

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Evaluación de alternativas para la protección costera frente a procesos erosivos utilizando MIKE 21. Caso de estudio: Libertador Bolívar

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera Oceanográfica

Presentado por:

Verenice Melissa Briones Montoya

Johanna Elizabeth Lynch Santillán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

El presente trabajo, lo dedico a mi madre Mercedes Montoya, por ser la base principal de mi vida, la persona que me dio mis estudios, por ella soy quien soy y es mi principal motor para seguir con mis sueños y metas. No obstante, le dedico este trabajo a mi padre German Briones, ya que mediante sus consejos y ánimos me dieron fuerzas para seguir en este camino profesional.

Verenice Briones Montoya

Dedico este trabajo a mis maravillosos padres Sandra Santillan y Juan Lynch y a mi hermano Renow Antonio Lynch Santillan, ya que han sido mi guía, mis pilares fundamentales y estuvieron siempre conmigo desde el principio dándome su apoyo incondicional en todo momento y me daban palabras de aliento cuando estaba a punto de rendirme.

Johanna Lynch Santillan

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios ya que, por Él, hemos llegado a nuestra meta, nos dio fortaleza para no desmayar en este trabajo y sabiduría para poder culminar nuestra carrera universitaria.

Agradecemos el apoyo arduo de nuestro tutor M. Sc, Iván Saltos, ya que nos guio durante la realización de este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Verenice Briones y Johanna Lynch, y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Verenice Briones

Verenice Melissa
Briones Montoya

Johanna Lynch B.

Johanna Elizabeth Lynch
Santillan

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**LUIS MIGUEL
ALTAMIRANO
PEREZ**

**IVAN
MARCELO
SALTOS
ANDRADE**

Digitally signed by
IVAN MARCELO
SALTOS ANDRADE
Date: 2020.12.11
00:00:23 -05'00'

M. Sc, Luis Miguel Altamirano Pérez
PROFESOR DE LA MATERIA

M. Sc, Iván Marcelo Saltos Andrade
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La playa de la comuna Atravezado, también conocida como Libertador Bolívar, ubicada en la provincia de Santa Elena, presenta evidentes problemas erosivos, debido al fuerte oleaje que caracteriza a esta zona. Para poder mitigar estos efectos es necesario la implementación de alguna obra de ingeniería, sin embargo, existe un gran nivel de incertidumbre en poder seleccionar el tipo de protección costera más óptimo. Para ello y previo a la toma de decisiones, este trabajo analiza posibles escenarios frente a la implementación de 3 tipos de infraestructuras de protección costeras utilizando para este análisis el modelo numérico computacional MIKE 21. Para de esta forma, analizar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la playa como respuesta de la implementación de las estructuras de protección.

Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron datos históricos de variables oceanográficas, datos de la campaña de medición realizadas en época húmeda e información de altura, periodo y dirección del oleaje del WAVEWATCH III. Los módulos utilizados en MIKE 21, fueron: Spectral Wave, Parabolic Mild Slope, Flow Model y Sediment Transport (Non-Cohesive), en donde se ingresaron 3 tipos de infraestructura costera como son: espigones en T, rompeolas y arrecifes de corales artificiales. Para la simulación de cada tipo de estructura, se analizó bajo 2 tipos de condiciones oceanográficas, uno en condiciones normales y otro en condiciones ENSO (El Niño).

Para cada escenario se analizaron las condiciones del oleaje (H_{mo} , M_{wd}), tensiones de radiación (S_{xx} , S_{yy} , S_{yy}), flujos hidrodinámicos (P_{flux} , Q_{flux}) y transporte de sedimentos (P_s , Q_s , $Init_{dz/dt}$). Los resultados de las simulaciones indican que los 3 tipos de estructuras cumple con la función de disminuir el efecto de erosión debido al oleaje, siendo las estructuras tipo T las que mejor resultados mostraron.

Palabras Clave: erosión, MIKE 21, espigones en T, rompeolas, arrecifes de corales artificiales.

ABSTRACT

The beach of the Atravezado commune, also known as Libertador Bolívar, located in the province of Santa Elena, evidences erosive issues, due to the strong waves that characterize this area. To mitigate these effects, it is necessary to implement some engineering infrastructure, however, there is a great level of uncertainty in being able to select the most optimal type of coastal protection. To do this, and before decision-making, this work analyzes possible scenarios for the implementation of 3 types of coastal protection infrastructures using the MIKE 21 computational numerical model. In this way, analyze the hydrodynamic and morphodynamic behaviour of the beach in response to the implementation of protection structures.

For the development of the project, historical data of oceanographic variables, data from the measurement campaign carried out in the wet season and information on height, period and wave direction from WAVEWATCH III were used. The modules used in MIKE 21 were: Spectral Wave, Parabolic Mild Slope, Flow Model and Sediment Transport (Non-Cohesive), where 3 types of coastal infrastructure were entered, such as: T-groynes, breakwaters and artificial reefs. For the simulation of each type of structure, it was analyzed under 2 types of oceanographic conditions, one under normal conditions and the other under ENSO (El Niño) conditions.

For each scenario, wave conditions (H_{mo} , M_{wd}), radiation stresses (S_{xx} , S_{yy} , S_{yy}), hydrodynamic flows (P_{flux} , Q_{flux}) and sediment transport (P_s , Q_s , $Initdz / dt$) were analyzed. The results of the simulations indicate that the 3 types of structures fulfill the function of reducing the effect of erosion due to waves, being the T-groynes the ones that showed the best results.

Keywords: erosion, MIKE 21, T-groynes, breakwaters, artificial reefs.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	v
RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ABREVIATURAS	vi
SIMBOLOGÍA.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema y necesidad	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Área de estudio	3
1.3.1 Características hidrodinámicas	3
1.3.2 Características meteorológicas.....	4
1.3.3 Características morfológicas.....	5
1.4 Marco teórico	5
1.4.1 Erosión Costera	5
1.4.2 Ingeniería costera	6
1.4.3 Modelos computacionales para estudios de procesos costeros	8
1.4.4 MIKE 21.....	8
CAPÍTULO 2.....	13
2. METODOLOGÍA.....	13
2.1 FASE I: Recolección de información	14

2.1.1	Mediciones de campo	14
2.1.2	Datos WAVEWATCH III	17
2.1.3	Batimetría	18
2.2	FASE II: Generación de Inputs con MIKE Zero	18
2.2.1	Digitalización de Batimetría y Generación de malla	18
2.2.2	Profile Series	20
2.2.3	Grid Series.....	20
2.3	FASE III: Oleaje en Aguas Profundas utilizando MIKE 21SW (Spectral Waves) 20	
2.4	FASE IV: Oleaje en Aguas Someras utilizando MIKE 21PMS (Parabolic Mild Slope) 21	
2.5	FASE V: Procesos Costeros: Flujos hidrodinámicos y Transporte de sedimentos 25	
2.5.1	MIKE 21FM: Flow Model.....	25
2.5.2	MIKE 21ST: Non-Cohesive Sediment Transport.....	27
2.5.3	Calibración y Validación del modelo	30
2.6	FASE VI: Generación de escenarios con estructuras de protección	30
2.6.1	Condiciones del oleaje.....	30
2.6.2	Evaluación de las estructuras de protección ante distintas condiciones de oleaje 31	
CAPÍTULO 3		39
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	39
3.1	Resultados de la FASE I: Mediciones de campo y Recolección de Información 39	
3.1.1	Vientos.....	39
3.1.2	Corriente litoral	43
3.1.3	Sedimentos.....	44
3.1.4	Pendiente de playa	44
3.1.5	Datos del WAVEWATCH III	48

3.2	Resultados de las FASES II, III, IV y V: Calibración y Validación del Modelo	50
3.2.1	Calibración del Oleaje: MIKE 21SW y MIKE 21PMS.....	50
3.2.2	Calibración de los Procesos Costeros: MIKE 21FM y MIKE 21ST	53
3.2.3	Validación de los resultados del modelo	54
3.3	Resultados de la FASE VI: Generación de escenarios con estructuras de protección para condiciones normales y ENSO.	56
3.3.1	Condiciones del Oleaje para condiciones normales y ENSO	56
3.3.2	Evaluación de las estructuras de protección ante las condiciones de oleaje propuestas	58
CAPÍTULO 4		83
4.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	83
4.1	DISCUSIÓN	83
4.2	CONCLUSIONES.....	84
4.3	RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA		86
APÉNDICES		89

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

DHI Danish Hydraulic Institute

SW Spectral wave

ST Sediment Transport

FM Flow Model

HWL High Water Level

LWL Low Water Level

MWD Mean Wave Direction

SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
Hs	Altura significativa
T	Periodo
Hmo	Altura significativa (espectro)
s	Segundo
Sxx	Tensión de radiación perpendicular
Sxy	Tensión de radiación cortante
Syy	Tensión de radiación transversal

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio [Autores, 2020]	3
Figura 1.2 Nivel del agua en (A) marea baja y (B) marea alta (Enriquez, 2016).	4
Figura 1.3 Comuna Libertador Bolívar afectada por erosión (Caiza & Nativi, 2019).	5
Figura 1.4 Estructuras costeras planteadas para la comuna Libertador Bolívar [Autores, 2020].	6
Figura 1.5 Relación del oleaje con la Tensión de radiación Sxy (DHI Group, 2014).	10
Figura 1.6 Módulos para la simulación en MIKE 21. [Autores, 2020]	12
Figura 2.1 Metodología Implementada para el proyecto [Autores, 2020].	13
Figura 2.2 Estaciones definidas para las mediciones litorales [Autores, 2020].	14
Figura 2.3 Método Andrade Método Andrade (Andrade & Ferreira, 2006).....	16
Figura 2.4 Digitalización de la batimetría [Autores, 2020].	19
Figura 2.5 Generación de la malla [Autores, 2020].	19
Figura 2.6 Proceso de simulación utilizado para el módulo Parabolic Mild Slope (PMS) [Autores, 2020].	21
Figura 2.7 Generación del archivo de distribución de energía [Autores, 2020].	22
Figura 2.8 Periodo de simulación y Espectro de frecuencia [Autores, 2020].	22
Figura 2.9 Especificaciones Espectro [Autores, 2020].	23
Figura 2.10 Condiciones de borde PMS [Autores, 2020].	23
Figura 2.11 Outputs del modelo [Autores, 2020].	24
Figura 2.12 Proceso realizado para la simulación con Flow Model [Autores, 2020].	25
Figura 2.13 Proceso realizado para la simulación con el modulo MIKE 21ST [Autores, 2020].	27
Figura 2.14 Teoría de olas y corrientes [Autores, 2020].	29
Figura 2.15 Ingreso de datos de oleaje [Autores, 2020].	29
Figura 2.16 Diseño de Rompeolas: Dimensiones [Autores, 2020].	32
Figura 2.17 Diseño de Rompeolas: Vista transversal - Dimensiones [Autores, 2020]...	32
Figura 2.18 Implementación de los Rompeolas en el área de estudio [Autores, 2020].	33
Figura 2.19 Diseño de espigones en T: Dimensiones [Autores, 2020].	35
Figura 2.20 Implementación de los espigones en T en la zona de estudio [Autores, 2020].	35
Figura 2.21 Diseño de arrecifes artificiales: Dimensiones [Autores, 2020].	37

Figura 2.22 Implementación de los arrecifes artificiales en la zona [Autores, 2020].	37
Figura 2.23 Batimetría: Espigones, rompeolas y arrecifes [Autores, 2020].	38
Figura 2.24 Inputs utilizados para cada módulo de MIKE 21 [Autores, 2020].	38
Figura 3.1 Dirección del viento [Autores, 2020].	40
Figura 3.2 Altura de olas en Sicigia y Cuadratura [Autores, 2020].	40
Figura 3.3 Periodo del oleaje en Sicigia [Autores, 2020].	41
Figura 3.4 Periodo del oleaje en Cuadratura [Autores, 2020].	41
Figura 3.5 Dirección del oleaje en Sicigia [Autores, 2020].	42
Figura 3.6 Dirección del oleaje en Cuadratura [Autores, 2020].	43
Figura 3.7 Corriente litoral - Sicigia [Autores, 2020].	43
Figura 3.8 Corriente litoral - Cuadratura [Autores, 2020].	44
Figura 3.9 Perfil de playa en Sicigia [Autores, 2020].	45
Figura 3.10 Perfil de playa en Cuadratura [Autores, 2020].	45
Figura 3.11 Datos de Salidas de Campo - Sicigia [Autores, 2020].	46
Figura 3.12 Datos de Salidas de Campo - Cuadratura [Autores, 2020].	46
Figura 3.13 Datos de Salidas de Campo - Sicigia [Autores, 2020].	47
Figura 3.14 Datos de Salidas de Campo - Cuadratura [Autores, 2020].	47
Figura 3.15 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones ENSO (El Niño) [Autores, 2020].	48
Figura 3.16 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones Normales [Autores, 2020].	49
Figura 3.17 Periodo de oleaje en condiciones El Niño [Autores, 2020].	49
Figura 3.18 Periodo de oleaje en condiciones Normales [Autores, 2020].	50
Figura 3.19 Altura y dirección del oleaje condiciones normales [Autores, 2020].	52
Figura 3.20 Esfuerzo de radiación condiciones normales [Autores, 2020].	52
Figura 3.21 Flujos de transporte de sedimentos en dirección x (P Flux) y en dirección y (Q Flux) [Autores, 2020].	53
Figura 3.22 Variación en el flujo de transporte de sedimentos (Ps y Qs) y la tasa inicial de cambio de nivel de lecho (Init. $\frac{dz}{dt}$) [Autores, 2020].	54
Figura 3.23 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones El Niño (1997-1998) [Autores, 2020].	56
Figura 3.24 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones Normales (2017) [Autores, 2020].	57
Figura 3.25 Periodo del oleaje en Condiciones Niño (1997 - 1998) [Autores, 2020].	57

Figura 3.26 Periodo del oleaje en Normales (2017) [Autores, 2020].....	58
Figura 3.27 Rompeolas - Condiciones El Niño: H _{mo} (Altura significativa del oleaje) y M _{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].	59
Figura 3.28 Rompeolas - Condiciones Normales: H _{mo} (Altura significativa del oleaje) y M _{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].....	60
Figura 3.29 Rompeolas - Condiciones El Niño: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].	61
Figura 3.30 Rompeolas - Condiciones Normales: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].	62
Figura 3.31 Rompeolas - Condiciones ENSO: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].	63
Figura 3.32 Rompeolas - Condiciones Normales: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].	64
Figura 3.33 Rompeolas - Condiciones ENSO: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].	65
Figura 3.34 Rompeolas - Condiciones Normales: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].	66
Figura 3.35 Espigones en T - Condiciones El Niño: H _{mo} (Altura significativa del oleaje) y M _{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020]	67
Figura 3.36 Espigones en T - Condiciones Normales: H _{mo} (Altura significativa del oleaje) y M _{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].	68
Figura 3.37 Espigones en T - Condiciones El Niño: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].	69
Figura 3.38 Espigones en T - Condiciones Normales: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].	70
Figura 3.39 Espigones en T - Condiciones ENSO: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].	71
Figura 3.40 Espigones en T - Condiciones Normales: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].	72
Figura 3.41 Espigones en T - Condiciones ENSO: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].	73
Figura 3.42 Espigones en T- Condiciones Normales: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].	74

Figura 3.43 Arrecifes artificiales - Condiciones El Niño: H_{mo} (Altura significativa del oleaje) y M_{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].	75
Figura 3.44 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: H_{mo} (Altura significativa del oleaje) y M_{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].	76
Figura 3.45 Arrecifes artificiales- Condiciones El Niño: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].	77
Figura 3.46 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].	78
Figura 3.47 Arrecifes artificiales - Condiciones ENSO: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].	79
Figura 3.48 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].	80
Figura 3.49 Arrecifes artificiales - Condiciones ENSO: Transporte de sedimentos [Autores, 2020].	81
Figura 3.50 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Recopilación de mediciones litorales. Fase: Sicigia [Autores, 2020].	17
Tabla 2.2 Recopilación de mediciones litorales. Fase: Cuadratura [Autores, 2020].	17
Tabla 2.3 Rangos para la filtración de datos WAVEWATCH III [Autores, 2020].	18
Tabla 2.4 Rugosidad de fondo marino y de las estructuras [Autores, 2020].	20
Tabla 2.5 Parámetros del modelo [Autores, 2020].	24
Tabla 2.6 Longitud del rompeolas [Autores, 2020].	31
Tabla 2.7 Separación entre rompeolas [Autores, 2020].	32
Tabla 2.8 Parámetros usados para la altura del rompeolas [Autores, 2020].	33
Tabla 2.9 Espaciamiento espigones [Autores, 2020].	34
Tabla 2.10 Longitud escolleras [Autores, 2020].	34
Tabla 2.11 Dimensiones del Bloque ECO Armor. [Econcrete, 2020].	36
Tabla 2.12 Dimensiones del Bloque ECO Armor adaptado a la zona. [Autores, 2020].	36
Tabla 3.1 Dirección del viento [Autores, 2020].	39
Tabla 3.2 Dirección del oleaje en Sicigia [Autores, 2020].	41
Tabla 3.3 Dirección del oleaje en Cuadratura [Autores, 2020].	42
Tabla 3.4 Diámetro de sedimentos [Autores, 2020].	44
Tabla 3.5 Pendiente de playa [Autores, 2020].	45
Tabla 3.6 Diámetro de sedimentos - Calibración [Autores, 2020].	51
Tabla 3.7 Rugosidad - Calibración [Autores, 2020].	51
Tabla 3.8 Altura del oleaje - Validación [Autores, 2020].	55
Tabla 3.9 Altura del oleaje - Validación [Autores, 2020].	55
Tabla 3.10 Tasa de erosión estudios previos (Caiza & Nativi, 2019).	55
Tabla 3.11 Tasa de erosión del modelo [Autores, 2020].	56
Tabla 4.1. Altura de olas promedio Sicigia	91
Tabla 4.2. Altura de olas promedio Cuadratura	91
Tabla 4.3. Altura de las olas al cuadrado para Sicigia y Cuadratura	92
Tabla 4.4. Valores de mediciones de campo 14/03/2020	92
Tabla 4.5 Valores de mediciones de campo 14/03/2020	93
Tabla 4.6. Valores de mediciones de campo 14/03/2020	94
Tabla 4.7. Valores de mediciones de campo 14/03/2020	95

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que experimentan las comunidades en el filo costero se debe a los procesos erosivos, los cuales se han convertido en una amenaza tanto para la seguridad de las personas que habitan en estas zonas, como también para las actividades que realizan diariamente como sustento económico (Cabildo Comuna Atravezado, 2019)

La erosión costera es un proceso de origen natural causado por la acción del oleaje, mareas y corrientes litorales que consiste en el retroceso, deslizamiento o desgaste de acantilados, playas y otras áreas planas y poco profundas. Además, el mar erosiona las salientes de los acantilados, promueve el retroceso de la línea de costa y acumula el sedimento en playas con entrantes (Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010).

Una de las comunas que presenta estos problemas erosivos es Libertador Bolívar, ya que mediante estudios anteriores se identificó la tendencia erosiva de la playa con un retroceso en la línea de costa de 50 cm al año, lo cual se debe a procesos antropogénicos y naturales que se dan en esta playa como la intensidad del oleaje, mareas, viento y corrientes que se generan en la zona (Caiza & Nativi, 2019).

1.1 Descripción del problema y necesidad

Los procesos erosivos en la playa de la comuna Libertador Bolívar tienen un impacto directo sobre la economía de la población, en parte debido a la poca afluencia turística de la zona. Basándonos en la problemática planteada y la necesidad de la comunidad, este proyecto se enfoca en analizar alternativas de protección costera, que permita mitigar los efectos erosivos de esta zona, utilizando modelos numéricos computacionales (MIKE Zero) para estudiar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico, bajo distintos escenarios de protección costera y distintas condiciones de oleaje.

Los resultados del uso de los modelos numéricos computacionales nos van a permitir analizar cuáles podrían ser los efectos sobre la zona costera y de esta forma ayudar en

la toma de decisiones a los consultores o autoridades correspondientes de cuál podría ser la mejor alternativa desde el punto de vista técnico. Se ha observado a lo largo del tiempo que muchos de los proyectos de ingeniería que se desarrollan en el borde costero no incorporan herramientas computacionales para analizar los posibles cambios hidrodinámicos y morfodinámicos. Debido a esta falencia, este proyecto plantea la necesidad de evaluar estas alternativas utilizando modelos computacionales, para de esta forma poder comparar no solo el comportamiento ante distintos escenarios, sino el poder comparar entre distintas alternativas de protecciones clásicas y más amigables con el ambiente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la playa de Libertador Bolívar ante diferentes tipos de estructuras de protección costera mediante la modelación numérica usando el software MIKE 21 para fomentar una adecuada toma de decisiones por parte de la comuna, que le permita identificar el diseño óptimo de una obra de protección costera para controlar los procesos erosivos de la zona.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Recolectar datos de parámetros oceanográficos de salidas de campo de periodos anteriores y del modelo WAVEWATCH III para nuestra área de interés.
2. Utilizar la herramienta MIKE 21 para la generación de inputs de cada módulo que se usara en la simulación.
3. Calibrar y validar el modelo tomando como referencia las mediciones litorales obtenidas durante las campañas de medición.
4. Diseñar tres tipos de estructuras de protección costeras que serán analizados utilizando el modelo MIKE 21.
5. Evaluar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la playa antes los diferentes tipos de estructuras propuestos.

1.3 Área de estudio

La Comuna Atravezado - Libertador Bolívar se encuentra ubicada en el Km 53, en la provincia de Santa Elena – Ecuador, aproximadamente cuenta con 3.000 habitantes. La mayor parte de los habitantes de Libertador Bolívar se dedican a generar actividades que potencian el área del turismo, con lo cual han implementado señaléticas y construcción de alcantarillado.

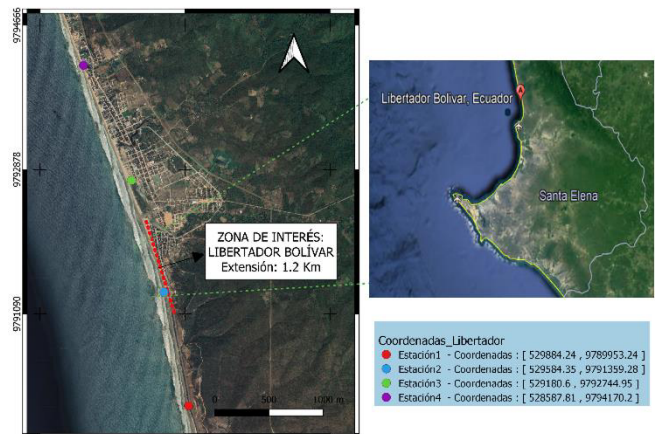


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio
[Autores, 2020]

No obstante, esta comunidad tiene proyecciones de mejorar cada vez más y llegar a ser una élite del ecoturismo mundial (Andrade, Granja, & Díaz , Determinación de los Recursos Naturales - Comuna Libertador Bolívar, 2019). En la Figura 1.1 se presenta la zona de estudio que consta de cuatro estaciones. Sin embargo, este proyecto está enfocado en un transepto de 1.2 Km.

1.3.1 Características hidrodinámicas

Los procesos costeros hidrodinámicos que afectan de manera significativa a la zona son principalmente mareas, oleaje, y corrientes. En las costas ecuatorianas se evidencia un oleaje de tipo “swell” que se genera principalmente por el viento o las tormentas formando ondas tubulares cuyos periodos varían de 10 a 25 segundos, las alturas más frecuentes de olas están en un rango de 1 y 1.5 metros (Recalde & Mindiola, 2008).

En Libertador Bolívar el oleaje incidente proviene de los frentes de olas con dirección de 205° y 330°, en Monteverde que es la estación más cercana a Libertador Bolívar, la altura máxima evidenciada en época de oleaje corresponde a un valor de 3.69 metros, durante esta época el oleaje afecta de manera significativa a la comunidad poniendo en riesgo varias viviendas que se encuentra construidas de forma aleatoria a la playa (Cansing & Mena, 2018).

El nivel del agua, debido a la marea, en la comuna Libertador puede llegar de 50 a 60 metros de distancia entre el nivel máximo de mar y el límite de construcción cuando se encuentra en marea baja, mientras que si es época de aguajes (marea alta) puede inundar en varios puntos a la comuna. El río atravesado actúa como flechas impidiendo que ciertas partes de la comuna no se vean afectadas por las mareas (Enriquez, 2016).

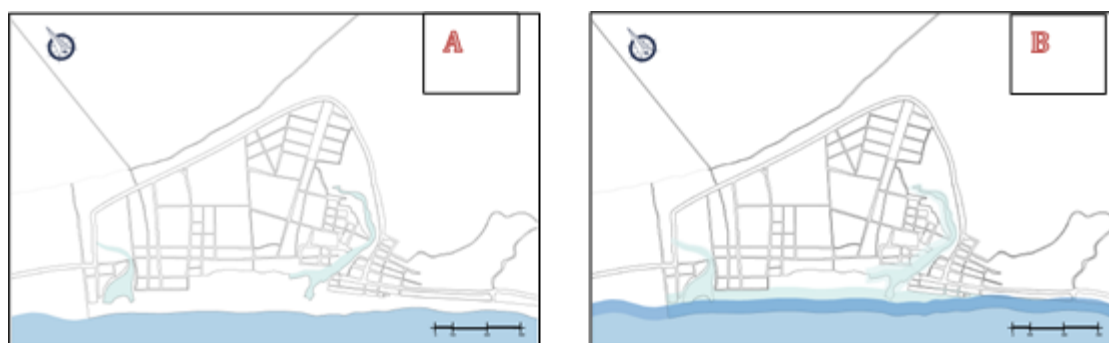


Figura 1.2 Nivel del agua en (A) marea baja y (B) marea alta (Enriquez, 2016).

Con respecto a los patrones de circulación, según un estudio realizado en Libertador Bolívar, las corrientes costeras que se generan en la zona tienen direcciones hacia el noroeste con una velocidad promedio que va desde los 0.04-0.08 m/s en presencia de marea alta, mientras que cuando existe marea baja las corrientes presentan una velocidad promedio de 0.03-0.06 m/s (Cansing & Mena, 2018).

En Libertador Bolívar también se pueden evidenciar corrientes de resaca, las cuales se generan de manera perpendicular a la costa hacia mar adentro, atravesando la zona de rompiente, la intensidad de estas corrientes va a depender específicamente de la altura que tengan las olas en la playa, además factores tales como las corrientes de marea pueden reforzar su intensidad haciendo más peligrosas. Su formación y espaciado va a depender de la topografía, geomorfología, el tipo de sedimento y la oceanografía física de la zona (Lizano, 2012).

1.3.2 Características meteorológicas

La comuna Libertador Bolívar se caracteriza por tener un clima cálido tropical, presenta una estación seca y húmeda que se ve influenciada por la zona de convergencia intertropical (ZCIT) que se da en los meses de enero a abril, y una estación fría y seca que se da entre los meses de mayo a diciembre, la temperatura promedio oscila entre

valores de 21°C a 33°C a una altura de 2 metros sobre el nivel del mar. Las precipitaciones anuales son menores de 200 mm, siendo la máxima precipitación registrada de 109 mm anuales, los periodos de lluvia son muy cortos. La humedad relativa varía entre los 75 y 85%, la intensidad de los vientos en esta zona genera un clima fresco ideal para los turistas que visitan la comuna (Alvarado, Arguello, & Vásquez, 2012).

1.3.3 Características morfológicas

Con respecto a las características morfológicas del sitio, el tipo de sedimento que se encuentra en mayor proporción es arena semi fina y clara, el suelo es 80% de tipo inceptisol, es decir que son superficiales a moderadamente profundos, con topografía plana a quebrada y 20% de tipo aridisol que es característico en regiones secas (Koupermann, 2014).

1.4 Marco teórico

1.4.1 Erosión Costera

Las principales causas de los procesos erosivos en las comunidades del borde costero se deben al oleaje que incide de manera oblicua en los litorales generando corrientes que se forma de manera paralela a la orilla, las cuales se encargan de transportar el sedimento a lo largo de la zona costera y este sedimento se deposita en desviaciones de origen natural como cabos, desembocaduras, entre otros. Esta deposición de sedimentos se extiende a lo largo en dirección y en sentido paralelo a la corriente de deriva litoral formando cúmulos de arena que se adentran en el mar, si este balance se ve interrumpido se genera el proceso erosivo causando un retroceso en la línea de playa (Sardá, 2009).



Figura 1.3 Comuna Libertador Bolívar afectada por erosión (Caiza & Nativi, 2019).

Las actividades antropogénicas tales como la urbanización en el borde costero han generado la necesidad de realizar trabajos de ingeniería costera que permitan proteger tanto la forma de vida de los habitantes de estas zonas como también las actividades con la que se sustentan económicamente. Entre los principales trabajos de ingeniería costera en lo que se enfocan para proteger la playa tenemos el uso de vegetación como manglares y otro tipo de plantas para frenar la erosión, construcción de dunas, relleno de playas y la construcción de obras de protección costera (EUCC Atlantic Centre, 2017).

1.4.2 Ingeniería costera

Para el presente proyecto se realizarán 3 diseños de estructuras costeras las cuales se muestran en la Figura 1.4, en donde el estudio se enfocará en un rompeolas, espigones tipo T y arrecifes de corales.



Figura 1.4 Estructuras costeras planteadas para la comuna Libertador Bolívar [Autores, 2020].

1.4.2.1 Rompeolas

Un rompeolas se define como un tipo de infraestructura costera la cual puede ser utilizada para proteger y dar estabilidad al talud frente a la acción del oleaje incidente y de la energía que éste lleva asociada (Cansing & Mena, 2018). En términos generales este tipo de obra permite mitigar los procesos erosivos de una zona costera que se

encuentra influenciada por las fuerzas destructivas del mar como las mareas, corrientes, vientos y oleaje (Us Army Corps of Engineers (USACE), 2003).

1.4.2.2 Espigones en T

Los espigones son obras de infraestructura costera cuya principal función consiste en mitigar el transporte de arena a lo largo de la orilla. La mayor parte de este transporte de arena ocurre en la zona de rompimiento de las olas por lo tanto los espigones deben comprender al menos una parte de la zona de surf, ya que en esta zona también ocurren la mayoría de los procesos dinámicos de la playa (Basco, 2001).

1.4.2.3 Arrecifes artificiales

Es de vital importancia para las comunidades del filo costero que se protejan las costas ya que representan una de sus principales fuentes de ingreso, es por ello por lo que las obras de protección costera juegan un papel muy importante. Sin embargo, hoy en día, se espera que estas defensas costeras no solo protejan una playa de las marejadas y el oleaje sino también que puedan ser sostenibles, es decir que al ser construidas no perjudiquen el ecosistema en torno a esta obra sino más bien creen un beneficio y agreguen valor a las comunidades. Una de las soluciones que cumple con este principio es trabajando con estructuras eco-amigables como se ha evidenciado en los últimos años en el despliegue de esquemas de protección inspirados en favorecer a la naturaleza. Estos esquemas planteados se conocen como infraestructura verde, que favorecen a la restauración del hábitat costero, la replantación de vegetación y los esquemas de nutrición de playas (Mott Macdonald Group, 2016).

Dentro de los tipos de obras reconocidas como infraestructura verde tenemos los arrecifes artificiales, los cuales retienen el agua y disipan la energía de las olas. Entre sus principales beneficios se tienen: la reducción de la energía de las olas en un 97% lo cual ayuda a proteger playas para uso recreativo y turismo. Además, ayuda a estabilizar los sedimentos para proteger las costas de la erosión, provee hábitat para innumerables especies marinas y la generación de ingresos y sustento a las poblaciones costeras que dependen de la pesca (Seelig, 2016).

1.4.3 Modelos computacionales para estudios de procesos costeros

Los modelos costeros representan una importante herramienta ingenieril para predecir y determinar el comportamiento de procesos dinámicos de una determinada zona costera. Estos modelos han evolucionado a lo largo del tiempo, por lo que actualmente se cuenta con una serie programas enfocados específicamente en el área costera cuya principal característica se basa en códigos más robustos y flexibles, entre los modelos costeros que pueden emplearse tenemos: DELFT3D, MIKE 21 y TELEMAC (Roelvink & Reniers, 2012). De estos modelos mencionados se escogió el modelo MIKE 21 para predecir los cambios hidrodinámicos y morfodinámicos de nuestra zona de estudio.

1.4.4 MIKE 21

El software DHI MIKE 21 se caracteriza por tener alta confiabilidad, calidad y versatilidad en la simulación de los modelos que se pueden generar, estos modelos en 2D nos permiten determinar la hidrodinámica, olas, dinámica de sedimentos, calidad de agua y ecología de un determinado sistema ya sea un río, estuario, marisma o una zona costera. Dentro de las aplicaciones de este software tenemos el modelado de los flujos de mareas, marejadas ciclónicas, dispersión por advección, derrames de petróleo, calidad de agua, transporte de lodo, transporte de arena, perturbación del puerto y la propagación de las olas (DHI Group, 2017). Se utilizaron 4 de los módulos disponibles en MIKE 21 los cuales son: Spectral Wave (para determinar la transformación del oleaje en aguas profundas), Parabolic Mild Slope (para determinar las condiciones de oleaje en la zona de surf), Flow Model (para determinar las condiciones hidrodinámicas de la zona) y Non-Cohesive Sediment Transporte (para determinar el transporte de sedimentos en la zona).

1.4.4.1 MIKE 21SW: Spectral wave

MIKE 21SW es un modelo utilizado para simular la transformación del oleaje en aguas costeras y marinas, incluye un modelo espectral de ondas de viento de nueva generación basado en mallas no estructuradas. Incluye dos formulaciones diferentes: Formulación paramétrica direccional desacoplada y Formulación completamente espectral (DHI Group, 2014). MIKE 21SW de manera particular permite predecir y analizar el oleaje a una escala regional, se utiliza una resolución espacial y temporal gruesa para la parte

regional de la malla y una malla adaptable a los límites y la profundidad de alta resolución describe el entorno de aguas poco profundas en la costa (DHI Group, 2014).

1.4.4.2 MIKE 21PMS: Parabolic Mild Slope

MIKE 21PMS es un modelo de refracción-difracción lineal basado en una aproximación parabólica a la ecuación de pendiente suave elíptica. El modelo tiene en cuenta los efectos de la refracción y la disipación debido a la profundidad variable, la difracción a lo largo de la perpendicular a la dirección predominante de las olas y la disipación de energía debido a la fricción del fondo y la rotura de las olas, además permite determinar la propagación del oleaje en áreas cercanas a la costa (DHI Group, 2014). El output básico del modelo es parámetros integrales de ola: (H_{mo}) altura significativa del oleaje, período pico, dirección de oleaje promedio, el estrés de radiación de la onda que se representan mediante las tensiones de radiación S_{xx} , S_{yy} y S_{xy} (DHI Group, 2014).

Estas fuerzas de radiación tienen influencia solo donde existen condiciones variables del oleaje y la profundidad es decir cuando una ola se aproxima a la costa se ve influenciada por el asomeramiento, refracción, difracción, rotura produciendo de manera consecuente cambios en las tensiones de radiación (Mosso Aranda, 2004).

La tensión de radiación S_{xx} y S_{yy} muestra el transporte horizontal en la dirección de propagación del oleaje es decir representan el flujo transversal en la dirección del oleaje, el cual actúa en un plano paralelo a la costa, cuando la altura del oleaje aumenta al acercarse a la costa estas tensiones de radiación aumentan y la pendiente del nivel medio del agua se hace negativa (DHI Group, 2014).

La tensión de radiación S_{xy} , que representa la componente de esfuerzo cortante de la radiación de estrés, sobre el ancho de la zona de surf. La fuerza S_{xy} es la principal impulsora de las corrientes inducidas por las olas por lo que también se va a ver influenciada por el oleaje y la profundidad. Sin embargo, en este caso cuando el tren de olas es afectado por las estructuras se disipa la energía y disminuye la altura de las olas, mientras que la tensión de radiación S_{xy} va a aumentar a medida que la altura va disminuyendo como se muestra en la siguiente ilustración (DHI Group, 2014).

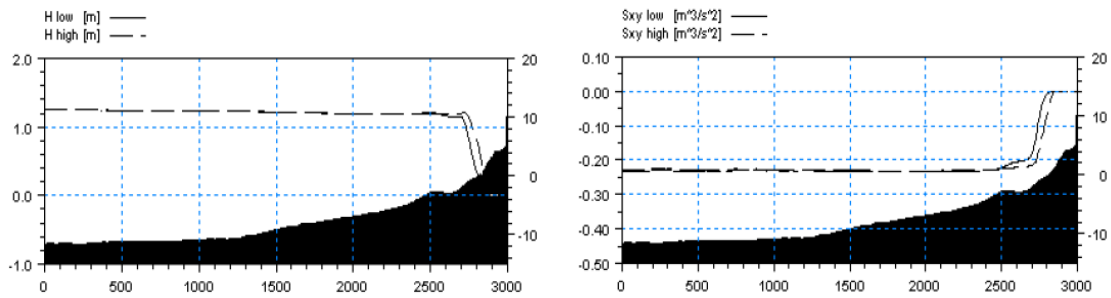


Figura 1.5 Relación del oleaje con la Tensión de radiación Sxy (DHI Group, 2014).

Tanto las condiciones de oleaje como los esfuerzos de radiación en el área modelada son parámetros esenciales para el cálculo del transporte de sedimentos y los patrones de erosión / deposición en la zona costera. (DHI Group, 2014).

1.4.4.3 MIKE 21FM: Flow Model

MIKE 21FM es un sistema de modelado para flujos de superficie libre 2D. El modelo de flujo MIKE 21 es aplicable a la simulación de fenómenos hidráulicos y ambientales en lagos, estuarios, bahías, zonas costeras y mares. Puede aplicarse siempre que se pueda despreciar la estratificación, se puede utilizar para simular una amplia gama de elementos hidráulicos como: 1) Intercambio de mareas y corrientes, 2) Mareas de tormenta, 3) Calor y recirculación y 4) Calidad del agua (DHI Group, 2014). Este módulo se divide en tres principales ramas las cuales son:

- Hidráulica Costera y Oceanografía
- Hidráulica Ambiental
- Transporte de lodo

Para la sección de hidráulica costera y oceanografía se trabaja con el módulo hidrodinámico, el cual es el módulo más básico de MIKE 21FM, entre sus principales funciones está la simulación de las variaciones y flujos de nivel del agua en respuesta a una variedad de funciones de forzamiento en lagos, estuarios y regiones costeras. Para la sección de hidráulica ambiental se trabaja con los submódulos Advección-Dispersión y el módulo de proceso ecológico (ECOLAB), entre sus principales funciones esta la descripción de los procesos químicos, biológicos, ecológicos e interacciones entre variables de estado y también se puede describir el proceso físico de sedimentación de

componentes. Para la sección de transporte de lodo se va a usar el submódulo de Mud Transport, entre las principales funciones de este módulo esta la descripción de la erosión, transporte y deposición de partículas de limo, lodo y arcilla bajo la acción de corrientes y olas además puede simular la presencia de múltiples fracciones en múltiples capas, el módulo es capaz de manejar la floculación y el asentamiento obstaculizado en la columna de agua, deslizamiento y consolidación en el fondo (DHI Group, 2014).

Los resultados en esta sección abarcan la base hidrodinámica que fue ingresada en el módulo ST y genera como resultado los flujos de transporte de sedimentos por segundos asociados a fuerzas externas como las tensiones de radiación. P representa la magnitud de flujo en la dirección x , mientras que Q representa la magnitud del flujo en la dirección y (DHI Group, 2014).

1.4.4.4 MIKE 21ST: Non-Cohesive Sediment Transport

MIKE 21ST es un módulo utilizado para calcular las velocidades de transporte de sedimentos (arena) no cohesivos. Puede calcular el transporte de arena en función de la información actual pura, o también puede tener en cuenta las olas. Este módulo puede simular velocidades de transporte de arena en una amplia gama de configuraciones, incluyendo ambientes naturales como: mareas, estuarios, costas, puertos y puentes. Las características principales del módulo de transporte de sedimentos no cohesivo MIKE 21 son las siguientes: Características constantes o espacialmente variables del material del lecho (es decir, tamaño de grano mediano y gradación), cinco teorías diferentes de transporte de arena disponibles para el cálculo de las tasas de transporte en condiciones de corriente pura, dos métodos disponibles para el cálculo de las tasas de transporte de sedimentos en corrientes combinadas y olas, método de transporte de arena seleccionado por el usuario en ondas combinadas y corriente cuando se utiliza el modelo STP, el uso de STP permite tener en cuenta la influencia de los siguientes fenómenos en las tasas de transporte de sedimentos calculadas y técnica de diferencias finitas en cuadrícula rectangular escalonada en el espacio y criterio de estabilidad de Courant-Friedrich-Lewy (DHI Group, 2014).

El módulo Non-Cohesive Sediment Transport, nos muestra tres diferentes variables que son P_s , Q_s y $\text{Init } dz/dt$. P_s es el flujo de transporte de sedimentos por año, promediada durante el periodo de simulación se encuentra en $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$, y está asociada a P Flux del módulo de Flow Model. Q_s representa el flujo de transporte de sedimentos relacionado con la variable Q Flux del módulo Flow Model. La variable de $\text{Init } dz/dt$, representa la tasa inicial de cambio de nivel de lecho, la cual nos va a permitir identificar las zonas en donde se genera acreción representado por valores positivos y erosión representada por valores negativos (DHI Group, 2014).



Figura 1.6 Módulos para la simulación en MIKE 21. [Autores, 2020]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para la realización de este proyecto, el mismo que fue dividido en 6 etapas. De esta Metodología destacamos como fue calibrado cada sub-módulo de MIKE 21 (ej. SW, PMS, FM y ST) y como se utilizó un escenario (condiciones normales 2017) para la validación de nuestro modelo antes de ingresar las estructuras de protección (ej. rompeolas, espigones y arrecifes artificiales) y analizar los posibles escenarios frente a los procesos erosivos. (Figura 2.1.)

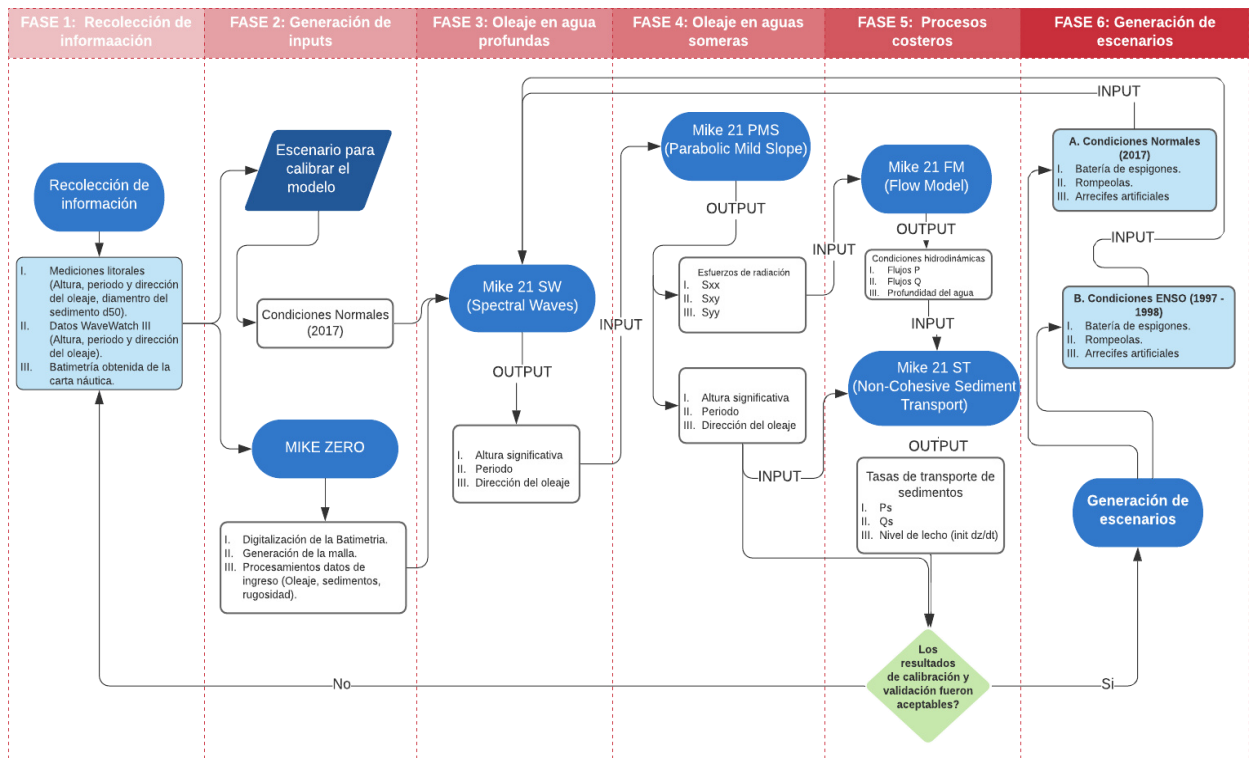


Figura 2.1 Metodología Implementada para el proyecto [Autores, 2020].

2.1 FASE I: Recolección de información

2.1.1 Mediciones de campo

Las campañas de medición fueron realizadas durante las dos fases de marea, sicigia y cuadratura, los días 07/03/2020 y 14/03/2020 respectivamente. Los parámetros que fueron analizados durante la campaña fueron: Corriente litoral, olas, vientos, sedimentos, pendiente de playa y circulación usando el método Lagrangiano.

Se designaron 4 estaciones las cuales estaban distribuidos a lo largo de la Playa Libertador Bolívar, desde Playa Bruja y extendiéndose hasta parte de San Antonio cubriendo un total de 4.2 Km como se muestra a continuación:

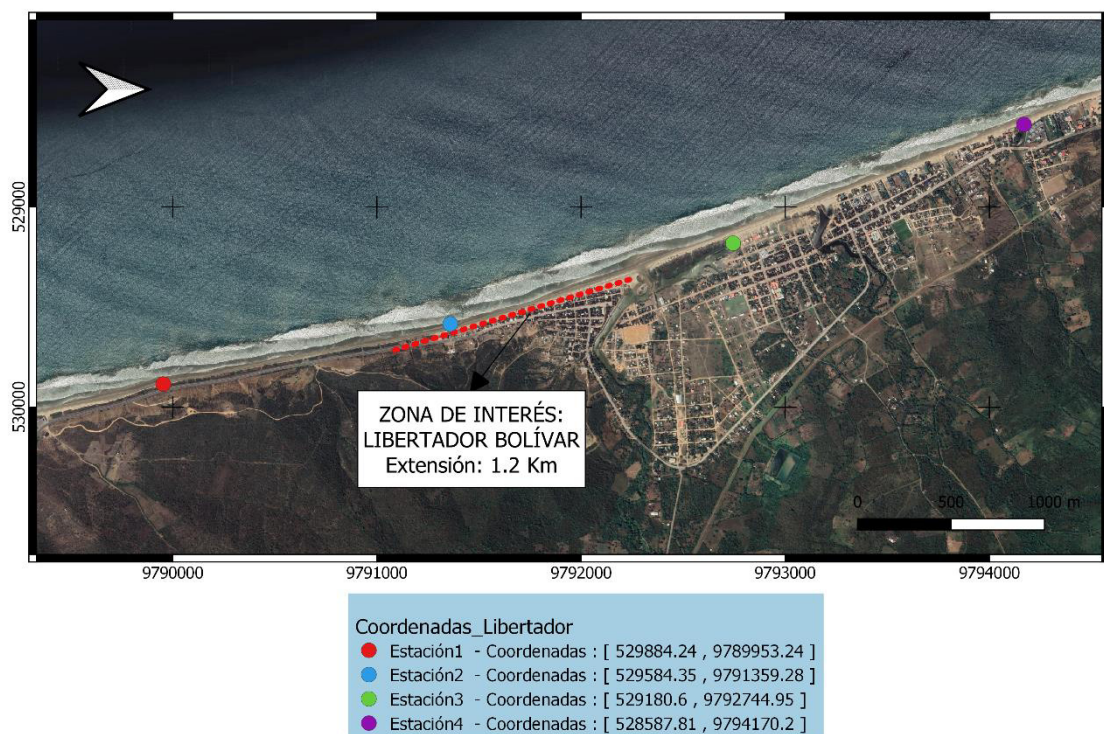


Figura 2.2 Estaciones definidas para las mediciones litorales [Autores, 2020].

Corriente Litoral

Las mediciones se realizaron cada 30 minutos desde las 10:00 am hasta las 15:30 pm. Entre los materiales utilizados para determinar la corriente litoral tenemos:

- Derivador (Botella de plástico marcada)
- Cronómetro

- Planilla de medición

Los datos recolectados son el tiempo que transcurre al momento que el observador arroja el derivador en la zona de rompiente hasta que éste llega a la costa, la distancia entre la línea de agua y el sitio donde se arrojó el derivador, y la distancia donde se depositó el derivador al llegar a la orilla hasta donde se encuentra el observador.

Olas:

Para la medición del oleaje se identifica el tren de olas y se empieza a contabilizar el tiempo que transcurre durante 10 olas consecutivas registrando de manera estimada y visual la altura de cada una de las 10 olas que han transcurrido, además se toma la dirección del tren del oleaje. Los materiales utilizados son:

- Planilla de medición
- Brújula
- Cronómetro

Vientos:

Se registra tanto la magnitud y la dirección con la que el viento está soplando con ayuda de un anemómetro digital y una brújula. Cabe mencionar que para las campañas de medición realizadas no se tomó el valor de la magnitud del viento debido a que no se contaba con el anemómetro.

Sedimentos:

Se recolectaron muestras de sedimentos en cada estación en marea alta, media y baja. Las muestras recolectadas se utilizarían para realizar los respectivos ensayos granulométricos, sin embargo, por motivos de la emergencia sanitaria no se pudo utilizar el laboratorio para procesar las muestras, motivo por el cual se recopiló información de campañas de mediciones previas para obtener la información de sedimentos.

Pendiente de playa:

En primer lugar, se registró la orientación de la playa con ayuda de una brújula y para determinar la pendiente se usaron dos métodos:

- Método Andrade
- Método Teodolito

El método Andrade, consiste en dos reglas conectadas entre sí por medio de una manguera, la cual contiene agua y por la diferencia de elevación que marca el agua, se puede realizar dicha medición como se muestra en la Figura 2.3. Los perfiles de playa fueron tomados a lo largo de las 4 estaciones definidas inicialmente para las campañas de medición.

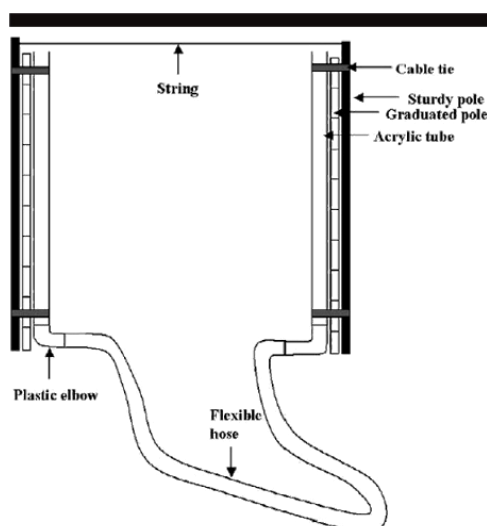


Figura 2.3 Método Andrade Método Andrade (Andrade & Ferreira, 2006).

El método con el teodolito consiste en la utilización del teodolito que es un instrumento de medición mecánico-óptico universal que sirve para medir ángulos verticales y, sobre todo, horizontales, que tiene una precisión elevada. De la misma manera se obtuvieron mediciones para cada estación desde el límite de construcción hasta el nivel de agua (Topoequipos S.A., 2019).

Campañas de medición: Años anteriores

Cabe mencionar que además de los datos tomados en las mediciones litorales correspondientes al año 2020, también se recopiló información correspondiente a

campañas previas de las cuales se obtuvieron las variables más importantes como se muestra a continuación:

Tabla 2.1 Recopilación de mediciones litorales. Fase: Sicigia [Autores, 2020].

		SICIGIA						
		2017 1S	2017 2S	2018 1S	2019 1S	2019 2S	2020 1S	PROM
Parámetros								
Olas	Altura [m]	0.60	0.43	0.63	1.11	1.02	0.69	0.75
	Periodo [s]	15.41	13.07	13.44	15.29	13.96	13.57	14.12
	Dirección [°]	328.36	246.15	254.49	237.71	224.99	254.01	257.62
Ancho de zona de surf [m]		28.70	31.74	39.32	76.50	62.63	80.72	53.27
Ancho de zona de rompiente [m]		45.26	73.36	74.67	3.50	33.93	35.18	44.32
Pendiente de playa [m]		0.08	0.02	0.03	0.06	0.05	0.04	0.05

Tabla 2.2 Recopilación de mediciones litorales. Fase: Cuadratura [Autores, 2020].

		CUADRATURA						
		2017 1S	2017 2S	2018 1S	2019 1S	2019 2S	2020 1S	PROM
Parámetros								
Olas	Altura [m]	0.69	0.39	0.63	0.31	0.75	0.51	0.55
	Periodo [s]	15.89	15.14	14.12	15.87	16.91	14.01	15.32
	Dirección [°]	321.61	255.90	256.30	221.79	202.45	212.39	245.07
Ancho de zona de surf [m]		34.54	38.98	64.17	30.44	63.08	82.88	52.35
Ancho de zona de rompiente [m]		45.78	66.66	88.03	26.34	39.97	21.41	48.03
Pendiente de playa [m]		0.09	0.05	0.03	0.07	0.02	0.04	0.05

2.1.2 Datos WAVEWATCH III

Los datos de pronóstico del oleaje fueron obtenidos del modelo WAVEWATCH III, del servidor Asia Pacific Data Research Center (APDRC), del cual se descargó un conjunto de datos desde el año 1996 hasta el 2018. Las variables de interés que fueron extraídas del conjunto de datos fueron: Altura significativa, periodo y dirección

del oleaje además de las coordenadas del sitio donde se registró cada medición. Los datos fueron revisados y filtrados en Matlab tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

Tabla 2.3 Rangos para la filtración de datos WAVEWATCH III [Autores, 2020].

Variable	Rango aceptado
Altura significativa [m]	0-4 m
Periodo [s]	8-20 s
Dirección del oleaje [°]	0-360

2.1.3 Batimetría

La batimetría utilizada corresponde a la carta I.O.A 105 obtenida del Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador (INOCAR). Se realizaron dos cortes a la batimetría para el ingreso a los respectivos módulos: El primer corte con un alcance hasta el veril de los 200 metros para el modelo MIKE 21SW (Spectral Waves), y el segundo corte con un alcance hasta los 10 metros para el modelo Parabolic Mild Slope (PMS).

2.2 FASE II: Generación de Inputs con MIKE Zero

2.2.1 Digitalización de Batimetría y Generación de malla

Se procedió a utilizar la herramienta Bathymetry Editor del componente MIKE Zero para digitalizar la carta náutica que fue previamente interpolada en el Software Quantum GIS. Se ingresó primero los polígonos correspondientes a la tierra, luego los veriles y los valores de profundidad. Una vez digitalizados todos los puntos se exportó la batimetría obteniendo dos archivos de tierra y de profundidad los cuales son requeridos para la generación de la malla.

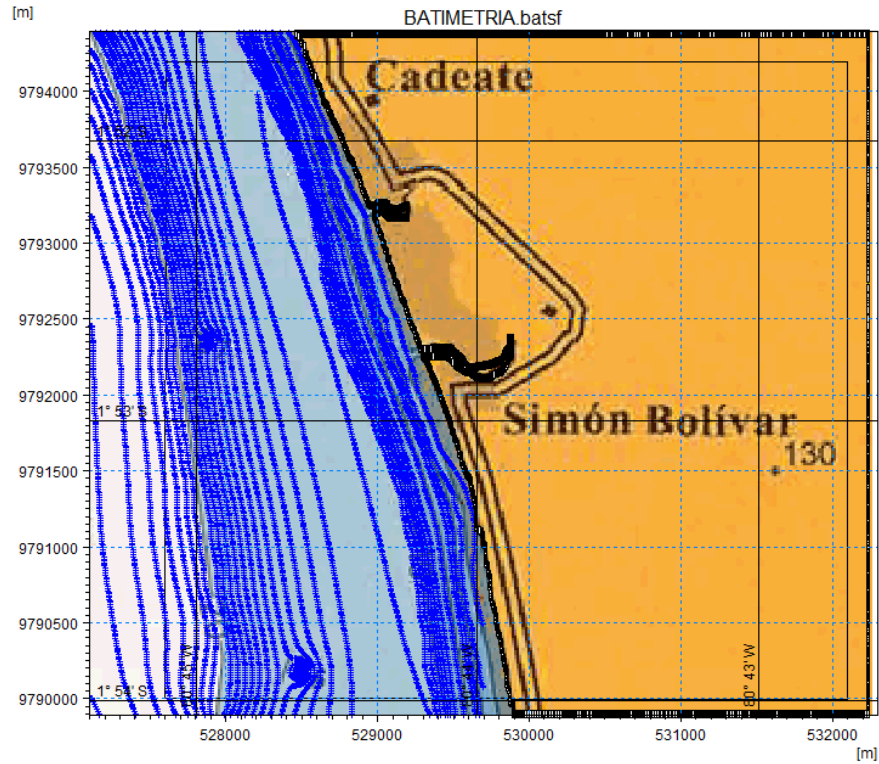


Figura 2.4 Digitalización de la batimetría [Autores, 2020].

Con los archivos generados se utilizó la herramienta Mesh Generator para generar la malla. Se definió previamente la sección de batimetría que se iba a interpolar. En la Figura 2.5 se muestra la malla generada para nuestra zona de estudio.

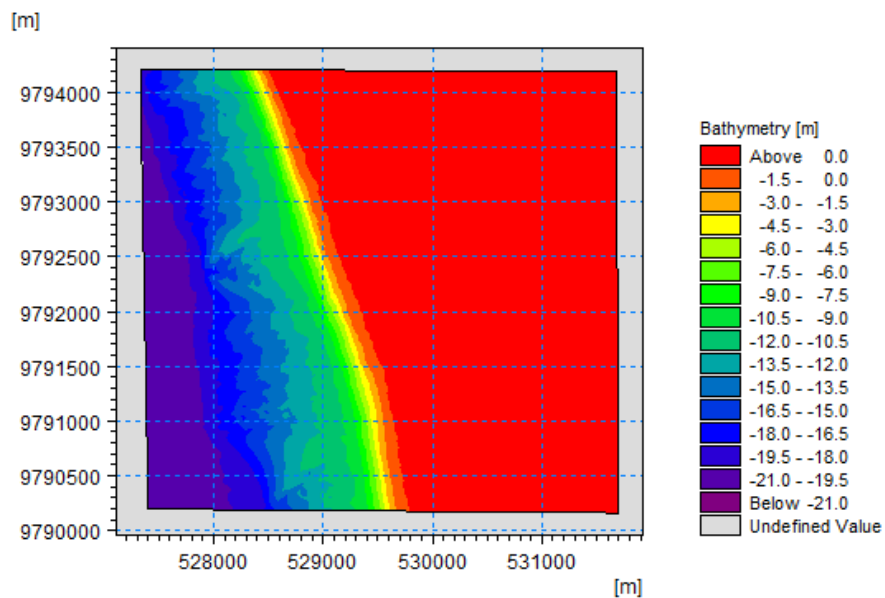


Figura 2.5 Generación de la malla [Autores, 2020].

2.2.2 Profile Series

Esta herramienta del componente MIKE Zero fue utilizada para generar los archivos de ingreso del MIKE 21SW (Spectral Wave). Se generaron dos archivos con extensión dsf0 correspondiente al año en condiciones normales y al año en condiciones ENSO. Los datos ingresados fueron filtrados y seleccionados del modelo WAVEWATCH III, adicional se utilizó un valor constante de 16.52 correspondiente a la Desviación direccional estándar que fue tomada como referencia de trabajos previos.

2.2.3 Grid Series

Esta herramienta fue utilizada para generar los archivos de ingreso de los módulos Parabolic Mild Slope y Non Cohesive Sediment Transport tomando en cuenta el tiempo de simulación y la cantidad de datos. Entre las variables ingresadas en los archivos se consideran: Rugosidad de fondo, diámetro del grano y la desviación estándar.

Tabla 2.4 Rugosidad de fondo marino y de las estructuras [Autores, 2020].

	RUGOSIDAD DE LA ESTRUCTURA	RUGOSIDAD DE FONDO
ESPIGONES T	3	0.04
ROMPEOLAS	3	0.04
CORAL	0.47	0.04

2.3 FASE III: Oleaje en Aguas Profundas utilizando MIKE 21SW (Spectral Waves)

El módulo de onda espectral se utilizó para determinar la transformación del oleaje de aguas profundas a aguas someras. Para obtener los resultados de este módulo se empleó la metodología propuesta por (Caiza & Nativi, 2019), adaptando al periodo de simulación y el área de la zona de estudio con la que se trabajó.

Los datos filtrados del WAVEWATCH III generados en la herramienta Profile Series con extensión dsf0 que se ingresaron en el modelo corresponden al año 2017, ya que se contaba con datos de ese año correspondiente a las mediciones litorales, lo que nos iba a permitir calibrar y validar el modelo posteriormente.

2.4 FASE IV: Oleaje en Aguas Someras utilizando MIKE 21PMS (Parabolic Mild Slope)

El módulo Parabolic Mild Slope se utilizó para determinar las condiciones del oleaje en la zona de aguas someras correspondientes a los 1.2km de línea de costa que delimitamos para analizar los efectos de refracción y difracción del oleaje a una profundidad variable. Los resultados que se obtienen del módulo PMS sirven como base para el modulo hidrodinámico. El proceso a seguir para obtener los resultados del módulo Parabolic Mild Slope se resume a continuación:

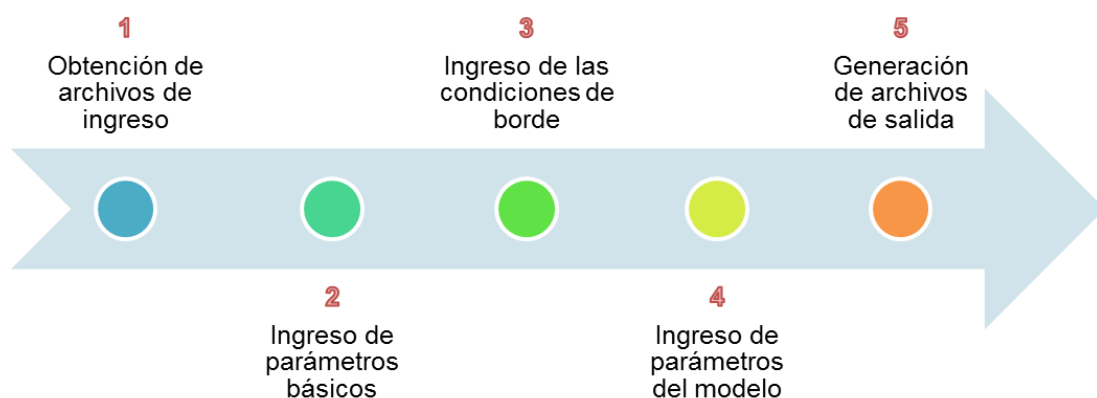


Figura 2.6 Proceso de simulación utilizado para el módulo Parabolic Mild Slope (PMS)
[Autores, 2020].

Paso 1: Preparar archivos de ingreso

Los archivos de ingreso del modelo están comprendidos por:

- Batimetría
- Rugosidad
- Distribución de la energía de las olas (Frecuencia y dirección).

La batimetría y la rugosidad de fondo correspondientes a la zona de estudio fueron generados previamente para la simulación del modelo, específicamente en las

herramientas “Batimetry Editor” y “Profile Series”. Mediante la herramienta MIKE 21 Toolbox se obtiene un archivo que con extensión dsf2 que representa la distribución de la energía de las olas para el cual se ingresan los resultados obtenidos en el Módulo SW.

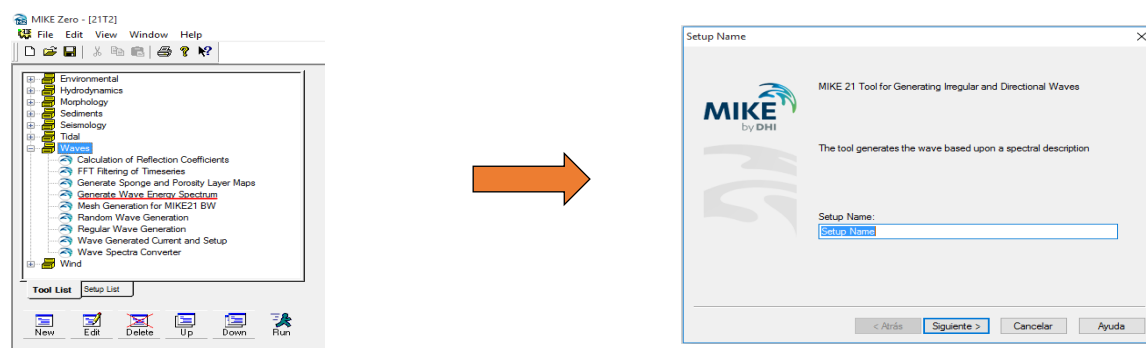


Figura 2.7 Generación del archivo de distribución de energía [Autores, 2020].

Posteriormente, se ingresa el periodo de simulación con el que se va a trabajar y se define el tipo de espectro de frecuencia de onda que se va a utilizar.

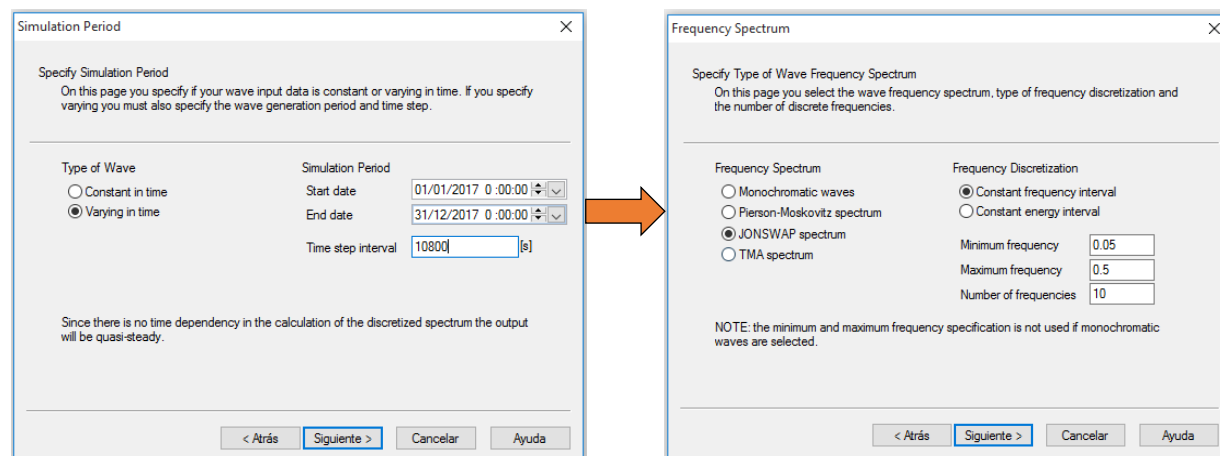


Figura 2.8 Periodo de simulación y Espectro de frecuencia [Autores, 2020].

Para nuestro caso de estudio definimos el espectro JONSWAP e ingresamos los parámetros de altura significativa, periodo y dirección del oleaje, los mismos que fueron obtenidos previamente por el MIKE 21SW. Finalmente, se guarda el archivo, y se genera el archivo en la carpeta especificada.

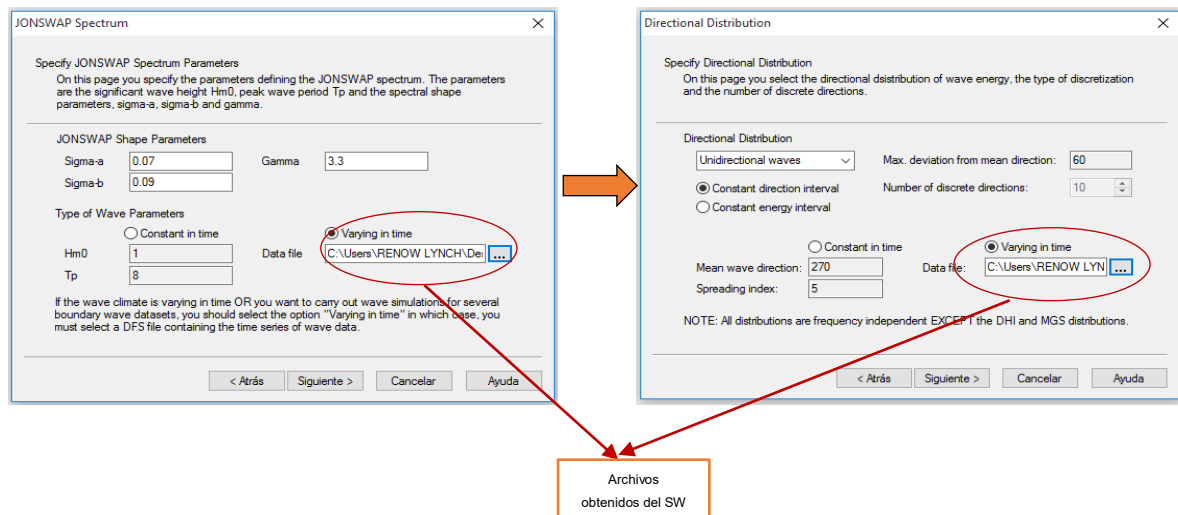


Figura 2.9 Especificaciones Espectro [Autores, 2020].

Paso 2: Ingresar parámetros básicos

En los parámetros básicos se ingresa la batimetría generada de la zona de estudio, además se define el tipo de simulación (Normal PMS) y se define el tiempo de simulación.

Paso 3: Ingresar condiciones de borde

Existen dos tipos de condiciones de borde dentro del módulo PMS:

Offshore: Se especifica un oleaje de tipo “Irregular Directional” en donde se ingresa la selección de datos que corresponde al archivo de la distribución de la energía de las olas, el cual fue generado en la preparación de los archivos de ingreso.

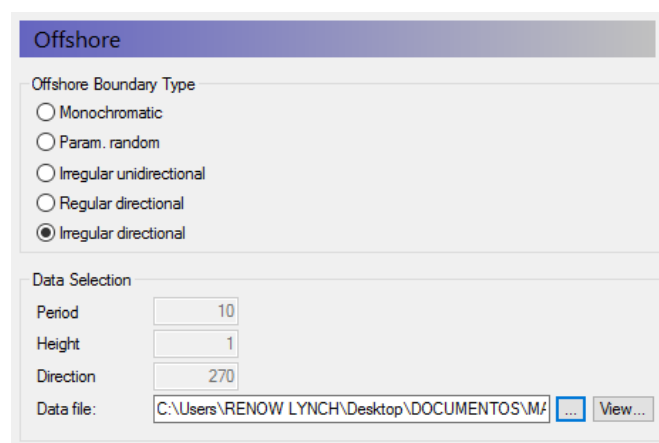


Figura 2.10 Condiciones de borde PMS [Autores, 2020].

Laterales: Se especifica un tipo de límite simétrico tanto para el norte como para el sur. Los límites simétricos asumen que los contornos son localmente rectos y paralelos cerca del límite y se recomienda en la mayoría de aplicaciones.

Paso 4: Ingresar parámetros del modelo

Los parámetros del modelo se encuentran divididos en 4 secciones: Elevación de la superficie, parámetros de solución, disipación de fondo y oleaje rompiente.

Tabla 2.5 Parámetros del modelo [Autores, 2020].

1	Elevación de la superficie	Valores constantes
2	Parámetros de solución	Se definen coeficientes mínimos y máximos del modelo y se incluye la filtración que está asociada con la disipación en la interface (coeficiente: 0.25)
3	Disipación de fondo	Se ingresó el archivo de rugosidad generado con ayuda de la herramienta Grid series
4	Oleaje rompiente	Se considera la formulación de Battjes & Stive.

Paso 5: Definir archivos de salida

Los resultados básicos de MIKE 21PMS consisten, en 2 tipos de archivos, los cuales van a tener una extensión dfs2. El primer archivo va a contener condiciones del oleaje como la altura significativa del oleaje obtenida del espectro, el periodo pico y la dirección promedio del oleaje; mientras que, el segundo archivo va a contener los esfuerzos de radiación del oleaje S_{xx} , S_{xy} y S_{yy} .

Numbers of output areas:

Size of Output MB

	Data File		Title	Height, Period, Direction	Surface Elevations	Vector Components	Radiation Stresses	J	K	Time
1	Wave.dfs2	View		☒	☐	☒	☐	0--1,1	0--1,1	0-0,1
2	Radwave.dfs2	View		☐	☐	☐	☒	0--1,1	0--1,1	0-0,1

Figura 2.11 Outputs del modelo [Autores, 2020].

2.5 FASE V: Procesos Costeros: Flujos hidrodinámicos y Transporte de sedimentos

2.5.1 MIKE 21FM: Flow Model

El módulo Flow Model (FM), fue utilizado para simular los fenómenos hidráulicos y ambientales en las zonas costeras. Además, complementa al módulo PMS para determinar las condiciones hidrodinámicas de una determinada zona. El proceso para obtener los resultados de la simulación en Flow Model consiste en 3 fases:

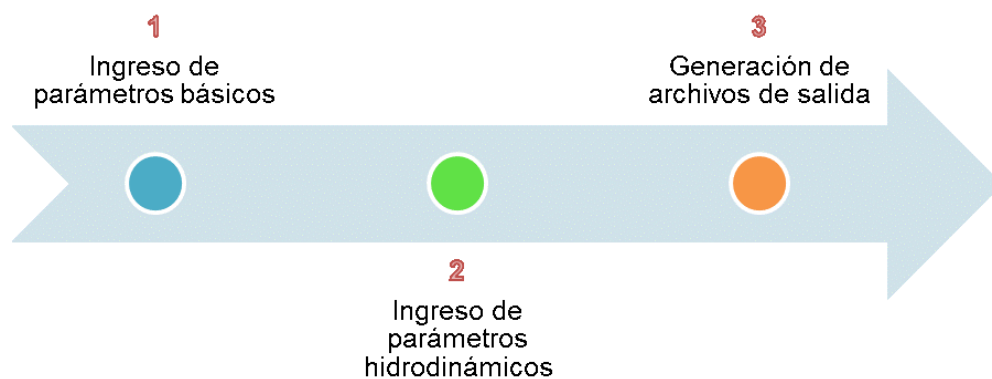


Figura 2.12 Proceso realizado para la simulación con Flow Model [Autores, 2020].

Paso 1: Ingresar parámetros básicos

Para correr la simulación del modelo se deben determinar las condiciones iniciales de la simulación que consiste en:

- Selección del módulo a trabajar
- Ingreso de la batimetría
- Definir el periodo de simulación
- Establecer las condiciones de borde
- Ingresar las fuentes y sumideros
- Ingresar la masa presupuestaria
- Ingresar puntos de inundaciones o sequías

Para la selección del módulo a trabajar se podía escoger 4 diferentes opciones: módulo hidrodinámico, módulo de advección y dispersión, módulo de transporte de arena y Ecolab. Sin embargo, para nuestro estudio se decidió trabajar solo con el módulo hidrodinámico. La batimetría a ingresar corresponde a la zona de estudio

definida previamente, esta batimetría fue de tipo Cold Start ya que con este tipo de batimetría se trabajó en el Spectral Waves y Parabolic Mild Slope, además se requería que el campo de velocidad se iniciara en cero.

Posteriormente, se ingresa el periodo de simulación, con el que se va a trabajar de manera inicial, las condiciones de borde son detectadas automáticamente por el programa, pero también se pueden ingresar de manera manual. Dentro de las características para la simulación requerida, no se considera fuentes y sumideros, masa presupuestaria, ni puntos de inundación y sequía por lo que no se va a ingresar información en estas secciones.

Paso 2: Ingresar parámetros hidrodinámicos

Los parámetros que deben ser considerados en esta sección están comprendidos por:

- Elevación inicial de la superficie
- Especificaciones de las condiciones de borde
- Fuentes y sumideros
- Viscosidad de Eddy
- Resistencia
- Radiación del oleaje
- Condiciones del viento
- Estructuras

La elevación inicial de superficie y las condiciones de borde son detectadas de manera automática por el programa cuando se ingresan los inputs. Para la viscosidad de Eddy y la resistencia se asumieron valores constantes de 1.5 y 28 m^2/s respectivamente, la formulación empleada para la viscosidad de Eddy está basada en la velocidad, mientras que, para la resistencia, las formulaciones están basadas en el número de Manning. Para la radiación del oleaje se ingresó uno de los archivos generados por el PMS (Parabolic Mild Slope) que indica el estrés de radiación del oleaje (S_{xx} , S_{xy} , S_{yy}). Este archivo es de tipo dsf2 y debe tener el mismo periodo de simulación que se definió al ingresar los parámetros básicos para correr el modelo.

Cabe mencionar que, dentro de estos parámetros hidrodinámicos, no se consideró para la simulación la presencia de fuentes y sumideros, estructuras, ni la acción del viento, por lo que no se ingresó ningún tipo de información en estas secciones.

Paso 3: Definir archivos de salida

El archivo de salida obtenido al finalizar la simulación va a servir como archivo de ingreso para el módulo de transporte de sedimentos no cohesivos (MIKE 21ST), que contempla los siguientes parámetros: Profundidad del agua, Flujo P, Flujo Q.

2.5.2 MIKE 21ST: Non-Cohesive Sediment Transport

MIKE 21ST fue utilizado para obtener las velocidades de transporte de sedimentos no-cohesivos (ej. arena). Los archivos de ingreso del programa están vinculados a los módulos PMS y FM. El proceso para obtener los resultados de la simulación se divide en 3 fases las cuales son:

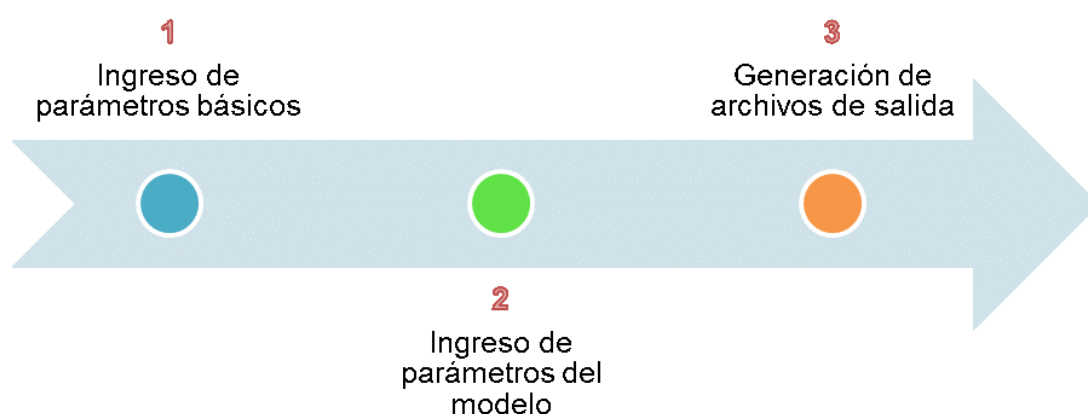


Figura 2.13 Proceso realizado para la simulación con el modulo MIKE 21ST [Autores, 2020].

Paso 1: Ingreso de parámetros básicos

En los parámetros básicos se deben especificar las condiciones iniciales para obtener los respectivos resultados del modelo, dentro de estos parámetros tenemos:

- Tipo de simulación

- Datos hidrodinámicos
- Sub área
- Sub series

El tipo de simulación escogida para el análisis del transporte de sedimentos considera una combinación de olas y corrientes, requiere de archivo que contenga datos de una simulación hidrodinámica, estos datos son los generados por el Flow Model. Otro de los requerimientos de este tipo de simulación es que se ingresen datos de una simulación de onda; en este caso los resultados obtenidos del PMS. Los datos hidrodinámicos ingresados corresponden a los valores de flujo hidrodinámico P flux y Q flux obtenido del Flow Model, como ya se especificó anteriormente.

Para la simulación también se debe especificar el área de influencia para lo cual se determina qué segmento del mapa hidrodinámico se utilizará al ejecutar la simulación del transporte de arena, estas coordenadas son relativas al archivo HD, por lo que se escogió las dimensiones seleccionadas para la extracción de la batimetría. El tamaño de las celdas de la cuadrícula utilizadas en la simulación hidrodinámica se refleja directamente en la simulación realizada por MIKE 21ST, por lo que hay que asegurarse de tener esto en cuenta al configurar los parámetros iniciales para la simulación de transporte de arena.

Paso 2: Ingreso de parámetros del modelo

Para los parámetros del modelo se especifican 4 diferentes parámetros que son:

- Teoría de olas y corrientes
- Datos de oleaje
- Resistencia del fondo
- Sedimentos

La teoría de olas y corrientes que fue utilizada para el transporte de sedimentos se basó en la metodología de Bijker presentada en el año 1967, este método usa como principales parámetros la densidad relativa del material de fondo, la temperatura del agua, el tamaño del grano y su densidad con el fin de determinar la velocidad de sedimentación del sedimento en suspensión.

Waves and Current Theory

Sediment Transport Method
☐ STP deterministic model
☒ Bijker's method

STP Model
☒ 2DH simulation
☐ Q3D simulation

Sediment Transport Table
 Data file: C:\Users\RENEW LYNCH\Desktop\DOCUMENTOS\MATEF ...

Bijker Method Parameters
 Relative density of sediment: 2.65
 Water temperature: 10 [°C]

Bed Load Transport Coefficient B
☒ Spatial constant
☐ Spatial varying

Coefficients
 Constant: 1
 Data file: ... View...

Figura 2.14 Teoría de olas y corrientes [Autores, 2020].

En la sección de ingreso de oleaje se debe incluir el otro archivo generado por el PMS de tipo dsf2 que contempla los siguientes parámetros: Altura significativa del oleaje, periodo pico y dirección media de las olas.

Wave Input Data

Wave Height Definition
☒ Significant wave height
☐ RMS wave height

Origin of Wave Grid
 j-coord.: 0
 k-coord.: 0

Wave Period Definition
☐ Mean wave period
☒ Peak wave period
☐ User-specified wave period
 Wave period: 8

Wave Data
☐ Stationary data file
☒ Quasi-stationary data file
 Data file: C:\Users\RENEW LYNCH\Desktop\RESPALDO JOHAN... View...

Figura 2.15 Ingreso de datos de oleaje [Autores, 2020].

Para la resistencia de fondo se especifica un valor constante basado en la formulación del número de Manning con un valor de 28. Para los datos de sedimentos se especifica de manera constante espacialmente en donde se ingresó

un valor de 0.4 para la porosidad, 0.25 para el diámetro medio del grano y 1.1 para la desviación estandar.

Fase 3: Generación de archivos de salida

Se generaron 2 tipos de datos de salida de una simulación MIKE 21ST. Estos son: Tasas de transporte de sedimentos promedios y Tasas iniciales de cambio del nivel del fondo. Adicionalmente, también se puede generar series temporales de tasas de transporte guardadas a intervalos determinados.

2.5.3 Calibración y Validación del modelo

Los datos del modelo fueron calibrados y validados tomando como referencia las mediciones litorales correspondiente a las campañas de medición realizadas en el año 2017 en donde se analizaron las condiciones de oleaje (altura, periodo y dirección de olas) y la tasa de erosión generada en el escenario de calibración. Los datos de las mediciones litorales fueron comparados con los resultados del modelo WAVEWATCH III y el Modelo de onda espectral SW. Mientras que los resultados de la tasa de erosión obtenidos del módulo Non-Cohesive Sediment Transport (ST) fueron comparados con las tasas de erosión de estudios previos realizados en la comuna Libertador Bolívar.

Los escenarios planteados fueron utilizados para analizar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la playa tanto en condiciones extremas como en condiciones normales ante los diferentes tipos de estructuras propuestas.

2.6 FASE VI: Generación de escenarios con estructuras de protección

2.6.1 Condiciones del oleaje

Se realizaron simulaciones con MIKE 21 para 2 condiciones de oleaje:

- Condiciones Normales (año 2017)
- Condiciones ENSO - El Niño (febrero 1997 - agosto 1998)

2.6.2 Evaluación de las estructuras de protección ante distintas condiciones de oleaje

2.6.2.1 Rompeolas

Los rompeolas deben estar ubicados de acuerdo con la respuesta que se quiere obtener, por ejemplo, tómbolos o salientes. Para este caso la respuesta que se quiere obtener de la playa es la formación de salientes, por ello debe colocarse más allá de la zona de rompiente por lo que el rompeolas debe estar ubicado más allá de la zona de rompiente, por esta razón se escogió una distancia de la berma al rompeolas de 200 m. Se consideró para el diseño funcional que el sistema de rompeolas sea emergido.

En la Tabla 2.6, se detalla la metodología del Shore Protection Manual (1984), para obtener la longitud de cada rompeolas, en la cual se usó la relación de Dally y Pope (1986) en donde se establece que: $L_s = x (0.5-0.67)$, donde x es la distancia de la berma al rompeolas. La longitud de los espigones de acuerdo con la relación utilizada debe estar comprendida entre (100, 134) por lo que se escogió una longitud promedio de 120 m.

Tabla 2.6 Longitud del rompeolas [Autores, 2020].

Fuente: Shore Protection Manual 1984

LONGITUD DEL ROMPEOLAS	
Relación de Dally y Pope (1986)	$L_s = X (0.5) - L_s = X (0.67)$
$L_s :$	Longitud de separación
$X :$	Distancia de la Berma al Rompeolas
$X = 200\text{m}$	
$L_s = 200 (0.5) = 100 \text{ m}$	
$L_s = 200 (0.67) = 134\text{m}$	
Longitud Promedio (L_s)= 120 m	

Para la separación del rompeolas, la metodología usada fue la relación de Seiji, Uda, Tanaka (1987) como se muestra en la Tabla 2.7, que establece que: $L_g \leq 0.8X$,

donde 'Lg' es la separación y 'x' la distancia desde la berma al rompeolas. Por otra parte, como esta debe cumplir la relación mencionada, es decir, ser menor a 160 metros, entonces se definió un $L_g = 100$ metros.

Tabla 2.7 Separación entre rompeolas [Autores, 2020].

Fuente: Shore Protection Manual 1984

SEPARACIÓN DEL ROMPEOLAS	
Relación de Seiji, Uda, Tanaka (1987)	$L_g \leq 0.8 X$
Lg:	Separación
X :	Distancia de la Berma al Rompeolas
$X = 200\text{m}$	
$L_g \leq 160\text{ m}$	
$L_g = 100\text{ m}$	

Se decidió diseñar 5 rompeolas para cubrir con la extensión de 1.2 Km de la zona que se quiere evaluar. En la Figura 2.16, se visualiza las dimensiones del rompeolas de acuerdo a los cálculos establecidos anteriormente.

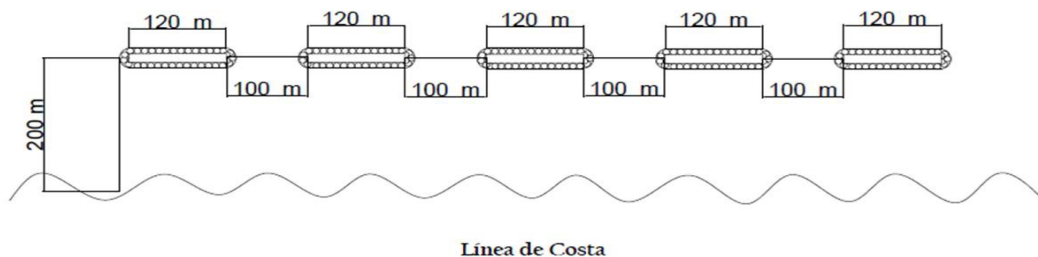


Figura 2.16 Diseño de Rompeolas: Dimensiones [Autores, 2020].

Para la altura del rompeolas se consideró los parámetros mostrados en la Tabla 2.8.

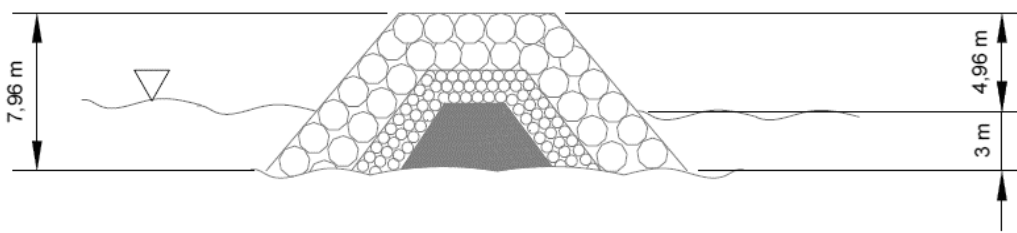


Figura 2.17 Diseño de Rompeolas: Vista transversal - Dimensiones [Autores, 2020]

Tabla 2.8 Parámetros usados para la altura del rompeolas [Autores, 2020].

Fuente: Shore Protection Manual 1984

PARÁMETRO	LONGITUD [M]
Rango de marea	2.5
Aumento El Niño	0.5
Run up	1.96
Veril	3
Altura total	7.96

En la Figura 2.18 se muestra la implantación de cómo se verían los rompeolas en la zona de estudio:



Figura 2.18 Implementación de los Rompeolas en el área de estudio [Autores, 2020].

2.6.2.2 Espigones en T

La mayor parte del transporte de sedimentos ocurre en la zona de rompimiento de las olas, por lo tanto, los espigones deben comprender al menos una parte de la zona de surf ya que en esta zona también ocurren la mayor parte de procesos dinámicos de la playa. En la Tabla 2.9 se muestra la metodología del Shore Protection Manual (1984), usada para calcular el espaciamiento de los espigones, el cual debe ser 1.5 o 2 veces la longitud del espigón. Para el diseño se tomó como referencia un valor promedio entre estos factores de 1.75.

Tabla 2.9 Espaciamiento espigones [Autores, 2020].

ESPACIAMIENTO DE LOS ESPIGONES	
$Xg=1.75Yg$	
Xg:	Espaciamiento
Yg:	Longitud del espigón
Longitud inicial de 80 metros que cubre parte de la zona de surf ($Yg = 80m$)	
$Xg = 1.75(80) = 140m$	

Debido a que se contaba con un área de influencia de 1.2 Km, se planteó la construcción de 4 espigones en forma de T, las longitudes de las escolleras fueron dimensionadas tomando en cuenta el área de influencia y el número de espigones requeridos, por lo que se escogió una longitud de 90 metros para cada escollera. También se determinó un ancho de 8 metros para cada espigón (Sánchez, 2003).

Tabla 2.10 Longitud escolleras [Autores, 2020].

LONGITUD DE LOS ESCOLLERAS	
Área de influencia=1.2 Km	
Xg:	Espaciamiento
$Xg=5(140) = 700$ metros	
Ancho total espigones= $8(4) = 32$ metros	
Área de construcción total= 0.73 Km	

Se diseñaron 4 espigones en forma de T con separación de 140 metros como se puede evidenciar en la Figura 2.20, la longitud del espigón hasta la escollera es de 80 metros, mostrada, mientras que la escollera tiene una longitud de 90 metros como se muestra en la Tabla 2.10.

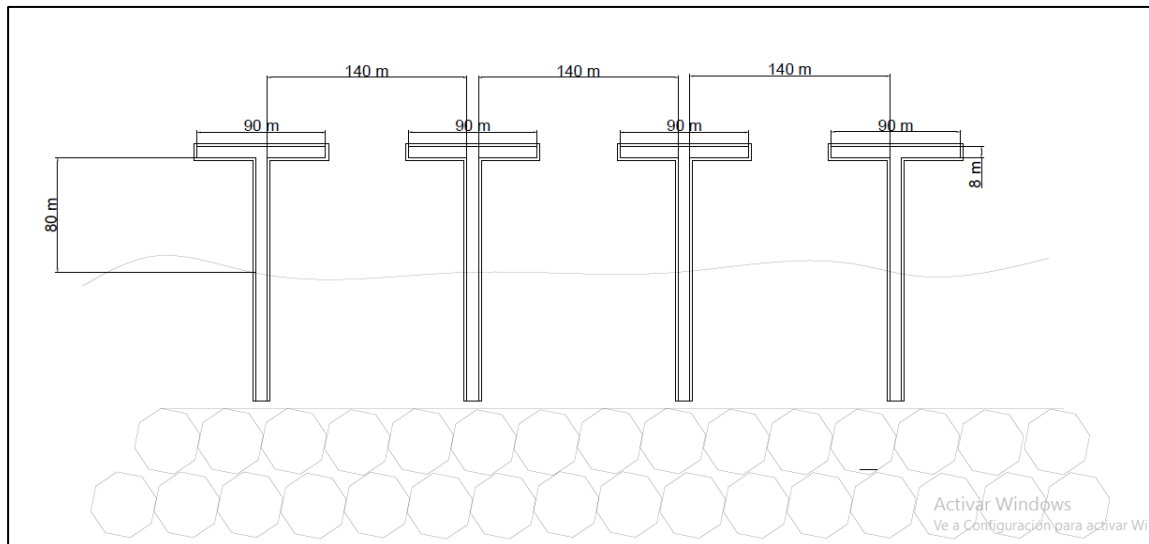


Figura 2.19 Diseño de espigones en T: Dimensiones [Autores, 2020].

En la Figura 2.20 se muestra la implantación de los espigones en T, en la zona de estudio:



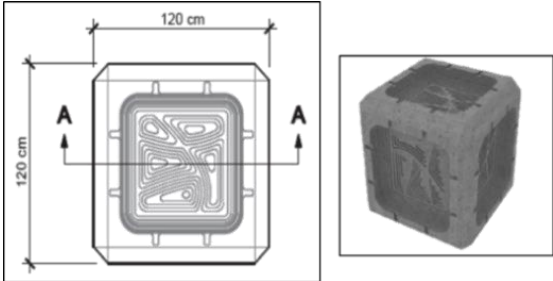
Figura 2.20 Implementación de los espigones en T en la zona de estudio [Autores, 2020].

2.6.2.3 Arrecifes de corales artificiales

Para el diseño de protección utilizando arrecifes de corales artificiales, se hizo la elección del tipo de material basados en los diseños sugeridos por (Andrade & Maquilón, 2019), en donde se usan bloques de construcción modulares de infraestructura marina (Econcrete). Estos bloques son elaborados con una medida estándar las cuales se muestran en la Tabla 2.11. Sin embargo, la compañía también diseña bloques con distintas dimensiones que son requeridas por el cliente y como

son sugeridas para este proyecto (Tabla 2.12). Para la ubicación de los corales artificiales se debe considerar una profundidad de 4 a 10 metros para que favorezca la ictiofauna marina de esa zona.

Tabla 2.11 Dimensiones del Bloque ECO Armor. [Econcrete, 2020].



Longitud [cm]	Altura [cm]	Ancho [cm]	Volumen [Litro]	Peso [Kg]
120	120	120	1053	2530

Tabla 2.12 Dimensiones del Bloque ECO Armor adaptado a la zona. [Autores, 2020].

	LARGO	ANCHO	PROFUNDIDAD
Área de colocación de cada arrecife	135 m	90 m	7.2 – 4.2 m
Bloque	1.50 m	1.50 m	1.20 m

El área donde se va a ubicar los corales, se encuentra a una distancia de 180 metros desde la línea de agua, como se muestra en la Figura 2.21.

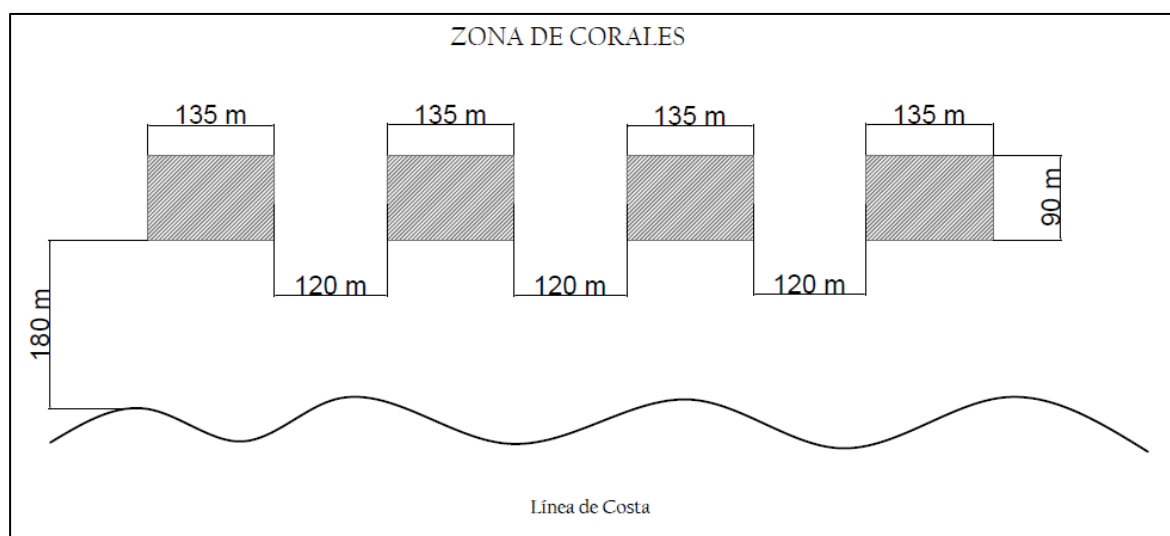


Figura 2.21 Diseño de arrecifes artificiales: Dimensiones [Autores, 2020].

En la Figura 2.22 se muestra la ubicación de la zona de corales en el área de estudio:



Figura 2.22 Implementación de los arrecifes artificiales en la zona [Autores, 2020].

Una vez que se haya diseñado todas las estructuras que van a ser introducidas en el modelo se procede a editar la batimetría con la herramienta Grid Series de MIKE Zero para empezar con las simulaciones. A continuación, se muestra las batimetrías que fueron ingresadas a los módulos de MIKE 21 para las simulaciones.

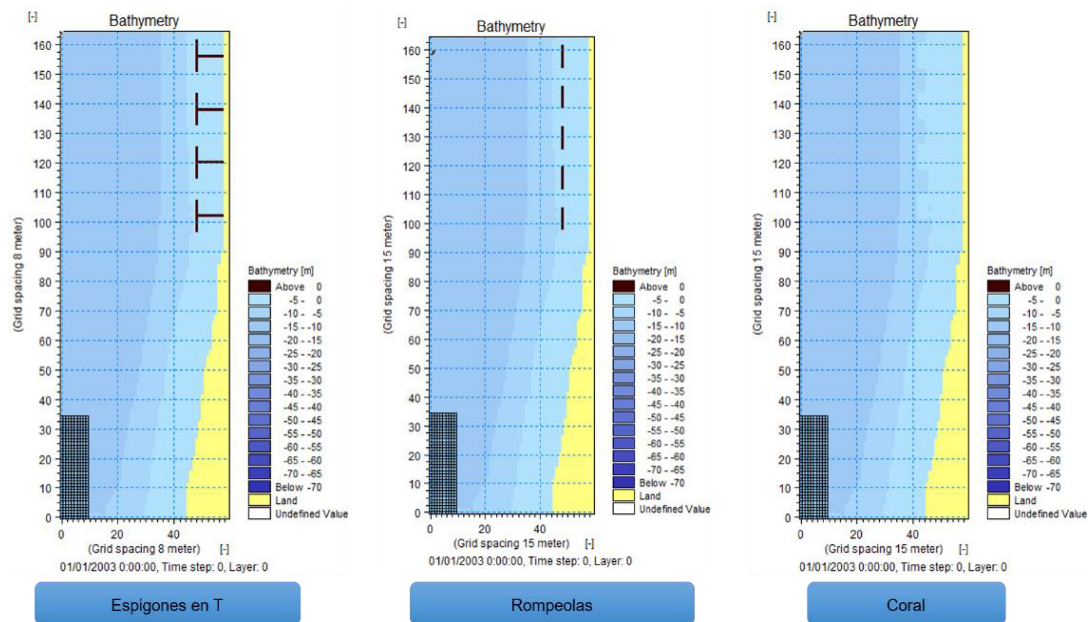


Figura 2.23 Batimetría: Espigones, rompeolas y arrecifes [Autores, 2020].

Para este proyecto se utilizó el modelo numérico computacional MIKE 21, para simular y analizar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la zona costera ante las estructuras propuestas y en condiciones extremas y normales. En la Figura 2.24 se muestra de manera general los inputs de cada módulo:

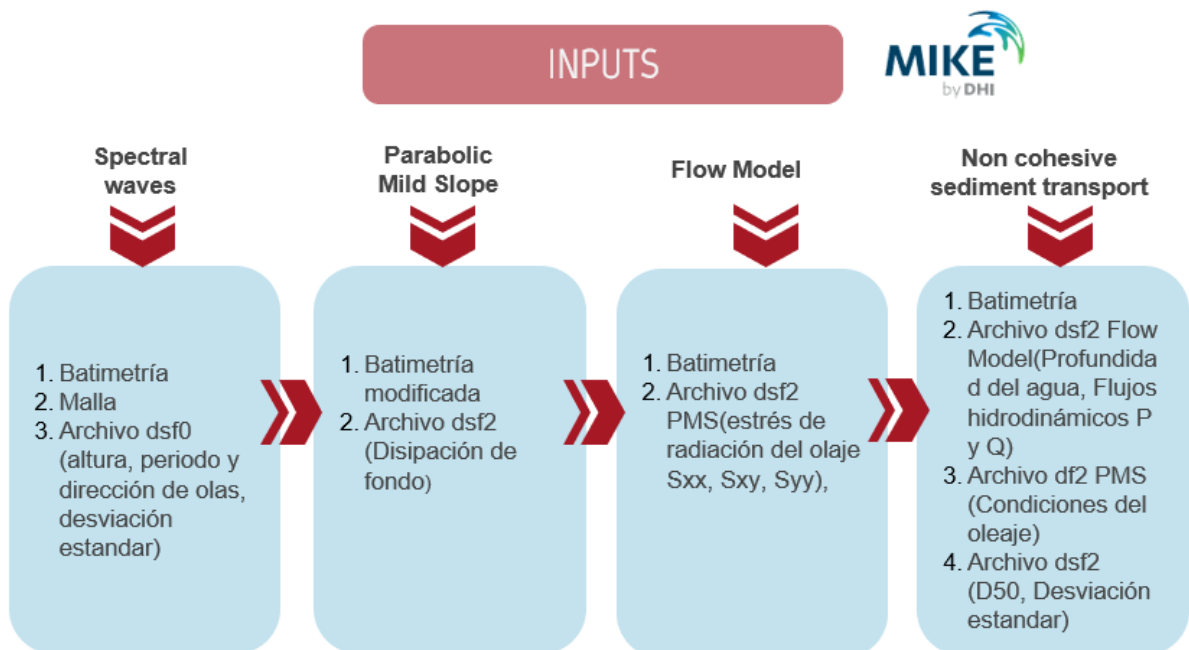


Figura 2.24 Inputs utilizados para cada módulo de MIKE 21 [Autores, 2020].

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos de la recolección de datos bibliográficos, parámetros oceanográficos de campañas de medición y datos de Hs y dirección de oleaje, los cuales fueron datos obtenidos del modelo WAVEWATCH-III (NOAA), además se muestra la calibración y validación del modelo. No obstante, se presentan los resultados de las simulaciones de los módulos de Spectral Waves, Parabolic Mild Slope, Flow Model y Sediment Transport para condiciones normales y extremas.

3.1 Resultados de la FASE I: Mediciones de campo y Recolección de Información

3.1.1 Vientos

La dirección predominante del viento se observa en rango entre 200-320 (grados) para la fase de sicigia y entre 190-330 para la fase de cuadratura.

Tabla 3.1 Dirección del viento [Autores, 2020].

Dirección del viento [°]		Sicigia	Cuadratura
	10:00	230.00	280.00
	10:30	230.00	280.00
	11:00	219.00	280.00
	11:30	205.00	192.00
	12:00	208.00	280.00
	12:30	245.00	310.00
	13:00	210.00	310.00
	13:30	212.00	310.00
	14:00	280.00	330.00
	14:30	320.00	312.00
	15:00	304.00	310.00
	15:30	306.00	295.00

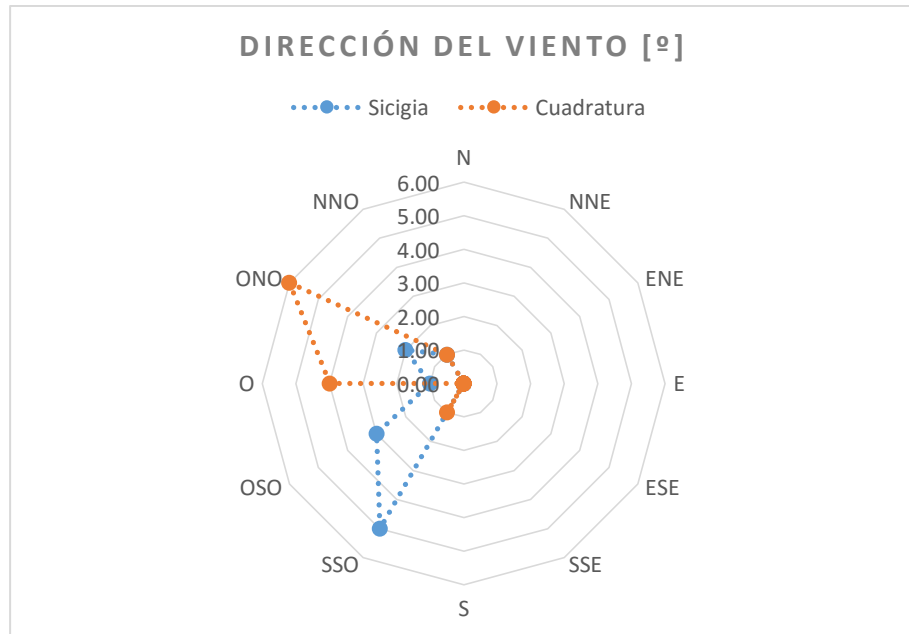


Figura 3.1 Dirección del viento [Autores, 2020].

Los resultados de las alturas de olas muestran que para la fase de sicigia alcanzan valores máximos de 1.2m (Estación 4) y para cuadratura 1.0m (Estación 2).

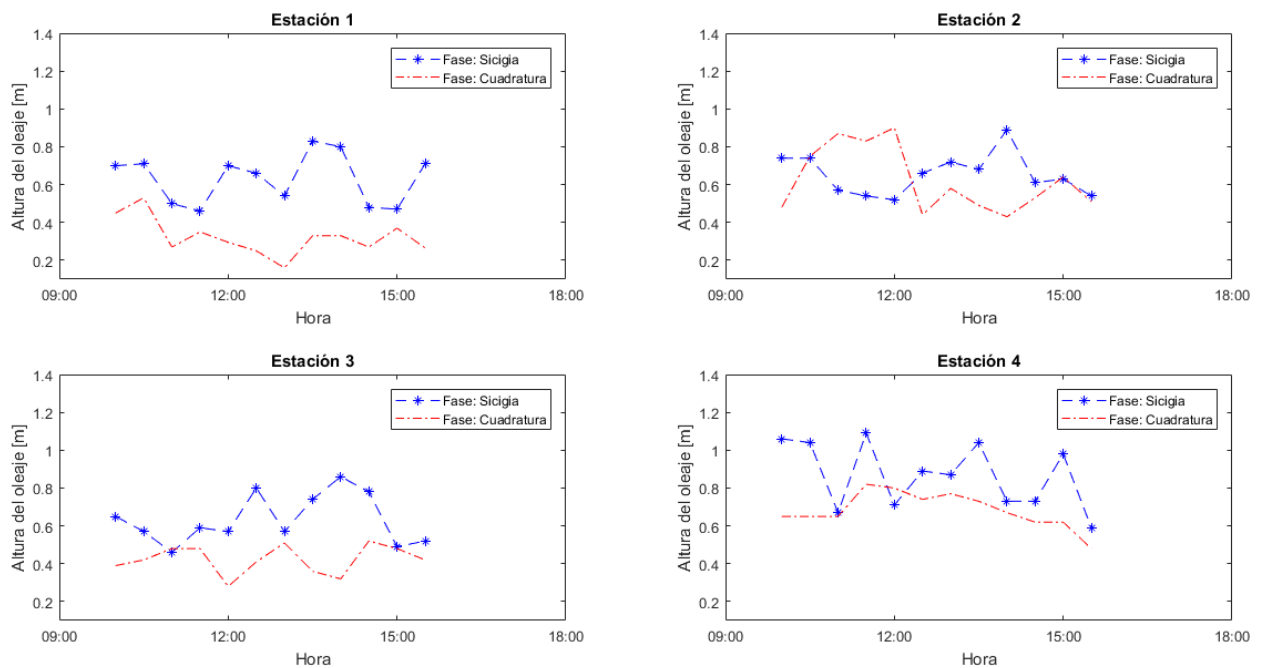


Figura 3.2 Altura de olas en Sicigia y Cuadratura [Autores, 2020].

Respecto al periodo de ola, para la fase de sicigia se observan valores entre 12 a 20 [s] y para la fase de cuadratura periodos entre 10 a 18 [s].

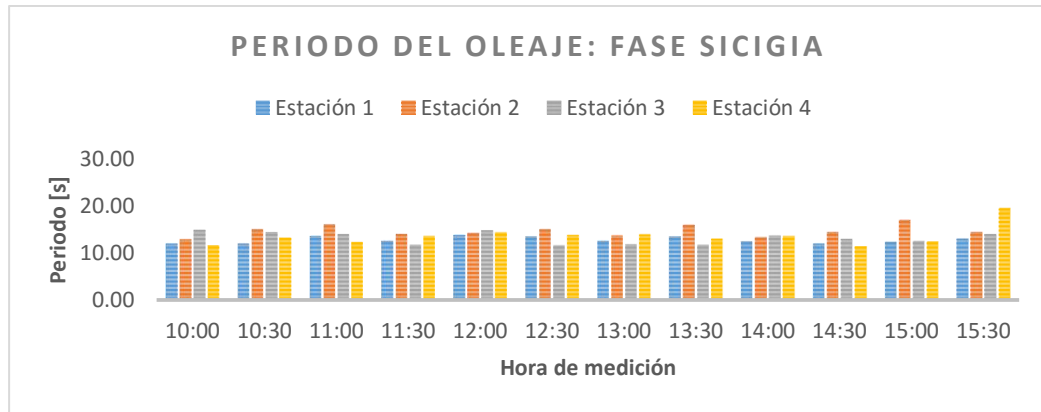


Figura 3.3 Periodo del oleaje en Sicigia [Autores, 2020].

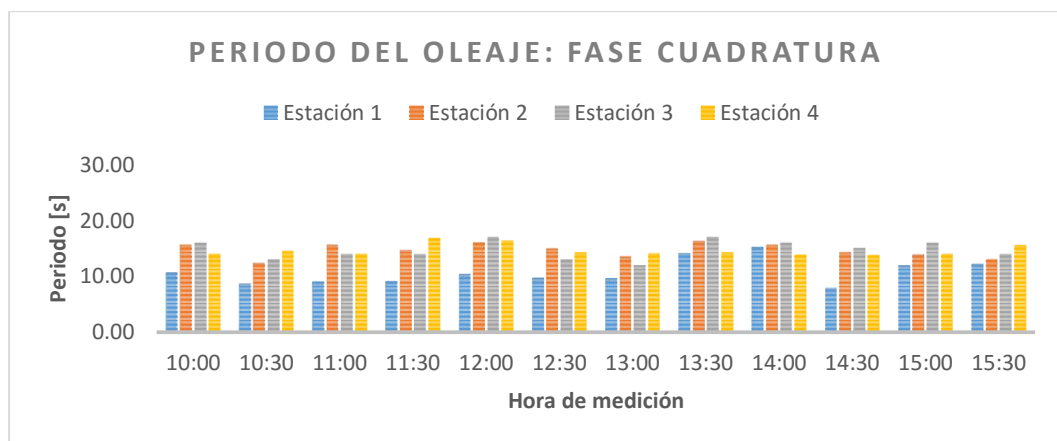


Figura 3.4 Periodo del oleaje en Cuadratura [Autores, 2020].

Respecto al ángulo de arribo de las olas a la zona de estudio, observamos que la dirección oscila en un rango entre 220–280 (grados), para la fase de sicigia y de 230-280 (grados) para la fase de cuadratura (Ver Tablas 3.2, 3.3 y Figuras 3.5 y 3.6).

Tabla 3.2 Dirección del oleaje en Sicigia [Autores, 2020].

Dirección del oleaje [°]	Hora	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4
	10:00	252.00	270.00	240.00	245.00
	10:30	252.00	270.00	242.00	240.00
	11:00	260.00	270.00	243.00	260.00
	11:30	270.00	270.00	230.00	240.00
	12:00	263.00	280.00	230.00	270.00
	12:30	250.00	278.00	221.00	240.00
	13:00	255.00	273.00	235.00	260.00
	13:30	262.00	290.00	240.00	240.00
	14:00	266.00	275.00	240.00	240.00
	14:30	252.00	247.00	242.00	240.00
	15:00	272.00	262.00	242.00	250.00
	15:30	260.00	264.00	230.00	260.00

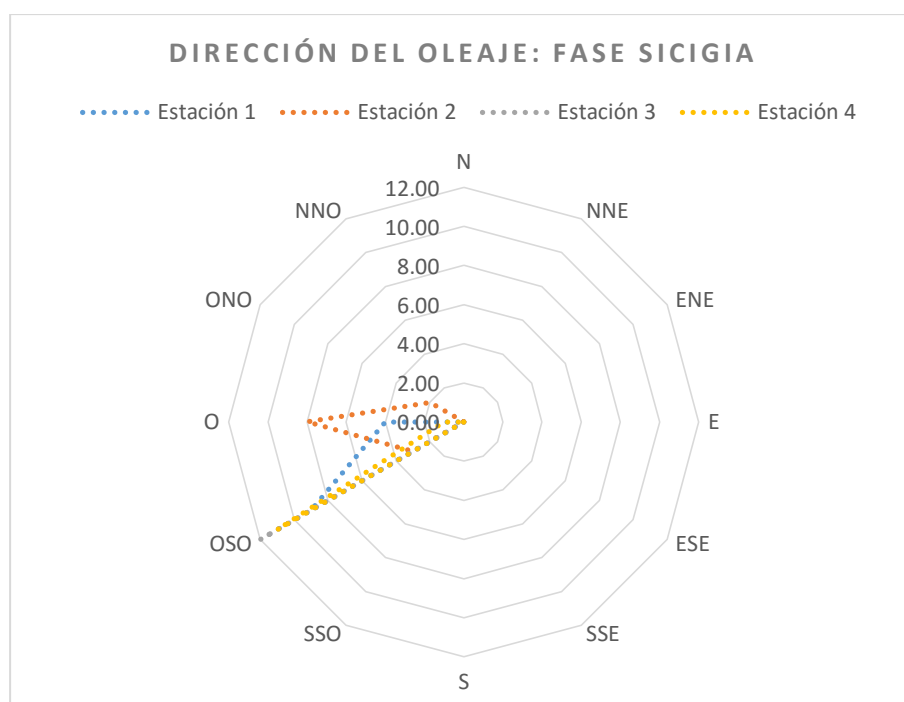


Figura 3.5 Dirección del oleaje en Sicigia [Autores, 2020].

Tabla 3.3 Dirección del oleaje en Cuadratura [Autores, 2020].

Dirección del oleaje [°]		Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4
	10:00	262.00	250.00	275.00	260.00
	10:30	260.00	260.00	265.00	255.00
	11:00	262.00	240.00	280.00	260.00
	11:30	262.00	240.00	270.00	255.00
	12:00	262.00	240.00	270.00	260.00
	12:30	262.00	240.00	273.00	250.00
	13:00	262.00	245.00	270.00	250.00
	13:30	262.00	250.00	271.00	245.00
	14:00	268.00	250.00	281.00	252.00
	14:30	268.00	240.00	275.00	260.00
	15:00	269.00	240.00	275.00	250.00
	15:30	268.00	230.00	273.00	250.00

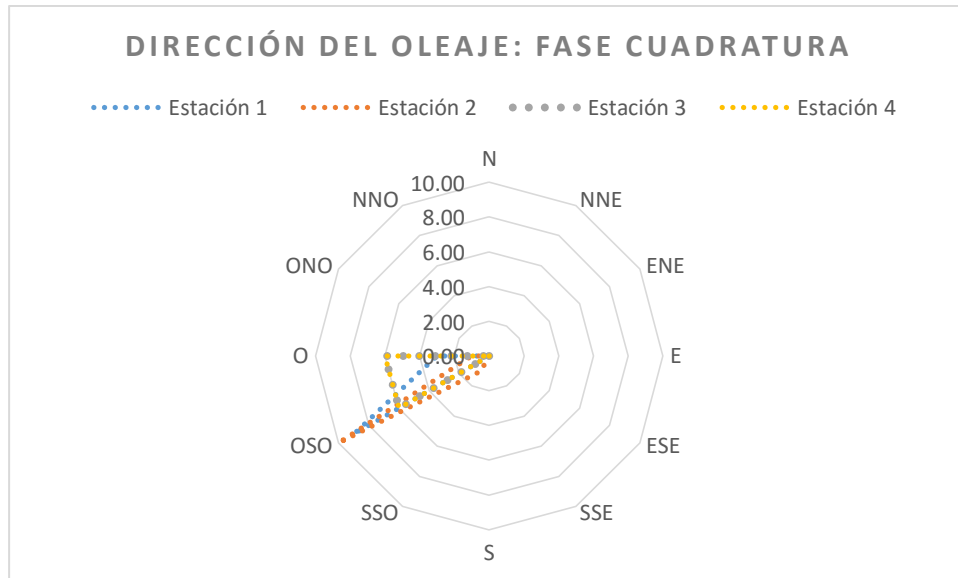


Figura 3.6 Dirección del oleaje en Cuadratura [Autores, 2020].

3.1.2 Corriente litoral

Las mayores velocidades de corrientes litorales se encontraron en la Fase de Sicigia con valores de 0.5 m/s en la Estación 2, mientras que el mayor valor de velocidad para la Fase de Cuadratura se encontraron en las Estaciones 3 y 4 con un valor de 0.39 m/s (Figuras 3.7 y 3.8).

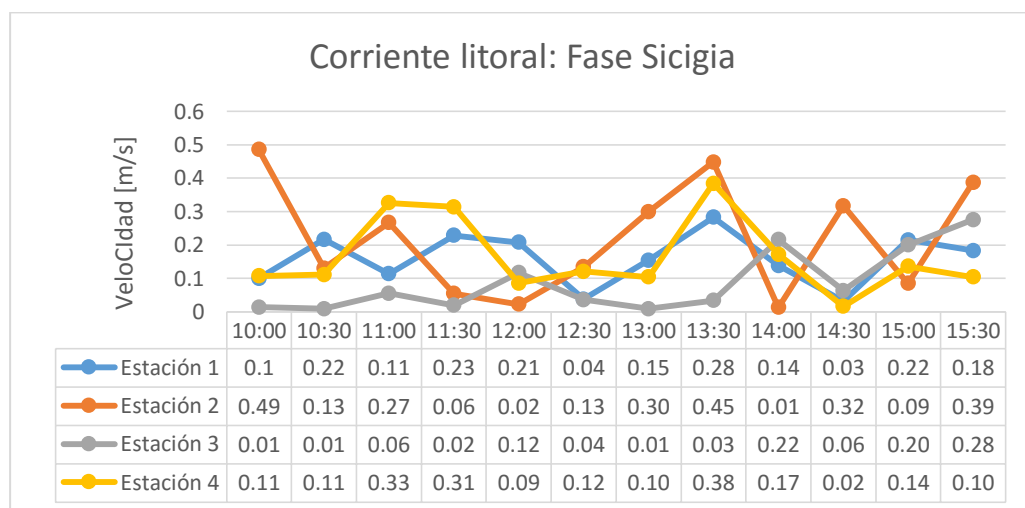


Figura 3.7 Corriente litoral - Sicigia [Autores, 2020].

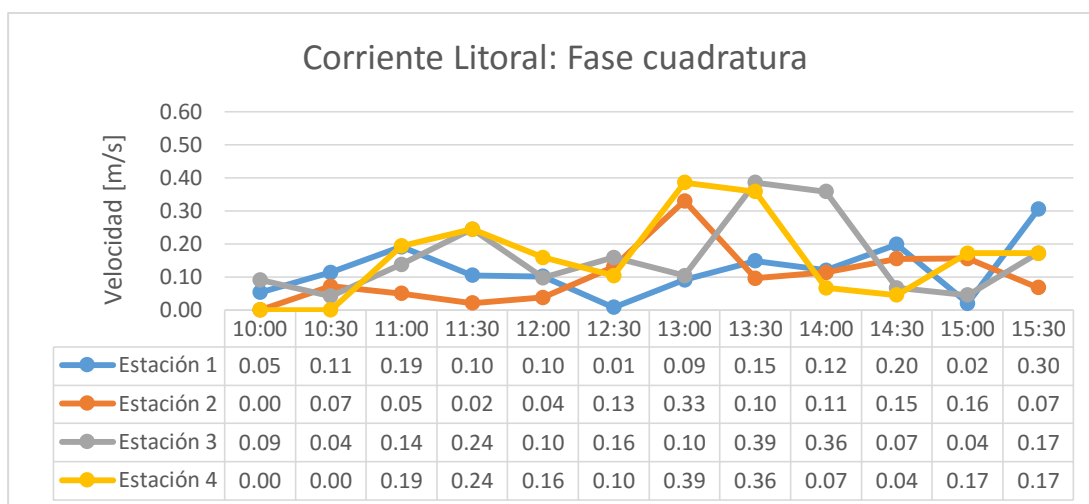


Figura 3.8 Corriente litoral - Cuadratura [Autores, 2020].

3.1.3 Sedimentos

Se recopiló información de campañas de medición previas (Caiza & Nativi, 2019) para obtener el diámetro medio del sedimento (d_{50}), el cual será utilizado para la calibración del modelo. A continuación, se muestra el d_{50} promedio para la zona de Libertador Bolívar para cada fase de marea:

Tabla 3.4 Diámetro de sedimentos [Autores, 2020].

D_{50} Promedio (Campañas de medición)	
Sicigia	Cuadratura
0.25 mm	0.19 mm

Cabe mencionar que para la simulación del modelo se utilizó el d_{50} promedio correspondiente a la fase de sicigia.

3.1.4 Pendiente de playa

En la Tabla 3.5 se muestra los valores de pendiente y orientación de la línea de playa correspondiente a cada estación y cada fase de marea:

Tabla 3.5 Pendiente de playa [Autores, 2020].

	Pendiente promedio		Orientación de la playa	
	Sicigia	Cuadratura	Sicigia	Cuadratura
Estación 1	0.03	0.04	340	255
Estación 2	0.04	0.03	330	350
Estación 3	0.04	0.04	346	330
Estación 4	0.05	0.05	340	345
Promedio	0.04	0.04	339	320

En las Figuras 3.9 y 3.10 podemos observar cómo está variando el perfil de playa desde la berma hacia la orilla tanto para la fase de sicigia y cuadratura.

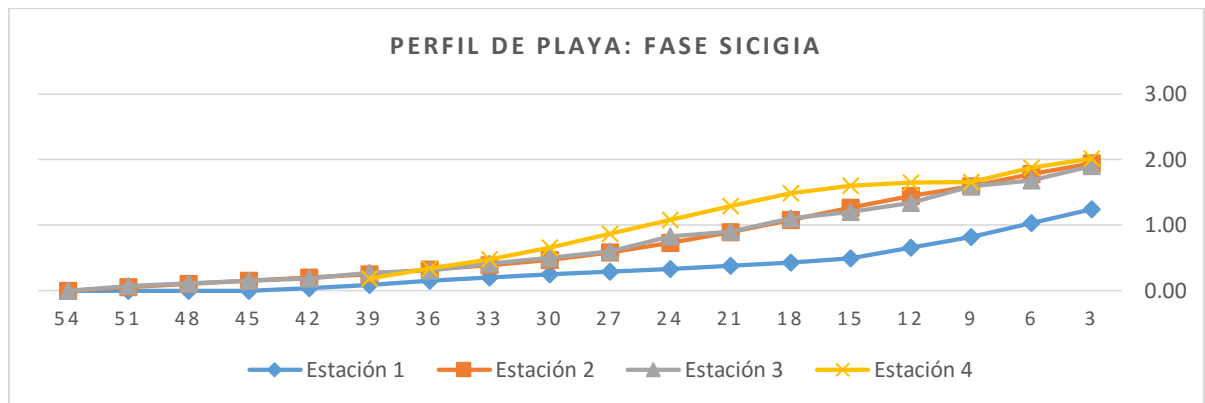


Figura 3.9 Perfil de playa en Sicigia [Autores, 2020].

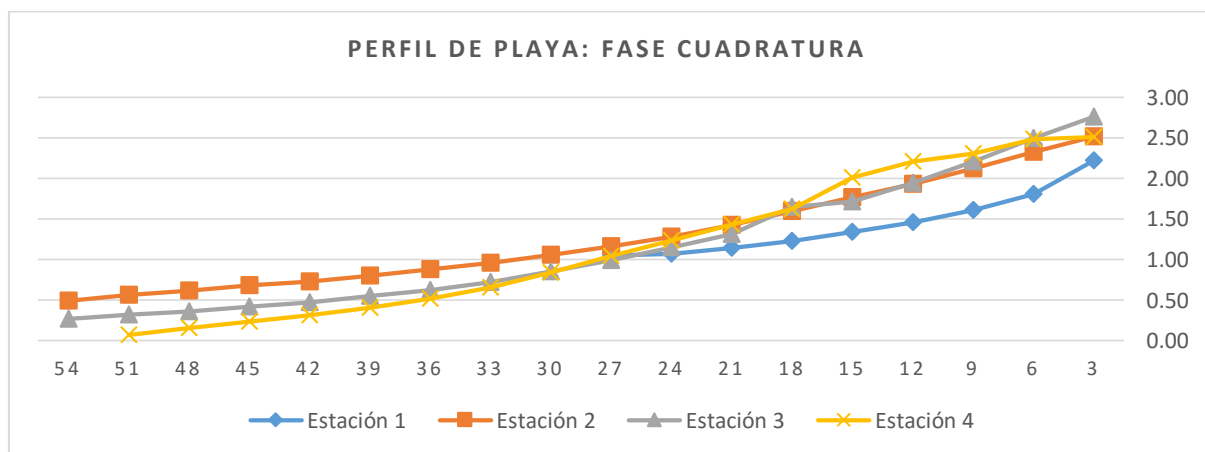


Figura 3.10 Perfil de playa en Cuadratura [Autores, 2020].

Adicionalmente, en las Figuras 3.11 y 3.12 se muestran resultado de mediciones de campo (características litorales) realizadas en la zona de estudio en campañas anteriores, de donde se escogieron los datos más relevantes para ingresar al modelo.

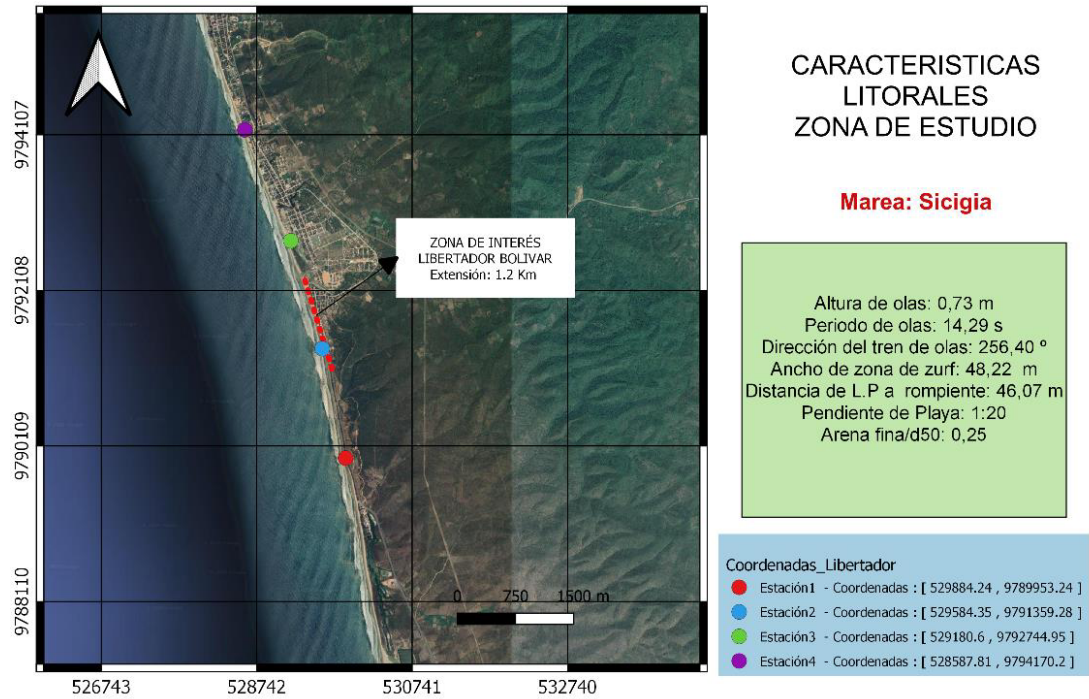


Figura 3.11 Datos de Salidas de Campo - Sicigia [Autores, 2020].

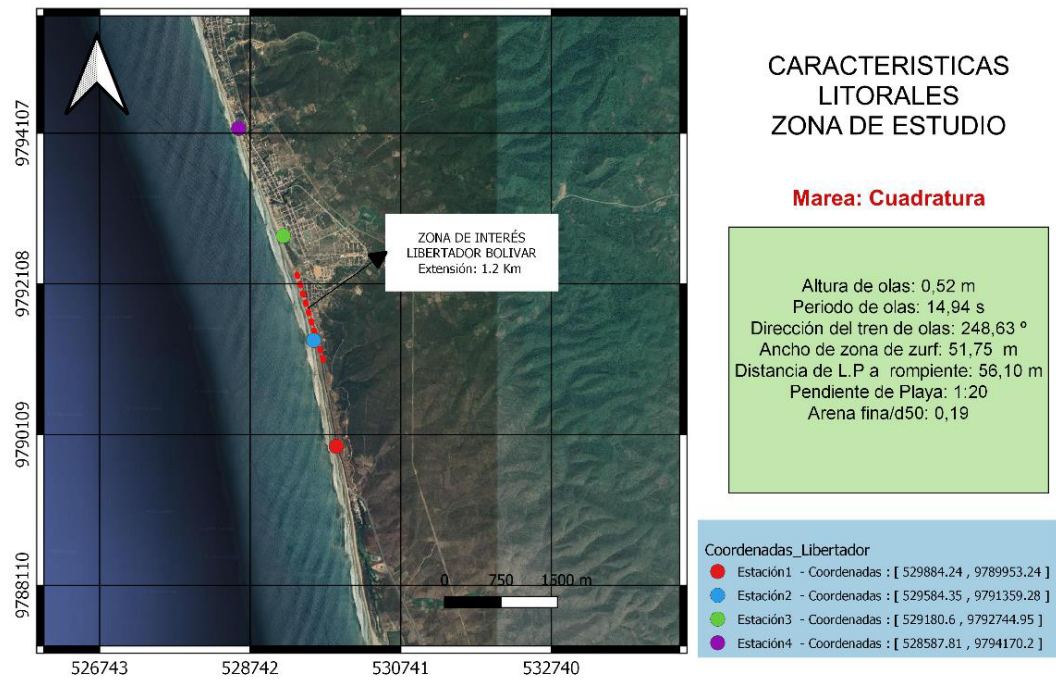


Figura 3.12 Datos de Salidas de Campo - Cuadratura [Autores, 2020].

Finalmente, en las Figuras 3.13 y 3.14, se muestra los datos más relevantes recolectados en las mediciones litorales de las campañas de medición del 7 y 14 de marzo del 2020.

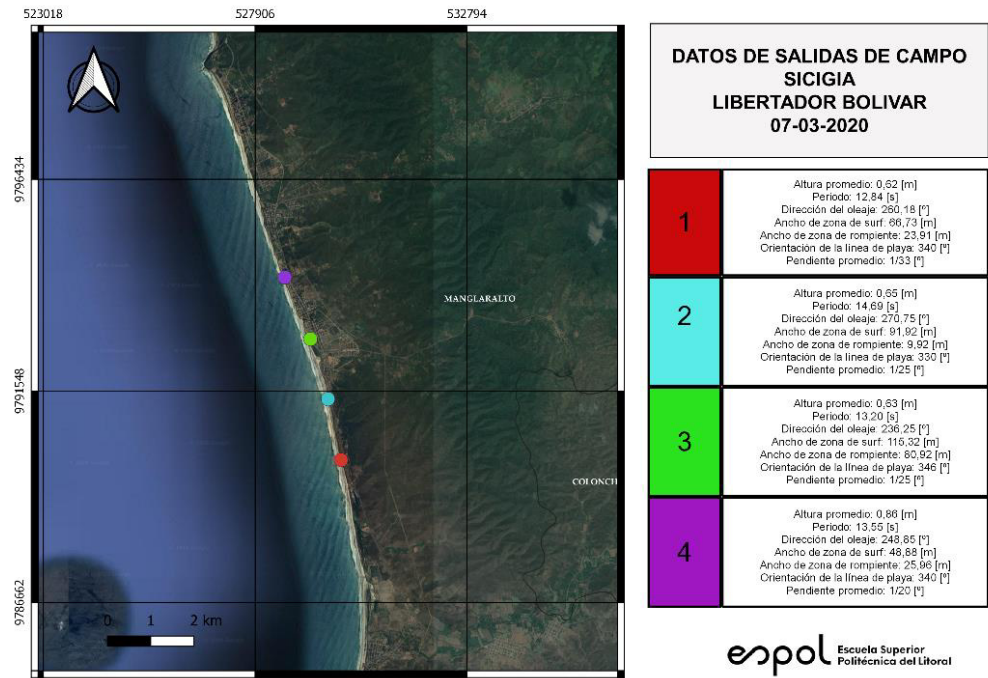


Figura 3.13 Datos de Salidas de Campo - Sicigia [Autores, 2020].

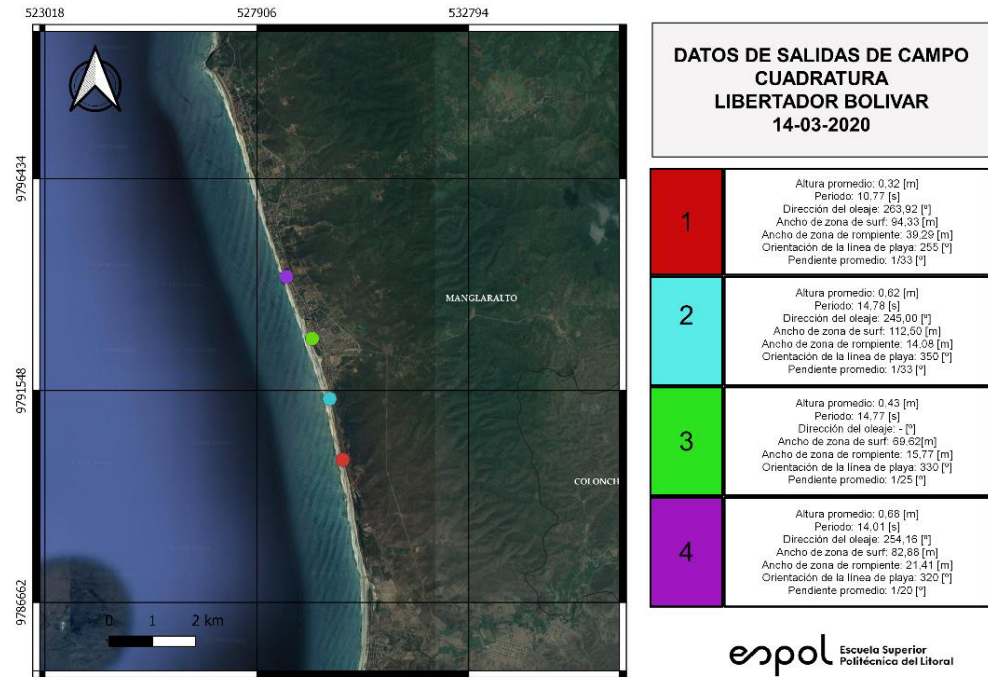


Figura 3.14 Datos de Salidas de Campo - Cuadratura [Autores, 2020].

3.1.5 Datos del WAVEWATCH III

En las Figuras 3.15 y 3.16, se muestran los datos de H_s y Dirección para condiciones normales de oleaje (2017) y en condiciones ENSO (El Niño 1997-1998). Los datos fueron obtenidos del modelo WAVEWATCH-III (NOAA), para una boya virtual ubicada en las coordenadas 81°W - 2°S , la cual fue procesada mediante el software de MATLAB.

Los resultados nos indican que para condiciones ENSO (El Niño) tenemos una H_s entre 1.5 y 2m con dirección entre 210° a 250° . Por otra parte, en condición normal se observa una H_s entre 1.2 a 1.4 m, con dirección entre 180° - 210° .

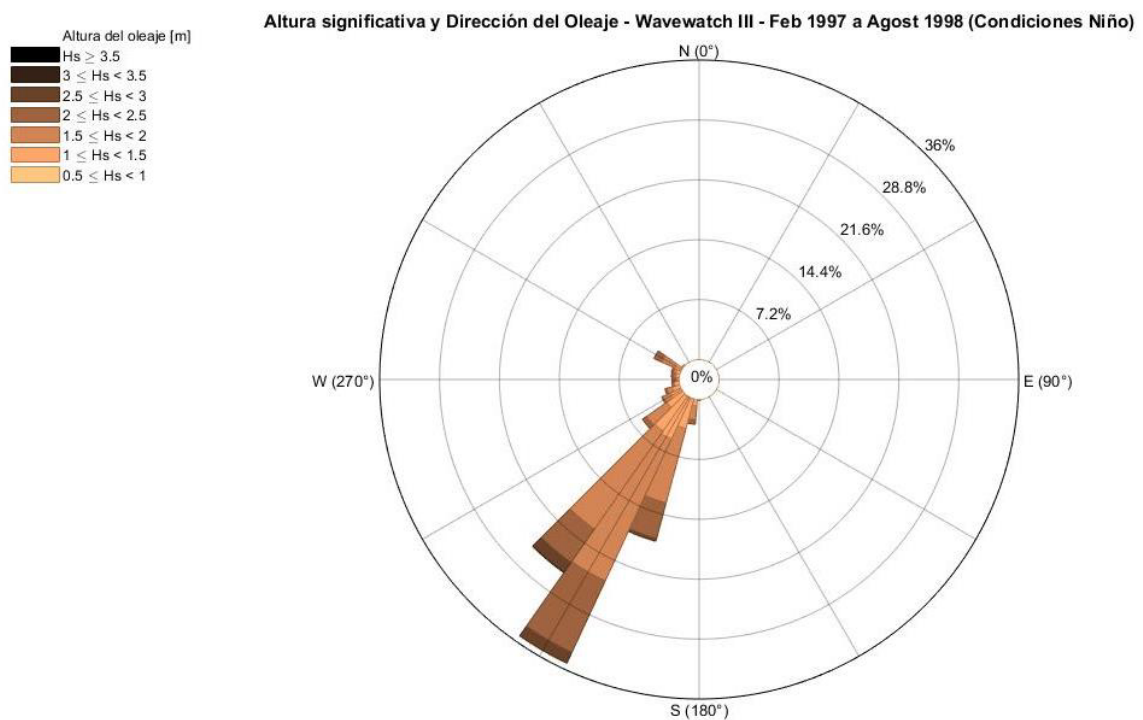


Figura 3.15 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones ENSO (El Niño)
[Autores, 2020].

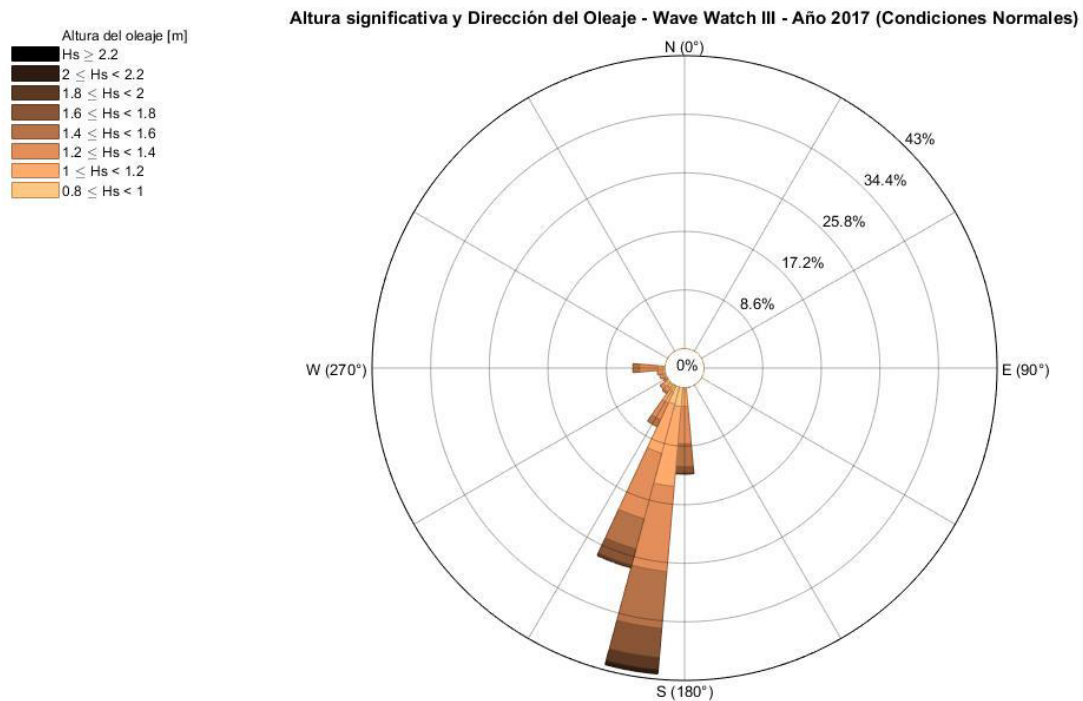


Figura 3.16 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones Normales [Autores, 2020].

Respecto al periodo de oleaje en condiciones El Niño se observa que hay una mayor frecuencia de datos entre 12 a 14 segundos muy similar a los rangos para condiciones normales.

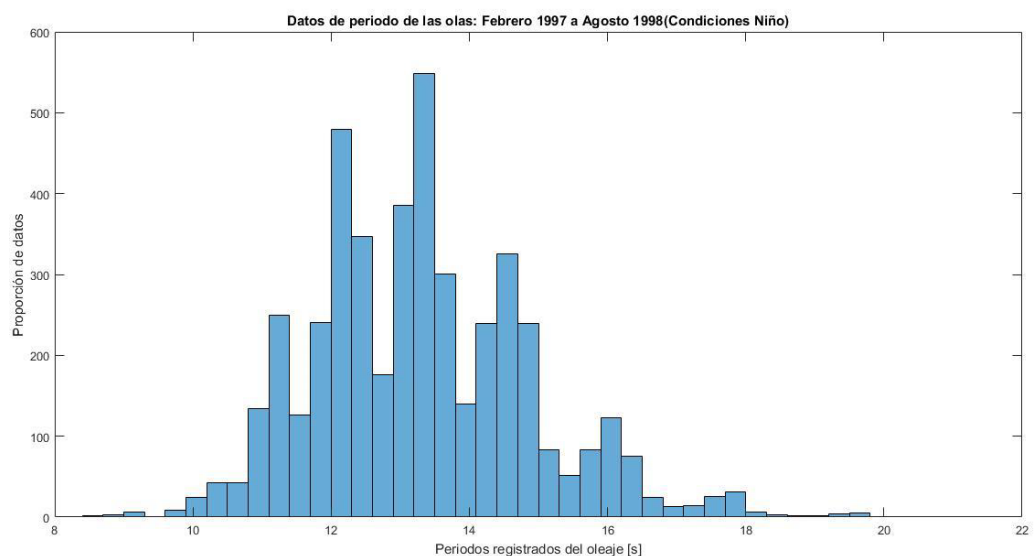


Figura 3.17 Periodo de oleaje en condiciones El Niño [Autores, 2020].

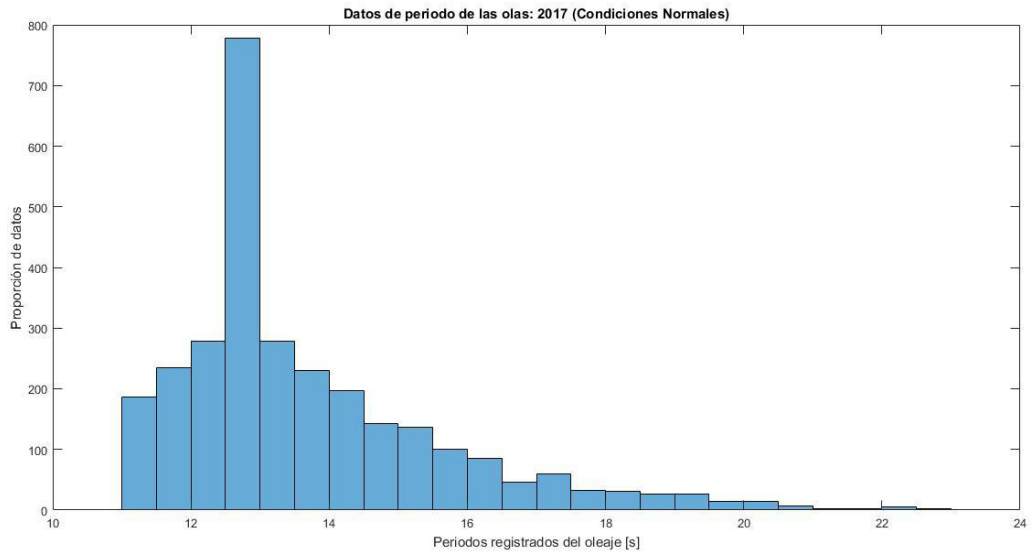


Figura 3.18 Periodo de oleaje en condiciones Normales [Autores, 2020].

3.2 Resultados de las FASES II, III, IV y V: Calibración y Validación del Modelo

3.2.1 Calibración del Oleaje: MIKE 21SW y MIKE 21PMS

Para el módulo SW (Spectral Wave) los parámetros que fueron calibrados corresponden a la altura, periodo y dirección del oleaje, estos datos se obtuvieron del modelo WW3, los cuales fueron filtrados e ingresados en la simulación.

Para el módulo PMS, los parámetros del modelo que fueron calibrados fueron: la batimetría, diámetro de sedimento y rugosidad de fondo, estos datos fueron ingresados en la simulación tomando como referencia las mediciones litorales realizadas durante las campañas de medición.

- Para el diámetro de sedimentos del fondo se estableció un valor d_{50} promedio igual a 0.25mm correspondiente a las mediciones litorales, mientras que para las estructuras se utilizó un valor de -99 ya fue un valor sugerido por el modelo para identificar las zonas donde no debía calcularse el transporte de sedimentos.

Tabla 3.6 Diámetro de sedimentos - Calibración [Autores, 2020].

	D_{50} [mm]
SEDIMENTO	0.25
ESTRUCTURA	-99

- Para la rugosidad del fondo se tomó como referencia estudios previos realizados en Libertador Bolívar tomando una rugosidad de 0,04, mientras que la rugosidad para las estructuras se obtuvo de revisión bibliográfica y especificaciones técnicas de los materiales de construcción.

Tabla 3.7 Rugosidad - Calibración [Autores, 2020].

	RUGOSIDAD DE LA ESTRUCTURA	RUGOSIDAD DE FONDO
ESPIGONES T	3	0.04
ROMPEOLAS	3	0.04
CORAL	0.47	0.04

En las Figuras 3.19 y 3.20, podemos observar los resultados obtenidos de la simulación del módulo SW y PMS, donde se muestran las condiciones del oleaje y los esfuerzos de radiación de la zona de estudio correspondiente al año 2017.

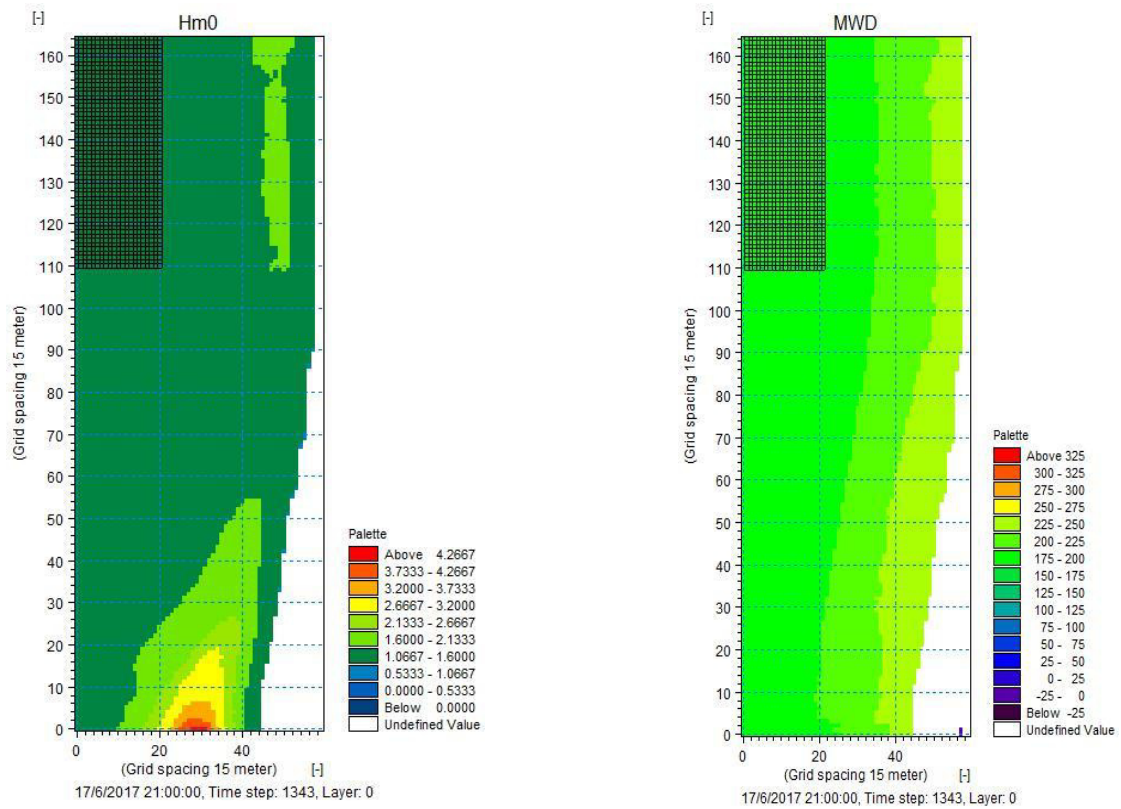


Figura 3.19 Altura y dirección del oleaje condiciones normales [Autores, 2020].

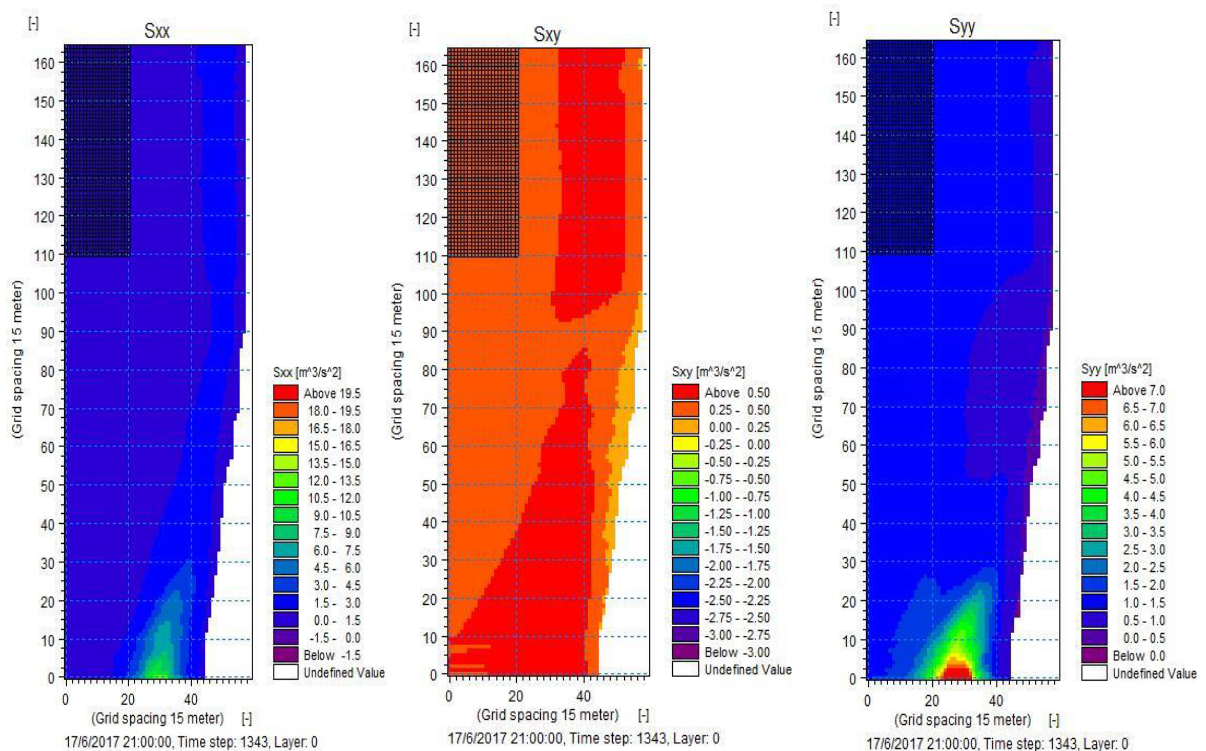


Figura 3.20 Esfuerzo de radiación condiciones normales [Autores, 2020].

3.2.2 Calibración de los Procesos Costeros: MIKE 21FM y MIKE 21ST

En las Figuras 3.21 y 3.22, se muestra los resultados de la calibración para el modulo de Flow Model, para los parametros de Flujos de transporte de sedimentos en dirección x (P Flux) y en dirección y (Q Flux). No obstante, se muestra los resultados del modulo del Sediment Transport en donde se presentan las simulaciones de variación en el flujo de transporte de sedimentos (P_s y Q_s) y la tasa inicial de cambio de nivel de lecho (init. dz/dt).

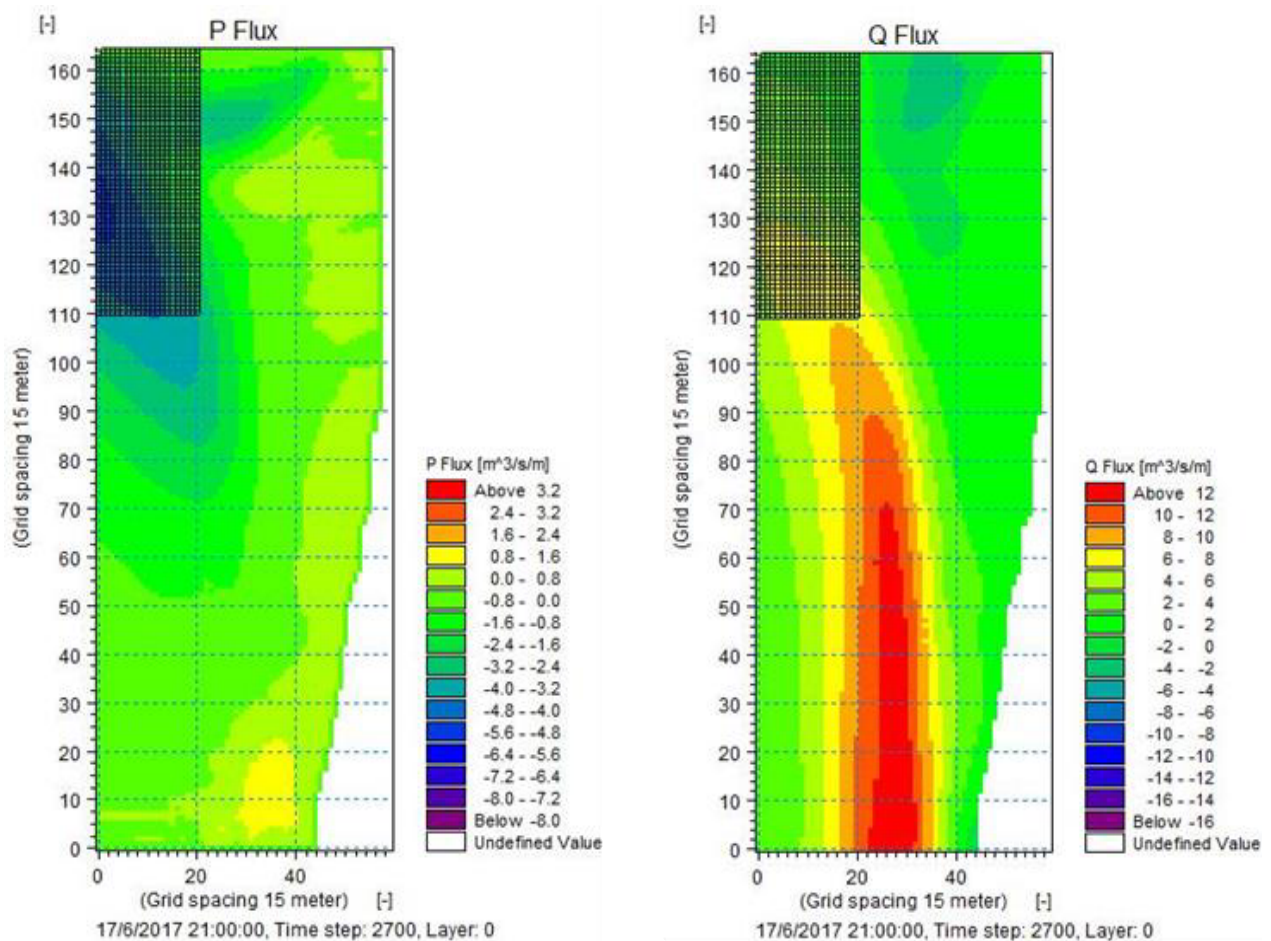


Figura 3.21 Flujos de transporte de sedimentos en dirección x (P Flux) y en dirección y (Q Flux) [Autores, 2020].

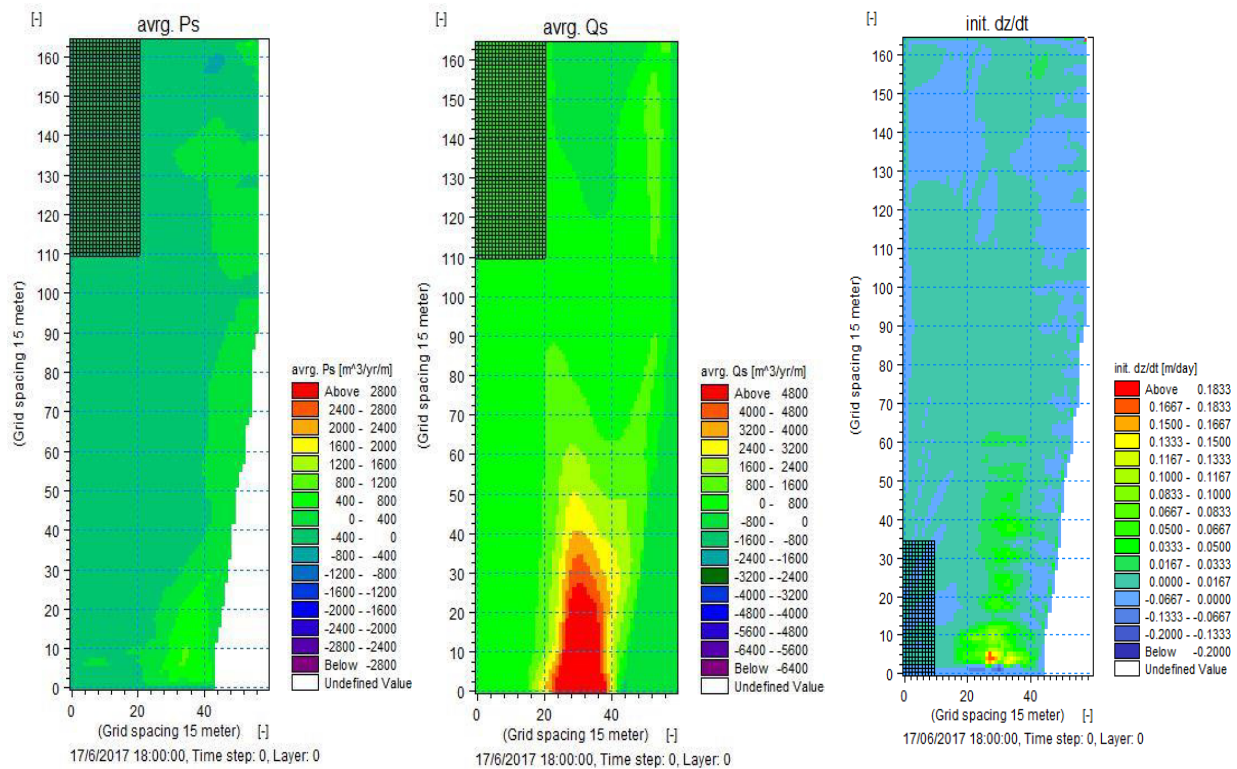


Figura 3.22 Variación en el flujo de transporte de sedimentos (Ps y Qs) y la tasa inicial de cambio de nivel de lecho (Init. dz/dt) [Autores, 2020].

3.2.3 Validación de los resultados del modelo

Se validaron los resultados obtenidos en el Modelo WAVEWATCH III y el Modelo Spectral Wave, los cuales fueron comparados con las mediciones litorales de las campañas de medición realizadas. Los parámetros a validar fueron:

- Altura, periodo y dirección de olas
- Tasa de erosión promedio de la zona

En la Tabla 3.8 y 3.9 podemos observar los valores correspondientes al $H_{1/3}$ y al $H_{promedio}$ correspondiente a la altura, además la dirección promedio del oleaje tanto para las mediciones litorales, el modelo WW3 y el modelo SW.

Tabla 3.8 Altura del oleaje - Validación [Autores, 2020].

	Altura del oleaje		
	Mediciones litorales	Modelo SW	WW III
H_{1/3}	0,63 [m]	1,93 [m]	1,56 [m]
H promedio	0,62 [m]	1,29 [m]	1,31 [m]

Tabla 3.9 Altura del oleaje - Validación [Autores, 2020].

	Dirección del oleaje		
	Mediciones litorales	Modelo SW	WW III
Dirección promedio	257,16 [°]	255,18 [°]	255,21 [°]

Para validar la tasa de erosión del modelo se utilizaron estudios previos realizados en Libertador Bolívar por (Caiza & Nativi, 2019), en donde establecen para nuestra zona valores promedios de 0.49–0.54 m/año, mientras que la tasa de erosión obtenida del modelo para el escenario de calibración del año 2017 fue de 0.45 m/año.

Tabla 3.10 Tasa de erosión estudios previos (Caiza & Nativi, 2019).

Periodo	Media	TE_Media (m/año)	TE_Mediana(m/año)
2000 - 2006	3.0815	0.513587386	0.50861588
2006 - 2013	3.4673	0.495327739	0.508756405
2000 - 2013	6.5488	0.503755268	0.544222808

Tabla 3.11 Tasa de erosión del modelo [Autores, 2020].

Tiempo	TE_Media (m/año)
2017	0.44925553

3.3 Resultados de la FASE VI: Generación de escenarios con estructuras de protección para condiciones normales y ENSO.

3.3.1 Condiciones del Oleaje para condiciones normales y ENSO

Los resultados obtenidos del Spectral Wave, fueron procesados en MATLAB, los cuales nos arroja los siguientes gráficos mostrados a continuación. Para la altura significativa en condiciones normales tenemos altura significativa entre 0.5–1.5 m y para la dirección de oleaje se encuentra en una dirección entre 260°-270°. Sin embargo, para condición El Niño tenemos alturas predominantes en un rango de 0.5 – 2.5 m con dirección de oleaje de 210°-270°.

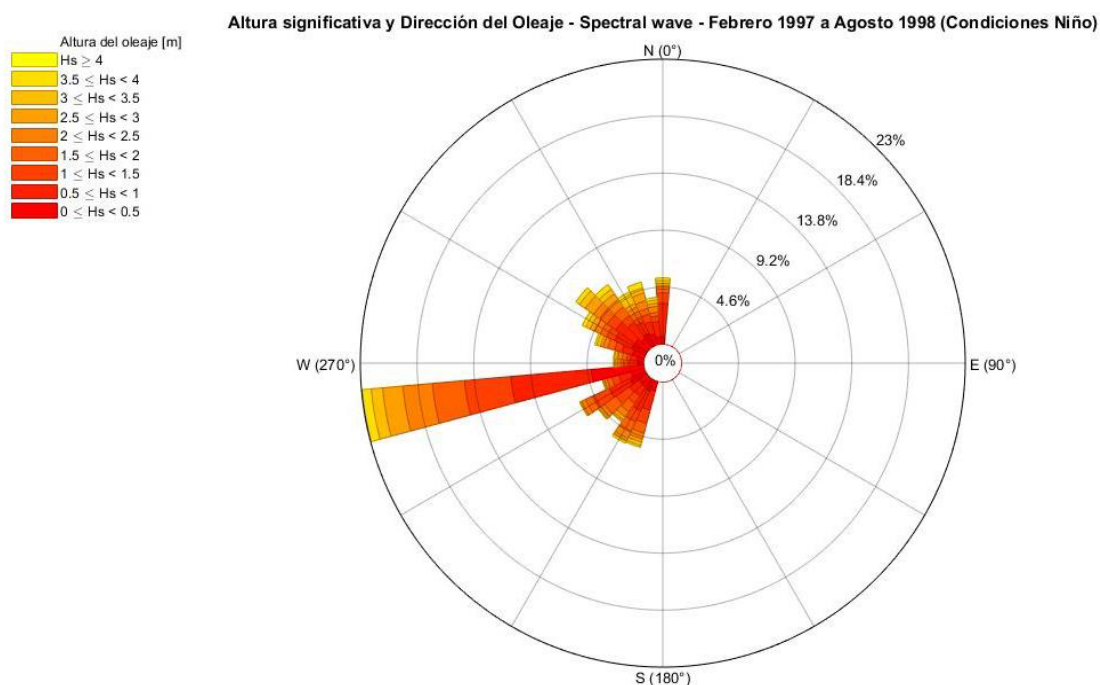


Figura 3.23 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones El Niño (1997-1998) [Autores, 2020].

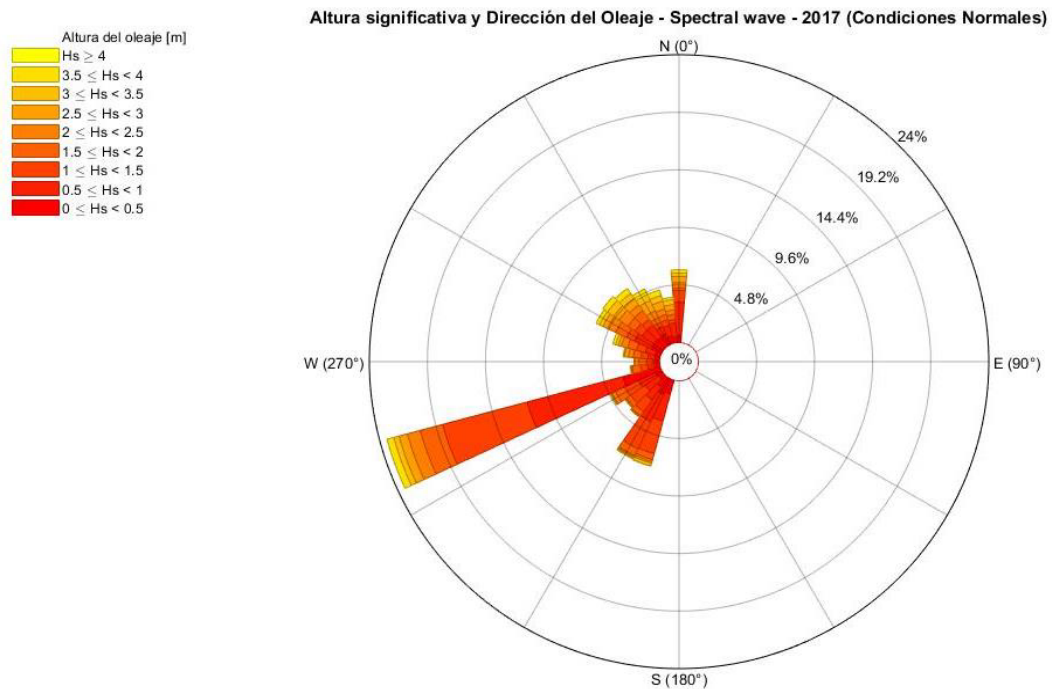


Figura 3.24 Altura significativa y Dirección del oleaje en Condiciones Normales (2017)
[Autores, 2020].

Para el periodo en condiciones El Niño, se observa una mayor proporción de 12 a 15s y para condiciones normales se tiene un periodo entre 12 a 16s.

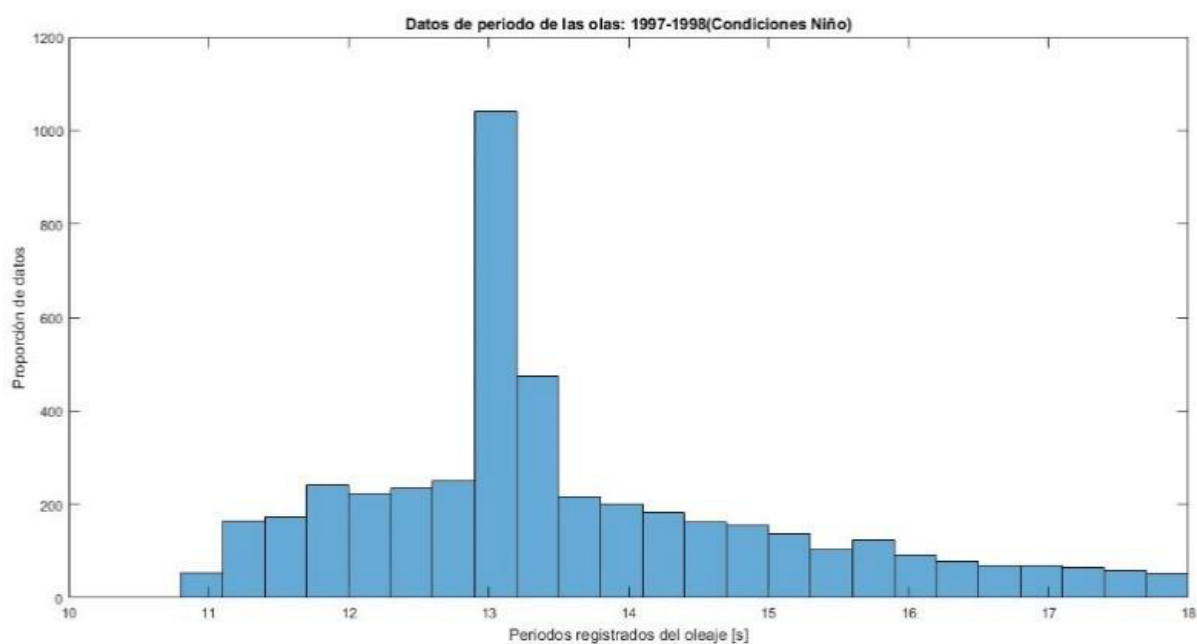


Figura 3.25 Periodo del oleaje en Condiciones Niño (1997 - 1998) [Autores, 2020].

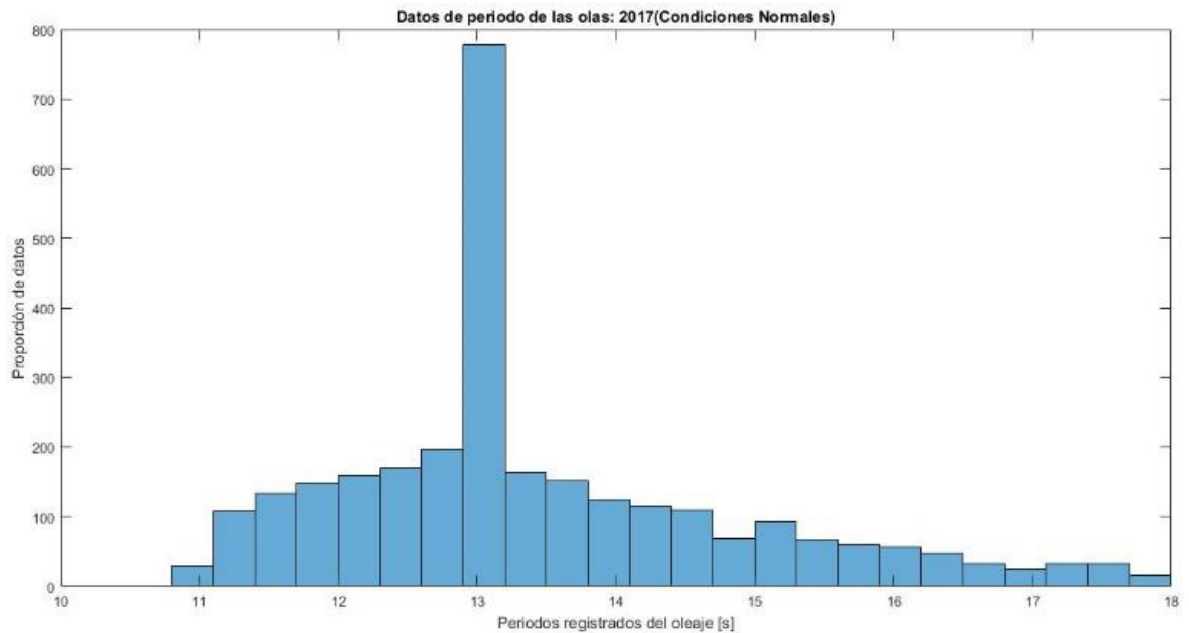


Figura 3.26 Periodo del oleaje en Normales (2017) [Autores, 2020].

3.3.2 Evaluación de las estructuras de protección ante las condiciones de oleaje propuestas

3.3.2.1 Rompeolas

MIKE 21SW: ALTURA SIGNIFICATIVA Y DIRECCIÓN PROMEDIO DEL OLEAJE

En las Figuras 3.27 y 3.28, se muestran los resultados de la simulación de Altura Significativa y dirección promedio del oleaje obtenidos en el módulo de SW, para las condiciones de oleaje ENSO y normal.

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

Podemos apreciar cómo se disipa la energía del oleaje al romper en la estructura teniendo así una disminución de la altura significativa del oleaje de 3.2 a 0.53m. El oleaje predominante en condiciones ENSO (El Niño) proviene del Suroeste (entre 240° a 270°) y cuando golpea la estructura la ola se difracta cambiando la dirección del oleaje entre ángulos de 300° a 330° y de 165° a 180° en esa zona.

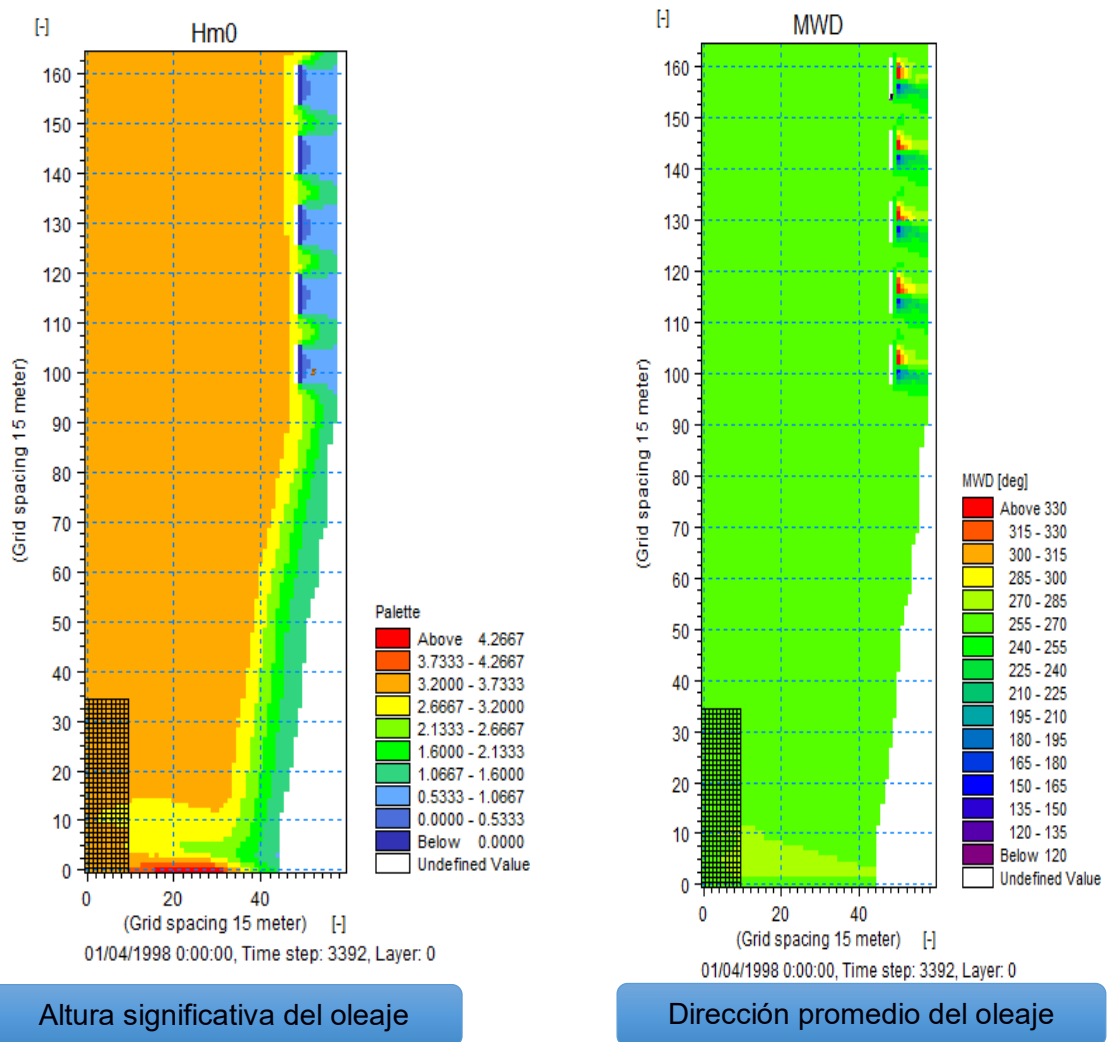


Figura 3.27 Rompeolas - Condiciones El Niño: Hmo (Altura significativa del oleaje) y Mwd (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales tanto la altura de ola y dirección se ven afectadas por la presencia del rompeolas. La energía se disipa llegando a disminuir la altura de 1.6 a 0.5m y provocando un cambio en las dirección del oleaje con ángulos de 225° a 275°.

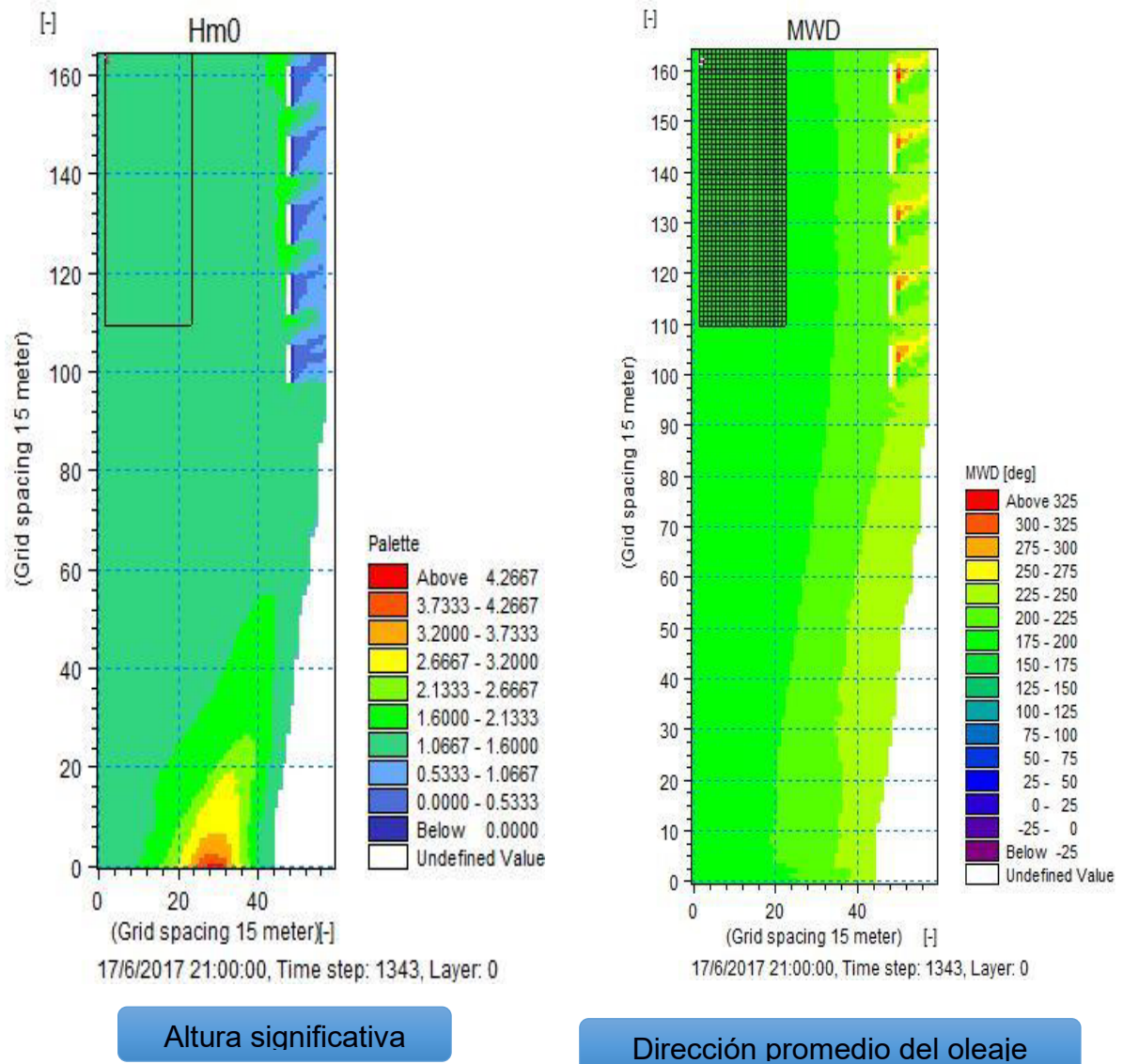


Figura 3.28 Rompeolas - Condiciones Normales: Hmo (Altura significativa del oleaje) y Mwd (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].

MIKE 21PMS: TENSIONES DE RADIACIÓN (S_{xx} , S_{xy} , S_{yy})

En las Figuras 3.29 y 3.30 se muestran las tensiones de radiación en condiciones ENSO y normales de oleaje. Estas tensiones se definen como el exceso del flujo de momento debido al oleaje y son las responsables tanto del setup (incremento del nivel medio del mar producido en la zona de rompientes) como del setdown (disminución en la superficie media del agua en el punto de rompiente) de las olas.

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En condiciones ENSO, a medida que el tren de olas se ve afectado por el rompeolas genera un disminución de $7.5 \text{ m}^3/\text{S}^2$ a $1.5 \text{ m}^3/\text{S}^2$ en la tensión S_{xx} y de $3 \text{ m}^3/\text{S}^2$ a $0.5 \text{ m}^3/\text{S}^2$ en la tensión S_{yy} . Mientras que en la tensión S_{xy} se puede evidenciar un aumento en la fuerza de -0.25 a $0.25 \text{ m}^3/\text{S}^2$.

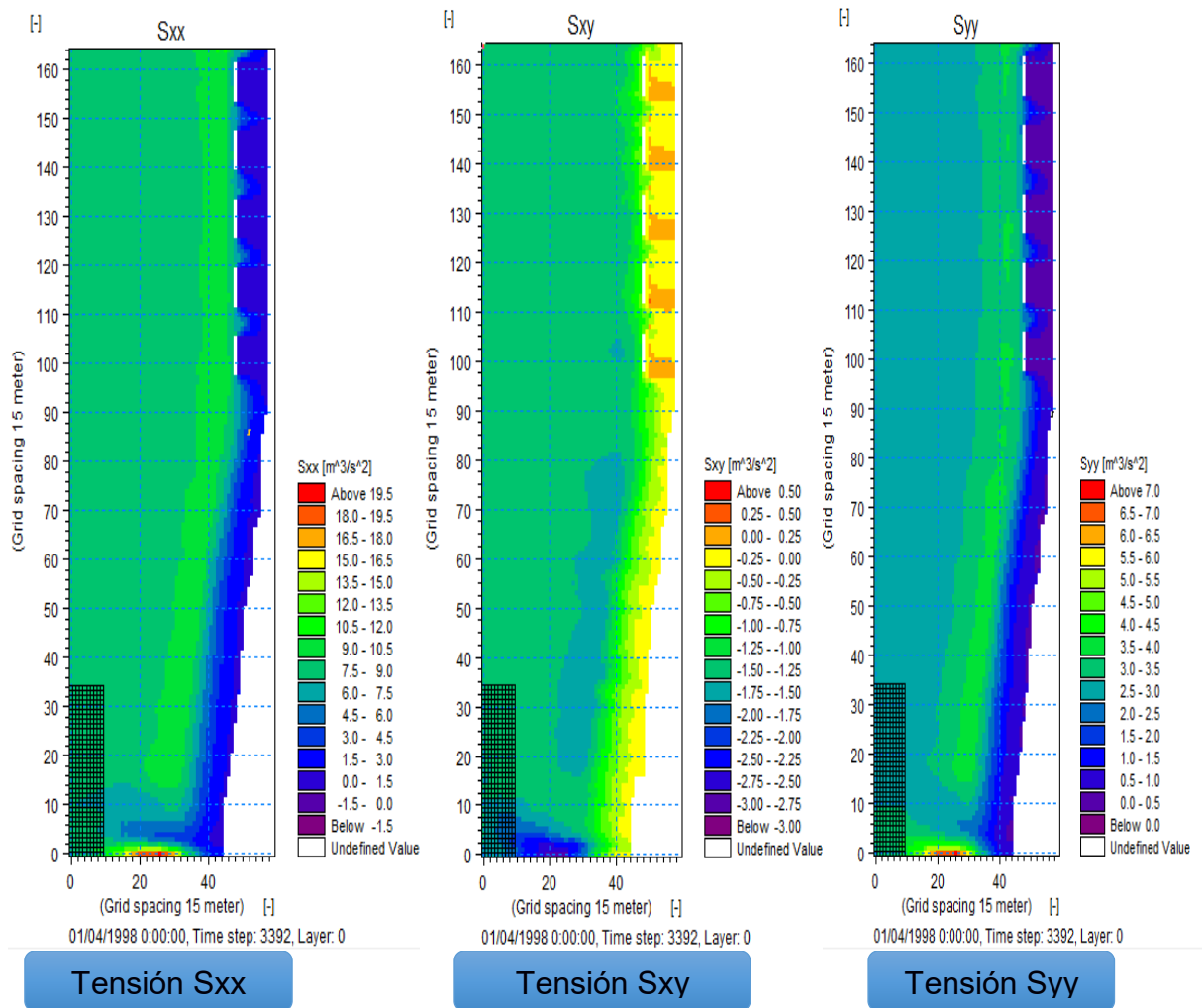


Figura 3.29 Rompeolas - Condiciones El Niño: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales las tensiones de radiación son menores con respecto a las condiciones extremas, esto se da porque las alturas de olas son menores, por lo que podemos evidenciar una disminución de 4.5 a 3 m^3/s^2 en la tensión S_{xx} y de 1.2 a 0.6 m^3/s^2 en la tensión S_{yy} . En la tensión S_{xy} se va a generar un aumento de -0.5 a 0.25 m^3/s^2 .

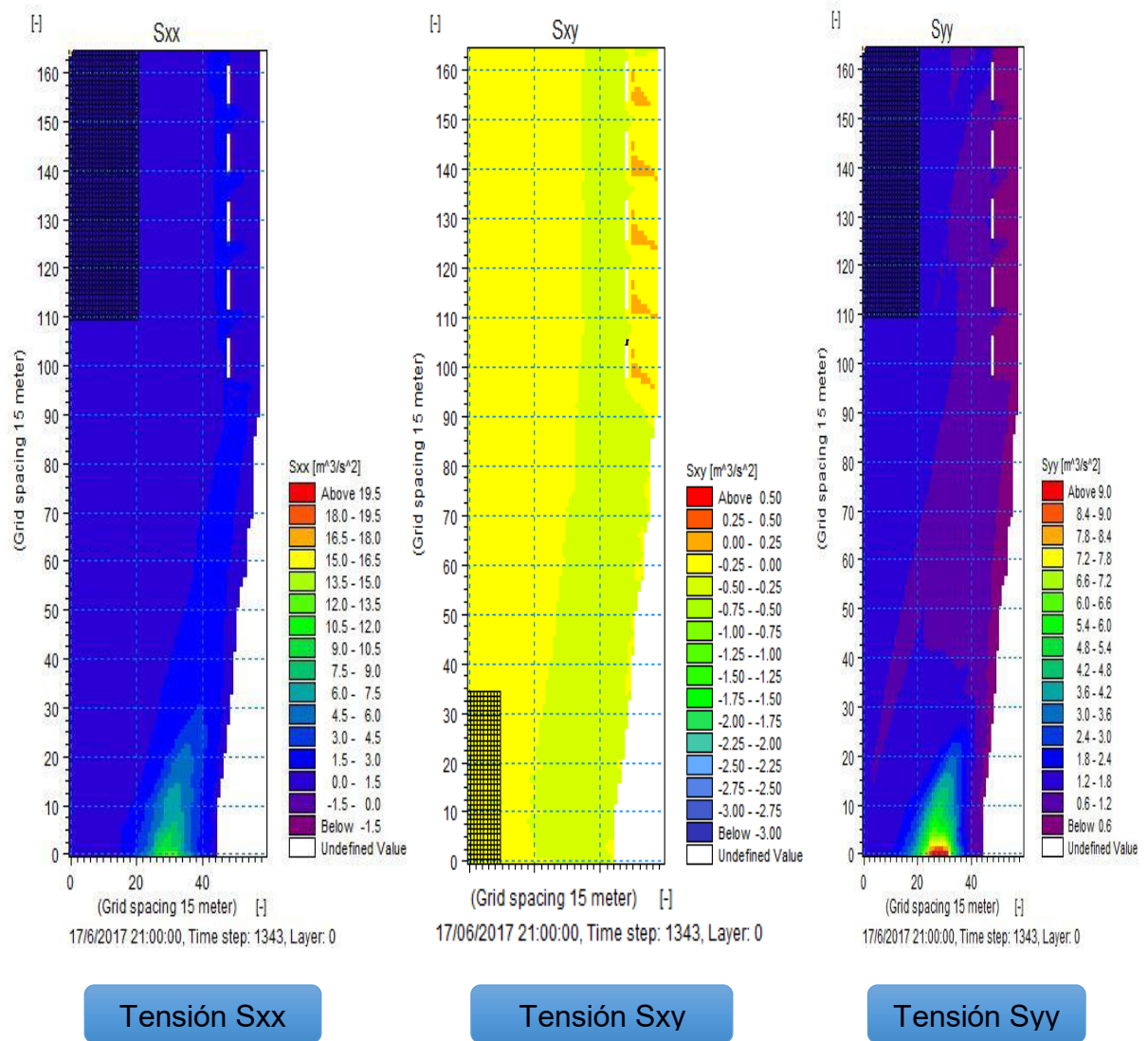


Figura 3.30 Rompeolas - Condiciones Normales: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].

MIKE 21FM: FLUJOS HIDRODINÁMICOS (P flux, Q flux)

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En la siguiente figura podemos observar que los flujos en ambas direcciones se encuentran concentrados entre la separación de cada estructura por lo para el escenario de los rompeolas se evidencia un aumento de flujo en x de 0.8 a 2.4 m³/s/m y un aumento gradual de flujo en y que va de -6 a 4 m³/s/m

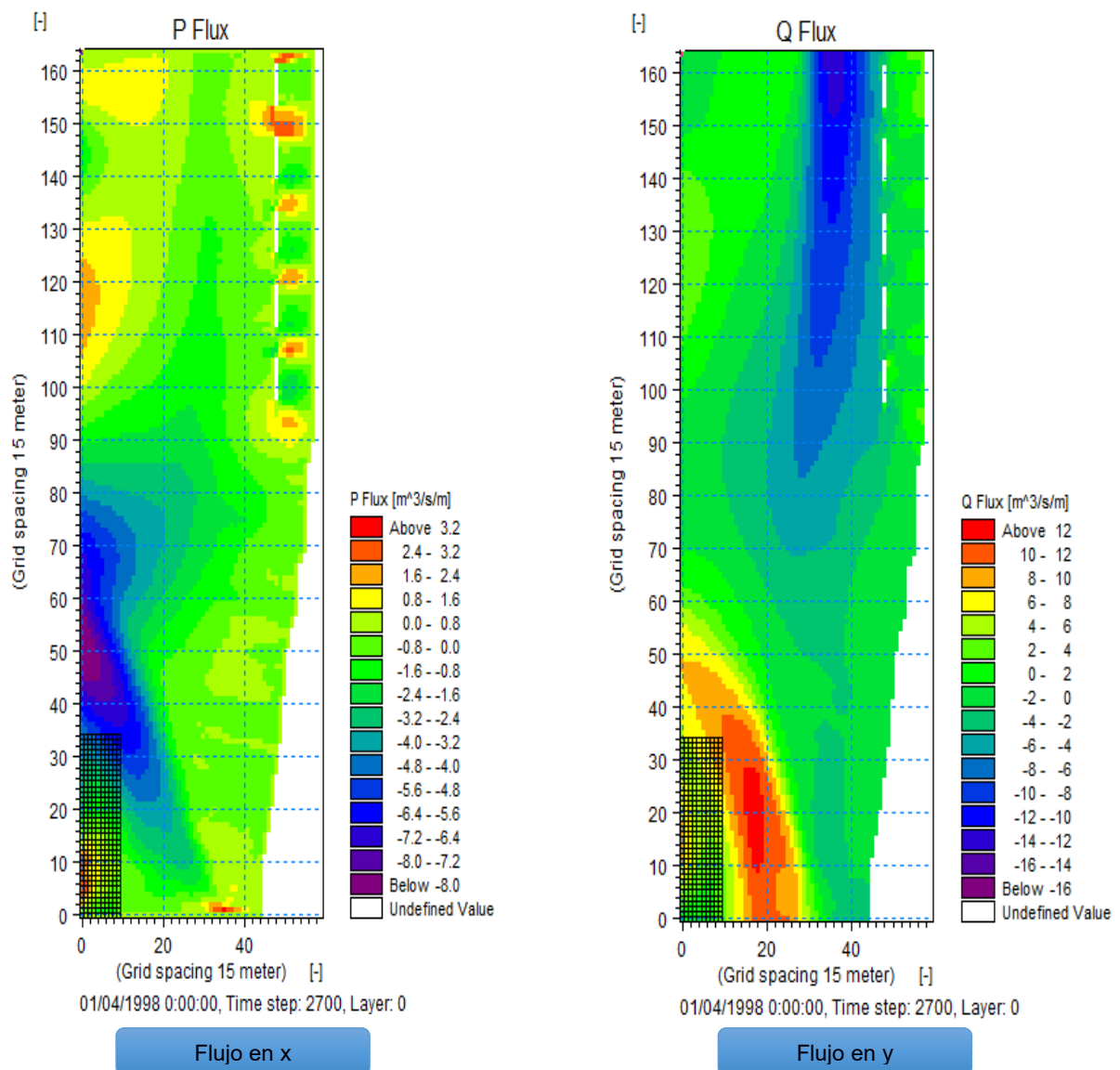


Figura 3.31 Rompeolas - Condiciones ENSO: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales los flujos P y Q son menores en comparación a los flujos en condiciones extremas ya que las fuerzas de radiación tienen una menor intensidad por lo que, para el escenario de rompeolas tenemos un flujo en x que aumenta de -0.8 a $0.8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y un flujo en y que aumenta de 6 a $12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

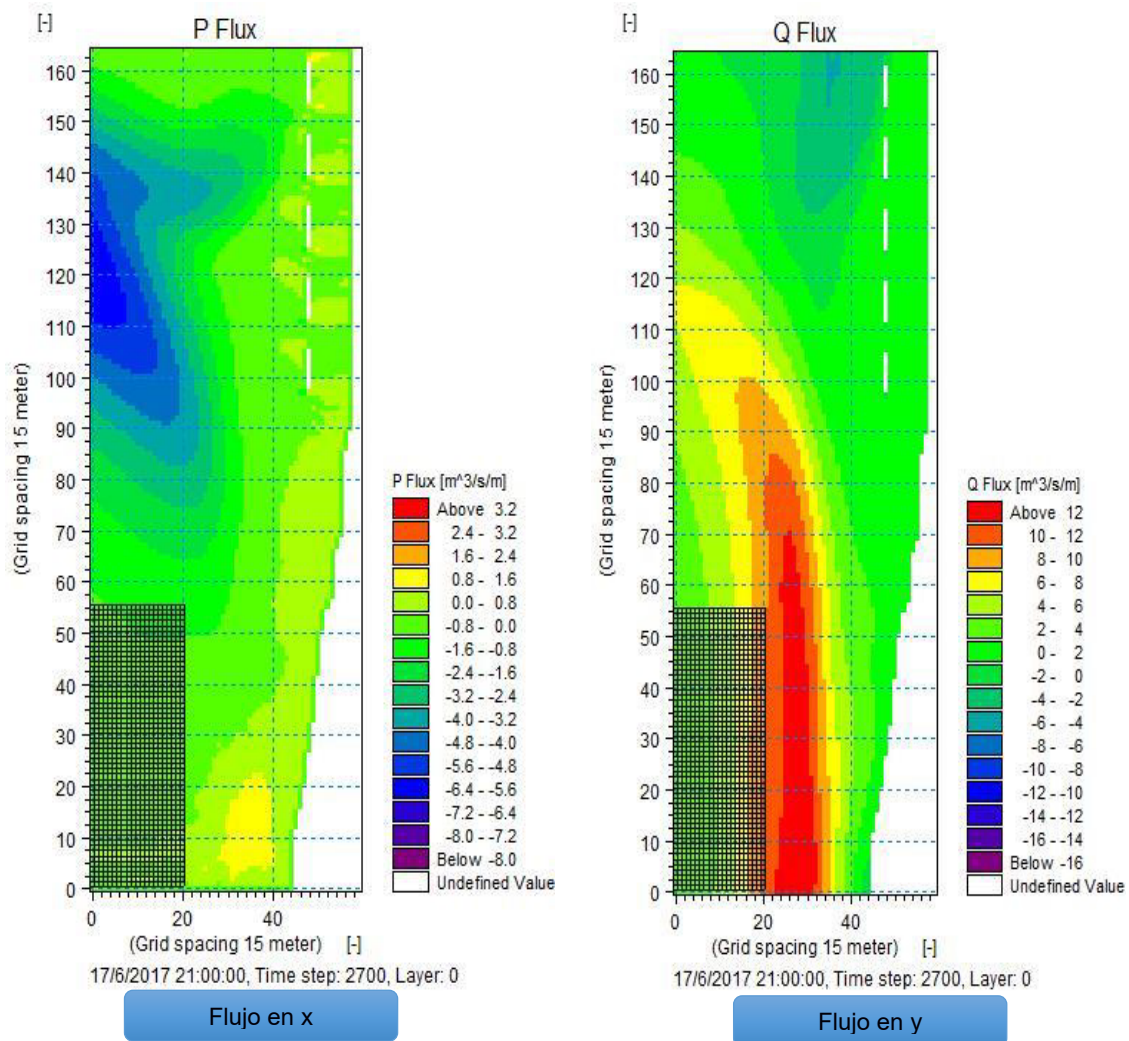


Figura 3.32 Rompeolas - Condiciones Normales: Flujos hidrodinámicos.
[Autores, 2020].

MIKE 21ST: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (P_s , Q_s , Init dz/dt)

A continuación, se mostrarán los resultados del flujo de transporte de sedimentos para condiciones extremas (ENSO) y para condiciones normales.

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En condiciones extremas se puede observar el cambio de flujo de transporte, en donde se evidencia que el flujo P_s varía de -3200 a 4000 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ y el flujo Q_s varía de 1500 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ a 3000 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ entre cada estructura además se puede evidenciar un flujo que viene del sur y se dirige a la parte norte en la zona de rompiente que va desde -4500 a -13500 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$. La tasa de acreción promedio varía de 0.017 a 0.18 m/dia el cual se va a acumular detrás de la estructura.

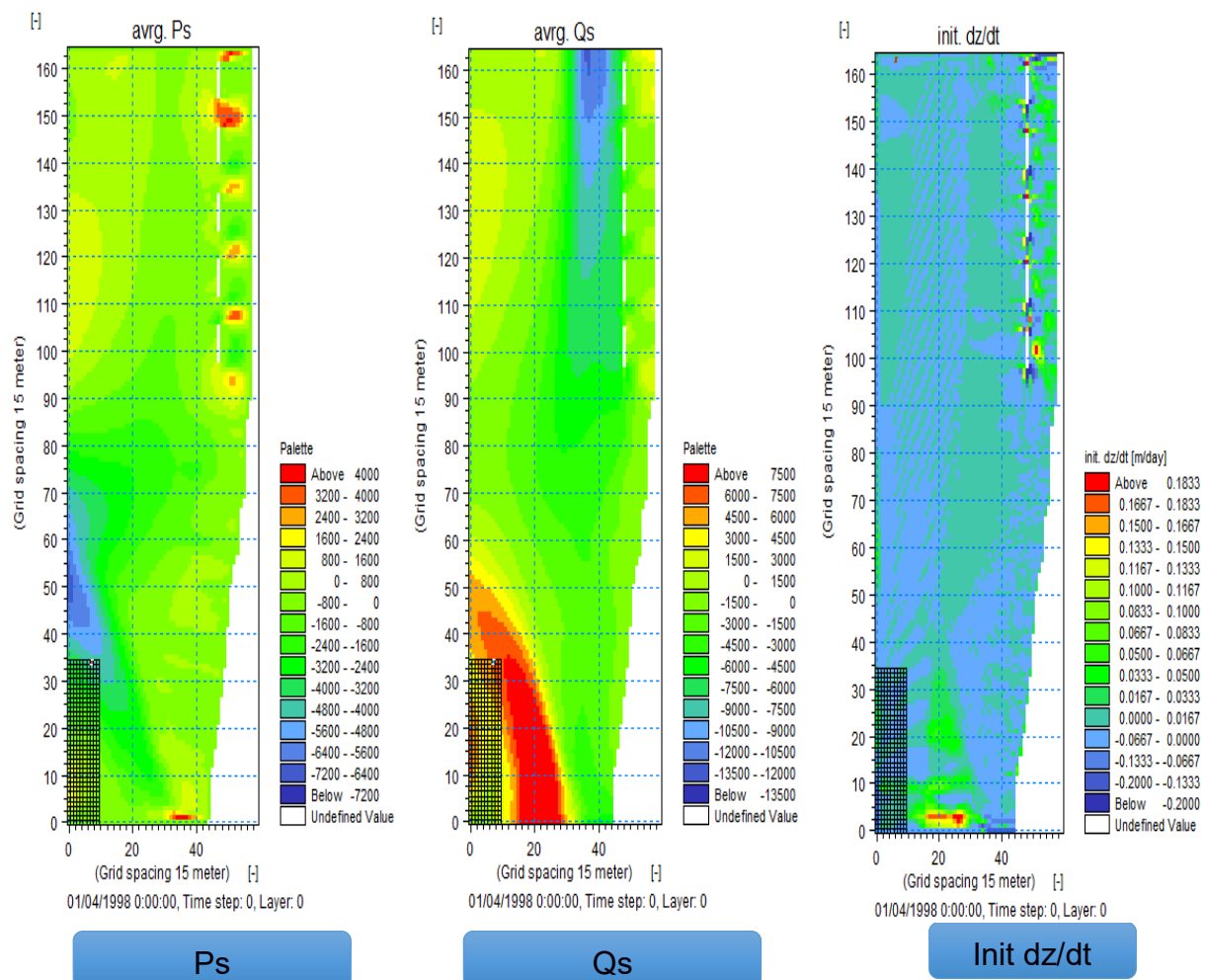


Figura 3.33 Rompeolas - Condiciones ENSO: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En la Figura 3.36 se puede observar el cambio de flujo de transporte, en donde se evidencia que el flujo P_s varía de -2400 a $800 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ y el flujo Q_s varía de $800 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ a $1600 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$. La tasa de acreción en condiciones normales es menor debido a que el oleaje y los esfuerzos de radiación juegan un papel importante en el transporte de sedimentos por lo que en condiciones extremas va a existir un mayor arrastre de sedimentos con una tasa de 0.017 a $0.05 \text{ m}/\text{dia}$ el cual se va a acumular detrás de la estructura.

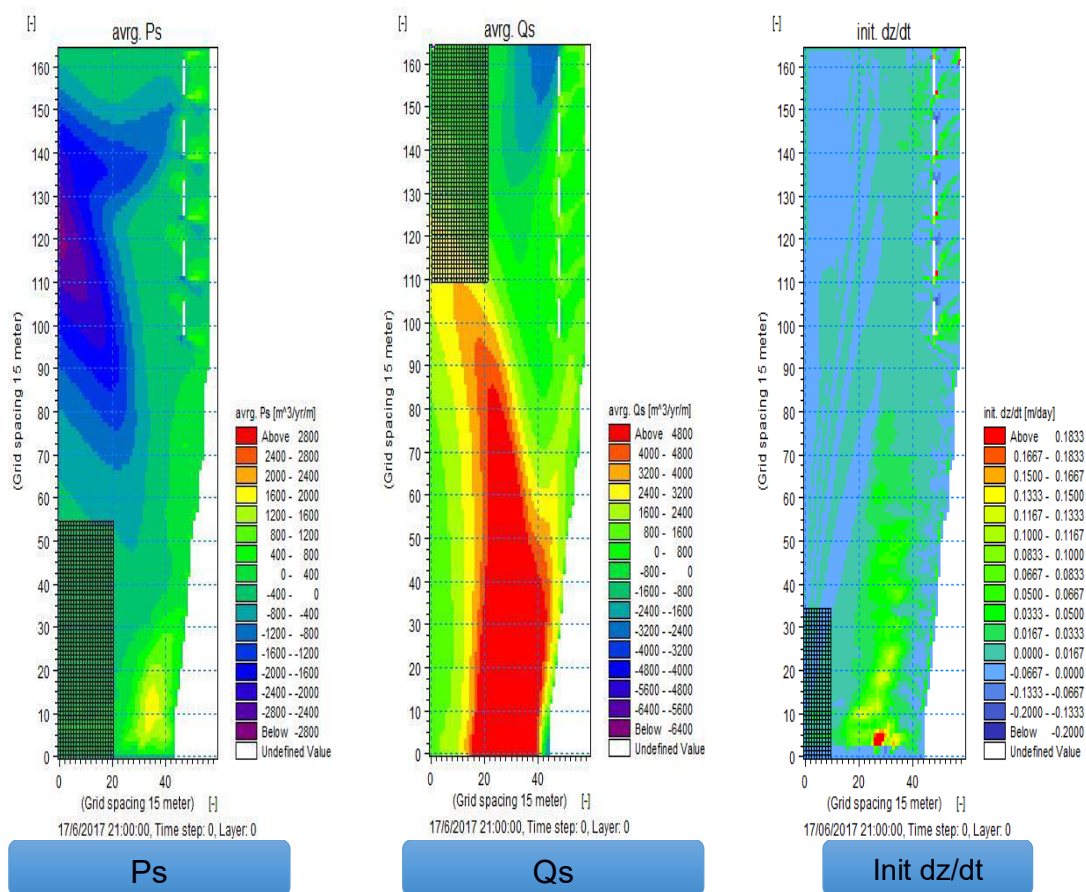


Figura 3.34 Rompeolas - Condiciones Normales: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].

3.3.2.2 Espigones en T

MIKE 21SW: ALTURA SIGNIFICATIVA Y DIRECCIÓN PROMEDIO DEL OLAJE

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En la Figura 3.35 se observa como el oleaje disminuye detrás de los espigones teniendo así alturas de 0.5m, además también se puede evidenciar en la zona izquierda del espigón que, cuando el recorrido del tren de olas se ve interrumpido por la estructura, la ola se difracta y la energía se transfiere de manera lateral con direcciones de 180° a 210° , mientras que en la zona derecha, la dirección de la ola difractada choca nuevamente con la estructura y se refleja con una dirección diferente con ángulos de 300° a 330° y con una evidente pérdida de energía.

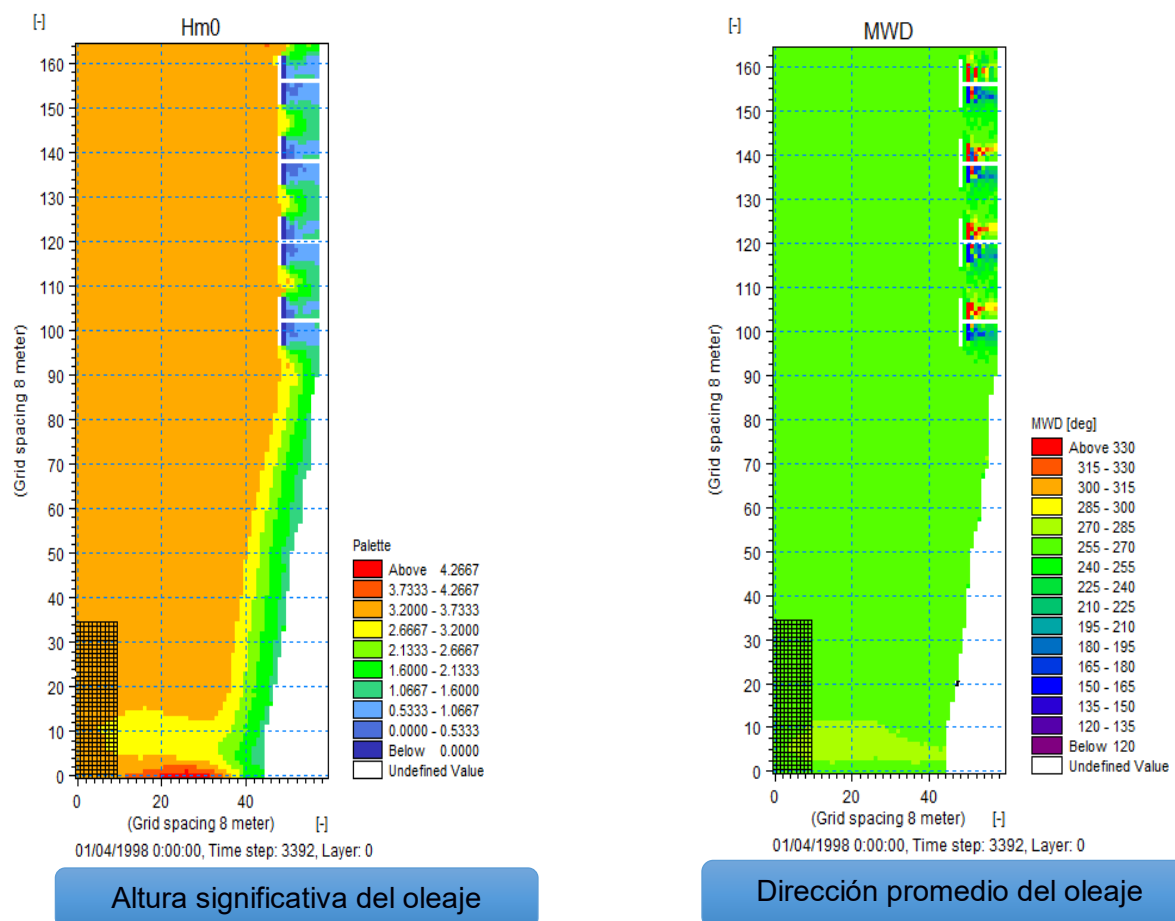


Figura 3.35 Espigones en T - Condiciones El Niño: H_{m0} (Altura significativa del oleaje) y M_{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020]

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales las alturas de olas detrás de la estructura varían de 0.2 a 0.5 m, además cuando el tren de olas choca con los espigones en T, la dirección de promedio del oleaje se desvía con direcciones de 250° a 275° y de 275° a 325°

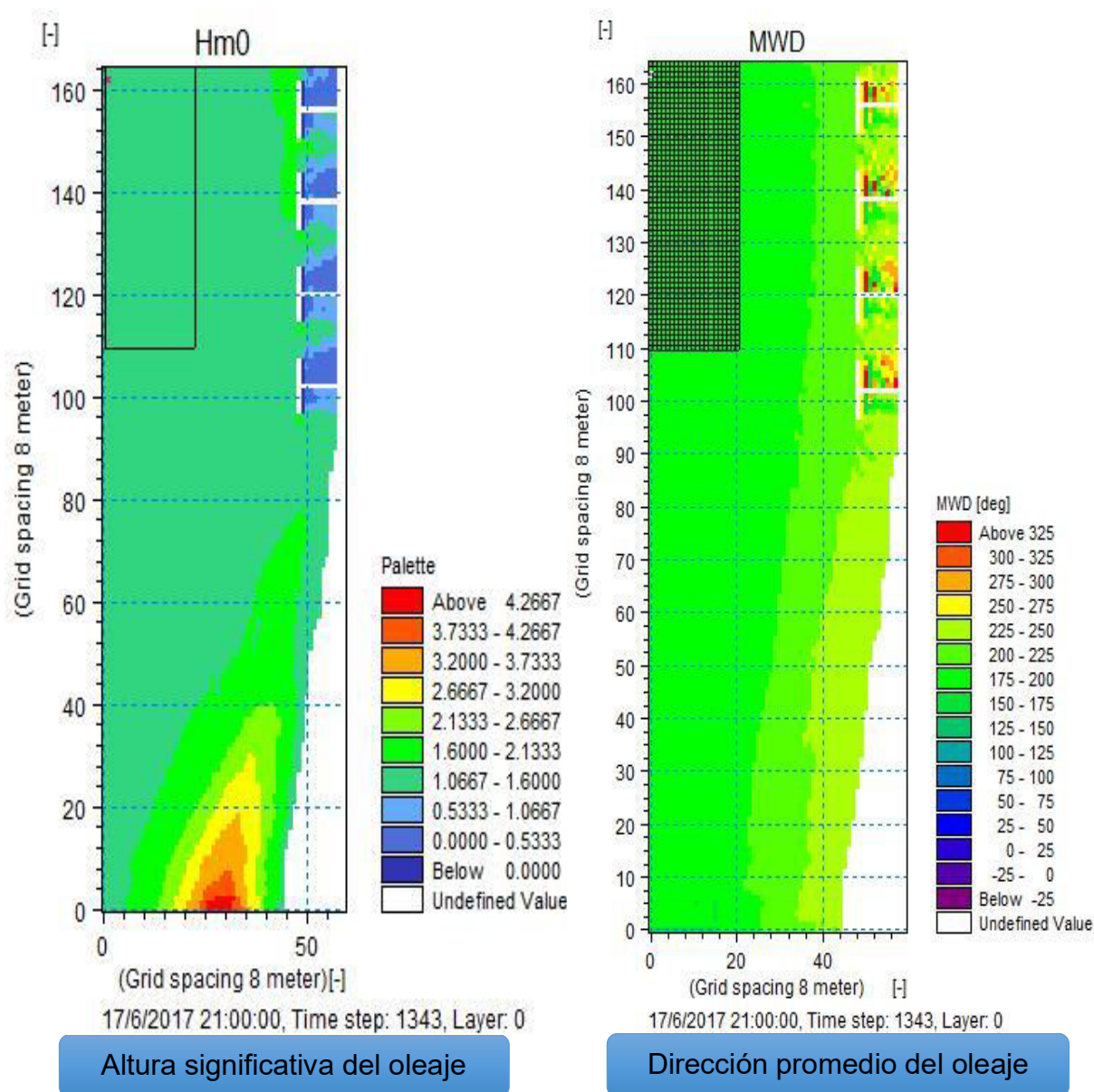


Figura 3.36 Espigones en T - Condiciones Normales: H_{m0} (Altura significativa del oleaje) y M_{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].

MIKE 21 PMS: TENSIONES DE RADIACIÓN (S_{xx} , S_{xy} , S_{yy})

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

Para los espigones en T en condiciones ENSO, se observa que hay un exceso de flujo delante de las estructuras, debido a la presencia del oleaje incidente que llega a la costa, por lo que detrás de las estructuras hay una disminución de flujo que va de los $10 \text{ m}^3/\text{S}^2$ a los $1.5 \text{ m}^3/\text{S}^2$ en la tensión S_{xx} y de 3.5 a $0.5 \text{ m}^3/\text{S}^2$ en la tensión S_{yy} , mientras que en la tensión S_{xy} se produce un aumento de -0.50 a $0.25 \text{ m}^3/\text{S}^2$.

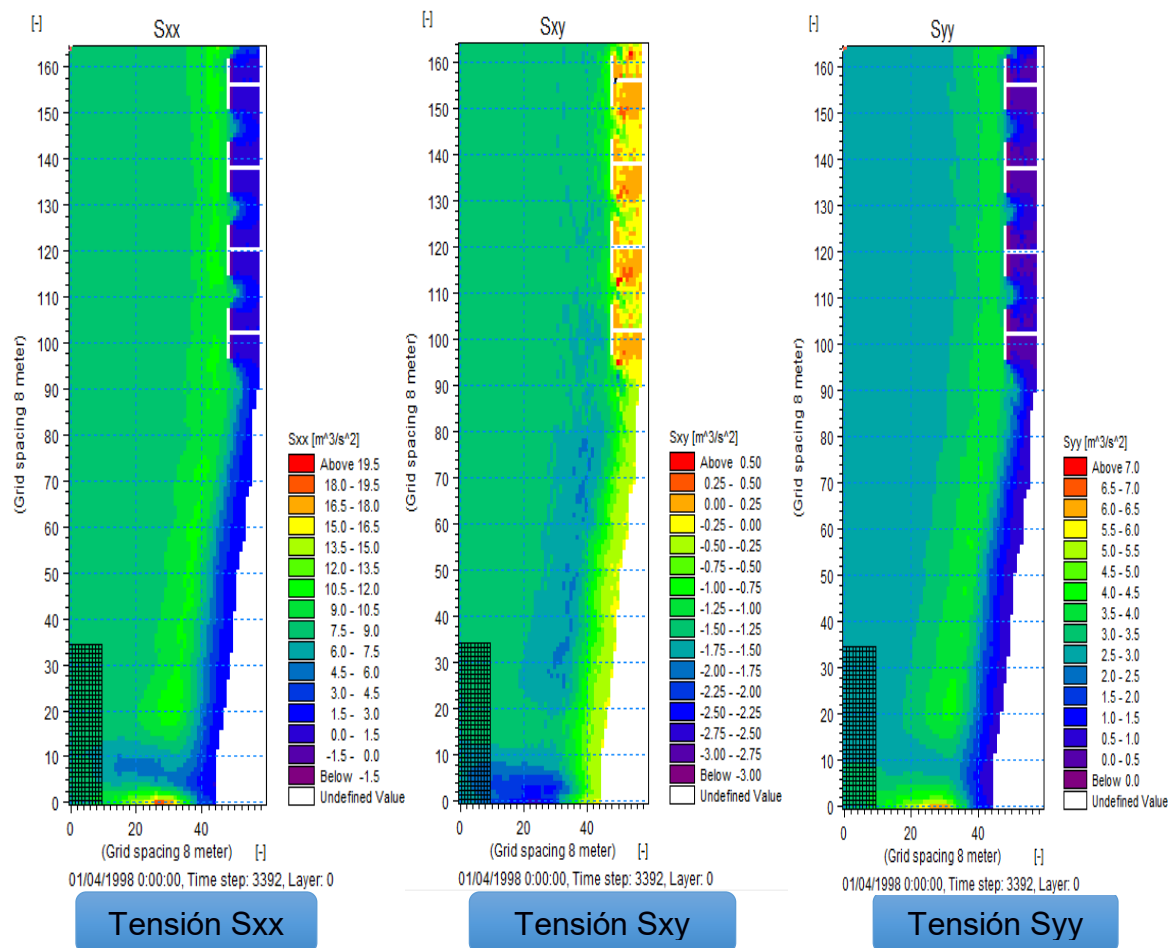


Figura 3.37 Espigones en T - Condiciones El Niño: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

Para condiciones normales en los espigones en T existe una disminución de 4.5 a 3 m^3/S^2 en las tensiones de radiación S_{xx} y de 1.5 a 0.5 m^3/S^2 en las tensiones de radiación S_{yy} , además también podemos observar el incremento de la tensión S_{xy} a medida que disminuye la altura de las olas, teniendo así una aumento en la tensión de -0.25 a 0.25 m^3/S^2 .

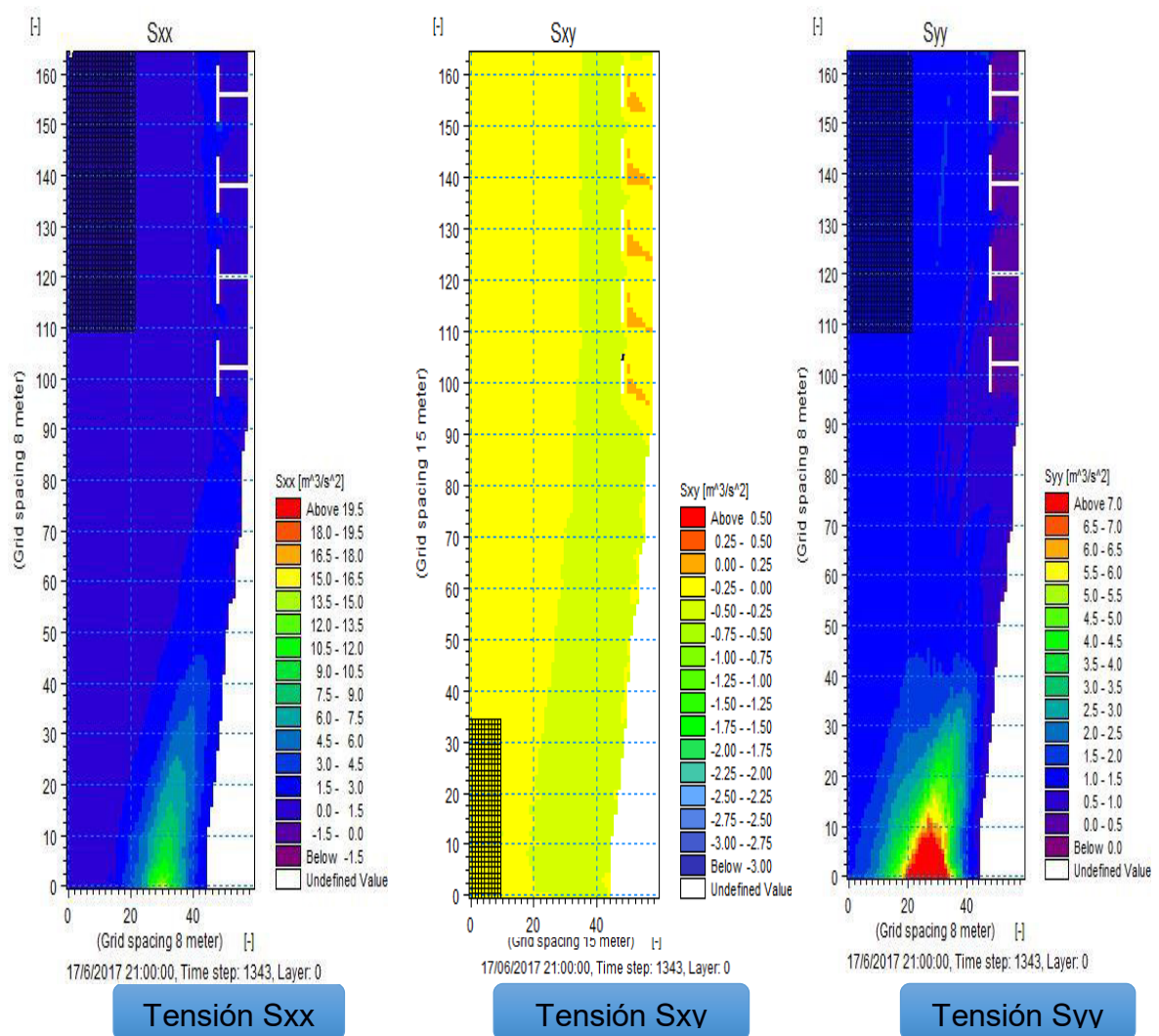


Figura 3.38 Espigones en T - Condiciones Normales: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].

MIKE 21FM: FLUJOS HIDRODINÁMICOS (P flux, Q flux)

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En la Figura 3.39 se muestran los flujos hidrodinámicos correspondientes a la estructura en los espigones en T, en donde podemos observar el aumento del flujo P en dirección x que va de 0.8 a 1.6 m³/s/m y un aumento del flujo Q en dirección y de -6 a 4 m³/s/m detrás de la estructura.

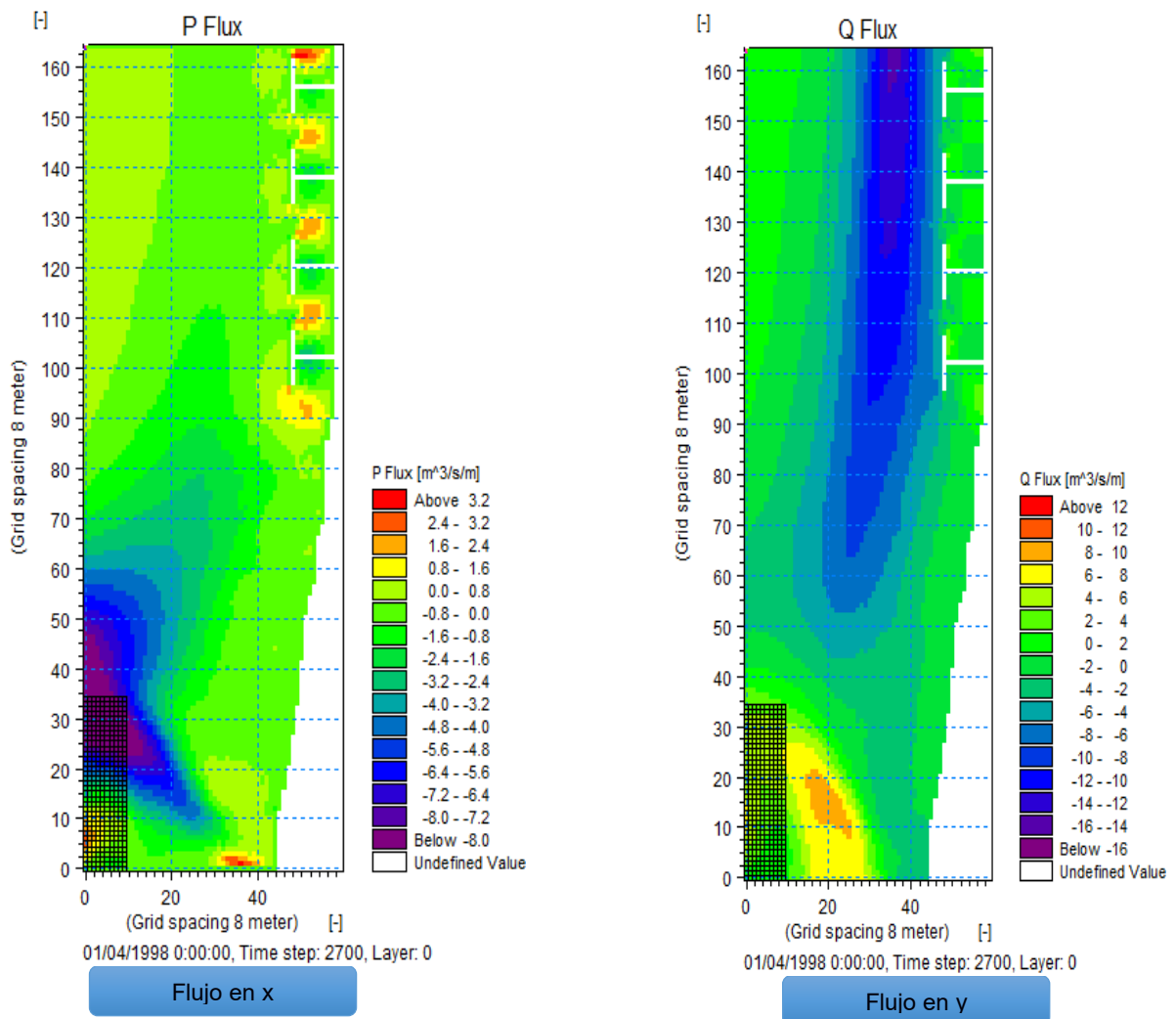


Figura 3.39 Espigones en T - Condiciones ENSO: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales tenemos un aumento gradual del flujo P en la dirección x que va de -0.8 a $0.8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, y del flujo Q en dirección y que va de 6 a $12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ que extiende por toda el área a una profundidad de 200 a 300 m .

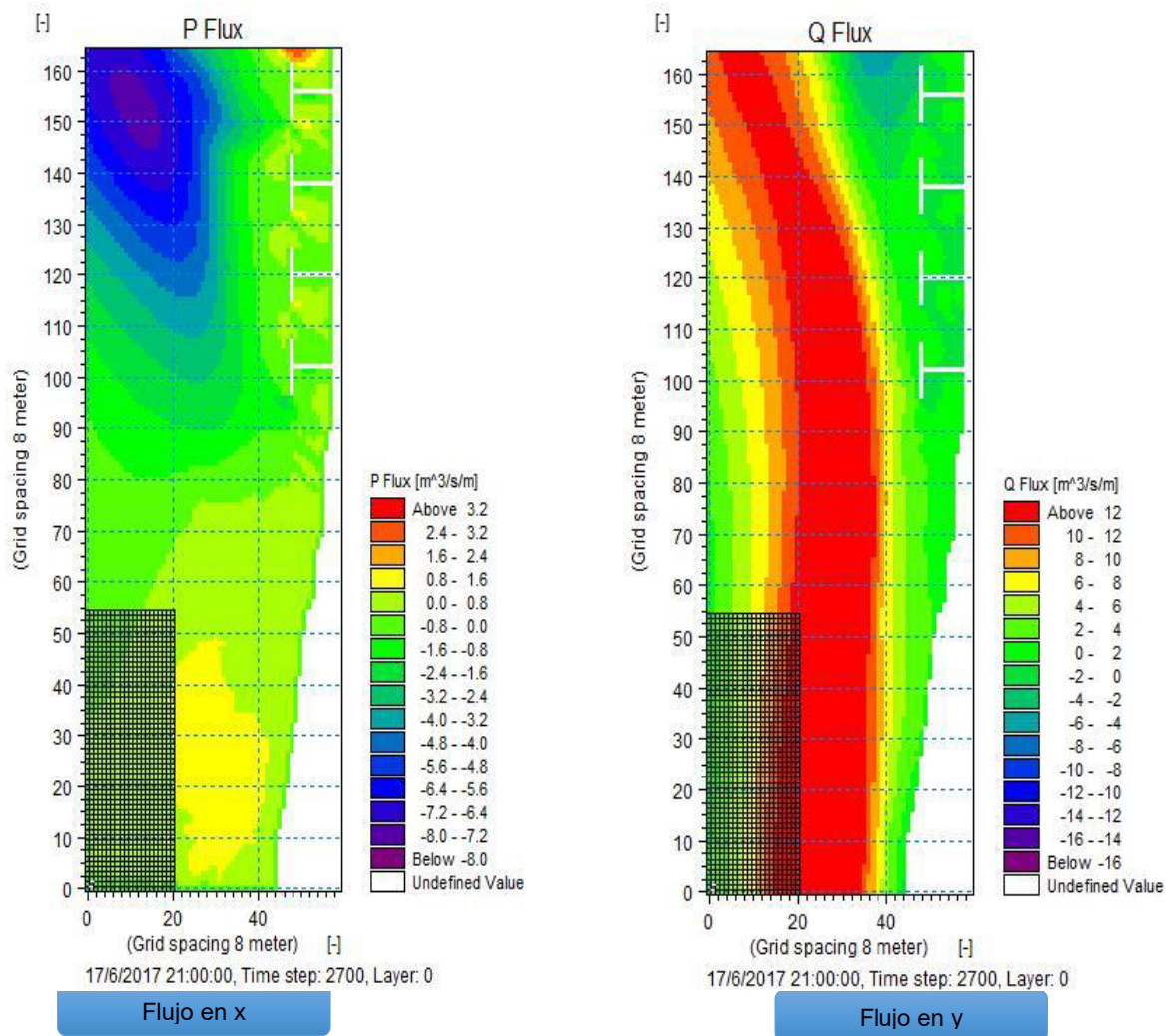


Figura 3.40 Espigones en T - Condiciones Normales: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].

MIKE 21ST: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (P_s , Q_s , Init dz/dt)

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En condiciones ENSO para la estructura correspondiente a los espigones en T, vemos un cambio de flujo de transporte asociado al flujo P de 800 a 3000 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ y un cambio asociado al flujo Q que va de 10500 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ a $-1500 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$. Además, la tasa de acreción promedio es de 0.017 a 0.2 $\text{m}/\text{día}$.

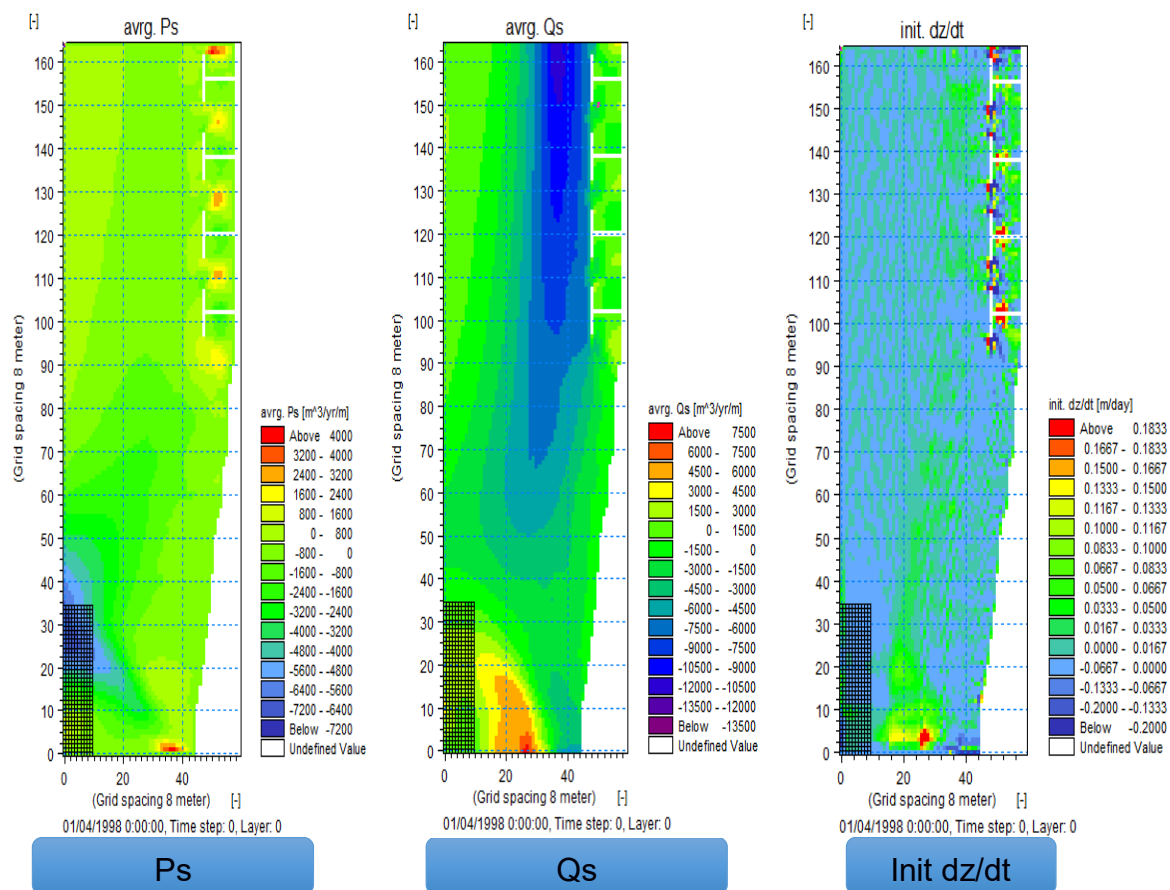


Figura 3.41 Espigones en T - Condiciones ENSO: Transporte de sedimentos. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales, el flujo de transporte de sedimentos P_s , refleja una variación de -2800 a $1200 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$, mientras que para el flujo Q_s se puede visualizar una variación que va de $4800 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ a $800 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$. La tasa de acreción promedio va de 0.017 a $0.033 \text{ m}/\text{día}$ como se muestra en la figura,

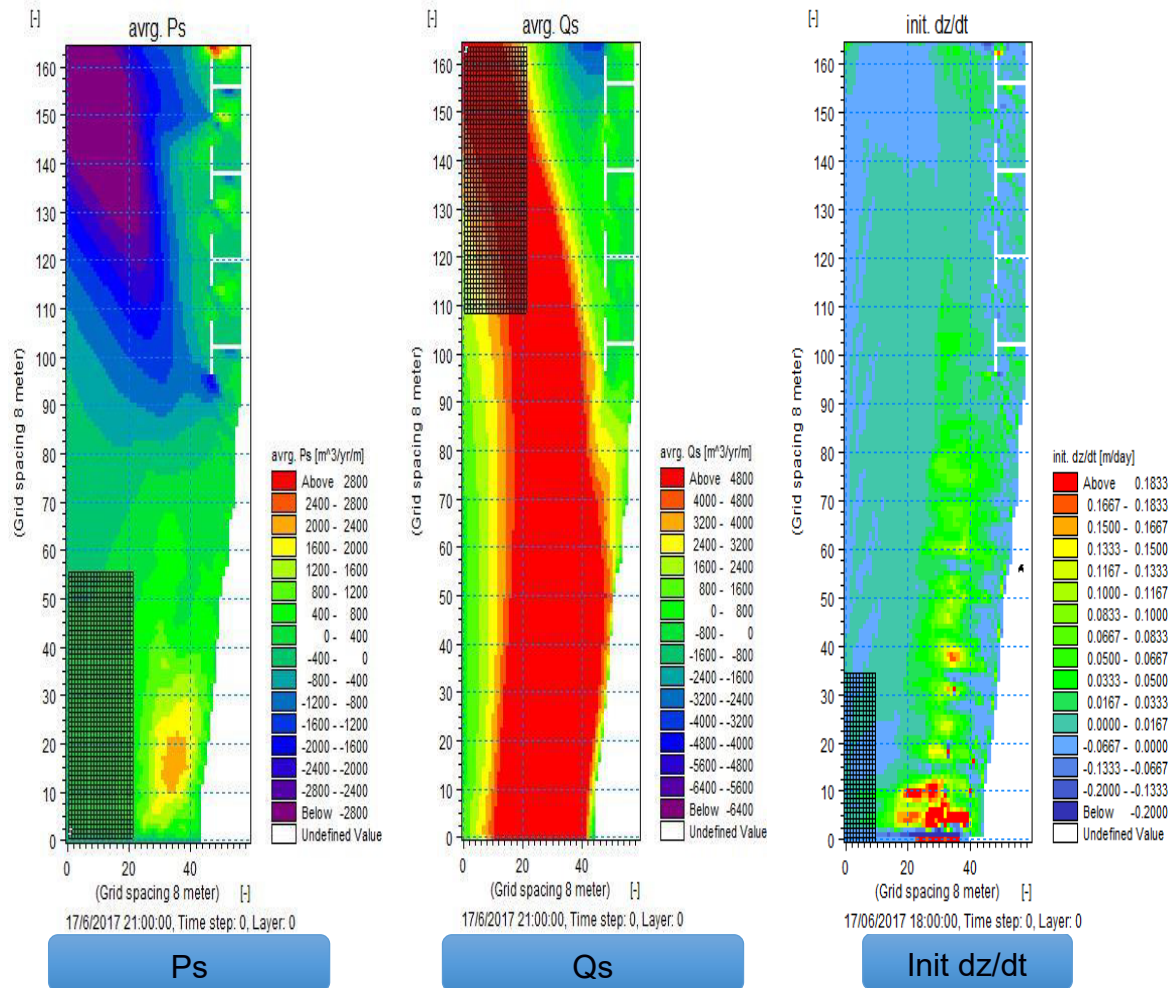


Figura 3.42 Espigones en T- Condiciones Normales: Transporte de sedimentos.

[Autores, 2020].

3.3.2.3 Arrecifes artificiales

MIKE 21SW: ALTURA SIGNIFICATIVA Y DIRECCIÓN PROMEDIO DEL OLAJE

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En condiciones ENSO se puede evidenciar en los arrecifes artificiales un aumento en la altura significativa del oleaje que va en un rango de 0.5 a 1 m. Podemos notar que, para los tres tipos de estructuras propuestas, en condiciones extremas la energía del oleaje y la altura de las olas disminuye considerablemente de una altura promedio de 3 a 4 metros y a una altura de 0.5 a 2.5 de forma gradual a medida que el oleaje va interactuando con la estructura. Además, también se produce una desviación del oleaje con ángulos de 180° a 210° y de 285° a 330° .

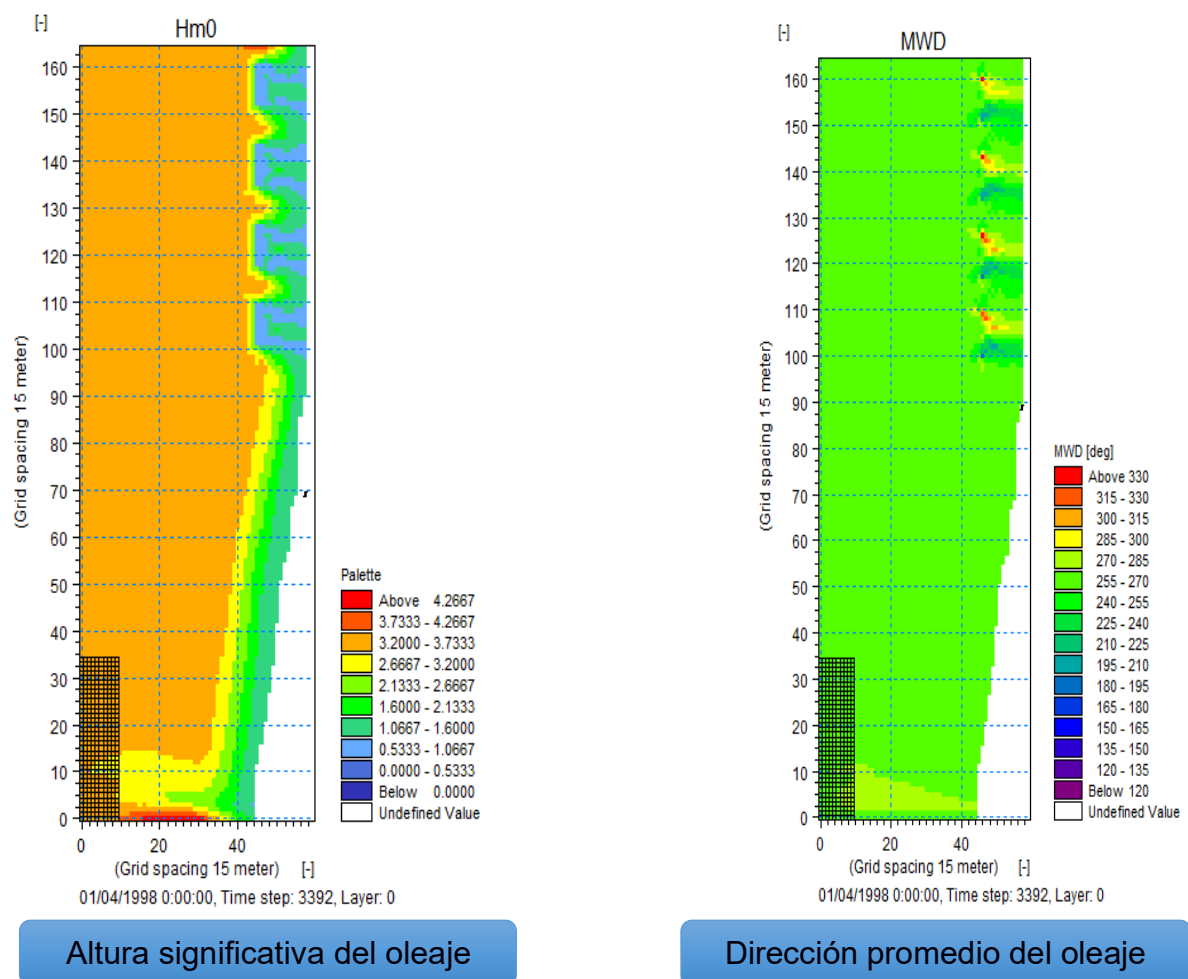


Figura 3.43 Arrecifes artificiales - Condiciones El Niño: H_{mo} (Altura significativa del oleaje) y M_{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales la altura significativa disminuye a 0.5 m, cabe mencionar que para este escenario existe una acumulación de energía justo en la zona de corales, es decir las alturas aumentan ligeramente y se van disipando a medida que se van alejando de la zona de corales y se van aproximando a la costa, esto se debe al decrecimiento repentino de la profundidad, es decir cuando la ola interactúa con la estructura del arrecife aumenta la velocidad con la que se transporta y la cresta de la ola aumenta su altura, al momento en que el tren de olas interactúa con la estructura, el oleaje se desvía con direcciones de 250° a 275°

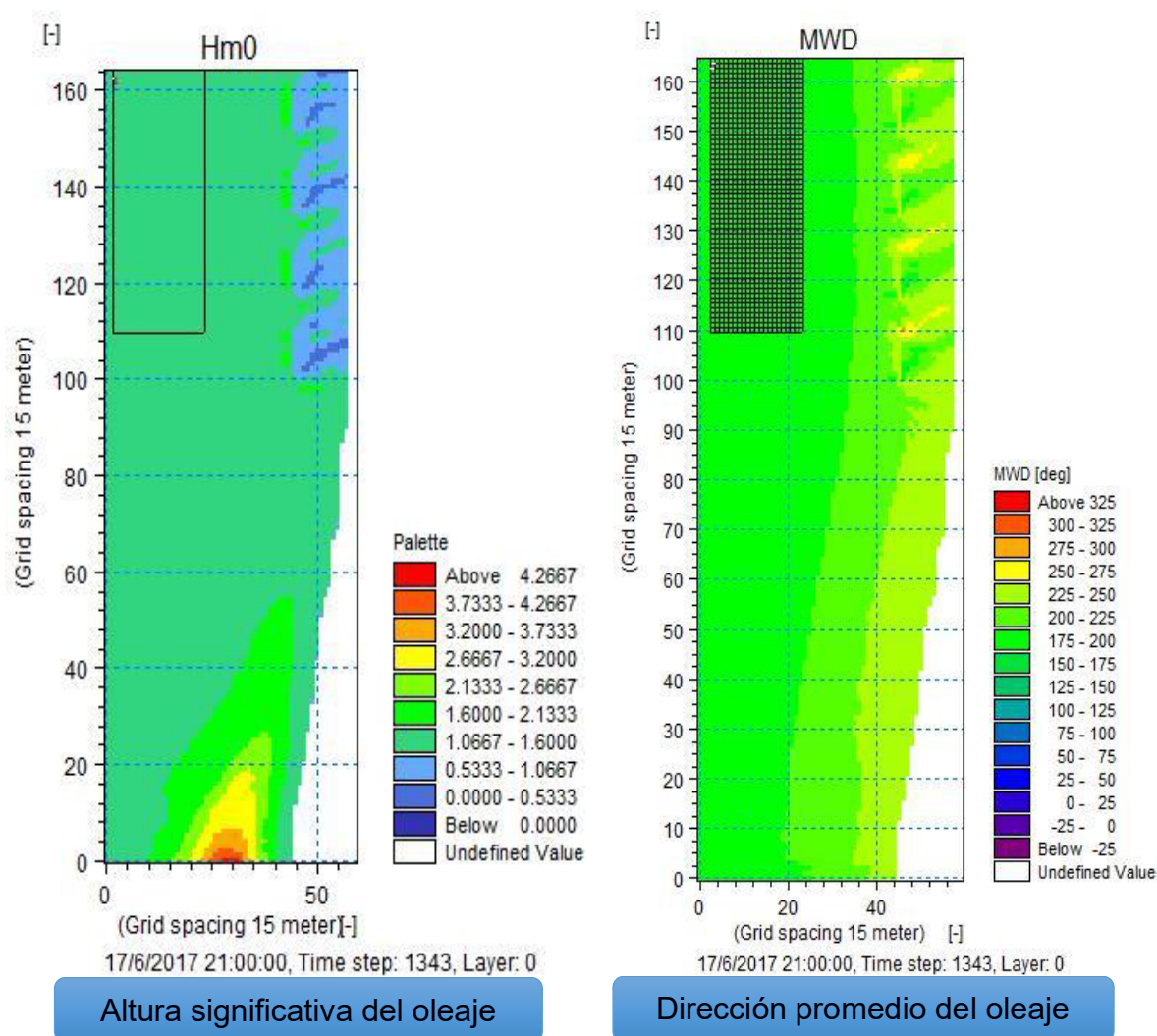


Figura 3.44 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: H_{m0} (Altura significativa del oleaje) y M_{wd} (Dirección promedio del oleaje). [Autores, 2020].

MIKE 21 PMS: TENSIONES DE RADIACIÓN (S_{xx} , S_{xy} , S_{yy})

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En la Figura 3.45 se puede observar una disminución de $12 \text{ m}^3/\text{S}^2$ a $1.5 \text{ m}^3/\text{S}^2$ en la tensión S_{xx} , y de $3 \text{ m}^3/\text{S}^2$ a $1 \text{ m}^3/\text{S}^2$ en la tensión S_{yy} . Además, también se puede observar que, en la zona de colocación del arrecife donde aumenta la altura de ola se produce una disminución de la tensión de radiación S_{xy} de -1.25 a $-1.75 \text{ m}^3/\text{S}^2$, y a medida que se va disipando la energía y va disminuyendo la altura de olas va aumentando la tensión de radiación S_{xy} de -1.75 a $0.5 \text{ m}^3/\text{S}^2$.

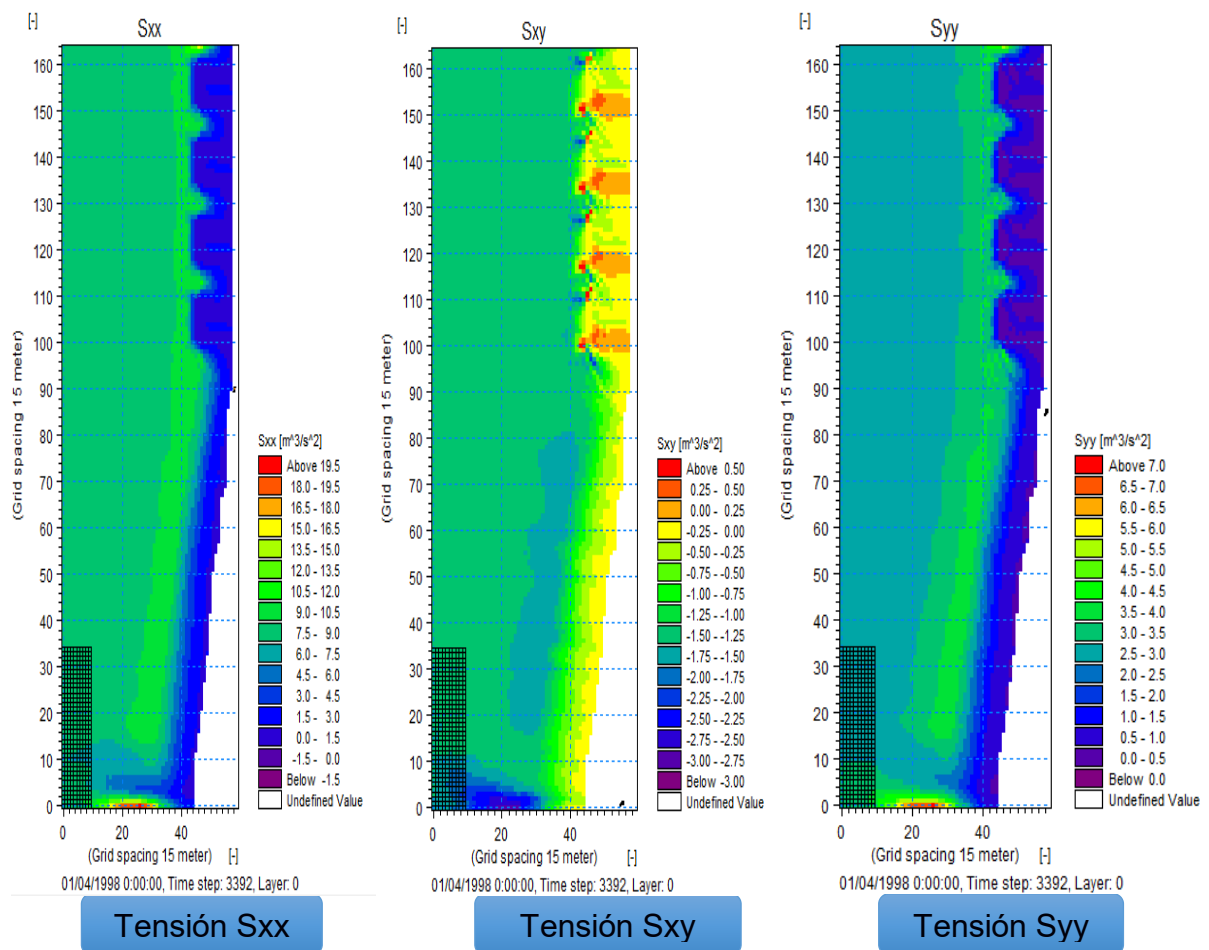


Figura 3.45 Arrecifes artificiales- Condiciones El Niño: Tensiones de radiación. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales podemos observar cómo aumenta las tensiones de radiación S_{xx} y S_{yy} en la zona de ubicación de corales y va disminuyendo a medida que disminuye la altura de las olas de teniendo así una variación en las tensiones de 4.5 a 1.5 m^3/S^2 y de 1 a 0.5 m^3/S^2 respectivamente. Además, se evidencia un aumento de -0.75 a -0.25 m^3/S^2 en las tensiones de radiación S_{xy} .

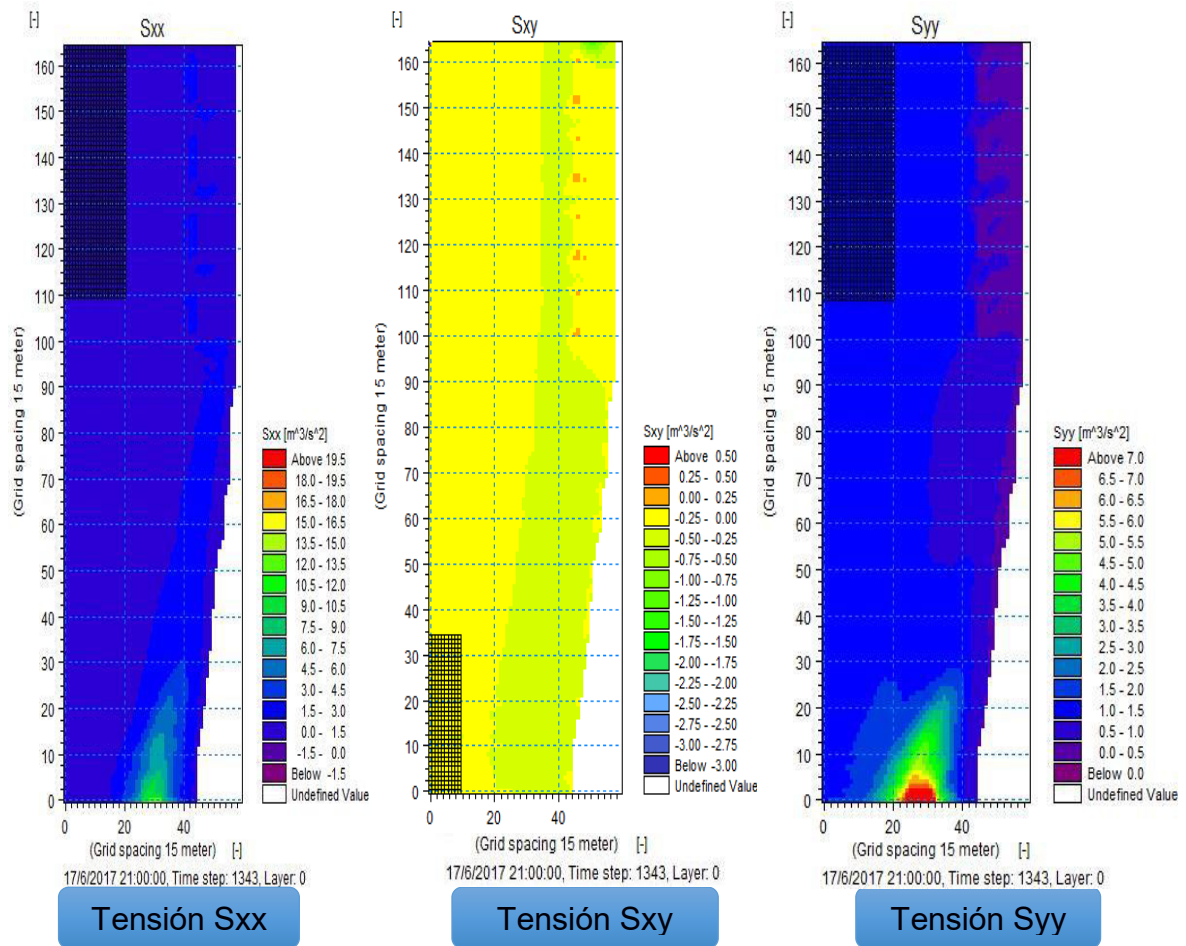


Figura 3.46 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: Tensiones de radiación.

[Autores, 2020].

MIKE 21FM: FLUJOS HIDRODINÁMICOS (P flux, Q flux)

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En la Figura 3.47 para el escenario correspondiente a los arrecifes se puede evidenciar un incremento de 0.8 a 3.2 m³/s/m del flujo P en dirección x y de -6 a 4 m³/s/m en el flujo Q en la dirección y.

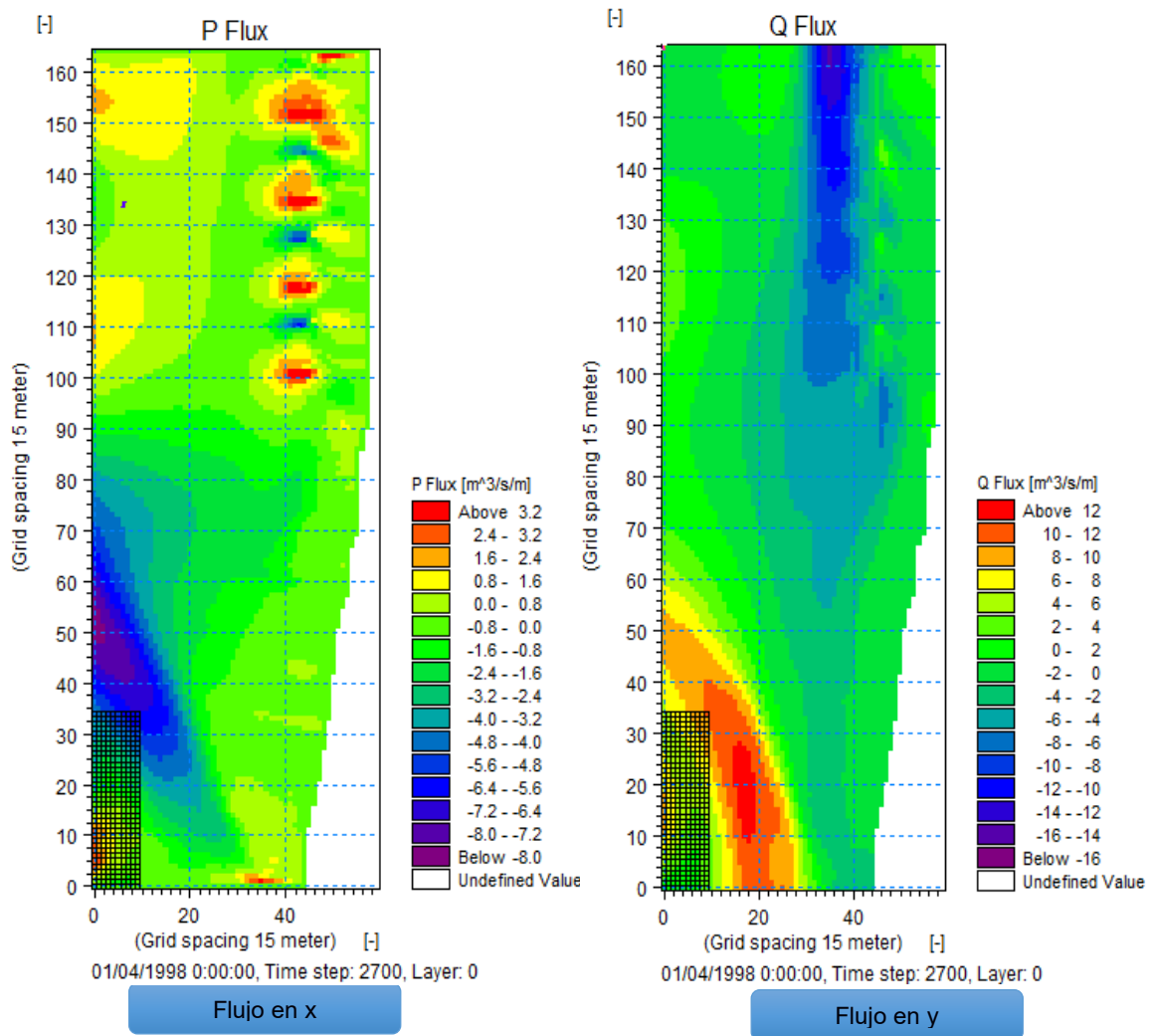


Figura 3.47 Arrecifes artificiales - Condiciones ENSO: Flujos hidrodinámicos. [Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En condiciones normales se puede evidenciar un incremento de -0.8 a $1.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ en el flujo P en x. Además, se puede observar que, el flujo Q se encuentra concentrado en la zona sur correspondiente al sector de Playa Bruja como se muestra en la figura, mientras que, en la zona donde se encuentran las estructuras podemos observar una ligero disminución en el flujo Q de 2 a $-2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

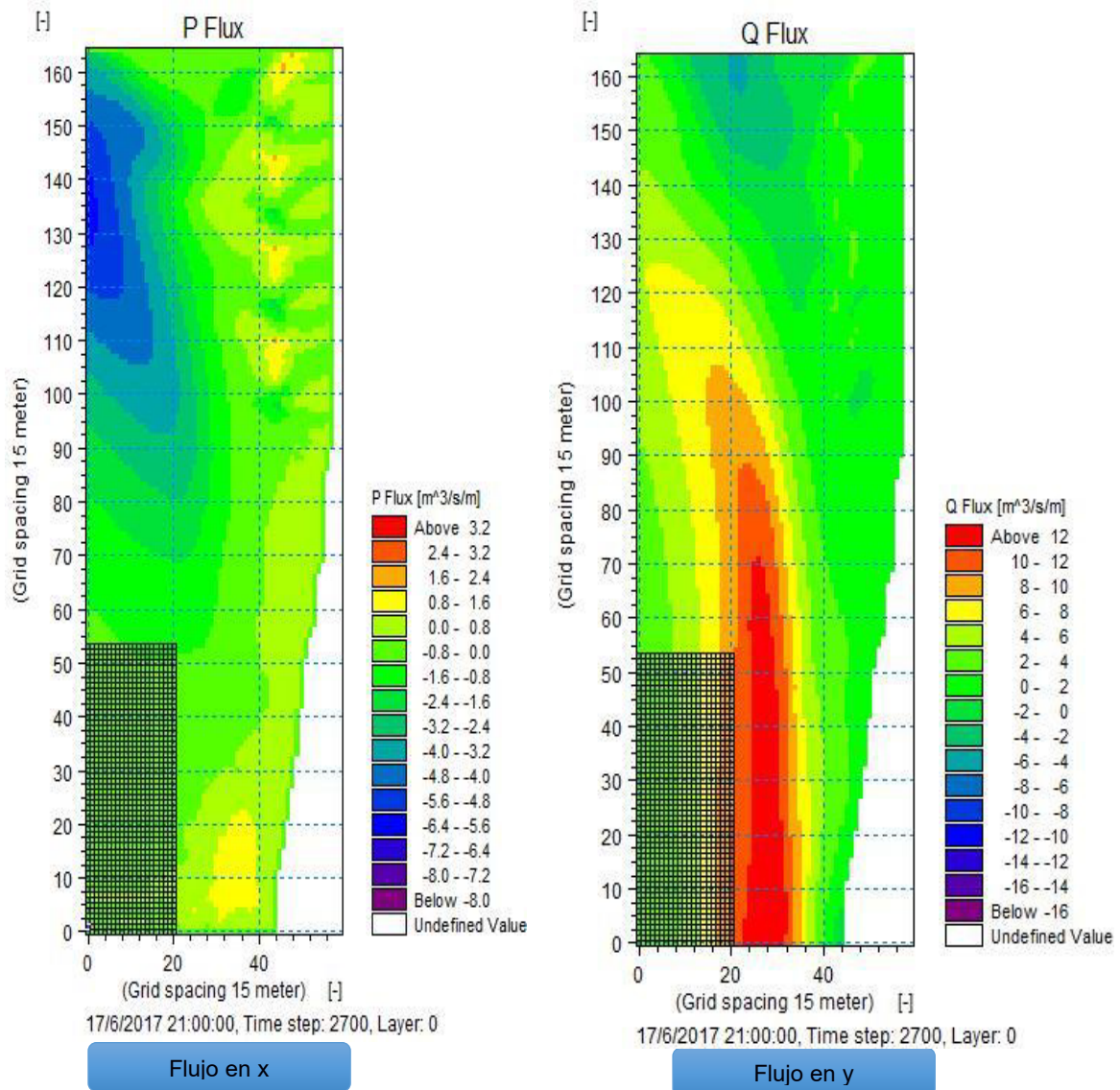


Figura 3.48 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: Flujos hidrodinámicos.
[Autores, 2020].

MIKE 21ST: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (P_s , Q_s , Init dz/dt)

Condiciones ENSO (El Niño 1997-1998)

En la Figura 3.49 se muestran los flujos de transporte de sedimentos asociados a cada flujo hidrodinámico para el escenario de los arrecifes artificiales, estos flujos son P_s y Q_s en los cuales se muestra una variación de transporte de 800 a 3800 $m^3/yr/m$ y de -4500 $m^3/yr/m$ a -1500 $m^3/yr/m$ respectivamente. Además, podemos notar que la tasa de acreción promedio se encuentra en un rango de 0.017 a 0.12m/dia.

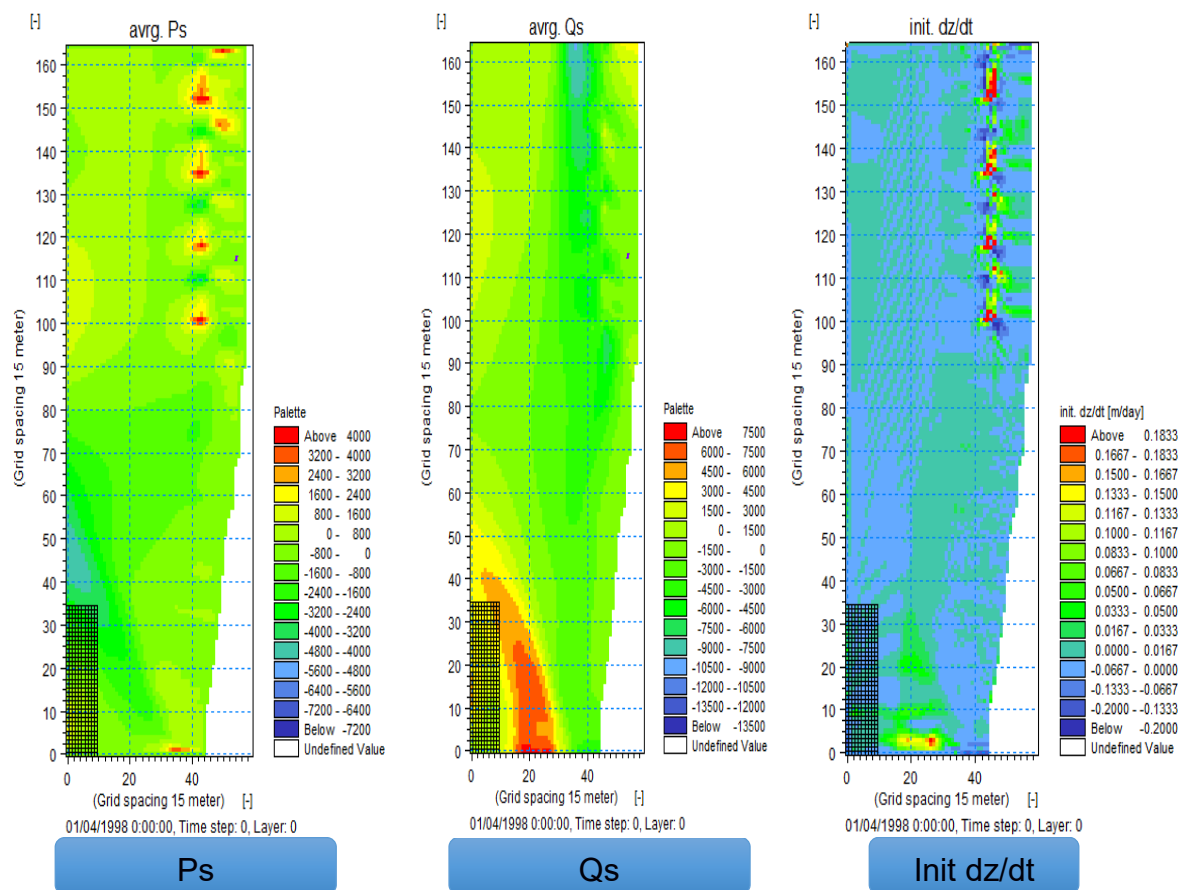


Figura 3.49 Arrecifes artificiales - Condiciones ENSO: Transporte de sedimentos
[Autores, 2020].

Condiciones Normales (2017)

En el caso de condiciones normales el flujo de transporte P_s varía de -2400 a 400 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ y el flujo de transporte Q_s presenta una variación de flujo de sedimentos de 800 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ a 3200 $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$. La tasa de acreción promedio se encuentra en un rango de 0.017 a 0.067 $\text{m}/\text{día}$.

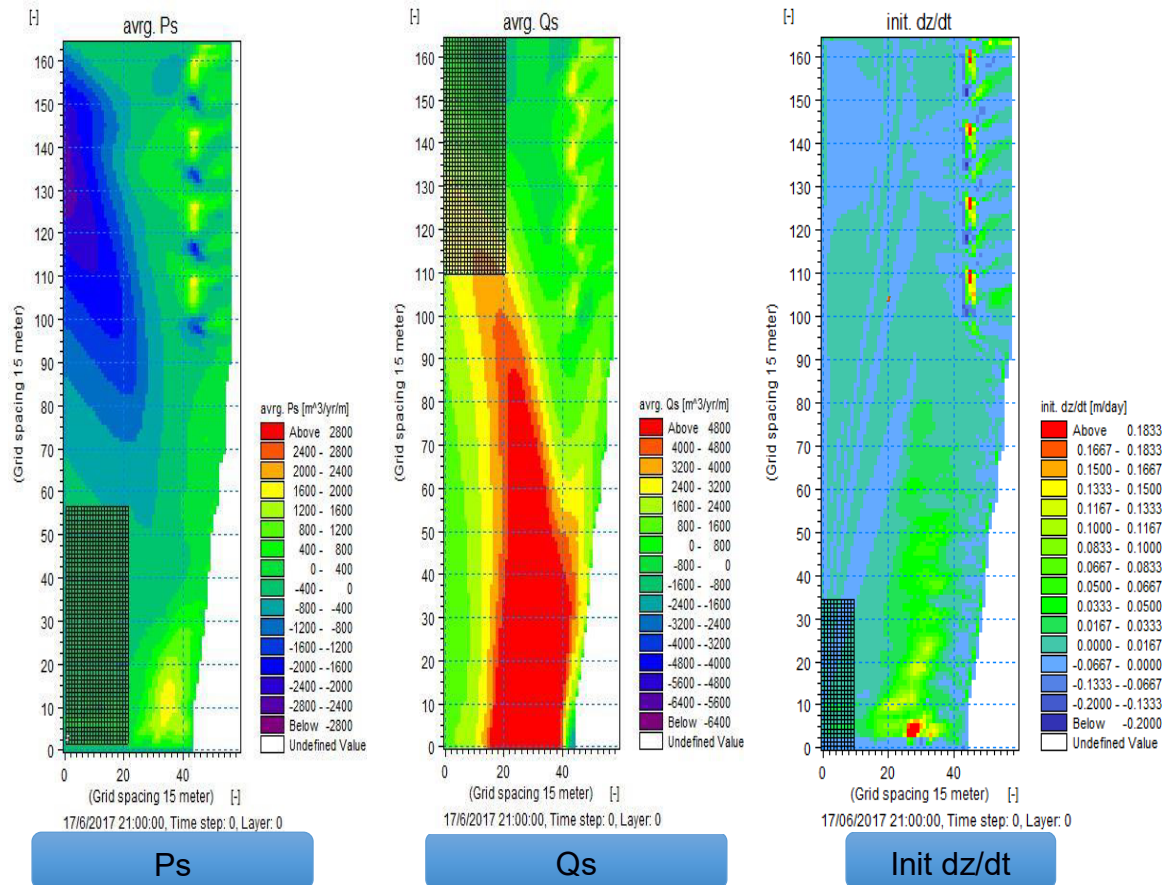


Figura 3.50 Arrecifes artificiales - Condiciones Normales: Transporte de sedimentos.
[Autores, 2020].

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 DISCUSIÓN

Oleaje en aguas profundas – Spectral Waves

Los resultados que se obtuvieron del modelo de onda espectral SW fueron utilizados como archivos de entrada para el modelo PMS, por lo que para garantizar la confiabilidad de los datos y disminuir la incertidumbre de los resultados del modelo se revisaron cuidadosamente los valores de altura, periodo y dirección del oleaje, estos parámetros fueron filtrados utilizando rangos aceptables para nuestra zona de estudio. No obstante, la validación se realizó comparando resultados del modelo con datos de mediciones litorales, estas mediciones están basadas en registros visuales y teóricos, es decir van a depender de la calidad de los datos de las mediciones realizadas y de la habilidad o experiencia del observador.

Oleaje en aguas someras – Parabolic Mild Slope

Otro de los resultados que genera el modelo PMS son las elevaciones de la superficie del nivel del mar sin embargo no fueron incluidas dentro del análisis debido a que el archivo generado debía cumplir ciertas limitaciones, por lo que esta variable no estaba considerada dentro de estos requerimientos ya que sería posteriormente analizada en el modelo de Flujo FM, en donde se establece un valor constante de la elevación de la superficie.

Flujos hidrodinámicos – Flow Model

Para la simulación del modelo de flujo hidrodinámico no se consideraron los parámetros de fuentes, sumideros ya que no se contaba con información suficiente para determinar si existían puntos de descargas de agua del modelo o la cantidad y ubicación de estos puntos. Tampoco fue considerado el presupuesto de masa debido a que no se requería una zona en específica en donde se pueda establecer el presupuesto masivo de uno o más componentes del modelo dentro de esa área.

Para los parámetros adicionales de ingreso de los modelos se contaba con el solucionador terrestre multicelular, sin embargo, no se habilitó esta opción debido a que se utiliza para modelar el flujo bidimensional en áreas urbanas y rurales lo que no estaba contemplado dentro de los objetivos propuestos.

Transporte de sedimentos – ST

Para el cálculo del transporte de sedimentos se utilizó la metodología de Bijker en el que se considera el transporte de carga total, aunque también considera otros parámetros como la densidad relativa del fondo, la temperatura del agua, el diámetro medio del sedimento para lo cual se escogió un promedio de los valores obtenidos de las campañas de medición y se analizaron las condiciones hidrodinámicas y morfodinámicas de la zona.

Cabe mencionar que los datos correspondientes a los sedimentos fueron ingresados especificando un d_{50} de 0.25mm para el fondo y de -99 debido a que permiten especificar si debe incluirse o no en la simulación el cálculo de transporte de sedimentos. Para la simulación al definir estos valores, las velocidades de transporte de sedimentos calculadas se ajustarán de tal manera que no se produzca erosión de fondo por debajo del nivel de la superficie dura, ya que se contaba con el ingreso de las estructuras.

4.2 CONCLUSIONES

- Los modelos numéricos representan una herramienta computacional eficaz que nos permite predecir el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico de la playa al implementar diferentes tipos de estructuras costeras y constituyen un importante complemento en proyectos de ingeniería costera fomentando una adecuada toma de decisiones que beneficie a las comunidades del filo costero.
- La tasa promedio de erosión obtenida para el escenario de calibración del modelo correspondiente al año 2017 tiene un valor promedio de 0.45m/año

además el modelo nos permite identificar las zonas en donde se genera erosión y tener una mejor idea con respecto a la ubicación de las estructuras.

- Los resultados obtenidos de los modelos WAVEWATCH III y Spectral Wave fueron coherentes y no presentaron una gran diferencia con respecto a los datos recolectados de las mediciones litorales.
- Los escenarios de protección propuestos mitigan la energía del oleaje y los procesos erosivos en la zona de estudio, no obstante, el escenario en el que se analiza la implementación de espigones tipo T en la zona de estudio, genera una mejor respuesta de la playa, proporciona una mayor protección del oleaje incidente y de los procesos erosivos.

4.3 RECOMENDACIONES

- Para la validación de los datos se usó como referencia datos de mediciones litorales, sin embargo, con el fin de obtener un mejor criterio de validación se recomienda utilizar una base de datos más amplia ya sea realizando un registro más continuo de mediciones o también utilizando un registro de oleaje obtenido de olígrafos.
- Investigar sobre nuevas formas de implementación de estructuras con otros modelos de simulación, para que de esta forma el uso de modelos costeros se convierta, en una herramienta computacional imprescindible en cualquier proyecto de ingeniería de tal forma que se pueda generar un mayor beneficio para los problemas que enfrentan las comunidades del filo costero.
- Contar con más licencias de MIKE 21, para que se puedan generar proyectos multidisciplinarios en donde se involucren más personas de diferentes especialidades con el fin de brindar un estudio más detallado de una determinada zona costera

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, O. G., Arguello, J., & Vásquez, M. (2012). *Evaluación del uso recreativo de la comuna Libertador Bolívar del Cantón Santa Elena*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Andrade, F., & Ferreira, M. A. (2006). *A simple method of measuring beach profiles*. *Journal of Coastal Research*, 22(4), 995–999. ISSN 0749-0208.
- Andrade, G., & Maquilón, B. (2019). *EVALUACIÓN DE DISEÑOS INGENIERILES ANTE PROCESOS EROSIVOS COSTEROS, UTILIZANDO MODELOS NUMÉRICOS*. Guayaquil: ESPOL.
- Andrade, G., Granja, R., & Díaz, N. (2019). *Determinación de los Recursos Naturales - Comuna Libertador Bolívar*.
- Basco, D. (2001). *Functional Design: Coastal Structures*. Virginia, United states: The Coastal Engineering Center.
- Cabildo Comuna Atravezado. (Julio de 2019). *Libertador Bolivar*. Obtenido de <https://libertadorbolivar.com/histo>
- Caiza, R., & Nativi, S. (2019). *Evaluación y modelamiento del cambio de línea de costa en condiciones naturales y bajo influencia de obras de protección costera. Caso de estudio: Libertador Bolívar, Santa Elena-Ecuador*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Cansing, S. A., & Mena, G. M. (2018). *Diseño de una estructura de protección costera para Playa Bruja, ubicada en la comunidad Libertador Bolivar - Provincia de Santa Elena*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- DHI Group. (2014). *Software Mike 21: Flow Model*.
- DHI Group. (2014). *Software Mike 21: Non-Cohesive Sediment Transport*.
- DHI Group. (2014). *Software Mike 21: Parabolic Mild Slope*.
- DHI Group. (2014). *Software Mike 21: Spectral Wave*.
- DHI Group. (2017). *Software DHI Mike 21: Descripción*.
- Enriquez, G. (2016). *Estudio de estrategias de diseño para adaptar el espacio construido y mitigar daños de inundación en la comuna Libertador Bolívar, Cantón*

Santa Elena. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil. Facultad de Arquitectura y urbanismo.

- Enriquez, G. (2016). *Plano nivel del agua en época de aguaje y agua normal*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil.
- EUCC Atlantic Centre. (2017). *Erosión Costera: Coastal Risks Management-ATlantic Stakeholders network*. Biarritz: Región Nouvelle-Aquitaine. Unión Europea .
- Instituto Mexicano del Transporte. (2006). *Estudios de transporte litoral*. México.
- Koupermann, J. I. (2014). *Determinación y mapeo de las áreas potencialmente incorporables al desarrollo sustentable a partir de la implementación del plan hidráulico en la provincia de Santa Elena*. Quito, Ecuador.: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Facultad de ciencias humanas.
- Lizano, O. (2012). *Corrientes de resaca*. Costa Rica: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Familia. .
- Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Introducción a la dinámica costera*. El Salvador: Dirección General del Servicio Nacional de Estudios territoriales. Servicio Oceanográfico Nacional.
- Mosso Aranda, C. O. (2004). *Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa: Hidrodinámica Costera*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.
- Mott Macdonald Group. (2016). *The natural solution to coastal protection*.
- Recalde , S., & Mindiola, M. (2008). *Análisis de metodologías para la evaluación ambiental de la construcción del terminal marítimo en el sector de Monteverde, Provincia de Santa Elena*. Guayaquil, Ecuador.: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Roelvink, D., & Reniers, A. (2012). *A Guide To Modeling Coastal Morphology*. Singapore: World Scientific.
- Sánchez, E. (2003). *DISEÑO DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA DEL MALECÓN DE LA LIBERTAD*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Sardá, R. (2009). *Sistemas Litorales*.
- Seelig, M. (2016). *Infraestructura verde: protege tu costa con un arrecife de coral*. Banco Interamericano de Desarrollo.

- Topoequipos S.A. (2019). *Descripción del teodolito*. Antioquía: Soluciones ingenieriles en Geomática.
- Us Army Corps of Engineers (USACE). (2003). *Coastal Engineering Manual (CEM)*. Washington.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Código de Matlab usado para la descarga de datos en la página del WAVEWATCH III

```
link='http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/Model_output/WAVEWATCH_III/3hourly';
ncdisp(link)
time=ncread(link,'time');
w=datevec(time)
tim=time(8529:11448,1)

hsg=ncread(link,'htsgwsfc',[224 77 1],[1 1 Inf]);
hsg=squeeze(hsg);

prd=ncread(link,'perpwsfc',[224 77 1],[1 1 Inf]);
prd=squeeze(prd);

dir=ncread(link,'dirpwsfc',[224 77 1],[1 1 Inf]);
dir=squeeze(dir);

ixhsg=find(hsg<0 | hsg>4);
ixper=find(prd<8 | prd>20);
ixdir=find(dir<0 | dir>360);

hsg(ixhsg)=NaN;
prd(ixper)=NaN;
dir(ixdir)=NaN;

h=hsg(8529:11448,1)
p=prd(8529:11448,1)
d=dir(8529:11448,1)
```

APÉNDICE B

Código de Matlab para obtener la Espectro del oleaje

```
%Espectro del oleaje
```

```
%PROFUNDO
```

```
z1=h-mean(h)
Fs1=1.5;
N1=2920;
df1=Fs1/N1; %intervalo de frecuencias
g1=fft(z1(1:N1)/100); %el desplazamiento en metros
g1=2*abs(g1).^2/(N1^2*df1);
g1=g1(1:N1/2); %Toma solamente N/2 datos
frec1=(0:N1/2-1)*df1; %Frecuencias
plot(frec1,g1,'m')
xlim([0,0.1])
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Densidad espectral')
title('Espectro del oleaje para aguas profundas: Año 2017')
```

```
%SOMERO
```

```
z=hs_somero-mean(hs_somero)
Fs=1.1;
N=2920;
df=Fs/N; %intervalo de frecuencias
g=fft(z(1:N)/100); %el desplazamiento en metros
g=2*abs(g).^2/(N^2*df);
g=g(1:N/2); %Toma solamente N/2 datos
frec=(0:N/2-1)*df; %Frecuencias
plot(frec,g,'r')
xlim([0,0.1])
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Densidad espectral')
title('Espectro del oleaje para aguas someras: Año 2017')
```

```
%SOMERO Y PROFUNDO
```

```
xlim([0,0.1])
plot(frec,g,'r'),hold on,
plot(frec1,g1,'g'),hold on,
legend('Profundo','Somero')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Densidad espectral')
title('Espectro del oleaje Año 1998')
```

APÉNDICE C

TRANSPORTE LITORAL (METODO DE EMPIRICA GALVIN)

Para obtener el transporte litoral se usó el método empírico de Galvin, el cual depende de la altura significativa, cuyos datos fueron obtenidos de las salidas de campo para sicigia y para cuadratura (Instituto Mexicano del Transporte, 2006).

Para este método se usó la siguiente formula

$$Q = 1.646 \times 10^6 \times Hb^2$$

Tabla 4.1. Altura de olas promedio Sicigia

Sábado 07 Marzo 2020	E1	E2	E3	E4
Sicigia	0.55	0.63	0.58	1.00
	0.55	0.63	0.72	0.71
	0.50	0.58	0.59	0.65
	0.49	0.71	0.70	0.67
	0.78	0.72	0.60	0.63
	0.79	0.62	0.60	0.78
	0.53	0.57	0.61	1.03
	0.57	0.69	0.62	1.02
	0.71	0.74	0.63	1.11
	0.72	0.66	0.66	0.98
PROMEDIO	0.62	0.65	0.63	0.86

Tabla 4.2. Altura de olas promedio Cuadratura

Sábado 14 Marzo 2020	E1	E2	E3	E4
Cuadratura	0.38	0.58	0.38	0.50
	0.34	0.60	0.36	0.53
	0.28	0.52	0.36	0.78
	0.30	0.53	0.44	0.66
	0.29	0.63	0.48	0.68
	0.34	0.67	0.39	0.70
	0.36	0.63	0.47	0.83
	0.31	0.59	0.48	0.58
	0.31	0.76	0.46	0.75
	0.32	0.72	0.44	0.73
PROMEDIO	0.32	0.62	0.43	0.68

Tabla 4.3. Altura de las olas al cuadrado para Sicigia y Cuadratura

	Cuadratura	Sicigia
Promedio de Hb (m)	0.51	0.69
Promedio Total de todas las campañas (m)	0.60	
Hb ²	0.36	

Se obtuvo el transporte neto de sedimentos mediante el método empírico de Galvin obteniendo así un valor de $Q = 5.95 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{año}$.

$$Q = 1.646 \times 10^6 * Hb^2$$

$$Q = (1.646 \times 10^6) (0.60)^2 = 5.95 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{año}.$$

TRANSPORTE LITORAL (METODO DE CERC)

ESTACIÓN 1 (CUADRATURA)

$$\frac{V}{V_o} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * \ln \frac{X}{W}$$

Tabla 4.4. Valores de mediciones de campo 14/03/2020

X	59	[m]
W	94	[m]
V _{leo}	0.12	[m/s]
H _{sb}	0.32	[m]

V/V _o	0.33426057
------------------	------------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{V_o} \right)}$$

Pls	138.11	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)ga'} P_{ls}$$

Q	487.06	m^3/dia
---	--------	---------

ESTACIÓN 2 (CUADRATURA)

$$\frac{V}{V_o} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * \ln \frac{X}{W}$$

Tabla 4.5 Valores de mediciones de campo 14/03/2020

X	87	[m]
W	99	[m]
Vleo	0.11	[m/s]
Hsb	0.62	[m]

V/Vo	0.2568321
------	-----------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{V_o} \right)}$$

Pls	336.23	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)ga'} P_{ls}$$

Q	1185.71	m^3/dia
---	---------	---------

ESTACIÓN 3 (CUADRATURA)

$$\frac{V}{V_o} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * \ln \frac{X}{W}$$

Tabla 4.6. Valores de mediciones de campo 14/03/2020

X	60	[m]
W	69	[m]
Vleo	0.15	[m/s]
Hsb	0.42	[m]

V/Vo	0.2558296
------	-----------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{V_o} \right)}$$

Pls	217.32	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho) g a'} P_{ls}$$

Q	766.38	m^3/dia
---	--------	---------

ESTACIÓN 4 (CUADRATURA)

$$\frac{V}{V_o} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * \ln \frac{X}{W}$$

Tabla 4.7. Valores de mediciones de campo 14/03/2020

X	40	[m]
W	55	[m]
Vleo	0.19	[m/s]
Hsb	0.67	[m]

V/Vo	0.3108189
------	-----------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{V_o} \right)}$$

Pls	288.10	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho) g a'} P_{ls}$$

Q	1015.99	m^3/dia
---	---------	---------

ESTACIÓN 1 (SICIGIA)

$$\frac{V}{V_o} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * \ln \frac{X}{W}$$

Tabla 26. Valores de mediciones de campo 7/03/2020

X	26	[m]
W	67	[m]
Vleo	0.16	[m/s]
Hsb	0.62	[m]

V/Vo	0.3398897
------	-----------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{V_o} \right)}$$

Pls	250.10	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho) g \alpha'} P_{ls}$$

Q	881.97	m^3/dia
---	--------	---------

ESTACIÓN 2 (SICIGIA)

$$\frac{V}{V_o} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * \ln \frac{X}{W}$$

Tabla 27 Valores de mediciones de campo 7/03/2020

X	70	[m]
W	91	[m]
Vleo	0.22	[m/s]
Hsb	0.65	[m]

V/Vo	0.2979447
------	-----------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{V_o} \right)}$$

Pls	558.60	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)ga'} P_{ls}$$

Q	1969.92	m^3/dia
---	---------	---------

ESTACIÓN 3 (SICIGIA)

$$\frac{V}{Vo} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * ln \frac{X}{W}$$

Tabla 28. Valores de mediciones de campo 7/03/2020

X	36	[m]
W	79	[m]
Vleo	0.10	[m/s]
Hsb	0.63	[m]

V/Vo	0.3468546
------	-----------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{Vo}\right)}$$

Pls	183.52	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)ga'} P_{ls}$$

Q	647.18	m^3/dia
---	--------	---------

ESTACIÓN 4 (SICIGIA)

$$\frac{V}{V_o} = 0.2 \frac{X}{W} - 0.714 \frac{X}{W} * \ln \frac{X}{W}$$

Tabla 29. Valores de mediciones de campo 7/03/2020

X	39	[m]
W	49	[m]
Vleo	0.18	[m/s]
Hsb	0.86	[m]

V/Vo	0.2888998
------	-----------

$$P_{ls} = \frac{\rho g H_{sb} w v_{LEO} C_F}{\frac{5\pi}{2} \left(\frac{V}{V_o} \right)}$$

Pls	335.80	J/m*s
-----	--------	-------

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho) g a'} P_{ls}$$

Q	1184.21	m^3/dia
---	---------	---------

APÉNDICE D

Evidencias correspondientes a las campañas de medición



Medición de pendiente de playa



Características Litorales