REPOSITORIO ACADÉMICO UPC

Propuesta de diseño de rompeolas como protección de la costa contra la erosión por efecto del oleaje en la playa La Herradura

Item Type	info:eu-repo/semantics/bachelorThesis
Authors	Valverde Llanos, Alexander Eduardo; Meza Sandoval, Juan Jose
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	info:eu-repo/semantics/openAccess; Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
Download date	05/04/2024 10:50:29
Item License	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	http://hdl.handle.net/10757/668052

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta de diseño de rompeolas como protección de la costa contra la erosión por efecto del oleaje en la playa La Herradura

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Meza Sandoval, Juan Jose (0000-0002-9646-5771)

Valverde Llanos, Alexander Eduardo (0000-0001-7018-7294)

ASESOR

Guzmán Zorrilla, Emanuel Jesús (0000-0001-8381-4509)

Lima, 26 de abril de 2023

DEDICATORIA

A Dios, por haber culminado mi carrera con satisfacción. A mis padres, Rossana y Jose quienes con mucho esfuerzo y dedicación han logrado que cumpla mis metas y que me dejan uno de los mejores bienes que es la educación. También quiero agradecer a mi prima Carola, quien me apoyo en mis últimos ciclos y confió en mi para poder desarrollarme profesionalmente. Por último, a mis amigos, quienes en los momentos más difíciles me apoyaron emocionalmente a seguir y culminar esta gran travesía.

Meza Sandoval, Juan José

Dedico esta tesis a mis padres, Juana y Eduardo por el apoyo constante, las enseñanzas y los valores que me han inculcado, y que han hecho de mí una mejor persona. A mis hermanos, Brisa y Yamill por estar siempre conmigo. A mi padrino Alexander, mi madrina Soledad y mi tía Ethel quienes me impulsaron en cada etapa de mi vida para continuar con mis objetivos. Y a toda mi familia que confió siempre en mí y que, como resultado, obtuve este logro.

Valverde Llanos, Alexander Eduardo

RESUMEN

La erosión costera es el proceso natural en el cual se pierde material del litoral de los litorales debido a fuerzas de fricción ocasionado por las olas, corrientes marinas u otros a través del tiempo. Además, este problema afecta a los países que tienen salida al mar, ya que la erosión no solo desgasta las playas, sino que perjudica el desarrollo urbano, impidiendo que las actividades humanas como la construcción o recreación se desarrollen. Por tal motivo, se propone el uso de estructuras artificiales como rompeolas para evitar la erosión en las costas.

El rompeolas permite contrarrestar la erosión ocasionado por el oleaje. Existen diversos tipos con diferente composición y morfología. Estas estructuras se construyen entre el mar y la costa, y su función es la de absorber la energía de las olas, disminuyendo su altura y alivianando el oleaje. Como consecuencia, este proceso en un periodo de tiempo prolongado genera la sedimentación de material del litoral en las playas debido a la disminución de la fuerza que presenta las olas.

En el Perú este problema se presenta en diversas playas, siendo la de este caso de estudio la playa La Herradura ubicada en la bahía de Chorrillos en Lima, Perú. Esta playa ha sido erosionada y ha perdido un total de 30m de costa aproximadamente. Motivo por el cual se realizaron simulaciones de rompeolas en un software numérico computacional (Delft 3D). Primero se simuló 2 sistemas de rompeolas, luego se propuso un tercer modelo con mejoras en su diseño, obteniéndose resultados más favorables. Por último, se realizó una comparación entre el modelo propuesto con un rompeolas recto convencional, siendo aún superior el resultado del tercer modelo propuesto, reduciendo hasta en un 97.85% la altura de las olas.

Palabras clave**:** Rompeolas convexo; erosión costera; oleaje; playa; marítima; refracción de olas; difracción de olas; sedimentación; modelamiento numérico; Delft-3D; estructuras costeras; protección costera; hidrodinámica.

Breakwaters design proposal to protect coast against erosion due to waves effect at La Herradura beach

ABSTRACT

Coastal erosion is the natural process in which shoreline material is lost from coastlines due to friction forces caused by waves, ocean currents, or others over time. In addition, this problem affects countries that have access to the sea, since erosion not only erodes beaches, but also harms urban development, preventing human activities such as construction or recreation from taking place. For this reason, the use of artificial structures such as breakwaters is proposed to prevent erosion on the coasts.

Breakwater allows to counteract waves erosion. There are several types with different composition and morphology. These structures are built between the sea and coast, and their function is to absorb waves energy, decreasing their height and lightening waves. Consequently, this process in a prolonged period generates sedimentation of coastal material on beaches due to decrease in waves forces.

In Peru, this problem occurs on various beaches, being in this study case La Herradura beach located in Chorrillos Bay in Lima, Peru. This beach has been eroded and has lost a total of approximately 30m of shoreline. Reason for which breakwater simulations were carried out in a computational numerical software (Delft 3D). First, 2 breakwater systems were simulated, then a third model was proposed with improvements in its design, obtaining more favorable results. Finally, a comparison was made between the proposed model with a conventional straight breakwater, the result of the third proposed model being even higher, reducing the height of the waves by up to 97.85%.

Keywords: Convex breakwater; coastal erosion; surf; beach; maritime; waves refraction; waves diffraction; sedimentation; numerical modeling; Delft-3D; coastal structures; coastal protection; Hydrodynamics.

N°5600_ Propuesta de diseño de rompeolas como protección de la costa contra la erosión por efecto del oleaje en la playa La Herradura

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	9%	4%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es Fuente de Internet	1%
2	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	www.iagua.es Fuente de Internet	1%
6	Tuz Pech José Clemente. "Impacto de espigones permeables en la costa norte de Yucatán", TESIUNAM, 2018 Publicación	<1%
7	consultaspublicas.semarnat.gob.mx Fuente de Internet	<1%

sisbib.unmsm.edu.pe

8	Fuente de Internet	<1 %
9	1library.co Fuente de Internet	<1 %
10	Cárdenas Rojas Dea Maribel. "Optimización mecánica e hidráulica de un dique sumergido homogéneo tipo arrecife artificial", TESIUNAM, 2021 Publicación	<1 %
11	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	www.ctc-n.org Fuente de Internet	<1 %
14	www.bbc.com Fuente de Internet	<1 %
15	upcommons.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
16	decologia.info Fuente de Internet	<1 %
17	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
	rpp.pe	

18	Fuente de Internet	<1 %
19	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
20	www.iho.shom.fr Fuente de Internet	<1 %
21	www.tusdeberes.com Fuente de Internet	<1 %
22	Cruz Juárez Víctor Mauricio de la. "Estudio para el aprovechamiento de energía marina en Cabo San Lucas, Baja California Sur", TESIUNAM, 2022 Publicación	<1 %
23	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
24	repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar Fuente de Internet	<1 %
25	www.dhn.mil.pe Fuente de Internet	<1 %
26	bioone.org Fuente de Internet	<1 %
27	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	<1 %

TABLA DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO 5

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 7

1.3 ESTADO DEL ARTE 7

2 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO 15

2.1 OCEANOGRAFÍA 15

2.1.1 CORRIENTES OCEÁNICAS 15

2.1.2 OLEAJES 16

2.1.3 MAREAS 17

2.1.4 SEDIMENTOS 18

2.1.5 NIVEL DE MAR 20

2.2 REFRACCIÓN, DIFRACCIÓN Y REFLEXIÓN DEL OLEAJE 21

2.2.1 REFRACCIÓN 21

2.2.2 DIFRACCIÓN 22

2.2.3 REFLEXIÓN 23

2.3 ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA 24

2.3.1 TIPOS DE ESTRUCTURAS 26

2.3.2 FORMAS DE ROMPEOLAS 28

2.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 28

2.5 DISEÑO FUNCIONAL 29

2.6 SOFTWARE DE SIMULACIÓN 30

2.6.1 OpenFOAM: 30

2.6.2 DELFT 3D: 30

2.6.3 XBEACH: 31

3 CAPÍTULO II: METODOLOGÍA 33

3.1 NIVEL DE INVESTIGACIÓN: 33

3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 33

3.3 PROCEDIMIENTO 33

3.3.1 RECOLECTAR DATOS BATIMÉTRICOS CARACTERÍSTICOS DE LA PLAYA LA HERRADURA. 33

3.3.2 CARACTERIZAR EL OLEAJE EN LA PLAYA LA HERRADURA. 34
3.3.3 REALIZAR EL DISEÑO DEL ROMPEOLAS CON LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN LOS ESTUDIOS DE LA PLAYA. 34
3.3.4 REALIZAR LA SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL ESPECIALIZADO, MEDIANTE EL SOFTWARE DELFT-3D, PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DEL ROMPEOLAS PROPUESTO EN LA ZONA DE ESTUDIO. 34
3.3.5 REALIZAR LA COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PROPUESTA CON ROMPEOLAS CONVENCIONALES. 35

4 CAPÍTULO III: RECOLECCIÓN DE DATOS BATIMÉTRICOS CARACTERÍSTICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO 37

4.1 ESTADO ACTUAL DE LA PLAYA LA HERRADURA 37
4.2 BATIMETRÍA 39
4.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS BATIMÉTRICOS LOCALES 39
4.2.2 PROCESAMIENTO DE DATOS BATIMÉTRICOS 40

5 CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE DE LA PLAYA LA HERRADURA 42

5.1 CÁLCULO DE CONDICIONES PREDOMINANTES Y MÁXIMAS EN AGUAS PROFUNDAS 44
5.2 CÁLCULO DE CONDICIONES PREDOMINANTES Y MÁXIMAS DEL OLEAJE EN LA PLAYA LA HERRADURA 46
5.3 CÁLCULO DE LA ZONA ROMPIENTE DE OLAS DE LA PLAYA LA HERRADURA 50

6 CAPÍTULO V: DISEÑO DE ROMPEOLAS 54

6.1 RECOPILACIÓN DE DATOS Y PARÁMETROS DE LA ZONA DE ESTUDIO 54
6.2 ELABORACIÓN DEL DISEÑO DEL ROMPEOLAS 56
6.3 RESULTADOS FINALES DEL DISEÑO 59

7 CAPÍTULO VI: SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL 61

7.1 SOFTWARE Y MODELADO DEL ROMPEOLAS 61
7.2 VERIFICACIÓN DE LA MODELACIÓN DEL ROMPEOLAS 63

7.3 CORRECCIÓN DEL DISEÑO DEL ROMPEOLAS 72

8 CAPÍTULO VII: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA PROPUESTA CON ROMPEOLAS CONVENCIONALES. 78

8.1 DATOS DE PROTECCIÓN DE ROMPEOLAS CONVECIONAL 78

8.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN UN CASO SIMPLIFICADO 83

8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ROMPEOLAS RECTO CON EL ROMPEOLAS PROPUESTO EN LA PLAYA LA HERRADURA 86

9 REFERENCIAS 97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Granulometría y pendiente promedio de las playas* 19
Tabla 2 *Tipos de estructuras de proyección costera con objetivos y su función principal* 25
Tabla 3 *Diferencia funcional de software numérico computacional para modelamiento de oleaje* 32
Tabla 4 *Pendientes de la playa La Herradura para las curvas de 5 y 10 m* 41
Tabla 5 *Resultados de promedio y máximo en los parámetros de altura, dirección y periodo del oleaje* 45
Tabla 6 *Rango de altura de ola en condición normal* 54
Tabla 7 *Rango de alturas de ola en la zona rompiente (m)* 55
Tabla 8 *Profundidad y distancia de la zona de rompiente desde la costa para la condición predominante y máxima en (m)* 55
Tabla 9 *Pendientes de la playa La Herradura para las curvas de 5 y 10 m* 56
Tabla 10 *Parámetros de relación de longitud de rompeolas (B) y distancia a la costa (X)* 59
Tabla 11 *Resultados del diseño de rompeolas convexo* 59
Tabla 12 *Altura de ola en (m) en la costa de la playa La Herradura para la condición predominante* 71
Tabla 13 *Altura de ola en (m) en la costa de la playa La Herradura para la condición máxima* 71
Tabla 14 *Altura de ola en (m) para el modelo 3 (corregido) para la condición predominante* 76
Tabla 15 *Altura de ola en (m) para el modelo 3 (corregido) para la condición máxima* .. 76
Tabla 16 *Comparación de reducción de ola en (%) de los 3 modelos* 77
Tabla 17 *Reducción de altura de ola en (%) del rompeolas recto* 82
Tabla 18 *Altura de ola para los rompeolas rectos y propuestos convexos y su diferencia en reducción de ola* 86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Porcentaje de retiro de arena sobre 100m de las playas proyectadas para experimentar erosión crítica* 2
Figura 2 *Viviendas afectadas por el fuerte oleaje en Trujillo* 2
Figura 3 *Antes y después de playa de Huanchaco* 3
Figura 4 *Amplia playa de arena en la herradura en los años 60* 4
Figura 5 *Erosión en la playa La herradura en el 2013* 5
Figura 6 *Daños en estructuras públicas en la playa La herradura* 5
Figura 7 *Cuadro comparativo de playa La Herradura* 6
Figura 8 *La Herradura con alta concurrencia de veraneantes* 7
Figura 9 *Erosión en la costa de Buenos Aires, Argentina* 8
Figura 10 *Fotografía satelital de la playa de Buenos Aires en los años 1997, 2004, 2011 y 2012* 9
Figura 11 *Asentamiento de rompeolas reforzada y no reforzada ante un terremoto y tsunami* 10
Figura 12 *Simulación de batimetría resultante con rompeolas convexo en programa Xbeach* 12
Figura 13 *Dirección de las corrientes superficiales más importantes* 15
Figura 14 *Parámetros asociados a la onda* 16
Figura 15 *Pleamar (high tide) y bajamar (low tide) por las fuerzas de tracción del sol y la luna* 18
Figura 16 *Refracción de ola al llegar a la costa en Villaricos España* 22
Figura 17 *Difracción de ola al impacto con un obstáculo* 22
Figura 18 *Difracción de ola en Sitges, Barcelona* 23
Figura 19 *Reflexión de ola ante un obstáculo* 24
Figura 20 *Reflexión de ola generada por el impacto con el malecón* 24
Figura 21 *Rompeolas convencional protegiendo puertos de la ciudad de Cowes, Inglaterra* 27
Figura 22 *Playa de Happisburh, Norfolk, Inglaterra* 28
Figura 23 *Desbordamiento y filtración generados durante un tsunami* 29
Figura 24 *Simulación de ola en 3D mediante OpenFOAM* 30
Figura 25 *Erosión y sedimentación mediante DELFT-3D* 31
Figura 26 *Simulación de rompeolas en el software Xbeach* 32

Figura 27 *Diagrama de flujo del procedimiento* 36
Figura 28 *Playa La Herradura con fuertes oleajes el 12/06/2021* 37
Figura 29 *El mar a pocos metros del edificio Las Gaviotas. Visita realizada el 12/06/2021* 38
Figura 30 *Carta Batimétrica de la Ensenada de Chorrillos* 39
Figura 31 *Representación de las profundidades de la playa La Herradura mediante el software Delft-3D* 40
Figura 32 *Rectas para el cálculo de las pendientes de la playa La Herradura* 41
Figura 33 *Gráfica de Altura de ola (m) vs Tiempo (años) de la data de oleaje en un rango de 40 años* 43
Figura 34 *Gráfica de Dirección de ola (grados) vs Tiempo (años) de la data de oleaje en un rango de 40 años* 43
Figura 35 *Gráfica de Periodo de ola (s) vs Tiempo (años) de la data de oleaje en un rango de 40 años* 43
Figura 36 *Plano de coordenadas polares con convención oceanográfica* 44
Figura 37 *Rosa de Oleaje de la Playa La Herradura* 45
Figura 38 *Modelamiento del oleaje de la playa La Herradura en Delft-3D* 46
Figura 39 *Modelamiento del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS* 47
Figura 40 *Modelamiento del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS* 47
Figura 41 *Modelamiento del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS* 48
Figura 42 *Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS* 48
Figura 43 *Modelamiento del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS* 49
Figura 44 *Modelamiento del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS* 50
Figura 45 *Modelamiento de zona rompiente en Delft-3D* 51
Figura 46 *Proyección de zona rompiente de la dirección sur en Google Earth Pro* 52
Figura 47 *Proyección de zona rompiente de la dirección suroeste en Google Earth Pro* . 53
Figura 48 *Playa Barceloneta* 57
Figura 49 *Playa de San Antonio de Calonge, Gerona* 57
Figura 50 *Plano de dimensionamiento del sistema de rompeolas en la playa La Herradura* 58
Figura 51 *Dimensiones del sistema de rompeolas en la playa La Herradura* 60
Figura 52 *Modelación del sistema de rompeolas en forma convexa en Delf-3D* 61
Figura 53 *Modelación del sistema de rompeolas en forma de pendiente en Delft-3D* 62

Figura 54 *Modelamiento del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS* 63
Figura 55 *Modelamiento del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS*..... 64
Figura 56 *Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS* 64
Figura 57 *Modelamiento del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS* 65
Figura 58 *Modelamiento del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS* 65
Figura 59 *Modelamiento del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS*..... 66
Figura 60 *Modelamiento del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS* 67
Figura 61 *Modelamiento del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS*..... 67
Figura 62 *Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS* 68
Figura 63 *Modelamiento del oleaje dirección suroeste en ArcGIS*..... 68
Figura 64 *Modelamiento del oleaje dirección oeste en ArcGIS*..... 69
Figura 65 *Modelamiento del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS*..... 69
Figura 66 *Puntos de control del sistema de rompeolas en la Playa La Herradura* 70
Figura 67 *Modelamiento de sistema de rompeolas en Delft-3D* 72
Figura 68 *Modelado del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS* 73
Figura 69 *Modelamiento del oleaje en dirección sur predominante en ArcGIS*..... 73
Figura 70 *Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS* 74
Figura 71 *Modelado del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS* 74
Figura 72 *Modelado del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS*..... 75
Figura 73 *Modelado del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS* 75
Figura 74 *Modelado de rompeolas rectos en Delft-3D* 78
Figura 75 *Modelado del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS* 79
Figura 76 *Modelado del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS* 79
Figura 77 *Modelado del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS*..... 80
Figura 78 *Modelado del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS* 80
Figura 79 *Modelado del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS*..... 81
Figura 80 *Modelado del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS* 81
Figura 81 *Modelado de una playa lineal en Delft-3D*..... 83
Figura 82 *Comparación entre casos simplificados de rompeolas recto y convexo en Delft-3D* 84
Figura 83 *Comparación entre casos simplificados de rompeolas recto y convexo en Delft-3D* 85

Figura 84 *Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Sur – condición predominante* 87
Figura 85 *Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Sur – condición máxima* 87
Figura 86 *Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Suroeste – condición predominante* 88
Figura 87 *Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Suroeste – condición máxima* 89
Figura 88 *Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Oeste – condición predominante* 89
Figura 89 *Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Oeste – condición máxima* 90

1 INTRODUCCIÓN

La erosión costera es un proceso común que se puede apreciar en todos los países debido a la acción de las mareas y el oleaje. Este proceso ocasiona el desgaste de la costa, lo cual hace que pierdan terreno y en algunos casos que desaparezca (Murilo, 2017).

La combinación de factores naturales y humanos producen que la erosión costera tenga como parámetros variables el viento, las corrientes, los temporales, los cambios en el nivel del mar, entre otros. Además, el proceso de resiliencia costera es impedida por factores humanos como las obras costeras, la extracción de áridos, la ocupación física, la regulación fluvial, entre otros. Lo que, a su vez, estos factores humanos aceleran la erosión (Sardá et al., 2013).

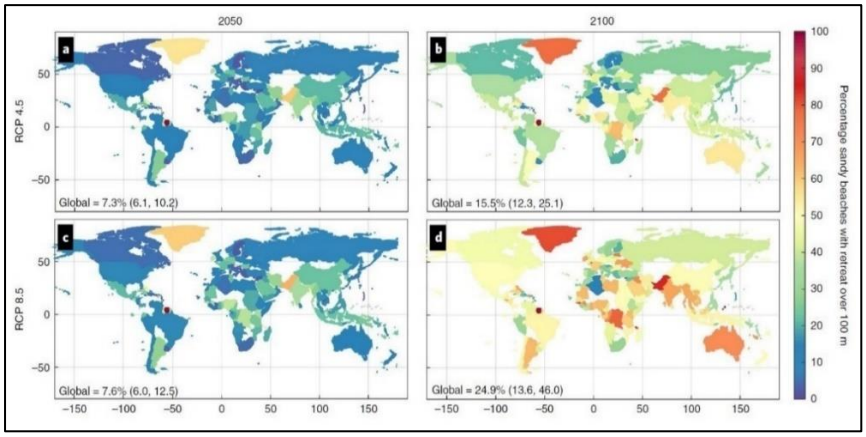
El impacto de la erosión en las costas puede reflejarse en la pérdida de playas, dunas, manglares e incluso en la dinámica social (da Cruz Braga et al., 2020). Además, las playas y dunas representan beneficios importantes para el país impulsando el turismo y la recreación. Espacios para navegar, pescar, nadar, bucear, caminar e incluso tomar el sol son solo algunas de las actividades recreativas que ofrecen las playas (Barbier et al., 2011).

El 24% de las playas en el mundo están siendo erosionadas a razón de 5m/año según un estudio publicado en el 2018 por la revista Scientific Reports. Además, descubrieron que las playas conforman el 31% de las costas en el mundo. De ellas, unos 6 mil kilómetros se están erosionando en promedio de 5 metros por año (Luijendijk et al., 2018).

Un estudio más actual realizado por Vousdoukas et al. (2020) menciona que más de la mitad de las playas existentes podrían casi extinguirse para fines del siglo. Como consecuencia de la erosión costera que, en unos 30 años, el mar ganará en promedio 100 metros a las playas de arena. Esto debido a la subida del mar y que podría duplicarse para finales del siglo. También menciona que en cuanto a mayor pérdida en kilómetros de playas será América Latina una de las más afectadas y dentro de esta región los países que resaltan son Chile, México y Argentina. Además, países de otros continentes como Australia y China están en riesgo de perder parte de sus litorales costeros arenosos como se observa en la Figura 1 que representa la pérdida de playas de cada país en metros, con dos posibles escenarios de cambio climáticos de RCP 4.5 y 8.5 para los años 2050 y 2100 (Vousdoukas et al., 2020). En la que, el escenario RCP 8.5 representa que continuemos con las políticas climáticas actuales. Mientras que el escenario RCP 4.5, representa una mejora intermedia. Ambos escenarios proyectados hasta fines del siglo XXI.

Figura 1

Porcentaje de retiro de arena sobre 100m de las playas proyectadas para experimentar erosión crítica



Nota. De "Sandy coastlines under threat of erosión", por Vousdoukas et al, 2020 (https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0).

Respecto al Perú el país presenta problemas de fuertes oleajes en su litoral costero. Como el desborde del mar en Trujillo, arrasando con viviendas y dejando a familias en las calles (Redacción RPP, 2019) como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Viviendas afectadas por el fuerte oleaje en Trujillo

Nota. Fuerte oleaje pone en peligro a familias en el sector Buenos Aires, distrito de Víctor Larco, Trujillo. De "El mar se sale, arrasa vivienda y deja en la calle a una familia en Trujillo", por Redacción RPP, 2019 (https://n9.cl/a1gnl).

Una de las principales causas de la erosión de las playas en Trujillo es ocasionado por la construcción del molón en el puerto de Salaverry, el cual acumuló un total de 90 millones de metros cúbicos de arena en el sur (Bocanegra Garcia et al., 2020). Pero que causó que las playas del norte se erosionen y pierdan una gran cantidad de terreno. Tal es el caso del balneario de Huanchaco, el cual en el 2018 tuvo una presencia de oleajes anómalos que ocasionaron que alrededor de 106 kilómetros de playa se erosionen, generando la preocupación de los habitantes, ya que temen que la playa termine como el balneario de Buenos Aires (Correo, 2018). Tal como se puede apreciar en la Figura 3, antes la playa de Huanchaco presentaba un extenso terreno de arena y en la actualidad se nota la perdida de litoral del balneario (Bocanegra Garcia et al., 2020).

Figura 3

Antes y después de playa de Huanchaco

Nota. La imagen superior playa de Huanchaco con extenso terreno de arena en el año 2009. De "Impactos ambientales en la tira litoral de la costa por acción antrópica en la ciudad de Trujillo", por Bocanegra Garcia et al., 2020 (https://doi.org/10.29019/enfoqueute.655). La imagen inferior playa de Huanchaco en la actualidad, se puede apreciar la perdida de terreno y el afloramiento de rocas en su costa, año 2016. De "Huanchaco se queda sin arena a causa del puerto de Salaverry", por Correo, 2018 (https://n9.cl/92yuy).

Incluso también estos problemas se ven reflejados en la capital del Perú con intensos oleajes en las costas de Lima. Como lo menciona la Municipalidad de Miraflores en su página web, sobre la intensidad de las olas, que afectan las veredas y ciclovías y ponen en peligro las vidas de las personas en la costa verde (Municipalidad de Miraflores, 2019).

Una de las playas más afectadas por la erosión del mar en la capital del Perú es la playa la herradura, en el distrito de Chorrillos. Esta erosión ha ido afectando a la playa a través de los años. Por ejemplo, en los años 60 la cantidad de arena era abundante, tal como se puede observar en la Figura 4 de Redacción EC (2018). Sin embargo, esto no continuó ya que tal como se ve en la Figura 5 (Vinces, 2013), la playa ha perdido un gran terreno de arena, lo cual se evidencia al observar la distancia del hotel "Las Gaviotas" con respecto al mar. Por último, en la foto más actual podemos observar como el mar ya erosionó gran parte de la playa y se encuentra a escasos metros de la orilla y daña las estructuras aledañas, como se observa en la Figura 6 (Mendoza, 2018).

Figura 4

Amplia playa de arena en la herradura en los años 60

Nota. De "La Herradura en los años 60, cuando aún tenía arena", por Redacción EC, 2018 (https://n9.cl/e6m3w).

Figura 5

Erosión en la playa La herradura en el 2013

Nota. De "Colocarán rocas en 40 metros de playa La Herradura para proteger edificio Las Gaviotas", por Vinces, 2013 (https://n9.cl/2f2q4).

Figura 6

Daños en estructuras públicas en la playa La herradura

Nota. De "Chorrillos: La Herradura sufre el paso del tiempo y la indiferencia", por Mendoza, 2018 (https://n9.cl/naqkn).

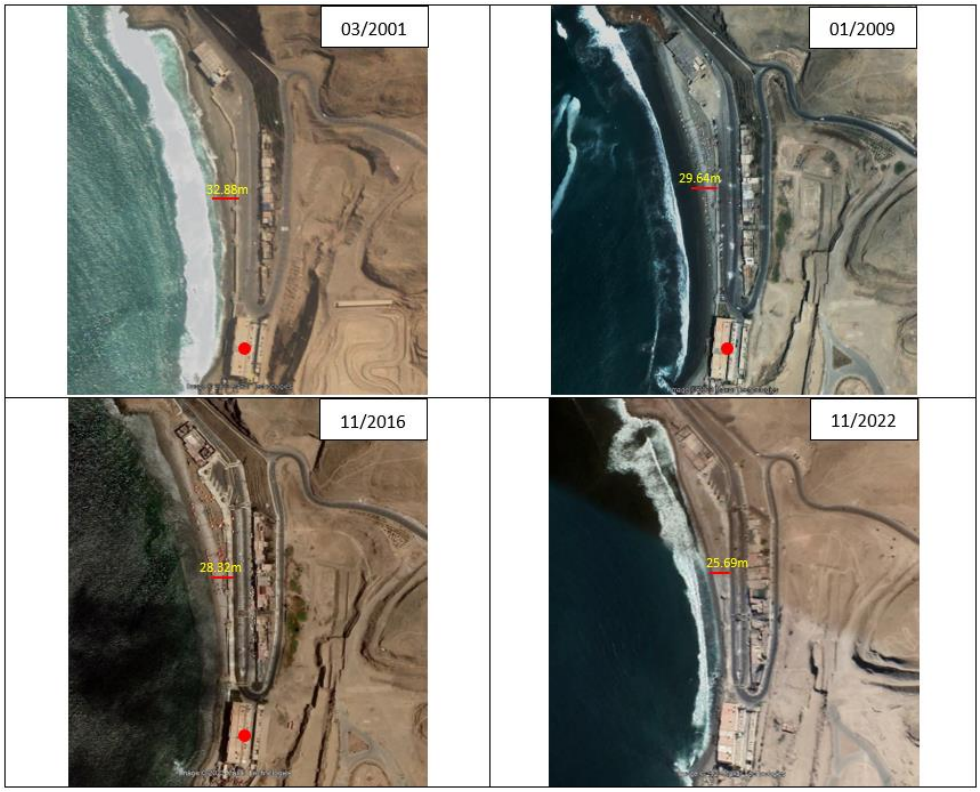
1.1 Justificación del Estudio

La playa la Herradura, ubicada en el distrito de Chorrillos, en los últimos años ha sido afectada por la erosión del mar por efecto del oleaje. Esto se ha evidenciado por la pérdida de terreno en la playa y los daños en las infraestructuras como veredas y ciclovías. Así como se mostró en la Figura 5. Además, mencionar que, la playa La Herradura en los años 60, era

una de las playas más exclusivas y concurridas de la clase acomodada de Lima por su gran playa y abundante arena, así como lo relata Orrego (2010). Estos cambios morfológicos se pueden apreciar en la Figura 7, donde se observa cómo el mar ha ido erosionando la playa, ocasionando que el mar se acerque cada vez más a la calzada y en el caso del hotel "Las gaviotas", marcado con un punto rojo, ya el mar se encuentra a escasos metros de la estructura.

Figura 7

Cuadro comparativo de playa La Herradura



Nota. Cuadro comparativo de imágenes satelitales de la playa La Herradura del año 2001, 2009, 2016 y 2002, en donde se evidencia con la línea roja la distancia del ancho de la playa que se ha reducido por la erosión del oleaje y con un punto rojo debajo el hotel Las Gaviotas. De "Playa La Herradura", por Google Earth Pro, s.f. (https://n9.cl/5oui5y).

Este trabajo busca desarrollar el diseño de un rompeolas que reduzca la erosión en la playa, con la finalidad de recuperar el terreno perdido, reducir daños en las infraestructuras y reestablecer las actividades recreativas propias del lugar. La construcción de una estructura marina es una opción viable al problema para recuperar la playa La herradura. Frente a las diversas propuestas realizadas en el lugar sin efecto positivo alguno, la mejor opción es un rompeolas para poder disipar la energía del oleaje y de esa manera proteger y recuperar la

playa. Al ganar terreno al mar, obtendrá un alto valor socioeconómico relacionado con la recreación y el turismo. Ello beneficiará a la municipalidad de Chorrillos, a los residentes del distrito y a los negocios ubicados en el lugar. Estos beneficios se darán gracias a la afluencia de veraneantes de Lima y provincias como en los años 60 de acuerdo con la Figura 8 (Llosa, 2012).

Figura 8

La Herradura con alta concurrencia de veraneantes

Nota. De "Playa La Herradura 1960", por Llosa, 2012 (https://n9.cl/ik9r2).

1.2 Formulación del problema

Por lo tanto, se propondrá un rompeolas convexo hacia el mar. Este diseño permitirá disipar la energía de las olas generando aguas más tranquilas, y a su vez incrementará el índice de asentamiento de arena en la playa por las características propias del rompeolas propuesto. Todo esto permitirá saber ¿Cómo se puede mejorar el diseño de un rompeolas para disminuir la altura de ola y reducir la erosión ocasionada por el oleaje en la playa la herradura?

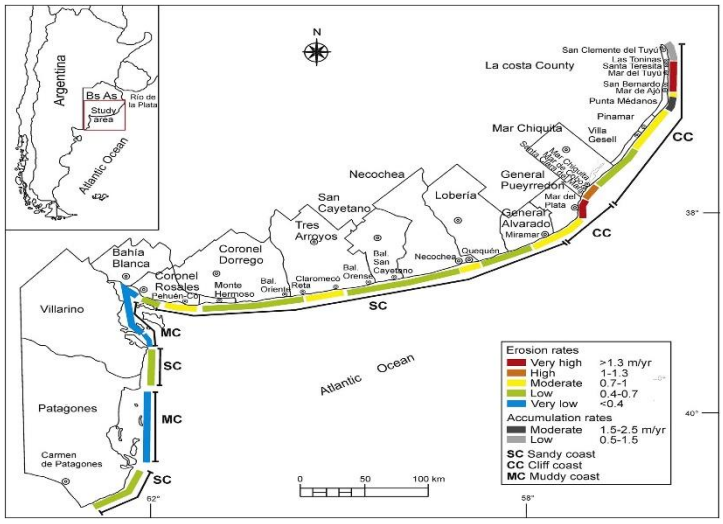
1.3 Estado del Arte

En primer lugar, la erosión costera afecta a diversos países, tal es el caso de la costa de Buenos Aires, en la cual la tasa de erosión se estimó a partir de fotografías satelitales de los años 1957, 1967, 1970, 1975, 1984, 1985 y 1989. A partir del 2009 se realizó por imágenes satelitales de Google Earth. Isla et al. (2018) determinaron que hay una tendencia de erosión moderada en la costa de Buenos Aires, obtuvo diferentes tasas de erosión en las playas. En la playa Mar Chiquita se obtuvo una tasa de erosión de 1,3 m/año, en las playas Partido de

la Costa y Pinamar se tiene 1 m/año, en Villa Gesell, General Alvarado, Arenas Verdes, Costa Bonita y el resto es de 0.5 m/año como se observa en la Figura 9. Esto debido al oleaje proveniente del sureste que tiene una altura de 1.3m y en ciertas partes de la costa alcanza altura de 2m, lo cual erosiona la playa en las tasas indicadas.

Figura 9

Erosión en la costa de Buenos Aires, Argentina



Nota. Tasas de erosión en la costa de buenos aires con valores de erosión en un rango de 1.3 a 0.4 m/año y acumulación de arena en un rango de 2.5 a 0.5 m/año. De "Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited", por Isla et al., 2018 (https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.008).

Un proyecto inconcluso por el gobierno argentino propuso la construcción de un sistema de 8 rompeolas separados, sin embargo, solo se construyeron 3 rompeolas y el tercero no se terminó por completo. No obstante, los resultados en la sedimentación de arena en la playa fueron positivos, obteniendo salientes y tómbolos, los cuales aumentaron el ancho de costa en la playa como se aprecia en la Figura 10.

Figura 10

Fotografía satelital de la playa de Buenos Aires en los años 1997, 2004, 2011 y 2012

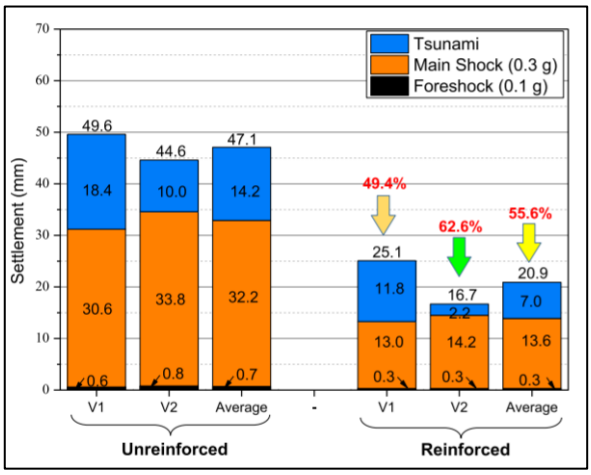
Nota. En la fotografía satelital se aprecia la playa de Buenos aires en los años 1997, 2004, 2011 y 2012. En la que, en el año 2011, se construye un rompeolas y para los años siguientes se genera sedimentación de arena. De "Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited", por Isla et al., 2018 (https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.008).

En segundo lugar, los rompeolas son estructuras marítimas cuya función principal es la de proteger las costas contra la erosión ocasionada por el oleaje, siendo su función principal el disipar la energía de las olas. Orimoloye et al. (2020) analizan la reflexión de las olas en pendientes permeables. Para lo cual presentaron una nueva fórmula mejorada del coeficiente de reflexión, que permitió reducir la cantidad de reflejos de las olas sobre la estructura. Los autores realizaron 823 pruebas experimentales en un laboratorio para examinar el rendimiento de la reflexión a través de los parámetros de ola lineal, la pendiente de la ola y el número adimensional de Iribarren. En cada prueba realizada se hizo el cálculo del coeficiente de reflexión. Obteniendo como resultado que los coeficientes de reflexión de las estructuras costeras están fuertemente influenciados por la pendiente de la estructura, las olas, la profundidad relativa del agua y batimetría. Además, hallaron que la menor cantidad de reflejo en las olas se da en pendientes suaves de 1:3. De igual manera el Perú al ser un país sísmico, se debe buscar que la estabilidad del rompeolas no se vea afectada por las ondas

de sismos. Debido a que no cumplirían su función correctamente. Para lo cual, Chaudhary et al. (2018), proponen un diseño más conservador para el rompeolas, en el cual se le reviste de distintos elementos para reforzarlo. Como, por ejemplo, el uso de geomembranas especiales, las cuales permitirán que el rompeolas no se fragmente demasiado al estar expuesto a cargas sísmicas. De igual manera, realizaron un ensayo en base a un rompeolas real para poder analizar mejor el comportamiento. Para el ensayo se fabricó un rompeolas a una escala mínima para poder simular las fuerzas del terremoto y tsunami. Los investigadores realizaron dos modelos, uno igual al real y otro modelo mejorado con gaviones, geomallas y tablaestacas, con el fin de observar las diferencias en el diseño. Para la simulación de las ondas sísmicas se usó una mesa de choques de cargas. Los ensayos demostraron que el nuevo diseño que se le dio al rompeolas permitió que se mejorará su resistencia ante las cargas sísmicas. Obteniéndose resultados favorables en el rompeolas de gaviones, tales como: 49.4% de mejora en la resistencia ante el desplazamiento ocasionado por tsunamis, 62.6% en la resistencia ante el primer impacto de fuerza del terremoto y un 55.6% ante cargas del oleaje y viento. Estos resultados se pueden observar en la Figura 11.

Figura 11

Asentamiento de rompeolas reforzada y no reforzada ante un terremoto y tsunami

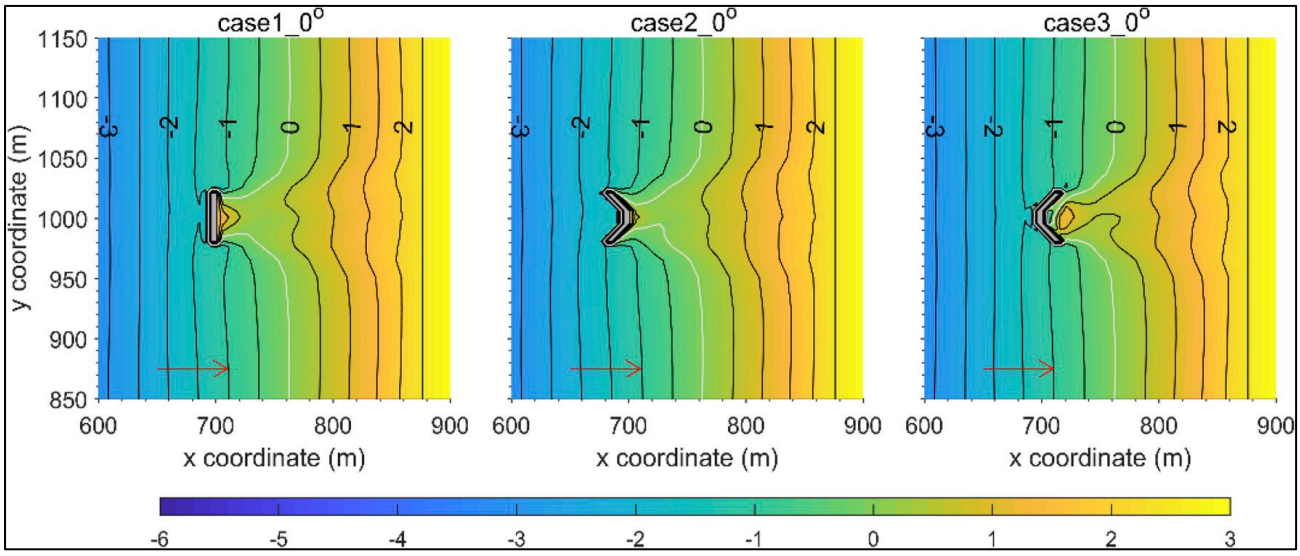


Nota. Asentamientos del cajón durante el terremoto y tsunami. ante una estructura no reforzada a la izquierda y una estructura reforzada a la derecha, se observa la disminución de asentamiento en cada ensayo. De "Geosynthetic-sheet pile reinforced foundation for mitigation of earthquake and tsunami induced damage of breakwater", por Chaudhary et al., 2018 (https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.011).

Por otro lado, la mejora del diseño del rompeolas para soportar cargas ocasionadas por la corriente sería una mejor opción. En segundo lugar, para el desarrollo de la investigación en la mejora del diseño del rompeolas es importante observar cómo es el impacto de este tipo de estructuras en las playas. Por un lado, se tiene a Fitri et al. (2019), quienes en su investigación evidenciaron la correcta función de los rompeolas en las costas; evitando de esta forma su erosión. También, demostraron que los sedimentos no cohesivos como la arena se depositan y permiten recuperar terreno para la generación de playa. Su estudio fue realizado en el bosque de manglares de la isla de Carey en Malasia. Los autores propusieron la construcción de un rompeolas de escombros de grandes dimensiones, el cual permitió que los sedimentos cohesivos no se transporten y ocurra una sedimentación gradual para la recuperación del manglar en el tiempo de 1 año. Los resultados de la sedimentación se pueden observar en la Figura 12. Por otro lado, se observa la respuesta de una playa frente a un rompeolas. Zhu et al. (2019) propusieron 3 diseños, los cuales fueron: horizontal, convexo hacia el mar y convexo hacia la playa. De igual manera, utilizaron estudios de otros autores para poder determinar una relación entre el largo del rompeolas y la separación con respecto a la playa. Ya que dependiendo de ello la sedimentación será diferente, siendo el objetivo principal la creación de un tómbolo de arena. El tiempo de ensayo fue de 180 días, el cual es el tiempo promedio de recuperación. Luego de realizar los ensayos en los 3 tipos de rompeolas en el programa Xbeach. Se obtuvo un volumen de sedimentación de 2038, 2632 y 2859 m^3 respectivamente. Por lo tanto, el rompeolas tipo convexo hacia el mar fue el que obtuvo el mejor resultado.

Figura 12

Simulación de batimetría resultante con rompeolas convexo en programa Xbeach



Nota. Batimetría resultante luego de 180 días de ensayo en simulación de programa Xbeach. Se puede observar como el rompeolas convexo hacia el mar posee la mayor cantidad de arena. De "Beach response to breakwater layouts of drainage pipe outlets during beach nourishment", por Zhu et al., 2019 (https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.011).

Por último, luego de la evaluación del diseño y el impacto de los rompeolas, se analiza este tipo de estructuras en software de simulación numérica. De esta forma el diseño será mejor desarrollado. Vieira et al. (2020) proponen 3 geometrías de estructuras de protección costera para el estudio: el arrecife artificial multifuncional, un rompeolas sumergido y un rompeolas emergente. Estas estructuras fueron simuladas en los softwares SWAN y Xbeach. En esta investigación los autores obtuvieron que las 3 estructuras estudiadas presentaron una gran influencia en la reducción de la altura de las olas y la energía. Sin embargo, el rompeolas separado emergido fue más eficiente en la reducción de olas significativas a mayor escala. También el rompeolas separado emergido mostró una sedimentación más notoria en la costa.

Hipótesis

La implementación de un rompeolas convexo con mejoras en su diseño morfológico reduce en un “40%” la altura de ola para disminuir la erosión en la playa la herradura, siendo más eficiente que los rompeolas tradicionales.

Objetivo General

- Realizar y evaluar el diseño de un rompeolas que permita la reducción de la altura de olas en un 40% para disminuir la erosión en la playa La playa La Herradura.

Objetivos Específicos

- Recolectar datos batimétricos característicos de la playa la herradura.
- Caracterizar el oleaje en la playa La Herradura.
- Realizar el diseño del rompeolas con los parámetros obtenidos en los estudios de la playa.
- Realizar la simulación numérica computacional especializado, mediante el software Delft-3D, para evaluar el comportamiento del rompeolas propuesto en la zona de estudio.
- Realizar la comparación de resultados obtenidos de la propuesta con rompeolas convencionales.

Limitaciones

- No se realizarán ensayos presenciales en la zona de estudio, solo se realizarán ensayos virtuales (software numérico computacional) debido a la situación de pandemia.
- No se estudiará la formación de nuevos hábitats generado por el rompeolas.
- No se incluye registros históricos ni antropológicos de la zona de estudio.
- No se evaluará el costo de construcción del rompeolas.
- No se realizará un estudio del potencial turístico y sociocultural de la playa.
- No se realizará el proceso constructivo.

Descripción del Contenido

- El 1er capítulo contiene el marco teórico, en el cual colocamos los principales conceptos para poder entender la base de este estudio.
- En el 2do capítulo contiene la metodología, en el cual se demarca el nivel y diseño de la investigación junto al procedimiento que se seguirá para cumplir los objetivos.
- El 3er capítulo muestra las fuentes de datos de donde se extrajo la información para determinar los parámetros de diseño del rompeolas.
- En el 4to capítulo se realizó la caracterización del oleaje con los datos adquiridos anteriormente. Así como los cálculos en las condiciones predominante y máxima del oleaje.
- El 5to capítulo el diseño del rompeolas realizado en base a los parámetros obtenidos de la zona de estudio y cálculos realizados con los mismos.
- En el 6to capítulo se elabora la simulación en un software para evaluar el comportamiento del rompeolas propuesto. Asimismo, se verifica que funcione correctamente.
- El 7mo capítulo contiene la comparación de los resultados del rompeolas propuesto con resultados de rompeolas convencionales para evaluar el porcentaje de reducción de la erosión.

2 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

2.1 OCEANOGRAFÍA

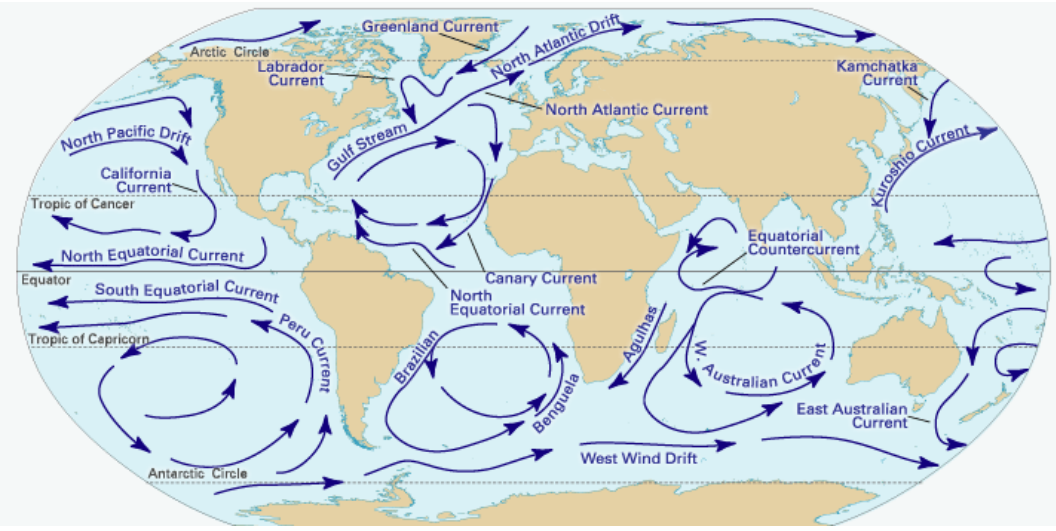
2.1.1 CORRIENTES OCEÁNICAS

Las corrientes marinas están constantemente en movimiento, están "formadas por componentes horizontales y verticales del sistema de circulación de las aguas oceánicas que se produce por la gravedad, la fricción del viento y la variación de la densidad del agua en diferentes partes del océano" (Decología, 2023, párr. 1). Las corrientes marinas se pueden clasificar en 2 tipos:

- Corrientes superficiales: Estas corrientes constituyen el 10% de las aguas del océano y se generan por efecto del viento, por la distribución de los continentes y por la rotación de la Tierra. Estos se mueven en el sentido del reloj en el hemisferio norte, y en el hemisferio sur de manera contraria (Cenedese & Gordon, 2018). Estas corrientes superficiales pueden ser de gran tamaño como se observa en la Figura 13.

Figura 13

Dirección de las corrientes superficiales más importantes



Nota. De "Ocean Current", por Cenedese & Gordon, 2018 (https://www.britannica.com/science/ocean-current).

- Corrientes profundas: Estas corrientes constituyen el 90% del agua de océano. Estas corrientes se forman donde la temperatura es baja y la salinidad es relativamente alta (Cenedese & Gordon, 2018).

Los efectos de las corrientes en las obras de protección costera o marítimas son importantes para el diseño y desarrollo de estas. Ya que, al determinar el sentido en el que circulan, podrán favorecer en la acreción de sedimentos en la playa.

2.1.2 OLEAJES

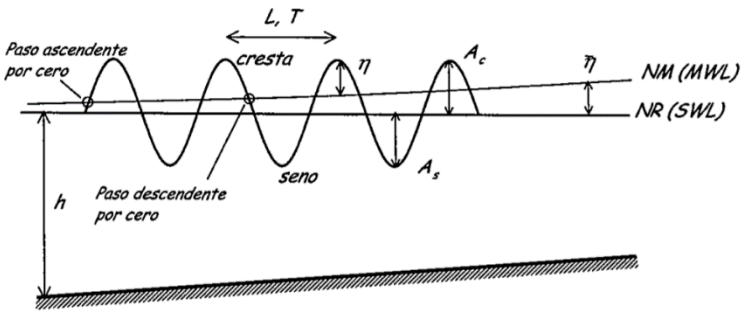
Son ondulaciones producidas en la superficie marina causadas por el viento y mareas. Las cuales se propagan hasta llegar a las costas.

2.1.2.1 COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA OLA

Las partes de una ola se pueden aprecian en la Figura 14 que se muestra a continuación:

Figura 14

Parámetros asociados a la onda



Nota. De "Dinámicas", por Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2000 (https://n9.cl/2y3bea).

Las definiciones de los parámetros representados en la Figura 14 se detallan a continuación:

- Cresta: convexidad hacia la superficie que se alza sobre el nivel de reposo del mar.
- Seno: concavidad por debajo del nivel medio del mar.
- Longitud de onda (L): distancia entre dos crestas o dos senos consecutivos.

- Altura de ola (H): diferencia de altura entre cresta y seno consecutivos.
- Período (T): tiempo transcurrido entre el paso de dos crestas o dos senos consecutivos.
- Celeridad (C): es la velocidad de propagación de la ola = L/T.
- Profundidad (h): distancia vertical entre el lecho del océano y la superficie del mar en reposo.
- Nivel de Reposo (N.R.): nivel del mar antes de iniciarse el movimiento.
- Nivel Medio (N.M.): línea horizontal equidistante entre senos y crestas.
- Sobreelevación (η): Diferencia de altura entre N.M. y N.R (Hurtado Reátegui & García Cavero, 2016, p. 16).

2.1.2.2 ALTURA DE OLA

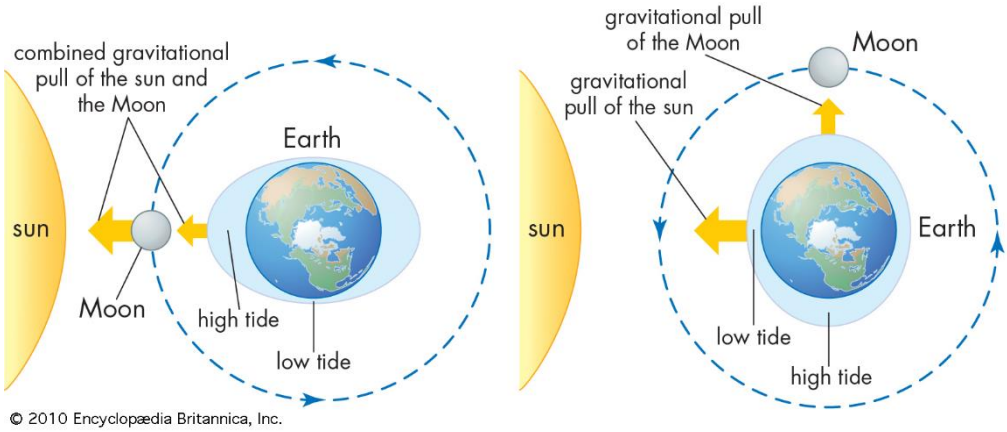
La altura de ola es obtenida a través de un registro de datos en un rango de tiempo determinado (años), los cuales son obtenidos cada 6 horas. Por ello se requiere un análisis de la zona generadora de oleaje. Con la cual se obtendrá la altura de oleaje para el diseño.

2.1.3 MAREAS

Según Tricker et al. (2020), son movimientos periódicos del agua del océano que consiste en ascensos y descensos del nivel del mar. Estos movimientos son causados por las fuerzas de tracción que ejercen la luna y el sol sobre La Tierra. Ello genera mareas más altas y bajas de lo habitual de acuerdo a la Figura 15. Cuando la marea es alta recibe el nombre de pleamar y cuando la marea desciende se denomina bajamar.

Figura 15

Pleamar (high tide) y bajamar (low tide) por las fuerzas de tracción del sol y la luna



Nota. De "Tide", por Tricker et al., 2020 (https://www.britannica.com/science/tide).

2.1.4 SEDIMENTOS

Los sedimentos son materiales sólidos que son depositados en la superficie terrestre, los cuales pueden permanecer en el lugar por un prolongado tiempo. Este material sólido, son los que constituyen las playas (Universidad Católica de Chile, 2015). La erosión constante o pérdida de este material, en nuestro caso la pérdida de arena ocasiona que las playas se deterioren, retrocedan y pierdan el efecto amortiguador, ello pone en riesgo a las viviendas o infraestructuras ubicadas en el lugar.

2.1.4.1 TIPOS DE SEDIMENTOS EN LAS PLAYAS

Los sedimentos o materiales sólidos que constituyen las playas pueden ser diferentes tipos. Además, los tipos de sedimentos existentes y su granulometría están altamente relacionados a la pendiente de la playa (Universidad Católica de Chile, 2015). En la Tabla 1 se presenta la pendiente promedio de las playas según su granulometría.

Tabla 1

Granulometría y pendiente promedio de las playas

Granulometría	**Pendiente de la playa**
Canto Rodado	24°
Grava gruesa	17°
Gravilla	11°
Arena muy gruesa	9°
Arena gruesa	7°
Arena media	5°
Arena fina	3°
Arena muy fina	1°

Nota. Adaptada de "Coastline Changes: A Global Review" por Bird, 1985 (https://doi.org/10.1002/gj.3350210215).

2.1.4.2 MODELOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Al tener la descripción hidrodinámica de la zona de estudio para la investigación, será importante determinar el transporte de sedimentos tanto en suspensión y por el lecho marino. Para ello, existen diversos modelos, para realizar un modelamiento 3-D, uno de los modelos propone trabajar bajo la hipótesis de que el sedimento viaja a la velocidad del fluido como lo propone Losada et al. (1995). De lo cual se obtiene la siguiente fórmula:

$$Q_{si} = \int_{z=0}^{h} u_i(z)C(z)dz$$

“Donde Q es la tasa local de transporte de sedimentos en la dirección i, ui el perfil local de velocidades en la dirección i y C(z) representa el perfil vertical de variación de la concentración del sedimento” (Losada et al., 1995). Sin embargo, “el método es complicado, ya que se debe de tener en cuenta factores como la capa límite en el fondo, tensión tangencial en el fondo inducida por la interacción ola-corriente o los efectos turbulentos generados por la rotura” (Losada et al., 1995).

Para modelos 2-DH, se puede determinar la tasa de transporte de sedimentos mediante fórmulas que sean función de una velocidad representativa de las corrientes, la cual se puede estimar mediante la formulación de (Kraus et al., 1982, como se cita en Losada et al., 1995):

$$Q = 0.024 H_b^2 V$$

Donde Q es la tasa de transporte de sedimentos en m^3/año, Hb la altura de ola significante en rotura y V la velocidad de la corriente longitudinal (Losada et al., 1995).

Otra fórmula que se podría aplicar es la de Kamphuis (1992):

$$Q = K H_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b)$$

Donde Tp es el periodo de pico, m la pendiente de la playa en la zona de rompientes, D50 el diámetro medio del material en la playa y K un factor según el tipo de material (Losada et al., 1995).

2.1.5 NIVEL DE MAR

Es importante conocer el nivel del mar, ya que de ella depende el diseño de una estructura marítima o de protección costera y la estabilización de las playas. Además, el nivel del mar determina las zonas críticas de las estructuras debido a la concentración de fuerzas por acción del oleaje. El nivel de mar es un factor importante para reforzar una estructura marítima (Paola & Sotomayor, 2019).

2.2 REFRACCIÓN, DIFRACCIÓN Y REFLEXIÓN DEL OLEAJE

Las olas al extenderse por la superficie del mar, va sufriendo alteraciones por efecto del fondo o por el impedimento de obstáculos en la continuidad de su recorrido. La deformación por efecto del fondo origina la refracción y la deformación por un obstáculo genera difracción y reflexión (Paola & Sotomayor, 2019).

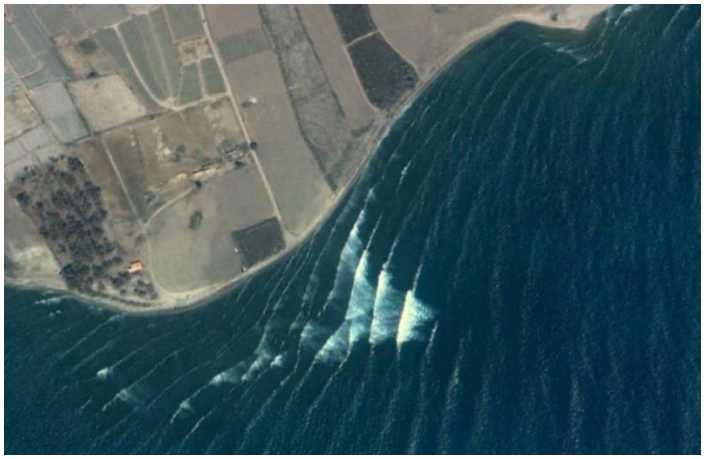
Al diseñar un rompeolas no solo se debe considerar el oleaje de diseño del que se tiene antes de construir la estructura. Se debe considerar el oleaje total que actuará considerando también la generada por la construcción de esta.

2.2.1 REFRACCIÓN

El fenómeno de la refracción se observa por el cambio en la dirección de la propagación de las olas al aproximarse a la costa. Esto es causado por cambios en la batimetría, las corrientes marinas o por cualquier otro fenómeno, el cual genere que una parte de una ola se propague más rápido o lento que en toda la extensión de la propia ola. Esto ocurre cuando la ola se acerca a la costa, la profundidad disminuye y el fondo marino empieza a afectar al movimiento de las partículas de agua, debido a la resistencia del fondo marino. Ello ocasiona la reducción de la velocidad de propagación y en la longitud de la ola (Hurtado Reátegui & García Cavero, 2016), tal como se pueda apreciar en la Figura 16.

Figura 16

Refracción de ola al llegar a la costa en Villaricos España



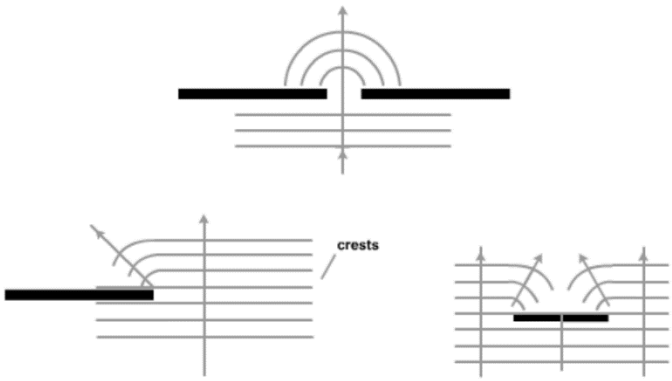
Nota. De "Villaricos, España", por Google Earth Pro, 2002 (https://n9.cl/z0nqw).

2.2.2 DIFRACCIÓN

Es el fenómeno que ocurre por la transferencia lateral de energía a lo largo de la línea de cresta, cuando la ola es interrumpida por algún obstáculo como un rompeolas, islas o algún otro tipo de barrera. La interrupción de un rompeolas al avance de las olas genera la transmisión de energía, es decir, genera y permite la propagación de las olas dentro de la zona protegida por el rompeolas en la Figura 16 (Hurtado Reátegui & García Cavero, 2016). De igual manera se puede observar esta difracción en Sitges, Barcelona como lo muestra la Figura 17 y Figura 18.

Figura 17

Difracción de ola al impacto con un obstáculo



Nota. De "Difraction", por Hristokaragiozov, 2016 (https://n9.cl/i07n9).

Figura 18

Difracción de ola en Sitges, Barcelona

Nota. De “Difraction”, por Hristokaragiozov, 2016 (https://n9.cl/i07n9).

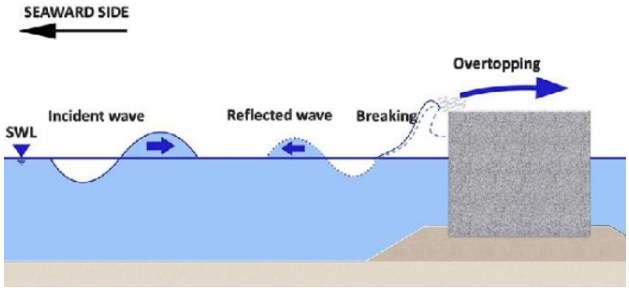
2.2.3 REFLEXIÓN

La ola incidente al impactar contra una barrera reflejará toda o parte de su energía de acuerdo con las características o condiciones del obstáculo. El ángulo de reflexión tiene el mismo valor que el ángulo de incidencia (Hurtado Reátegui & García Cavero, 2016).

- Estructuras verticales: Ocurre la reflexión total en la dirección diferente a la ola incidente como se muestra en la Figura 19.
- Estructuras porosas o fondo rugoso: La energía de la ola incidente es disipada.
- Estructuras como diques: Transmisión parcial de la energía como se observa en la Figura 20, en donde se ve el impacto de una ola en el malecón.

Figura 19

Reflexión de ola ante un obstáculo



Nota. De "Review of Innovative Harbor Breakwaters for Wave-Energy Conversion", por Vicinanza et al., 2019 (https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000519).

Figura 20

Reflexión de ola generada por el impacto con el malecón

Nota. De "Olas reflejándose en un malecón", por Glessmer, 2017 (https://n9.cl/8qntq).

2.3 ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA

Las obras de protección costera o estructuras marítimas tienen como finalidad reducir el impacto de las olas, las mareas o las tormentas. De esa manera, generar aguas más tranquilas y proteger las costas y puertos. Entre las estructuras más comunes de protección costera tenemos a los malecones, espigones, embarcaderos, muros verticales, rompeolas convencionales, rompeolas desvinculados, rompeolas sumergido, entre otros. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de diversos tipos de estructuras marítimas con sus objetivos y sus funciones principales (United States Army Corps of Engineers [USACE], 2011).

Tabla 2

Tipos de estructuras de proyección costera con objetivos y su función principal

Tipo de Estructuras	**Objetivo**	**Función Principal**
Dique	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas costeras bajas.	Separación de la costa del interior por una estructura de alta impermeabilidad.
Muro vertical	Proteger tierra y estructuras contra inundaciones y rebase.	Refuerzo de parte del perfil de playa.
Revestimiento	Proteger la línea de costa contra erosiones.	Refuerzo de parte del perfil de playa.
Malecón de retención	Retener suelo y evitar deslizamiento de tierra al mar.	Refuerzo y relleno del banco de tierra costero
Espigón	Prevenir erosión playera.	Reducción de transporte longitudinal a la playa.
Rompeolas separados	Prevenir erosión playera.	Reducción de la altura de las olas a sotavento de la estructura y reducción del transporte litoral de sedimentos.
Dique sumergido	Prevenir la erosión de las playas	Retardar el movimiento de sedimentos en alta mar
Rompeolas	Proteger puertos y obras de toma contra oleaje y corrientes.	Disipación de energía de oleaje hacia mar adentro
Rompeolas flotante	Proteger puertos contra oleaje y corrientes.	Reducción de la altura de las olas por reflexión y atenuación.

Nota. De “Coastal Engineering Manual, Part VI”, USACE, 2011 (https://n9.cl/1jx1w).

2.3.1 TIPOS DE ESTRUCTURAS

A continuación, se detallará las características de las estructuras más usadas como protección de costas ante la acción del oleaje:

2.3.1.1 MUROS VERTICALES

Los muros verticales son estructuras cuyo objetico principal es proteger de desbordamientos e inundaciones al terreno y las estructuras que se encuentren detrás de ellas. Esto debido a las mareas ciclónicas y las olas. Estas estructuras se construyen paralelo a la costa como refuerzo del perfil costero. Usualmente, estas estructuras son usadas para proteger carreteras y casas ubicadas frente al mar con fuerte oleaje y posibles inundaciones (USACE, 2011).

2.3.1.2 ESPIGÓN

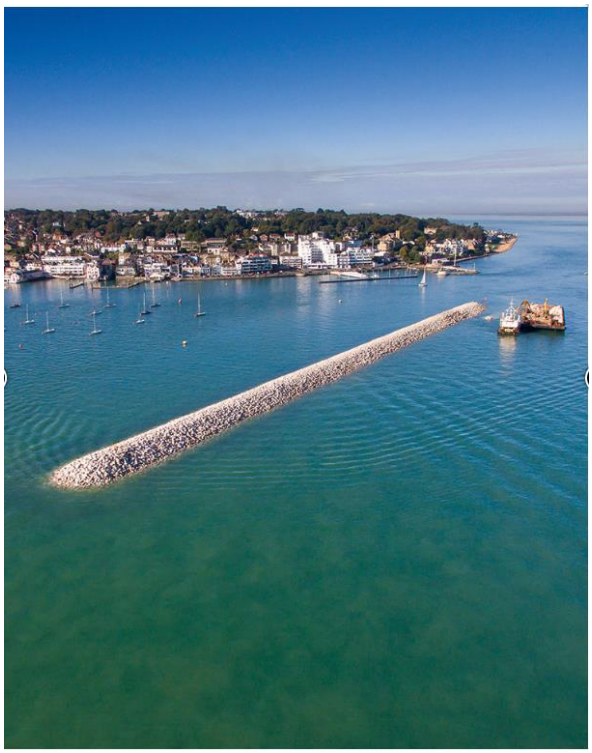
Los espigones son estructuras cuyo objetivo principal es la de prevenir la erosión de la playa. Estas estructuras se construyen para estabilizar un tramo de playa nutrida o artificialmente contra la erosión, la cual se debe principalmente a una pérdida de material de playa en el litoral costero. Los espigones son estructuras estrechas, por lo general son recta y perpendicular al litoral costero. El efecto generado por la instalación de un solo espigón es la acumulación de material de playa por el lado ascendente de la corriente y la erosión del material por el lado descendente de la corriente (USACE, 2011).

2.3.1.3 ROMPEOLAS RECTO O CONVENCIONAL

Los rompeolas convencionales se construyen en su mayoría para proteger puertos, ya que estas estructuras tranquilizan las aguas para poder realizar las operaciones seguras de amarre y carga, manejo de barcos y protección de las instalaciones portuarias como se aprecia en la Figura 21. Además, estas estructuras se construyen para ayudar a regular la sedimentación dirigiendo las corrientes y creando áreas con diferentes niveles de perturbación de olas. Otras aplicaciones del rompeolas es la protección de las tomas de agua para las centrales eléctricas y la protección de las costas contra las olas de los tsunamis (USACE, 2011).

Figura 21

Rompeolas convencional protegiendo puertos de la ciudad de Cowes, Inglaterra



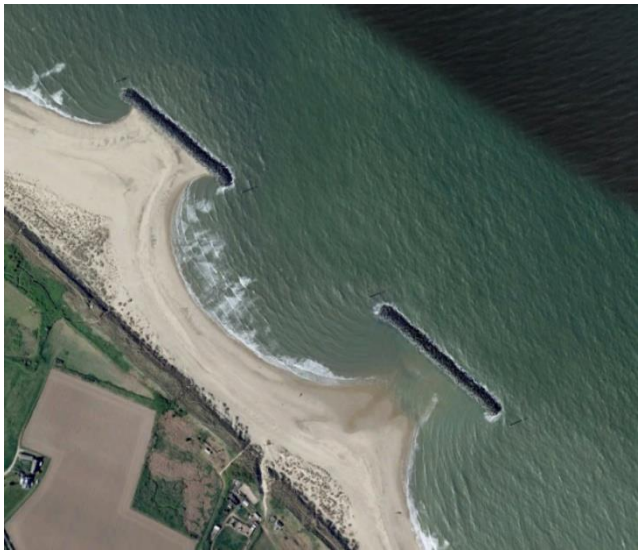
Nota. De "Improving coastal protection" por World Ocean Review, 2017 (https://n9.cl/wvdmd).

2.3.1.4 ROMPEOLAS EXENTOS

Los rompeolas separados son rompeolas pequeños, relativamente cortos y no están conectados a la costa. El objetivo principal de esta estructura es prevenir la erosión de la playa. Esta estructura marítima se construye paralelamente a la costa en aguas poco profundas. Cada rompeolas separado refleja y disipa parte de la energía de las olas entrantes, lo que permite la reducción de la altura de las olas a sotavento de la estructura, y a su vez, la reducción de la erosión de la costa. El material que es transportado por toda la playa se mueve hacia la zona de aguas tranquilas o protegidas por el rompeolas, donde es depositado debido a la baja energía de las olas. La ola cerca de la costa, el cual está influenciado por la difracción en las cabezas de las estructuras, generará que se formen salientes y, en algunas situaciones, tómbolos como en la Figura 22 (USACE, 2011).

Figura 22

Playa de Happisburh, Norfolk, Inglaterra



Nota. Formación de tómbolos por la implementación de rompeolas exentos en Happisburgh, Norfolk, Inglaterra. De "Playa de Happisburh, Norfolk, Inglaterra", por Google Earth Pro, 2021 (https://n9.cl/qigx0).

2.3.2 FORMAS DE ROMPEOLAS

Pueden existir diversas formas de rompeolas, sin embargo, en esta sección solo se detallarán 2 tipos: el rompeolas recto convencional y el rompeolas convexo.

- ROMPEOLAS RECTO. - Es el rompeolas más usado, ya que cumple con la función de reducir o disipar la energía de las olas con el objetivo de proteger las playas o puertos.

- ROMPEOLAS CONVEXO. – Este rompeolas, como su nombre lo dice, mantiene una forma convexa. La forma de este rompeolas, convexo hacia el mar, logra una mejor sedimentación que el rompeolas recto convencional, así como lo muestra (Zhu et al., 2019).

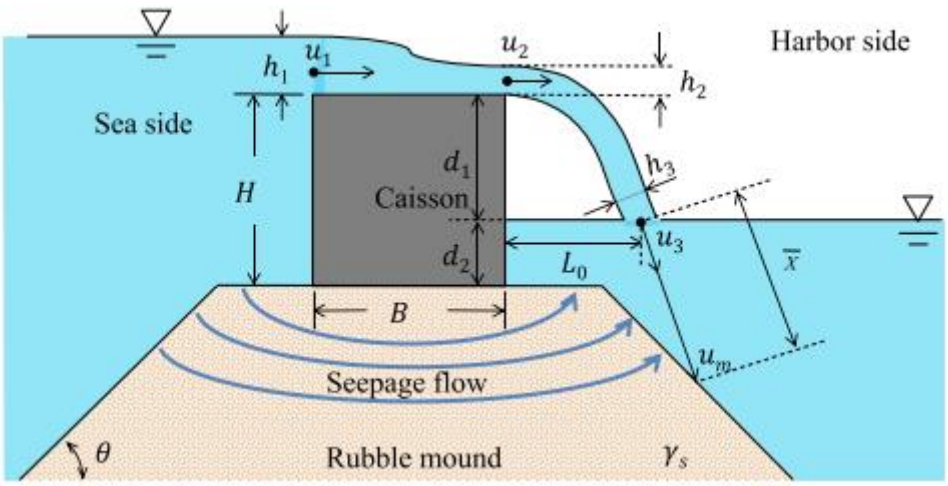
2.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Para el diseño de un rompeolas es importante contar con la estabilidad que esta tendrá. Uno de los factores determinantes para la estabilidad es el peso de los materiales del manto principal, y con un talud determinado puede resistir las solicitaciones del oleaje

contra la estructura. Por lo que, para un diseño óptimo es necesario determinar el peso ideal de la estructura junto a un talud determinado a fin de lograr la estabilidad hidrodinámica de la estructura frente a la acción del oleaje (Vidal et al., 1994). Además, se considera en el diseño la estabilidad del rompeolas ante efectos de un tsunami para que no ocurra desbordamientos, tal como se aprecia en la Figura 23.

Figura 23

Desbordamiento y filtración generados durante un tsunami



Nota. De "Instability evaluation of rubble mound for breakwaters subjected to tsunami-induced overflow and seepage flow", por Kasama et al., 2020 (https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.006).

2.5 DISEÑO FUNCIONAL

Para realizar el diseño de un rompeolas influyen diversos factores que determinan sus características. Entre los factores que influyen se encuentran las condiciones climatológicas, condiciones oceanográficas como las corrientes, mareas, oleaje, batimetría, sedimentos. De estas condiciones mencionadas, las más importantes son las condiciones de oleaje y las de sedimentación, ya que estas determinaran las características básicas del rompeolas a diseñar (Paola & Sotomayor, 2019).

Además, para el diseño de un rompeolas deberán emplearse diversas fórmulas para determinar el peso ideal de la estructura para lograr la estabilidad de la estructura. Actualmente, existen diversos softwares para la simulación de estructuras marítimas, los cuales podrán ser de aporte en la investigación para un diseño más eficiente.

2.6 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

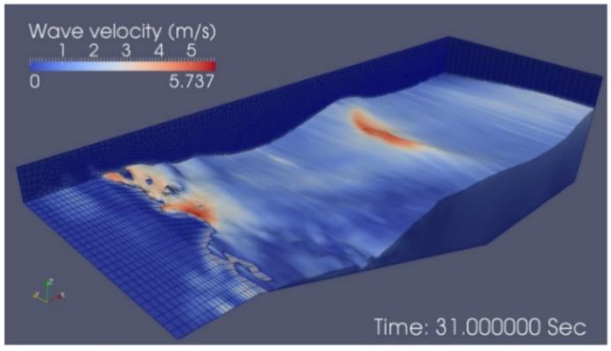
En la actualidad existen diversos softwares de simulación para el modelamiento oceánica y de estructuras de protección costera. Estos softwares son herramientas que ayudan a realizar estudios hidrodinámicos y morfodinámicos. A continuación, se presentarán algunos de estos softwares y sus principales funcionalidades.

2.6.1 OpenFOAM:

Es un software diseñado para la simulación informática de dinámicas de flujo (CFD) como se ve en la Figura 24. Este software cuenta con una gran librería asociado al flujo de fluidos en canales y tuberías. Su facilidad de uso permite presentar fenómenos como la mezcla de efluentes con agua de ríos y reservorios, las plumas de emisiones en aire, descarga de emisores submarinos, cálculos de erosión de ríos, entre otros (Montoya, 2015)

Figura 24

Simulación de ola en 3D mediante OpenFOAM



Nota. De "Los 5 mejores softwares para modelamiento oceánico", por Montoya, 2015 (https://n9.cl/nbzc1).

2.6.2 DELFT 3D:

Es un software de código abierto. El cual permite realizar estudios de hidrodinámica, transporte de sedimentos, morfología y calidad de agua para ambientes fluviales, de estuarios y costeros, obteniendo resultados como el de la Figura 25. Delft 3D consiste en 3 módulos:

- Flujo (FLOW). - Es un programa multidimensional (2D-3D) que realiza la simulación hidrodinámica en la que calcula el flujo no constante y el fenómeno de transporte resultante de las mareas y variables meteorológicas (Montoya, 2015).

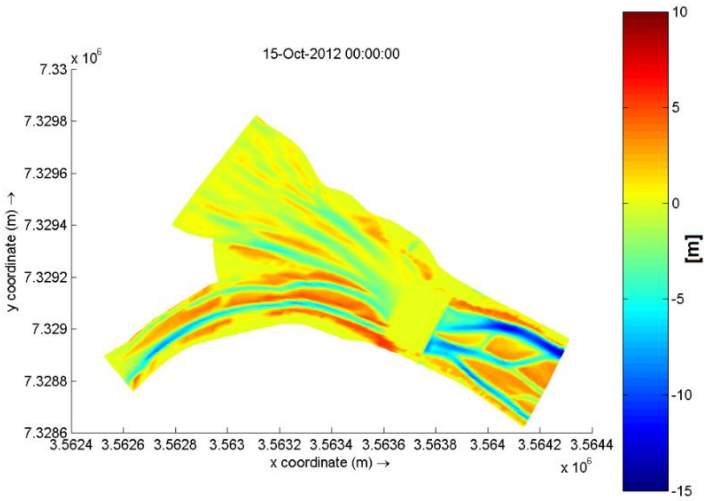
- Morfología (MOR). – Se enfoca en el transporte de sedimentos, en el cambio morfológico. El sistema trabaja con las corrientes y olas como fuerzas condicionantes. Además, contiene una amplia variedad de fórmulas para el transporte de sedimentos (Montoya, 2015).

- Olas (WAVE). – Permite generar el oleaje espectral por efecto de la acción del viento y la propagación del oleaje hacia la costa (Montoya, 2015).

Además, el módulo MOR permite la dinámica y retroalimentación con los módulos FLOW y WAVE. Esto permite que los flujos y olas se ajusten a la batimetría de la zona de estudio, y generar la simulación en cualquier escala de tiempo desde días a años.

Figura 25

Erosión y sedimentación mediante DELFT-3D



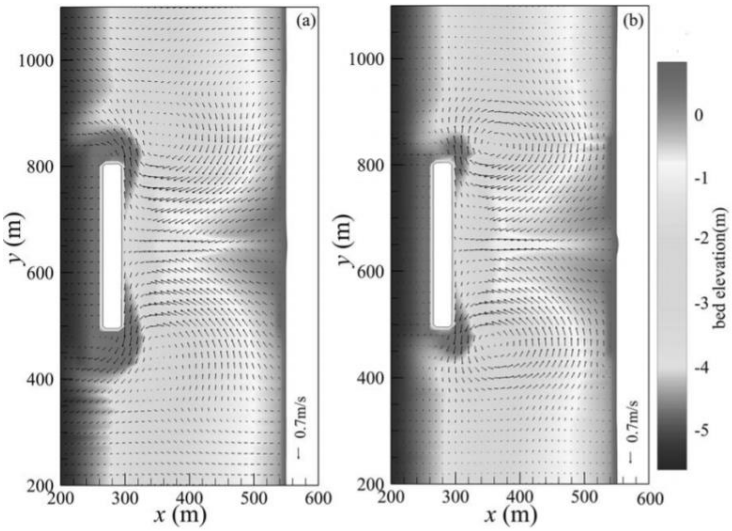
De "Aplicaciones del Modelo Numérico Delft3D a Diferentes Problemas Hidrosedimentológicos en Casos Argentinos", por Gyssels et al., 2013 (https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4517).

2.6.3 XBEACH:

Es un modelo bidimensional para la propagación de olas, flujo medio, transporte de sedimentos y cambios morfológicos del área cercana a la costa, playas, dunas y barreras traseras durante tormentas. Este modelo es de dominio público y ofrece resultados como los que se observan en la Figura 26, en donde se observa el campo de flujo de olas.

Figura 26

Simulación de rompeolas en el software Xbeach



Nota. Batimetrías calculadas y campo de flujo con difracción (a) y sin difracción (b) mediante el software Xbeach. De "Including Wave Diffraction in XBeach: Model Extension and Validation.", por Fang et al., 2020 (https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-19-00015.1).

La diferencia entre los 3 softwares mencionados se puede observar en la Tabla 3, donde se aprecia la función principal que realiza cada uno de ellos.

Tabla 3

Diferencia funcional de software numérico computacional para modelamiento de oleaje

OpenFoam	Deft-3D	Xbeach
Software de simulación de dinámica de flujo.	Software de hidrodinámica compuesto por 3 módulos: - FLOW: Estudia la dinámica de flujo. - MOR: Se enfoca en el cambio morfológico - WAVE: Se enfoca en el estudio de las olas y su propagación hacia las costas.	Software que estudia la dinámica del flujo, los cambios morfológicos y propagación de olas.

3 CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La siguiente investigación consiste en diseñar un rompeolas exento y convexo, este rompeolas tendrá como función disipar los fuertes oleajes y permitir la acreción de sedimentos en la playa.

3.1 NIVEL DE INVESTIGACIÓN:

Por un lado, el nivel de investigación es descriptivo, debido a que se detalla el problema junto con las características que presenta la zona de estudio para luego proceder con la experimentación. Por otro lado, es explicativo, ya que trata sobre un diseño de rompeolas que tendrá como resultado principal restaurar la playa, a partir de la sedimentación en la costa.

3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación es experimental, ya que se considerarán variables y se recabarán información de datos batimétricos y de oleaje, los cuales serán simulados a través de un software con la finalidad de desarrollar un diseño óptimo que dé solución al problema.

3.3 PROCEDIMIENTO

3.3.1 RECOLECTAR DATOS BATIMÉTRICOS CARACTERÍSTICOS DE LA PLAYA LA HERRADURA.

- Se solicitaron los datos de batimetría y topografía a entidades como la Autoridad Portuaria Nacional y a La Marina de Guerra del Perú para conocer las características de la playa.
- Se realizó una visita de campo a la zona de estudio para observar y tomar evidencia del estado actual de la playa La Herradura mediante fotografías.
- Se definió los parámetros batimétricos de la zona de estudio con las cartas náuticas solicitadas a la Dirección de Hidrografía y Navegación de La Marina de Guerra del Perú. Las cuales fueron de gran importancia, ya que permitieron entender mejor la batimetría de la zona de estudio.

3.3.2 CARACTERIZAR EL OLEAJE EN LA PLAYA LA HERRADURA.

- Se realizó el cálculo de condiciones predominantes y máximas aguas adentro, con el cual obtenemos la altura, dirección y periodo del oleaje con el software Delft3D. Asimismo, saber cuál es la zona con la mayor concurrencia de olas.
- Se realizó el cálculo de condiciones predominantes y máximas en la playa La Herradura con el software Delft3D, con el cual se obtuvo la caracterización del oleaje en la costa de la playa que se representaron en un plano realizado en ArcGIS.
- Se realizó el cálculo de la zona de rompiente en la playa La Herradura, con el software Delft3D, para luego ser representadas en Google Earth con el objetivo de observar el comportamiento del oleaje en la playa.

3.3.3 REALIZAR EL DISEÑO DEL ROMPEOLAS CON LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN LOS ESTUDIOS DE LA PLAYA.

- Luego de caracterizar el oleaje de la playa, se recopiló los datos y parámetros obtenidos de la zona de estudio, los cuales se ordenará en un cuadro para un mejor manejo de la información.
- Se elaboró el diseño del rompeolas, a partir de la información recopilada de la caracterización del oleaje.
- Después de elaborar el diseño del rompeolas, se realizó un informe final con los resultados del diseño.

3.3.4 REALIZAR LA SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL ESPECIALIZADO, MEDIANTE EL SOFTWARE DELFT-3D, PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DEL ROMPEOLAS PROPUESTO EN LA ZONA DE ESTUDIO.

- Con el diseño del rompeolas obtenido, se procedió a modelarlo en el software de código abierto Delft-3D, con el cual se evaluó el comportamiento del rompeolas a través de un rango de tiempo.
- Se verificó que el diseño del rompeolas modelado en el software cumpla con los requerimientos y logre la sedimentación en la costa.
- Se realizaron las correcciones y mejoras necesarias en el software del diseño propuesto.

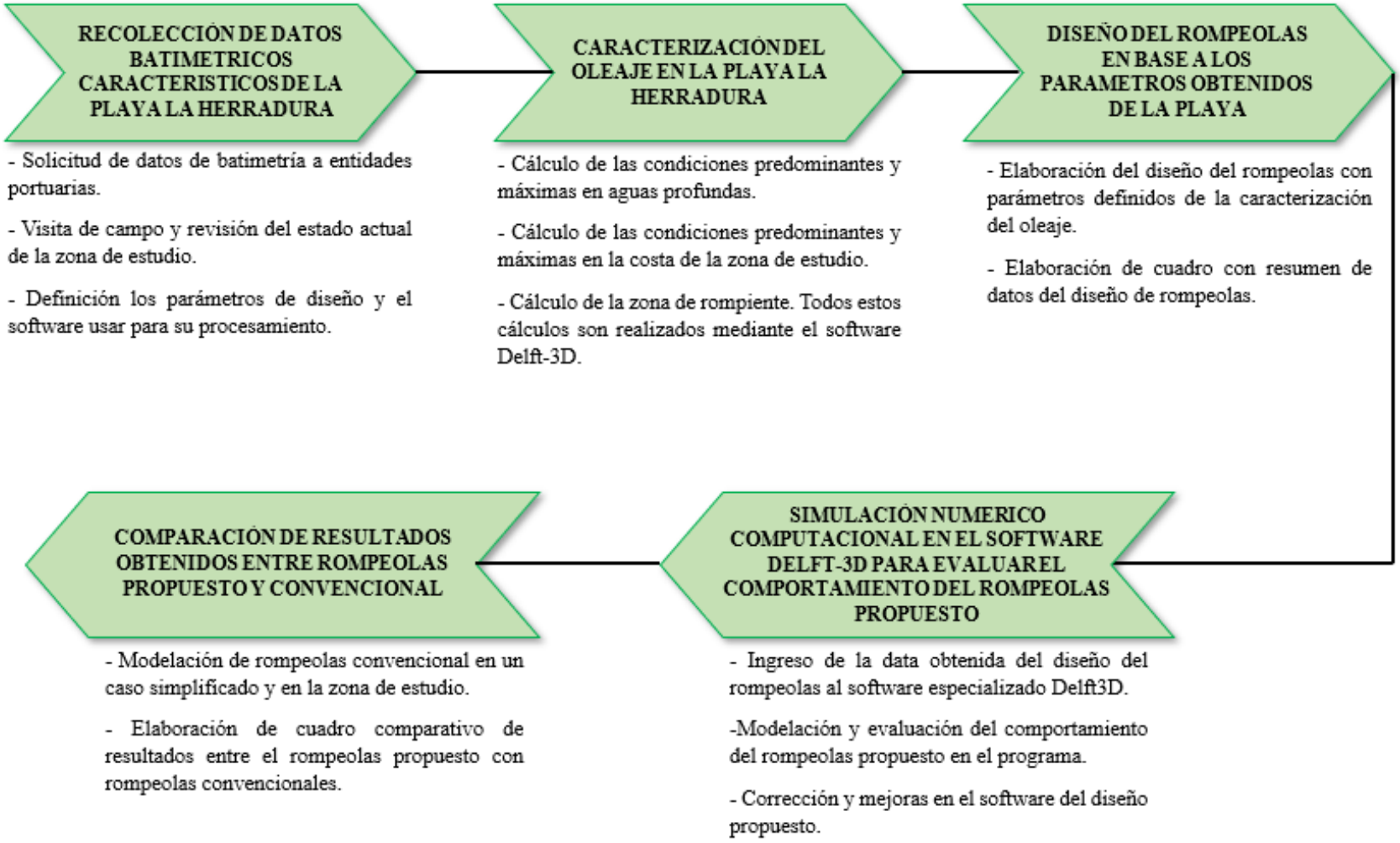
3.3.5 REALIZAR LA COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PROPUESTA CON ROMPEOLAS CONVENCIONALES.

- Se realizó la modelación de un rompeolas convencional en la zona de estudio y se elaboró un cuadro de resumen de los resultados obtenidos.
- Se realizó una modelación de rompeolas convencional y rompeolas propuesto en un caso simplificado.
- Se comparó los resultados obtenidos del rompeolas propuesto con los datos de los rompeolas convencionales para poder evaluar si la mejora logro cumplir la hipótesis planteada.

El procedimiento mostrado se puede observar en la siguiente Figura 27 como un diagrama de flujo para poder comprender con mejor detalle cada paso que se realizará.

Figura 27

Diagrama de flujo del procedimiento



4 CAPÍTULO III: RECOLECCIÓN DE DATOS BATIMÉTRICOS CARACTERÍSTICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para definir los parámetros de la zona de estudio primero se solicitó información de oleaje y batimetría a la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú. Asu vez, se realizó una visita de campo en la zona de estudio.

4.1 ESTADO ACTUAL DE LA PLAYA LA HERRADURA

Según la visita de campo realizada el 12/06/2021 se pudo observar la playa erosionada por el fuerte oleaje. Asimismo, se observó el avance del mar, en la Figura 28 se muestra cómo el mar se encuentra a escasos metros del edificio Las Gaviotas. También se evidenció la predominancia del material de canto rodado y la ausencia de arena como se aprecia en la Figura 29.

Figura 28

Playa La Herradura con fuertes oleajes el 12/06/2021

Figura 29

El mar a pocos metros del edificio Las Gaviotas. Visita realizada el 12/06/2021

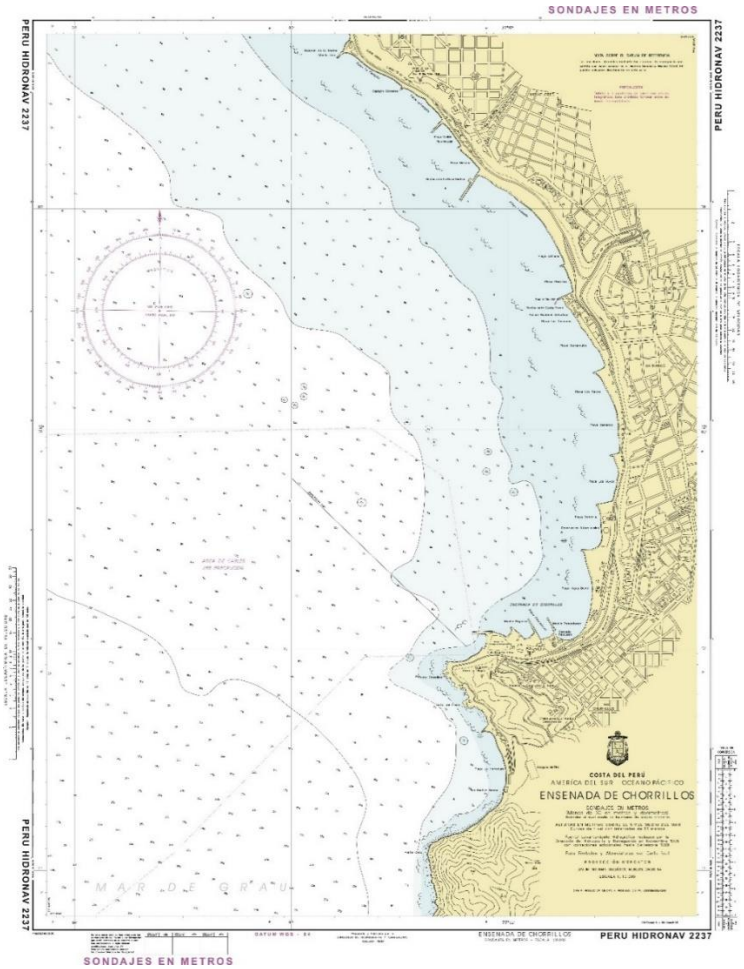
4.2 BATIMETRÍA

4.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS BATIMÉTRICOS LOCALES

La carta batimétrica adquirida es de la Ensenada de Chorrillos - HIDRONAV 2237, 4ta Ed. Feb. 2000 (Autoridad del Portuaria Nacional, comunicación personal, 28 de mayo del 2021). Realizada por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DIHIDRONAV) en noviembre de 1995 y actualizada hasta 1999 en escala de 1:10,000. En ella se puede observar la profundidad del mar y la altura del terreno tal como se observa en la Figura 30.

Figura 30

Carta Batimétrica de la Ensenada de Chorrillos



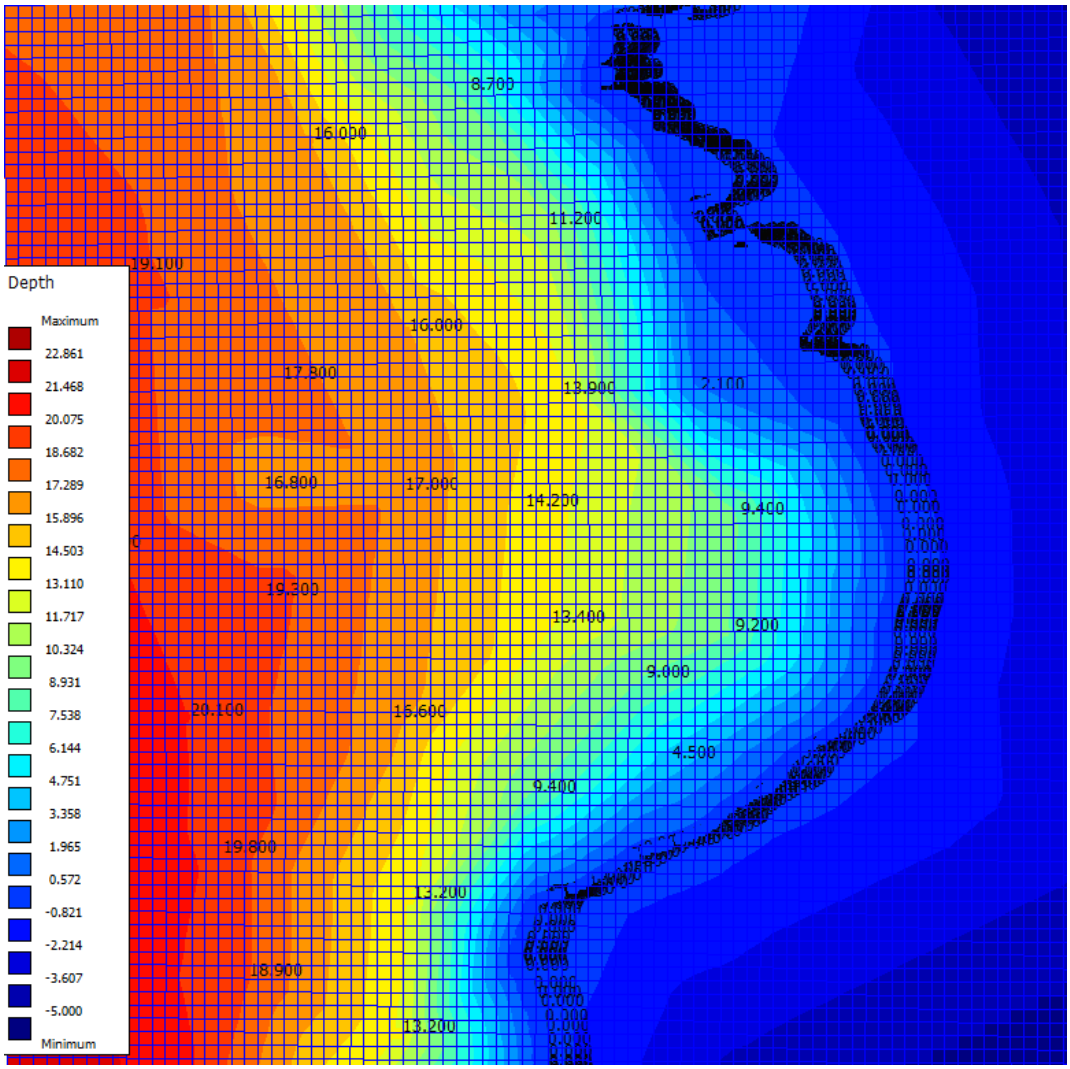
Nota. La Carta Batimétrica fue solicitada a la Autoridad Portuaria Nacional (comunicación personal, 28 de mayo de 2021)

4.2.2 PROCESAMIENTO DE DATOS BATIMÉTRICOS

Los datos batimétricos locales obtenidos de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú se procesaron mediante el software DELFT-3D. Este software procesó la información con cuadrículas de 8x8m. El cual se puede observar en la Figura 31.

Figura 31

Representación de las profundidades de la playa La Herradura mediante el software Delft-3D



En la Figura 32, de acuerdo con la información batimétrica, se observa que la playa presenta una forma cóncava con una profundidad que va desde los 0 metros hasta los 15 metros.

De igual manera, con ayuda de Google Earth se determinó la longitud de la playa, el cual fue de 550 m. y se realizó el cálculo de las pendientes de la playa. Así como se observa en la Figura 32 y se presentan los resultados en la Tabla 4.

Figura 32

Rectas para el cálculo de las pendientes de la playa La Herradura

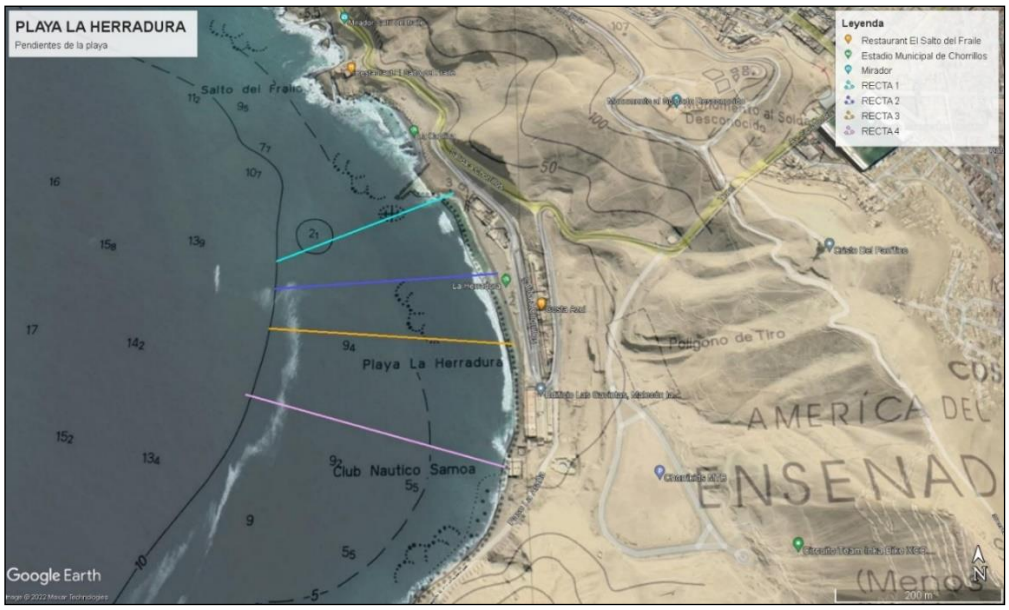


Tabla 4

Pendientes de la playa La Herradura para las curvas de 5 y 10 m

N° RECTA	Descripción	Curva de nivel (5m)		Curva de nivel (10m)	
		Longitud (m)	Pendiente (%)	Longitud (m)	Pendiente (%)
RECTA 1	Zona Izquierda	No hay nivel	No hay nivel	343	1.46%
RECTA 2	Z. Central Izquierda	No hay nivel	No hay nivel	397	1.26%
RECTA 3	Z. Central Derecha	195	2.56%	435	1.15%
RECTA 4	Zona Derecha	120	4.17%	455	1.10%

En la Tabla 4 se puede observar las pendientes de la playa. Para la curva de nivel de 5m, en las Rectas 1 y 2 no se observa la curva de nivel, por lo que no se pudo calcular la pendiente, en las Rectas 3 y 4 las pendientes registran 2.56% y 4.17% respectivamente. Para la curva de nivel de 10m, en las Rectas 1, 2, 3 y 4 los resultados de las pendientes son 1.46%, 1.26%, 1.15% y 1.10% respectivamente. De estos resultados se obtiene la pendiente promedio de 3.3% considerando la curva de nivel de 5m.

5 CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE DE LA PLAYA LA HERRADURA

El oleaje en la playa La Herradura fluctúa con el pasar del tiempo, es decir parámetros como altura de ola, dirección del viento y periodo cambian. Por ello se hace uso de una data de oleaje de aguas oceánicas con un rango de 40 años. La información ha sido tomada de la base de datos (Copernicus, 2018). Con la cual se realizará los cálculos de la zona de rompiente y las condiciones predominantes y máximas. De igual manera, se puede observar cómo es la variación del oleaje de cada uno de los 3 parámetros a través del tiempo. Por ejemplo, en la Figura 33 se puede observar una gráfica de altura de ola (m) vs el tiempo (años), mientras que en la Figura 34 se aprecia la gráfica de dirección de ola (grados) vs tiempo (años) y por último en la Figura 35 se observa la gráfica de periodo de ola (s) vs tiempo (años).

Figura 33

Gráfica de Altura de ola (m) vs Tiempo (años) de la data de oleaje en un rango de 40 años

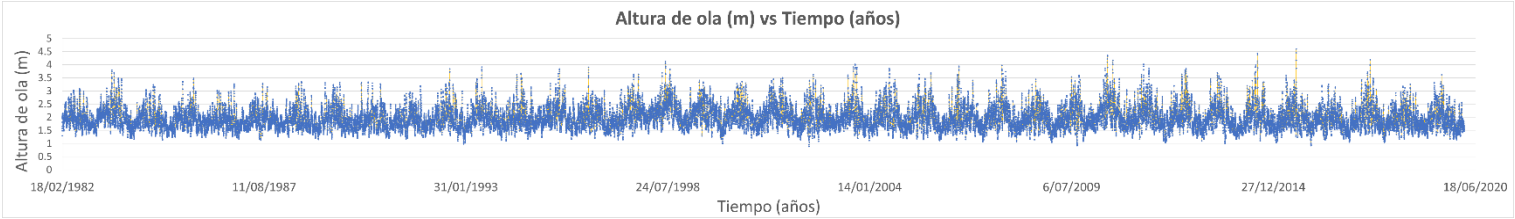


Figura 34

Gráfica de Dirección de ola (grados) vs Tiempo (años) de la data de oleaje en un rango de 40 años

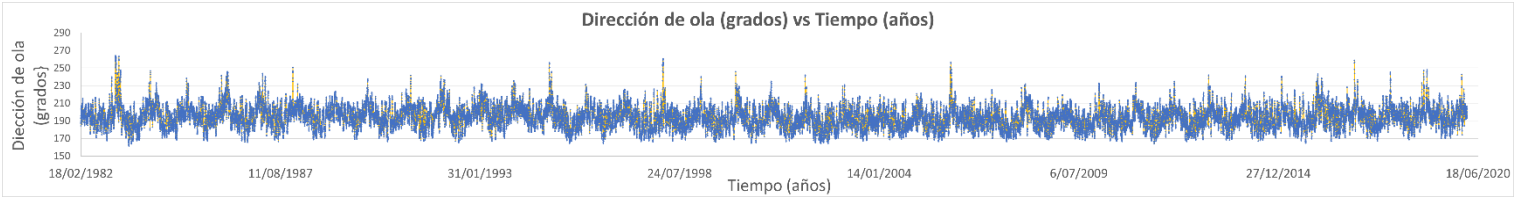
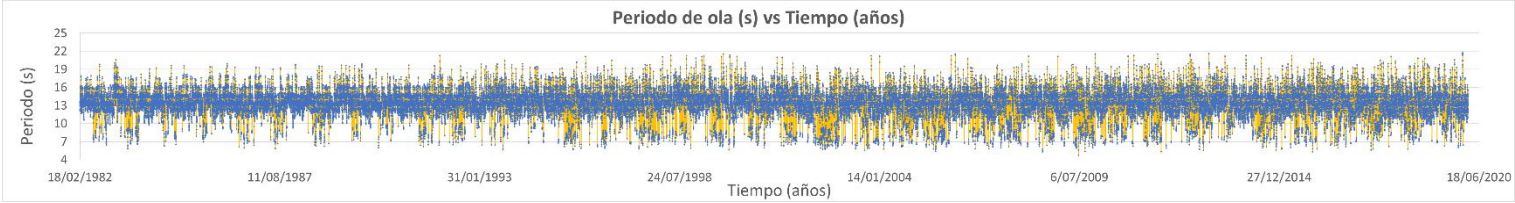


Figura 35

Gráfica de Periodo de ola (s) vs Tiempo (años) de la data de oleaje en un rango de 40 años

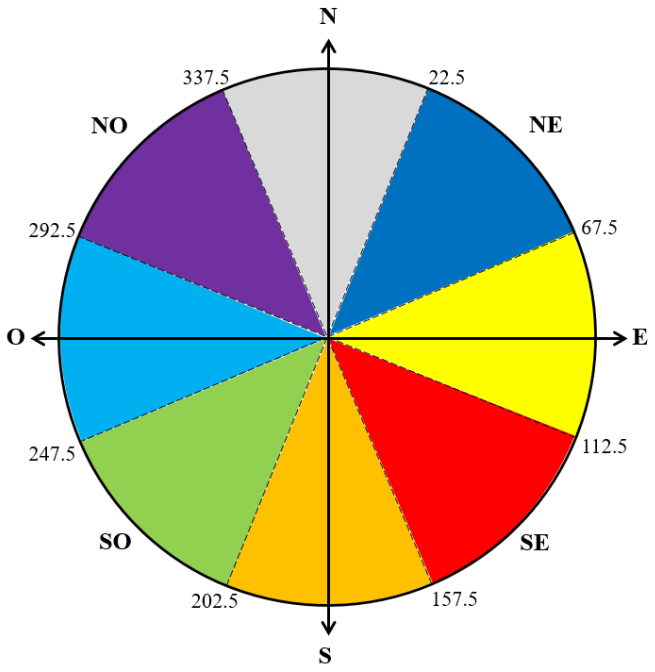


5.1 CÁLCULO DE CONDICIONES PREDOMINANTES Y MÁXIMAS EN AGUAS PROFUNDAS

Para realizar el cálculo primero definimos el rango de las direcciones del viento de la data del oleaje, la cual se dividió en 8 regiones como se observa en la Figura 36, donde se aprecia un plano de coordenadas polares con convención oceanográfica.

Figura 36

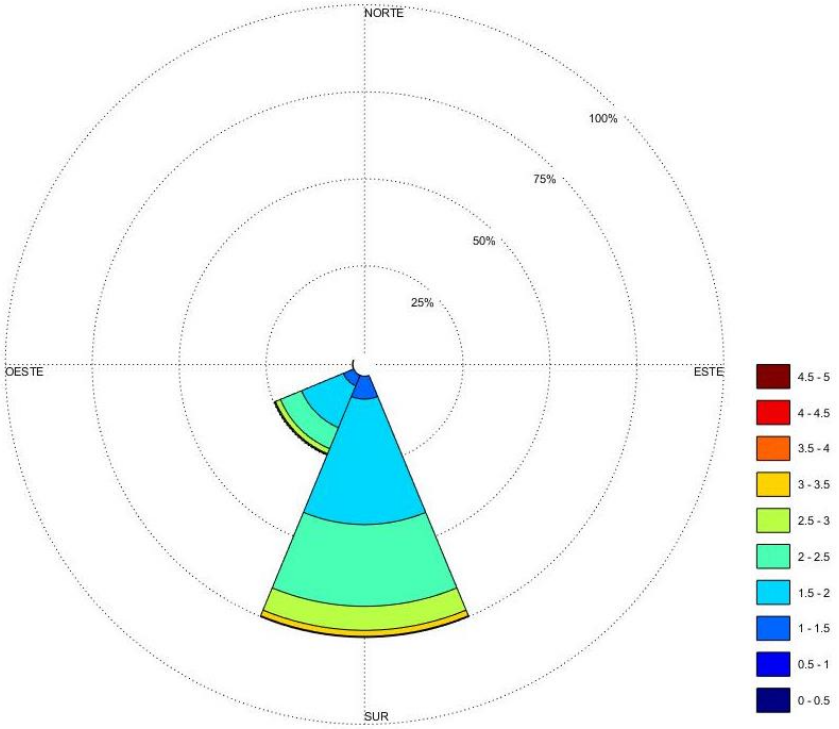
Plano de coordenadas polares con convención oceanográfica



Luego, mediante una hoja de cálculo en Excel se filtró las direcciones del viento de la data en cada rango que presenta el plano de coordenadas polares. Obteniéndose que la dirección del viento de la data se encuentra en los rangos de 157.5-202.5 S, 202.5-247.5 SO y de 247.5-292.5 O. Con ayuda del programa MATLAB, se hizo uso de un código para poder obtener una rosa de oleaje para observar que altura de ola es predominante y cual dirección presenta la mayor cantidad de olas como se observa en la Figura 37.

Figura 37

Rosa de Oleaje de la Playa La Herradura



Nota. Rosa de oleaje donde se observa que la zona sur presenta una mayor cantidad de oleaje. Además, la altura predominante es de 1.5 a 2m de altura.

Se realiza un cuadro general con toda la información recabada tanto para las direcciones sur, suroeste y oeste como se aprecia en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados de promedio y máximo en los parámetros de altura, dirección y periodo del oleaje

DIRECCIÓN	ALTURA		DIRECCIÓN		PERIODO	
	PROMEDIO	MÁXIMO	PROMEDIO	MÁXIMO	PROMEDIO	MÁXIMO
SUR	1.99	4.60	189.19	202.5	12.82	21.72
SUROESTE	1.90	4.17	210.50	247.37	14.14	21.61
OESTE	1.97	2.73	256.13	271.2	16.16	21.23

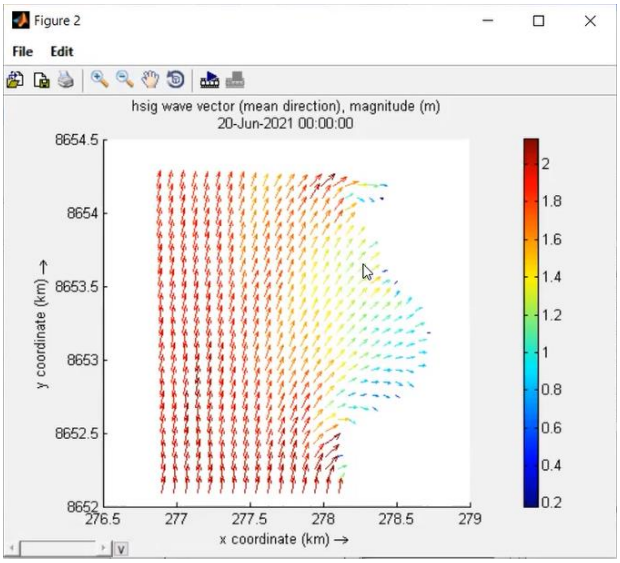
5.2 CÁLCULO DE CONDICIONES PREDOMINANTES Y MÁXIMAS DEL OLEAJE EN LA PLAYA LA HERRADURA

Luego de realizar los cálculos con la data de 40 años las cuales corresponde a información de aguas profundas se realiza los cálculos de las condiciones mencionadas en la playa La Herradura. De esta forma se analiza cómo es el comportamiento de las olas en aguas profundas.

En el programa Delft-3D se introduce los datos de la Tabla 5, los cuales se procesan junto a los datos batimétricos de la Figura 30. Para ello, se establecen las condiciones de borde en el software: Norte, Sur y Oeste. Y la condición inicial con una altura de 0 m. Se procesa cada dato de acuerdo con la dirección de la ola obteniéndose resultados como lo muestra la Figura 38. Donde se observa la dirección del oleaje en la condición sur predominante.

Figura 38

Modelamiento del oleaje de la playa La Herradura en Delft-3D

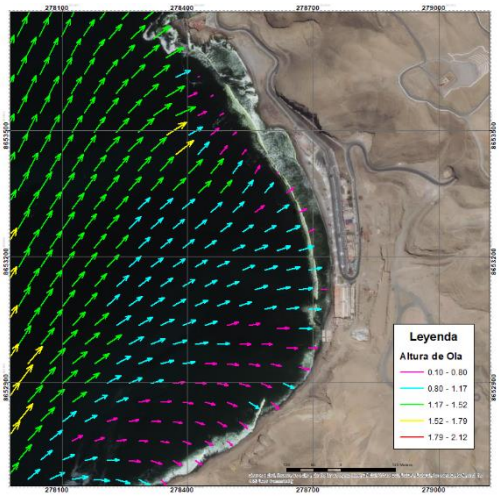


Nota. Gráfica de dirección del oleaje de la zona sur predominante en el programa Delft-3D.

Las gráficas obtenidas son exportadas y llevadas al programa ArcGIS, donde se georreferencia con la zona de estudio para analizar mejor el comportamiento del oleaje y obtener mejores resultados en el posterior diseño del rompeolas. En la Figura 39, Figura 41 y Figura 43 se observa el comportamiento en condiciones predominantes de la dirección y altura de las olas de las direcciones sur, suroeste y oeste respectivamente. De igual manera en la Figura 40, Figura 42 y Figura 44 se observa el comportamiento de las olas en condiciones máximas en las mismas direcciones mencionadas anteriormente.

Figura 39

Modelamiento del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS



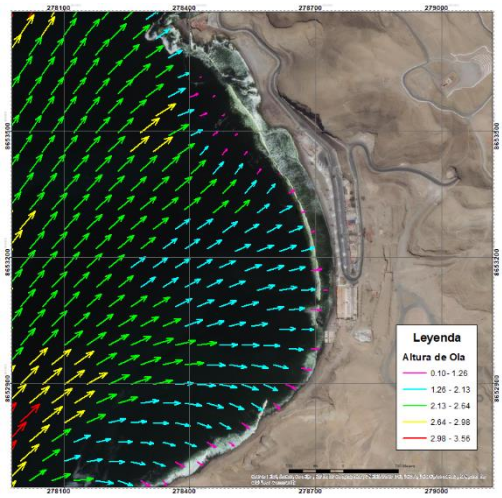
Nota. Modelación de la dirección y altura de las olas para la dirección sur en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

.

Como se observa en la Figura 39, las olas en la zona norte son más tranquilas en comparación a la zona sur, las cuales van en un rango de altura de ola de 0.10 a 0.80 m y 0.80 a 1.17 m respectivamente para la condición predominante sur.

Figura 40

Modelamiento del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS

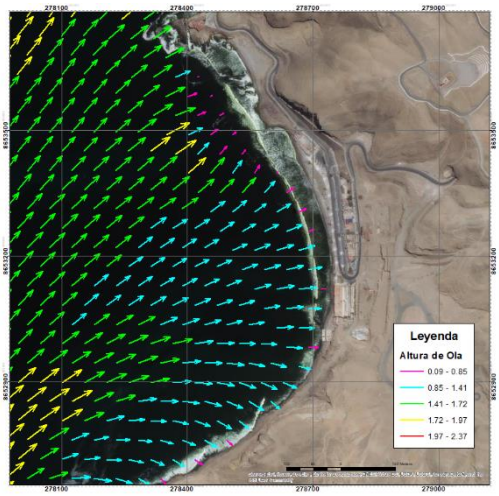


Nota. Modelación de la dirección y altura de las olas para la dirección sur en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

En la Figura 40, para la condición máxima sur, las olas varían entre el rango de 0.10 a 1.26 m en la zona norte, entre 0.10 a 2.13 m en la zona central y zona sur.

Figura 41

Modelamiento del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS

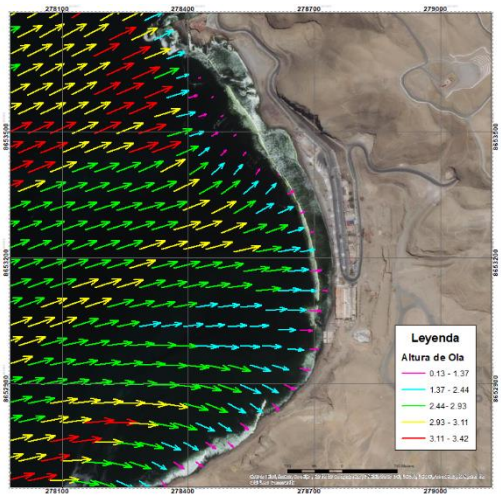


Nota. Modelación de la dirección y altura de las olas para la dirección suroeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Para la condición predominante suroeste, el rango de altura de ola varía entre 0.09 y 0.85 m para la zona norte y zona central. Entre 0.85 y 1.41 m para la zona sur. Como se observa en la Figura 41.

Figura 42

Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS

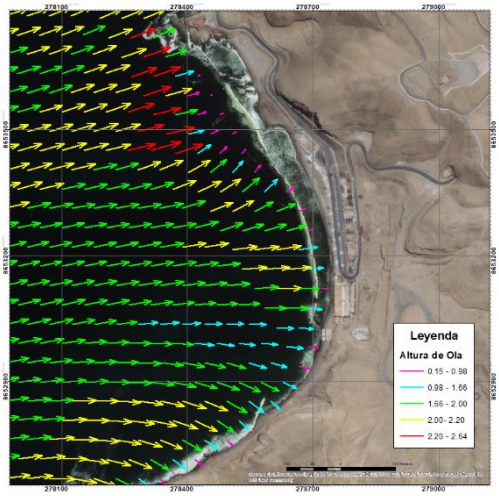


Nota. Modelación de la dirección y altura de las olas para la dirección suroeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

En la condición máxima suroeste, se presenta la condición más crítica ya que la altura de ola oscila entre 0.13 hasta los 1.37 m en la zona norte, entre 1.37 a 2.44 m en la zona central y entre 0.13 hasta los 1.37 m en la zona sur, como se muestra en la Figura 42.

Figura 43

Modelamiento del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS

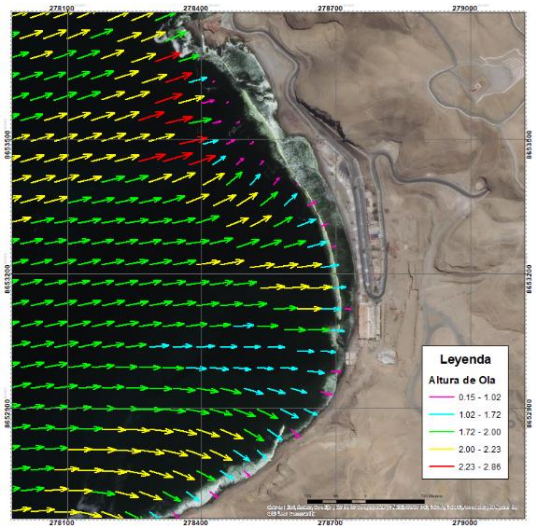


Nota. Modelación de la dirección y altura de las olas para la dirección oeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

En la condición predominante oeste, la altura de ola en la zona norte se encuentra entre 0.15 a 0.98 m, en la zona central entre 0.98 a 2.00 m y en la zona sur entre 0.15 a 1.66m. cómo se presentan en la Figura 43.

Figura 44

Modelamiento del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS



Nota. Modelación de la dirección y altura de las olas para la dirección oeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

En la Figura 44, la cual representa a la condición oeste máxima, la altura de las olas se encuentra en el rango de 0.15 a 1.72 m para la zona central, en la zona norte entre 0.15 y 1.02 m, y en la zona sur llegan a alcanzar hasta los 2.00 m.

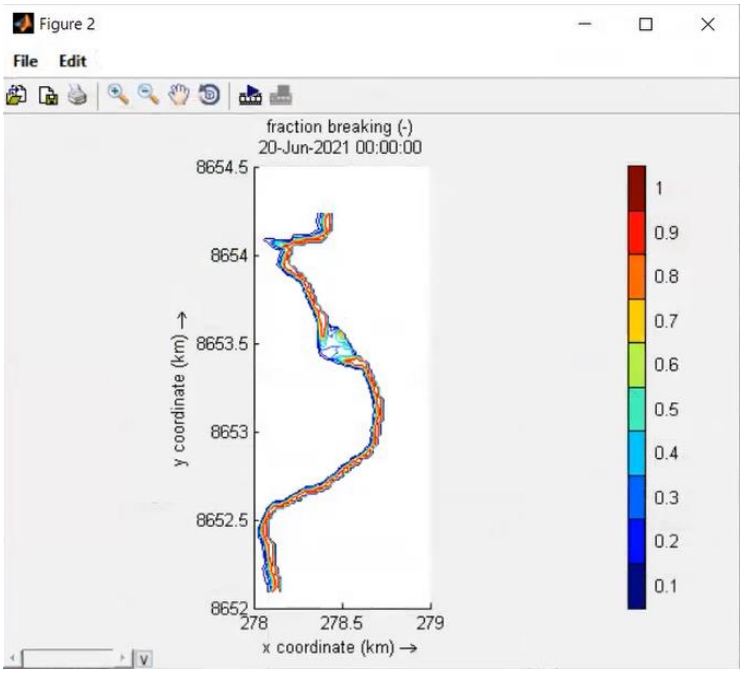
5.3 CÁLCULO DE LA ZONA ROMPIENTE DE OLAS DE LA PLAYA LA HERRADURA

La zona rompiente es el área con las alturas de olas más críticas antes de llegar a la costa, lo que genera que tengan una mayor energía cerca a la orilla de la playa. Por ello, es necesario determinar a qué distancia de la costa está ubicada la zona rompiente, para definir la ubicación del rompeolas detrás de la zona en mención.

Para el cálculo de la zona de rompiente se realizó el mismo desarrollo con el programa Delft-3D. La data de la Tabla 5 se ingresó al software, pero en esta ocasión se procesa la información con la opción de “Fraction Breaking”, el cual determina la ubicación de la zona rompiente. La data se procesa y se obtiene una gráfica con la zona de rompiente como se observa en la Figura 45, la cual muestra la zona sur predominante de la playa La Herradura.

Figura 45

Modelamiento de zona rompiente en Delft-3D

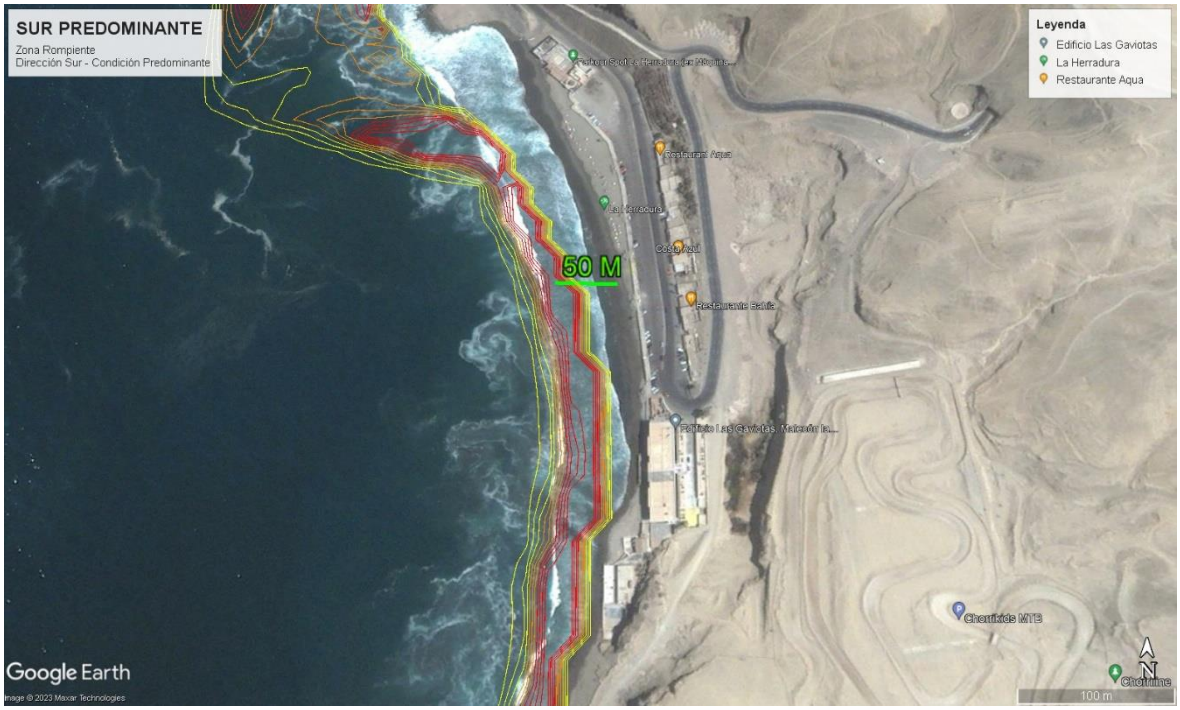


Nota. Gráfica de rompiente de olas de la zona Sur de la playa La Herradura en el programa Delft3D.

Las gráficas obtenidas son exportadas y llevadas al programa Google Earth, donde se georreferencia con la zona de estudio para analizar mejor el comportamiento del oleaje en zona de rompiente y obtener mejores resultados en el posterior diseño del rompeolas. Luego de georreferenciar las imágenes en Google Earth se evalúa cuáles son los 2 rompientes en condiciones máximas y predominantes que abarcan mayor área. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 46 y Figura 47, la primera muestra la rompiente para la dirección sur en condición predominante y en la segunda se observa la rompiente para la dirección suroeste respectivamente, siendo ambas las de mayor extensión.

Figura 46

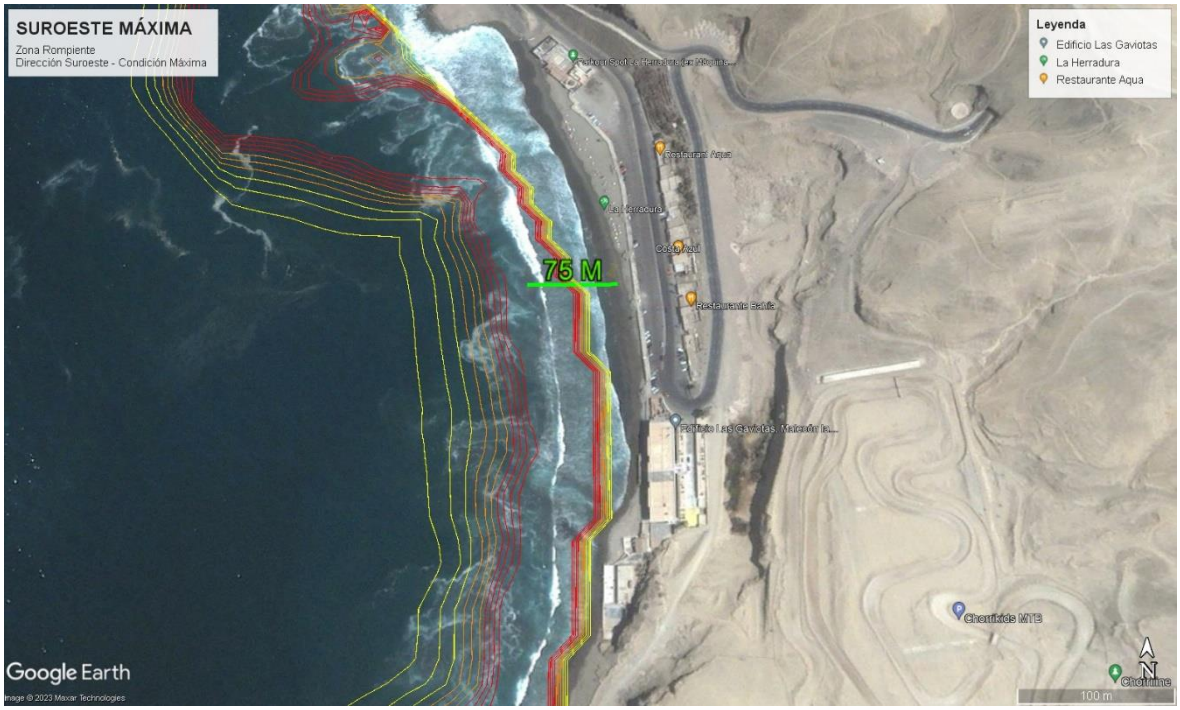
Proyección de zona rompiente de la dirección sur en Google Earth Pro



Nota. Modelación de la zona de rompiente de olas para la dirección sur en condición predominante en la playa La Herradura con el programa Google Earth. De "Playa La Herradura", por Google Earth Pro, 2021 (https://n9.cl/z9p1w).

Figura 47

Proyección de zona rompiente de la dirección suroeste en Google Earth Pro



Nota. Modelación de la rompiente de olas para la dirección suroeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa Google Earth. De "Playa La Herradura", por Google Earth Pro, 2021 (https://n9.cl/z9p1w).

De acuerdo con la Figura 46, la distancia de la rompiente para la dirección sur predominante se encuentra a 50 m aproximadamente. De igual manera, en la Figura 47 la cual representa para la dirección suroeste en condición máxima, se encuentra a 75 m de la costa. Con ello se determina la ubicación del rompeolas para disipar la energía de las olas al llegar a la costa.

6 CAPÍTULO V: DISEÑO DE ROMPEOLAS

6.1 RECOPILACIÓN DE DATOS Y PARÁMETROS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para realizar la propuesta de diseño del rompeolas, es necesario recopilar los parámetros a los cuales estará sujeta la estructura. Los datos lo podemos observar en los siguientes cuadros.

En la tabla 6 se observa el rango de altura de ola en condición normal, es decir, sin presencia de ninguna estructura en la playa. En la tabla 7 se muestra el rango de altura de la ola en la zona rompiente, el cual corresponde al lugar en donde el oleaje rompe.

Tabla 6

Rango de altura de ola en condición normal

	Condición Normal			
Zona	Predominante		Máxima	
Sur	0.10	0.80	0.10	1.26
	0.80	1.17	1.26	2.13
	1.17	1.52	2.13	2.64
	1.52	1.79	2.64	2.98
	1.79	2.12	2.98	3.56
Suroeste	0.09	0.85	0.13	1.37
	0.85	1.41	1.37	2.44
	1.41	1.72	2.44	2.93
	1.72	1.97	2.93	3.11
	1.97	2.37	3.11	3.42
Oeste	0.15	0.98	0.15	1.02
	0.98	1.66	1.02	1.72
	1.66	2.00	1.72	2.00
	2.00	2.20	2.00	2.23
	2.20	2.64	2.23	2.86

Tabla 7

Rango de alturas de ola en la zona rompiente (m)

Zona	Zona Rompiente			
	Predominante		Máxima	
Sur	0.09	0.18	0.09	0.18
	0.18	0.36	0.18	0.36
	0.36	0.55	0.36	0.55
	0.55	0.73	0.55	0.72
	0.73	0.91	0.72	0.91
Suroeste	0.09	0.18	0.09	0.18
	0.18	0.36	0.18	0.36
	0.36	0.55	0.36	0.55
	0.55	0.73	0.55	0.72
	0.73	0.91	0.72	0.91
Oeste	0.09	0.18	0.09	0.18
	0.18	0.36	0.18	0.36
	0.36	0.55	0.36	0.55
	0.55	0.73	0.55	0.72
	0.73	0.91	0.72	0.91

La Tabla 8 muestra la profundidad y distancia de la zona rompiente de las olas en condición predominante y máxima con respecto a la costa y la Tabla 9 contiene las pendientes de la playa para las curvas de 5 y 10m.

Tabla 8

Profundidad y distancia de la zona de rompiente desde la costa para la condición predominante y máxima en (m)

Condición		Sur	Suroeste	Oeste
Distancia	Predominante	50	51	54
	Máxima	61	75	59
Profundidad	Predominante	0 - 5	0 - 5	0 – 5
	Máxima	0 - 7	0 - 9	0 – 5

Tabla 9

Pendientes de la playa La Herradura para las curvas de 5 y 10 m

Descripción	Curva de nivel (5m)		Curva de nivel (10m)	
	Longitud (m)	Pendiente (%)	Longitud (m)	Pendiente (%)
Zona Izquierda	No hay nivel	No hay nivel	343	1.46%
Z. Central Izquierda	No hay nivel	No hay nivel	397	1.26%
Z. Central Derecha	195	2.56%	435	1.15%
Zona Extrema	120	4.17%	455	1.10%

6.2 ELABORACIÓN DEL DISEÑO DEL ROMPEOLAS

Para elaborar el diseño inicial del sistema de rompeolas separado, se hizo uso de diversos estudios realizados para determinar a qué distancia de la costa debería ubicarse y determinar la longitud de la estructura. Ello, con la finalidad de generar salientes como en la playa Barcelona en España (Figura 48), que luego de la construcción del rompeolas favoreció la formación de saliente en dicha playa. Por otro lado, evitar la formación de tómbolos como en la playa de San Antonio de Colange, Gerona (Figura 49), que luego de la construcción de un rompeolas cerca a la playa, generó acreción de arena hasta conectar la playa con el rompeolas. Además, para un sistema de rompeolas de 2 a más estructuras, se establece una distancia de separación para que pueda permitir la circulación del mar y no producir estancamientos. Es por ello por lo que, para el diseño del sistema de rompeolas en la playa la Herradura, se considerará la formación de salientes, lo que permitirá la acreción de sedimentos sin conectar la playa con las estructuras de protección costera. Asimismo, ambas playas presentan una forma cóncava similar a la playa La Herradura.

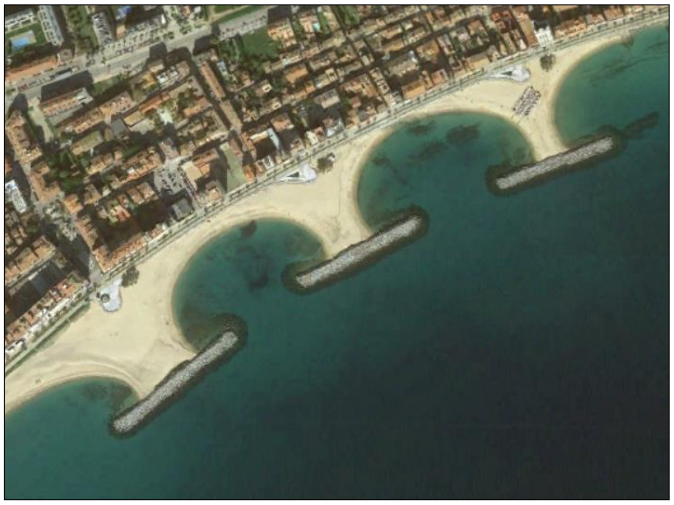
Figura 48

Playa Barceloneta

Nota. La imagen muestra la playa Barceloneta, España. (a) año 2006 sin rompeolas al borde de la playa. (b) año 2010 con la formación de un saliente por la instalación de un rompeolas. De "Playa Barceloneta", Google Earth Pro, 2021 (https://n9.cl/qigx0).

Figura 49

Playa de San Antonio de Calonge, Gerona



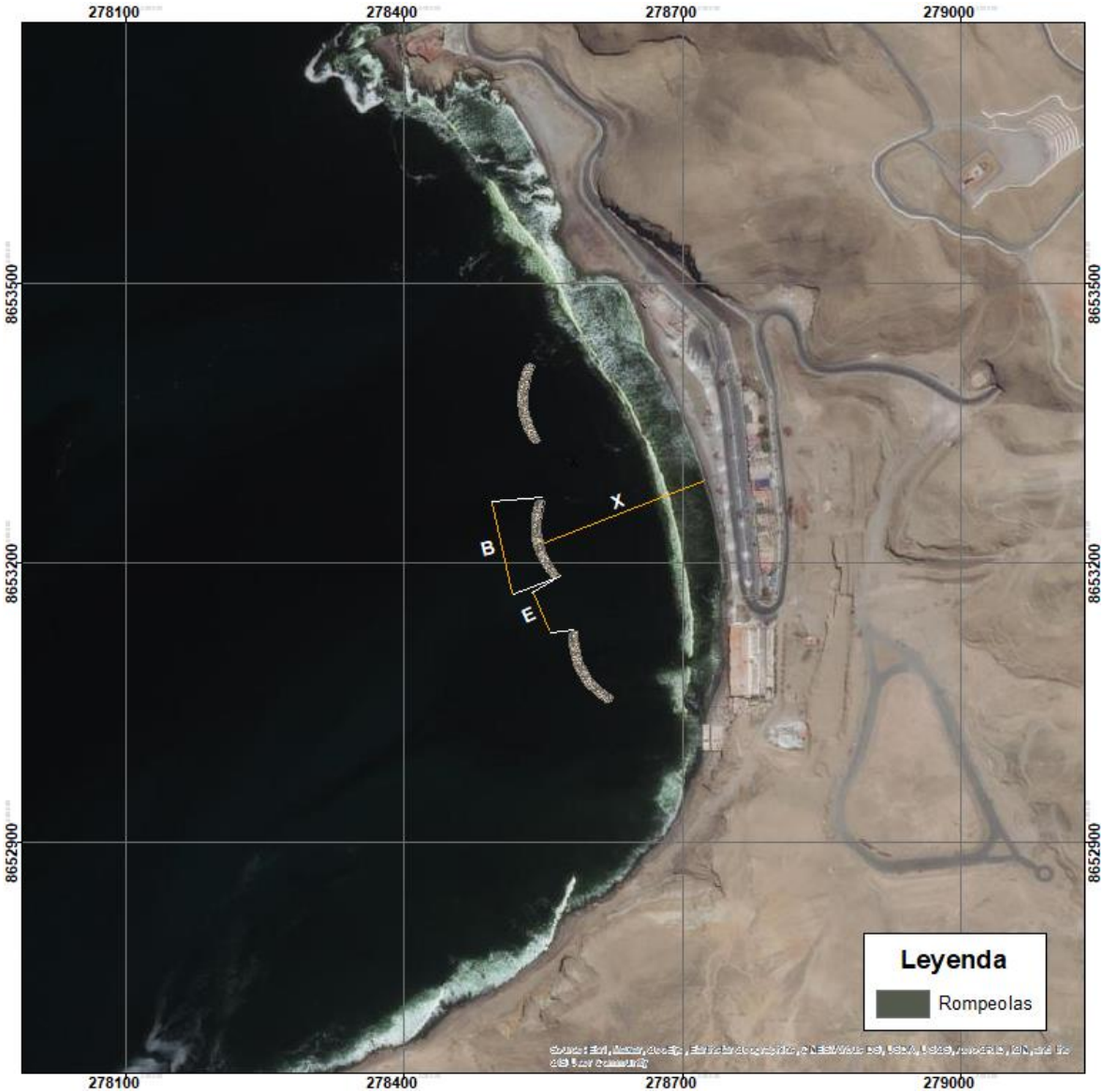
Nota. Tómbolos generados por la instalación de rompeolas. De "Playa de San Antonio de Colange, Gerona", por Google Earth Pro, 2021 (https://n9.cl/w0iy9).

Las variables para usar para el diseño son los siguientes: B es la longitud del rompeolas, X es la distancia desde la costa al eje central de rompeolas y E la distancia de separación entre cada estructura. Así como se observa en la Figura 50.

El estudio realizado por Bricio et al. (2012) en las costas noreste de España proponen el siguiente modelo geométrico para la formación de salientes: 0.5<B/X<1.3. Otro estudio realizado por Van Rijn (2018) indica que, para el software DELFT-3D, predice salientes para la siguiente relación: B/X<0.6. Por lo tanto, para el diseño preliminar usaremos el rango de valores para B/X entre 0.5 y 0.6.

Figura 50

Plano de dimensionamiento del sistema de rompeolas en la playa La Herradura



Nota. Variables para el diseño del sistema de rompeolas en la playa La Herradura.

El sistema de rompeolas se ubicará a 170 m. de la costa (después de la zona rompiente). La longitud del rompeolas calculado a un valor de 90 m., da como resultado la relación de B/X un valor de 0.53, lo cual se encuentra dentro del rango delimitado para la formación de salientes. La separación entre cada rompeolas se trabajará en una relación de B/E=1.5, para lo cual obtenemos un valor de E igual a 60 m.

6.3 RESULTADOS FINALES DEL DISEÑO

Para el diseño se usó diversos estudios sobre la relación de la longitud con respecto a la costa y la longitud del rompeolas en la formación de tómbolos y salientes. También se tomó en cuenta los parámetros que se deben considerar para su posterior modelación en el programa Delft-3D. Todo ello se puede encontrar en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10

Parámetros de relación de longitud de rompeolas (B) y distancia a la costa (X)

	Saliente	**Tómbolo**
Autor (años)	B/X >	B/X <
Bricio et al. (2012)	0.5	1.3
Van Rijin (2018) - Delft 3D	-	0.6

Luego de realizar los cálculos en base a los estudios y a la batimetría del lugar se determinó que la longitud del rompeolas y la distancia con respecto a la costa serian como se observa en la Tabla 11 y graficadas en la Figura 51.

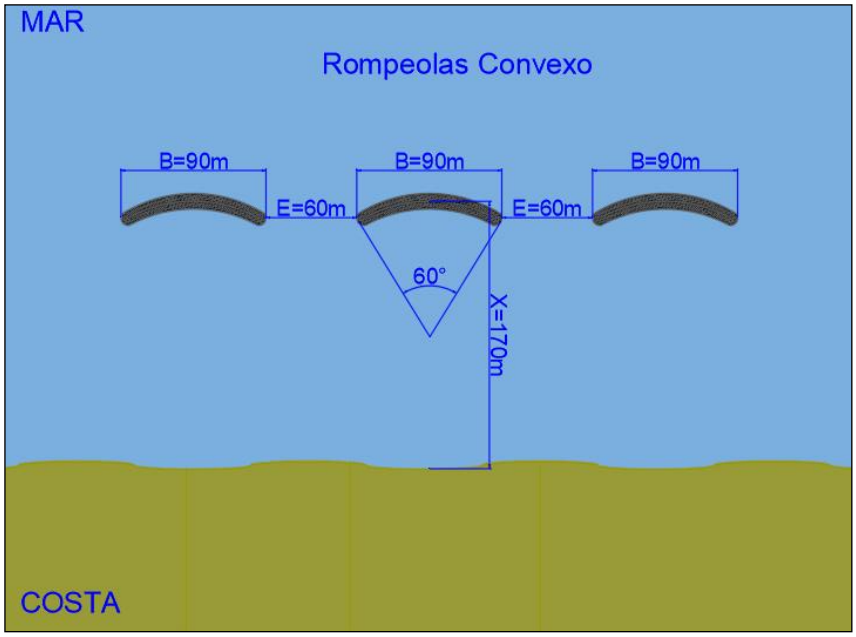
Tabla 11

Resultados del diseño de rompeolas convexo

Parámetros	**Medidas (m)**
Longitud con respecto a la costa (X)	170
Longitud rompeolas (B)	90
Separación entre rompeolas (E)	60

Figura 51

Dimensiones del sistema de rompeolas en la playa La Herradura



7 CAPÍTULO VI: SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL

7.1 SOFTWARE Y MODELADO DEL ROMPEOLAS

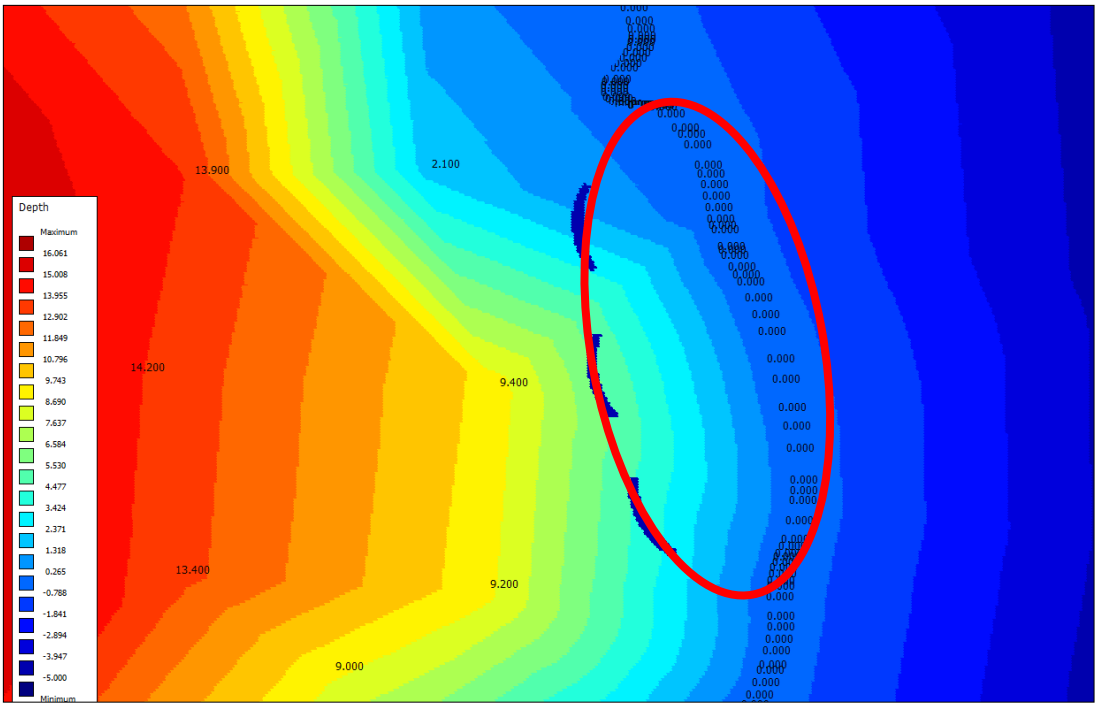
Para el modelado del sistema de rompeolas se usó el software Delft-3D. En el cual, se ubicó el sistema de rompeolas a 170 m. de la costa, con 90 m. de longitud de la estructura y 60 m. de brecha entre cada una de ellas, según lo determinado en el capítulo anterior. Para encontrar un mejor resultado, se opta por diseñar 2 modelos de sistema de rompeolas.

- Modelo 1:

El modelo 1 en la Figura 52 presenta un sistema de rompeolas con sentido cóncavo cubriendo toda la costa de la playa La Herradura. La ubicación de este sistema de rompeolas se da en las coordenadas (278538.932 E, 8653221.981 N) con referencia al rompeolas central.

Figura 52

Modelación del sistema de rompeolas en forma convexa en Delf-3D



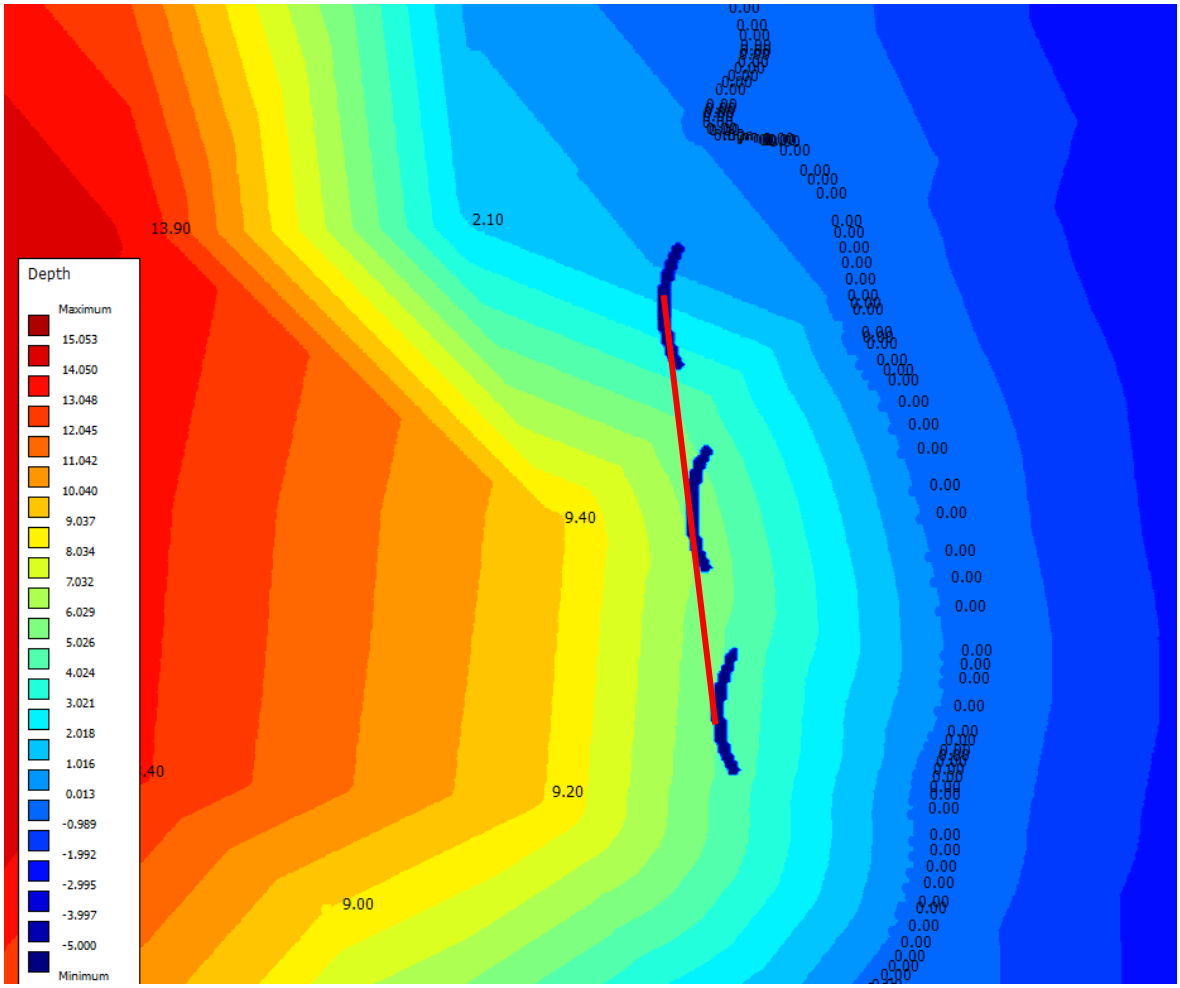
Nota. Modelo 1: Rompeolas convexos modelados en el software Delft-3D.

- Modelo 2:

El modelo 2 en la Figura 53 presenta un sistema de rompeolas convexos hacia el Oeste y distanciados cada 20 metros en el eje X. La ubicación de este sistema de rompeolas se da en las coordenadas (278538.932 E, 8653221.981 N) con referencia al rompeolas central.

Figura 53

Modelación del sistema de rompeolas en forma de pendiente en Delft-3D



Nota. Modelo 2: Rompeolas convexos distanciados cada 20 metros en el eje X modelados en el software Delft-3D.

Luego de haber modelado los sistemas de rompeolas es necesario verificar si los cálculos de la ubicación, longitudes de los rompeolas y las brechas son correctas para la formación de salientes en la playa, y de esa manera ganar terreno de costa. Esta verificación se realizará en el siguiente paso.

7.2 VERIFICACIÓN DE LA MODELACIÓN DEL ROMPEOLAS

Los rompeolas se modelan en las condiciones máximas y predominantes de las 3 direcciones de ola. Esto se realiza mediante el software Delft-3D, donde se ingresan los datos de aguas profundas de la Tabla 5 para cada condición de borde: Norte, Sur y Oeste. Esta información se procesa junto a la nueva profundidad de la zona de estudio en la que se incorporó el sistema de rompeolas, la cual funciona como un obstáculo para las olas provenientes de cada dirección. Con este sistema de rompeolas incorporado en el software se busca disminuir la altura de ola en la zona protegida.

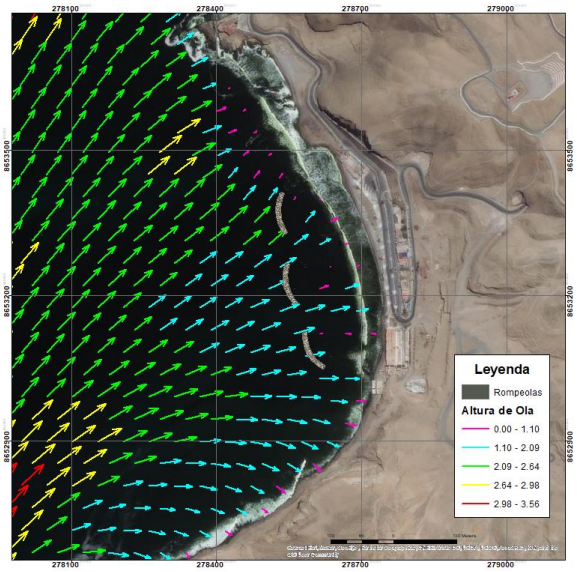
Luego se verifica si es que los rompeolas logran disminuir la altura de las olas que rompen en la playa La Herradura. Para ello se exporta los resultados y se georreferencian en el programa ArcGIS, mediante el cual se logra observar mejor el comportamiento del oleaje frente a los rompeolas. Las gráficas de ambos modelos se observan a continuación.

- Modelo 1

En la Figura 54, Figura 56 y Figura 58 se puede apreciar el comportamiento del oleaje en la condición máxima. Mientras que en la Figura 55, Figura 57 y Figura 59 se observa el comportamiento del oleaje en la condición predominante.

Figura 54

Modelamiento del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS

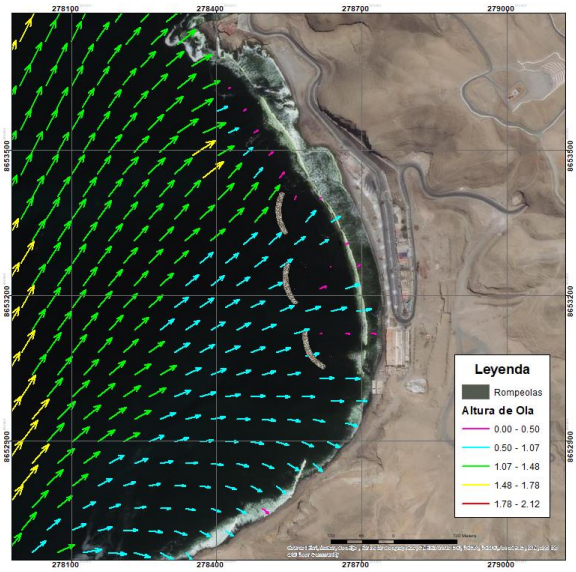


Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 1 para la dirección sur en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

.

Figura 55

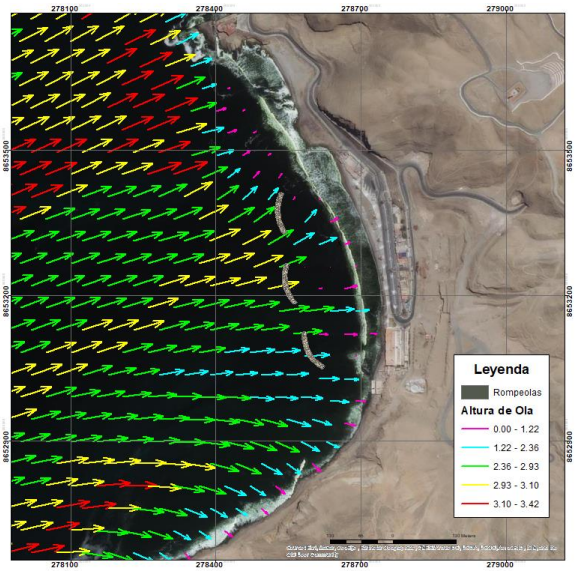
Modelamiento del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 1 para la dirección sur en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 56

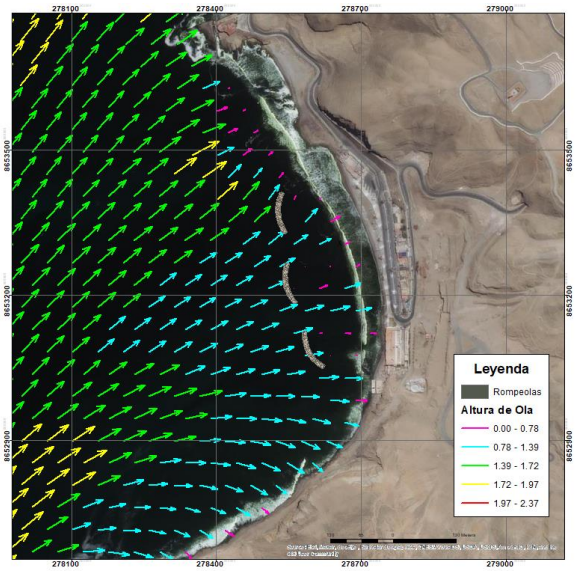
Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 1 para la dirección suroeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 57

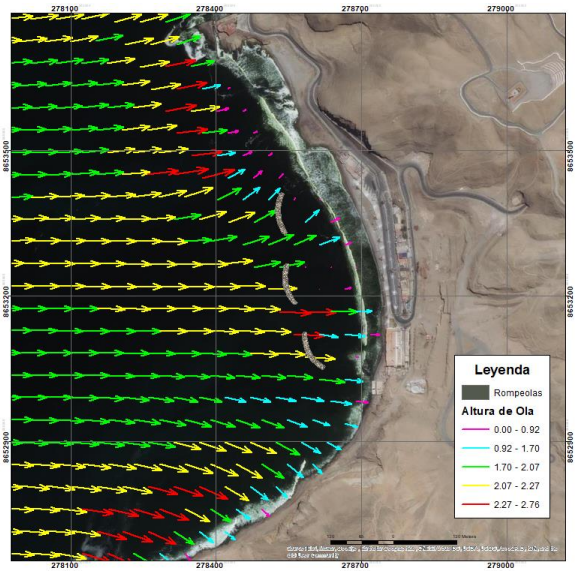
Modelamiento del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 1 para la dirección suroeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 58

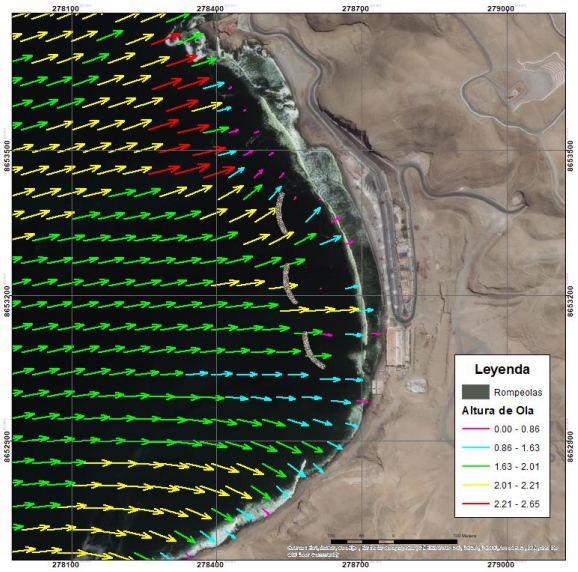
Modelamiento del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 1 para la dirección oeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 59

Modelamiento del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS



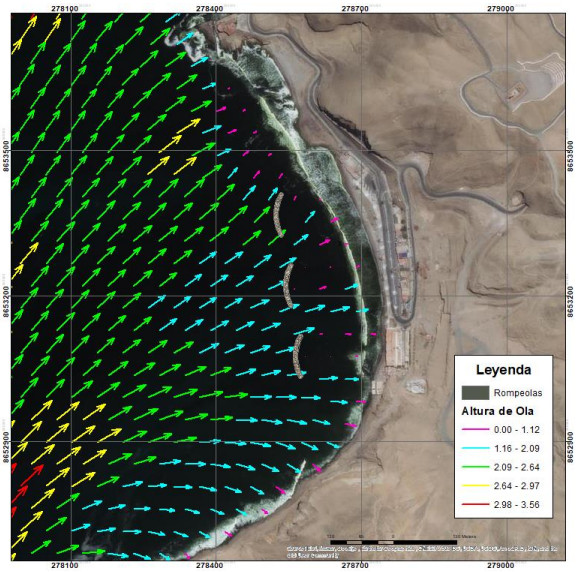
Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 1 para la dirección oeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

- **<u>Modelo 2</u>**

En la Figura 60, Figura 62 y Figura 64 se puede apreciar el comportamiento del oleaje en la condición máxima. Mientras que en la Figura 61, Figura 63 y Figura 65 se observa el comportamiento del oleaje en la condición predominante.

Figura 60

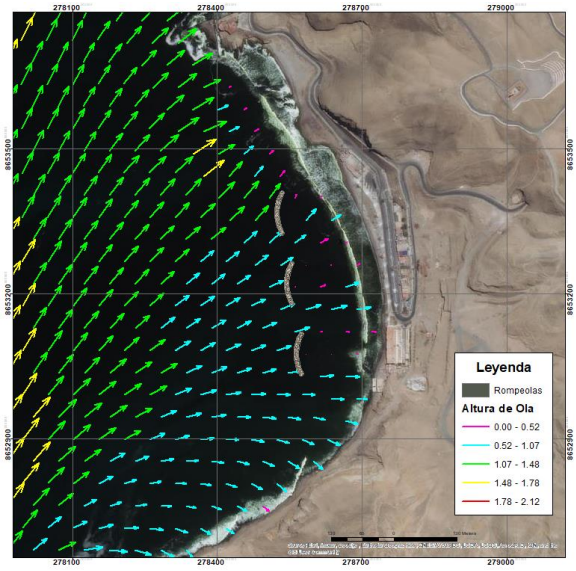
Modelamiento del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 2 para la dirección sur en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 61

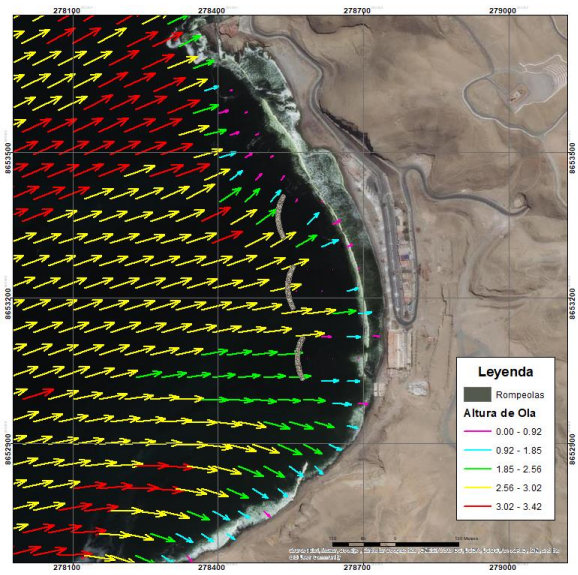
Modelamiento del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 2 para la dirección sur en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 62

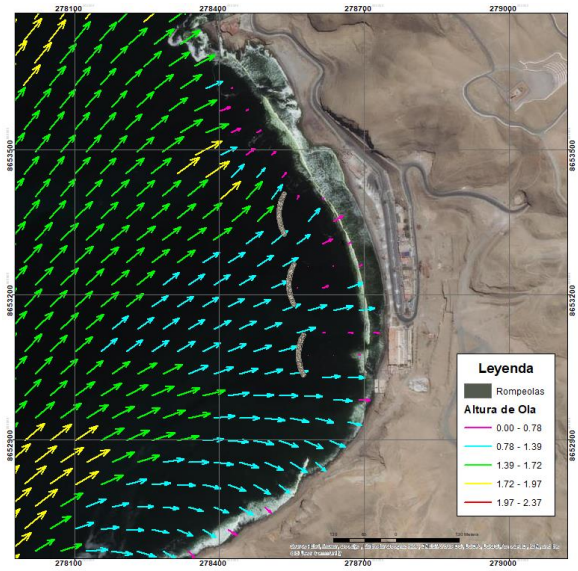
Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 2 para la dirección suroeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 63

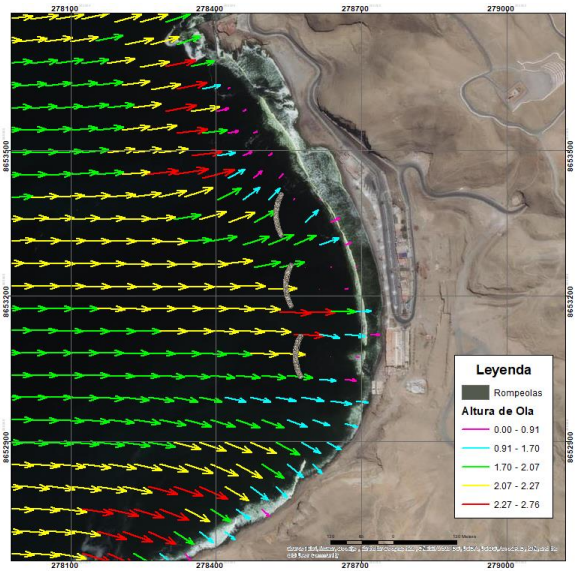
Modelamiento del oleaje dirección suroeste en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 2 para la dirección suroeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 64

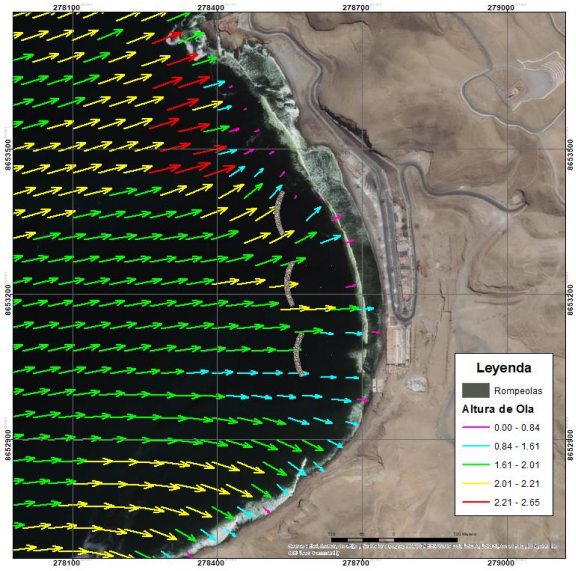
Modelamiento del oleaje dirección oeste en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 2 para la dirección oeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 65

Modelamiento del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS

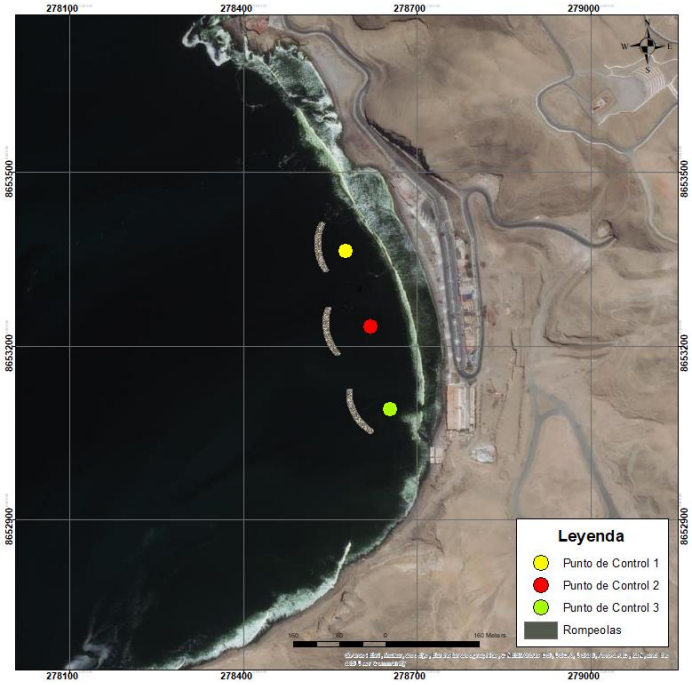


Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas del Modelo 2 para la dirección oeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Para evaluar el comportamiento del oleaje frente a los 2 sistemas de rompeolas se colocó 3 puntos de control. Cada uno entre el rompeolas y la costa, con el fin de obtener la altura de ola que se generaba en el lugar dependiendo de la condición que se presentara, tal como se observa en la Figura 66.

Figura 66

Puntos de control del sistema de rompeolas en la Playa La Herradura



Nota. Puntos de control ubicados entre el sistema de rompeolas del modelo 1 y la costa de la playa La Herradura.

Con la altura de ola de cada punto de control se elaboró un cuadro resumen en el cual se comparó el porcentaje de reducción de la altura de ola generada por los 2 sistemas de rompeolas, en condición predominante Tabla 12 y condición máxima Tabla 13.

Tabla 12

Altura de ola en (m) en la costa de la playa La Herradura para la condición predominante

PUNTO CONTROL	DIRECCIÓN	SIN ROMPEOLAS	CON MODELO (1)	CON MODELO (2)	REDUCCION (1)	REDUCCION (2)
P1	SUR	0.910	0.366	0.336	-59.82%	-63.11%
	SUROESTE	1.086	0.452	0.481	-58.43%	-55.75%
	OESTE	1.216	0.412	0.418	-66.12%	-65.61%
P2	SUR	0.955	0.034	0.020	-96.41%	-97.90%
	SUROESTE	1.297	0.060	0.064	-95.40%	-95.07%
	OESTE	1.974	0.009	0.011	-99.53%	-99.46%
P3	SUR	0.916	0.007	0.008	-99.20%	-99.11%
	SUROESTE	1.313	0.005	0.013	-98.61%	-99.03%
	OESTE	1.825	0.013	0.052	-98.33%	-97.17%

Tabla 13

Altura de ola en (m) en la costa de la playa La Herradura para la condición máxima

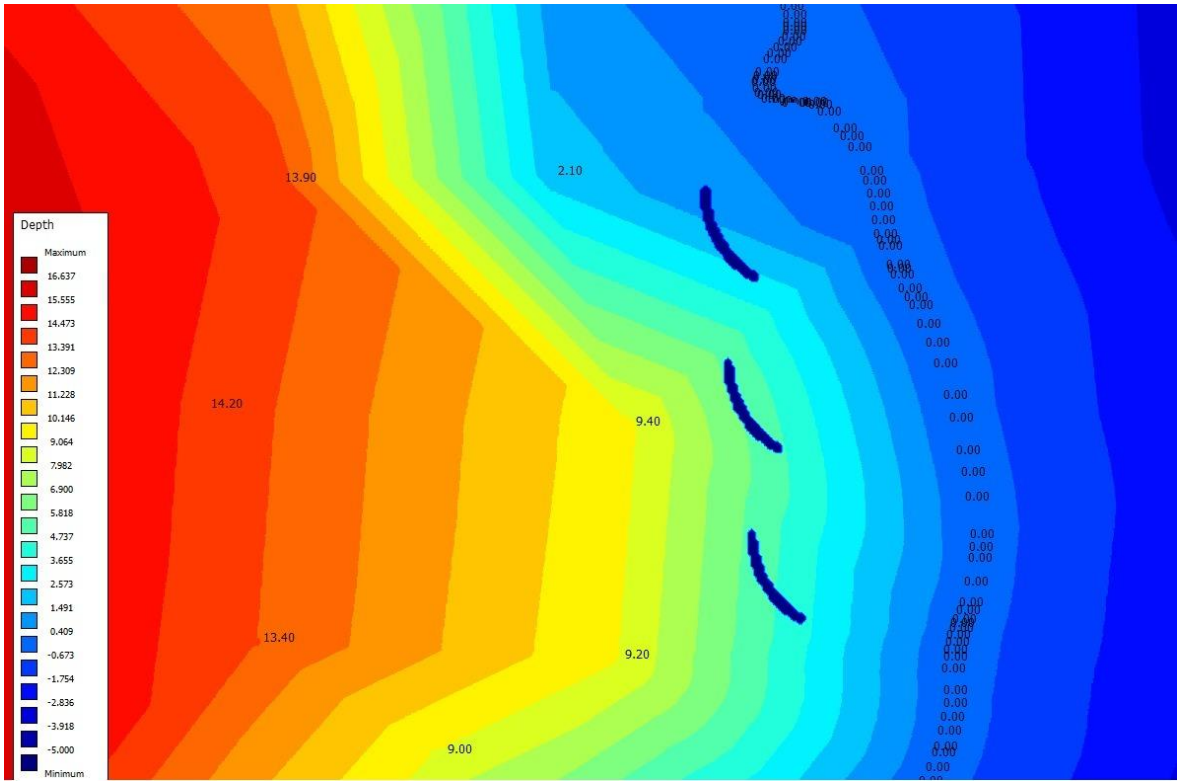
PUNTO CONTROL	DIRECCIÓN	SIN ROMPEOLAS	CON MODELO (1)	CON MODELO (2)	REDUCCION (1)	REDUCCION (2)
P1	SUR	1.042	0.491	0.527	-52.87%	-49.44%
	SUROESTE	1.342	0.668	0.711	-50.25%	-47.03%
	OESTE	1.271	0.623	0.485	-51.01%	-61.82%
P2	SUR	1.949	0.041	0.038	-97.92%	-98.03%
	SUROESTE	2.326	0.075	0.079	-98.77%	-96.61%
	OESTE	2.026	0.023	0.013	-98.84%	-99.35%
P3	SUR	1.730	0.013	0.012	-99.46%	-99.30%
	SUROESTE	1.839	0.082	0.067	-99.16%	-96.34%
	OESTE	1.863	0.319	0.275	-90.18%	-85.25%

7.3 CORRECCIÓN DEL DISEÑO DEL ROMPEOLAS

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 10 y Tabla 11. El modelo 2 presentaba mejor reducción de la altura de ola. Sin embargo, el rompeolas ubicado en la parte superior presentó una baja reducción de altura de ola. Por tal motivo, se diseñó un tercer modelo en el cual se giró 30° sobre su eje a los 3 rompeolas, ya que la dirección del oleaje se desviaba hacia el norte. Además, se mantuvo la separación entre rompeolas en el eje X de 20 m como lo mostrado en el modelo 1 y la separación en el eje Y de 60 m entre cada estructura. El modelo 3 se muestra en la Figura 67.

Figura 67

Modelamiento de sistema de rompeolas en Delft-3D

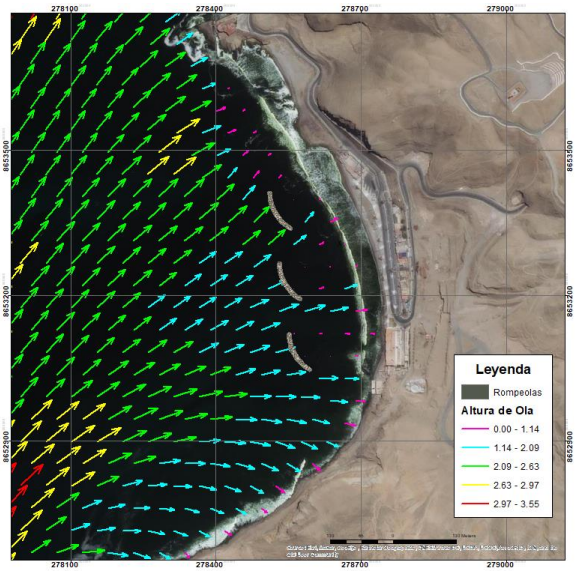


Nota. Modelo 3: Rompeolas convexos distanciados cada 20 metros en el eje X y girados 30° cada rompeolas en su propio eje. modelados en el software Delft-3D.

Para este tercer modelo se hizo el mismo proceso en el programa Delft-3D y los vectores se exportaron a ArcGIS. En la Figura 68, Figura 70 y Figura 72 se puede apreciar el comportamiento del oleaje en la condición máxima. Mientras que en la Figura 69, Figura 71 y Figura 73 se observa el comportamiento del oleaje en la condición predominante.

Figura 68

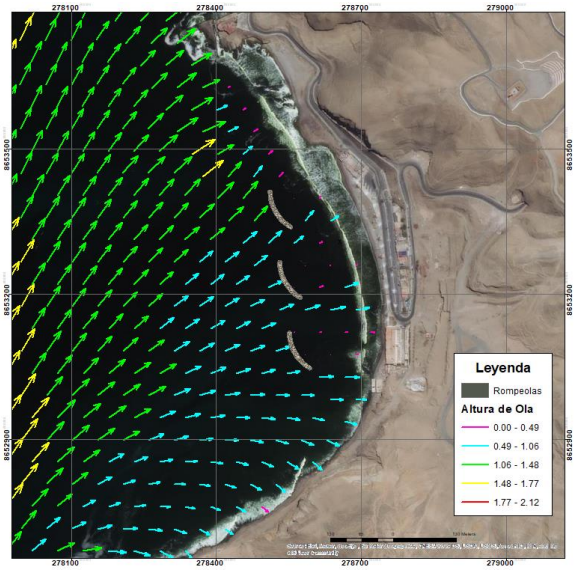
Modelado del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas convexo propuesto para la dirección sur en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 69

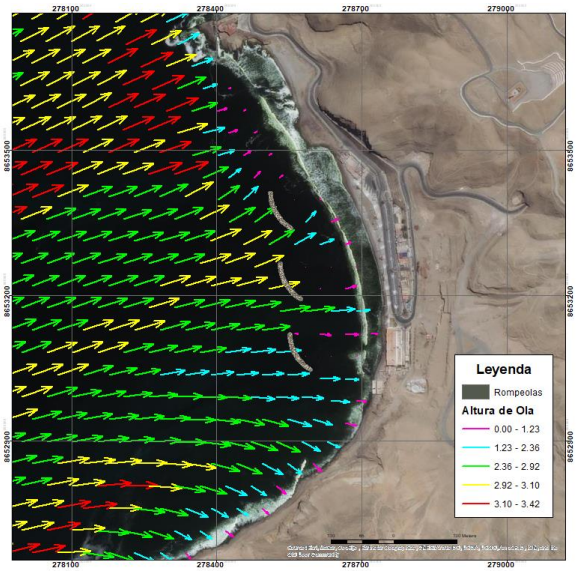
Modelamiento del oleaje en dirección sur predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas convexo propuesto para la dirección sur en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 70

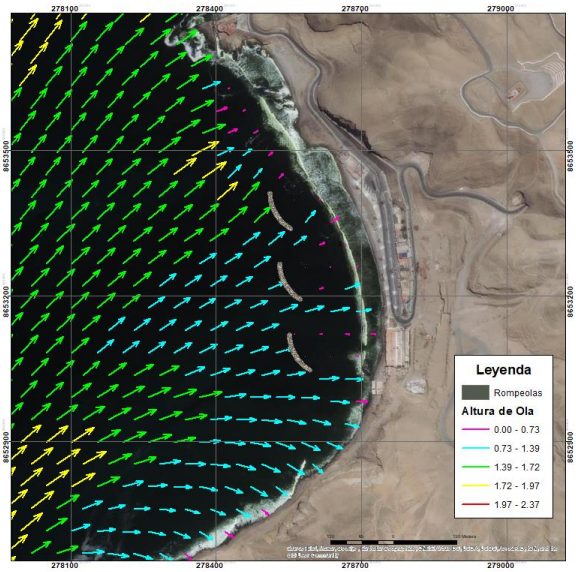
Modelamiento del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas convexo propuesto para la dirección suroeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 71

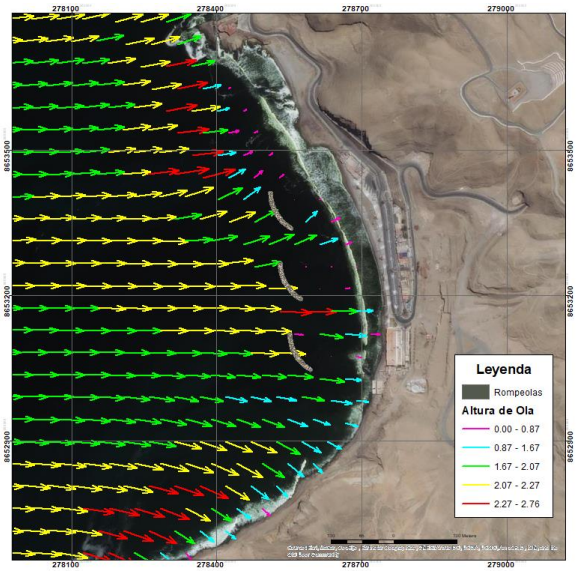
Modelado del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas convexo propuesto para la dirección suroeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 72

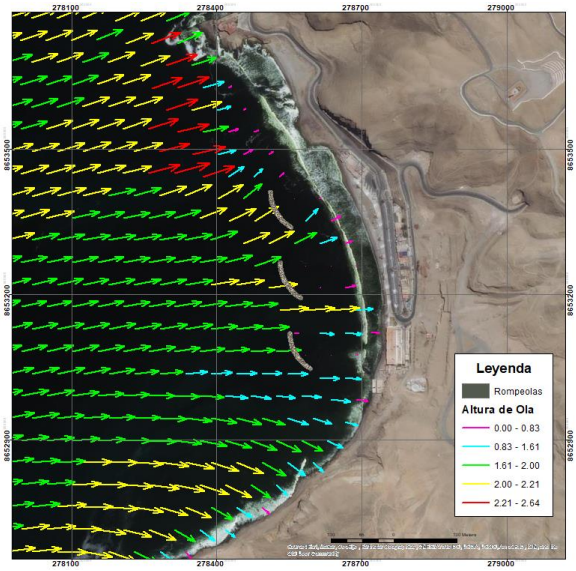
Modelado del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas convexo propuesto para la dirección oeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 73

Modelado del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas convexo propuesto para la dirección oeste en condición predominante en playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Los resultados obtenidos del modelo 3 se observa en la Tabla 14 y Tabla 15 para las condiciones predominantes y máximas respectivamente. En las tablas se pueden observar que las olas son reducidas en el área de sotavento de los rompeolas en los 3 puntos de control.

Tabla 14

Altura de ola en (m) para el modelo 3 (corregido) para la condición predominante

PUNTO CONTROL	DIRECCIÓN	SIN ROMPEOLAS	CON MODELO (3) - CORREGIDO	REDUCCION (3) - CORREGIDO
P1	SUR	0.910	0.056	-93.86%
	SUROESTE	1.086	0.015	-98.58%
	OESTE	1.216	0.007	-99.45%
P2	SUR	0.955	0.018	-98.13%
	SUROESTE	1.297	0.017	-98.70%
	OESTE	1.974	0.004	-99.79%
P3	SUR	0.916	0.011	-99.28%
	SUROESTE	1.313	0.024	-99.09%
	OESTE	1.825	0.160	-98.60%

Tabla 15

Altura de ola en (m) para el modelo 3 (corregido) para la condición máxima

PUNTO CONTROL	DIRECCIÓN	SIN ROMPEOLAS	CON MODELO (3) - CORREGIDO	REDUCCION (3) - CORREGIDO
P1	SUR	1.042	0.085	-91.80%
	SUROESTE	1.342	0.017	-98.75%
	OESTE	1.271	0.027	-97.85%
P2	SUR	1.949	0.018	-99.05%
	SUROESTE	2.326	0.019	-99.19%
	OESTE	2.026	0.006	-99.70%
P3	SUR	1.730	0.011	-99.38%
	SUROESTE	1.839	0.024	-98.69%
	OESTE	1.863	0.160	-91.41%

En la Tabla 16 se presenta las reducciones de olas en (%) de los 3 modelos de rompeolas. En la cual, se puede concluir, que el modelo 3 presenta una mejor reducción de ola respecto a los modelos 1 y 2.

Tabla 16

Comparación de reducción de ola en (%) de los 3 modelos

CONDICIÓN	PUNTO CONTROL	DIRECCIÓN	REDUCCION 1	REDUCCION 2	REDUCCION 3
PREDOMINANTE	P1	SUR	-59.82%	-63.11%	-93.86%
		SUROESTE	-58.43%	-55.75%	-98.58%
		OESTE	-66.12%	-65.61%	-99.45%
	P2	SUR	-96.41%	-97.90%	-98.13%
		SUROESTE	-95.40%	-95.07%	-98.70%
		OESTE	-99.53%	-99.46%	-99.79%
	P3	SUR	-99.20%	-99.11%	-99.28%
		SUROESTE	-98.61%	-99.03%	-99.09%
		OESTE	-98.33%	-97.17%	-98.60%
MÁXIMAS	P1	SUR	-52.87%	-49.44%	-91.80%
		SUROESTE	-50.25%	-47.03%	-98.75%
		OESTE	-51.01%	-61.82%	-97.85%
	P2	SUR	-97.92%	-98.03%	-99.05%
		SUROESTE	-96.76%	-96.61%	-99.19%
		OESTE	-98.84%	-99.35%	-99.70%
	P3	SUR	-99.24%	-99.30%	-99.38%
		SUROESTE	-95.55%	-96.34%	-98.69%
		OESTE	-82.88%	-85.25%	-91.41%

Debido a que el modelo 3 presenta mejores resultados en reducción de ola respecto a los modelos 1 y 2, se toma como el modelo propuesto para esta tesis. Este modelo 3 será comparado con los rompeolas rectos en el siguiente capítulo.

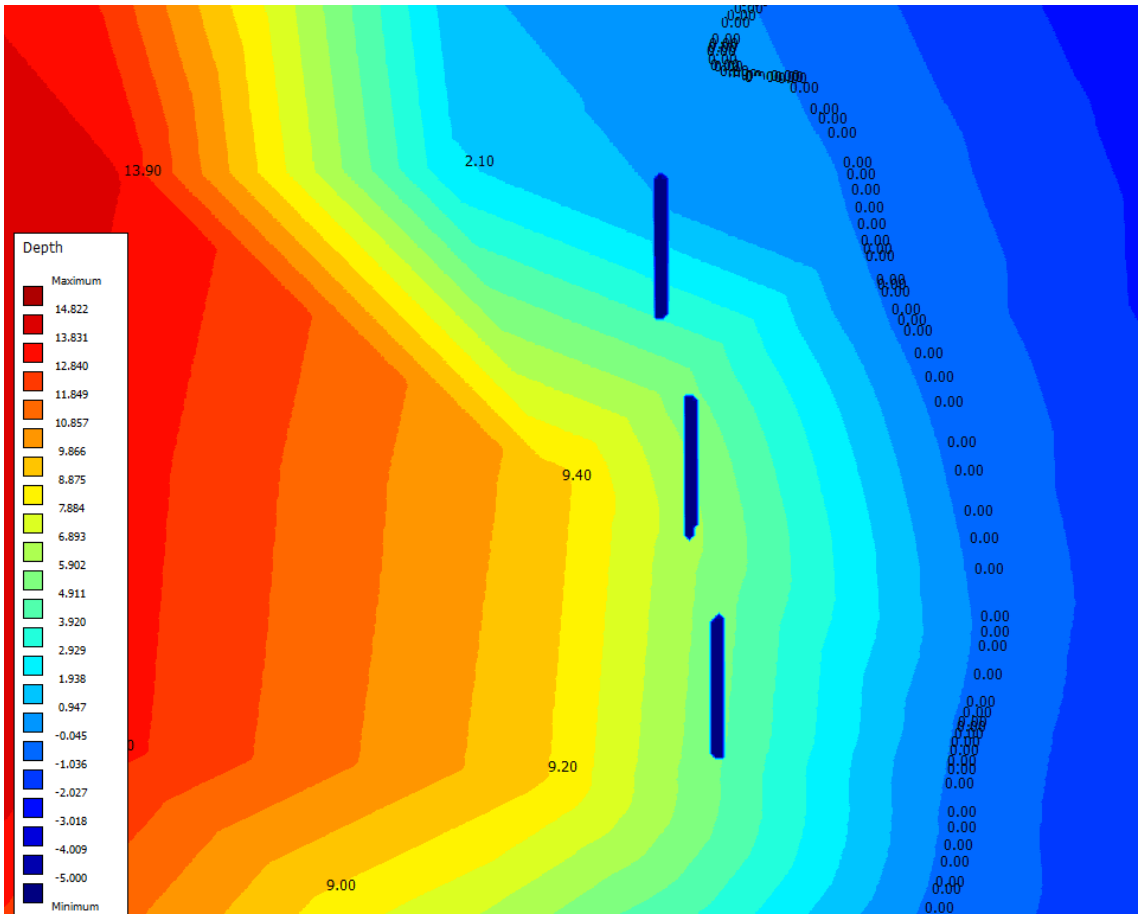
8 CAPÍTULO VII: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA PROPUESTA CON ROMPEOLAS CONVENCIONALES.

8.1 DATOS DE PROTECCIÓN DE ROMPEOLAS CONVECIONAL

Se diseñó un sistema convencional de rompeolas rectos, los cuales están ubicados en las mismas coordenadas que los rompeolas convexos. De igual manera, las dimensiones y distancia de separación de la costa es la misma que los rompeolas propuestos. Con el fin de obtener resultados en condiciones iguales como se puede observar en la Figura 74.

Figura 74

Modelado de rompeolas rectos en Delft-3D

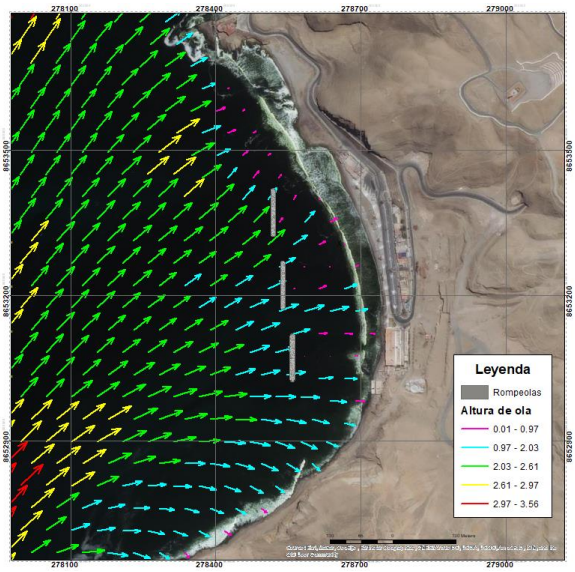


Nota. Rompeolas rectos distanciados cada 20 metros modelados en el software Delft-3D.

Para este modelo convencional se hizo el mismo proceso en el programa Delft-3D y los vectores se exportaron a ArcGIS. En la Figura 75, Figura 77 y Figura 79 se puede apreciar el comportamiento del oleaje en la condición máxima. Mientras que en la Figura 76, Figura 78 y Figura 80 se observa el comportamiento del oleaje en la condición predominante.

Figura 75

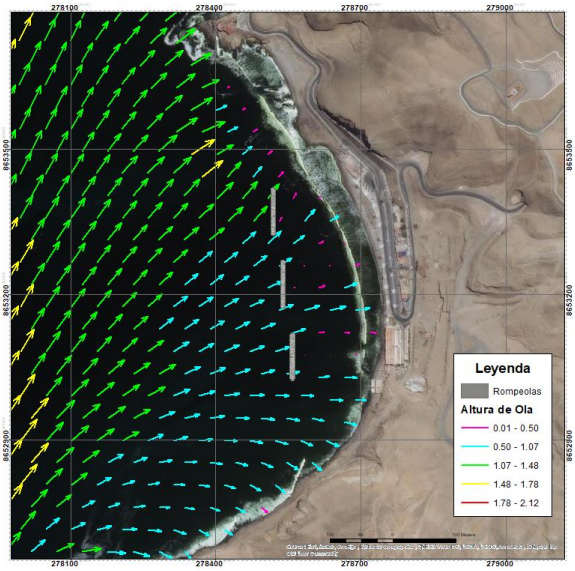
Modelado del oleaje dirección sur máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas recto para la dirección sur en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 76

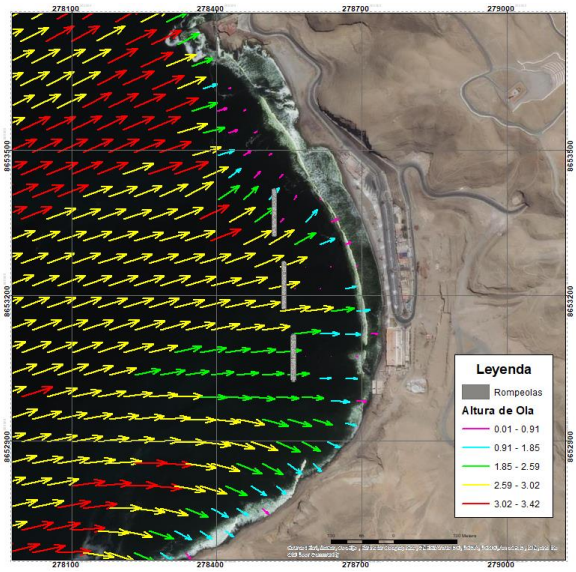
Modelado del oleaje dirección sur predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas recto para la dirección sur en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 77

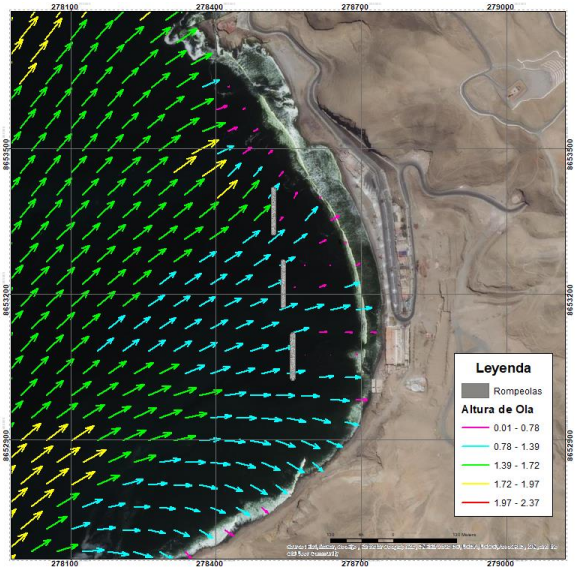
Modelado del oleaje dirección suroeste máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas recto para la dirección suroeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 78

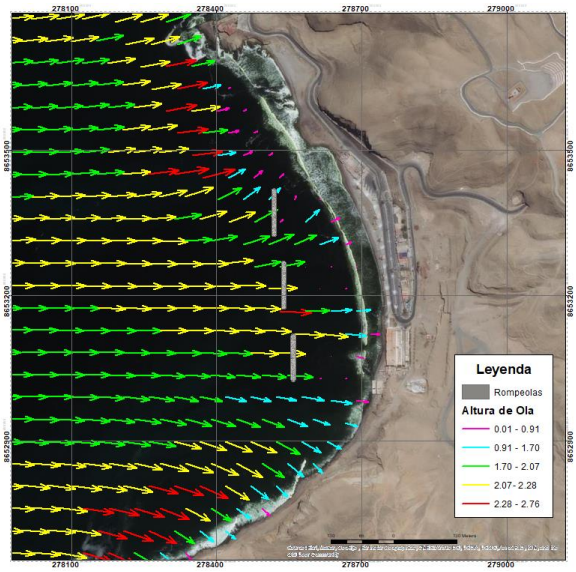
Modelado del oleaje dirección suroeste predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas recto para la dirección suroeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 79

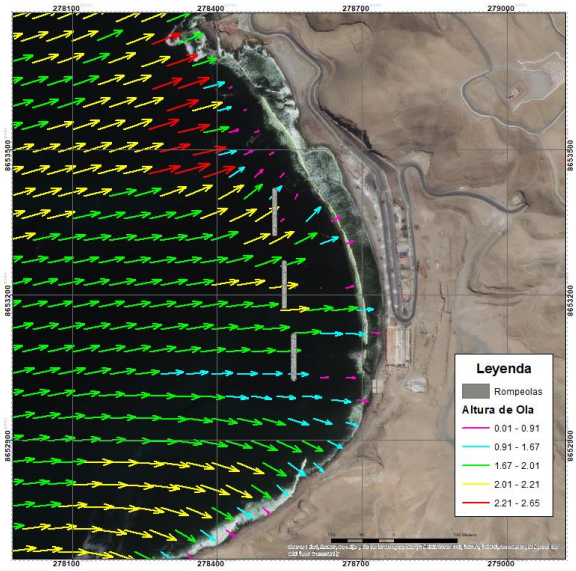
Modelado del oleaje dirección oeste máxima en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas recto para la dirección oeste en condición máxima en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Figura 80

Modelado del oleaje dirección oeste predominante en ArcGIS



Nota. Comportamiento de la dirección y altura de las olas del rompeolas recto para la dirección oeste en condición predominante en la playa La Herradura con el programa ArcGIS.

Los resultados del modelamiento del rompeolas recto son mostrados en la Tabla 17. La condición predominante presentó una reducción de ola promedio del 76.16%. La condición máxima presentó una reducción de ola promedio del 65.99%.

Tabla 17

Reducción de altura de ola en (%) del rompeolas recto

CONDICIÓN	PUNTO CONTROL	DIRECCIÓN	SIN ROMPEOLAS	CON ROMPEOLAS RECTO	REDUCCION (%)
PREDOMINNTE	P1	SUR	0.910	0.566	-37.80%
		SUROESTE	1.086	0.589	-45.80%
		OESTE	1.216	0.774	-36.36%
	P2	SUR	0.955	0.108	-88.75%
		SUROESTE	1.297	0.062	-95.23%
		OESTE	1.974	0.019	-99.02%
	P3	SUR	0.916	0.010	-98.93%
		SUROESTE	1.313	0.019	-98.54%
		OESTE	1.825	0.274	-85.01%
MÁXIMA	P1	SUR	1.042	0.887	-14.85%
		SUROESTE	1.342	0.800	-40.36%
		OESTE	1.271	0.819	-35.59%
	P2	SUR	1.949	0.802	-58.86%
		SUROESTE	2.326	0.090	-96.15%
		OESTE	2.026	0.020	-99.01%
	P3	SUR	1.73	0.015	-99.15%
		SUROESTE	1.839	0.195	-89.40%
		OESTE	1.863	0.735	-60.54%

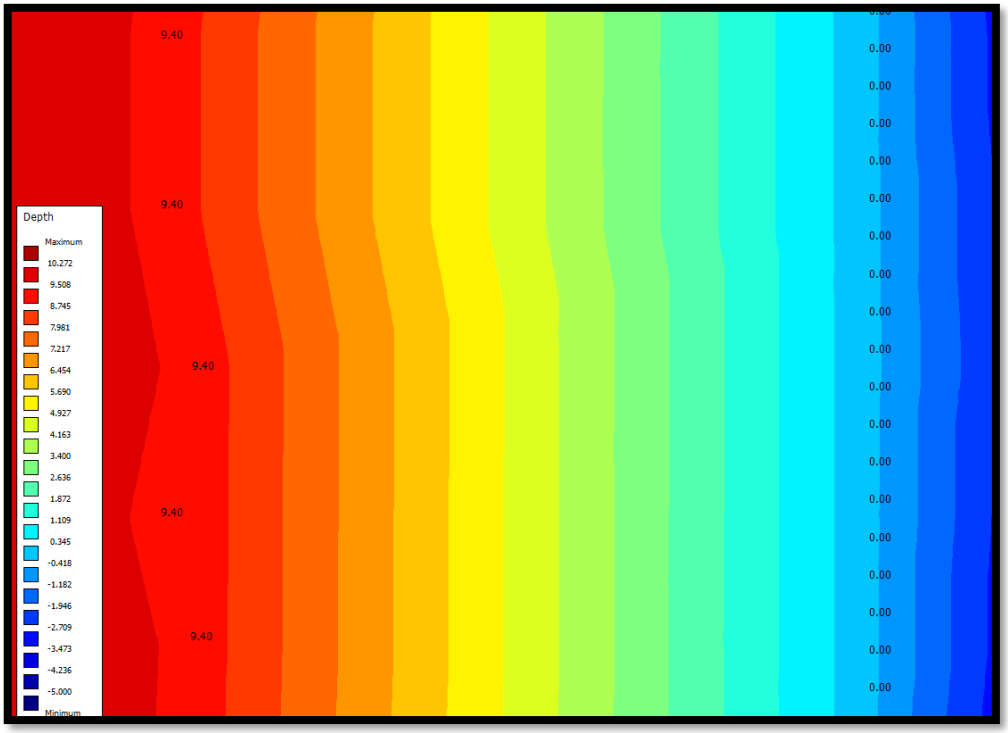
8.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN UN CASO SIMPLIFICADO

Para el caso simplificado se trabajó en una playa recta con una pendiente similar a la playa La Herradura. En este caso simplificado se presenta el resultado en gráficas de alturas de ola para las condiciones predominantes y máximas en cada dirección de ola para los rompeolas rectos y los rompeolas propuestos convexos.

En la Figura 81 se presenta la batimetría de una playa recta trabajada para el caso simplificado. La batimetría se creó con una pendiente del 3.3% similar a la pendiente presente en la playa La Herradura.

Figura 81

Modelado de una playa lineal en Delft-3D



Nota. Batimetría creada en el software Delft-3D con una pendiente del 3.3%.

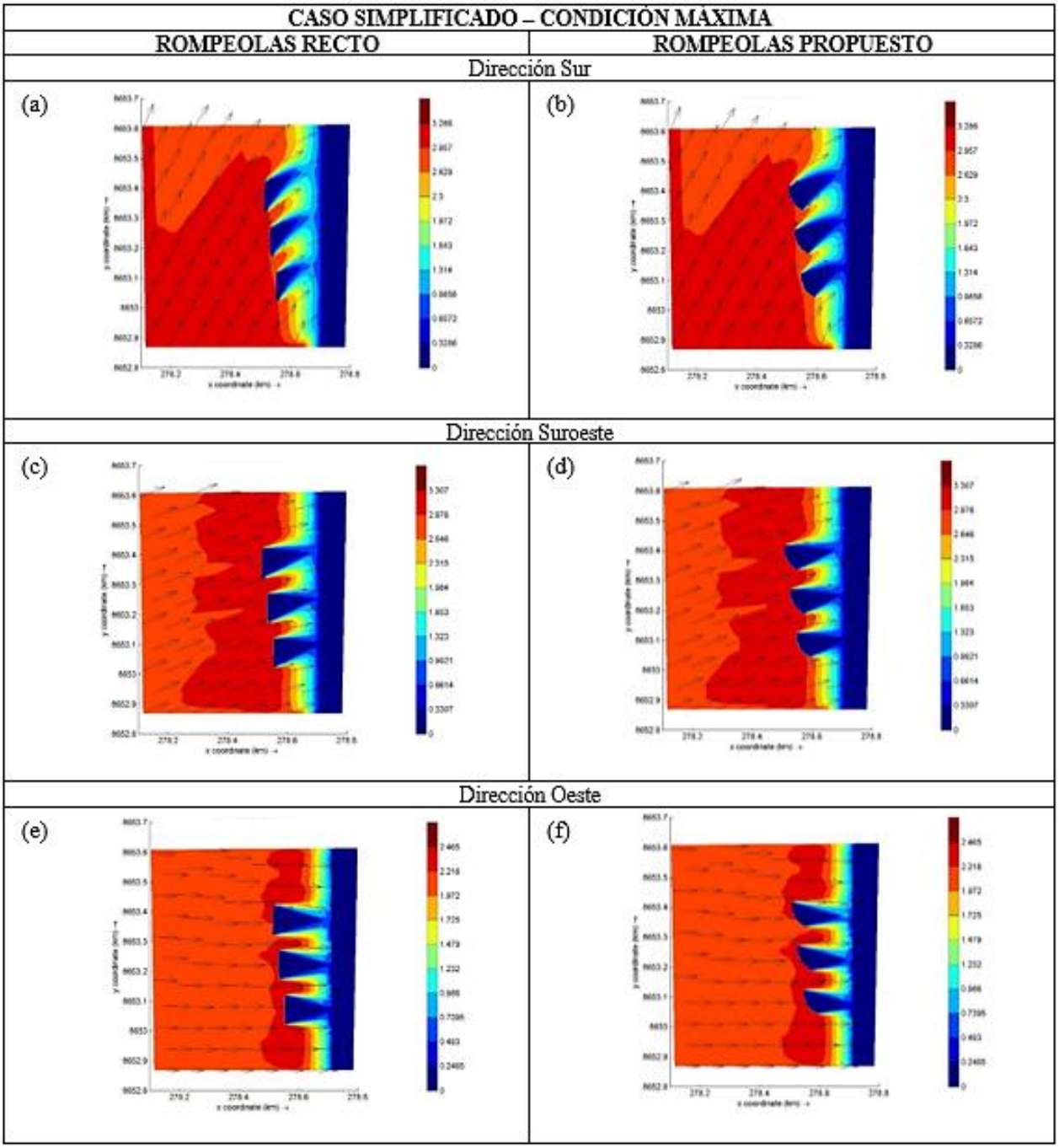
Los rompeolas para esta simulación contaron con una longitud de 90 m y 60 m de separación entre ellas, como lo modelado en la playa la Herradura. Los rompeolas se ubicaron a 170 m desde la costa.

En las Figuras 82 y 83 se muestra una comparativa de resultado en gráficas de alturas y dirección de ola para las condiciones máximas y predominantes respectivamente. Estos

resultados son presentados con los datos procesados de aguas profundas y llevadas a la costa en un caso simplificado con ayuda del software Delft-3D.

Figura 82

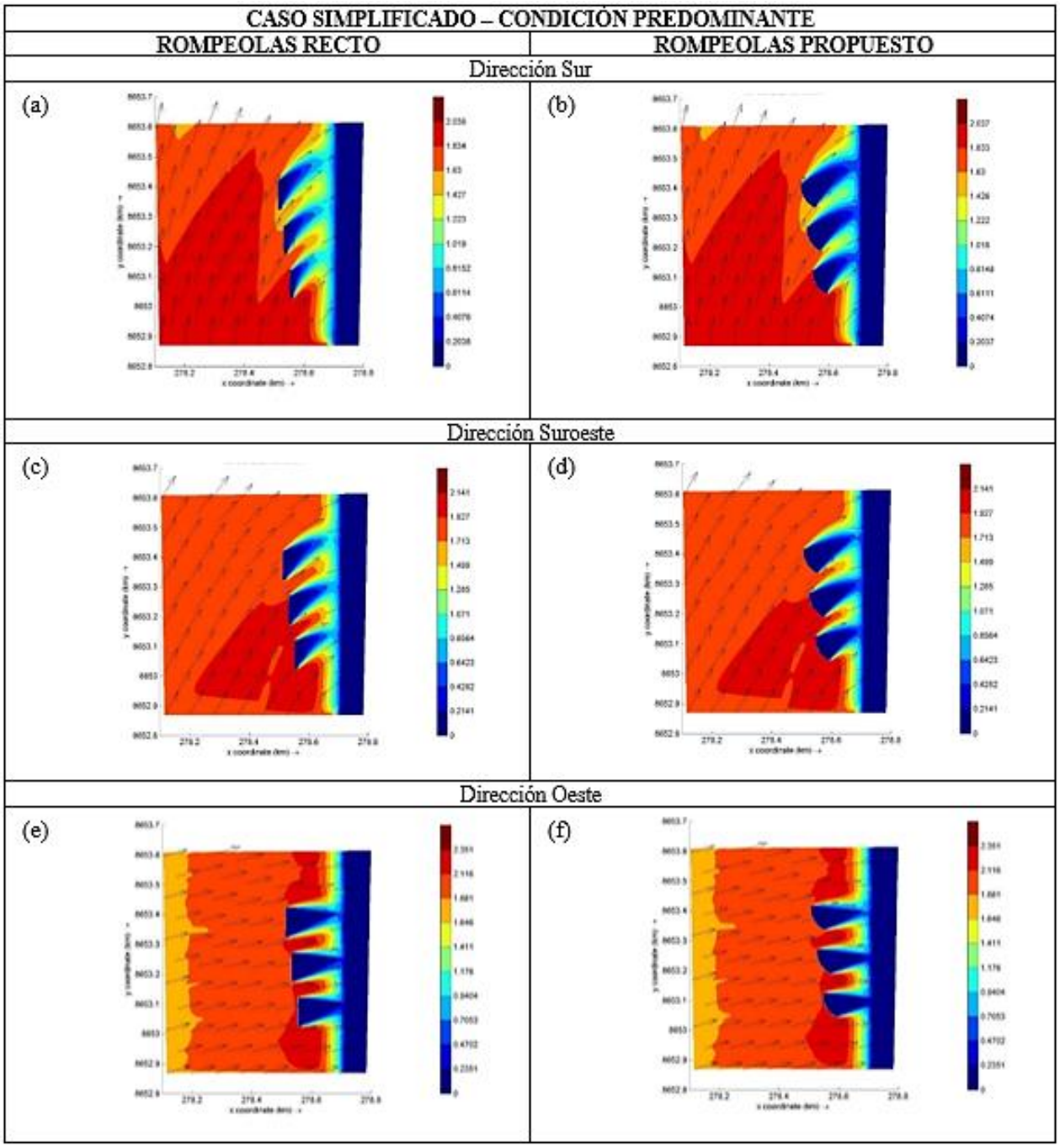
Comparación entre casos simplificados de rompeolas recto y convexo en Delft-3D



Nota. Gráfica y altura de ola en la condición máxima para los rompeolas rectos y rompeolas convexos propuestos respectivamente (a) y (b) dirección sur, (c) y (d) dirección suroeste, (e) y (f) dirección oeste.

Figura 83

Comparación entre casos simplificados de rompeolas recto y convexo en Delft-3D



Nota. Gráfica y altura de ola en la condición predominante para los rompeolas rectos y rompeolas convexos propuestos respectivamente (a) y (b) dirección sur, (c) y (d) dirección suroeste, (e) y (f) dirección oeste.

En la Tabla 18, se muestra las alturas de ola al implementar un sistema de rompeolas recto y un sistema de rompeolas convexo, como lo propuesto en la zona de estudio. De estos resultados, se evaluó la capacidad de reducción de ola en porcentaje del sistema de rompeolas convexo respecto al sistema de rompeolas recto, por lo que también es presentado en la misma tabla para la condición predominante y máxima en un caso simplificado. El punto de control 1 está posicionado en el área protegida del rompeolas de la zona norte, el punto de control 2 en el área protegida del rompeolas central y el punto de control 3 en el área protegida del rompeolas de la zona sur.

Tabla 18

Altura de ola para los rompeolas rectos y propuestos convexos y su diferencia en reducción de ola

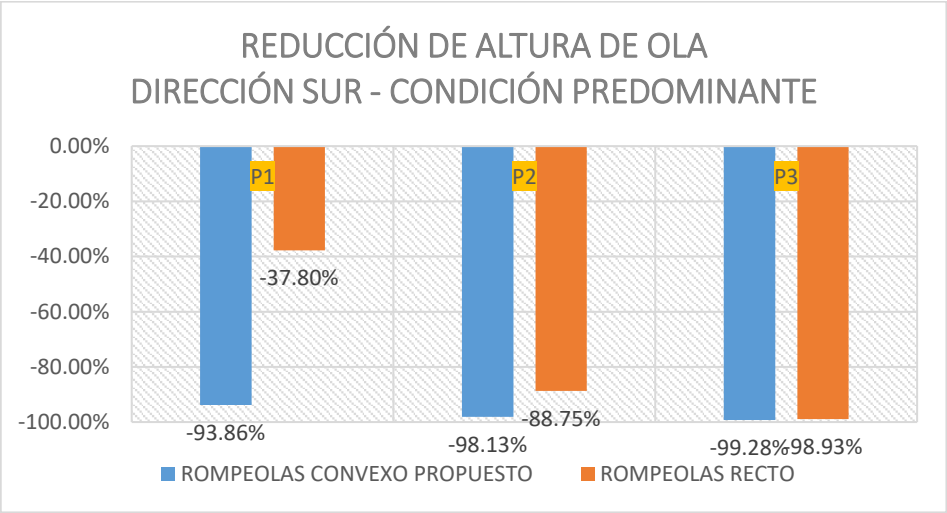
PUNTOS DE CONTROL	DIRECCIÓN	PREDOMINANTE			MÁXIMAS		
		ROMPEOLAS RECTO	ROMPEOLAS CONVEXO	DIF. REDUC. DE OLA (%)	ROMPEOLAS RECTO	ROMPEOLAS CONVEXO	DIF. REDUC. DE OLA (%)
P1	SUR	0.566	0.056	-90.13%	0.887	0.085	-90.37%
	SUROESTE	0.589	0.015	-97.38%	0.800	0.017	-97.91%
	OESTE	0.774	0.007	-99.14%	0.819	0.027	-96.66%
P2	SUR	0.107	0.018	-83.40%	0.802	0.018	-97.70%
	SUROESTE	0.062	0.017	-72.68%	0.090	0.019	-78.96%
	OESTE	0.019	0.004	-78.43%	0.019	0.006	-68.13%
P3	SUR	0.010	0.007	-33.23%	0.015	0.011	-26.93%
	SUROESTE	0.019	0.012	-37.69%	0.195	0.024	-87.69%
	OESTE	0.274	0.026	-90.68%	0.735	0.160	-78.22%

8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ROMPEOLAS RECTO CON EL ROMPEOLAS PROPUESTO EN LA PLAYA LA HERRADURA

En esta sección se realiza una comparativa de los resultados obtenidos del rompeolas propuesto con el rompeolas recto en la playa La Herradura. La información presentada en esta sección del rompeolas propuesto ha sido trabajada en el capítulo 6 como modelo 3, y los resultados del rompeolas recto ha sido trabajado en el capítulo 7. Estos resultados son representados mediante gráficas de barras, en la cual, se muestra una comparativa en reducción de altura de ola para los 2 modelos. Los puntos de control evaluados en la comparativa son los representados en la Figura 62. En las Figuras 84 y 85, Figuras 86 y 87 y las Figuras 88 y 89 se muestran los resultados en % para las direcciones de ola Sur, Suroeste y Oeste respectivamente.

Figura 84

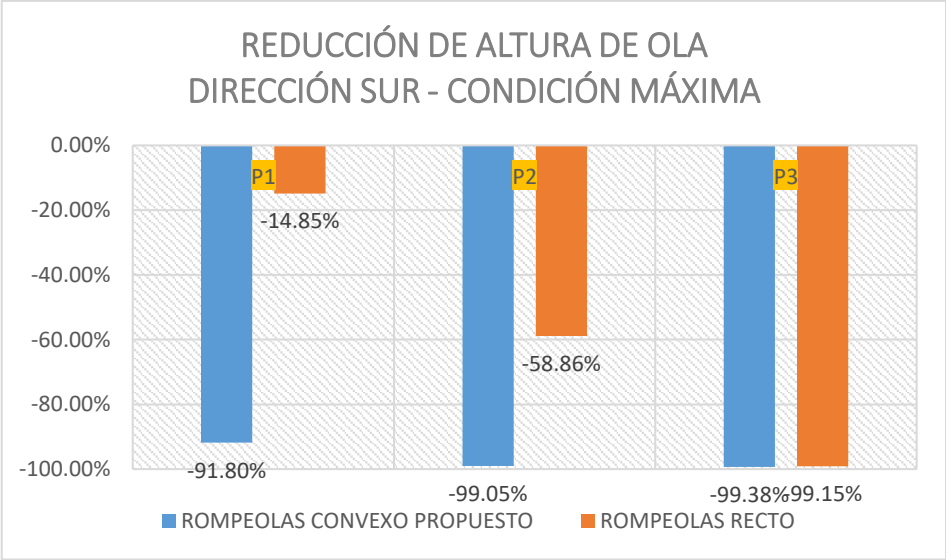
Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Sur – condición predominante



En la Figura 84 se muestra los siguientes resultados para la dirección sur predominante. En el punto de control 1, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 93.86%, mientras que el rompeolas recto en un 37.80%. En el punto de control 2, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 98.13%, mientras que el rompeolas recto en un 88.75%. En el punto de control 3, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.28%, mientras que el rompeolas recto en un 98.93%.

Figura 85

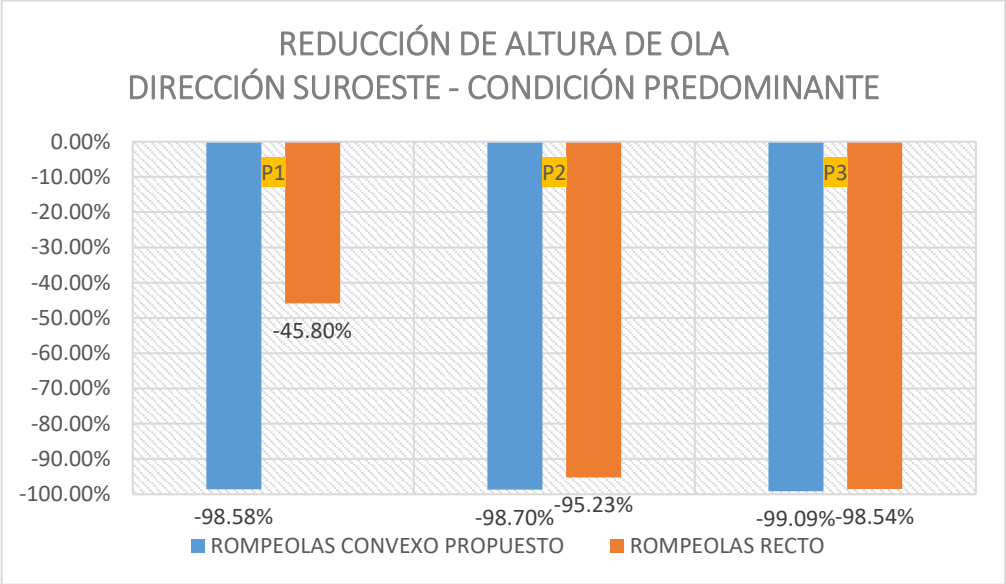
Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Sur – condición máxima



En la Figura 85 se muestra los siguientes resultados para la dirección sur máxima. En el punto de control 1, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 91.80%, mientras que el rompeolas recto en un 14.85%. En el punto de control 2, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.05%, mientras que el rompeolas recto en un 58.86%. En el punto de control 3, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.38% y el rompeolas recto en un 99.15%.

Figura 86

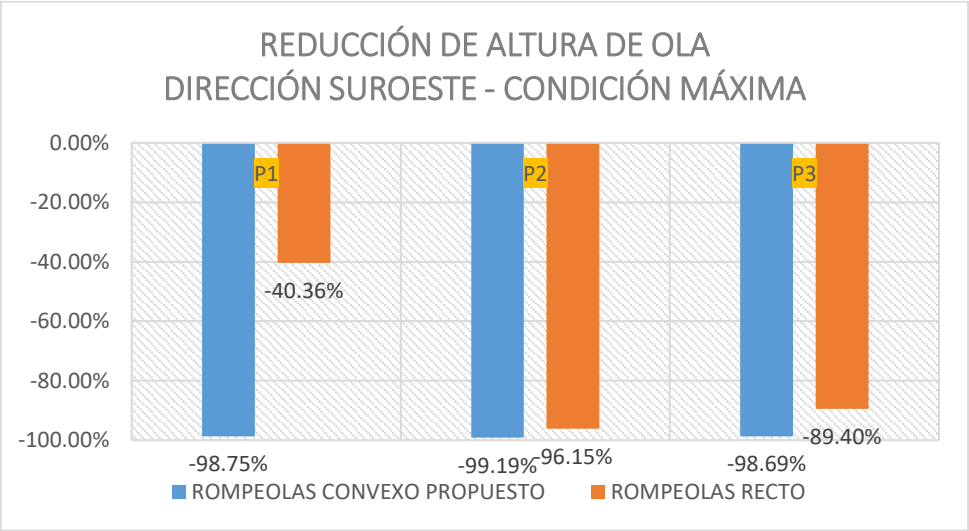
Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Suroeste – condición predominante



En la Figura 86 se muestra los siguientes resultados para la dirección suroeste predominante. En el punto de control 1, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 98.58%, mientras que el rompeolas recto en un 45.80%. En el punto de control 2, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 98.70%, mientras que el rompeolas recto en un 95.23%. En el punto de control 3, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.09% y el rompeolas recto en un 98.54%.

Figura 87

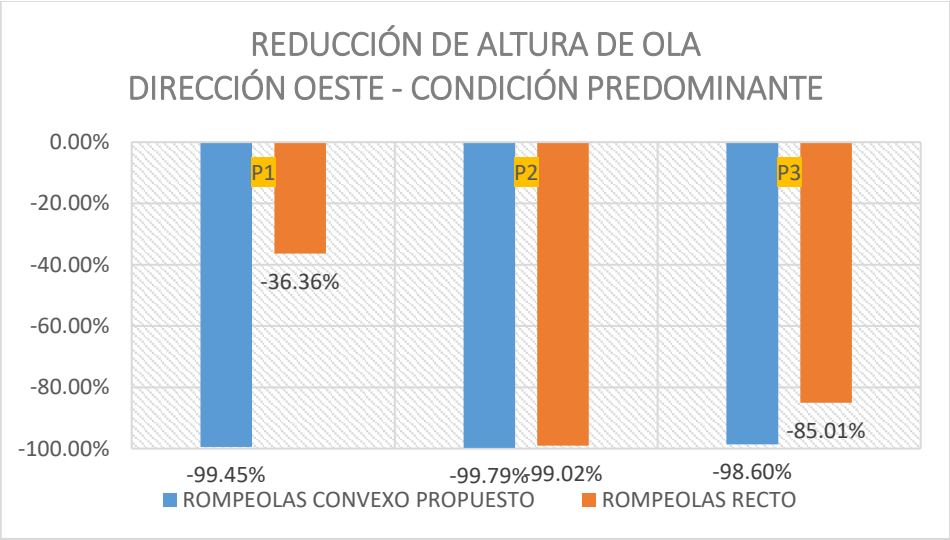
Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Suroeste – condición máxima



En la Figura 87 se muestra los siguientes resultados para la dirección suroeste máxima. En el punto de control 1, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 98.75%, mientras que el rompeolas recto en un 40.36%. En el punto de control 2, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.19%, mientras que el rompeolas recto en un 96.15%. En el punto de control 3, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 98.69% y el rompeolas recto en un 89.40%.

Figura 88

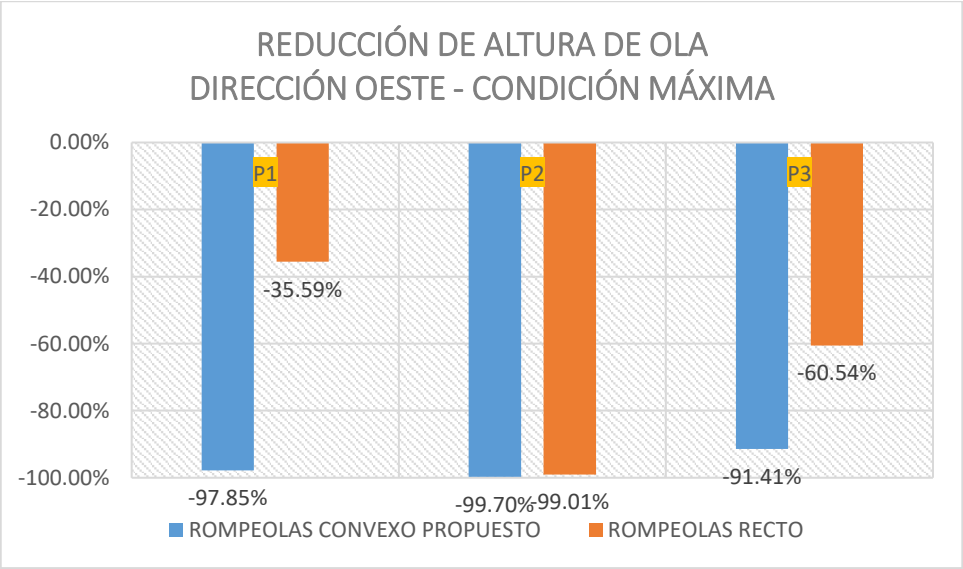
Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Oeste – condición predominante



En la Figura 88 se muestra los siguientes resultados para la dirección oeste predominante. En el punto de control 1, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.45%, mientras que el rompeolas recto en un 36.36%. En el punto de control 2, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.79%, mientras que el rompeolas recto en un 99.02%. En el punto de control 3, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 98.60% y el rompeolas recto en un 85.01%.

Figura 89

Gráfica de reducción de altura de ola para la dirección Oeste – condición máxima



En la Figura 89 se muestra los siguientes resultados para la dirección oeste máxima. En el punto de control 1, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 97.85%, mientras que el rompeolas recto en un 35.59%. En el punto de control 2, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 99.70%, mientras que el rompeolas recto en un 99.01%. En el punto de control 3, el rompeolas convexo logra disminuir la altura de ola en un 91.41% y el rompeolas recto en un 60.54%.

Como se observa en las gráficas, el rompeolas propuesto frente al rompeolas recto muestra mejores resultados. Esto se evidencia, en mayor medida, en los puntos de control 1 y 2. Ya que la variación del resultado entre los 2 modelos de rompeolas alcanza hasta los 50% de diferencia, obteniendo un mayor porcentaje de reducción de ola en los rompeolas convexos.

Respecto al punto de control 3, la diferencia de reducción de ola entre los 2 modelos es mínima. Sin embargo, en los 2 modelos de rompeolas, se logra disminuir la altura de ola hasta en más del 98%.

Se puede concluir que el modelo del rompeolas convexo propuesto logra disminuir la altura de ola en más de un 40% en el área de sotavento o área protegida con mejores resultados que el rompeolas recto.

CONCLUSIONES

Objetivo General

El rompeolas convexo puede disminuir en más de un 40% la altura de ola, siendo más eficiente que un rompeolas recto. Lo que permitiría reducir la erosión en la playa La Herradura y aumentar la sedimentación en la zona de estudio.

Objetivos Específicos

Objetivo N°1: Recolectar datos batimétricos característicos de la playa la herradura.

1. La playa La Herradura, ubicada en el distrito de Chorrillos, presenta una forma cóncava correspondiente a una bahía. Además, presenta una extensión de 550 m, medida obtenida con el programa Google Earth.
2. La pendiente promedio de la playa es del 3.3%. Además, para la curva de nivel de 5 m es más pronunciada en la Recta N°4 con un valor de 4.17%, la cual indica que es la zona más afectada por la fuerza del oleaje.
3. Los tipos de sedimentos en la playa con mayor predominancia son canto rodado y grava. Esto debido a que la capa superior de arena ha sido erosionada por la braveza del oleaje dejando al descubierto este tipo de relieve.

Objetivo N°2: Caracterizar el oleaje en la playa La Herradura.

1. Para la condición predominante de aguas profundas, las alturas de ola promedio son 1.99, 1.90 y 1.97 m para las direcciones Sur, Suroeste y Oeste respectivamente. Para la condición máxima de aguas profundas, las alturas de ola son 4.60, 4.17 y 2.73 m para las mismas direcciones. Las olas en aguas profundas, para la condición máxima presentan mayor energía en la dirección sur y suroeste.
2. El programa Deft-3D permitió modelar la variación en la altura de las olas en aguas profundas cuando llegan a la costa. También se observó que, las olas con mayor altura se dieron en la dirección suroeste y oeste con valores de 1.41m y 1.66 m en condición predominante y para las direcciones sur y suroeste con valores de 2.13 m y 2.93 m para la condición máxima.
3. La zona de rompiente se encuentra a 50 m para la dirección sur predominante y 75 m para la dirección suroeste máxima con respecto a la costa. Se evaluó en ambas direcciones debido a que presentaron mayor altura de ola y se validó con imágenes de Google Earth.

Objetivo N°3: Realizar el diseño del rompeolas con los parámetros obtenidos en los estudios de la playa.

1. Para la formación de salientes, la relación de la longitud del rompeolas respecto a la distancia de la orilla no debería ser menor a 0.5 ni mayor a 0.6 para el software Delft-3d. Debido a que aumenta la probabilidad de que se generen salientes en el rango mencionado.
2. La ubicación del sistema de rompeolas debe estar ubicado detrás de la zona de rompiente, para cumplir con la función de disipar la energía. Por lo que el sistema de rompeolas fue ubicado a 170m de distancia de la costa y a 5.5m de profundidad.
3. Para evitar estancamientos del agua de mar en la playa se trabaja con una relación de B/E=1.5. Por lo que, para el sistema de rompeolas de longitud de 90m, se obtiene una separación entre estructuras de 60m.

Objetivo N°4: Realizar la simulación numérica computacional especializado, mediante el software Delft-3D, para evaluar el comportamiento del rompeolas propuesto en la zona de estudio.

1. Para realizar la simulación numérica computacional de los rompeolas, se eligió el software Delft-3D. Ya que permite modelar rompeolas con las condiciones y parámetros propios de la zona de estudio. Además, evalúa el comportamiento de las olas de aguas profundas hasta llegar a la costa.
2. Los modelos 1 y 2, como se observa en la Figura 52 y 53, logran reducir la altura de ola en el área protegida para las 3 direcciones evaluadas con porcentajes en promedio de 85.76% y 85.80% en condición predominante y 82.05% y 81.46% para la condición máxima para los modelos 1 y 2 respectivamente.
3. El rompeolas propuesto (modelo 3) presenta una inclinación de 30° en su propio eje como se observa en la Figura 67. Con este modelo 3, se logra mejores resultados respecto a los modelos anteriores 1 y 2 como se observa en la Tabla 16. Este modelo logra reducir la altura de ola en promedio en 98.39% para la condición predominante y 97.31% para la condición máxima.

Objetivo N°5: Realizar la comparación de resultados obtenidos de la propuesta con rompeolas convencionales.

1. El rompeolas recto modelado en el software presentó la reducción de ola promedio de 76.16% para la condición predominante y 65.99% para la condición máxima. Sin embargo, los porcentajes obtenidos con el rompeolas recto son menores que el rompeolas convexo.
2. En un caso simplificado, el sistema de rompeolas convexo frente a un sistema de rompeolas recto abarca una mayor área de protección en la zona de sotavento con una pendiente del 3.3% y el mismo oleaje de aguas profundas como se observó en las Figuras 82 y 83.
3. Se realizó una comparación de resultados en reducción de ola en la playa La Herradura entre los rompeolas convexos propuestos y el rompeolas recto, evaluados en 3 puntos de control. De la cual se observó qué, en el punto de control 1 el rompeolas convexo propuesto logra una mejor reducción de ola en un 96.72% en promedio frente al 35.13% del rompeolas recto. En los puntos de control 2 y 3, el rompeolas convexo logra una reducción de ola promedio de 98.42% mientras que el rompeolas recto un 89.05%. Por lo que, según los resultados obtenidos, el rompeolas convexo propuesto presenta mayor eficiencia en la reducción de altura de ola frente al sistema de rompeolas convencional.

RECOMENDACIONES

Objetivo N°1: Recolectar datos batimétricos característicos de la playa la herradura.

- En la adquisición de los datos batimétricos se recomienda solicitar la información a la División de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN), para poder tener datos muchos más cercanos a los que se encuentran en la playa La Herradura como lo es la altura de ola.

Objetivo N°2: Caracterizar el oleaje en la playa La Herradura.

- Para la caracterización del oleaje se recomienda obtener datos con un rango de tiempo mayor a 30 años. Ya que el oleaje es fluctuante y de esta forma se puede tener un mejor contraste en los parámetros de ola como altura, dirección y periodo de las olas.

Objetivo N°3: Realizar el diseño del rompeolas con los parámetros obtenidos en los estudios de la playa.

- En el diseño del rompeolas se recomienda tomar en cuenta la relación de la distancia del rompeolas con respecto a la costa y la longitud total de la estructura con el objetivo de obtener tómbolos o salientes según lo que se desea obtener.

Objetivo N°4: Realizar la simulación numérica computacional especializado, mediante el software Delft-3D, para evaluar el comportamiento del rompeolas propuesto en la zona de estudio.

- Para el modelamiento del rompeolas se recomienda realizar más de 1 modelo, con el fin de evaluar el porcentaje de reducción de ola y elegir el más optimo en la protección de la playa. Además, es necesario contar con las coordenadas de las estructuras para que la georreferenciación sea la más aproximada.
- Para evaluar de mejor forma el porcentaje de reducción se recomienda colocar puntos de control entre el rompeolas y la playa. Con el objetivo de evaluar el comportamiento de la altura de ola y de esta manera comparar la reducción y elegir el modelo más adecuado para la protección de la playa La Herradura.

Objetivo N°5: Realizar la comparación de resultados obtenidos de la propuesta con rompeolas convencionales.

- Para realizar la comparación de resultados se recomienda modelar casos simplificados en los cuales se pueda evaluar los rompeolas con parámetros neutros con el objetivo de validar el comportamiento del rompeolas propuesto con los convencionales.
- Se recomienda para estudios futuros evaluar el transporte de sedimentos que se da en la playa La Herradura, así como solicitar la información del estudio de suelos a las entidades que gestionan la playa.

9 REFERENCIAS

Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, *81*(2), 169–193. https://doi.org/10.1890/10-1510.1

Bird, E. C. F. (1985). *Coastline Changes: A Global Review*. Wiley. https://doi.org/10.1002/gj.3350210215

Bocanegra Garcia, C., Veneros Urbina, B., & Culquichicon Malpica, Z. (2020). Impactos ambientales en la tira litoral de la costa por acción antrópica en la ciudad de Trujillo, Perú. *Enfoque UTE*, *12*(1), 59–73. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.655

Bricio, L., Negro, V., Diez, J. J., & López, J. S. (2012). Functional and environmental design of detached, low crest level breakwaters. *Journal of Coastal Research*, *28*(1 A), 131–142. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00083.1

Cenedese, C., & Gordon, A. (2018). *Ocean Current*. Encyclopedia Britannica. https://www.britannica.com/science/ocean-current

Chaudhary, B., Hazarika, H., Murakami, A., & Fujisawa, K. (2018). Geosynthetic-sheet pile reinforced foundation for mitigation of earthquake and tsunami induced damage of breakwater. *Geotextiles and Geomembranes*, *46*(5), 597–610. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.011

Copernicus. (2018). *ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present*. Climate Change Service. https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview

Correo. (2018, 11 de noviembre). Huanchaco se queda sin arena a causa del puerto de Salaverry. *Diario Correo*. https://n9.cl/78bxi

da Cruz Braga, R., da Silva Pimentel, M. A., & Paulino Rocha, E. J. (2020). Climate change and impacts of the sea level elevation in the coastal zone: Bibliographical research and conceptual contribution. *Fronteiras*, *9*(1), 230–255. https://doi.org/10.21664/2238-8869.2020v9i1.p230-255

Decología. (2023). *Corrientes Oceánicas, Distribuciones, Causas, Tipos De Corrientes Y Más*. Recuperado el 10 de abril de 2023, de https://n9.cl/l9aqv

Fang, K., Wang, H., Sun, J., Zhang, J., & Liu, Z. (2020). Including Wave Diffraction in XBeach: Model Extension and Validation. *Journal of Coastal Research*, *36*(1), 116. https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-19-00015.1

Fitri, A., Hashim, R., Abolfathi, S., & Maulud, K. N. A. (2019). Dynamics of sediment transport and erosion-deposition patterns in the locality of a detached low-crested breakwater on a cohesive coast. *Water (Switzerland)*, *11*(8). https://doi.org/10.3390/w11081721

Glessmer, M. S. (2017, 11 de mayo). *Waves reflecting on a sea wall*. Adventures in Oceanography and Teaching. Recuperado el 13 de abril del 2021 de https://n9.cl/8qntq

Google. (2021). *Google Earth Pro* [version 7.3]. Google. https://www.google.com/intl/es_ALL/earth/versions/#earth-pro

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2000). Dinámicas. *Sección 2, Vol. 1*, 580. https://n9.cl/2y3bea

Gyssels, P., Baldissone, C. M., Hillman, G., Corral, M., Pagot, M., Brea, D., Spalletti, P., & Daniel, H. (2013). Aplicaciones Del Modelo Numérico Delft3D a. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, *32*, 19–22. https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4517

Hristokaragiozov. (2016, 29 de enero). *Difraction*. KARAGYOZOV. Recuperado el 05 de marzo del 2021 de https://karagyozovblog.wordpress.com/2016/01/29/diffraction/

Hurtado Reátegui, V. N., & García Cavero, L. A. (2016). *Estudio para la recuperación de la playa del club regatas por medio de un dique sumergido* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. https://hdl.handle.net/20.500.14138/436

Isla, F. I., Cortizo, L., Merlotto, A., Bértola, G., Pontrelli Albisetti, M., & Finocchietti, C. (2018). Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited. *Ocean and Coastal Management*, *156*, 107–116. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.008

Kamphuis, J. W. (1992). Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 117*(6), 624–640. https://n9.cl/ml94g

Kasama, K., Zen, K., Nakagawa, Y., & Furukawa, Z. (2020). Instability evaluation of rubble mound for breakwaters subjected to tsunami-induced overflow and seepage flow. *Soils and Foundations*, *60*(6), 1532–1545. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.006

Kraus, N., Isobe, M., Igarashi, H., Sasaki, T., & Horikawa, K. (1982). Field experiments on longshore sand transport in the surf zone. *Coastal Engineerring Proceedings, 1(18)* 1–20. https://doi.org/10.9753/icce.v18.61

Llosa, J. (2012, 30 de abril). *Playa La Herradura 1960*. SlideShare. Recuperado del 07 de abril del 2021 de https://n9.cl/ik9r2

Losada, I. J., Medina, R., Losada, M. Á., & Vidal, C. (1995). Modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos. *Ingeniería Del Agua*, *2*(1), 99–118. https://doi.org/10.4995/ia.1995.2667

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, *8(1)*, 1–11. https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6

Mendoza, R. (2018, 08 de setiembre). Chorrillos: La Herradura sufre el paso del tiempo y la indiferencia. *Diario El Correo*. https://n9.cl/naqkn

Montoya, S. (2015, 15 de julio). *Los 5 mejores softwares para modelamiento oceánico*. Gidahatari. Recuperado el 10 de marzo de 2021, de https://n9.cl/nbzc1

Municipalidad de Miraflores. (2019, 08 de junio). *Miraflores exhorta a Municipalidad de Lima proteger playas de la Costa Verde* [Nota de Prensa]. https://n9.cl/7xz06

Murilo, J. D. (2017). *Diseño de sistema de espigones con geotubos para la protección del malecón de Crucita* [Trabajo de Investigación, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. Repositorio digital de la Universidad de Especialidades Espíritu Santo UEES. http://201.159.223.2/handle/123456789/1940

Orimoloye, S., Karunarathna, H., & Reeve, D. E. (2020). Reflection analysis of impermeable slopes under bimodal sea conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(2). https://doi.org/10.3390/jmse8020133

Orrego, J. L. (2010, 17 de enero). *Playa 'La Herradura.'* Blog PUCP. Recuperado el 03 de marzo del 2021 de https://n9.cl/53lpq

Paola, S., & Sotomayor, Z. (2019). *Diseño de un rompeolas usando tetrápodos para la protección de puerto baquerizo moreno (galapagos)* [Tesis de licenciatura, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. Repositorio digital de la UEES. http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/2915

Redacción EC. (2018, 08 de marzo). La Herradura en los años 60, cuando aún tenía arena. *El Comercio*. https://elcomercio.pe/lima/sucesos/herradura-anos-60-tenia-arena-fotos-noticia-502624-noticia/?foto=1

Redacción RPP. (2019, 03 de junio). El mar se sale, arrasa vivienda y deja en la calle a una familia en Trujillo. *RPP*. https://n9.cl/a1gnl

Sardá, R., Conde, R., Casadesús, M., Sánchez, A., & Pablo, J. (2013). Erosión en las playas y gestión desintegrada: la problemática actual de la playa de S'Abanell. *Hacia Un Nuevo Modelo Integral de Gestión de Playas*, 51–71. https://n9.cl/0oc1w

Tricker, R., Cenedese, C., Groen, P., & Gordon, A. (2020). *Tide*. Encyclopedia Britannica. Recuperado 14 de noviembre de 2022 de https://www.britannica.com/science/tide

Universidad Católica de Chile. (s.f.). *Geomorfología Litoral*. Geomorfología, Dinámica y Climática. Recuperado el 18 de noviembre del 2020 de https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/4.html

United State Army Corps of Engineers. (2011). Coastal Engineering Manual, Part VI. *Engineer*, *VI*(200), 771. https://n9.cl/1jx1w

Van Rijn, L. C. (2018). *Detached breakwaters*. *January*, 2005–2017. https://n9.cl/10gqh

Vicinanza, D., Ph, D., Lauro, E. Di, Ph, D., Contestabile, P., Ph, D., Gisonni, C., & Ph, D. (2019). Review of Innovative Harbor Breakwaters for Wave-Energy Conversion. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. *145(4)*. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000519

Vidal, C., Losada, M. Á., Medina, R., & Losada, I. (1994). Análisis de la estabilidad de diques rompeolas. *Ingeniería Del Agua*, *1*(1), 17–34. https://doi.org/10.4995/ia.1994.2629

Vieira, B. F. V., Pinho, J. L. S., Barros, J. A. O., & Antunes do Carmo, J. S. (2020). Hydrodynamics and morphodynamics performance assessment of three coastal protection structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(3). https://doi.org/10.3390/jmse8030175

Vinces, H. (2013, 24 de junio). Colocarán rocas en 40 metros de playa La Herradura para proteger edificio Las Gaviotas. *Andina*. https://n9.cl/2f2q4

Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, *10*(3), 260–263. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0

World Ocean Review. (2017). *Improving coastal protection*. https://n9.cl/wvdmd

Zhu, J., Cai, F., Shi, F., Qi, H., Lei, G., Liu, J., & Cao, H. (2019). Beach response to breakwater layouts of drainage pipe outlets during beach nourishment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *228*(February). https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106354