al complejo turístico “Grand Sirenis” presentan problemas de erosión que justifiquen un trabajo de recuperación, se realizó la digitalización de la línea de costa sobre imágenes satelitales actuales y pasadas, con el fin de apreciar gráficamente el retroceso o acreción que haya sufrido esta zona costera a lo largo de este tiempo.

Las imágenes satelitales evaluadas son del 14/julio/2016 y 10/julio/2000, se obtuvieron de la Scientific Agency for Natural Sciences (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y fueron tomadas por los satélites Landsat 8 y 7 respectivamente; presentan una resolución de 30 m por pixel, por lo que los resultados son de carácter cualitativo más que cuantitativo, Figura 1.5.

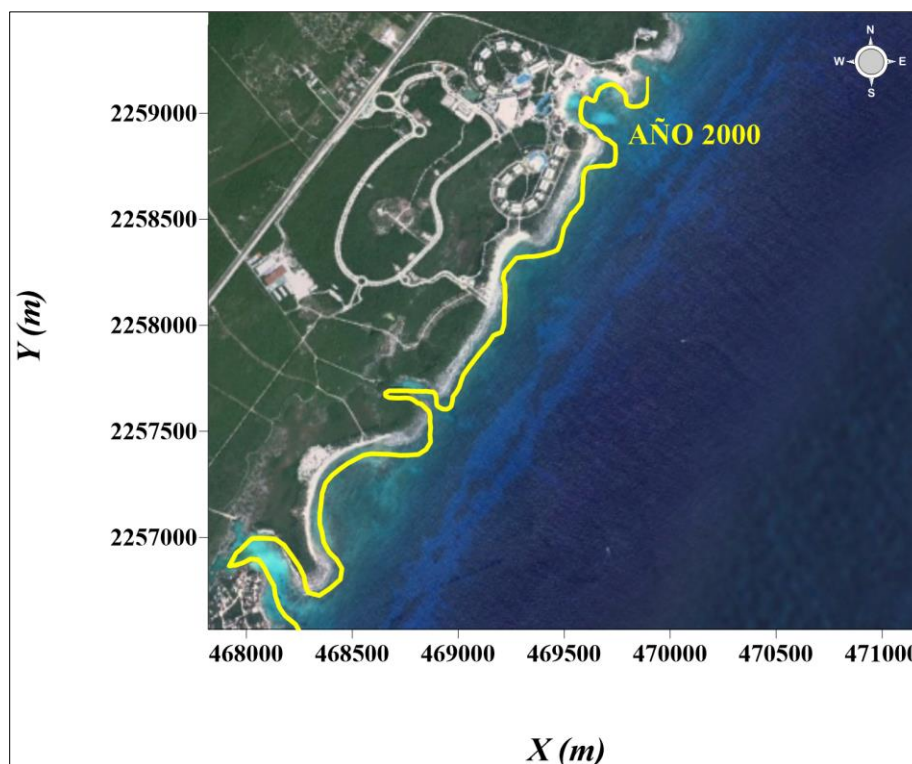


Figura 1.5. Retroceso den la línea de costa 2000-2016

Se puede apreciar en la figura que sí existe erosión en la playa frente al complejo, validando así la petición de restauración que se solicitó al Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Teniendo en cuenta la importancia que tiene la actividad turística en el estado, más allá de un beneficio particular, el restaurar la playa se verá reflejado como un incremento en las fuentes de empleo para los habitantes del lugar y un mayor ingreso económico para el país.

Con la información que se ha expuesto hasta el momento se justifica y establece el problema a resolver, que es el presentado en el título de este trabajo de investigación: propuesta estructural para la recuperación de playas frente al complejo turístico “Grand Sirenis” ubicado en Quintana Roo, México.



Figura 1.6. Fotografía del sitio de restauración de playa

Como parte de las soluciones preliminares que se consideraron, se tiene el uso de rompeolas sumergidos. El diseño mecánico de este tipo de estructuras se encuentra documentado en la literatura especializada, sin embargo, el cálculo de su estabilidad en profundidades muy bajas (como es el caso) donde la principal sollicitación es el empuje horizontal debido al oleaje, solo existe para estructuras de geometría rectangular. En este punto del estudio se decidió llevar a cabo el desarrollo matemático que derivara en una expresión para estimar el empuje en secciones trapeciales. El resultado de lo cual se presenta en el siguiente capítulo.

2 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FROUDE-KRILOFF

La carga de Froude-Kriloff o Froude-Krylov, define la fuerza que ejerce el oleaje sobre un cuerpo sumergido, considerando los efectos incidentes y despreciando la perturbación que ocasiona la interacción del oleaje con el cuerpo.

Su deducción tiene como principio las ecuaciones fundamentales de hidrodinámica, que parten de las leyes de conservación de masa, movimiento y energía, y cuya solución considera la idealización del agua como un fluido incompresible, no viscoso y de movimiento irrotacional; con base en ello se determina, mediante teoría lineal de ondas de pequeña amplitud sobre fondo horizontal e impermeable, una función escalar de potencial de velocidades, ecuación (2.1).

$$\Phi_w(x, y, z) = \frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen}(kx - \omega t - \nu) \quad (2.1)$$

La fuerza de Froude-Kriloff es una primera aproximación del empuje inducido por el oleaje sobre un cuerpo sumergido, debido a que sólo toma en cuenta para su análisis al potencial incidente, despreciando los efectos de radiación, difracción y rotura del oleaje, rugosidad de las superficies, separación de flujo en las esquinas del cuerpo y cambios en su densidad, entre otros.

Existen dos opciones de cálculo para la carga de Froude-Kriloff: la primera evaluando el campo de presiones actuante sobre las superficies verticales del cuerpo, y la segunda a partir del campo de velocidades, integrando la componente de la aceleración horizontal multiplicada por la densidad del fluido sobre el volumen del objeto.

Campo de Presiones:

$$P(x, y, z) = p(z) + p(x, y, z) = -\rho gz + \rho \frac{\partial \Phi_w(x, y, z)}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$P(x, y, z) = -\rho gz + \rho A \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t - \nu) \quad (2.3)$$

Velocidad horizontal:

$$u = \frac{Agk}{\omega} \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t - \nu) \quad (2.4)$$

Aceleración horizontal:

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = Agk \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen}(kx - \omega t - \nu) \quad (2.5)$$

a) A partir del campo de presiones

$$F_x = -\iint P \vec{n} dS \quad (2.6)$$

$$\vec{n} dS = \pm dz dy \vec{e}_1 \quad (2.7)$$

b) A partir del campo de velocidades

$$F_x = \iiint \rho \frac{\partial u}{\partial t} dV \quad (2.8)$$

$$dV = dx dy dz \quad (2.9)$$

Para determinar de forma analítica la ecuación del empuje debido al oleaje sobre un cuerpo sumergido de sección trapezoidal, primero se realizó la deducción de la ecuación para sección rectangular, ya establecida en la literatura (Hudspeth, 2006), con la finalidad de verificar el proceso matemático y las consideraciones físicas necesarias para su análisis, y estar en posibilidades de presentar la propuesta de modificación por cambio en la sección transversal del cuerpo sumergido.

2.1 Desarrollo analítico

El criterio utilizado en las deducciones analíticas de este trabajo, es el cálculo mediante el campo de velocidades del fluido.

2.1.1 Sección rectangular

Siendo un cuerpo tridimensional sumergido, con la profundidad del centro de gravedad del cuerpo localizado en $z = -d$, como se muestra en la Figura 2.1.

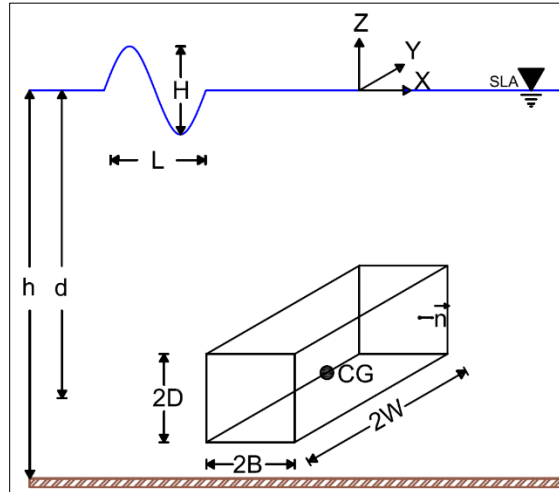


Figura 2.1. Cuerpo de sección rectangular a evaluar

Sustituyendo las ecuaciones (2.5) y (2.9) en ecuación (2.8), y asignando los límites de integración correspondientes tiene que:

$$F_x = \int_{-d-D}^{-d+D} \int_0^{2W} \int_{-B}^B \rho A g k \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen}(kx-\omega t-\nu) dx dy dz \quad (2.10)$$

Integrando:

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} \int_0^{2W} -\rho A g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \cos(kx-\omega t-\nu) \Big|_{-B}^B dy dz \quad (2.11)$$

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} \int_0^{2W} -\rho A g \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(kB-\omega t-\nu) + \rho A g \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(-kB-\omega t-\nu) dy dz \quad (2.12)$$

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} -\rho A g y \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(kB-\omega t-\nu) + \rho A g y \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(-kB-\omega t-\nu) \Big|_0^{2W} dz \quad (2.13)$$

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} -2\rho A g W \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(kB-\omega t-\nu) + 2\rho A g W \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(-kB-\omega t-\nu) dz \quad (2.14)$$

$$= -\frac{2\rho A g W}{k} \frac{\operatorname{senh}(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(kB-\omega t-\nu) + \frac{2\rho A g W}{k} \frac{\operatorname{senh}(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(-kB-\omega t-\nu) \Big|_{-d-D}^{-d+D} \quad (2.15)$$

Resultado:

$$F_x = -\frac{2\rho A g W}{k} \frac{\operatorname{senh}(kh-kd+kD)}{\cosh(kh)} \cos(kB-\omega t-\nu) + \frac{2\rho A g W}{k} \frac{\operatorname{senh}(kh-kd+kD)}{\cosh(kh)} \cos(-kB-\omega t-\nu) \\ + \frac{2\rho A g W}{k} \frac{\operatorname{senh}(kh-kd-kD)}{\cosh(kh)} \cos(kB-\omega t-\nu) - \frac{2\rho A g W}{k} \frac{\operatorname{senh}(kh-kd-kD)}{\cosh(kh)} \cos(-kB-\omega t-\nu) \quad (2.16)$$

Simplificación:

$$\varepsilon = \frac{\operatorname{senh}(kh-kd+kD)}{\cosh(kh)} \quad (2.17)$$

$$\delta = \frac{\sinh(kh - kd - kD)}{\cosh(kh)} \quad (2.18)$$

$$\alpha = (kB - \omega t - \nu) \quad (2.19)$$

$$\beta = (-kB - \omega t - \nu) \quad (2.20)$$

Carga horizontal inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido de sección rectangular:

$$F_x = \frac{2\rho AgW}{k} [-\varepsilon \cos(\alpha) + \varepsilon \cos(\beta) + \delta \cos(\alpha) - \delta \cos(\beta)] \quad (2.21)$$

2.1.2 Sección trapecial

Siendo un cuerpo tridimensional sumergido, con la profundidad del centro de gravedad del cuerpo localizado en $z = -d$, como se muestra en la Figura 2.2.

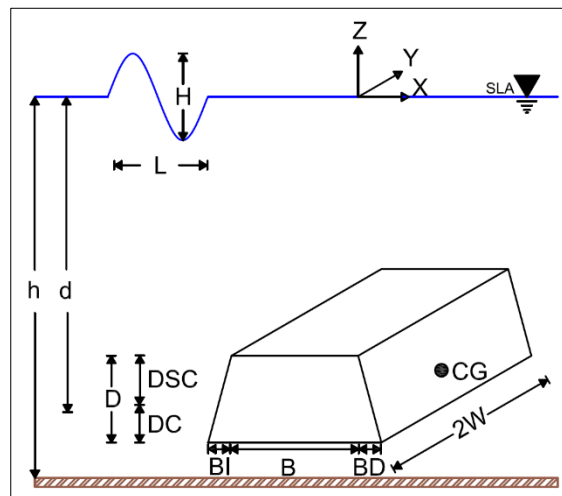


Figura 2.2. Cuerpo de sección trapecial a evaluar

El primer paso es calcular el centroide de la sección, según los ejes auxiliares presentados en la Figura 2.3.

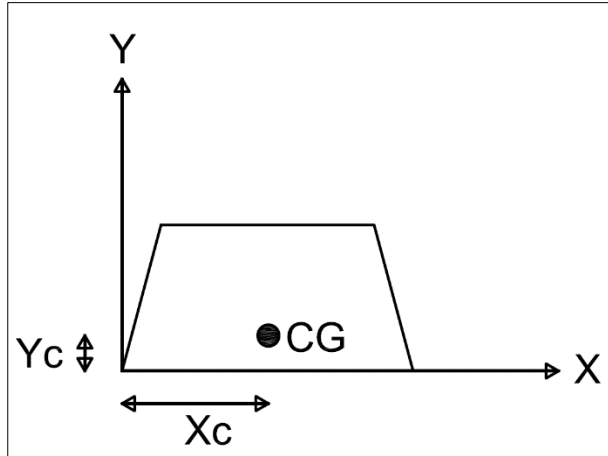


Figura 2.3. Ejes auxiliares de sección trapezoidal

$$X_c = \frac{\left[\left(\frac{BI * D}{2} \right) \left(\frac{2}{3} BI \right) \right] + \left[(B * D) \left(BI + \frac{1}{2} B \right) \right] + \left[\left(\frac{BD * D}{2} \right) \left(BI + B + \frac{1}{3} BD \right) \right]}{\left(\frac{BI * D}{2} \right) + (B * D) + \left(\frac{BD * D}{2} \right)} \quad (2.22)$$

$$Y_c = \frac{\left[\left(\frac{BI * D}{2} \right) \left(\frac{1}{3} D \right) \right] + \left[(B * D) \left(\frac{1}{2} D \right) \right] + \left[\left(\frac{BD * D}{2} \right) \left(\frac{1}{3} D \right) \right]}{\left(\frac{BI * D}{2} \right) + (B * D) + \left(\frac{BD * D}{2} \right)} \quad (2.23)$$

Posteriormente se establecen las coordenadas de cada punto de la sección, mostrado en la Figura 2.4 y en la Tabla 2.1.

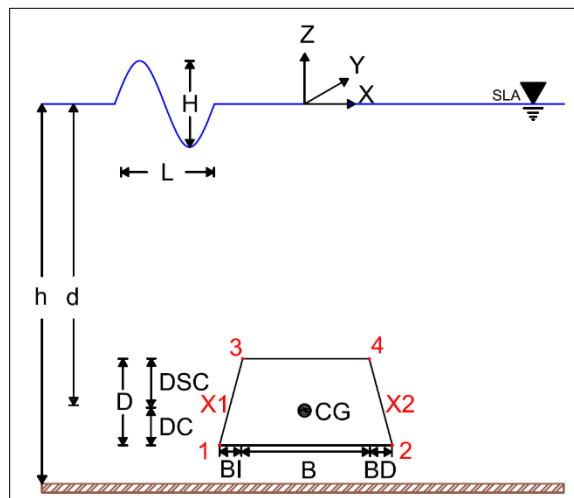


Figura 2.4. Puntos para definir la ecuación de la recta que forman los taludes de la sección

Tabla 2.1. Coordenadas de los vértices del trapecio

Punto	Coordenadas	
	X	Y
1	$-X_c$	$-d-DC$
2	$BI+B+BD-X_c$	$-d-DC$
3	$-X_c+BI$	$-d+DSC$
4	$BI+B-X_c$	$-d+DSC$

Se determinan las ecuaciones de las rectas que forman los taludes de la sección

$$X1 = \frac{BI(y+d+DC)}{DSC+DC} - X_c \quad (2.24)$$

$$X2 = \frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c \quad (2.25)$$

Siguiendo un procedimiento similar al de la sección rectangular, se establecen los límites de integración y se procede a desarrollar las operaciones matemáticas para la determinación de la ecuación buscada.

Sustituyendo las ecuaciones (2.5) y (2.9) en la ecuación (2.8) se tiene lo siguiente:

$$Fx = \int_{-d-DC}^{-d+DSC2W} \int_0^{\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c} \int_{\frac{BI(y+d+DC)}{DSC+DC} - X_c}^{\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c} \rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \text{sen}(kx - \omega t - \nu) dx dy dz \quad (2.26)$$

Integrando:

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC2W} \int_0^{\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c} \left[-\rho Ag \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t - \nu) \right]_{\frac{BI(y+d+DC)}{DSC+DC} - X_c}^{\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c} dy dz \quad (2.27)$$

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC2W} \int_0^{\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c} \left[-\rho Ag \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos \left(k \left(\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c \right) - \omega t - \nu \right) \right. \\ \left. + \rho Ag \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \cos \left(k \left(\frac{BI(y+d+DC)}{DSC+DC} - X_c \right) - \omega t - \nu \right) \right] dy dz \quad (2.28)$$

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC} \frac{\rho Ag (DSC+DC) \cosh k(h+z)}{(BD)k \cosh(kh)} \text{sen} \left(k \left(\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c \right) - \omega t - \nu \right)$$

$$+ \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BI)k} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(y+d+DC)}{DSC+DC} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \Bigg|_0^{2W} dz \quad (2.29)$$

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC} \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BD)k} \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(2W+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\ + \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BI)k} \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(2W+d+DC)}{DSC+DC} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\ - \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BD)k} \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\ - \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BI)k} \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(d+DC)}{DSC+DC} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) dz \quad (2.30)$$

$$= \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BD)k^2} \frac{\operatorname{senh}(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(2W+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\ + \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BI)k^2} \frac{\operatorname{senh}(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(2W+d+DC)}{DSC+DC} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\ - \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BD)k^2} \frac{\operatorname{senh}(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\ - \frac{\rho Ag (DSC + DC)}{(BI)k^2} \frac{\operatorname{senh}(kh+kz)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(d+DC)}{DSC+DC} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \Bigg|_{-d-DC}^{-d+DSC} \quad (2.31)$$

Resultado:

$$\begin{aligned}
F_x = & \frac{\rho Ag(D)}{(BD)k^2} \frac{\sinh(kh - kd + kDSC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(2W + d + DC)}{D} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\
& + \frac{\rho Ag(D)}{(BI)k^2} \frac{\sinh(kh - kd + kDSC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(2W + d + DC)}{D} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\
& - \frac{\rho Ag(D)}{(BD)k^2} \frac{\sinh(kh - kd + kDSC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(d + DC)}{D} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\
& - \frac{\rho Ag(D)}{(BI)k^2} \frac{\sinh(kh - kd + kDSC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(d + DC)}{D} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\
& - \frac{\rho Ag(D)}{(BD)k^2} \frac{\sinh(kh - kd - kDC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(2W + d + DC)}{D} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\
& - \frac{\rho Ag(D)}{(BI)k^2} \frac{\sinh(kh - kd - kDC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(2W + d + DC)}{D} - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\
& + \frac{\rho Ag(D)}{(BD)k^2} \frac{\sinh(kh - kd - kDC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{-BD(d + DC)}{D} + BI + B + BD - Xc \right) - \omega t - \nu \right) \\
& + \frac{\rho Ag(D)}{(BI)k^2} \frac{\sinh(kh - kd - kDC)}{\cosh(kh)} \operatorname{sen} \left(k \left(\frac{BI(d + DC)}{D} - Xc \right) - \omega t - \nu \right)
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Simplificación:

$$\gamma = \frac{\sinh(kh - kd + kDSC)}{\cosh(kh)} \tag{2.33}$$

$$\theta = \frac{\sinh(kh - kd - kDC)}{\cosh(kh)} \tag{2.34}$$

$$BI + B + BD = BT \tag{2.35}$$

$$k \left[\frac{-BD(2W + h)}{D} + BT - Xc \right] - \omega t - \nu = C_1 \tag{2.36}$$

$$k \left[\frac{BI(2W+h)}{D} - Xc \right] - \omega t - \nu = C_2 \quad (2.37)$$

$$k \left[\frac{-BD(h)}{D} + BT - Xc \right] - \omega t - \nu = C_3 \quad (2.38)$$

$$k \left[\frac{BI(h)}{D} - Xc \right] - \omega t - \nu = C_4 \quad (2.39)$$

Carga horizontal inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido de sección trapecial:

$$\begin{aligned} F_x = & \frac{\rho Ag(D)}{(BD)k^2} \left[\gamma \text{sen}(C_1) - \gamma \text{sen}(C_3) - \theta \text{sen}(C_1) + \theta \text{sen}(C_3) \right] \\ & + \frac{\rho Ag(D)}{(BI)k^2} \left[\gamma \text{sen}(C_2) - \gamma \text{sen}(C_4) - \theta \text{sen}(C_2) + \theta \text{sen}(C_4) \right] \end{aligned} \quad (2.40)$$

2.2 Ecuaciones de carga horizontal máxima

Para fines de diseño, es de interés encontrar los valores máximos de las cargas a las que estará sometida una estructura, en las ecuaciones (2.21) y (2.40) se presenta el empuje máximo resolviéndolas para un valor de $(\omega t + \nu) = \frac{\pi}{2}$.

2.2.1 Ecuaciones simplificadas de carga horizontal máxima

Las ecuaciones (2.21) y (2.40) pueden ser simplificadas mediante una aproximación que se obtiene de considerar una aceleración horizontal máxima previo a la integración, el desarrollo y resultado de este análisis se muestra a continuación.

Sección rectangular

Aceleración horizontal máxima:

$$a_x \text{ max} = Agk \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \quad (2.41)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.41) y (2.9) en la ecuación (2.8) y siguiendo el proceso descrito en la sección 2.1.1 se tiene que:

$$F_x = \int_{-d-D}^{-d+D} \int_0^{2W} \int_{-B}^B \rho Agk \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} dx dy dz \quad (2.42)$$

Integrando:

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} \int_0^{2W} x \rho A g k \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \Big|_{-B}^B dy dz \quad (2.43)$$

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} \int_0^{2W} 2B \rho A g k \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} dy dz \quad (2.44)$$

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} y 2B \rho A g k \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \Big|_0^{2W} dz \quad (2.45)$$

$$= \int_{-d-D}^{-d+D} 4BW \rho A g k \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} dz \quad (2.46)$$

$$= 4BW \rho A g \frac{\sinh(kh + kz)}{\cosh(kh)} \Big|_{-d-D}^{-d+D} \quad (2.47)$$

$$F_x = 4BW \rho A g \frac{\sinh(kh - kd + kD)}{\cosh(kh)} - 4BW \rho A g \frac{\sinh(kh - kd - kD)}{\cosh(kh)} \quad (2.48)$$

Se procede a simplificar este resultado con las ecuaciones (2.17) y (2.18) propuestas en la sección 2.1.1.

La ecuación (2.49) determina de forma aproximada la carga horizontal máxima inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido de sección rectangular:

$$F_{x_M} = 4BW \rho A g (\varepsilon - \delta) \quad (2.49)$$

Sección trapezoidal

Sustituyendo las ecuaciones (2.41) y (2.9) en la ecuación (2.8) y siguiendo el proceso descrito anteriormente se tiene que:

$$F_x = \int_{-d-DC}^{-d+DSC} \int_0^{2W} \int_{\frac{BI(y+d+DC)}{DSC+DC} - X_c}^{\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI + B + BD - X_c} \rho A g k \frac{\cosh(kh + kz)}{\cosh(kh)} dx dy dz \quad (2.50)$$

Integrando:

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC2W} \int_0^x \rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \left[\frac{-BD(y+d+DC)}{DSC+DC} + BI+B+BD-Xc \right]_{\frac{BI(y+d+DC)}{DSC+DC}-Xc} dydz \quad (2.51)$$

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC2W} \int_0^x \left(\frac{-BD(y+d+DC)}{D} + BT - Xc \right) \left(\rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) - \left(\frac{BI(y+d+DC)}{D} - Xc \right) \left(\rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) dydz \quad (2.52)$$

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC} \left(\frac{-BD}{D} \left(\frac{y^2}{2} + dy + DCy \right) + BTy - Xcy \right) \left(\rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) - \left(\frac{BI}{D} \left(\frac{y^2}{2} + dy + DCy \right) - Xcy \right) \left(\rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) \Big|_0^{2W} dz \quad (2.53)$$

$$= \int_{-d-DC}^{-d+DSC} \left(\frac{-BD}{D} (2W^2 + 2dW + 2DCW) + 2BTW - 2XcW \right) \left(\rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) - \left(\frac{BI}{D} (2W^2 + 2dW + 2DCW) - 2XcW \right) \left(\rho Agk \frac{\cosh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) dz \quad (2.54)$$

$$= \left(\frac{-BD}{D} (2W^2 + 2dW + 2DCW) + 2BTW - 2XcW \right) \left(\rho Ag \frac{\sinh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) - \left(\frac{BI}{D} (2W^2 + 2dW + 2DCW) - 2XcW \right) \left(\rho Ag \frac{\sinh(kh+kz)}{\cosh(kh)} \right) \Big|_{-d-DC}^{-d+DSC} \quad (2.55)$$

Resultado:

$$Fx = \left(\frac{-BD}{D} (2W^2 + 2dW + 2DCW) + 2BTW - 2XcW \right) \left(\rho Ag \frac{\sinh(kh - kd + kDSC)}{\cosh(kh)} \right)$$

$$\begin{aligned}
 & -\left(\frac{BI}{D}\left(2W^2 + 2dW + 2DCW\right) - 2XcW\right)\left(\rho Ag \frac{\sinh(kh - kd + kDSC)}{\cosh(kh)}\right) \\
 & -\left(\frac{-BD}{D}\left(2W^2 + 2dW + 2DCW\right) + 2BTW - 2XcW\right)\left(\rho Ag \frac{\sinh(kh - kd - kDC)}{\cosh(kh)}\right) \\
 & +\left(\frac{BI}{D}\left(2W^2 + 2dW + 2DCW\right) - 2XcW\right)\left(\rho Ag \frac{\sinh(kh - kd - kDC)}{\cosh(kh)}\right) \quad (2.56)
 \end{aligned}$$

Se simplifica este resultado mediante las ecuaciones auxiliares propuestas en la sección 2.1.2 y las mostradas a continuación:

$$\frac{-BD(W^2 + hW)}{D} + BTW - XcW = \tilde{C}_1 \quad (2.57)$$

$$\frac{BI(W^2 + hW)}{D} - XcW = \tilde{C}_2 \quad (2.58)$$

Ecuación para determinar la carga horizontal máxima inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido de sección trapecial:

$$Fx_M = 2\rho Ag \left[\tilde{C}_1\gamma - \tilde{C}_2\gamma - \tilde{C}_1\theta + \tilde{C}_2\theta \right] \quad (2.59)$$

2.2.2 Rango de aplicación de las ecuaciones simplificadas

La simplificación expuesta en las ecuaciones (2.49) y (2.59) tiene un rango de validez propuesta, cuando el error relativo entre éstas y las ecuaciones extendidas no exceda el 5.0 %, esto se muestra en la Figura 2.5. En ella, se tiene una proporción específica en cuanto a geometría y condiciones hidráulicas, Figura 2.6, pero ejemplifica la variación que presentan las ecuaciones.

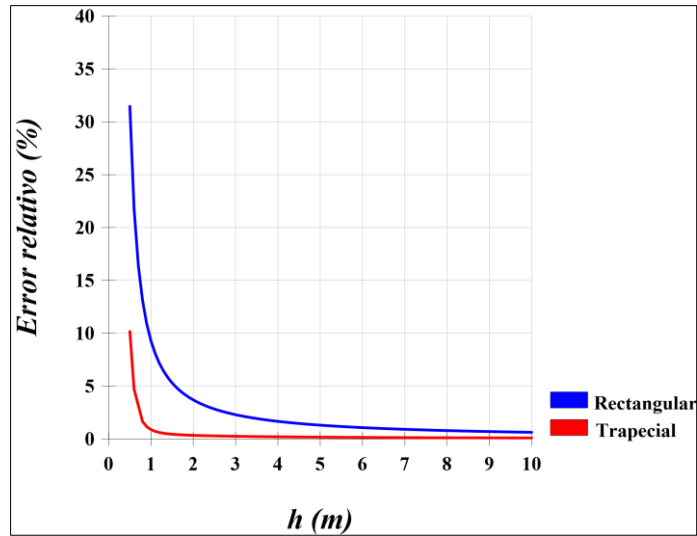


Figura 2.5. Rango de aplicación de ecuaciones simplificadas

$$H = h \cdot 0.5 \text{ m}; T = h \cdot 2 \text{ s}; 2D = h; 2B = 1.2 \cdot h; 2A = 0.5 \cdot$$

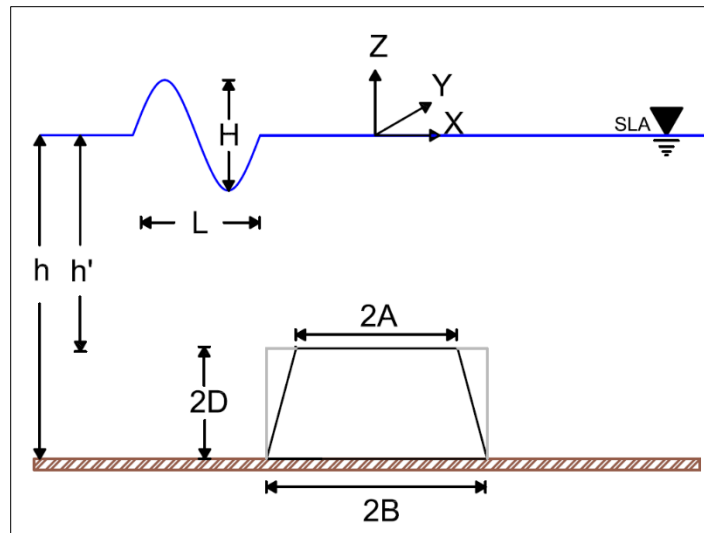


Figura 2.6. Esquema de parámetros

2.3 Validación experimental

Con el objeto de validar las ecuaciones planteadas en este capítulo, se llevó a cabo un experimento de laboratorio para evaluar la carga horizontal inducida por el oleaje sobre cuerpos sumergidos, y comparar el empuje medido experimentalmente contra los resultados teóricos que se obtienen de la formulación de Froude-Kriloff.

Al igual que el planteamiento de las ecuaciones, se decidió validar primero la ecuación para sección rectangular (Hudspeth, 2006) y posteriormente la ecuación de sección trapezoidal desarrollada en este trabajo.

El experimento consistió en fabricar dos modelos físicos, uno de sección trapecial y otro de sección rectangular, y probarlos en las mismas condiciones de oleaje. Se llevaron a cabo 24 ensayos, registrando la carga horizontal sobre el cuerpo sumergido mediante sensores de presión colocados en la cara exterior de la estructura, y la altura y periodo de ola mediante sensores de nivel colocados a lo largo del canal de oleaje.

2.3.1 Metodología

Lo primero a considerar en el diseño del experimento fueron las instalaciones en las que se realizarían los ensayos: Canal de oleaje de 0.40 m de base, 0.60 m de altura y 22.00 m de longitud, ubicado en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. A partir de ello se realizó el dimensionamiento de los modelos físicos a construir, y se establecieron las condiciones hidráulicas para cada caso a ensayar.

Se diseñaron estructuras fabricadas en acrílico, ya que al ser un material liso e impermeable se pueden despreciar los efectos no considerados en la formulación de Froude-Kriloff; estas estructuras fueron rellenas con arena para dar un peso suficiente que resistiera las condiciones de oleaje y que a la vez fuera un material que pudiera ser colocado y retirado sin dañar los sensores de presión instalados dentro de los modelos físicos.

Las dimensiones de las estructuras, expresadas en centímetros, y el resultado final de su construcción se presentan de la Figura 2.7 a la Figura 2.9.

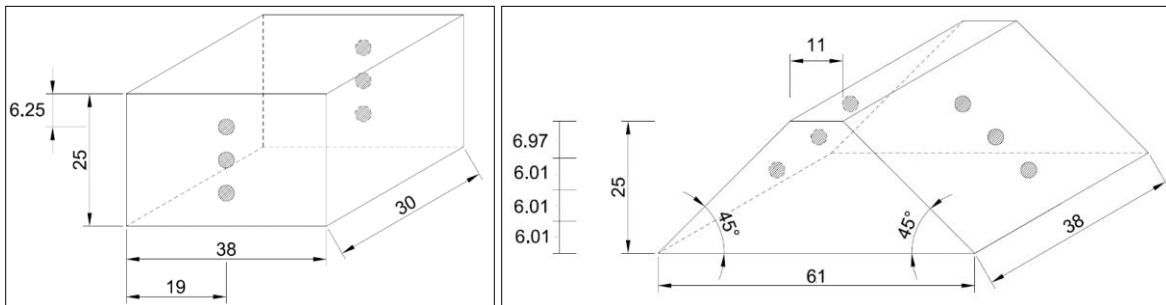


Figura 2.7. Dimensiones de las estructuras: rectangular (izq.), trapecial (der.)



Figura 2.8. Estructura de sección rectangular



Figura 2.9. Estructura de sección trapecial

En la Tabla 2.2 se enlistan las condiciones hidráulicas de cada una de las pruebas experimentales realizadas. En la Figura 2.10 se muestra el esquema general de los ensayos en el canal de oleaje.

El experimento consistió, entonces, en generar un tren de olas de 5 minutos para cada uno de los casos expuestos en la Tabla 2.2, dando tiempo suficiente entre ensayos para garantizar un estado de calma previo a cada nueva prueba. Registrando, mediante sensores de nivel, el cambio en la superficie libre del agua y, mediante sensores de presión, la carga horizontal inducida por el oleaje sobre el cuerpo sumergido.

En la Figura 2.11 y Figura 2.12 se muestran algunas de las fotografías tomadas de los experimentos realizados para sección rectangular y trapecial, para francobordo cero y negativo.

Tabla 2.2. Casos de validación experimental

Oleaje regular			Oleaje irregular		
Caso	Condición		Caso	Condición	
1	h=	0.25 m	7	h=	0.25 m
	H=	0.05 m		Hs=	0.05 m
	T=	0.80 s		Tp=	0.80 s
2	h=	0.25 m	8	h=	0.25 m
	H=	0.08 m		Hs=	0.08 m
	T=	1.00 s		Tp=	1.00 s
3	h=	0.25 m	9	h=	0.25 m
	H=	0.08 m		Hs=	0.08 m
	T=	1.10 s		Tp=	1.10 s
4	h=	0.40 m	10	h=	0.40 m
	H=	0.05 m		Hs=	0.05 m
	T=	0.80 s		Tp=	0.80 s
5	h=	0.40 m	11	h=	0.40 m
	H=	0.08 m		Hs=	0.08 m
	T=	1.00 s		Tp=	1.00 s
6	h=	0.40 m	12	h=	0.40 m
	H=	0.08 m		Hs=	0.08 m
	T=	1.10 s		Tp=	1.10 s

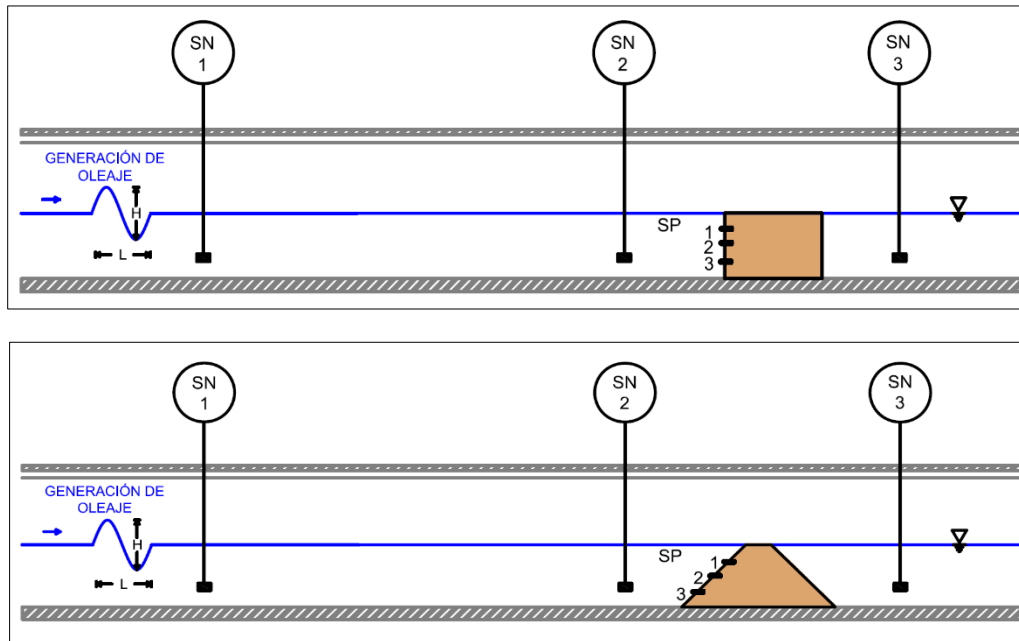


Figura 2.10. Esquema general de los experimentos, sección rectangular (arriba) y sección trapezoidal (abajo)

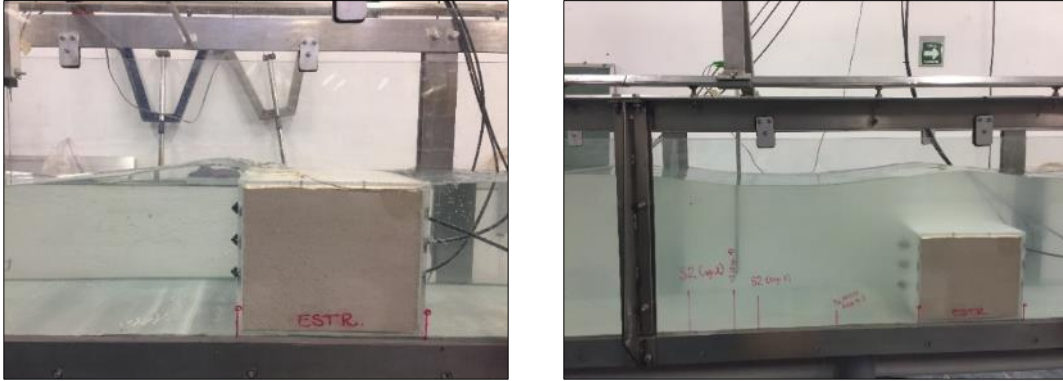


Figura 2.11. Imágenes de experimento para sección rectangular

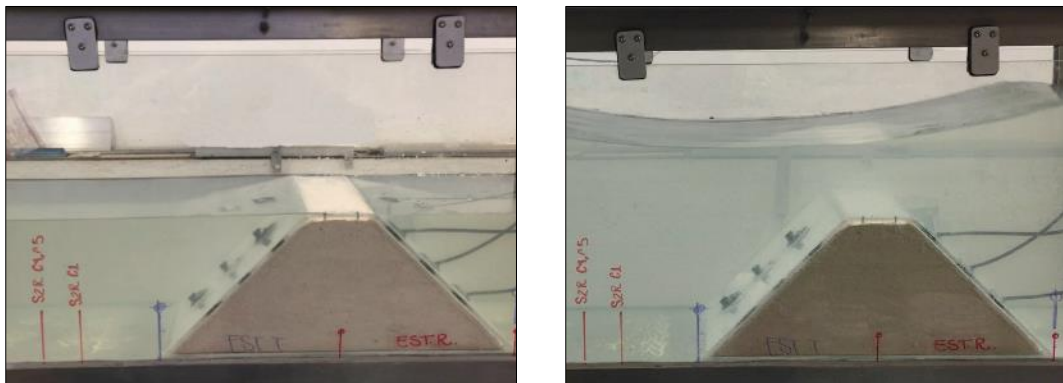


Figura 2.12. Imágenes de experimento para sección trapecial

2.3.2 Procesamiento de datos

Una vez efectuados los experimentos se procedió a procesar los datos registrados en cada uno de los sensores de nivel y presión, para obtener la variación en la superficie libre del agua y la carga horizontal inducida por el oleaje sobre la estructura sumergida evaluada.

Sensores de nivel

Se realizó el análisis temporal de la serie de datos obtenidos de cada uno de los tres sensores de nivel colocados en el experimento, para cada uno de los casos ensayados, a partir de los métodos estadísticos descritos en la literatura (e.g. Silva, 2005).

Lo primero a llevar a cabo fue la revisión gráfica de cada una de las señales para garantizar la congruencia y continuidad del registro, posteriormente se decidió cortar de cada señal los primeros segundos de medición para tomar en cuenta en el análisis estadístico únicamente los valores de registro a partir de los cuales el oleaje está completamente desarrollado.

Una vez efectuada esta revisión y depuración inicial de la muestra, se realizó una corrección de tipo parabólico al nivel medio del registro; se caracterizó la señal, obteniendo las alturas y periodos de cada ola generada mediante el criterio de pasos ascendentes por cero; finalmente se determinaron los parámetros del oleaje, definiendo la altura de ola cuadrática media y significativo, de la misma forma que el periodo cuadrático medio y pico.

Los resultados obtenidos muestran en la Tabla 2.3 y la Tabla 2.4.

Tabla 2.3. Parámetros de oleaje de los ensayos para sección rectangular

Parámetros	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)
	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1	
RMS	4.934	0.800	7.031	0.924	12.599	1.100	5.364	0.800	8.552	1.000	9.565	1.100
(Hs,Tp)	5.055	0.799	9.221	1.002	12.761	1.101	5.420	0.800	8.646	1.000	9.632	1.100
	SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2	
RMS	4.840	0.800	9.247	1.001	13.370	1.100	5.198	0.800	6.761	1.000	10.020	1.100
(Hs,Tp)	4.967	0.799	10.666	1.016	13.596	1.100	5.241	0.800	6.895	1.000	10.123	1.100
	SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3	
RMS	0.555	0.600	1.584	0.712	0.808	0.687	4.751	0.800	5.976	1.000	7.673	1.100
(Hs,Tp)	0.715	0.663	2.223	0.891	1.104	0.809	4.813	0.800	6.119	1.000	7.774	1.100
	Caso 7		Caso 8		Caso 9		Caso 10		Caso 11		Caso 12	
	SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1	
RMS	3.227	0.809	6.069	0.962	5.521	1.007	2.904	0.812	5.066	0.966	4.768	1.036
(Hs,Tp)	4.619	0.820	8.357	0.992	7.702	1.047	4.096	0.808	7.142	0.955	6.701	1.036
	SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2	
RMS	4.217	0.820	7.617	0.963	6.989	1.049	2.733	0.801	4.650	0.928	5.338	1.041
(Hs,Tp)	6.025	0.814	10.388	0.975	9.862	1.088	3.927	0.799	6.623	0.947	7.493	1.046
	SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3	
RMS	0.611	0.532	1.507	0.693	1.010	0.790	2.516	0.818	4.351	0.934	4.312	0.991
(Hs,Tp)	0.880	0.577	2.248	0.868	1.448	0.940	3.602	0.817	6.236	0.949	6.098	1.039

Tabla 2.4. Parámetros de oleaje de los ensayos para sección trapezoidal

Parámetros	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)	H (cm)	T (s)
	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1	
RMS	6.486	0.800	11.065	0.999	11.460	1.099	4.913	0.800	10.063	1.000	10.059	1.100
(Hs,Tp)	6.572	0.800	11.314	1.002	11.908	1.098	4.940	0.800	10.160	1.000	10.172	1.100
	SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2	
RMS	6.695	0.800	11.074	1.000	11.190	1.100	3.924	0.800	10.345	1.000	10.492	1.100
(Hs,Tp)	6.753	0.800	11.428	1.005	11.609	1.103	3.950	0.800	10.515	1.000	10.618	1.100
	SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3	
RMS	2.971	0.723	4.280	0.902	4.376	1.000	5.080	0.800	7.009	1.000	8.272	1.100
(Hs,Tp)	3.459	0.799	4.950	1.001	4.838	1.055	5.159	0.800	7.217	1.000	8.369	1.100
	Caso 7		Caso 8		Caso 9		Caso 10		Caso 11		Caso 12	
	SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1		SN_1	
RMS	2.861	0.812	5.343	0.971	5.744	1.046	2.674	0.807	4.816	0.973	5.052	1.045
(Hs,Tp)	4.038	0.807	7.586	0.949	8.044	1.052	3.805	0.808	6.860	0.955	7.115	1.040
	SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2		SN_2	
RMS	3.011	0.776	6.321	1.008	6.827	1.072	2.770	0.822	5.283	0.965	5.565	1.024
(Hs,Tp)	4.272	0.802	8.823	1.001	9.486	1.104	4.010	0.823	7.447	0.963	7.900	1.036
	SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3		SN_3	
RMS	1.200	0.633	2.456	0.774	2.460	0.829	2.522	0.825	4.397	0.947	4.603	1.009
(Hs,Tp)	1.743	0.678	3.664	0.921	3.663	1.006	3.641	0.813	6.267	0.959	6.540	1.033

A partir de estos valores y sustituyendo los datos geométricos de los modelos físicos en las ecuaciones (2.21) y (2.40), planteadas al inicio de este capítulo, se obtuvo la carga horizontal por metro lineal inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido.

En la Tabla 2.5 y la Tabla 2.6 se muestran los resultados a pie de estructura (sensor de nivel 2) para cada sección.

Tabla 2.5. Carga horizontal teórica sobre estructura de sección rectangular

Parámetros	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.048	0.800	5.6372	0.092	1.001	10.5494	0.134	1.100	14.7518
(Hs,Tp)	0.050	0.799	5.8705	0.107	1.016	12.2019	0.136	1.100	14.9720
	Caso 4			Caso 5			Caso 6		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.052	0.800	2.4462	0.068	1.000	4.2758	0.100	1.100	6.5572
(Hs,Tp)	0.052	0.800	2.4462	0.069	1.000	4.3386	0.101	1.100	6.6228
	Caso 7			Caso 8			Caso 9		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.042	0.820	4.9537	0.076	0.963	8.8244	0.070	1.049	7.8790
(Hs,Tp)	0.060	0.814	7.0693	0.104	0.975	12.0309	0.099	1.088	10.9577
	Caso 10			Caso 11			Caso 12		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.027	0.801	1.2735	0.046	0.928	2.7172	0.053	1.041	3.4076
(Hs,Tp)	0.039	0.799	1.8299	0.066	0.947	3.9770	0.075	1.046	4.8327

Tabla 2.6. Carga horizontal teórica sobre estructuras de sección trapecial

Parámetros	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.067	0.800	0.0888	0.111	1.000	4.4849	0.112	1.100	7.9698
(Hs,Tp)	0.068	0.800	0.0902	0.114	1.005	4.7867	0.116	1.103	8.3546
	Caso 4			Caso 5			Caso 6		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.039	0.800	0.0175	0.103	1.000	2.3374	0.105	1.100	5.5317
(Hs,Tp)	0.039	0.800	0.0175	0.105	1.000	2.3828	0.106	1.100	5.5843
	Caso 7			Caso 8			Caso 9		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.030	0.776	0.0043	0.063	1.008	2.7052	0.068	1.072	4.2762
(Hs,Tp)	0.043	0.802	0.0585	0.088	1.001	3.5835	0.095	1.104	6.8694
	Caso 10			Caso 11			Caso 12		
	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)	H (m)	T (s)	Fx (kg-f/m)
RMS (H,T)	0.028	0.822	0.0299	0.053	0.965	0.7198	0.056	1.024	1.6561
(Hs,Tp)	0.040	0.823	0.0448	0.074	0.963	0.9697	0.079	1.036	2.6179

Sensores de presión

Se realizó el análisis temporal de la serie de datos obtenidos de cada uno de los tres sensores de nivel colocados en el experimento, para cada uno de los casos ensayados.

Lo primero a llevar a cabo fue la revisión gráfica de las series de datos para garantizar la congruencia y continuidad del registro, posteriormente se decidió cortar de cada señal los primeros segundos de medición para tomar en cuenta en el análisis estadístico únicamente los valores de registro a partir de los cuales el oleaje está completamente desarrollado (a partir de los datos finales considerados para los sensores de nivel).

Una vez efectuada esta revisión y depuración inicial de la muestra se realizó una corrección de tipo parabólico al nivel medio del registro y posteriormente se determinó el valor cuadrático medio de todos los datos registrados por cada sensor.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.7 y la Tabla 2.8.

Tabla 2.7. Carga horizontal registrada en los sensores de presión, sección rectangular

Parámetros	Presión (kg-f/m ²)					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1
RMS	1.185	2.656	3.635	0.624	1.590	1.844
	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2
RMS	0.859	2.213	3.158	0.545	1.430	1.633
	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3
RMS	0.331	1.006	1.375	0.237	0.640	0.715
	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12
	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1
RMS	1.186	2.445	2.301	0.349	0.877	1.078
	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2
RMS	0.886	2.088	1.985	0.311	0.790	0.977
	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3
RMS	0.358	0.984	0.858	0.138	0.355	0.434

Tabla 2.8. Carga horizontal registrada en los sensores de presión, sección trapecial

Parámetros	Presión (kg-f/m ²)					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1
RMS	1.683	1.598	3.118	0.260	0.775	0.850
	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2
RMS	0.611	2.110	2.417	0.397	1.374	1.502
	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3
RMS	0.748	1.229	1.481	0.321	1.061	1.196
	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12
	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1	SP_1
RMS	1.004	1.410	2.499	0.163	0.425	0.506
	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2	SP_2
RMS	0.423	1.515	1.819	0.292	0.804	0.975
	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3	SP_3
RMS	0.411	1.002	1.215	0.238	0.695	0.859

Después de tener este valor para cada sensor de presión en el modelo, se realizaron diagramas de empuje para determinar la carga horizontal por metro lineal ejercida sobre la estructura, como se muestran en las Figura 2.13 y la Figura 2.14.

De la suma de las cuatro áreas del diagrama de presiones, formadas por la distancia vertical entre sensores y la magnitud de la presión registrada en ellos, resulta la carga horizontal por metro lineal inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido.

Los resultados de estos cálculos, según la sección transversal y para cada caso ensayado se muestran en la Tabla 2.9 y la Tabla 2.10.

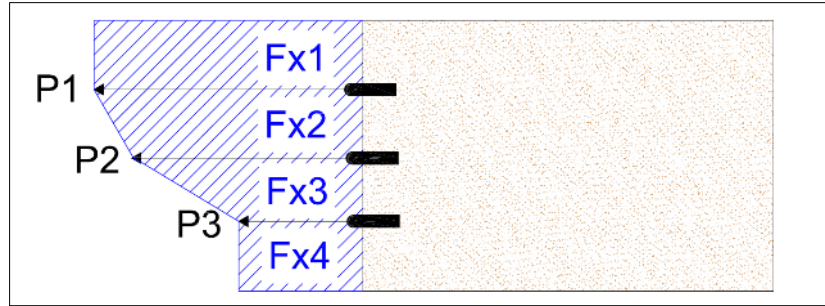


Figura 2.13. Diagrama general de carga horizontal para sección rectangular

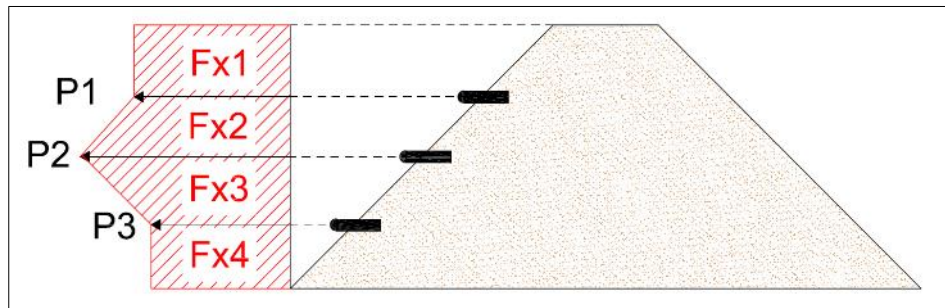


Figura 2.14. Diagrama horizontal para sección trapecial

Tabla 2.9. Carga horizontal experimental sobre estructura de sección rectangular

Sensor	Caso 1	Fx (Kg-f/m)	Caso 2	Fx (Kg-f/m)	Caso 3	Fx (Kg-f/m)	Caso 4	Fx (Kg-f/m)	Caso 5	Fx (Kg-f/m)	Caso 6	Fx (Kg-f/m)
SP_28	0.331	1.915	1.006	4.728	1.375	6.547	0.237	1.127	0.640	2.932	0.715	3.357
SP_27	0.859		2.213		3.158		0.545		1.430		1.633	
SP_25	1.185		2.656		3.635		0.624		1.590		1.844	
	Caso 7	Fx (Kg-f/m)	Caso 8	Fx (Kg-f/m)	Caso 9	Fx (Kg-f/m)	Caso 10	Fx (Kg-f/m)	Caso 11	Fx (Kg-f/m)	Caso 12	Fx (Kg-f/m)
SP_28	0.358	1.959	0.984	4.441	0.858	4.123	0.138	0.639	0.355	1.620	0.434	1.992
SP_27	0.886		2.088		1.985		0.311		0.790		0.977	
SP_25	1.186		2.445		2.301		0.349		0.877		1.078	

Tabla 2.10. Carga horizontal experimental sobre estructura de sección rectangular

Sensor	Caso 1	Fx (Kg-f/m)	Caso 2	Fx (Kg-f/m)	Caso 3	Fx (Kg-f/m)	Caso 4	Fx (Kg-f/m)	Caso 5	Fx (Kg-f/m)	Caso 6	Fx (Kg-f/m)
SP_28	1.683	2.720	1.598	3.970	3.118	5.899	0.260	0.787	0.775	2.555	0.850	2.829
SP_27	0.611		2.110		2.417		0.397		1.374		1.502	
SP_25	0.748		1.229		1.481		0.321		1.061		1.196	
	Caso 7	Fx (Kg-f/m)	Caso 8	Fx (Kg-f/m)	Caso 9	Fx (Kg-f/m)	Caso 10	Fx (Kg-f/m)	Caso 11	Fx (Kg-f/m)	Caso 12	Fx (Kg-f/m)
SP_28	1.004	1.626	1.410	3.221	2.499	4.681	0.163	0.552	0.425	1.534	0.506	1.865
SP_27	0.423		1.515		1.819		0.292		0.804		0.975	
SP_25	0.411		1.002		1.215		0.238		0.695		0.859	

2.4 Resultados y discusión

Se procedió a comparar los resultados obtenidos mediante la formulación de Froude-Kriloff con la carga horizontal medida de forma experimental en los ensayos de laboratorio realizados. Los resultados de los parámetros de mejor ajuste, que resultan de las condiciones de oleaje a pie de estructura y los parámetros de H_s y T_p , se muestran a continuación.

Tabla 2.11. Comparativa entre valores teóricos y experimentales de sección rectangular

Caso	Carga horizontal Kgf/m		Error relativo absoluto
	Teórico	Experimental	
1	5.871	1.915	0.67
2	12.202	4.728	0.61
3	14.972	6.547	0.56
4	2.446	1.127	0.54
5	4.339	2.932	0.32
6	6.623	3.357	0.49
7	7.069	1.959	0.72
8	12.031	4.441	0.63
9	10.958	4.123	0.62
10	1.830	0.639	0.65
11	3.977	1.620	0.59
12	4.833	1.992	0.59

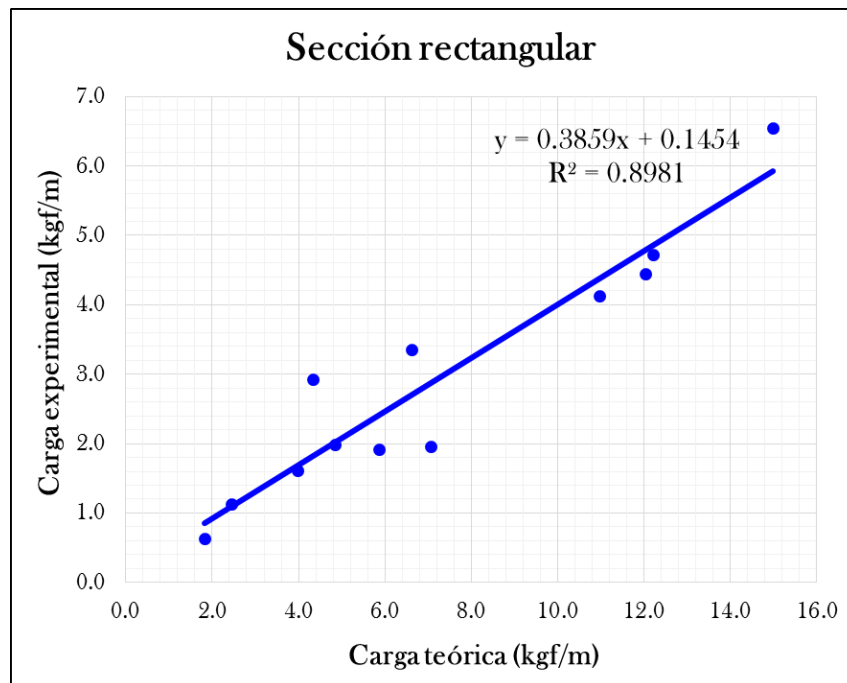


Figura 2.15. Correlación entre la carga horizontal teórica y experimental

La ecuación de sección rectangular sobrestima la carga horizontal inducida por el oleaje sobre un cuerpo sumergido, por lo que se propone un coeficiente de validación experimental de 0.5 para que dicha formulación pueda ser empleada para diseño estructural. Lo que se muestra en la Tabla 2.12 y la Figura 2.16.

Tabla 2.12. Comparativa entre valores teóricos, aplicando coeficiente de validación experimental, y experimentales de sección rectangular

Caso	Carga horizontal Kg/m		Error relativo absoluto
	Teórico	Experimental	
1	2.935	1.915	0.35
2	6.101	4.728	0.23
3	7.486	6.547	0.13
4	1.223	1.127	0.08
5	2.169	2.932	0.35
6	3.311	3.357	0.01
7	3.535	1.959	0.45
8	6.015	4.441	0.26
9	5.479	4.123	0.25
10	0.915	0.639	0.30
11	1.989	1.620	0.19
12	2.416	1.992	0.18

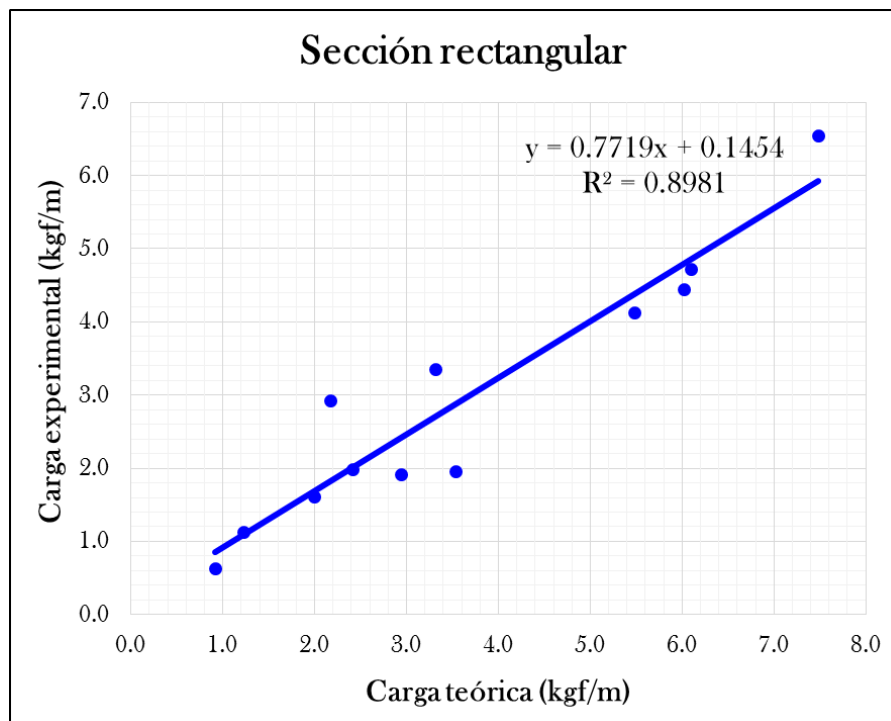


Figura 2.16. Correlación entre la carga horizontal teórica final y experimental

La relación que presenta la ecuación de sección trapecial con la carga horizontal medida experimentalmente, Tabla 2.13 y Figura 2.17, no es tan alta como la rectangular, esto debido a la amplia diferencia que se tiene en los casos de menor altura de ola y periodo; por tanto, la ecuación podrá ser implementada para el diseño estructural sin necesidad de un factor de ajuste teniendo en cuenta que esto está abierto a mayor experimentación para establecer recomendaciones más precisas.

Tabla 2.13. Comparativa entre valores teóricos y experimentales en sección trapecial

Caso	Carga horizontal Kgf/m		Error relativo absoluto
	Teórico	Experimental	
1	0.090	2.720	29.15
2	4.787	3.970	0.17
3	8.355	5.899	0.29
4	0.018	0.787	43.98
5	2.383	2.555	0.07
6	5.584	2.829	0.49
7	0.059	1.626	26.80
8	3.584	3.221	0.10
9	6.869	4.681	0.32
10	0.045	0.552	11.32
11	0.970	1.534	0.58
12	2.618	1.865	0.29

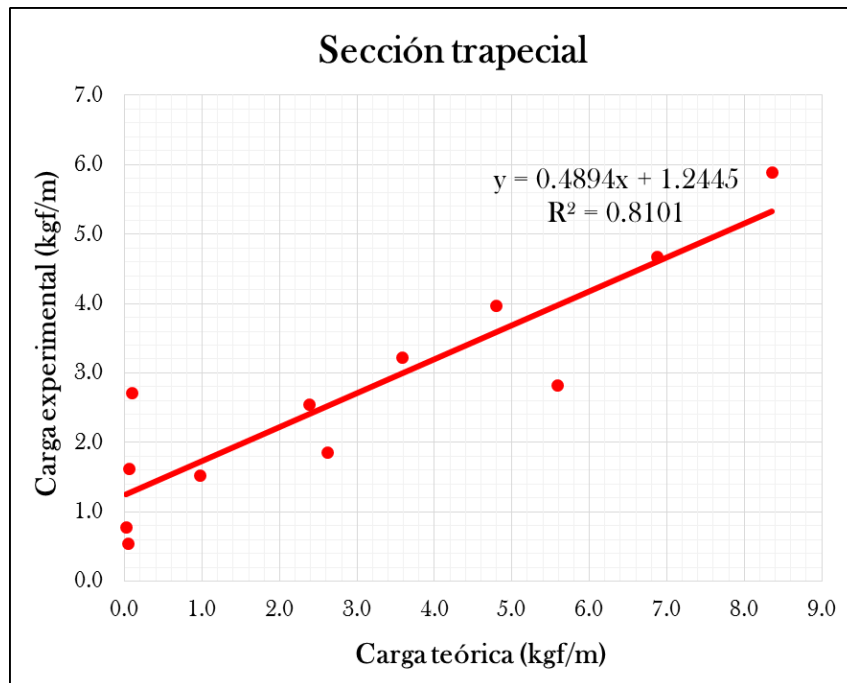


Figura 2.17. Correlación entre la carga horizontal teórica y experimental

2.5 Recomendaciones de aplicación para la formulación Froude-Kriloff

Con fines de diseño estructural, en base al desarrollo analítico y la validación experimental que se llevó a cabo para este trabajo de investigación, se recomienda utilizar la formulación desarrollada para sección rectangular agregando el factor de corrección determinado a través de la validación experimental; mientras que la ecuación para sección trapecial es la misma que se determinó en el subcapítulo del desarrollo analítico.

$$F_x = 0.5 * \frac{2\rho AgW}{k} \left[-\varepsilon \cos(\alpha) + \varepsilon \cos(\beta) + \delta \cos(\alpha) - \delta \cos(\beta) \right] \quad (2.60)$$

$$F_x = \frac{\rho Ag(D)}{(BD)k^2} \left[\gamma \text{sen}(C_1) - \gamma \text{sen}(C_3) - \theta \text{sen}(C_1) + \theta \text{sen}(C_3) \right] \\ + \frac{\rho Ag(D)}{(BI)k^2} \left[\gamma \text{sen}(C_2) - \gamma \text{sen}(C_4) - \theta \text{sen}(C_2) + \theta \text{sen}(C_4) \right] \quad (2.61)$$

Evaluándolas para valores de $(\omega t + \nu) = \frac{\pi}{2}$ y utilizando las condiciones de oleaje a pie de dique y los parámetros de altura de ola significativa y periodo pico, ya que con estos valores se obtiene un mejor ajuste en los resultados.

2.6 Comparativa de desempeño estructural entre ambas secciones

Una vez establecidas las ecuaciones validadas para determinar la carga horizontal sobre un cuerpo sumergido para ambas secciones, se procedió a realizar una comparativa de su desempeño, empleando gráficas adimensionales variando un parámetro geométrico o de oleaje para cada una de ellas, manteniendo los demás valores constantes.

Atendiendo al esquema mostrado en la Figura 2.6 se variaron las condiciones para cada caso según se presenta a continuación:

Las primeras dos gráficas comparativas varían condiciones de oleaje, manteniendo una misma sección transversal del objeto. Las últimas tres gráficas comparativas mantienen las condiciones de oleaje, variando las dimensiones de la sección.

Para las secciones propuestas, variando el Periodo del oleaje, Figura 2.18, el empuje sobre una sección rectangular es menor que el de sección trapecial en los primeros valores del rango de variación del periodo, observando que para periodos muy pequeños el empuje aumenta en ambas secciones hasta un periodo a partir del cual decrece la carga y la diferencia entre ellas comienza a ser menor.

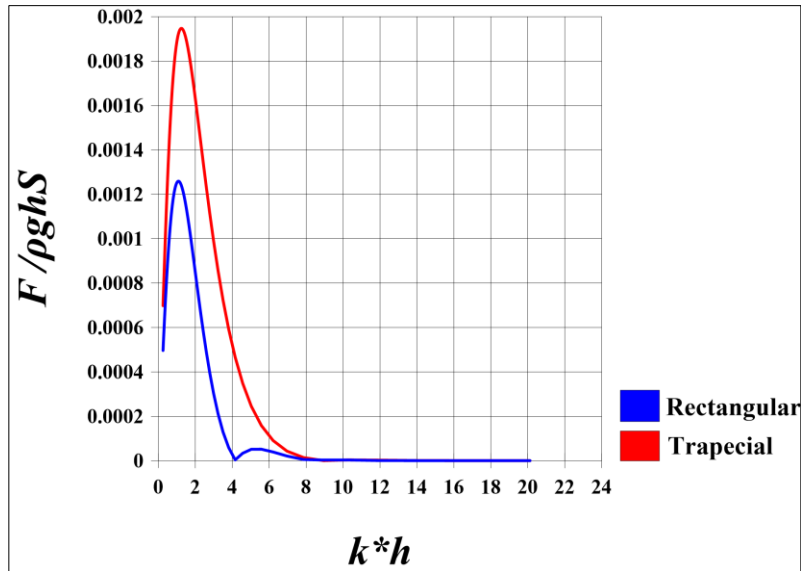


Figura 2.18. Variando periodo

$$h = 5 \text{ m}; H = 2 \text{ m}; T = (1, 18) \text{ s}; 2D = 0.5 \cdot h; 2B = 1.5 \cdot h; 2A = 0.5 \cdot h$$

Para las secciones propuestas, variando la altura de ola, Figura 2.19, siempre es menor el empuje sobre una sección rectangular que una trapecial, observando que la diferencia aumenta linealmente en la medida que crece la altura de ola.

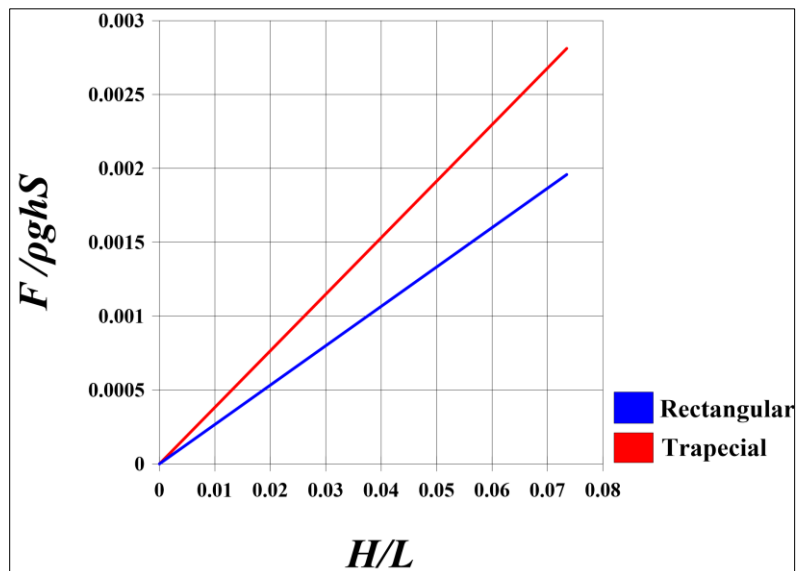


Figura 2.19. Variando altura de ola

$$h = 5 \text{ m}; H = (0, 0.78 \cdot h) \text{ m}; T = 8 \text{ s}; 2D = 0.5 \cdot h; 2B = 1.5 \cdot h; 2A = 0.5 \cdot h$$

Para las condiciones de oleaje propuestas, variando la altura de la estructura y manteniendo bases constantes, Figura 2.20, se observa que el empuje es menor en la sección trapecial hasta

una dimensión h' a partir de la cual, conforme decrece la altura de la estructura, la sección rectangular recibe menos carga que la trapecial.

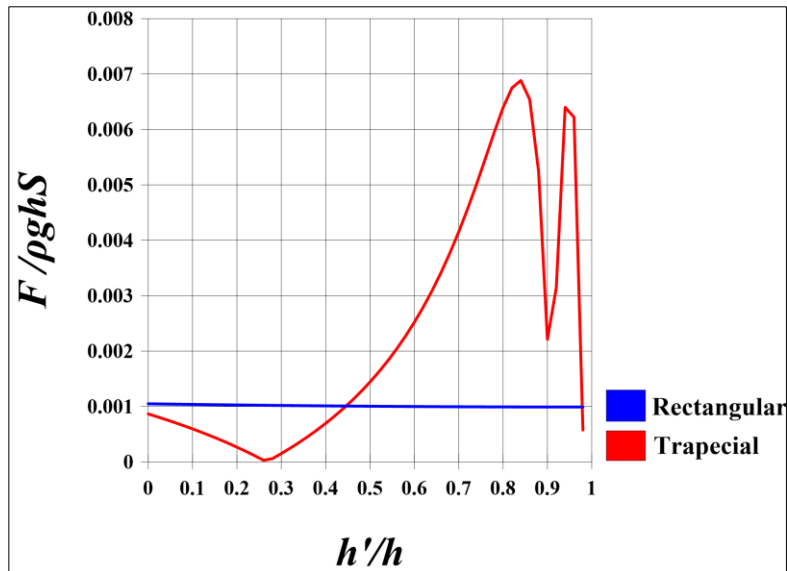


Figura 2.20. Variando la altura de la estructura

$$h = 5 \text{ m}; H = 2 \text{ m}; T = 8 \text{ s}; 2D = (0, h); 2B = 1.5 \cdot h; 2A = 0.5 \cdot h$$

Para las condiciones de oleaje propuestas, variando la base mayor de la estructura, Figura 2.21, el empuje es menor en la sección trapecial hasta una variación de B a partir de la cual crece la carga horizontal sobre esta sección, superando el empuje de la sección rectangular.

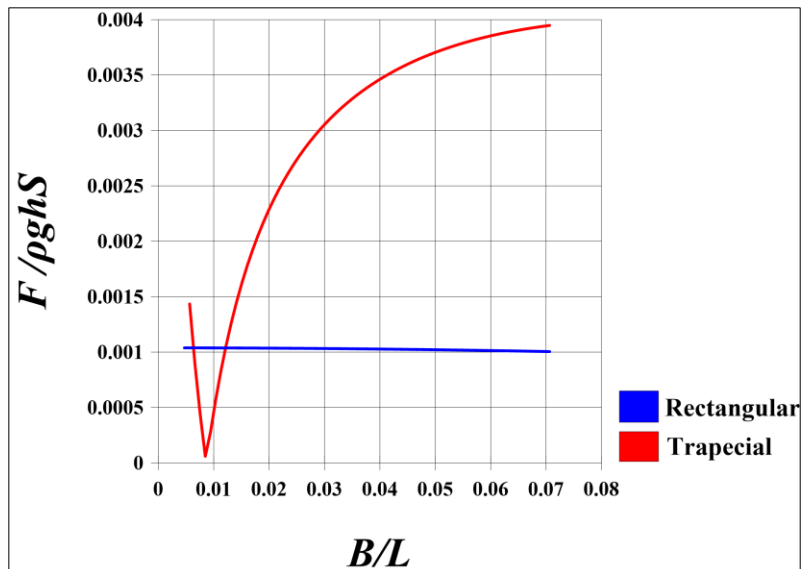


Figura 2.21. Variando la base mayor

$$h = 5 \text{ m}; H = 2 \text{ m}; T = 8 \text{ s}; 2D = 0.5 \cdot h; 2B = (0.1 \cdot h, 1.5 \cdot h); 2A = 0.1 \cdot h$$

Para las condiciones de oleaje propuestas, variando la base menor de la estructura, Figura 2.22, el empuje en la sección rectangular se mantiene ya que esta variación sólo es posible en la sección trapecial, la cual presenta empujes mayores y menores, según la relación que mantiene el talud con la altura de la estructura, observando que para secciones casi triangulares el empuje es mayor, decreciendo conforme la base menor va en aumento hasta un valor a partir del cual se vuelve a presentar un incremento en la carga horizontal sobre la estructura.

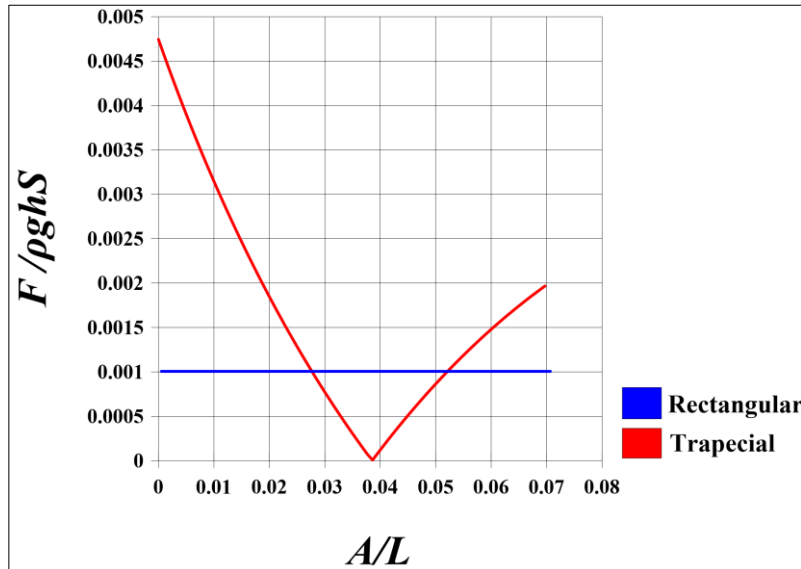


Figura 2.22. Variando la base menor de la estructura

$$h = 5 \text{ m}; H = 2 \text{ m}; T = 8 \text{ s}; 2D = 0.5 \cdot h; 2B = 1.5 \cdot h; 2A = (0, 1.5 \cdot h)$$

Estas gráficas generales son importantes porque ejemplifican muy bien que existen casos en los que se preferirá una sección sobre otra por temas de eficiencia; al utilizar esta metodología para diseño es conveniente tenerlas presentes y se podrán elaborar a partir de valores específicos del caso de aplicación con los cuales sabremos el tipo de estructura a elegir.

3 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE MODELADO

Con el fin de tener una base de datos larga y con datos recientes, se ubicaron estaciones de medición, cercanas y representativas, del sitio de interés, de donde se obtuvieron las cuatro mostradas en la Figura 3.1. En ella, las Estaciones 1 y 2 se tomaron de (Silva, et al, 2008) donde se tienen datos de oleaje horarios desde 1948 hasta 2010; mientras que las Estaciones 3 y 4 corresponden a series de datos de oleaje cada tres horas, desde 2010 hasta 2015 tomadas de la NOAA (<ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>).

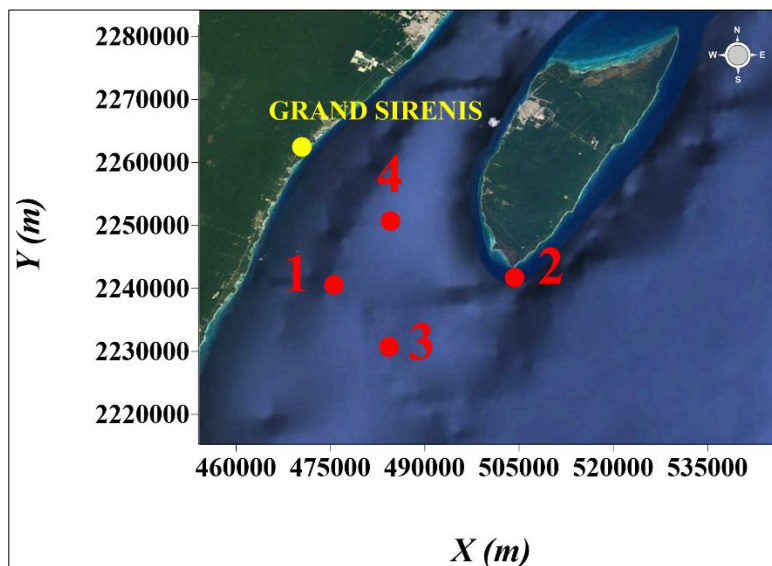


Figura 3.1. Localización de las estaciones con datos de oleaje

Tabla 3.1. Coordenadas de las estaciones de oleaje

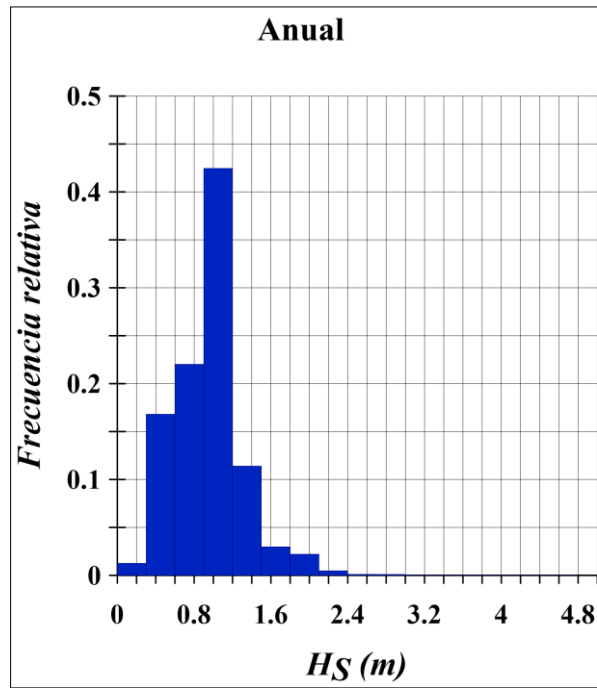
Estación	Coordenadas		Años disponibles		Frecuencia de muestreo (horas)
	Longitud	Latitud	Inicio	Fin	
1	-87.2500	20.2500	01/01/1948	21/12/2010	1
2	-87.0000	20.2500	01/01/1948	21/12/2010	1
3	-87.1667	20.1667	01/02/2005	01/08/2015	3
4	-87.1667	20.3333	01/02/2005	01/08/2015	3

3.1 Estadística del oleaje

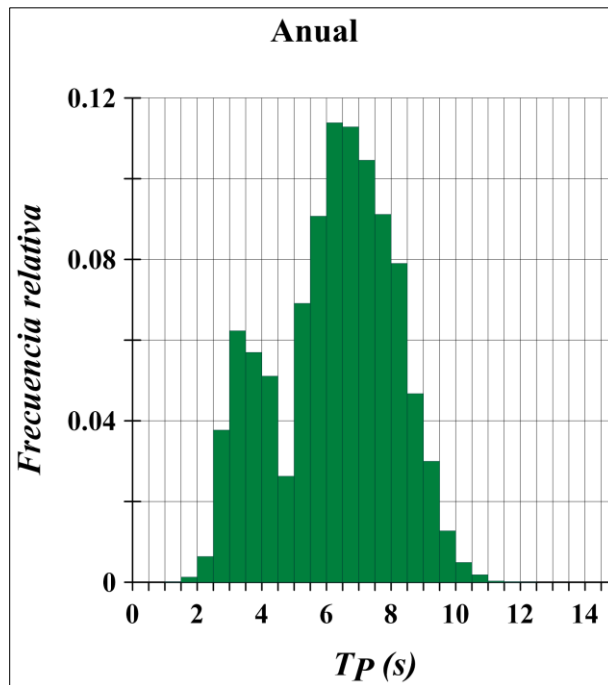
Con la finalidad de obtener los casos representativos a los que está sometida la zona costera en estudio se realizó un análisis estadístico de los datos de oleaje de la región, cuyos resultados se muestran a continuación. Como resumen del análisis se presentan, para cada estación, los histogramas de frecuencia, rosas de dirección y curvas de probabilidad de excedencia. También las gráficas de probabilidad conjunta, así como los análisis de régimen extremal, presentando tanto probabilidad de ocurrencia como periodo de retorno en papel Weibull.

3.1.1 Estación 1

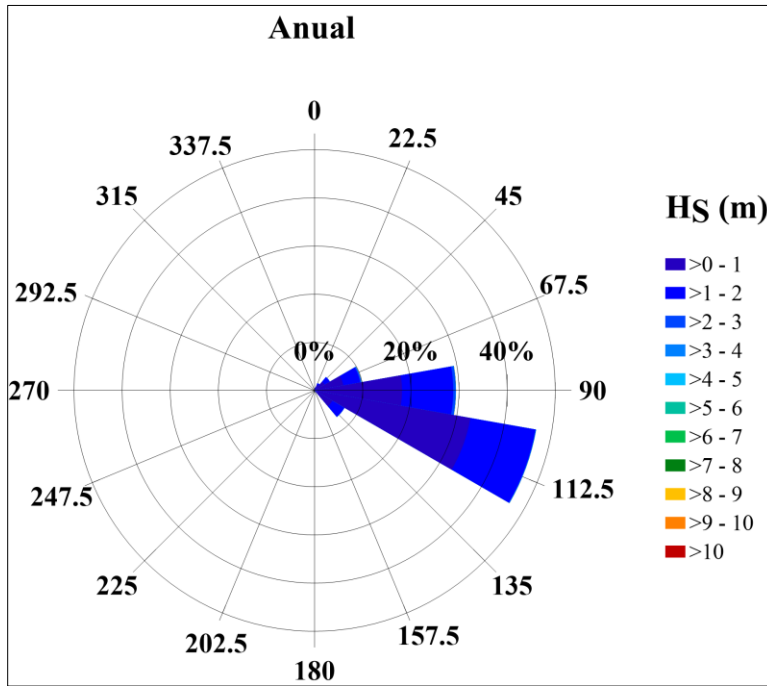
Histograma H_s



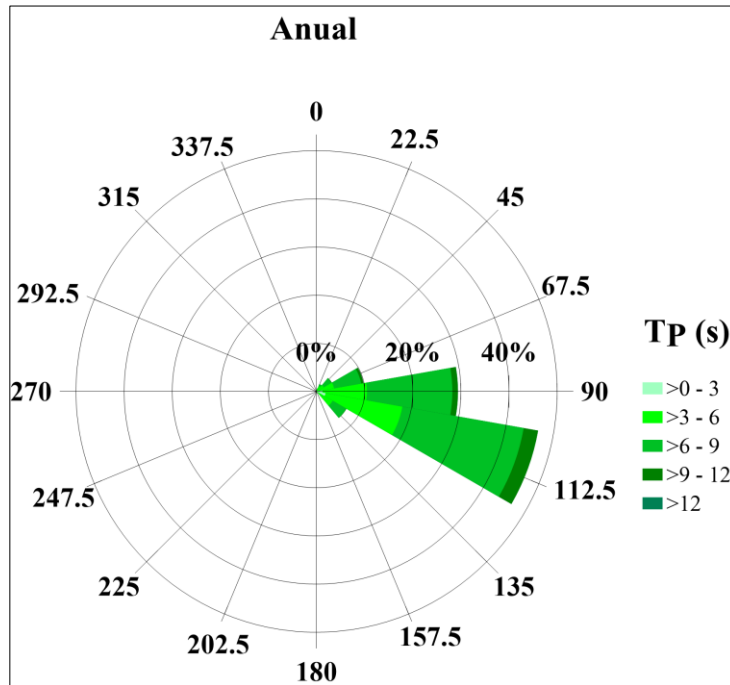
Histograma T_p



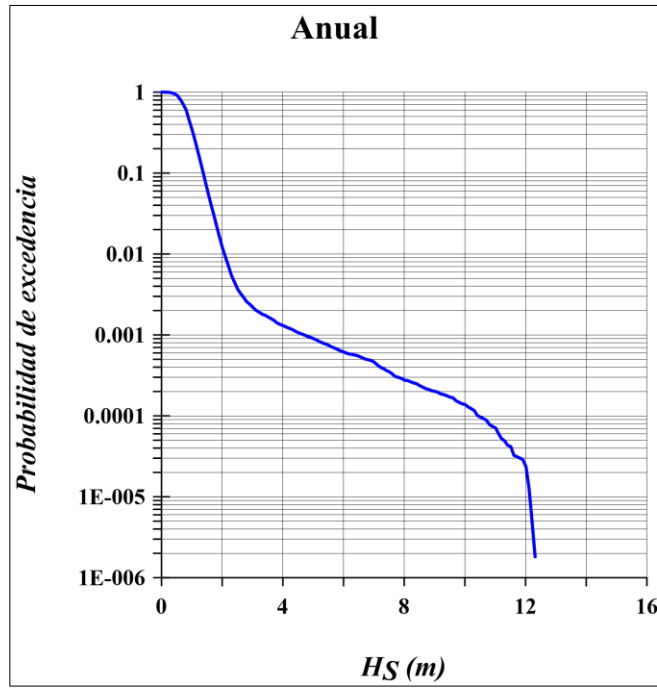
Rosa H_s



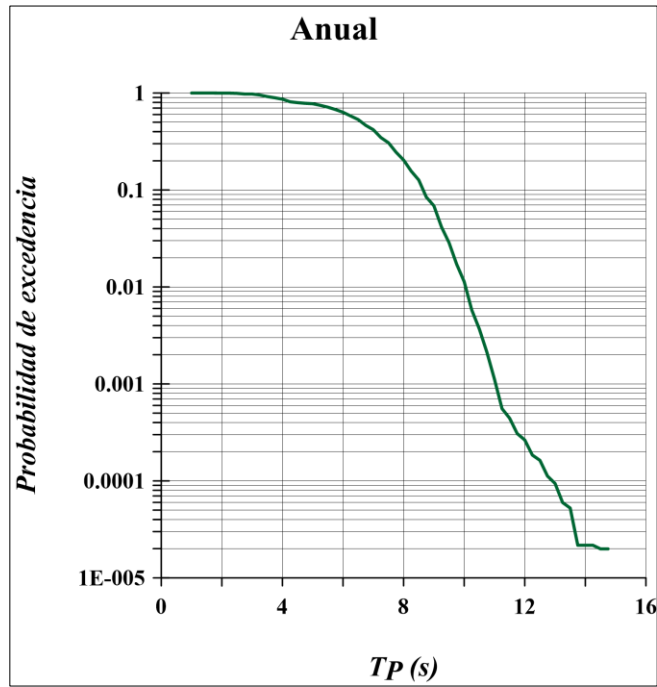
Rosa T_p



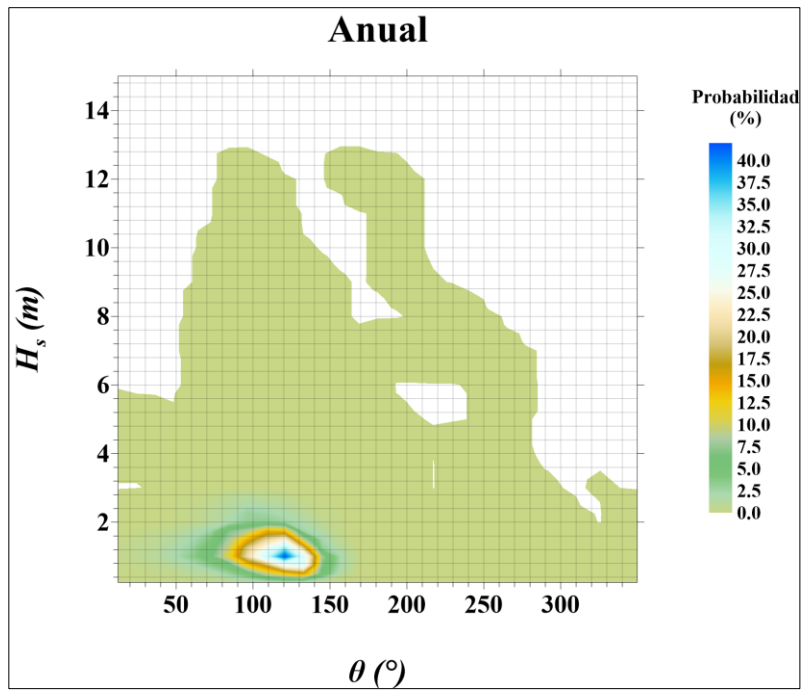
Probabilidad de excedencia H_s



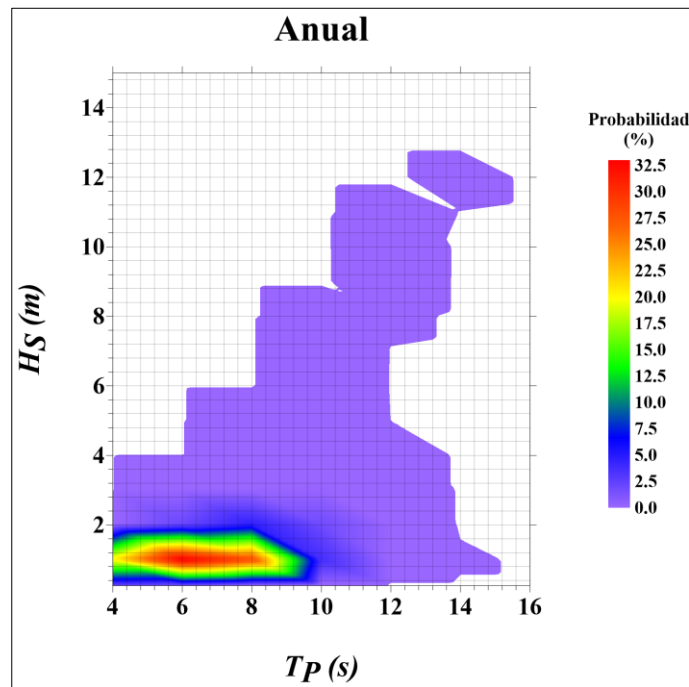
Probabilidad de excedencia T_p



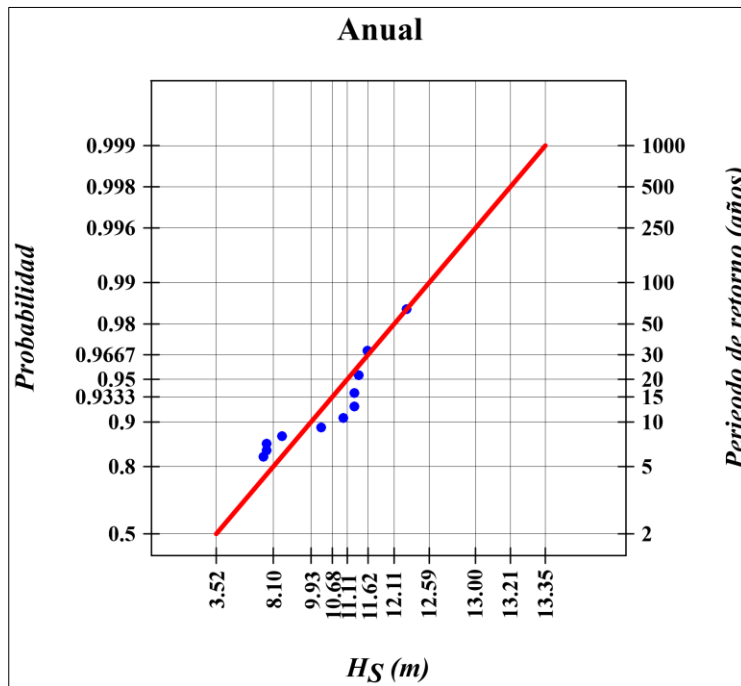
Probabilidad conjunta H_s vs θ



Probabilidad conjunta H_s vs T_p

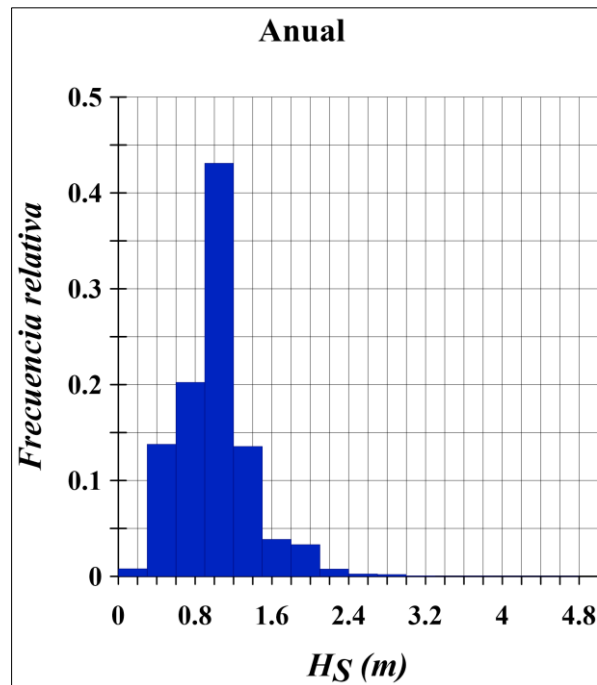


Régimen extremo (Distribución Weibull)

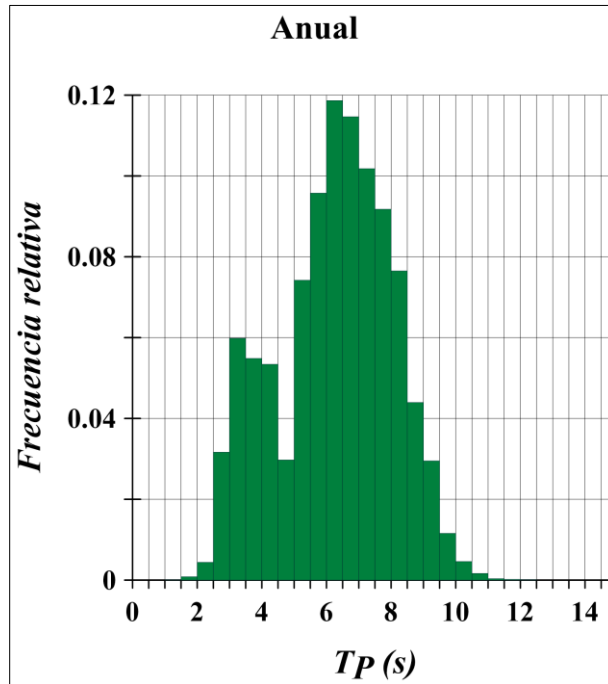


3.1.2 Estación 2

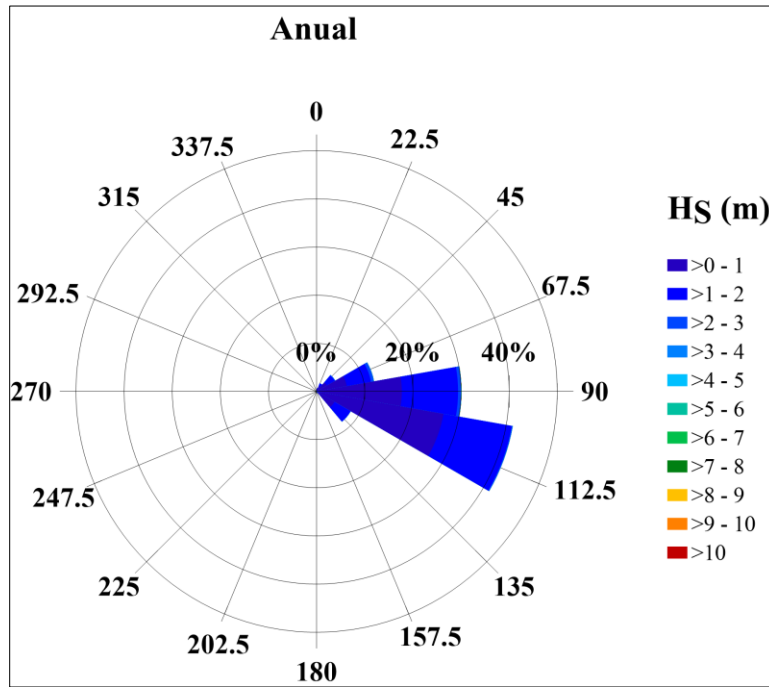
Histograma H_s



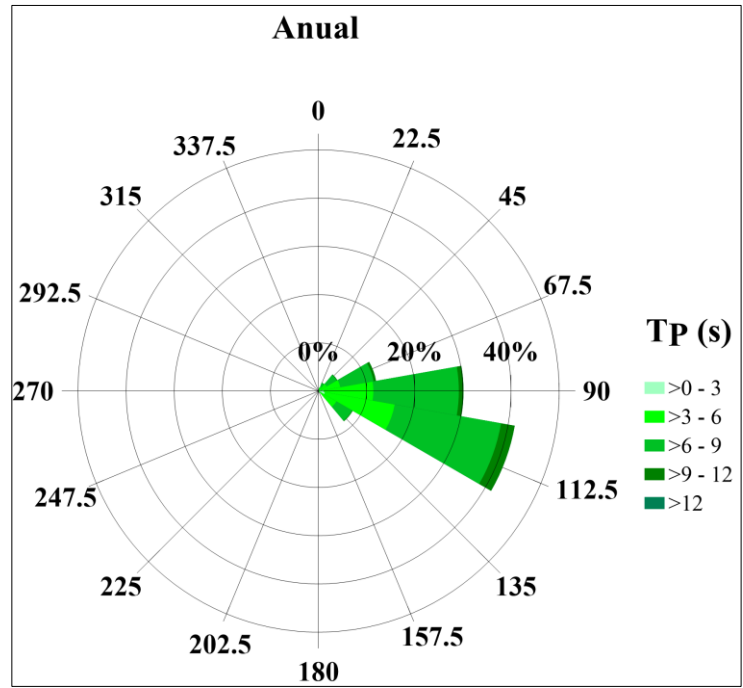
Histograma T_P



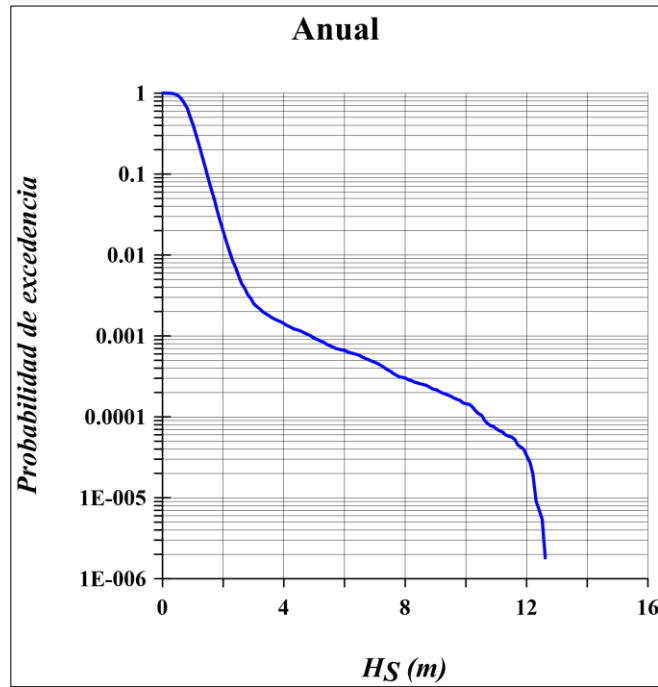
Rosa H_s



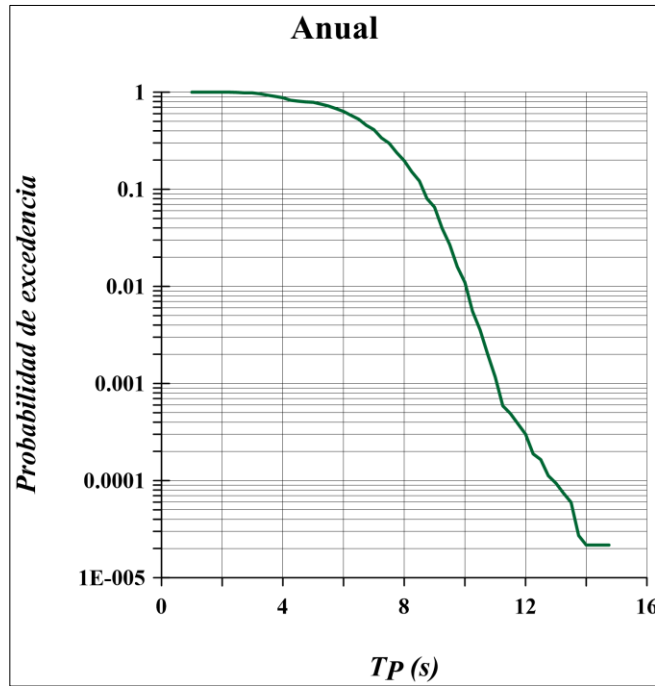
Rosa T_P



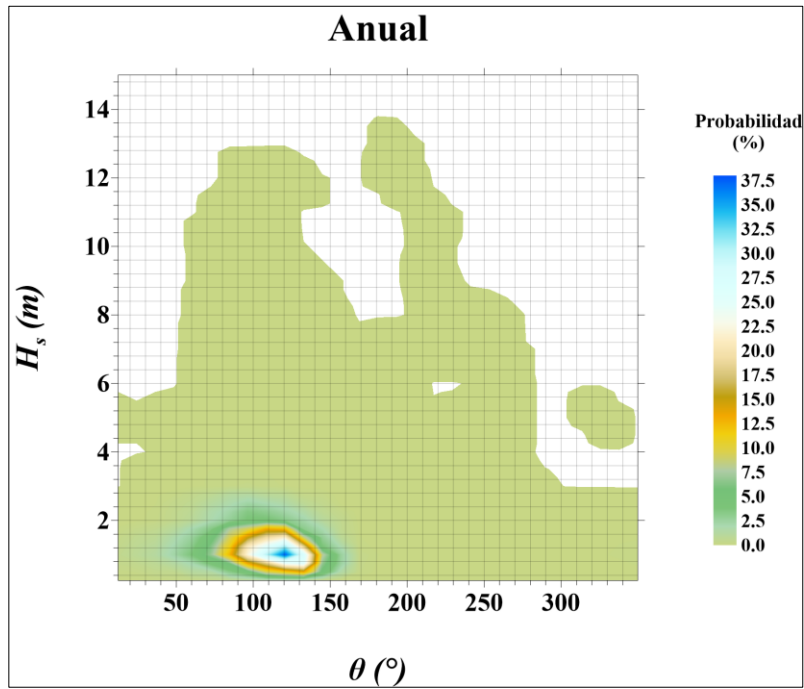
Probabilidad de excedencia H_S



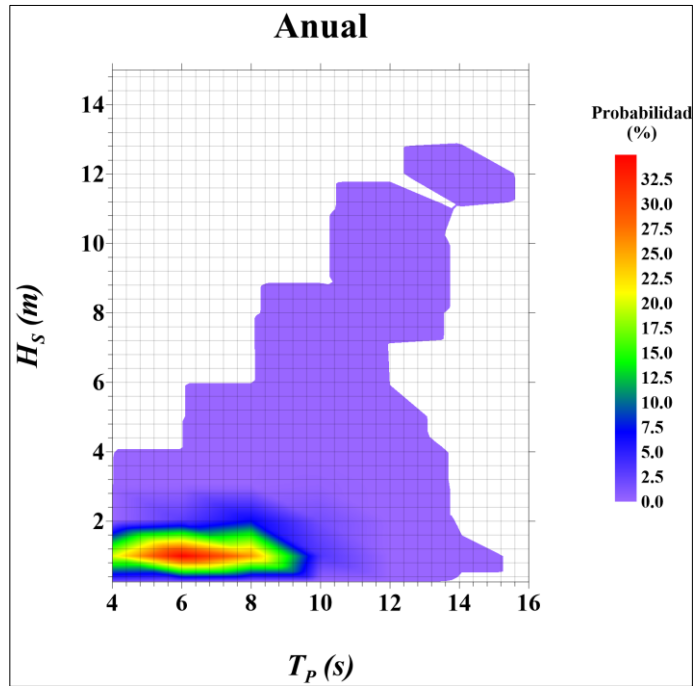
Probabilidad de excedencia T_P



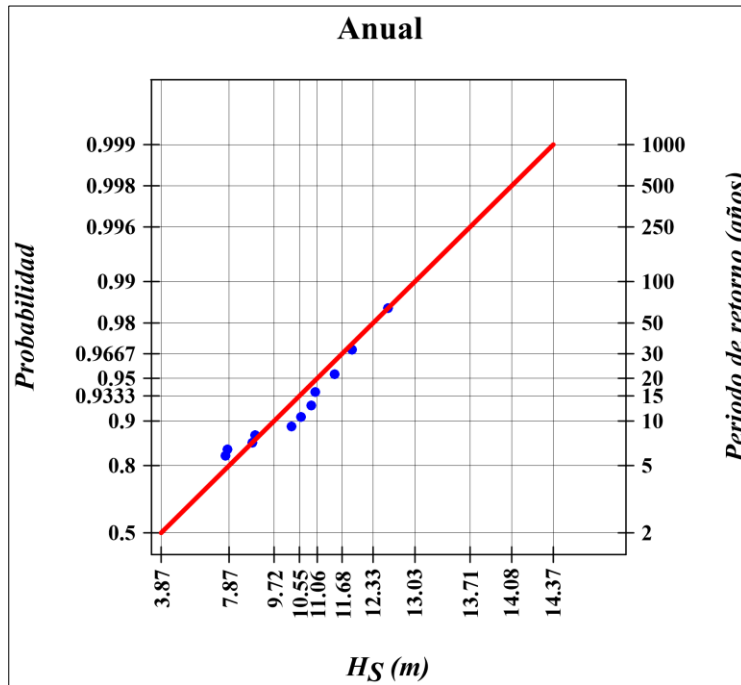
Probabilidad conjunta H_s vs θ



Probabilidad conjunta H_s vs T_p

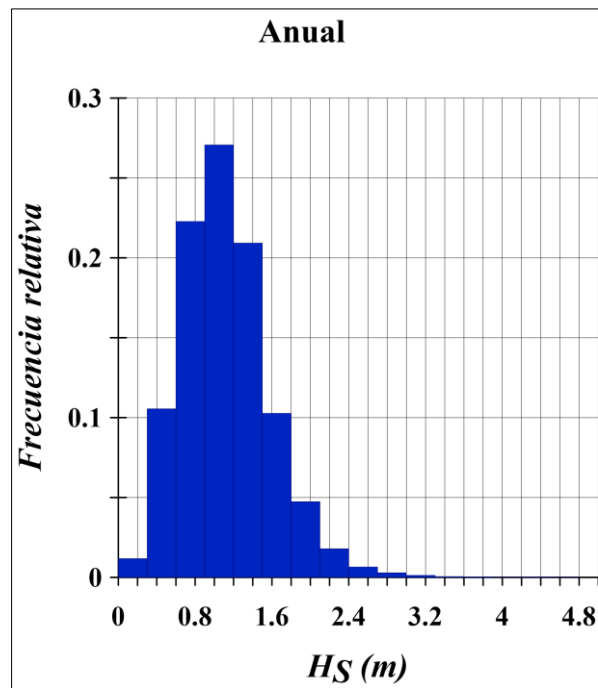


Régimen extremo (Distribución Weibull)

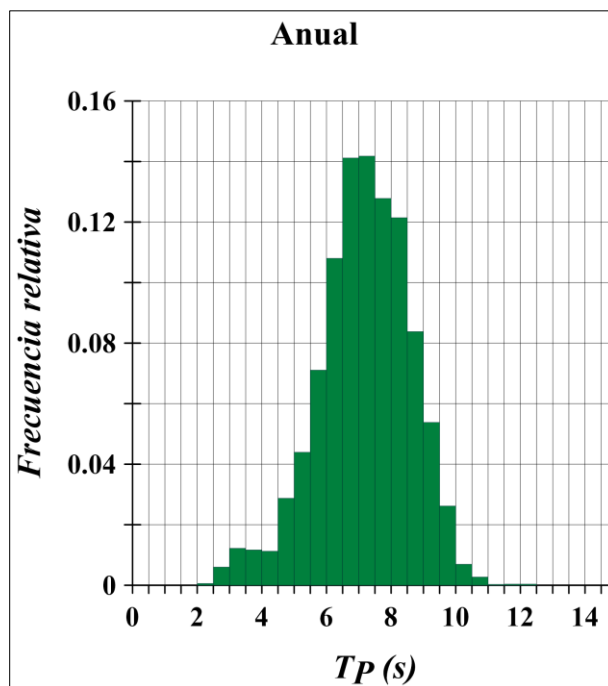


3.1.3 Estación 3

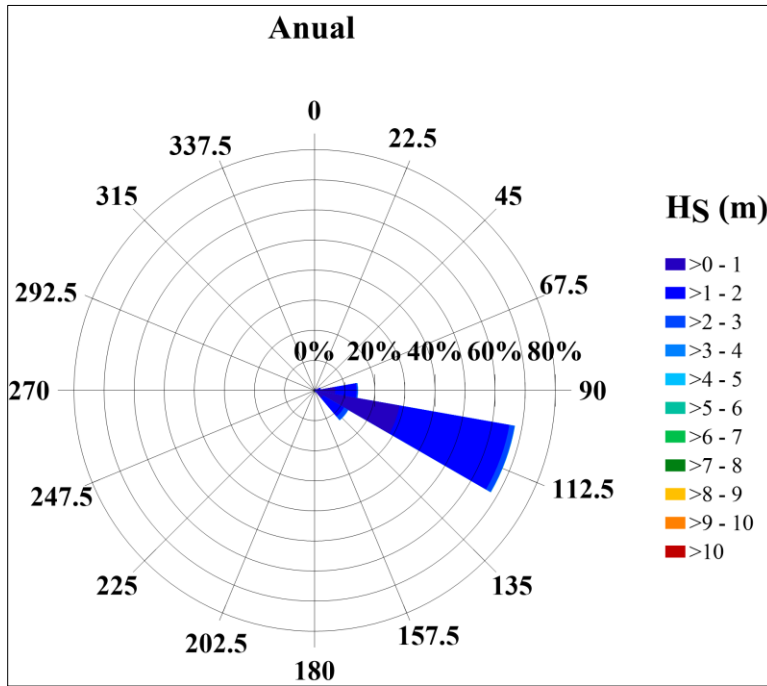
Histograma H_s



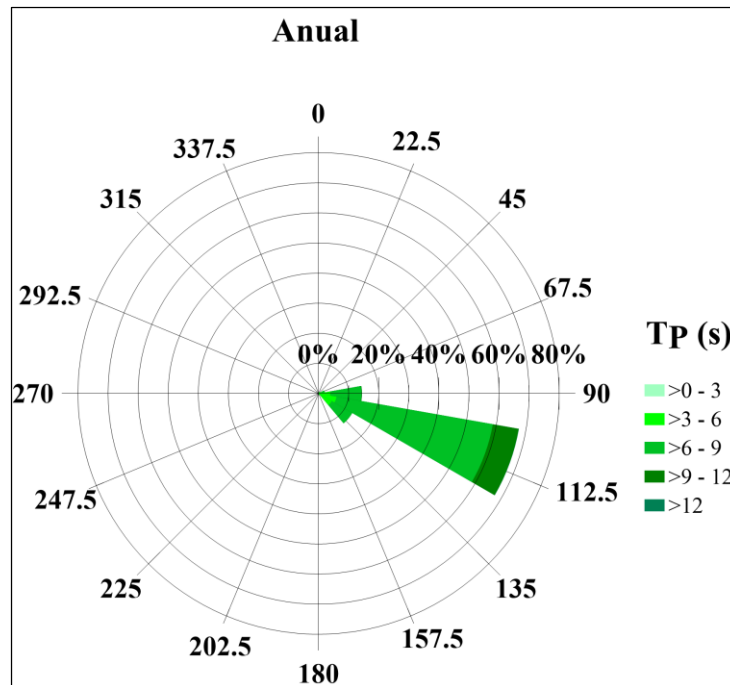
Histograma T_p



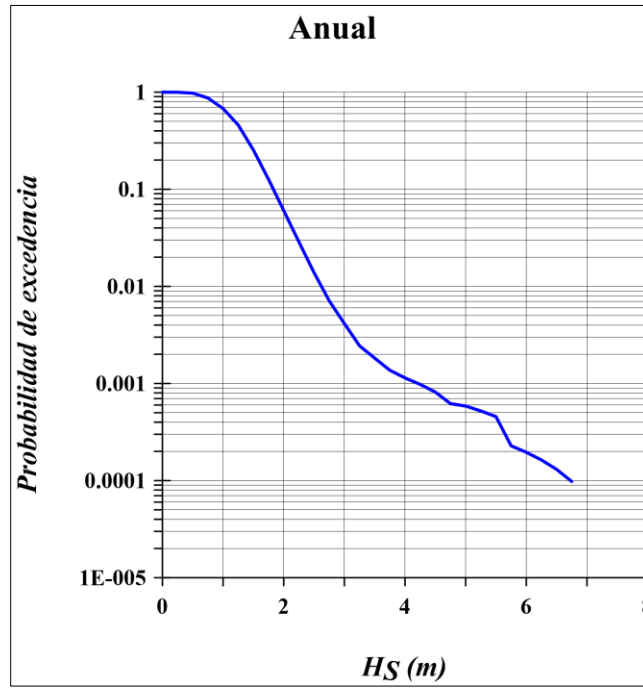
Rosa H_s



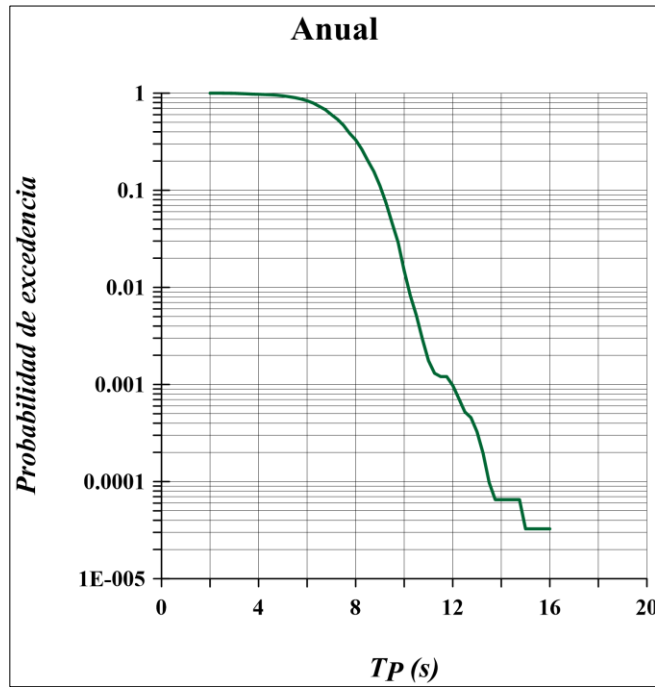
Rosa T_p



Probabilidad de excedencia H_S

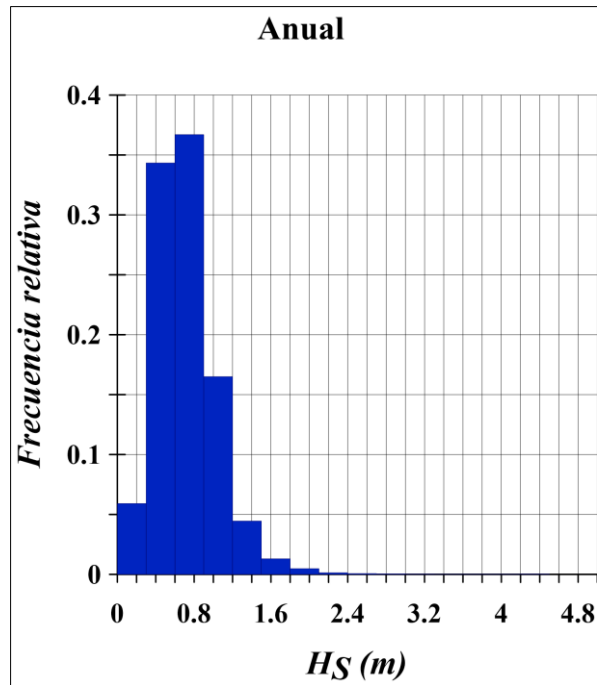


Probabilidad de excedencia T_P

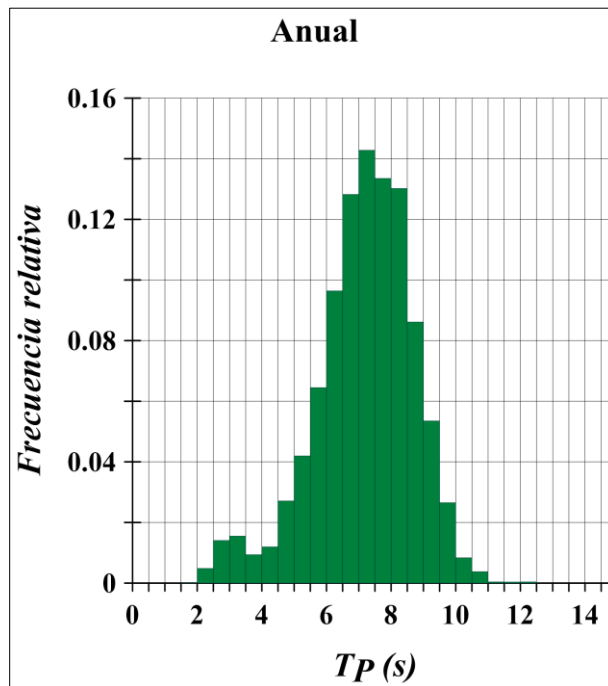


3.1.4 Estación 4

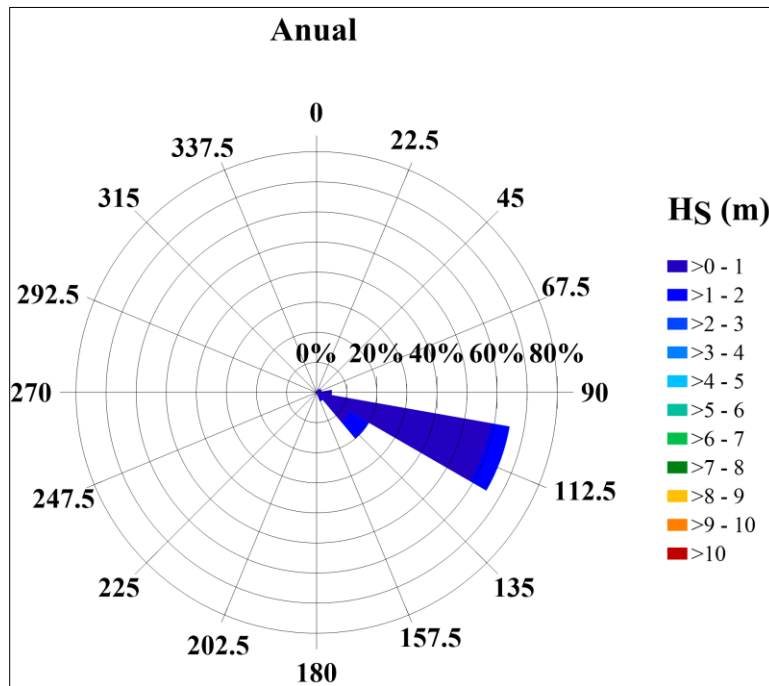
Histograma H_s



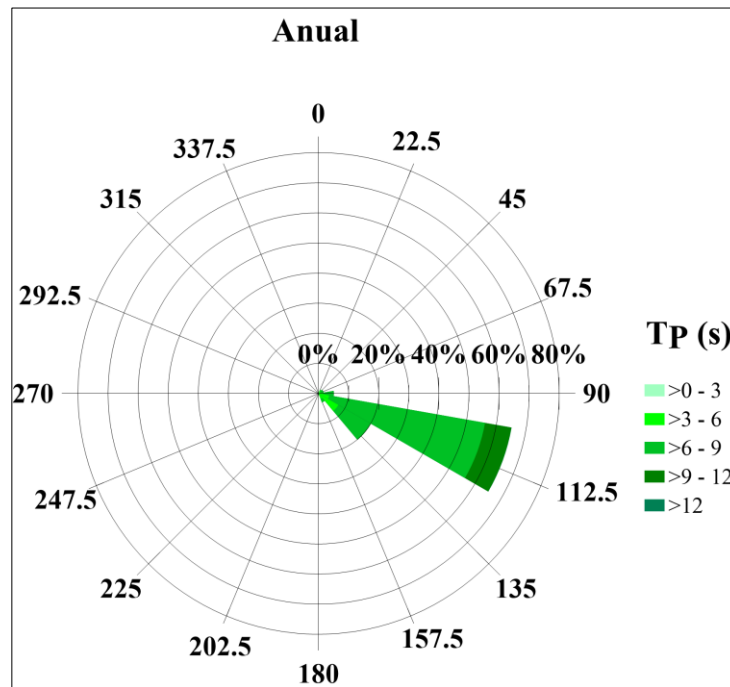
Histograma T_p



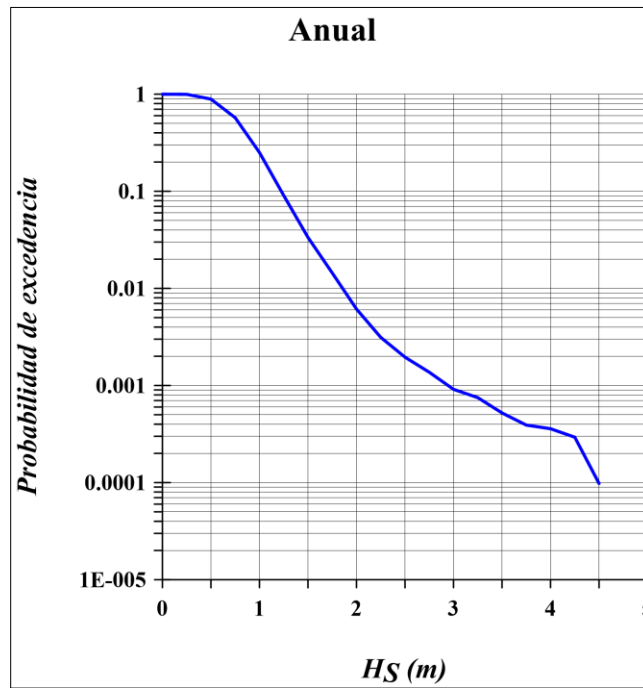
Rosa H_s



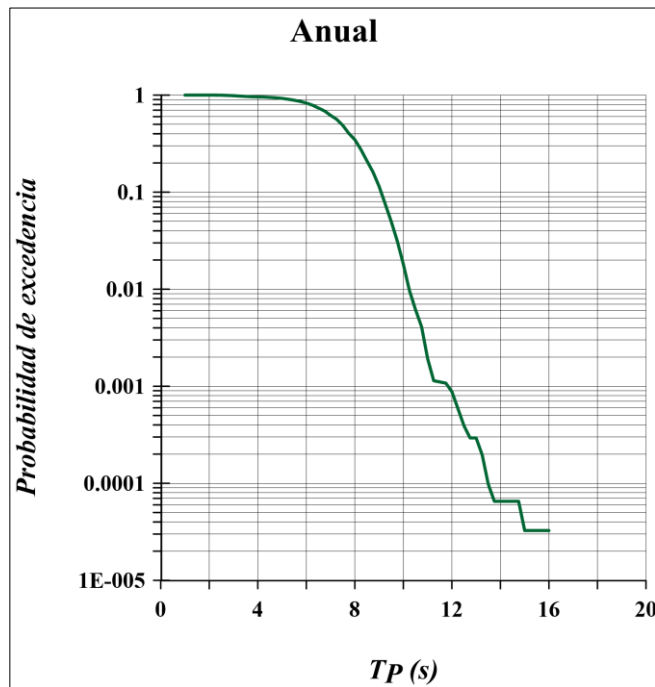
Rosas T_p



Probabilidad de Excedencia H_s



Probabilidad de excedencia T_p



3.1.5 Determinación de valores representativos en régimen medio

De acuerdo con la información anterior, se determinaron tres casos de modelación numérica para régimen medio:

1. $T_p = 8.0$ s ; $H_s = 1.5$ m; $\theta = 112.5^\circ$
2. $T_p = 6.0$ s ; $H_s = 1.0$ m; $\theta = 112.5^\circ$
3. $T_p = 7.0$ s ; $H_s = 1.7$ m; $\theta = 90.0^\circ$

Para establecer estos valores se recurrió primero a los histogramas de frecuencia del periodo, de donde se aprecia un rango medio de 6.0 s a 8.0 s a partir de lo cual, en combinación con las gráficas de probabilidad conjunta (H_s vs T_p), se obtuvieron las alturas de ola asociadas a los periodos de mayor ocurrencia; una vez hecho esto se procedió a fijar la dirección de dichas alturas de ola con las rosas de oleaje según la alturas de cada caso, posteriormente se verificó con las gráficas de probabilidad conjunta (H_s vs θ).

3.1.6 Determinación de valores representativos en régimen extremal

Condiciones de Huracán

Para obtener el caso de régimen extremal representativo de una condición de Huracán en el sitio se evaluó la función de Weibull para un periodo de retorno de 25 años (Silva, 2005), obteniendo una altura de ola y determinando su periodo asociado mediante probabilidad conjunta, asignando una dirección Este (90°) y una marea de tormenta de 2.0 m, lo cual es característico en los ciclones tropicales en el caribe mexicano.

Distribución Weibull:

$$F(H_s) = e^{\left[-\left(\frac{\lambda - H_s}{\delta}\right)^\beta\right]} ; -\infty < H_s \leq \lambda \quad (3.1)$$

Periodo de retorno:

$$T(H_s) = \frac{1}{1 - F(H_s)} \quad (3.2)$$

Donde:

$$\eta = -\log[-\log(F(H_s))] \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = -\log(\lambda - H_s) \quad (3.4)$$

$$a = \frac{N_{DATOS} \sum_{k=1}^N \varepsilon_k \eta_k - \sum_{k=1}^N \varepsilon_k \sum_{k=1}^N \eta_k}{N_{DATOS} \sum_{k=1}^N \varepsilon_k^2 - \left(\sum_{k=1}^N \varepsilon_k\right)^2} \quad (3.5)$$

$$b = \frac{-a \sum_{k=1}^N \varepsilon_k + \sum_{k=1}^N \eta_k}{N_{DATOS}} \quad (3.6)$$

$$a = \beta \quad (3.7)$$

$$b = \beta \log(\delta) \quad (3.8)$$

$$\lambda = \text{parámetro umbral} \quad (3.9)$$

Tabla 3.2. Resultados del análisis extremal para condición de Huracán

Variable	Estación 1	Estación 2
λ	13.66484	15.33033
δ	12.3253	13.16956
β	1.886307	2.638107
H_S	11.403 m	11.413 m
T_P	12.61 s	12.41 s

La Tabla 3.2 muestra el resumen de los valores obtenidos para el análisis extremal en condiciones de Huracán, de ella, se consideró como caso de modelación numérica una altura de ola de 12.00 m y periodo de 13.00 s.

Condiciones de Norte

Para caso de oleaje inducido por viento proveniente del norte se evaluó la función de Weibull para un periodo de retorno de 5 años. Se obtiene para ello una altura de ola a la cual se asocia un periodo mediante probabilidad conjunta y una dirección de 45° , que es el caso más desfavorable para esta condición.

Tabla 3.3. Resultados del análisis extremal para condición de Norte

Variable	Estación 1	Estación 2
λ	13.66484	15.33033
δ	12.3253	13.16956
β	1.886307	2.638107
H_S	8.100 m	7.871 m
T_P	8.96s	8.56 s

La Tabla 3.3 muestra el resumen de los valores obtenidos para el análisis extremal en condiciones de Norte, de ella, se consideró como caso de modelación numérica una altura de ola de 8.00 m y periodo de 9.00 s.

3.1.7 Condiciones de oleaje para modelado numérico

Las condiciones de oleaje consideradas en la modelación de escenarios se resumen en la Tabla 3.4. Con ellos se buscó una representación adecuada del régimen medio y extremal de la zona en estudio, variando la altura de ola, dirección incidente, periodo y elevación del nivel medio del mar por marea de tormenta.

Tabla 3.4. Condiciones de oleaje modeladas

Régimen	Caso	H (m)	T_p (s)	θ (°)		Marea de tormenta (m)
Medio	1	1.50	8.00	112.50	S-E	0.00
	2	1.00	6.00	112.50	S-E	0.00
	3	1.70	7.00	90.00	E	0.00
Extremal	4	12.00	13.00	90.00	E	2.00
	5	8.00	9.00	45.00	N-E	0.00

Cada uno de los casos elegidos se modeló en las condiciones actuales y en las condiciones de proyecto, de donde se obtuvieron los campos de altura de ola máxima, superficie libre instantánea y corrientes inducida por el oleaje. Estos resultados se muestran a continuación.

4 PROPUESTA DE ACTUACIÓN ESTRUCTURAL PARA LA RECUPERACIÓN DE LAS PLAYAS

4.1 Modelación hidrodinámica de la condición actual sin estructuras

Para la evaluación del desempeño hidráulico y de los efectos comparativos de la solución propuesta con las condiciones actuales se modelaron con las herramientas WAPO y COCO (Silva et al, 2010), un grupo representativo de condiciones de oleaje, con lo que se ha alcanzado un nivel de concomitamiento amplio respecto de la distribución de la energía que solicita las playas en situaciones de régimen medio, tormentas moderadas y eventos extraordinarios. A partir del análisis de los campos de oleaje y de corrientes que ofrecen dichas herramientas, respectivamente, se concluyó respecto del funcionamiento de las obras propuestas, se infirió el efecto morfológico de la solución y se presentan recomendaciones respecto del diseño mecánico de las estructuras planteadas.

Es conveniente resaltar en este punto que la selección del modelo numérico WAPO para calcular las características de las ondas que se propagan desde la zona de generación hasta la costa, obedece a que resuelve la ecuación extendida de la pendiente suave y, por tanto, no tiene limitaciones intrínsecas para resolver, en presencia de obstáculos y conjuntamente, los procesos de difracción, reflexión, someramiento, refracción y disipación de energía del oleaje tanto por fondo como por rotura. El modelo COCO estima el campo de corrientes inducidas por oleaje a partir de las ecuaciones no lineales de aguas someras, lo cual aplica en zonas de baja profundidad, y toma como dato de entrada el oleaje estimado por el modelo WAPO. Es por ello que las herramientas elegidas son adecuadas para el caso en estudio.

En este apartado se presenta el análisis de la zona en las condiciones topo-batimétricas actuales. La batimetría de la condición actual se presenta en la Figura 4.1. Debido a las dimensiones de la zona y la dirección del oleaje, y con el objeto de optimizar el tiempo computacional, se definió la malla con celdas cuadradas de 5 m de lado, y se giró la batimetría en 30° , por lo que las coordenadas mostradas son arbitrarias.

La principal característica de la morfología costera de la zona es la existencia de un grupo de caletas naturales que pueden ser empleadas como regiones para uso recreativo en los sitios donde la existencia de elementos naturales protegidos por la legislación actual o que se consideren importantes lo permita. Estas áreas naturalmente protegidas favorecen y al mismo tiempo limitan las posibilidades de actuación en pro de la estabilización de las playas. Otra característica relevante, propia de toda la Riviera Maya, es lo estrecho de la plataforma continental que alcanza, en pocos metros, grandes profundidades; esto hace que las playas en costas expuestas directamente al mar, por un lado, no sean capaces de mantener volúmenes considerables de arena (en muchas ocasiones solo se encuentra roca) y por otro; que la arena que viaja en sentido transversal a la costa, se pierda en el acantilado de manera irrecuperable. Por tanto, las actuaciones que se pretendan hacer en este sitio deberán estar confinadas a lo que se pueda aprovechar dentro de las zonas naturalmente protegidas de la acción oleaje.

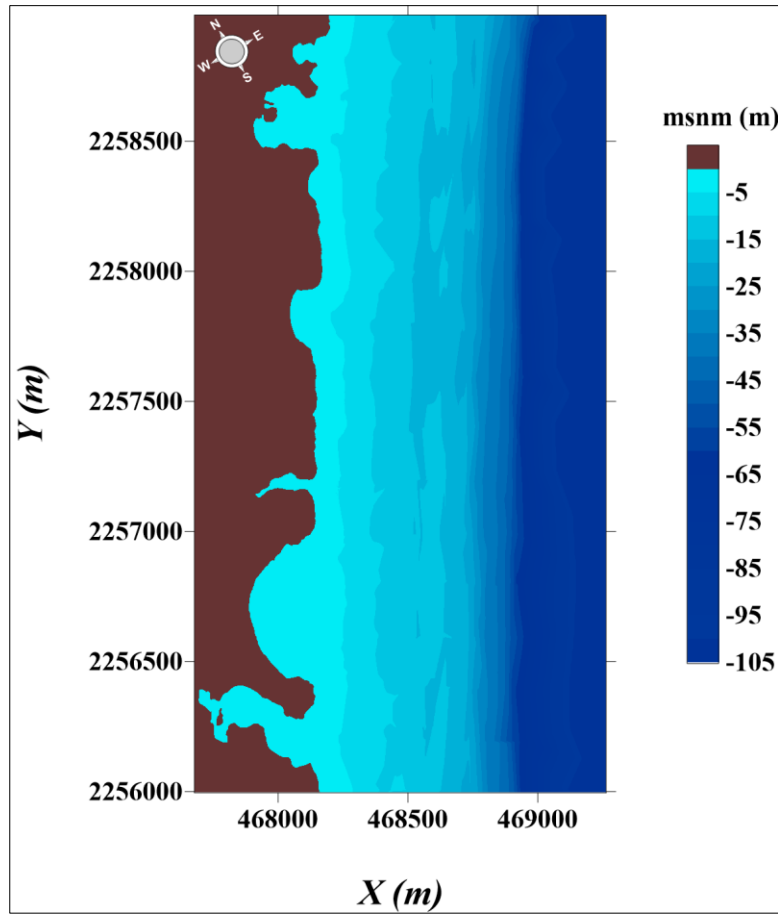


Figura 4.1. Condición topo-batimétrica actual

Los resultados de los campos de oleaje y superficie libre en la condición actual se presentan de la Figura 4.2 a la Figura 4.6. Para cada caso modelado, se han organizado cuadros encabezados con los datos referentes a las condiciones de oleaje de cada uno. En el panel izquierdo de cada cuadro se presenta la altura de ola máxima con una escala de colores que ofrece la magnitud de dicho parámetro calculado en cada celda de la malla (se presentan escalas independientes para régimen medio y régimen extremal), valores altos de este parámetro corresponden directamente a energía con capacidad de transportar sedimento, ya sea fuera del área de estudio o simplemente removerlo de la playa. El panel derecho de cada cuadro representa la superficie libre instantánea, que permite visualizar los fenómenos de propagación gobernados por la refracción, difracción, reflexión y someramiento según los contornos impuestos por el fondo y por las condiciones de frontera consideradas.

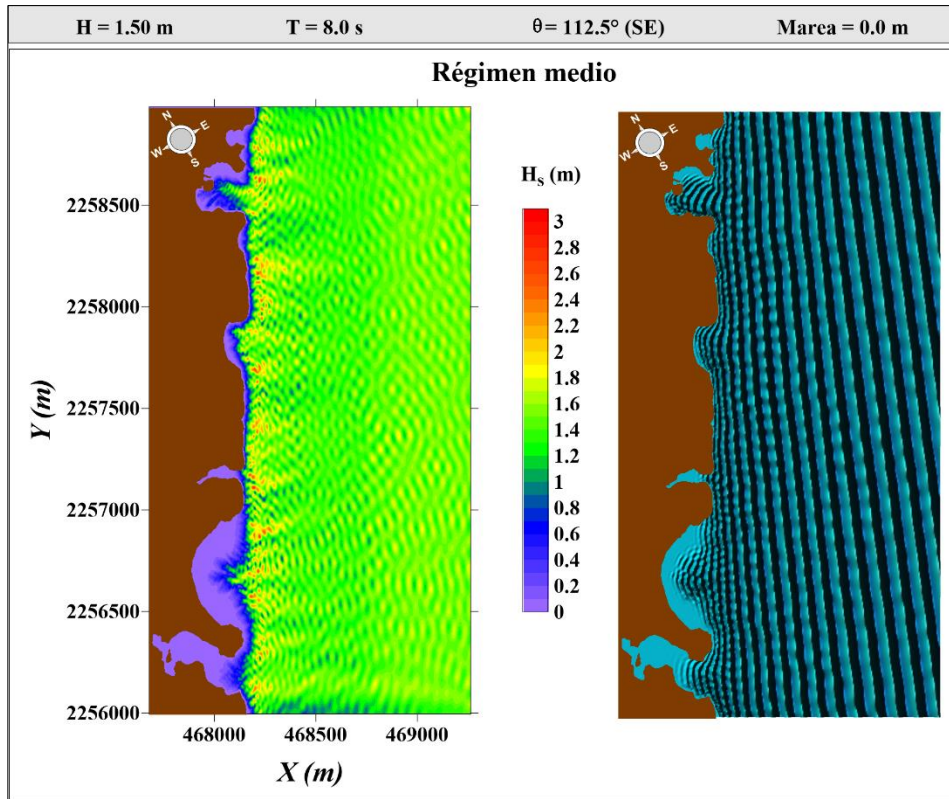


Figura 4.2. Propagación de oleaje: Caso 1

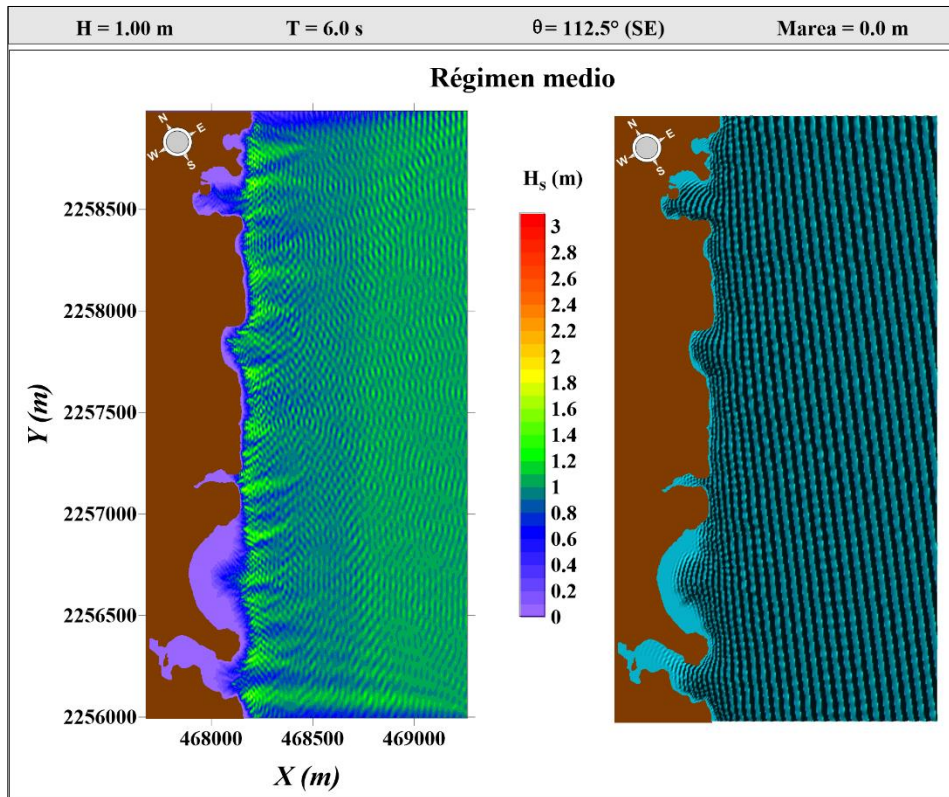


Figura 4.3. Propagación del oleaje: Caso 2

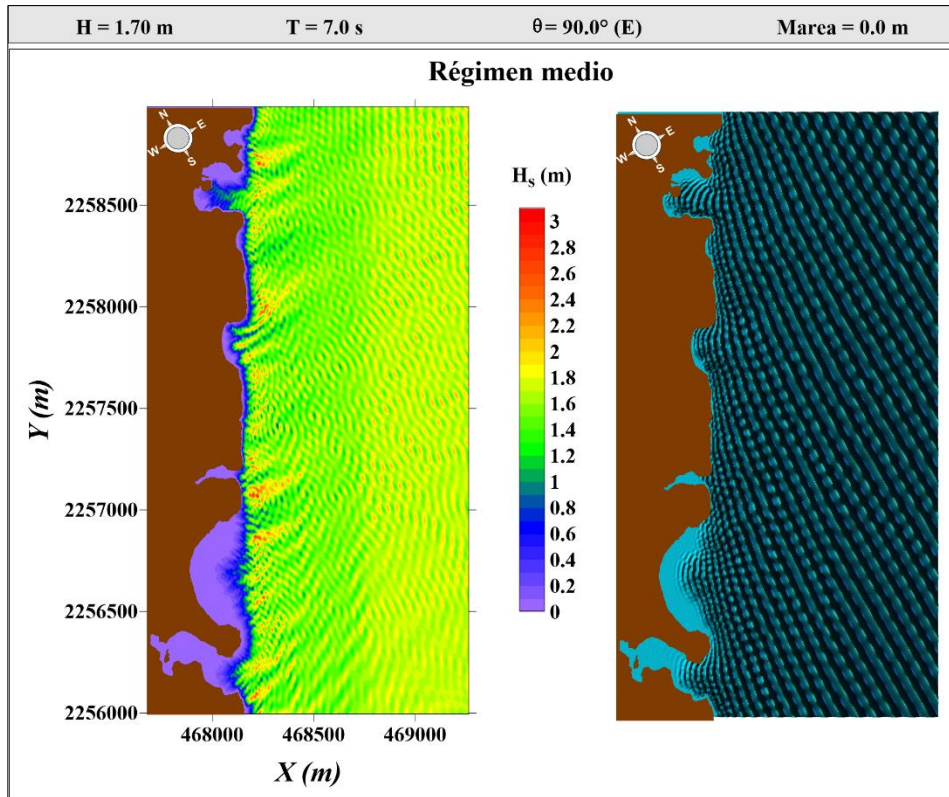


Figura 4.4. Propagación del oleaje: Caso 3

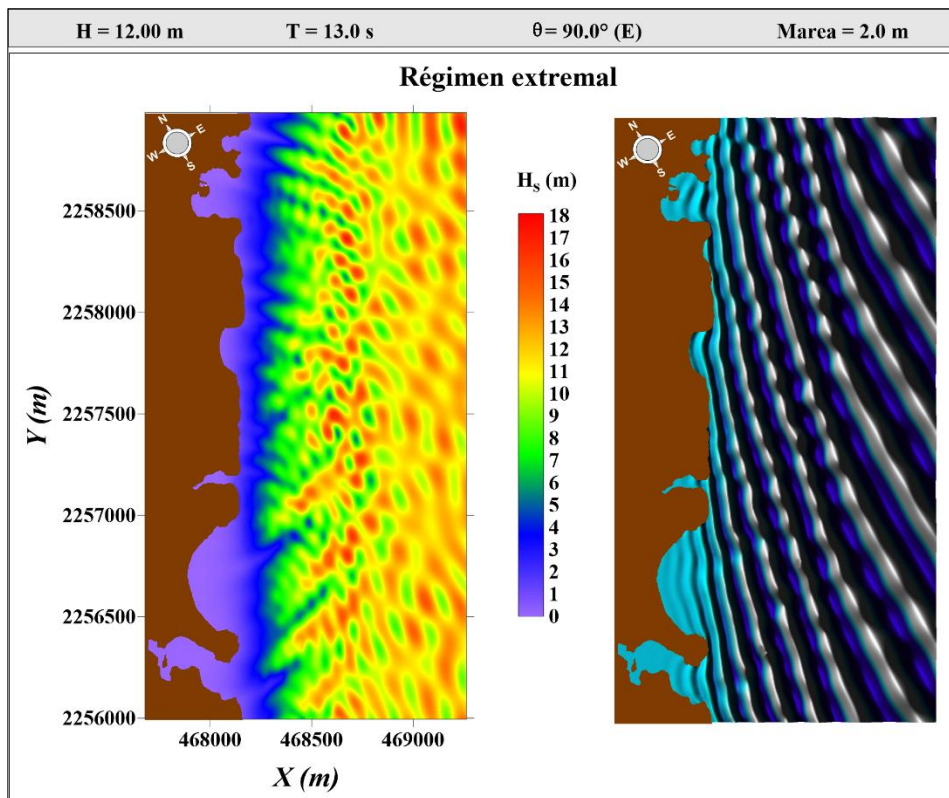


Figura 4.5. Propagación del oleaje: Caso 4

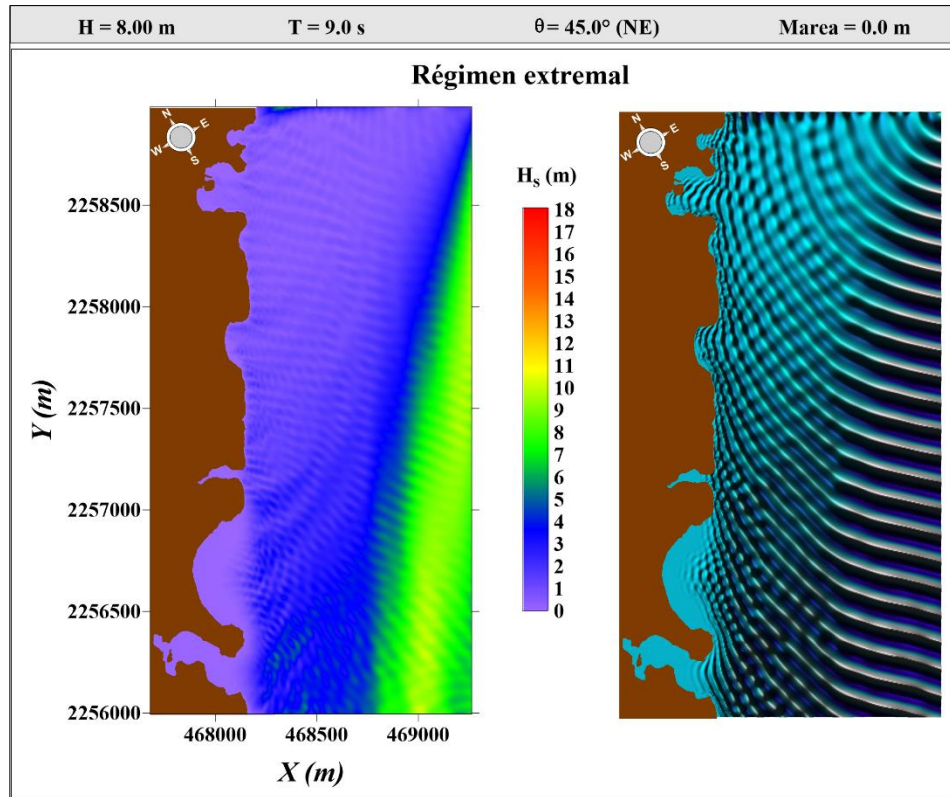


Figura 4.6. Propagación del oleaje: Caso 5

Como se podía prever, todas las condiciones de régimen medio llegan a la costa con relativamente baja energía. Es de especial mención que al interior de las caletas naturales no se aprecia ingreso importante del oleaje, por lo que se confirma su posible uso como zonas lúdicas siempre que la biota marina así lo permita. En este sentido, la idea de utilizar algún tipo de estructura como retención de la arena que se deposite en las playas y no como elemento para controlar la energía del oleaje parece ser adecuada.

Vale la pena señalar que uno de los principales causantes de la baja agitación al interior de las caletas es su baja profundidad, de donde se desprende que las playas para uso recreativo que se pueden diseñar en esta zona serán de relativamente pequeñas dimensiones y lo que se buscará es que sean lo más estables posible para que los trabajos de mantenimiento que requieran sean poco frecuentes y de bajo costo.

Los casos con oleaje extremal muestran alta energía en las zonas expuestas directamente al mar y, aparentemente, poca energía en los cuerpos semi-cerrados. Sin embargo, al observar el campo de superficie libre es claro que sí se presenta agitación, es decir, el oleaje de tormenta sí penetra en las caletas, particularmente en la caleta central. Estas condiciones no plantean la necesidad de construir elementos para el control de la energía del oleaje, en primera instancia, porque cuando ocurren este tipo de tormentas las playas no se encuentran ocupadas por los visitantes dada la incomodidad que representan el fuerte viento y las lluvias, de manera que no se prevé riesgo para los usuarios y, por otro lado, una vez colocadas las barreras que detendrán el paso de la arena, los trabajos de recuperación consistirán en tomar la arena detenida por la barreras y devolverla a la playa. Es de notar que, dados los periodos de retorno elegidos, no se

prevé que los trabajos de mantenimiento deban realizarse con mayor frecuencia que cada 5 años en promedio.

Los resultados de estas modelaciones se presentan de la Figura 4.7 a la Figura 4.9. En estas figuras se muestran, en forma de flechas, la direcciones de la corriente inducida por el oleaje, mientras que la intensidad de la corriente se ha dibujado en colores en una escala de amarillo (menores valores) a rojo (mayores valores). Cabe señalar que la dirección de esta corriente es prácticamente la misma que tendrá el transporte de sedimentos y su intensidad es un indicador de la capacidad que tendrá de remover el material depositado en la costa.

En todos los casos, la dirección de las corrientes indica un transporte de sedimentos dominante hacia el sur. Por lo que respecta a las caletas, todas parecen ser importadores de sedimento en régimen medio y, en los casos extremos, se observa una tendencia a exportar material. Como era de esperarse se presentan mayores velocidades en las respectivas zonas de rompientes. En todo caso, el principal objetivo de estas modelaciones es sentar la base sobre la que se evaluará si las estructuras planteadas provocan algún tipo de alteración relevante en los patrones hidrodinámicos y, por consecuencia, en la dinámica actual del transporte sedimentario.

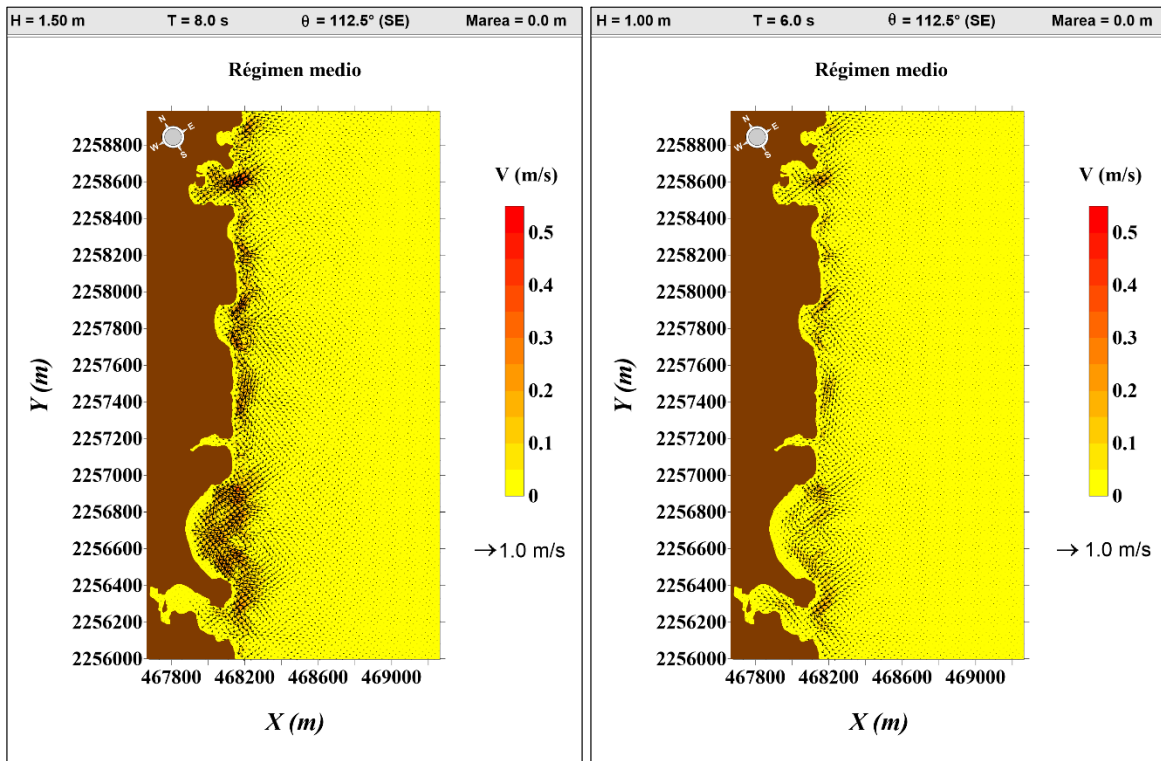


Figura 4.7. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 1 (izq.), Caso 2 (der)

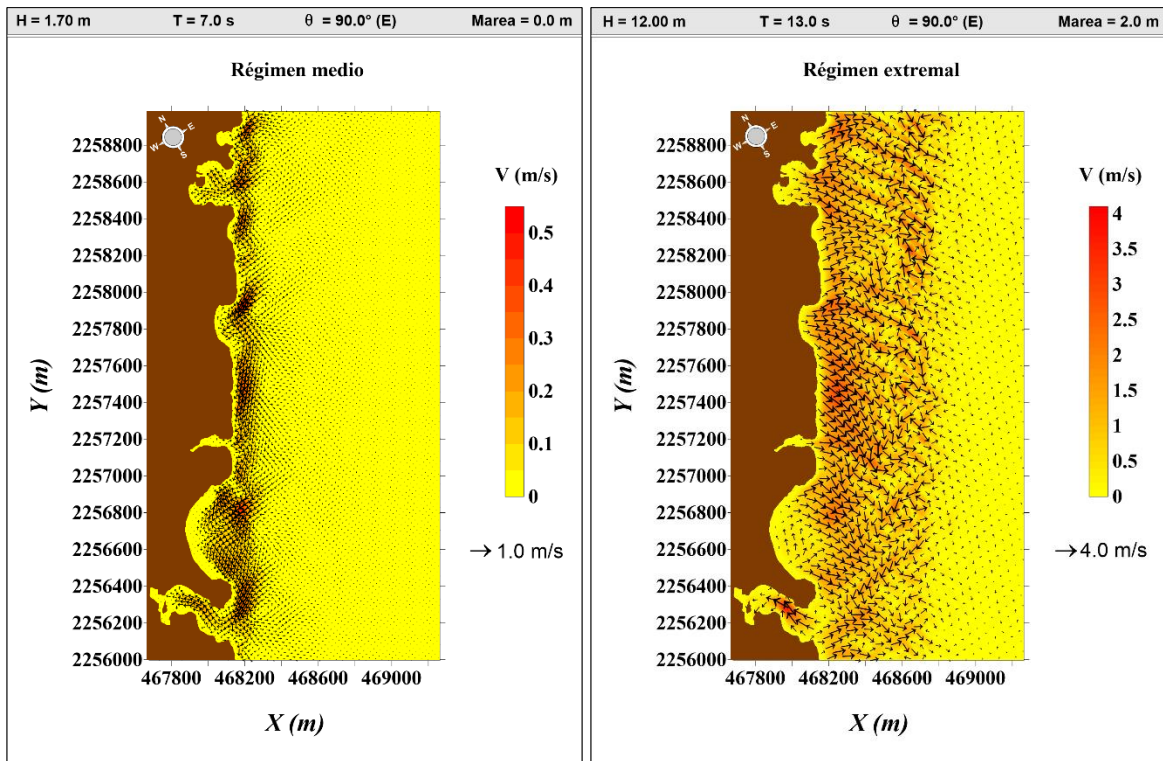


Figura 4.8. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 3 (izq.), Caso 4 (der.)

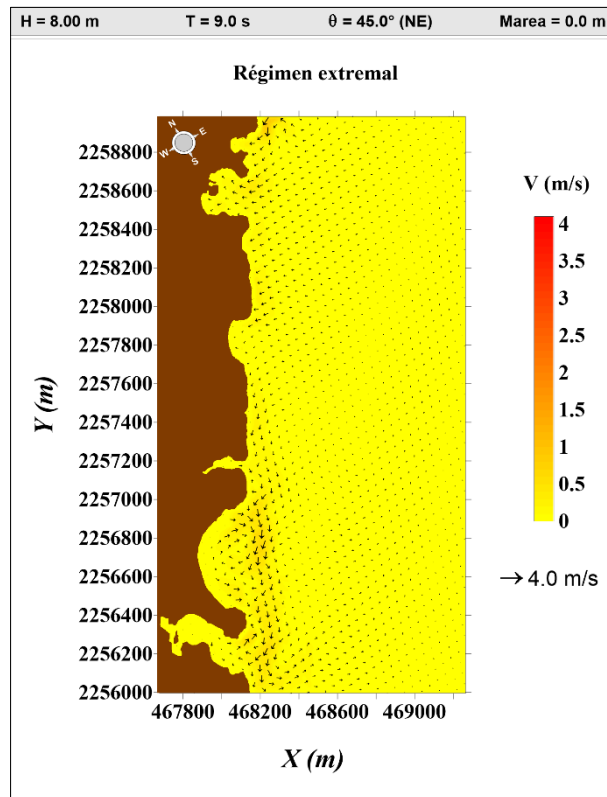


Figura 4.9. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 5

4.2 Propuesta de estructuración

La propuesta que se plantea tiene como principal fundamento la protección de la zona litoral atendiendo a sus características naturales actuales, el respeto a la biota marina presente en diferentes zonas del frente costero y la posibilidad de proveer zonas de playa para disfrute de los visitantes permitiendo áreas de baño en donde sea factible y seguro. La propuesta se ha realizado estrictamente en ese orden de prioridades.

Se propone el aprovechamiento de las caletas naturales del sitio, que brindan por sí mismas protección y zona de calma, evitando así modificar el frente expuesto directamente al mar. Para su trazo se considera la presencia de coral en algunas zonas de la región costera evaluada y a las condiciones hidrodinámicas en régimen medio y extremal, presentadas en el capítulo anterior.

El principal objetivo que buscan cumplir las estructuras que se proponen es la de servir como elementos que disminuyan el transporte de arena que podría ser acarreada fuera de la playa con la ocurrencia de tormentas. Eso permite un diseño poco agresivo, con estructuras de pequeñas dimensiones y cuyos costos de construcción, así como sus valores de repercusión en caso de alcanzar sus estados límite últimos o de servicio no son relevantes en comparación con el beneficio que ofrecerán al negocio turístico.

Así, pues, la propuesta de estructuración consta de 7 estructuras ubicadas como se muestra en la Figura 4.10

En la Tabla 4.1 se enlistan las coordenadas UTM de las estructuras, referidas a su cota superior y centro de trazo, indicando el punto inicial y final. Además de incluir anexo a este documento el croquis detallado de la propuesta.

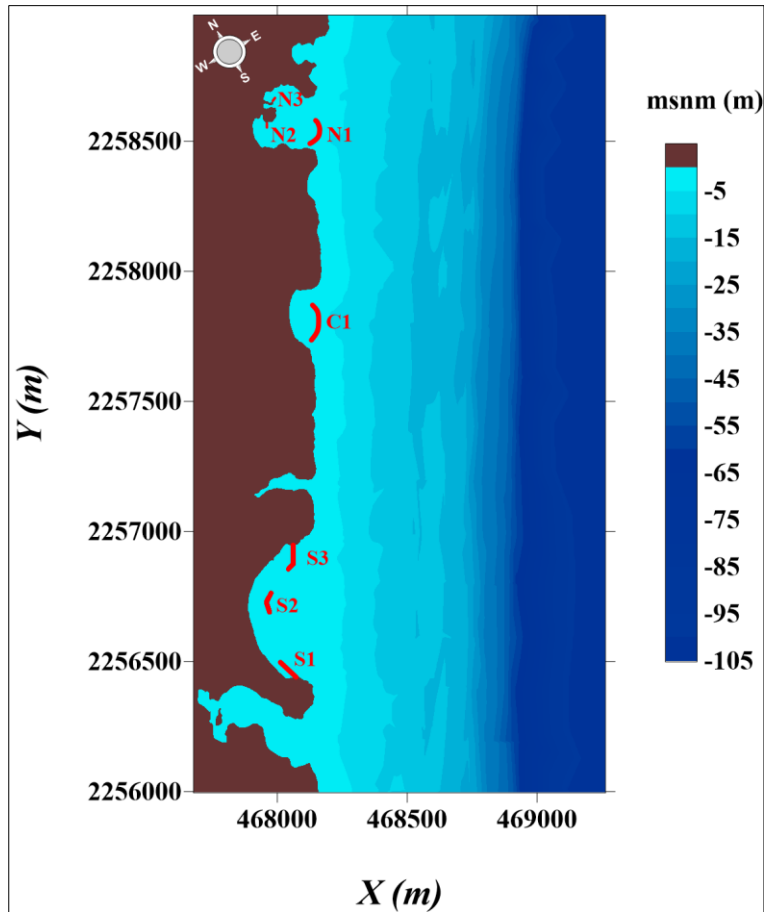


Figura 4.10. Condición topo-batimétrica con estructuras

Tabla 4.1. Coordenadas de las estructuras propuestas

Estructura	Punto	X	Y
S1	Inicial	468,535.95	2,257,058.96
	Final	468,514.42	2,257,136.01
S2	Inicial	468,574.00	2,257,324.00
	Final	468,615.28	2,257,386.67
S3	Inicial	468,719.30	2,257,430.34
	Final	468,780.83	2,257,502.45
C1	Inicial	469,242.89	2,258,150.65
	Final	469,309.54	2,258,255.60
N1	Inicial	469,609.54	2,258,808.31
	Final	469,668.80	2,258,870.81
N2	Inicial	469,495.04	2,258,941.68
	Final	469,506.05	2,258,958.38
N3	Inicial	469,561.94	2,259,013.56
	Final	469,578.26	2,259,025.13

4.3 Modelación hidrodinámica de la actuación estructural

Los resultados de la modelación hidrodinámica de propagación de oleaje y corrientes inducidas por éste, se muestran de la Figura 4.11 a la Figura 4.18.

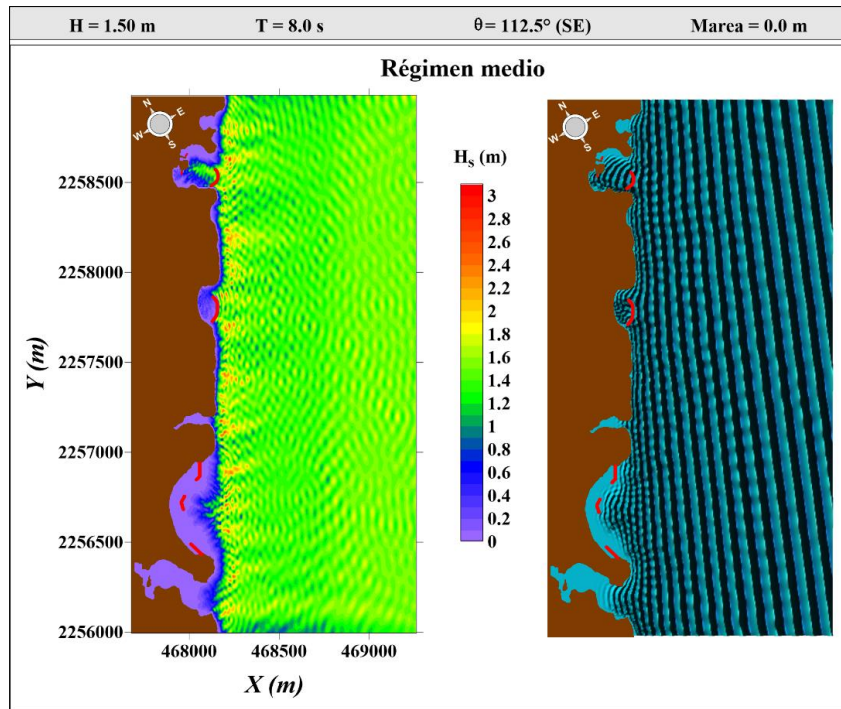


Figura 4.11. Propagación de oleaje con la actuación propuesta: Caso 1

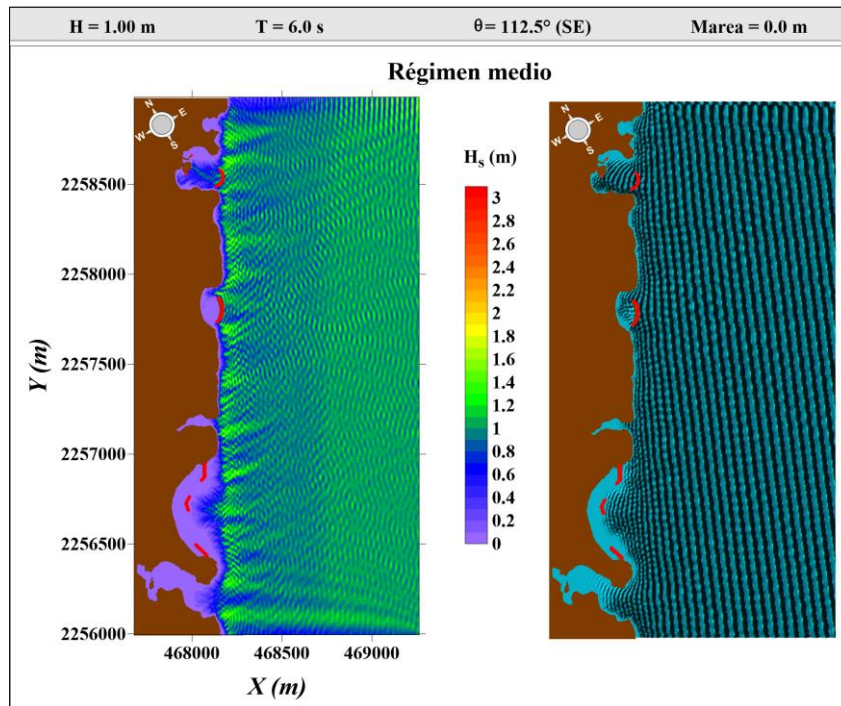


Figura 4.12. Propagación de oleaje con la propuesta de actuación: Caso 2

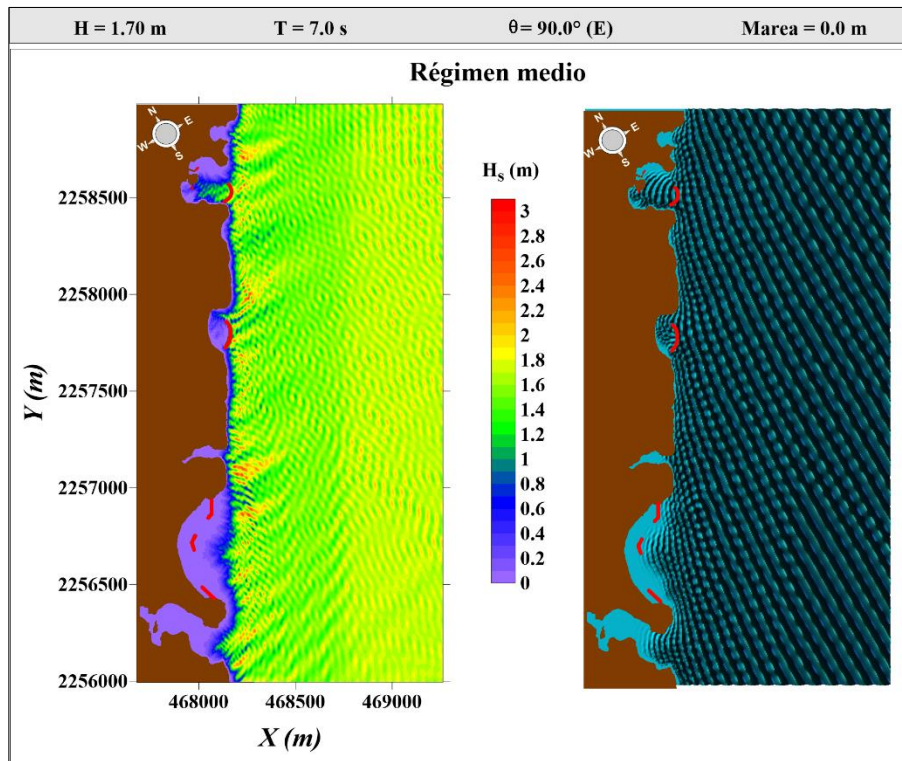


Figura 4.13. Propagación de oleaje con la propuesta de actuación: Caso 3

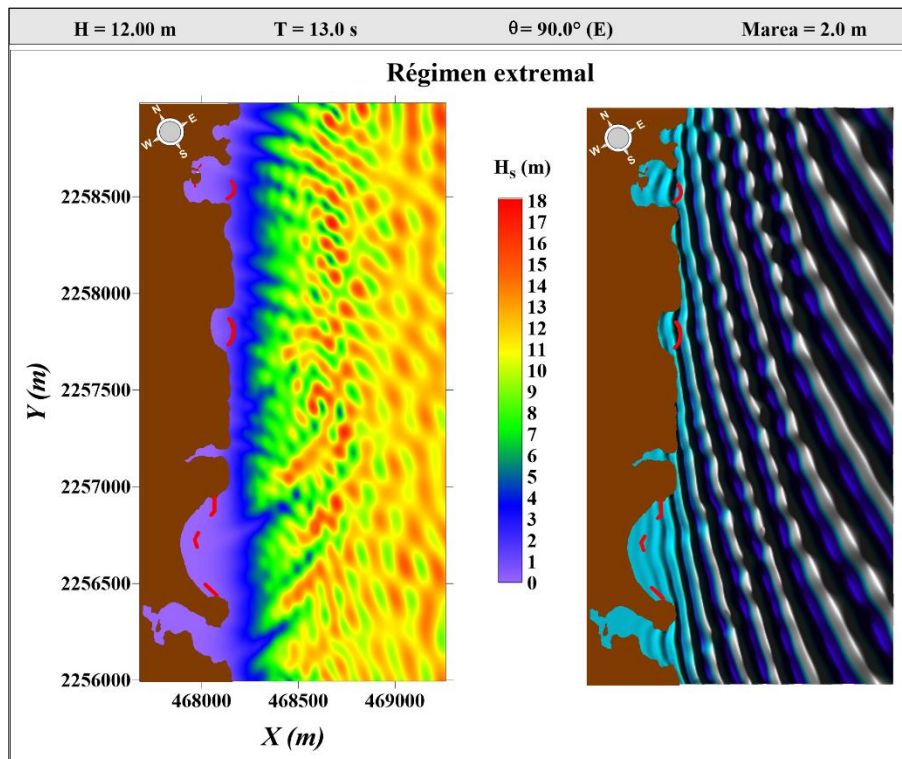


Figura 4.14. Propagación de oleaje con la propuesta de actuación: Caso 4

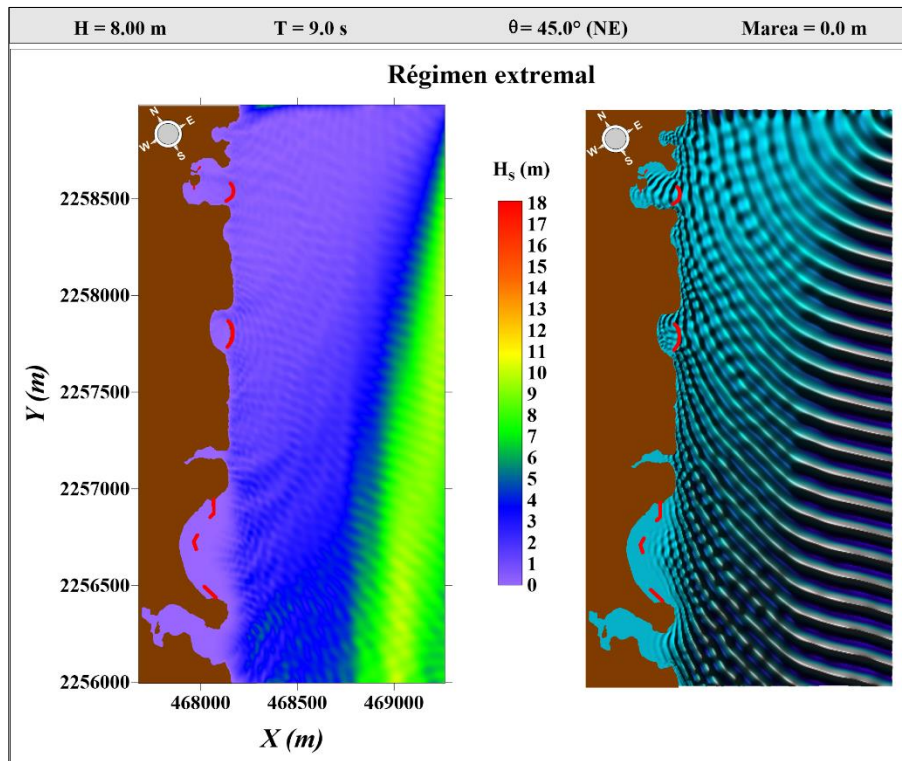


Figura 4.15. Propagación de oleaje con la actuación propuesta: Caso 5

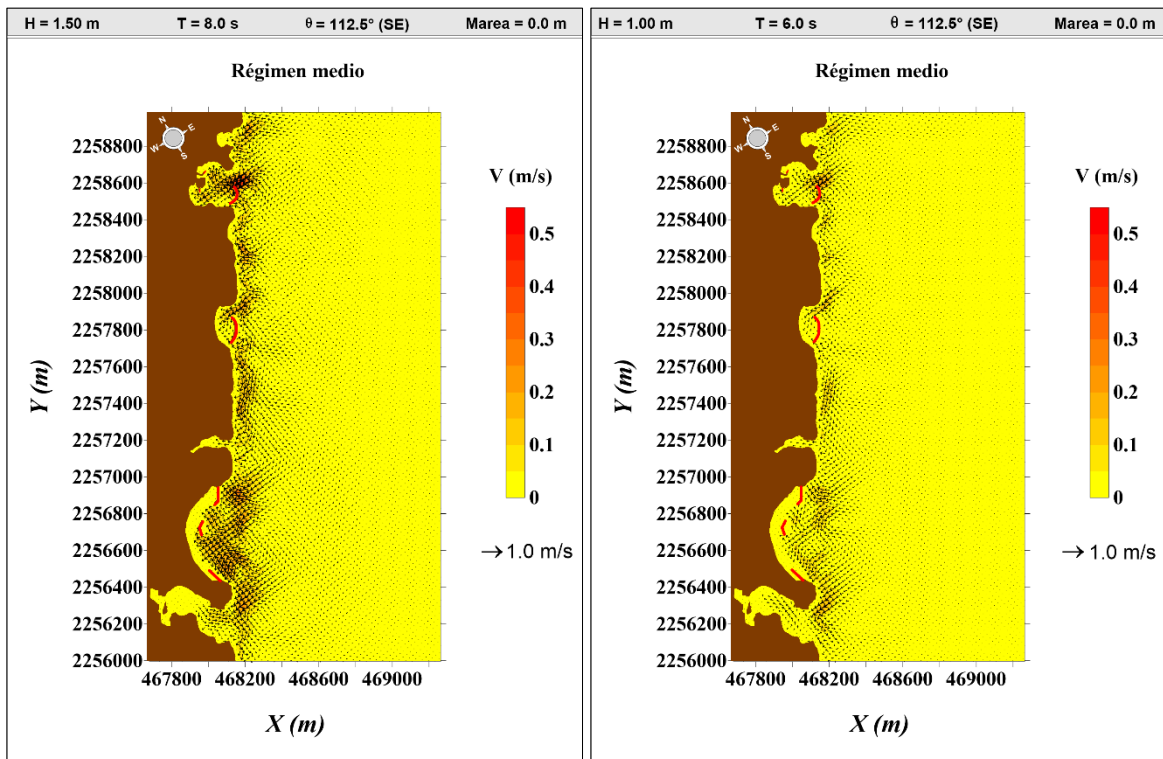


Figura 4.16. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 1 (izq.), Caso 2 (der.)

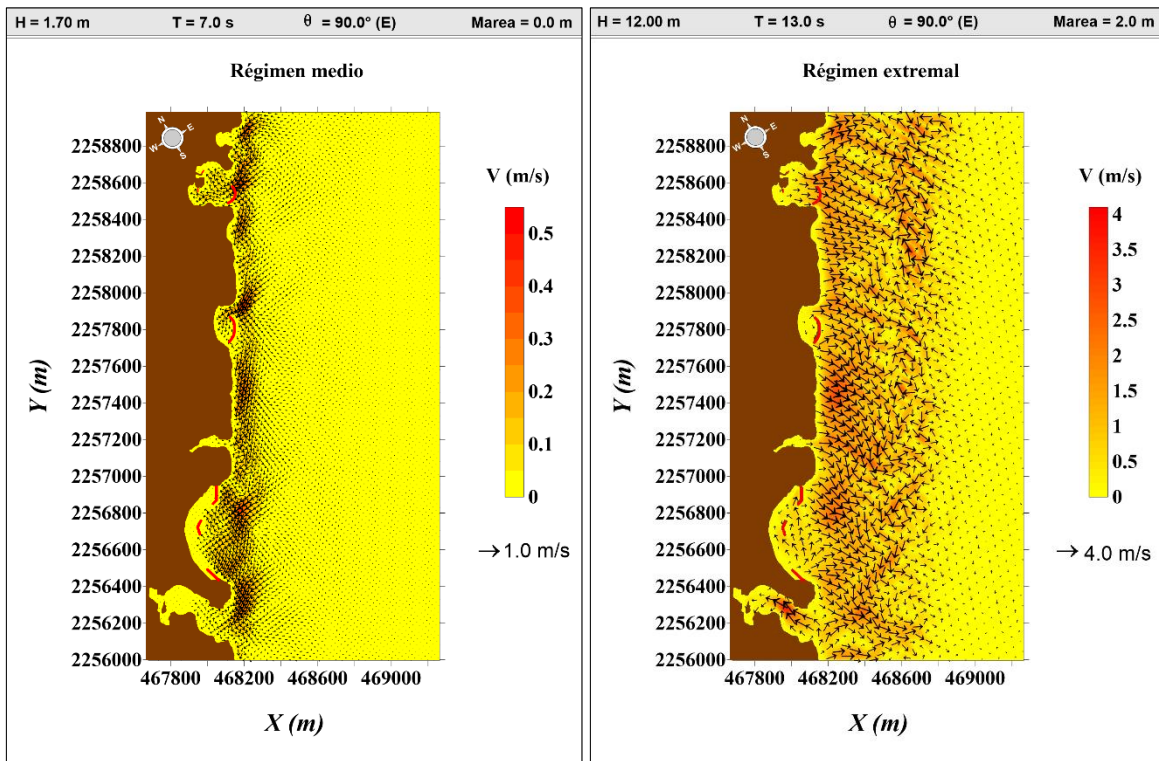


Figura 4.17. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 3 (izq.), Caso 4 (der.)

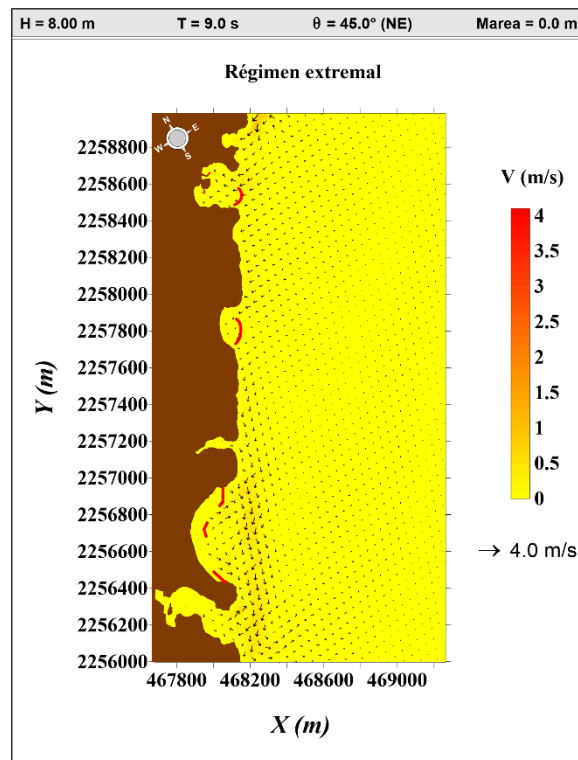


Figura 4.18. Corrientes inducidas por el oleaje: Caso 5

De las modelaciones numéricas se puede observar que la estructura N1 permite el paso de las corrientes y una parte mayoritaria del oleaje, por lo que no se prevé afectación importante a la hidrodinámica al interior de la caleta, este funcionamiento es adecuado para las comunidades de biota que habitan dentro de la caleta. Es de notar que en condiciones extremas, cuando las corrientes tienen capacidad y dirección tal que el sedimento viajaría hacia fuera de la caleta, la ubicación de la estructura N1 es tal que servirá como barrera para evitar la pérdida de este material.

Las estructuras N2 y N3, dada su cercanía con la costa, no afectan los patrones hidrodinámicos en la caleta que las contiene. Su única función será apoyar la playa que se genere con el reciclado de arena y detener el paso del sedimento.

Durante la ocurrencia de algún evento extremo, la estructura C1 será capaz de detener una buena parte del material que sea acarreado fuera de la playa seca, además, en todos los casos modelados, tanto de régimen medio como extremos, se observa clara evidencia de la protección a la costa que ofrece la estructura C1, provocando la rotura del oleaje y generando una zona de sombra apta para el desarrollo de actividades lúdicas y recreativas; cabe mencionar que la caleta centro es la que se pretende aprovechar más ampliamente para el turismo ya que no se encuentra presencia de coral, por lo que se proyectó en ella la estructura más robusta de la propuesta.

Las estructuras S1 y S3, dado que se encuentran adelante del arrecife posterior, tienen poca interacción con el oleaje y las corrientes. No se prevé que generen zonas protegidas de importancia y tampoco interferirán con los patrones hidrosedimentarios actuales de la caleta. Sin embargo, cumplen con su función de retener la arena de las zonas diseñadas como playa seca sin acceso al mar. En ocurrencia de eventos extremos, las estructuras S1 y S3 están colocadas en la zona hacia donde fluye la corriente por lo que, si la playa central requiriera mantenimiento, el material estará retenido en el área cercana a estas estructuras.

Dada la configuración batimétrica de la caleta sur, la estructura S2 recibe, en prácticamente todos los casos de régimen medio y extremal, las olas rotas. Esto hace que su función sea esencialmente de apoyo al relleno de playa y de retención durante las tormentas (tal como se evidencia en las modelaciones), brindando una zona de nado segura de baja profundidad dentro de la caleta sur.

En resumen, la propuesta cumple con los objetivos planteados y armoniza adecuadamente con los ecosistemas presentes, así como con los procesos y ciclos que presenta actualmente el sistema.

4.4 Diseño geométrico y mecánico de las estructuras

A continuación, a partir de las alturas de ola a pie de dique estimadas con el modelo numérico, se presenta una recomendación de pesos mínimos de las piezas que conformarán las corazas de cada una de las estructuras propuestas. Para las estructuras S1, S2, S3, C1 y N1 se empleó el método de (Vidal et al. 1992) para diques sumergidos y rebasables; mientras que las estructuras N2 y N3 se empleó la modificación de la ecuación Froude-Kriloff para la

estimación de la carga horizontal inducida por oleaje sobre un cuerpo sumergido descrita en el segundo capítulo de este documento.

De la Figura 4.19 a la Figura 4.23 se muestran los datos empleados y los resultados obtenidos de pesos mínimos recomendables de las piezas que conformarán las estructuras diseñadas, así como imágenes en planta indicando los pesos para cada sector.

Estructura S1	
Diseño geométrico	
Tipo:	Dique sumergido
Material:	Cubos de concreto
Largo:	80.00 m
Desplante:	-0.50 m
Franco bordo:	0.00 m
Atura estructura:	0.50 m
Ancho de corona:	5.00 m
Talud interior:	1.50
Talud exterior:	2.00
Condiciones de oleaje incidente	
Hs=	0.50 m
Tp=	13.00 m
$\theta=$	0.00 °
Diseño mecánico	
Inicio de avería	
Piezas de talud exterior	
D=	0.18 m
W=	14.76 kg
Piezas de coronación	
D=	0.28 m
W=	58.56 kg
Piezas de talud interior	
D=	0.18 m
W=	15.47 kg
Piezas de morro	
D=	0.28 m
W=	55.92 kg

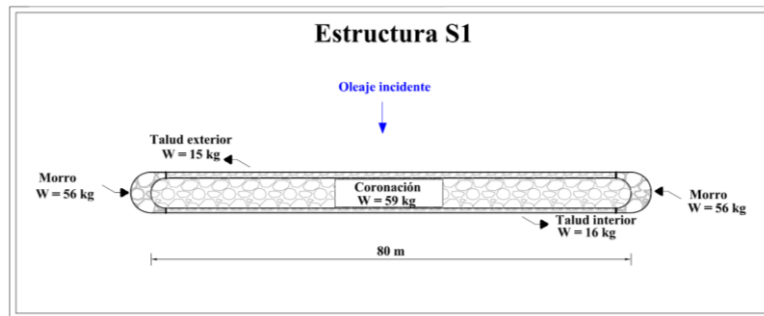


Figura 4.19. Estimación de pesos mínimos recomendables, estructura S1

Estructura S2	
Diseño geométrico	
Tipo:	Dique sumergido
Material:	Cubos de concreto
Largo:	80.00 m
Desplante:	-1.00 m
Franco bordo:	0.00 m
Atura estructura:	1.00 m
Ancho de corona:	5.00 m
Talud interior:	1.50
Talud exterior:	2.00
Condiciones de oleaje incidente	
Hs=	0.50 m
Tp=	13.00 m
$\theta=$	0.00 °
Diseño mecánico	
Inicio de avería	
Piezas de talud exterior	
D=	0.18 m
W=	14.76 kg
Piezas de coronación	
D=	0.28 m
W=	56.83 kg
Piezas de talud interior	
D=	0.18 m
W=	15.01 kg
Piezas de morro	
D=	0.28 m
W=	54.25 kg

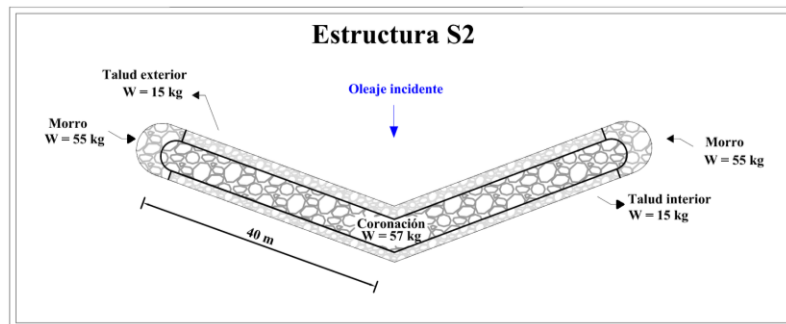


Figura 4.20. Estimación de pesos mínimos recomendables, Estructura 2

Estructura S3	
Diseño geométrico	
Tipo:	Dique sumergido
Material:	Cubos de concreto
Largo:	100.00 m
Desplante:	-1.00 m
Franco bordo:	0.00 m
Atura estructura:	1.00 m
Ancho de corona:	5.00 m
Talud interior:	1.50
Talud exterior:	2.00
Condiciones de oleaje incidente	
Hs=	0.50 m
Tp=	13.00 m
$\theta=$	0.00 °
Diseño mecánico	
Inicio de avería	
Piezas de talud exterior	
D=	0.18 m
W=	14.76 kg
Piezas de coronación	
D=	0.28 m
W=	56.83 kg
Piezas de talud interior	
D=	0.18 m
W=	15.01 kg
Piezas de morro	
D=	0.28 m
W=	54.25 kg

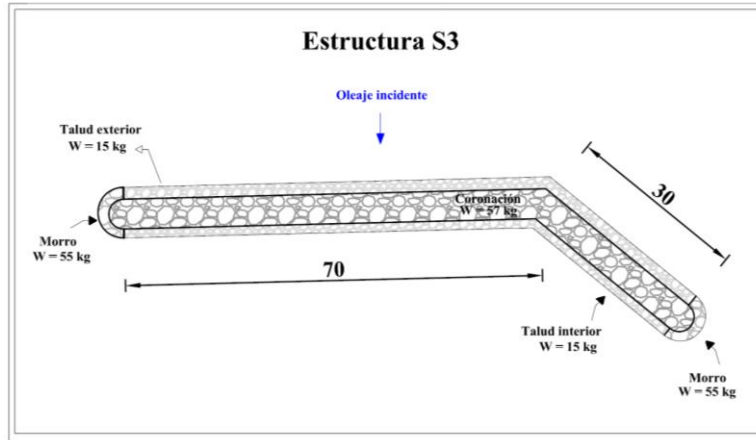


Figura 4.21. Estimación de pesos mínimos recomendables, estructura S3

Estructura C1	
Diseño geométrico	
Tipo:	Dique sumergido
Material:	Cubos de concreto
Largo:	130.00 m
Desplante:	-3.00 m
Franco bordo:	0.00 m
Atura estructura:	3.00 m
Ancho de corona:	5.00 m
Talud interior:	1.50
Talud exterior:	2.00
Condiciones de oleaje incidente	
Hs=	2.00 m
Tp=	13.00 m
$\theta=$	0.00 °
Diseño mecánico	
Inicio de avería	
Piezas de talud exterior	
D=	0.36 m
W=	119.6 kg
Piezas de coronación	
D=	0.56 m
W=	465.96 kg
Piezas de talud interior	
D=	0.36 m
W=	123.03 kg
Piezas de morro	
D=	0.56 m
W=	445.2 kg

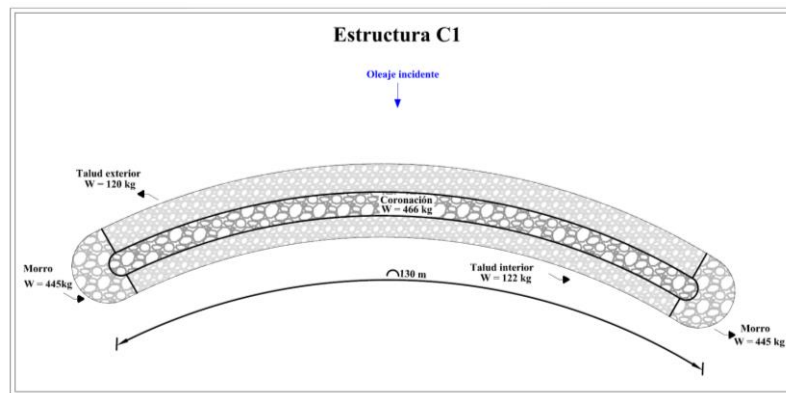


Figura 4.22. Estimación de pesos mínimos recomendables, Estructura C1

Estructura N1	
Diseño geométrico	
Tipo:	Dique sumergido
Material:	Cubos de concreto
Largo:	100.00 m
Desplante:	-3.50 m
Franco bordo:	-2.50 m
Atura estructura:	1.00 m
Ancho de corona:	5.00 m
Talud interior:	1.50 m
Talud exterior:	2.00 m
Condiciones de oleaje incidente	
Hs=	2.00 m
Tp=	13.00 m
$\theta=$	0.00 °
Diseño mecánico	
Inicio de avería	
Piezas de talud exterior	
D=	0.2 m
W=	19.31 kg
Piezas de coronación	
D=	0.13 m
W=	6.03 kg
Piezas de talud interior	
D=	0.21 m
W=	25.52 kg
Piezas de morro	
D=	0.22 m
W=	29.38 kg

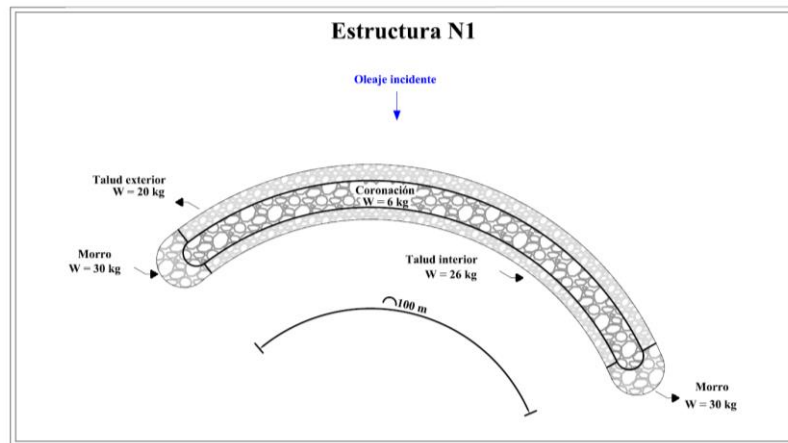


Figura 4.23. Estimación de pesos mínimos recomendables, Estructura N1

Para el diseño las estructuras N2 y N3, como ya se mencionó, se empleó la metodología desarrollada en este trabajo de investigación y los resultados se presentan a continuación.

Los datos a partir de los cuales se realizará el diseño se presentan en la Figura 4.24.

Estructura N2		Estructura N3	
Diseño geométrico		Diseño geométrico	
Tipo:	Dique sumergido	Tipo:	Dique sumergido
Largo:	20.00 m	Largo:	20.00 m
Desplante:	-1.50 m	Desplante:	-0.50 m
Franco bordo:	0.00 m	Franco bordo:	0.00 m
Atura estructura:	1.50 m	Atura estructura:	0.50 m
Condiciones de oleaje incidente		Condiciones de oleaje incidente	
Hs=	0.50 m	Hs=	0.50 m
Tp=	13.00 m	Tp=	13.00 m
$\theta=$	0.00 °	$\theta=$	0.00 °

Figura 4.24. Condiciones de oleaje para diseño

Teniendo en cuenta que ambas serán estructuras sumergidas que pretenden apoyar un relleno de arena, el franco bordo es de 0.00 metros. De este modo ya se cuenta con parámetros fijos de diseño pudiendo sólo variar las dimensiones de base mayor y/o menor de cada cuerpo para evaluar la eficiencia entre ambos y decidir la geometría específica que deberán tener las estructuras.

Se elaboraron, pues, gráficas comparativas utilizando las ecuaciones (2.64) y (2.65), manteniendo fijos los datos de oleaje y altura de las estructuras y variando exclusivamente su ancho y/o taludes, Figura 4.25.

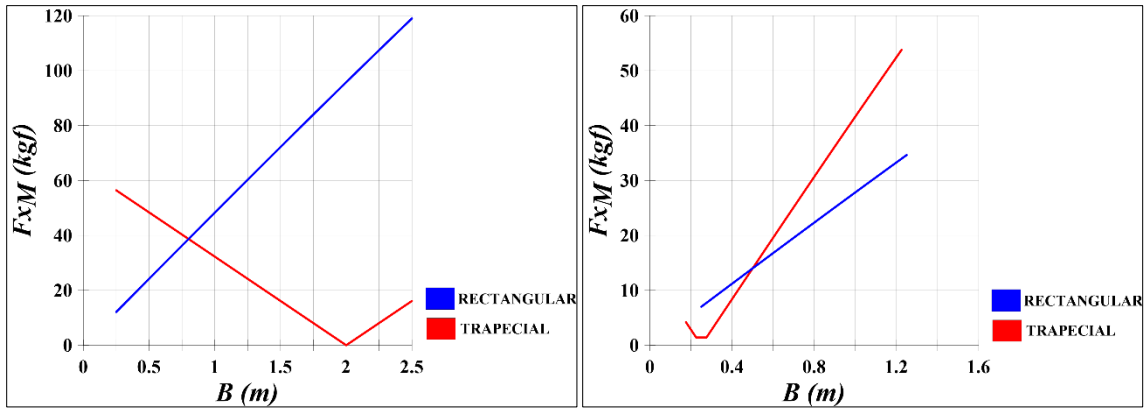


Figura 4.25. Gráficas comparativas: Estructura N2 (izq.), Estructura N3 (der)

De estas gráficas notamos que la carga horizontal para todos los casos es muy pequeña y que, dependiendo de las dimensiones transversales de la estructura, se alterna el valor de menor empuje entre la sección rectangular y la trapezoidal.

A partir de estas gráficas determinamos el caso más eficiente para cada una de las estructuras planteaas, Figura 4.26; el dimensionamiento se muestra en la Figura 4.27.

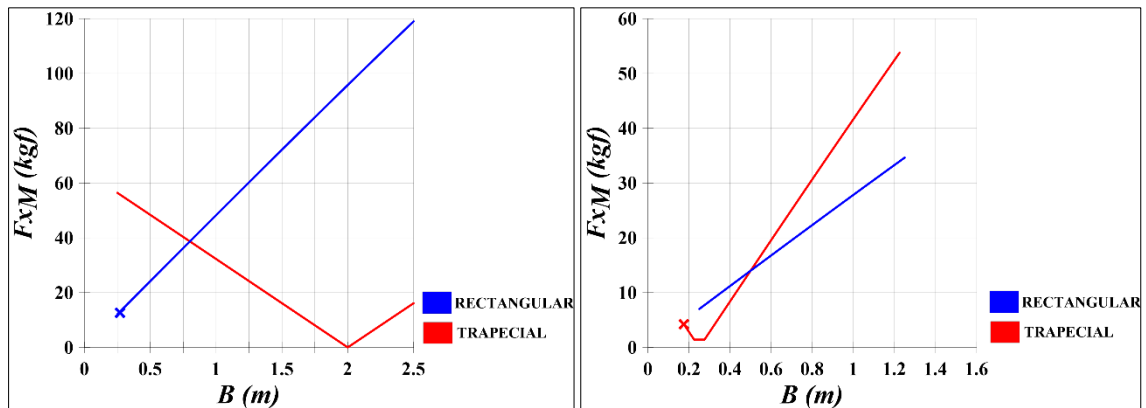


Figura 4.26. Casos elegidos; Estructura N2 (izq.), Estructura N3 (der.)

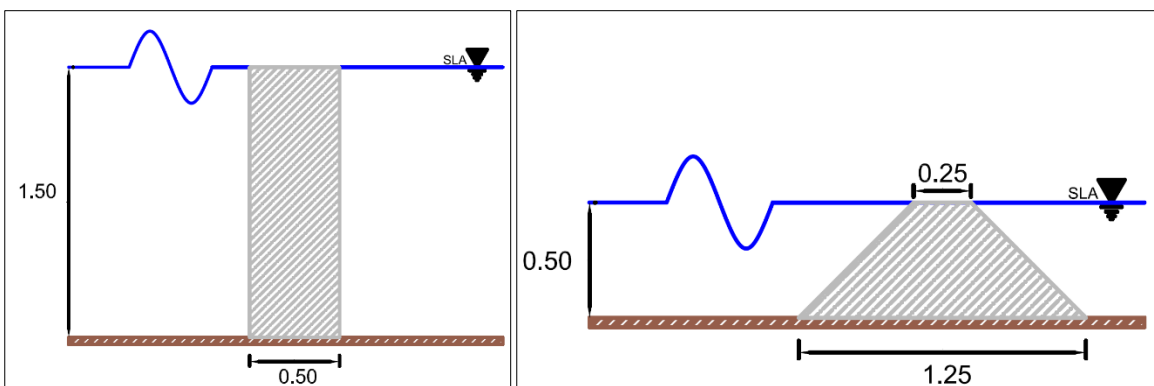


Figura 4.27. Dimensiones: Estructura N2 (izq.), Estructura N3 (der)

Para la estructura N2, se recomienda una sección rectangular debido a que tendrá el área menor de sección transversal para un empuje mínimo; en caso de secciones rectangulares se deben considerar, además, los coeficientes de deslizamiento y vuelco como se muestra a continuación.

El Coeficiente de Seguridad por Deslizamiento, CSD, es la relación de fuerzas que resisten el fallo (F_v) con las que lo provocan (F_h), esto es:

$$CSD = \mu \sum \frac{F_v}{F_h} \quad (4.1)$$

Donde μ es la fricción entre el concreto y el fondo marino (0.6).

El Coeficiente de Seguridad por Volteo, CSV, se obtiene como la relación de la suma de momentos que resisten el vuelco con la suma de momentos que provocan el vuelco, respecto del punto más desfavorable para el modo de fallo, es decir, la esquina inferior del cuerpo del lado no expuesto al oleaje:

$$CSV = \frac{\sum M_r}{\sum M_f} \quad (4.2)$$

Para obtener el peso sumergido se considera el área del cuerpo y una densidad de $2,400 \text{ kgf/m}^3$ para el concreto hidráulico.

$$W_s = 0.75(2400 - 1030) = 1,027.50 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad (4.3)$$

Sustituyendo y resolviendo:

$$CSD = \mu \sum \frac{F_v}{F_h} = \frac{W_s - Sp}{F_x} = 0.6 \left(\frac{1027.5 - 12.1}{12.1} \right) = 50.35 \quad (4.4)$$

$$CSV = \frac{\sum M_r}{\sum M_f} = \frac{1027.50(0.25)}{12.1(0.75 + 0.333)} = 19.60 \quad (4.5)$$

Dados los valores de los coeficientes de seguridad, el diseño del bloque monolítico es aceptable.

Para la estructura N3 se propone una sección trapezoidal, que si bien no es el empuje menor, sí es el área transversal más pequeña posible, lo que es muy importante ya que reducirá los costos y tiempos de construcción. En este caso no se requiere revisión por deslizamiento o vuelco.

El peso por metro lineal de ambas estructuras supera ampliamente al de la carga horizontal inducida por el oleaje, por lo que el diseño es correcto.

4.5 Relleno de playa

Con la finalidad de que la actividad turística se vea beneficiada de forma inmediata, como ya se mencionó, se propone complementar la acción estructural con una realimentación de arena, atendiendo a la configuración en planta que naturalmente generarían las estructuras planteadas y apoyando el material reciclado en ellas para brindarle estabilidad y evitar la pérdida de este sedimento durante eventos extremos.

4.5.1 Identificación del problema de erosión

Para identificar la causa principal de la pérdida de material en la playa estudiada se realizó el análisis de imágenes satelitales, expuesto en el Capítulo 1, y el modelado numérico de las corrientes inducidas por el oleaje. Se puede observar un proceso de erosión relativamente uniforme en el que el factor de mayor impacto es la ocurrencia de eventos extremos que ocasiona un transporte de sedimentos en sentido transversal a la costa a una profundidad mayor a la de cierre, lo que evita que este material retorne naturalmente al sistema durante régimen medio.

4.5.2 Diseño del relleno

El objetivo del diseño del relleno es la determinación de la forma en planta y perfil de la playa restaurada y el cálculo del volumen de sedimento aproximado para dicha restauración.

Planta

La forma en planta que tendrá el relleno de arena fue definida por el cambio en la línea de costa que generarán las estructuras propuestas; este cambio se determinó mediante el programa MepBay a partir de la batimetría con estructuras, posteriormente este trazado fue georreferenciado y digitalizado, Figura 4.28.

Perfil

Analizando la pendiente que presentan las playas en la Riviera Maya (SECTUR, 2013) se propone, inicialmente, un perfil con una pendiente de 5.0% para la realimentación de arena. Tomando en cuenta este valor y el cambio en la línea de costa, se procede a calcular el volumen aproximado de relleno.

Volumen de arena para regeneración Caleta Sur: 4,700.00 m³

Volumen de arena para regeneración Caleta Sur: 8,050.00 m³

Volumen de arena para regeneración Caleta Sur: 1,050.00 m³

Volumen de arena para regeneración total de proyecto: 13,800.00 m³

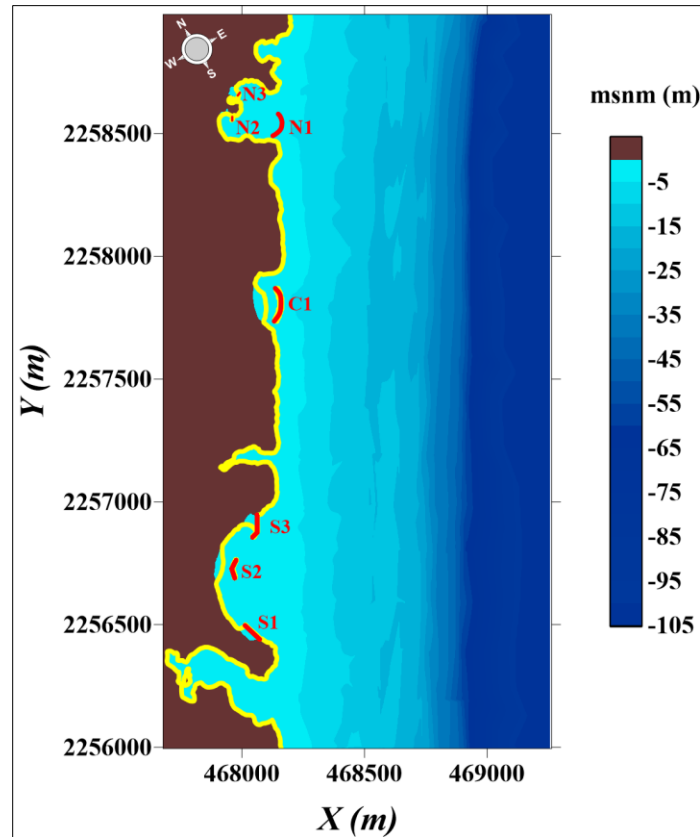


Figura 4.28. Cambio en la línea de costa

A partir de este volumen de relleno y atendiendo a las modelaciones hidrodinámicas en régimen medio, se establecieron algunas variaciones de este perfil propuesto para las estructuras S2 y C1, conformado por una duna, en la playa emergida, y por berma, en la playa sumergida; la ventaja de este perfil es que permitirá al sistema llegar de forma natural al equilibrio.

Para la Estructura S1 observamos que las corrientes inducidas por el oleaje son prácticamente nulas en la zona del relleno artificial, por lo que se propone un perfil final con una pendiente uniforme de 5.0% en toda la sección.

En lo que respecta a la Estructura S2, se observa que hacia sus costados existen corrientes que tienden a importar sedimento hacia la costa, por lo que se propone un perfil distinto para el relleno frente a la estructura, 5.0%, y otro que se conformará en las secciones laterales, manteniendo el área de la sección transversal del perfil, Figura 4.29.

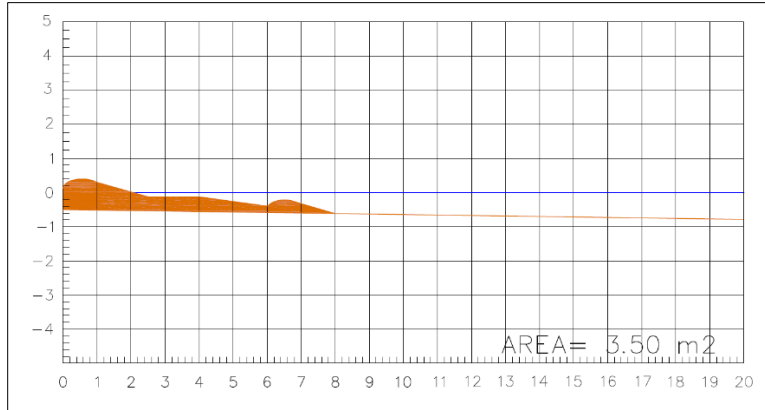


Figura 4.29. Perfil modificado para estructura S2

La forma en planta del relleno para la Estructura S3 le asegura una protección total desde la nueva línea de costa hasta el final de la pendiente ya propuesta, por lo que su perfil tendrá una pendiente uniforme de 5.0 % en todo el perfil del relleno.

La Estructura C1 presenta un caso similar a la Estructura S2, por lo que el perfil central será distinto de los laterales, Figura 4.30.

Para la estructura N2 y N3 el perfil del relleno será uniforme con pendiente de 5.0 % ya que estos se encuentran en zonas de calma, al abrigo y apoyo total de estas estructuras y su único propósito es brindar más playa seca para las actividades recreativas del complejo.

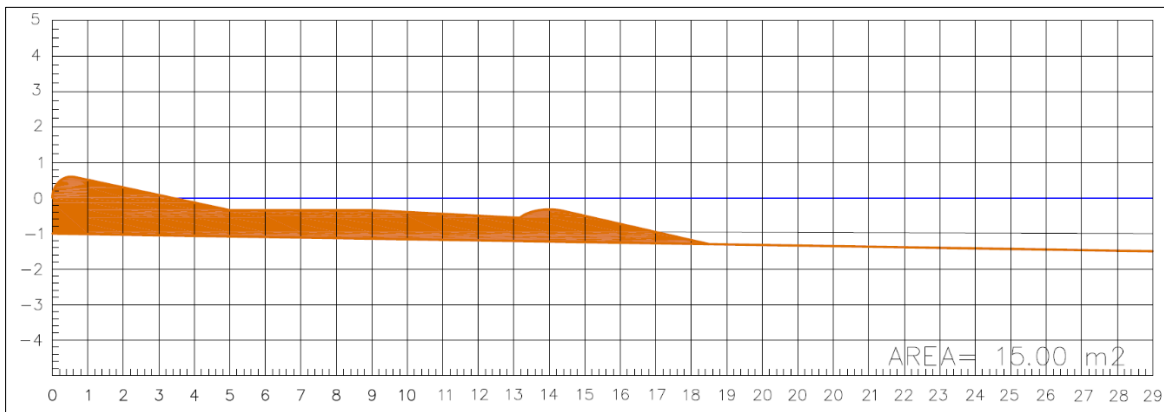


Figura 4.30. Perfil modificado para estructura C1

4.6 Propuesta Integral de restauración

En la Figura 4.31, se muestra la condición topo-batimétrica final del sitio, según la solución integral propuesta para la recuperación de playas frente al complejo turístico “Grand Sirenis”.

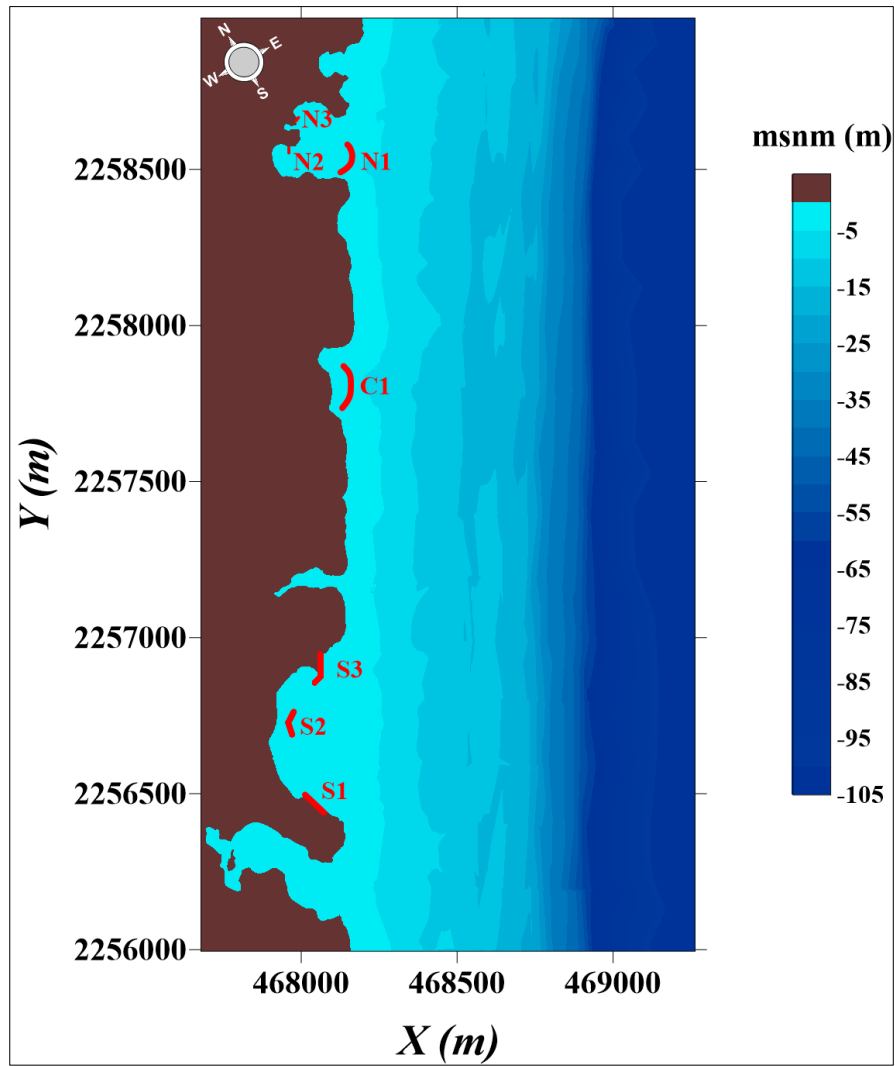


Figura 4.31. Condición topo-batimétrica de la solución integral

5 CONCLUSIONES

En lo que respecta a la modificación de la ecuación de Froude-Kriloff aquí propuesta se concluye: 1) La ecuación desarrollada y validada en este trabajo, para sección trapecial, brinda una nueva opción de cálculo para el diseño de este tipo de estructuras; 2) La validación de la ecuación teórica existente, para sección rectangular, permite implementarla en el diseño estructural de una forma más precisa; 3) Al utilizar esta metodología se estará en posibilidad de definir el tipo de sección recomendada según su eficiencia ante las circunstancias particulares del caso que se evalúe; 4) Es necesario desarrollar más a fondo la experimentación en ensayos de mayor escala, en laboratorio y campo, para establecer rangos de aplicación y factores de ajuste más precisos.

Respecto a la propuesta integral de recuperación de playas: Las estructuras planteadas cumplen con las funciones previstas y tiene la capacidad de ofrecer áreas seguras y estables para las actividades turísticas de sol y playa. Es altamente recomendable ejecutar acciones de reciclado de arena (colocación artificial de arena que previamente formó o formará parte de la playa) y se evite en lo posible el relleno artificial con fuentes de arena proveniente de otras celdas para que la operación turística refleje de manera inmediata los beneficios.

Como se observó en la modelación numérica, el sistema de caletas tiende a exportar el material sedimentario en ocurrencia de eventos extremos pero no en régimen medio, es por ello que la función principal de las barreras proyectadas es retener la arena durante tormentas lo cual, a la vista de los resultados numéricos, ocurrirá. De lo anterior, la recomendación es que las estructuras se mantengan coronadas lo más cerca posible del nivel medio del mar, con ello se minimiza el impacto visual, se reducen costos y la función morfológica de las estructuras se sigue cumpliendo.

Los diseños mecánicos que se presentan aquí, corresponden a la estimación de los pesos mínimos recomendables de las piezas de las corazas de todas las estructuras, esto significa que pesos mayores quedarán del lado de la seguridad. En específico se recomienda que los diques S1, S2, S3, y N1 se fabriquen con piezas cuyo peso supere los 60 kg en todos sus sectores; mientras que los elementos que se elijan para las estructuras N2 y N3 deberán tener un peso mínimo por metro lineal de 1,800 kg para el dique N2, y de 900 kg para el dique N3. El dique C1, que es el único que efectivamente controlará parte de la energía del oleaje resulta con un peso mínimo recomendable, por pieza de 500 kg en todos sus sectores.

Un aspecto que es conveniente destacar, y que también fue verificado con las modelaciones numéricas, es que ninguna de las estructuras propuestas provoca alteraciones en las que se interrumpa el transporte longitudinal global. Es por ello que no se prevé de ninguna manera afectar predios aledaños, ni trasvasar problemas de erosión a los desarrollos vecinos, ni retener sedimentó en volúmenes importantes que pudieran provocar déficit a las playas corriente abajo. El efecto de las estructuras aquí planteadas es local y en beneficio del predio de interés.

REFERENCIAS

Hudspeth, R. 2006. *Waves and Wave Forces on Coastal and Ocean Structures*. Advanced Series on Ocean Engineering - Vol. 21. Ed. World Scientific. Singapur.

INEGI, 2015. *Sistema de Cuentas Nacionales de México: cuenta satélite del turismo de México 2013*. INEGI. México.

Silva, R. 2005. *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Serie Docencia Vol. 49. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Silva, R., Ruiz, G., Posada, G., Perez, D., Rivillas, G., Espinal, J., Mendoza, E., Bautista, G. and Moran, D. 2008. *Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Atlántica Mexicana*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Silva, R., Baquerizo, A., Losada, M. Á., & Mendoza, E. (2010). Hydrodynamics of a headland-bay beach—nearshore current circulation. *Coastal Engineering*, 57(2), 160-175.

Vidal, C., Losada, M.A., Medina, R., Mansard, E.P.D. y Gomez-Pina, G. 1992. A universal analysis for the stability of both low-crested and submerged breakwaters. *Proc. 23 Int. Conference on Coastal Engineering*, p. 1679-1692, Italia.

Bolongaro, A. 2013. *Estudio de la vulnerabilidad y programa de adaptación ante la variabilidad climática y el cambio climático en diez destinos turísticos estratégicos, así como propuesta de un sistema de alerta temprana a eventos hidrometeorológicos extremos*. SECTUR. México.