

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Marítima y Ciencias del Mar

Estudio del oleaje de aguas profundas a someras integrando los modelos computacionales SWAN y SWASH mediante la comparación de datos in-situ e imágenes satelitales.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera Oceanográfica

Presentado por:

Dayanna Lissette Reyes Bailón

Katty Zobeida Vilela Aguilar

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia pues siempre han estado a mi lado dándome ánimos, apoyo y cariño. A Damara y Daniela por su invaluable amistad, a mis soquetes que me han acompañado a lo largo de este camino. A Lucky que, aunque ya no está presente, me acompañó todas las noches y madrugadas, aunque más veces dormido que despierto. Y a mi compañera y amiga Katty, ¡Lo logramos!

Dayanna Reyes Bailón.

A mi madre Zoila Aguilar, por el apoyo incondicional a lo largo mi carrera universitaria. A mi familia por su comprensión, son mi orgullo y quienes me motivan a seguir adelante. Gracias por confiar en mí. A mi amiga y compañera Dayanna por formar parte de este logro. A mis compañeros y amigos, quienes compartieron su conocimiento y gratos momentos, a todas las personas que de una u otra manera me ayudaron y apoyaron durante mi vida universitaria. A todos ellos, les dedico con mucho cariño este proyecto.

Katty Vilela Aguilar.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por brindarnos la fortaleza y sabiduría para culminar esta etapa, a nuestras familias por el apoyo incondicional, a los amigos que conocimos en este camino, por su cariño y soporte, a Julio y Elisa por brindar siempre su apoyo, y en especial a Josué por estar pendiente de nosotras a pesar de la distancia.

A nuestros maestros por su paciencia, enseñanzas y pautas para culminar este hermoso y gratificante viaje por ESPOL. Y a nuestro tutor M. Sc. Iván Saltos por su guía durante la realización del proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Dayanna Lissette Reyes Bailón* y *Katty Zobeida Vilela Aguilar* 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”



Dayanna Lissette Reyes
Bailón



Katty Zobeida Vilela
Aguilar

EVALUADORES

Luis Miguel Altamirano Pérez

PROFESOR DE LA MATERIA

Iván Marcelo Saltos Andrade

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las ondas que se generan aleatoriamente en aguas profundas debido a la transferencia de energía entre el viento y la superficie del mar se definen como oleaje. Caracterizar las ondas que arriban a la costa es fundamental para el desarrollo y manejo de estas. Este trabajo estudia la transformación del oleaje desde aguas profundas a someras mediante la integración de 2 modelos computacionales, comparando estadísticamente el ajuste de sus resultados con datos in situ e imágenes satelitales. Se usó el modelo SWAN para simular el oleaje en aguas profundas e intermedias luego se anidó el modelo SWASH en aguas someras en la playa de San Pedro. Se validaron los resultados de SWAN vs. olígrafo (ADCP) con los estadísticos: R, RMSE, Bias e IA; SWASH vs. Hsig de las salidas de campo. La dirección de oleaje para ambos modelos fue comparada con los trenes de onda vectorizados de la imagen Sentinel 2A. Los resultados estadísticos entre SWAN y el olígrafo mostraron una correlación moderada para la altura y período con valores de 0.58 y 0.61 respectivamente, los demás estadísticos tuvieron un ajuste aceptable. Para SWASH se obtuvo un error menor al 10% entre los resultados y los datos en campo. La comparación de los trenes de onda de la imagen satelital con la dirección de oleaje en ambos modelos tuvo un ajuste aceptable. Existe una buena integración entre los modelos utilizados, por lo que el estudio es replicable en otras zonas costeras, sin embargo, es necesario disponer de datos con buena resolución espacial y temporal, los cuales deben estar asociados a un buen registro y procesamiento, caso contrario se compromete la calidad de los resultados ya que el proceso de validación es fundamental.

Palabras Clave: SWAN, SWASH, altura significativa, modelamiento de oleaje.

ABSTRACT

Waves are randomly generated in deep water due to the transfer of energy between the wind and the sea surface. Characterizing the waves that arrive at the coast is essential for their development and management. This project studies the transformation of waves from deep to shallow waters through the integration of 2 computational models, statistically comparing the adjustment of their results with in-situ data and satellite images. The SWAN model was used to simulate the waves in deep and intermediate waters, then the SWASH model was nested in shallow waters at San Pedro beach. The results of SWAN vs. ADCP with statistics: R, RMSE, Bias and IA; SWASH vs. Hsig of the field measurement data. The wave direction for both models was compared with the vectorized wave trains from the Sentinel 2A image. Statistical results between SWAN and ADCP showed a moderate correlation for height and period with values of 0.58 and 0.61 respectively, the other statistics had an acceptable adjustment. For SWASH, an error of less than 10% was obtained between the results and the field data. The comparison of the wave trains of the satellite image with the wave direction in both models had an acceptable adjustment. There is good integration between the models used, therefore the study is replicable in other coastal areas, however, it is necessary to have data with good spatial and temporal resolution, which must be associated with good registration and processing, Otherwise, the quality of the results is compromised since the validation process is fundamental.

Keywords: SWAN, SWASH, significant wave height, wave modelling.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Modelos numéricos para el estudio de ondas marinas	2
1.4.2 Parámetros estadísticos.....	8
1.5 Área de estudio.....	9
1.5.1 Características meteorológicas	10
1.5.2 Características morfológicas	11
1.5.3 Características hidrodinámicas	12
CAPÍTULO 2.....	14
2. Metodología	14
2.1 Fase 1: Recopilación de información.....	16
2.2 Fase 2: Generación de archivos de entrada SWAN	17
2.2.1 Malla y Batimetría.....	18
2.2.2 Condiciones de frontera	18

2.2.3	Obstáculos	19
2.3	Fase 3: Calibración y validación de SWAN.....	19
2.3.1	Calibración	19
2.3.2	Validación de los resultados de SWAN	20
2.4	Fase 4: Generación de archivos de entrada SWASH.....	23
2.4.1	Topo-batimetría	23
2.4.2	Condiciones de frontera	24
2.4.3	Rugosidad	24
2.4.4	Meteorología Condiciones iniciales.....	25
2.5	Fase 5: Calibración y validación de SWASH	25
2.5.1	Calibración	25
2.5.2	Validación.....	26
CAPÍTULO 3.....		28
3.	Resultados Y ANÁLISIS.....	28
3.1	Resultados SWAN vs. Olígrafo.....	28
3.2	Resultados SWAN vs. Imagen satelital.....	35
3.3	Resultados SWASH vs. Datos de campo	38
3.4	Resultados SWASH vs. Imagen satelital	42
3.5	Aplicaciones.....	43
3.6	Análisis de costos	46
CAPÍTULO 4.....		48
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	48
4.1	Conclusiones	48
4.2	Recomendaciones	49
BIBLIOGRAFÍA		52
APÉNDICES		55

ABREVIATURAS

ADCP	Acoustic Current Profiler.
AWAC	Acoustic Wave and Current Profiler.
B	BIAS o sesgo.
CENAIM	Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas.
CMEMS	Copernicus Marine Environmental Monitoring Service.
DEM	Modelo Digital de Elevación.
ERDDAP	Environmental Research Division's Data Access Program.
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral.
FIMCM	Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar.
GDAS	Global Data Assimilation System.
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans.
GFS	Global Forecast System.
IA	Índice de ajuste.
INOCAR	Instituto Oceanográfico de la Armada.
LTA	Non-linear triad interactions.
NMM	Nivel Medio del Mar.
NOAA	National Ocean Atmospheric Administration.
NCEP	National Center for Environmental Prediction.
R	Coeficiente de correlación.
RAM	Random Access Memory.
RMSE	Error medio cuadrático.
SIPA	Sistema de Información Pública Agropecuaria del Ecuador.
SWAN	Simulating Waves Nearshore.
SWASH	Simulating Waves till Shore.
WWIII	WAVEWATCH III.

SIMBOLOGÍA

°	Grados.
Δx	Subdivisiones en el eje x.
Δy	Subdivisiones en el eje y,
DIR	Dirección.
GB	Gigabytes.
Hsig	Altura significativa.
H	Altura.
Lat	Latitud.
Long	Longitud
km	Kilómetros.
m	Metro.
m/s	Metros por segundo.
N°	Número.
T	Período.
s	Segundos.
u	Componente meridional del viento.
v	Componente zonal del viento.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelos que promedia la fase de onda. Fuente: (De Ridder, 2018).	4
Figura 1.2 Modelos que resuelve la fase de onda. Fuente: (De Ridder, 2018).	6
Figura 1.3 Integración de SWAN y SWASH. Fuente: (Rijnsdorp, 2016)	8
Figura 1.4 Dominio de SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).	10
Figura 1.5 Dirección y velocidad de viento en aguas profundas. Fuente: (Autoras, 2022)	11
Figura 1.6 Morfología Valdivia – San Pedro – Ayañgue. Fuente: (Ayon, Boothroyd, Robadue, Visconez, & Noboa, 1994).....	12
Figura 1.7 Rosas de oleaje aguas profundas. a) Período y dirección. b) Altura y dirección. Fuente: (Autoras, 2022).	13
Figura 2.1 Fases de la metodología del proyecto. Fuente: (Autoras, 2022).	14
Figura 2.2 Variables y fechas de validación, SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).	15
Figura 2.3 Puntos de validación, SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).	15
Figura 2.4 Dominio de datos globales para calibración y puntos de validación. Fuente: (Autoras, 2022)	17
Figura 2.5 a) Malla y b) batimetría, obtenido de Delft DashBoard. Fuente: (Autoras, 2022).	18
Figura 2.6 Proceso de validación 19 enero – 19 febrero 2019. Fuente: (Autoras, 2022)	21
Figura 2.7 Proceso validación 1 de marzo 2019. Fuente: (Autoras, 2022).	21
Figura 2.8 Proceso etapa C. Fuente: (Autoras, 2022).	22
Figura 2.9 Modelo de terreno Topo batimétrico. Fuente: (Autoras, 2022)	23
Figura 2.10 Esquema malla de cálculo y condiciones de frontera. Fuente: (Autoras, 2022).	24
Figura 2.11 Coeficientes rugosidad. Fuente: (Autoras, 2022).	25
Figura 3.1 Rosa de oleaje a partir de los datos del olígrafo para; a) Dirección vs Altura significativa, b) Dirección vs Período. Fuente: (Autoras, 2021).	28
Figura 3.2 Rosas de oleaje obtenidas con SWAN. a) Dirección y Altura significativa, b) Dirección y Período para SWAN. Fuente: (Autoras, 2021).	29

Figura 3.3 Serie de tiempo de altura significativa Ológrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).....	30
Figura 3.4 Diagrama de dispersión Altura significativa Ológrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).	31
Figura 3.5 Serie de tiempo de período Ológrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).	31
Figura 3.6 Diagrama de dispersión Período Ológrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).....	32
Figura 3.7 Serie de tiempo de Dirección Ológrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).	32
Figura 3.8 Diagrama de dispersión Dirección Ológrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).....	33
Figura 3.9 Rosa de Oleaje obtenidas con SWAN. a) Altura significativa y dirección. b) Período y dirección. Fuente: (Autoras, 2022).	35
Figura 3.10 Mapas ráster. a) Altura significativa. b) Dirección. c) Período. Fuente: (Autoras, 2022).	36
Figura 3.11 Trenes de onda vs. Dirección de onda SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).	37
Figura 3.12 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 5 m. Fuente: (Autoras, 2022).	38
Figura 3.13 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 2 m. Fuente: (Autoras, 2022).	39
Figura 3.14 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 10 m. Fuente: (Autoras, 2022).	40
Figura 3.15 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 25 m. Fuente: (Autoras, 2022).	41
Figura 3.16 Trenes de ondas de la imagen satelital vs. Trenes de SWASH. Fuente: (Autoras, 2022)	43
Figura 3.17. Comparación de Altura significativa vs alcance máximo horizontal. Fuente: (Autoras, 2022)	44
Figura 3.18 Simulación de batería de espigones. Fuente: (Autoras, 2022)	45
Figura 3.19 Simulación de rompeolas en T. Fuente: (Autoras, 2022).....	45
Figura 3.20 Simulación de rompeolas paralelos. Fuente: (Autoras, 2022)	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tabla comparativa SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).	7
Tabla 2.1 Descripción parámetros de calibración SWAN. Simulación 19 enero – 19 febrero 2019. Fuente: (Autoras, 2022).	19
Tabla 2.2 Descripción de parámetros de calibración SWAN. Simulación 1 de marzo 2019. Fuente: (Autoras, 2022).	20
Tabla 2.3 Descripción de parámetros de calibración SWASH. Simulación 1 de marzo 2019. Fuente: (Autoras, 2022).	26
Tabla 2.4 Detalle salidas de campo. Fuente: (Autoras, 2022).	27
Tabla 3.1 Descripción estadística de los datos para el olígrafo. Fuente: (Autoras, 2021).	29
Tabla 3.2 Descripción estadística de los datos para SWAN. Fuente: (Autoras, 2021).	30
Tabla 3.3 Resumen de estadísticos para las variables de interés entre el modelo y el olígrafo. Fuente: (Autoras, 2022).	34
Tabla 3.4 Resumen de estadísticos descriptivos SWAN vs. Imagen Satelital. Fuente: (Autoras, 2022).	38
Tabla 3.5 Resultados de Hsig de salida de campo vs. diferentes resoluciones de malla. Fuente: (Autoras, 2022).	41
Tabla 3.6 Resumen de errores relativos para las diferentes resoluciones de malla. Fuente: (Autoras, 2022).	42
Tabla 3.7 Costos de los elementos usados en la realización del proyecto. Fuente: (Autoras, 2022)	47

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Conocer la dinámica del clima marino es primordial para el buen desarrollo y manejo de las costas. En Ecuador, disponer de datos de oleaje in-situ es escaso, subjetivo y discontinuo en escala espacial y temporal. La logística asociada a la creación y manejo de estaciones de monitoreo está ligada a factores como inversión de recursos económicos y humanos para el levantamiento, recolección y obtención de datos, y así también la adquisición y mantenimiento de equipos, dentro de este contexto el modelamiento numérico representa una herramienta que permite cuantificar variables esenciales en la zona costera.

En la actualidad el uso de modelos numéricos computacionales predictivos para el estudio de la propagación de ondas marinas no incluye todos los procesos que ocurren en la zona de surf, en el desarrollo de los modelos se suelen hacer simplificaciones dado que la comprensión de ciertos procesos es limitada, por ende, se suele arrastrar un error, el mismo que no siempre es despreciable. Por lo que, la efectividad de los modelos está ligada al proceso de calibración, pues de otra forma los resultados de este pueden resultar inexactos, imprecisos y contraproducentes. Por otra parte, la confiabilidad del modelo reposa en el proceso de validación el mismo que se efectúa de acuerdo con la disponibilidad de información del sitio a estudiar.

De acuerdo con lo antes mencionado se evalúa la disponibilidad de los datos históricos y remotos, por lo que este trabajo se aplica a la comuna San Pedro en la provincia de Santa Elena.

1.2 Justificación del problema

En Ecuador se usa el modelo SWAN para el área de pronósticos de oleaje, el cual simula el territorio marítimo ecuatoriano y la región insular, con una resolución aproximada de 1 km (INOCAR, 2022); al ser un modelo espectral recrea de manera

eficiente el comportamiento del oleaje en aguas profundas e intermedias. Sin embargo, en zonas costeras con poca profundidad recrear este comportamiento es un desafío, ya que toman relevancia procesos asociados a la interacción con el fondo y la presencia de corrientes (Cavaleri, y otros, 2018), lo que sugiere trabajar estas zonas con modelos más eficientes como SWASH que permite tener predicciones más acertadas a nivel local.

Esta investigación integra los modelos SWAN y SWASH para caracterizar el clima de oleaje de la comuna San Pedro- Santa Elena, explorando diferentes fuentes de datos como modelos globales, olígrafo fondeados, observaciones litorales e imágenes satelitales para el proceso de calibración y validación, y a su vez determinar el ajuste de estos mediante un análisis estadístico para indicar si los resultados son acordes a la realidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar los resultados de la integración de los modelos computacionales SWAN y SWASH comparando con datos in-situ e imágenes satelitales con el fin de describir de manera confiable el comportamiento del oleaje en la zona costera.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Calibrar el modelo SWASH a partir de los resultados de SWAN (DELFT3D-WAVE).
2. Validar los resultados del modelo SWAN comparándolos con registros del Olígrafo mediante estadísticos descriptivos.
3. Determinar el error relativo del modelo SWASH comparándolos con datos de campo utilizando diferentes resoluciones de mallas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Modelos numéricos para el estudio de ondas marinas

Los modelos numéricos son herramientas indispensables para predecir mediante ecuaciones matemáticas el comportamiento de un fluido (Palemón, 2015). En este

estudio se utilizó modelos que promedian y resuelven la fase de ondas (SWAN y SWASH). A continuación, se detallan algunas de sus características principales.

1.4.1.1 SWAN

Es un modelo de olas de tercera generación el cual permite obtener estimaciones realistas de los parámetros de las olas en áreas costeras, lagos y estuarios a partir de condiciones dadas de viento, fondo y corrientes (The SWAN team, 2021). El modelo SWAN está basado en ecuaciones de balance de energía espectral: balance de acción espectral discreta, totalmente espectral (en todas las direcciones y frecuencias). Lo que implica que se pueden acomodar campos de ondas aleatorias de cresta corta que se propagan simultáneamente desde direcciones muy diferentes (ej., una mar de viento (sea) con oleaje superpuesto) (Deltares, 2018).

La densidad de acción $N(\sigma, \theta)$ se define en la ecuación 1.1, donde $E(\sigma, \theta)$ corresponde al espectro de varianza que distribuye la energía de las olas sobre las frecuencias (The SWAN team, 2021).

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1.1)$$

Cuya evolución es gobernada por la ecuación 1.2 para aplicaciones a pequeña escala, la ecuación de equilibrio de acción espectral puede expresarse en coordenadas cartesianas (The SWAN team, 2021), dadas por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial X} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1.2)$$

Donde la dirección de onda se denota como θ , el tiempo como t , la frecuencia de onda en radianes es σ , la coordenada transversal es x , la coordenada a lo largo de la costa es y ; la velocidad de propagación como c en x , y , y en el espacio espectral σ y θ . (P. A. & Behera, 2021).

El término S representa los procesos físicos de generación, disipación y redistribución de energía (Muliati, Lukman Tawekal, Wurjanto, Kelvin, & Setiyo

Pranowo, 2018) donde S_{in} representa la generación de olas por viento, S_{nl3} y S_{nl4} representa la transferencia no lineal de energía a través de 3 y 4 ondas, S_{ds} , representa la disipación de energía: $S_{ds,w}$ por whitecapping, $S_{ds,b}$ por fricción de fondo y $S_{ds,br}$ por rotura del oleaje (P. A. & Behera, 2021).

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (1.3)$$

Debido a sus características SWAN forma parte de los modelos que promedia la fase de onda, calculando la evolución de olas aleatorias de cresta corta en regiones costeras con aguas profundas, intermedias y poco profundas (Deltares, 2018). Así también corresponde a un modelo de gran escala, dado que su área de aplicación puede abarcar cientos de kilómetros.

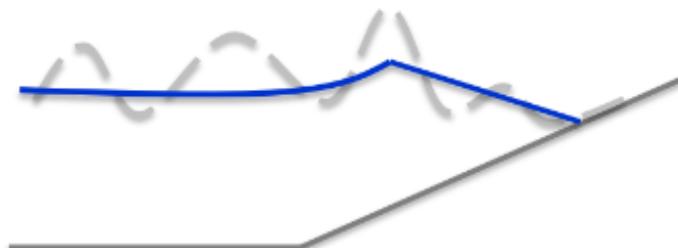


Figura 1.1 Modelos que promedia la fase de onda. Fuente: (De Ridder, 2018).

SWAN es capaz de reproducir varios fenómenos físicos. Algunos de estos se listan a continuación (The SWAN team, 2021):

- Propagación de ondas en el tiempo y el espacio, formación de bancos, refracción debido a la corriente y la profundidad, desplazamiento de frecuencia debido a las corrientes y la profundidad no estacionaria.
- Generación de olas por el viento.
- Interacciones de tres y cuatro ondas.
- Whitecapping, fricción de fondo y rotura inducida por profundidad.
- Disipación por vegetación acuática, flujo turbulento y lodo fluido viscoso.
- Configuración inducida por olas.

- Propagación desde el laboratorio hasta escalas globales.
- Transmisión a través y reflexión (especular y difusa) contra obstáculos.
- Difracción.

1.4.1.2 SWASH

Es un modelo numérico que permite describir las transformaciones de las olas desde el mar a la playa. Además del estudio de la dinámica de la zona de rompiente y zona de lavado, agitación de olas en puertos y bahías, y flujos rápidamente variados en agua poco profundas (The SWASH team, 2020). SWASH es una herramienta numérica de propósito general para simular flujos rotacionales no hidrostáticos de superficie libre y fenómenos de transporte en una, dos o tres dimensiones. El modelo está gobernado por las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas y los términos no hidrostáticos (Munita, 2020), esto último, permite al modelo incorporar la dispersión de frecuencia, la cual a su vez hace posible el cálculo de la transformación de las ondas hacia la costa (Suzuki, Bolle, & Verwaest, 2012). Se derivan en las ecuaciones incompresibles de Navier Stokes que comprenden la conservación de la masa y el momento (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011), como se muestra a continuación.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (1.6)$$

La ecuación 1.4 representa la conservación de la masa, mientras que las ecuaciones 1.5 y 1.6, representan el momento horizontal y vertical escrito de forma no conservativa. La capa de fluido puede tener un promedio de profundidad o varias

capas de manera que puede representar los gradientes verticales de presión no hidrostática (Kar, 2017).

Donde t es el tiempo, x e y están ubicados en el nivel de agua en reposo y el eje $z \uparrow$, $\zeta(t,x,y)$ corresponde a la elevación de la superficie con respecto al nivel de agua en reposo, $d(x,y)$ es la profundidad del agua, h es la profundidad total del agua y corresponde a la suma de ζ y d , $u(x,y,t)$ y $v(x,y,t)$ son las velocidades promediadas en profundidad en la dirección x e y respectivamente, $q(x,y,z,t)$ es el término de la presión no hidrostática, g la aceleración de la gravedad, c_f el coeficiente de fricción de fondo y T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} y T_{yy} corresponde al esfuerzo horizontal turbulento (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011).

Debido a sus características SWASH forma parte de los modelos que resuelven la fase de onda, proporcionando un modelo eficiente que permite replicar varias escalas de tiempo y espacio de ondas superficiales y flujos de aguas poco profundas en entornos complejos. Este modelo está limitado a áreas de interés de pequeña escala, especialmente aplicaciones costeras (The SWASH team, 2020).

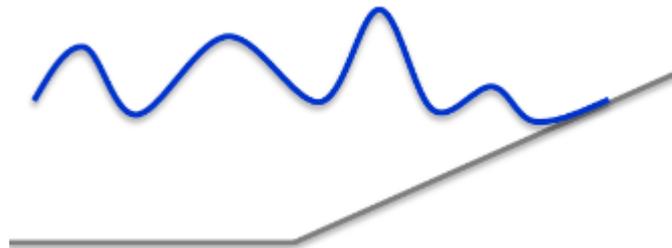


Figura 1.2 Modelos que resuelve la fase de onda. Fuente: (De Ridder, 2018).

SWASH reproduce fenómenos físicos relevantes en el diseño, construcción y manejo de ambientes costeros. Algunos de estos fenómenos se encuentran listados a continuación (The SWASH team, 2020):

- Propagación de ondas, dispersión de frecuencia, formación de bancos, refracción y difracción.
- Interacciones no lineales de onda a onda.

- Crecimiento de las olas de profundidad limitada por el viento.
- Ola rompiente.
- Runup y rundown.
- Interacción de las olas con estructuras.
- Interacción de olas con objetos flotantes.
- Interacción onda-corriente.
- Corrientes inducidas por ondas.
- Transporte de trazador.

Tabla 1.1 Tabla comparativa SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).

Modelo Características	SWAN	SWASH
Tipo	Promedia la fase	Resuelve la fase
Fórmula conceptual	Propagación espectral por superposición de ondas lineales	Ecuaciones no lineales de aguas poco profundas
Escalas de aplicación	Medio a gran escala	Pequeña escala
Mallas	Rectangular y curvilínea	Rectangular y curvilínea
Valor	Código abierto	Código abierto
Eficiencia computacional	Demanda de recursos computacionales baja	Demanda de recursos computacionales media

1.4.1.3 Integración de los modelos SWAN y SWASH

Recurrir a la anidación de ambos modelos permite obtener resultados precisos y de alta resolución con un menor costo computacional (Enríquez A. , Marcos, Álvarez-Ellacuría, Orfila, & Gomis, 2016), como se ilustra en la siguiente imagen.

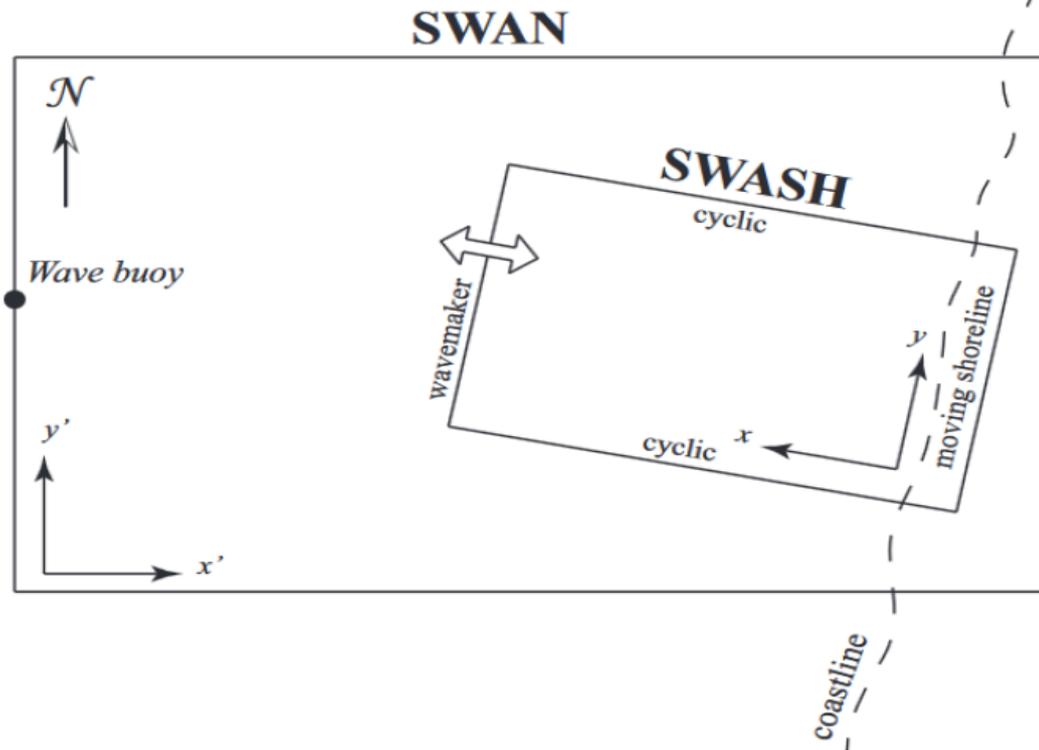


Figura 1.3 Integración de SWAN y SWASH. Fuente: (Rijnsdorp, 2016)

Por un lado, SWAN permite realizar simulaciones en áreas relativamente grandes, describiendo de manera factible el comportamiento de las ondas que se acercan a la costa y SWASH por otro lado, al estar restringida a pequeñas áreas y resolver sistemas de ecuaciones para aguas someras admite como datos de entrada las salidas de la transformación de oleaje del modelo SWAN.

1.4.2 Parámetros estadísticos

La correlación lineal define la asociación entre 2 variables, en este caso las observaciones y los valores del modelo, puede tomar valores entre -1 y 1 . Cuando el valor de correlación es muy alto y positivo sugiere que la predicción reproduce la tendencia de las observaciones, mientras que si es 0 no existe relación entre ellas, el signo indica la dirección de la asociación. (Willmott, y otros, 1985)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 (O_i - \bar{O})^2}}$$

(1.7)

El BIAS es la diferencia media entre las predicciones del modelo y observaciones define la tendencia de los resultados, es decir evalúa si se sobreestima o subestima el parámetro analizado. (Butunoiu & Rusu, 2012)

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (1.8)$$

El RMSE indica la exactitud entre los datos y se define como las diferencias en la desviación estándar entre las predicciones y las observaciones del modelo. (Butunoiu & Rusu, 2012)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1.9)$$

El IA se define como una estimación estándar del grado de error de las predicciones del modelo, fue definido por Willmott (1981). El valor varía entre 0 y 1, siendo 0 la ausencia de coincidencia y 1 un ajuste perfecto. (Willmott, y otros, 1985)

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1.10)$$

Donde 'n' es el número de datos, P_i las estimaciones del modelo, O_i las observaciones, \bar{P} y \bar{O} representan los valores promedios para el modelo y las observaciones respectivamente.

1.5 Área de estudio

La provincia de Santa Elena en Ecuador tiene una extensión de 3.691 km² aproximadamente (Secretaria Nacional de Planificación, 2015). Limita con las provincias de Manabí al norte y Guayas al este y sur, mientras que al oeste con el Océano Pacífico, al ser una provincia costera presenta una alta afluencia de turistas por lo que ha logrado un importante desarrollo comercial.

Este proyecto contempla la bahía de Santa Elena como dominio para el modelo SWAN y comuna San Pedro como dominio del modelo SWASH.

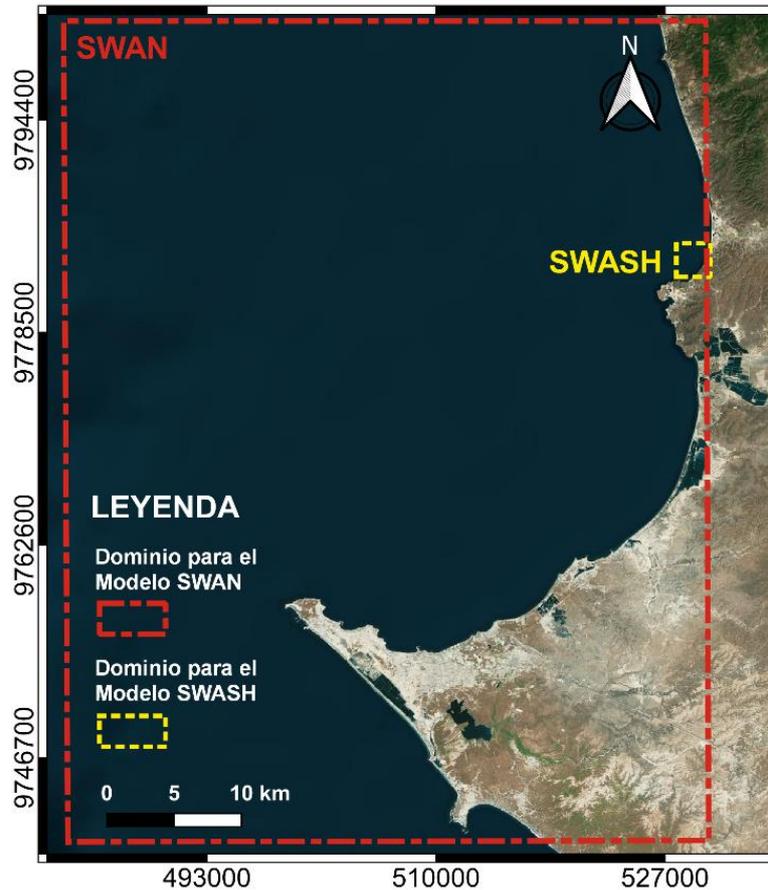


Figura 1.4 Dominio de SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).

La comuna San Pedro forma parte de la parroquia rural Manglaralto, perteneciente a la provincia de Santa Elena. Limita al norte con las comunas de Valdivia, al sur con Ayangué, al este con Sinchal-Barcelona y Manantial de Colonche, y al oeste con el Océano Pacífico (Aguirre, Benavides, & Jara, 2012).

1.5.1 Características meteorológicas

En la región el clima es tropical húmedo con una temperatura media anual que oscila entre 23°C – 25°C. influenciado en la zona central por la Cordillera Chongón Colonche (GAD Parroquial Manglaralto, 2018). Por otro lado, las precipitaciones son escasas causando que la mayoría del suelo de Santa Elena sea estéril con promedios de precipitación anuales menores a 300mm (INOCAR, 2015).

En cuanto a los vientos, las series temporales presentadas en estudios previos muestran patrones con valores entre 2.9 – 4.2 m/s con direcciones predominantes en el cuadrante suroeste (Andrade & Maquilón, 2019). A continuación, se muestra la rosa de viento obtenida para el período de tiempo 1996-2018 para la boya de WAVEWATCH III más cercana a San Pedro.

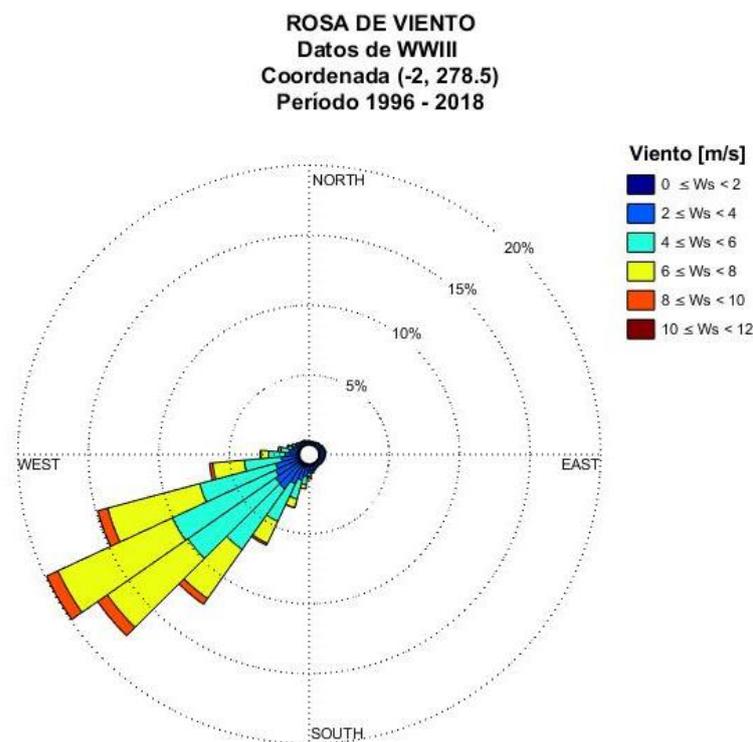


Figura 1.5 Dirección y velocidad de viento en aguas profundas. Fuente: (Autoras, 2022)

1.5.2 Características morfológicas

De acuerdo con el trabajo realizado por Ayón (1994), la zona de San Pedro se caracteriza por tener presencia de acantilados altos y bajos, y playas de barrera frente a sus costas (Ayón, Boothroyd, Robadue, Visconez, & Noboa, 1994). Otros estudios mencionan que la playa recibe aporte de sedimentos debido al acantilado con aparición de rocas en ciertos períodos del año (Ruiz, 2002).

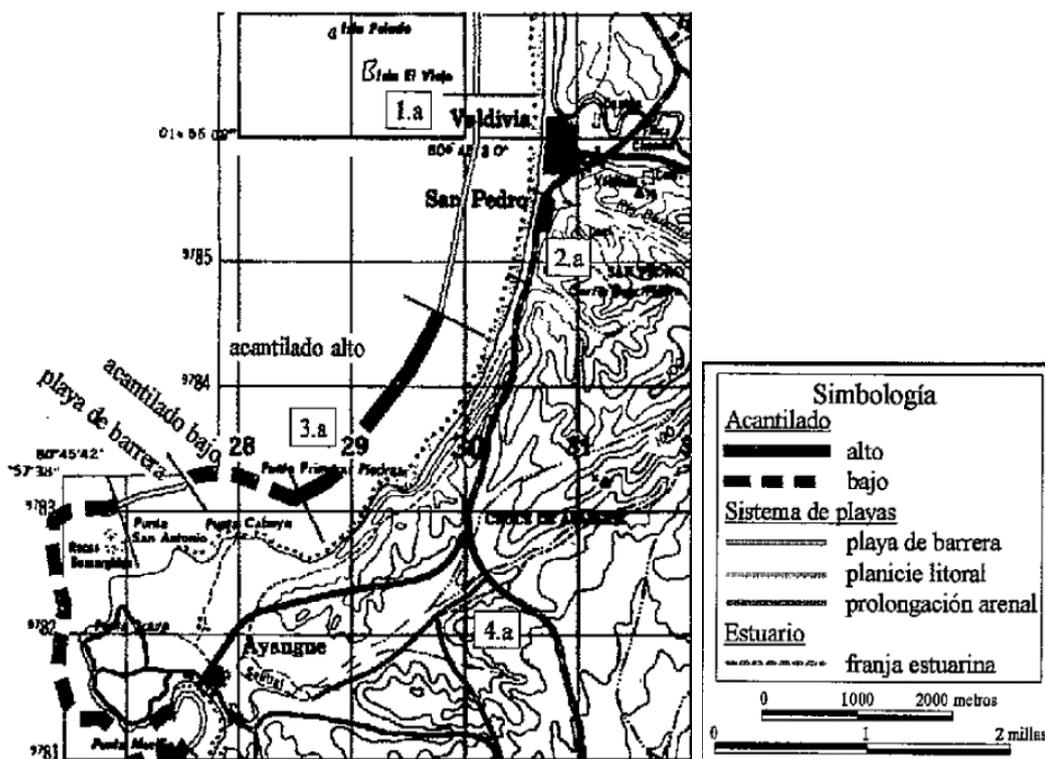


Figura 1.6 Morfología Valdivia – San Pedro – Ayungue. Fuente: (Ayon, Boothroyd, Robadue, Visconez, & Noboa, 1994)

1.5.3 Características hidrodinámicas

La circulación en los sectores de la costa es influenciada principalmente por el viento, mareas y batimetría del área. Respecto a las corrientes, según un estudio realizado por INOCAR realizado en el año 2008 se tiene que para la zona de Monteverde - Santa Elena en época húmeda con una velocidad máxima de 0.33 m/s durante el flujo y 0.29 m/s para el refluo (INOCAR, 2015).

Las costas del Ecuador se tiene un régimen de mareas semidiurnas. El oleaje es predominante del Suroeste y Oeste de abril a octubre, también recibe oleaje del Norte y Noroeste de manera no recurrente en los meses de diciembre a marzo (INOCAR, 2015). A continuación, se muestran las rosas de oleaje para altura y período obtenidas para los años 1996 al 2018 para la boya de WAVEWATCH III más cercana a San Pedro.

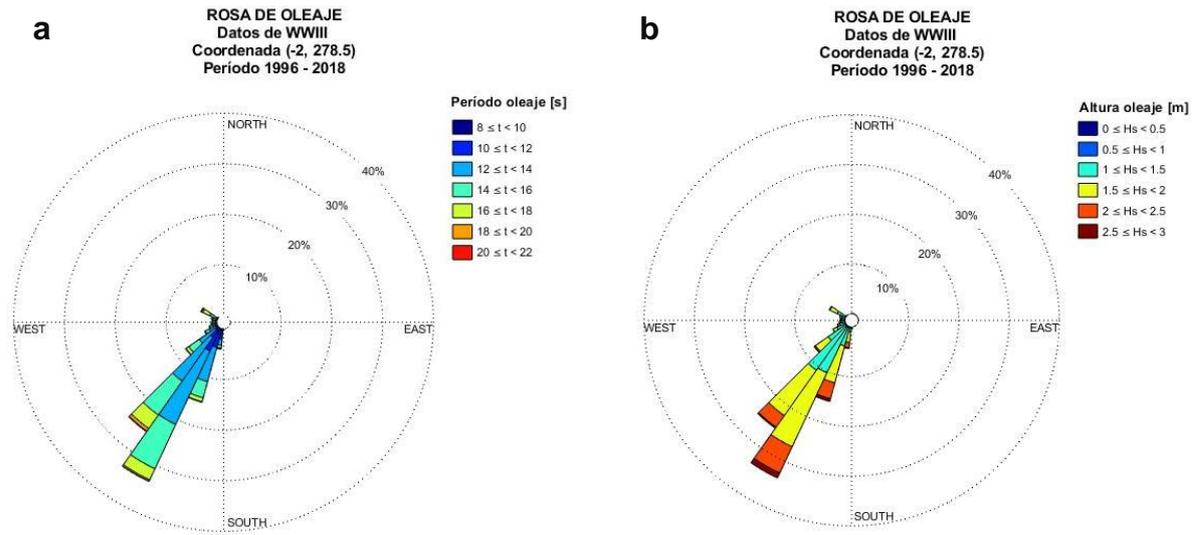


Figura 1.7 Rosas de oleaje aguas profundas. a) Período y dirección. b) Altura y dirección. Fuente: (Autoras, 2022).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se explica la metodología aplicada para el proyecto, asimismo se detallan las fases establecidas y la información necesaria para cada una de ellas. En el siguiente esquema se explica de manera gráfica la secuencia ordenada de las fases del proyecto.

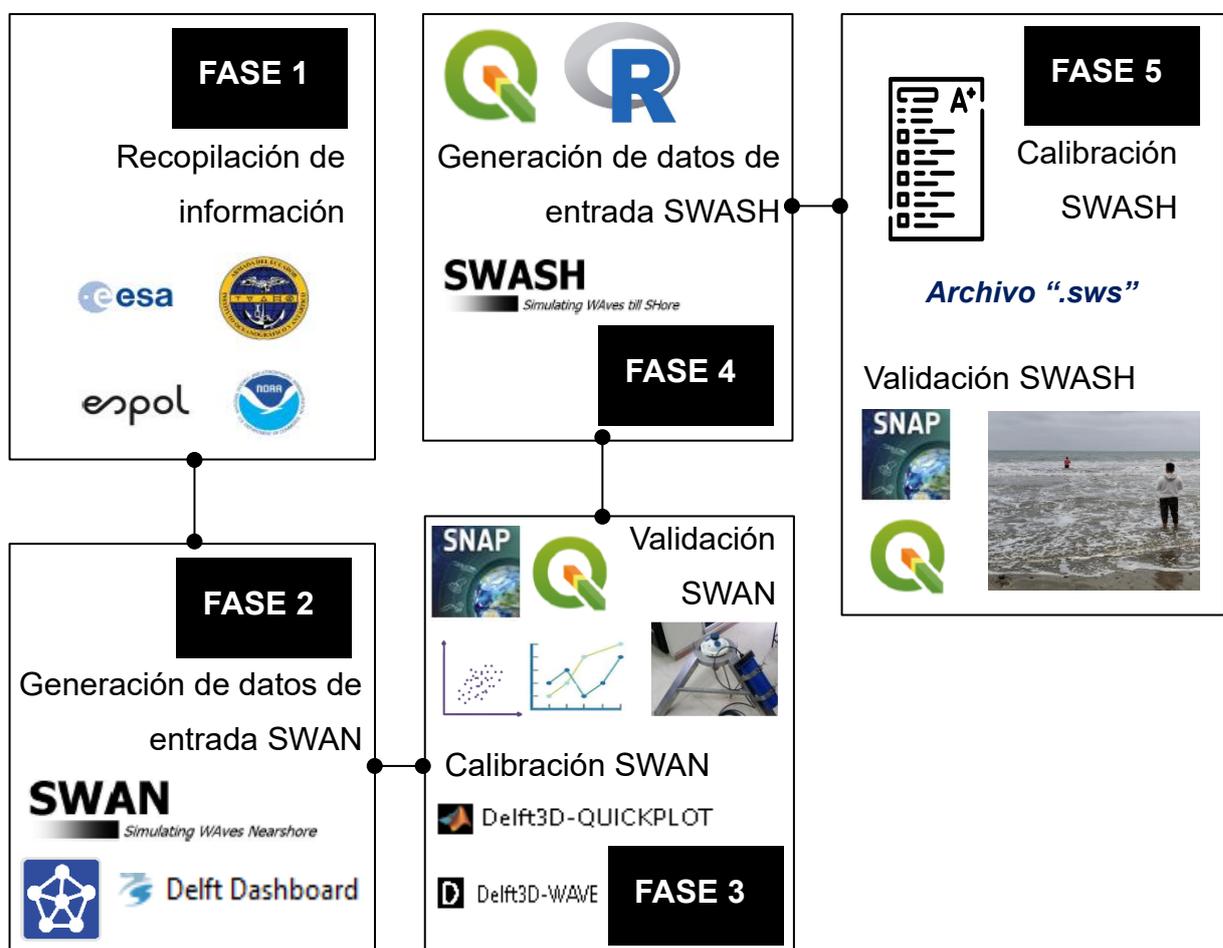


Figura 2.1 Fases de la metodología del proyecto. Fuente: (Autoras, 2022).

En este punto es importante mencionar que las validaciones se realizaron acorde con la disponibilidad de datos, a continuación, se muestran los esquemas con las variables, fechas y puntos utilizados para la validación:

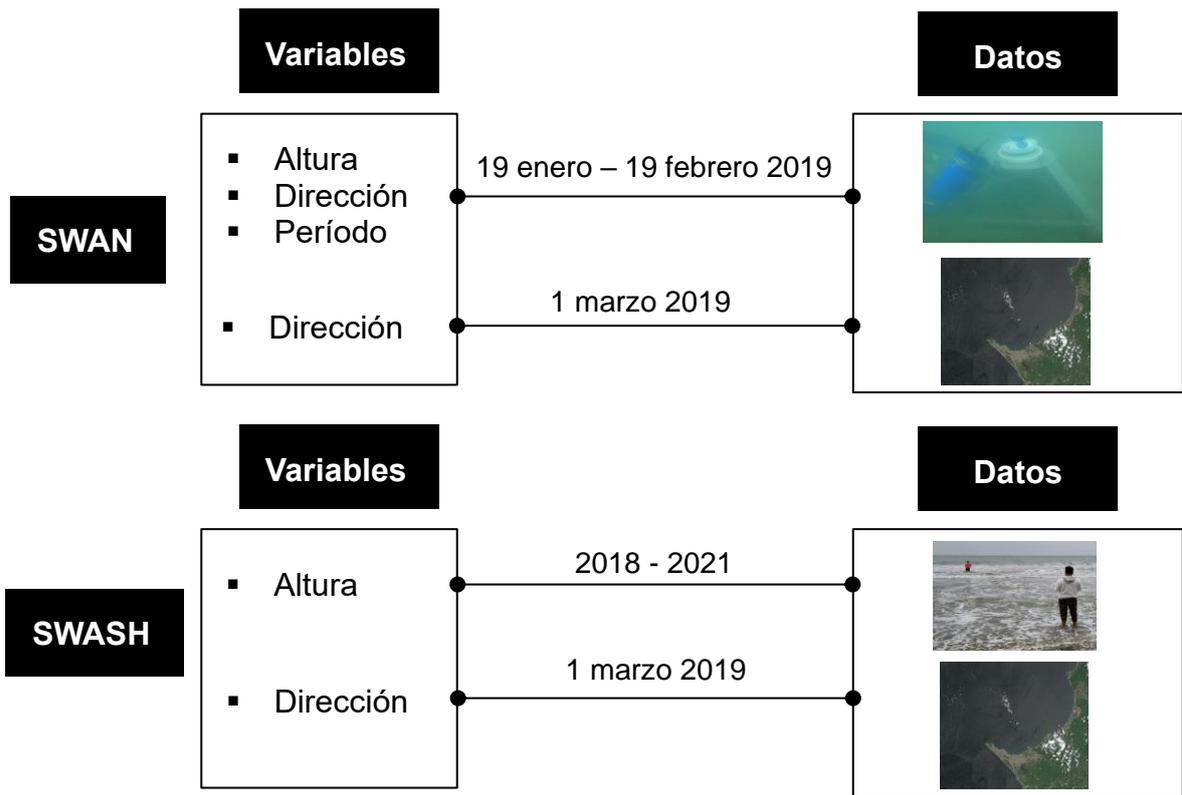


Figura 2.2 Variables y fechas de validación, SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).

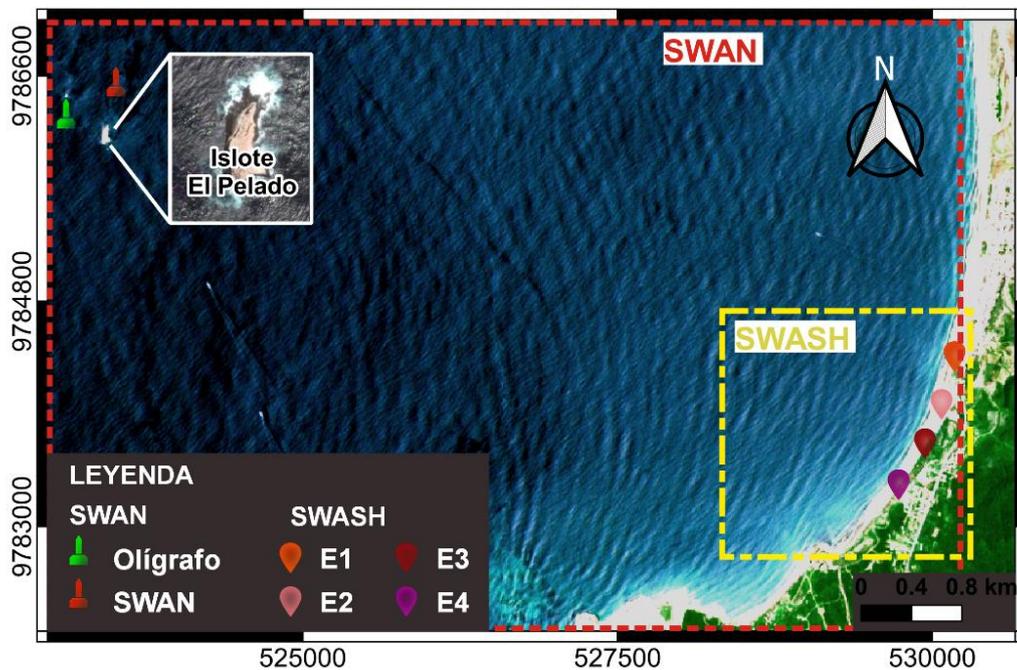


Figura 2.3 Puntos de validación, SWAN y SWASH. Fuente: (Autoras, 2022).

2.1 Fase 1: Recopilación de información

A continuación, se detallan las bases de datos de acceso libre utilizadas para la recopilación de información.

WAVEWATCH III: Se accedió a esta base de datos desde la página **ERDDAP**, extrayendo resultados para el punto lat -2° , long 278.5° , (ver Figura 2.4). Se descargó información de dirección, período y altura significativa de ola; asimismo se obtuvieron los datos para velocidad y dirección de viento. Esta base de datos contiene información de aguas profundas.

INOCAR: Se utilizaron los datos registrados por mareógrafos instalados en distintos puntos de monitoreo, para mareas para este caso Monteverde, también se utilizó el factor de corrección para nivel medio del mar correspondiente a la península de Santa Elena. Además, se utilizaron las cartas náuticas CN_GEO_IOA1051_1ED_28112005 y CN_GEO_IOA105_2ED_30042012 (ver Apéndice A) para la digitalización de batimetría como dato de entrada.

ESPOL: Se utilizaron 3 fuentes de datos:

- Características litorales: Datos de altura rompiente de salidas de campo en los años 2018, 2019 y 2021 para las cuatro estaciones de monitoreo ubicadas en la comuna San Pedro – Santa Elena.
- Olígrafo: Datos de altura, dirección y período para el 19 de enero – 19 de febrero 2019 recolectada por el ADCP (AWAC Nortek) fondeado a una profundidad de 10 m frente al Islote El Pelado, ver Figura 2.3.
- Batimetría: Levantada en el año 2019 en San Pedro. (ver Apéndice C)

GLOBAL FORECAST PHY_001_024: Se accedió a la base de datos desde la página web de Copernicus Marine Service (**CMEMS**) para obtener valores de salinidad, temperatura y anomalía del nivel del mar.

NCEP GDAS/FNL Global Surface Flux Grids: Estos archivos equivalentes a los históricos del modelo GFS de pronóstico, se utilizó esta base de datos para obtener

archivos ráster con el valor de presión en la columna de agua y para velocidad de viento local (u , v).

FROMM: Se utilizaron los datos del modelo de cobertura de suelo de la Universidad de Tsinghua “Finer Resolution Observation and Monitoring – Global Land Cover” para obtener los datos de rugosidad en la zona de la comuna San Pablo.

Copernicus Open Access Hub: Se descargaron cuatro imágenes satelitales ópticas Sentinel 2A, para la fecha 1 de marzo de 2019. Se hizo uso de las bandas espectrales 2, 3 y 4.

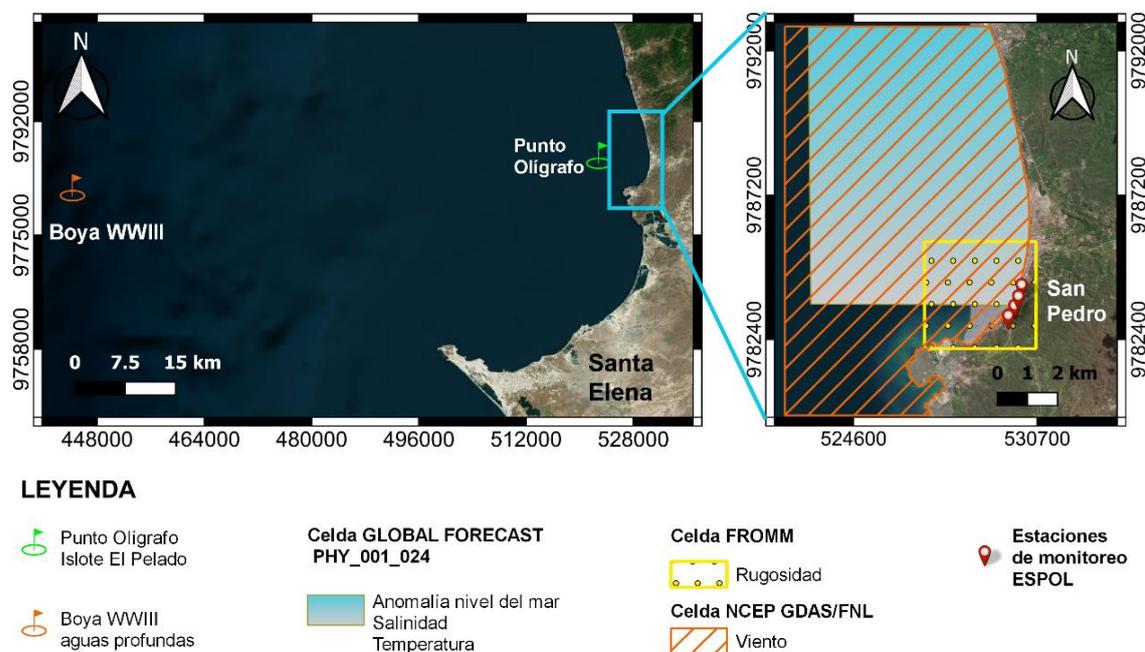


Figura 2.4 Dominio de datos globales para calibración y puntos de validación.

Fuente: (Autoras, 2022)

Esta información fue tratada y procesada de acuerdo con los requerimientos de cada fase del proyecto.

2.2 Fase 2: Generación de archivos de entrada SWAN

Esta fase comprende la generación de archivos legibles para el modelo SWAN el cual se simulará a través del módulo “DELFT3D – WAVE”.

2.2.1 Malla y Batimetría

Para este modelo se definió como zona de interés la bahía de Santa Elena, la generación de la malla y batimetría se hizo mediante el uso de la herramienta Delft Dashboard, utilizando como base la información disponible de GEBCO para el año 2019. Se definió una malla de cálculo con resolución de 500 m y se generó un archivo “malla.grid”, luego se procedió a descargar la información disponible para batimetría y se obtuvo un archivo “bati.dep”. Dichos archivos son necesario para la calibración del modelo.

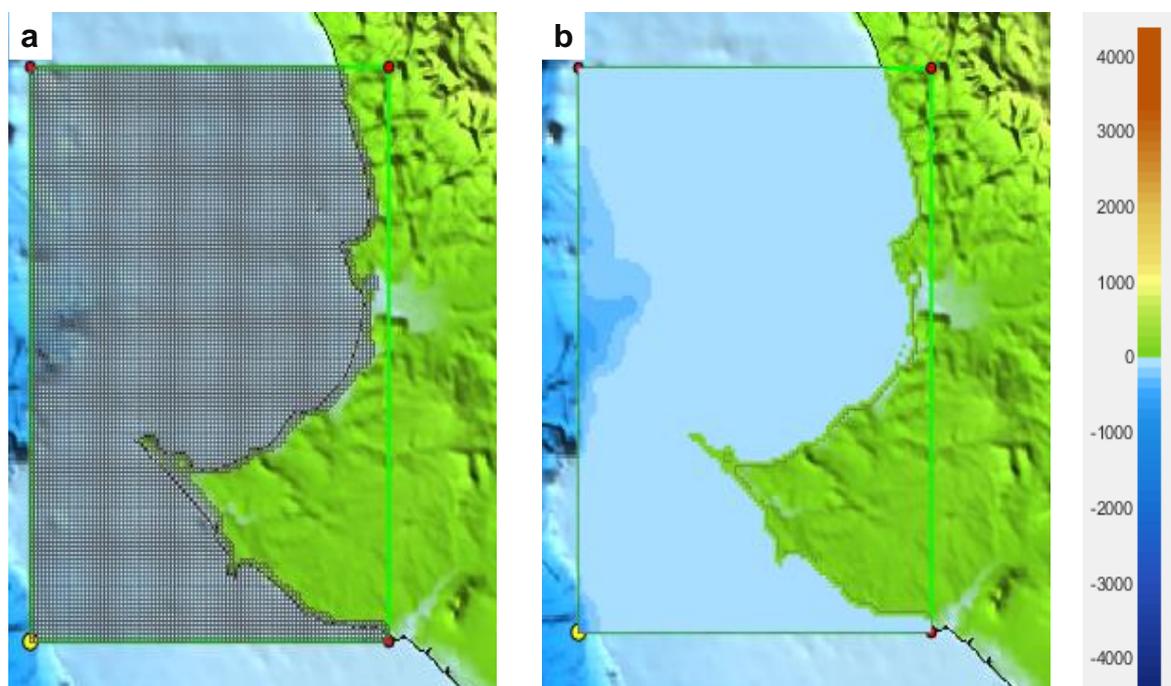


Figura 2.5 a) Generación de la Malla y b) Obtención de la batimetría GEBCO, utilizando Delft Dashboard. Fuente: (Autoras, 2022).

2.2.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se definieron dentro de un archivo “boundary.bnd”, el cual contiene las series de tiempo de oleaje en aguas profundas para las variables: período, dirección y altura significativa. Las cuales fueron obtenidas de las boyas de WAVEWATCH III desde la página de ERDDAP (ver Apéndice B).

2.2.3 Obstáculos

Con la finalidad de indicar a la malla de cálculo que existe una zona seca frente a la comuna de San Pedro se creó un obstáculo definiendo un punto seco en la zona del Islote El Pelado, para esto fue necesario crear un archivo “obstaculo.pol” y “obstaculo.obt”.

2.3 Fase 3: Calibración y validación de SWAN

2.3.1 Calibración

En esta sección se muestran los parámetros de calibración utilizados para las dos simulaciones realizadas con el modelo SWAN a través del programa DELFT3D y el módulo WAVE. En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros ingresados para la simulación del 19 de enero al 19 de febrero del 2019 a partir de datos descargados de WAVEWATCH III. Los valores de viento utilizados corresponden a la velocidad y dirección promedio registradas en aguas profundas para cada mes. Los parámetros descritos a continuación se muestran en el idioma propio de la ventana interactiva de WAVE.

Tabla 2.1 Descripción parámetros de calibración SWAN. Simulación 19 enero – 19 febrero 2019. Fuente: (Autoras, 2022).

Parámetros WAVE input	
Wind	Speed enero: 4.72 m/s Direction enero: 197° Speed febrero: 2.5 m/s Direction febrero: 265 °
Boundaries	Archivo “boundary. bnd” Series de tiempo en aguas profundas
Obstacles	Archivo “obstaculo.pol” Archivo “obstaculo.obt”
Physical Parameters	LTA Bottom friction Refraction Depth-induce breaking (B&Jmodel)
Whitcapping	Komen et al.

A continuación, en la Tabla 2.2 se muestran los parámetros de calibración para la simulación del 1 de marzo del 2019 a partir de datos obtenidos de WAVEWATCH III. A diferencia de la simulación anterior, en este caso el boundary se trabajó como un solo dato de entrada.

Tabla 2.2 Descripción de parámetros de calibración SWAN. Simulación 1 de marzo 2019. Fuente: (Autoras, 2022).

Parámetros WAVE input	
Wind	Speed: 1.81 m/s Direction: 177.86 °
Boundaries	Hsig: 1.4027 m Peak Period: 13.053 s Nautical Direction: 233.33 °
Obstacles	File "obstaculo.pol" File "obstaculo.obt"
Physical Parameters	LTA Bottom friction Refraction Depth-induce breaking (B&Jmodel)
Whitecapping	Komen et al.

2.3.2 Validación de los resultados de SWAN

Se realizaron dos tipos de validaciones de acuerdo con la disponibilidad de información para las fechas simuladas.

2.3.2.1 SWAN vs. Olígrafo

Se compararon las variables de altura significativa, dirección y período de oleaje con la información tomada por el olígrafo para las mismas fechas y se procedió a realizar un análisis estadístico. A continuación, se muestra el procedimiento que se siguió para el análisis de validación:

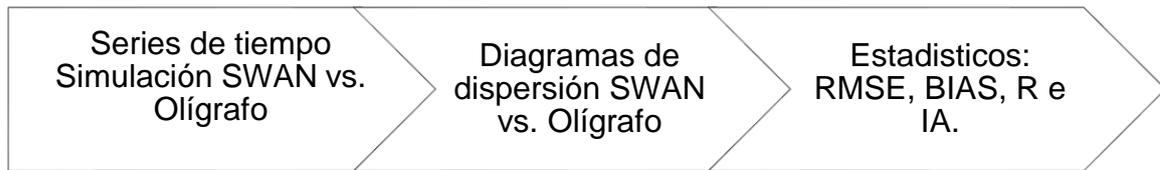


Figura 2.6 Proceso de validación 19 enero – 19 febrero 2019. Fuente: (Autoras, 2022)

2.3.2.2 SWAN vs. Imágenes Satelitales

Se compararon los resultados de dirección de oleaje con la imagen satelital Sentinel 2A para ese día. Este proceso de validación comprende cuatro etapas:

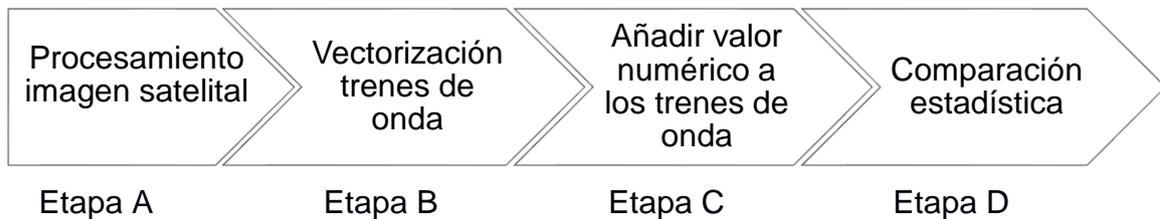


Figura 2.7 Proceso validación 1 de marzo 2019. Fuente: (Autoras, 2022).

Etapa A: Procesamiento de imagen satelital.

Debido a que la malla de cálculo de SWAN contiene toda la bahía de Santa Elena es necesario descargar cuatro imágenes satelitales para cubrir completamente el área. Estas imágenes se obtienen desde la web de Copernicus Open Access Hub, se necesitan las bandas 4, 3 y 2 para realizar una composición a color real. El procesamiento de las imágenes se lo realizó en el programa SNAP, donde se hizo un mosaico con las imágenes y la composición en color real. Además, se aplicaron los filtros para corregir la calidad de imagen y finalmente se exporto el mosaico en un archivo “.TIF”.

Etapa B: Vectorización de trenes de onda.

En el programa QGIS se carga el archivo “.TIF” obtenido en la etapa A y se procede a crear una capa shape en la cual se almacenarán las vectorizaciones de los trenes de onda. La vectorización se realizó de manera manual utilizando únicamente los

trenes que se apreciaban de manera nítida. Esta etapa se debe realizar con extremo cuidado ya que el proceso está ligado en gran parte a la subjetividad y experticia del usuario.

Etapa C: Añadir valor numérico a los trenes de onda

Con la vectorización de los trenes de ondas se necesita agregar un valor numérico en grados con respecto al norte para poder realizar la validación. Para esto se requiere usar el complemento de Qgis Azimuth Measurement , al valor del ángulo con respecto al norte se le resta 90° para obtener la dirección normal a los trenes de onda que serán comparada con la dirección de los vectores simulados en SWAN.

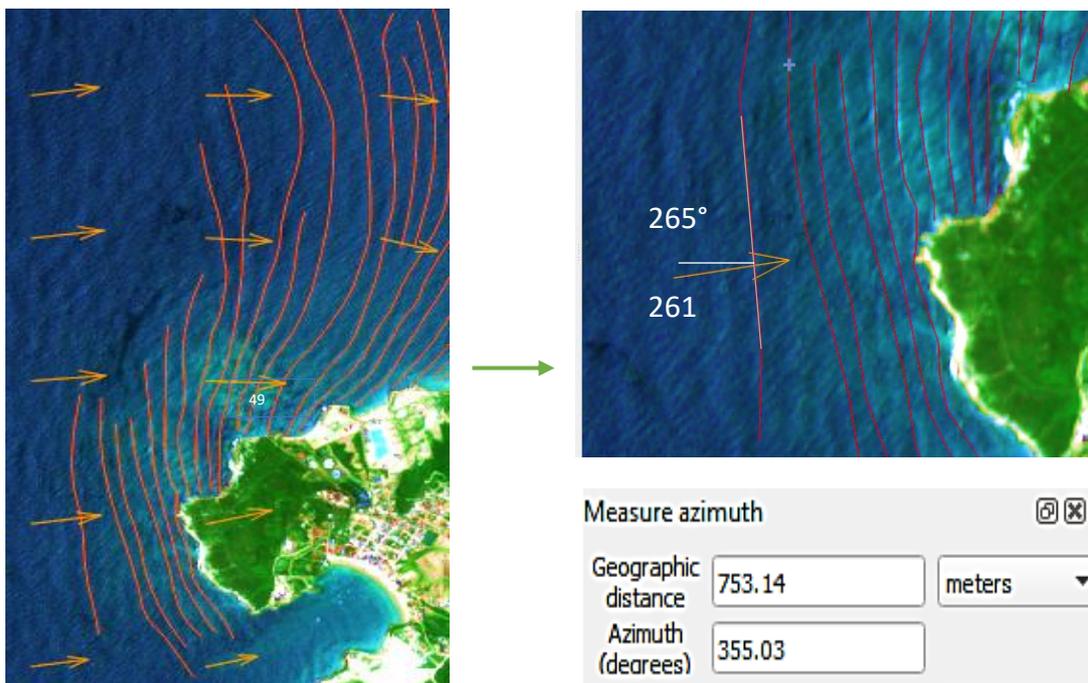


Figura 2.8 Proceso etapa C. Fuente: (Autoras, 2022).

Etapa D: Comparación estadística

Se compararon los resultados obtenidos en la etapa C y los resultados de la dirección de oleaje (capa de vectores) extraída de la simulación de SWAN, se obtuvo: dirección promedio, desviación estándar y error absoluto.

2.4 Fase 4: Generación de archivos de entrada SWASH

Esta fase comprende la generación de archivos legibles para el modelo SWASH, se requiere de los archivos machinefile y swashinit, estos no se los desarrolla, pero son esenciales para la correcta compilación del modelo. A continuación, se detalla la generación de los archivos ".txt" y así mismo los archivos complementarios: "input.bot", "input.rug", "input.wnd" y "input.prs" necesarios para calibrar y ejecutar el modelo.

2.4.1 Topo-batimetría

Se hizo uso de la batimetría levantada en San Pedro junto con las cartas náuticas CN_GEO_IOA105_2ED_30042012 y CN_GEO_IAO_1ED_28112005 (ver Apéndice A y C). Se procesaron los archivos en el programa QGIS realizando la corrección de marea referida al nivel medio del mar para realizar una interpolación con un tamaño de celda de 10 m obteniendo un único archivo ráster. Así mismo se trabajó con un modelo digital de elevación "DEM" del año 2014 referido al nivel medio del mar, descargado del geoportal del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. (SIPA - MAG, 2021). Para obtener la Topo-batimetría se realizó un mosaico con los archivos ráster de batimetría y topografía, luego se procedió a traducir el mosaico a un formato ".asc". Para calibrar el modelo SWASH es necesario fraccionar el archivo "topobatimetria.asc" en dos: "topobati.txt" y "input.bot", los cuales contienen las coordenadas, resolución, número de filas y columnas; y los valores de batimetría y topografía, respectivamente.

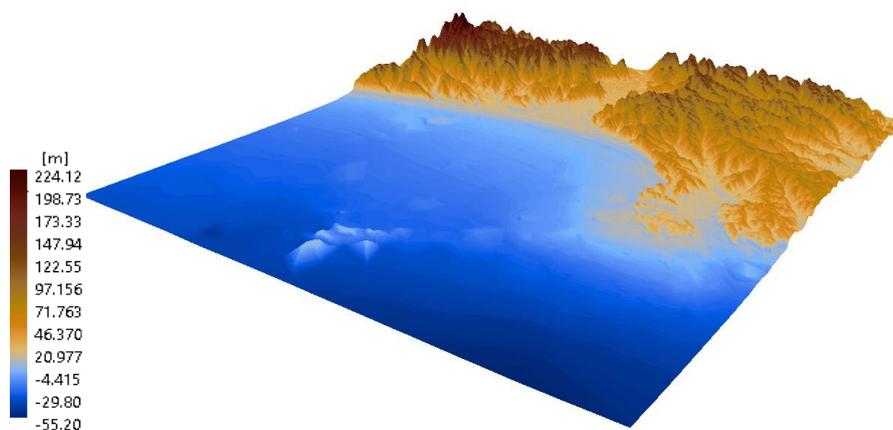


Figura 2.9 Modelo de terreno Topo batimétrico. Fuente: (Autoras, 2022)

2.4.2 Condiciones de frontera

En esta sección se utilizaron los datos de salida del modelo SWAN, específicamente la información obtenida en la simulación del “1 de marzo de 2019”, para las variables altura, dirección y período de ola. Se crearon 3 archivos ráster mediante el uso del programa QGIS, donde además de visualizarlos se extrae la información de la zona de interés con la herramienta “profile tools”. Para este estudio se trabajará con una malla cuadrada, la cual se establece como dato de calibración, además se definirán 3 puntos en la frontera de entrada (F1, F2 y F3) con datos de dirección, período y altura significativa de la siguiente manera:

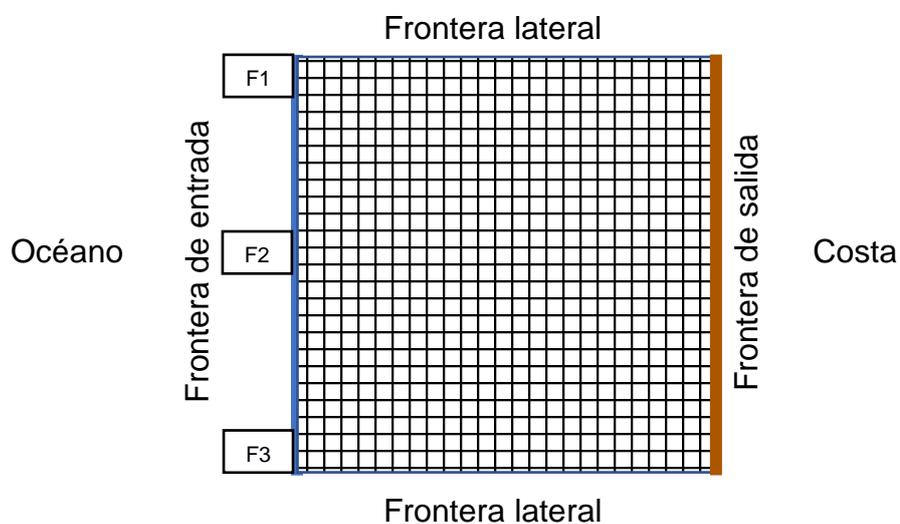


Figura 2.10 Esquema malla de cálculo y condiciones de frontera.

Fuente: (Autoras, 2022).

2.4.3 Rugosidad

Se carga el archivo de rugosidad tomado del modelo de cobertura de suelo de la Universidad de Tsinghua, se realiza un post-procesamiento en QGIS obteniendo un ráster, una vez realizado el proceso se tradujo a un archivo “.asc”. Para calibrar el modelo SWASH es necesario fraccionar el archivo "rugosidad.asc" en dos: "rug.txt" e "input.rug" los cuales contienen las coordenadas, resolución, número de filas y columnas; y los valores de rugosidad, respectivamente.

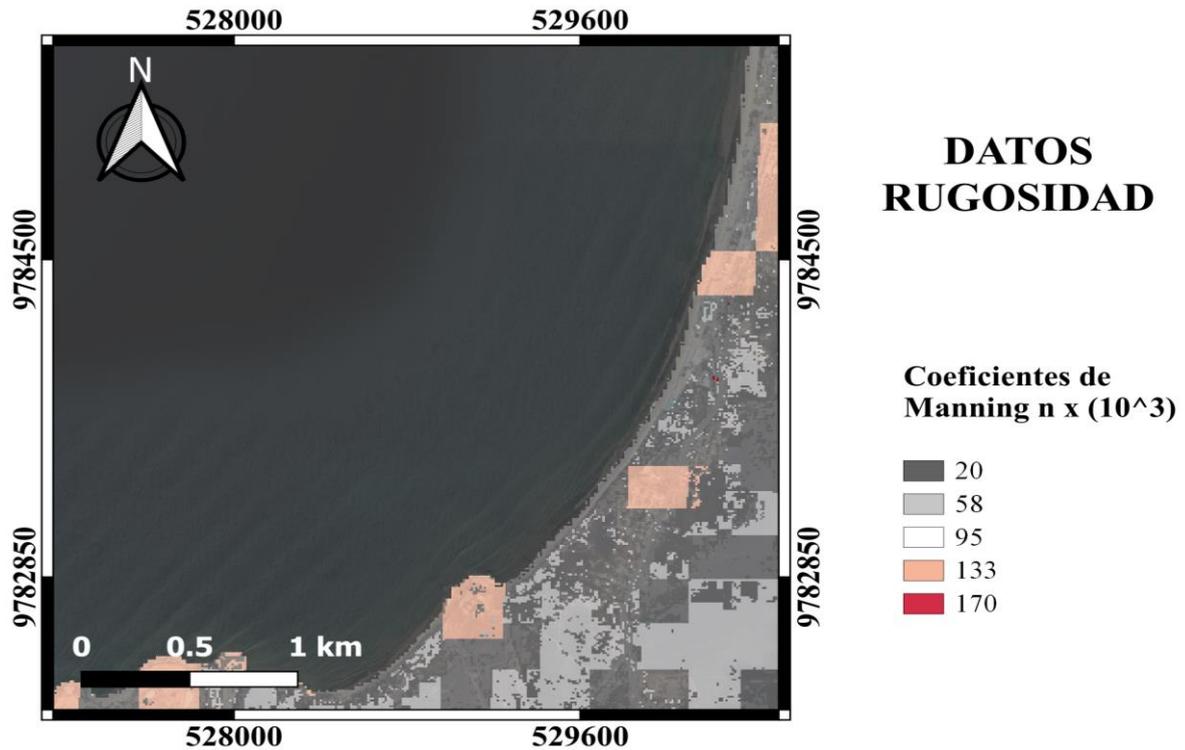


Figura 2.11 Coeficientes rugosidad. Fuente: (Autoras, 2022).

2.4.4 Meteorología Condiciones iniciales

Se cargan en el software R los archivos “.nc” descargados de NCEP GDAS/FNL para las variables de viento (u, v) y presión, para ello se requiere hacer un procesamiento de estos obteniendo archivos legibles para SWASH, se extraen 3 tipos de archivos: “meteorologia.txt”, “input.wnd” y “input.prs” los cuales contiene las coordenadas, resolución, número de filas y columnas; los valores de viento; y los valores de presión respectivamente.

2.5 Fase 5: Calibración y validación de SWASH

2.5.1 Calibración

En esta sección se muestran los parámetros de calibración para la simulación del 1 de marzo de 2019 realizada con el modelo SWASH, estos parámetros fueron ingresados dentro de un archivo “.sws”.

Tabla 2.3 Descripción de parámetros de calibración SWASH. Simulación 1 de marzo 2019. Fuente: (Autoras, 2022).

Parámetros Wave input	
Nivel de agua	0.2 m
Malla de cálculo	2500 x 2500 m Resolución 5 m Coordenada: 530322, 9782664
Topo-batimetría	- Archivo "input.bot" - Coordenadas: 521741.76, 9779357.82 - N° filas: 1245, N° columnas: 1370 - Tamaño de celda: 10
Rugosidad	- Archivo "input.rug" - Coordenadas: 526952.19, 9782112.12 - N° filas: 368, N° columnas: 356 - Tamaño de celda: 10
Viento y presión	- Archivo "input.wind" - Archivo "input.prs" - Coordenadas: 522287.16, 9779921.57 - N° filas: 2, N° columnas: 2 - Tamaño de celda: 12900
Fronteras	F1: DIR 270.14°, T 13 s, H 0.85 m F2: DIR 270.39°, T 13 s, H 0.79 m F3: DIR 270.53°, T 13 s, H 0.86 m

Consideraciones

Para la malla se necesita definir el punto de coordenada inicial a partir del cual se extenderán 2500 m en dirección del eje "x" y del eje "y" positivos. Así mismo se deberá indicar la resolución de la malla, al subdividir los ejes en " Δx " y " Δy ", los cuales deberán ser números enteros.

2.5.2 Validación

Para la simulación 1 de marzo 2019 se realizó la validación de la variable altura de ola, mediante el uso de los registros levantados in-situ en las cuatro estaciones de monitoreo de la comuna San Pedro. Debido a que no se contaba con datos para la fecha simulada se procedió a realizar una recopilación de los valores obtenidos en las salidas de campo del 2018, 2019 y 2021. Se trabajó con los valores promedios

correspondientes a $H_{1/3}$ recopilando los valores de altura para las fechas disponibles por estación.

Tabla 2.4 Detalle salidas de campo. Fuente: (Autoras, 2022).

Estaciones	Fechas	Fas Lunar
E1	- 18/ 08/ 2018	Cuadratura
	- 08/ 09/ 2018	Sicigia
E2	- 08/ 06/ 2019	Cuadratura
	- 15/ 06/ 2019	Sicigia
E3	- 20/ 10/ 2019	Cuadratura
	- 16/ 11/ 2019	Sicigia
E4	- 12/ 11/ 2021	Cuadratura

Para la variable dirección, se realizó una comparación visual entre los trenes de onda vectorizados en la imagen satelital Sentinel 2A y el arribo de los trenes de olas visibles en la salida de SWASH.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se detallan los resultados de las diferentes simulaciones realizadas en este trabajo y a su vez el análisis de estos.

3.1 Resultados SWAN vs. Olígrafo

La rosa de oleaje obtenida para el olígrafo en la Figura 3.1a muestra la predominancia de la dirección Suroeste, Oeste y Noroeste $255-275^\circ$ donde se evidencian los valores típicos para las costas de Ecuador para la altura de ola entre 0.6-1.4 m, estos valores corresponden al 25% de las observaciones para cada dirección, a su vez como se muestra en la Figura 3.1b los períodos típicos entre 13-15 s, estos valores corresponden al 23-25% de las observaciones para cada dirección, en menor proporción se tienen direcciones provenientes del Noroeste y Suroeste.

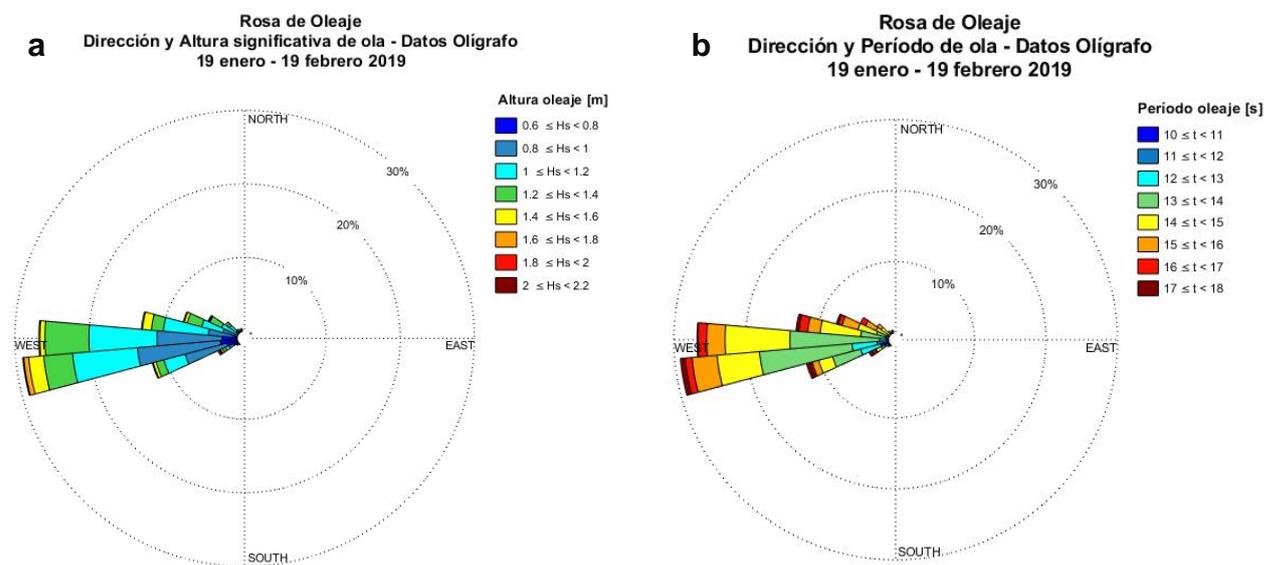


Figura 3.1 Rosa de oleaje a partir de los datos del olígrafo para; a) Dirección vs Altura significativa, b) Dirección vs Período. Fuente: (Autoras, 2021).

En la Tabla 3.1 se observan los valores promedios y la desviación estándar entre las variables altura, período y dirección para el olígrafo.

Tabla 3.1 Descripción estadística de los datos para el olígrafo. Fuente: (Autoras, 2021).

Variables	Media	Desviación estándar
Altura	1.07 m	0.19 m
Período	14.34 s	1.33 s
Dirección	261.80 °	9.01 °

La rosa de oleaje obtenida para el modelo SWAN en la Figura 3.2a muestra la predominancia de la dirección Oeste y Suroeste entre 255-275° donde se evidencian los valores típicos para las costas de Ecuador para la altura de ola entre 0.6 - 1.2 m, estos valores corresponden al 25-28% de las observaciones para cada dirección, a su vez como se muestra en la Figura 3.2b los períodos típicos entre 12-17 s, estos valores corresponden al 25-28% de las observaciones para cada dirección, en menor proporción se tienen direcciones provenientes del Noroeste y Suroeste.

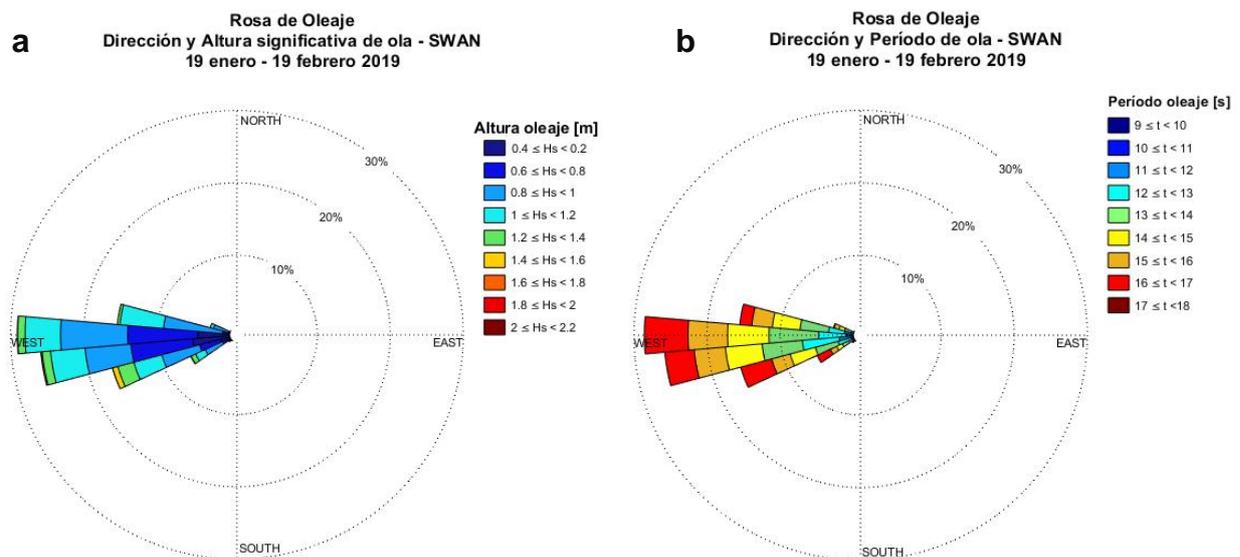


Figura 3.2 Rosas de oleaje obtenidas con SWAN. a) Dirección y Altura significativa, b) Dirección y Período para SWAN. Fuente: (Autoras, 2021).

En la Tabla 3.2 se observan los valores promedios y la desviación estándar entre las variables altura, período y dirección para el modelo SWAN.

Tabla 3.2 Descripción estadística de los datos para SWAN. Fuente: (Autoras, 2021).

Variables	Media	Desviación estándar
Altura	1.05 m	0.20 m
Período	15.55 s	1.85 s
Dirección	267.40°	7.20°

De manera general se muestra un buen ajuste entre los valores del modelo y el olígrafo, sin embargo, para el posterior análisis se considera un punto específico de la malla del cual se detalla la comparación estadística a continuación.

En la Figura 3.3 se muestra la serie de tiempo de altura significativa donde el comportamiento del modelo se asemeja al comportamiento del instrumento, sin embargo, hay casos en los que se sobreestiman y subestiman las alturas registradas.

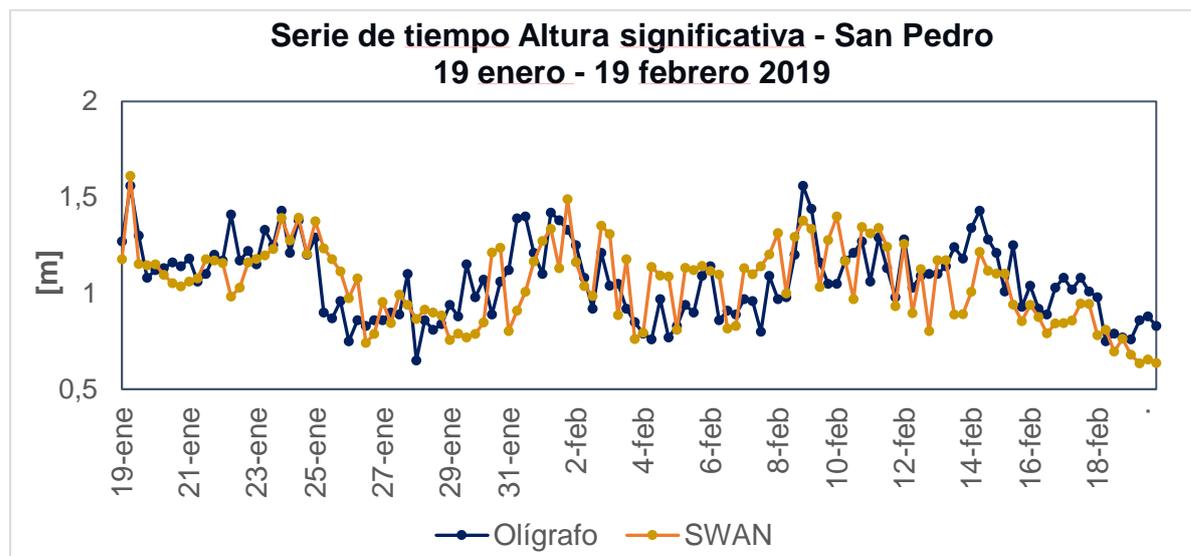


Figura 3.3 Serie de tiempo de altura significativa Olígrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).

En la Figura 3.4 se observa el diagrama de dispersión de altura entre el olígrafo y el modelo, donde los puntos están muy dispersos por encima y por debajo de la línea de mejor ajuste, los datos no presentan una tendencia muy marcada.

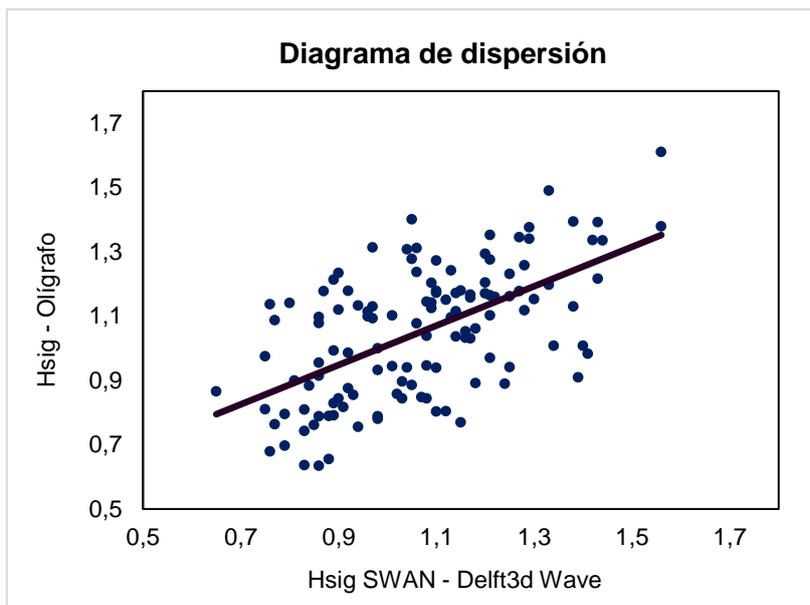


Figura 3.4 Diagrama de dispersión Altura significativa Olígrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).

En la Figura 3.5 se muestra la serie de tiempo de período se observa una tendencia marcada entre el modelo y el olígrafo, a diferencia de la altura se aprecia notablemente que el modelo sobreestima los máximos períodos registrados.

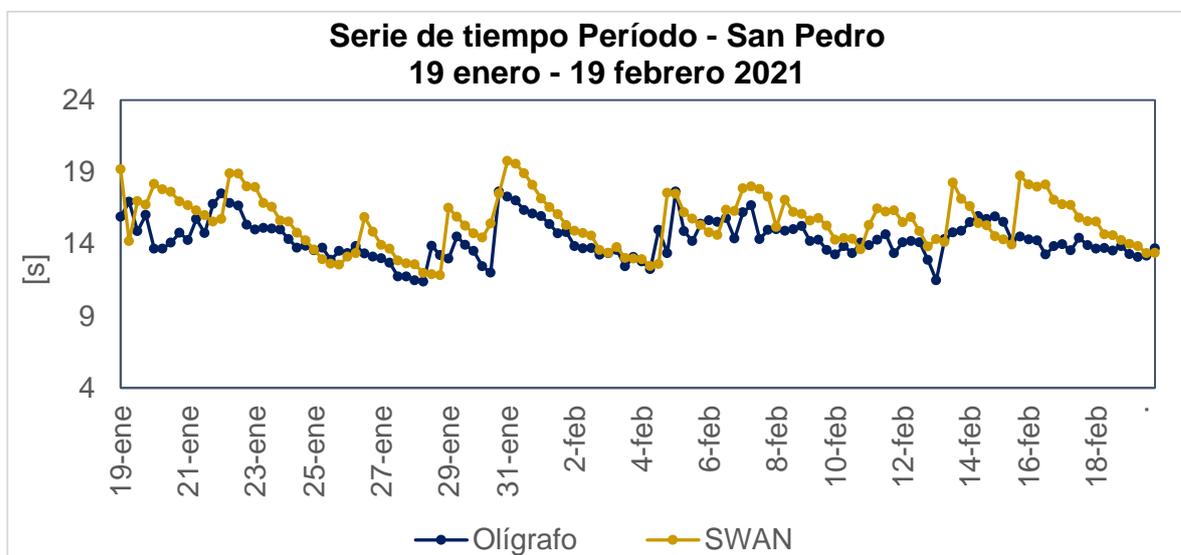


Figura 3.5 Serie de tiempo de período Olígrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).

En la Figura 3.6 se observa el diagrama de dispersión resultado de la modelación y los datos in-situ donde parte de los datos se encuentran agrupados en la línea de mejor ajuste, sin embargo, fuera de esta los datos están dispersos.

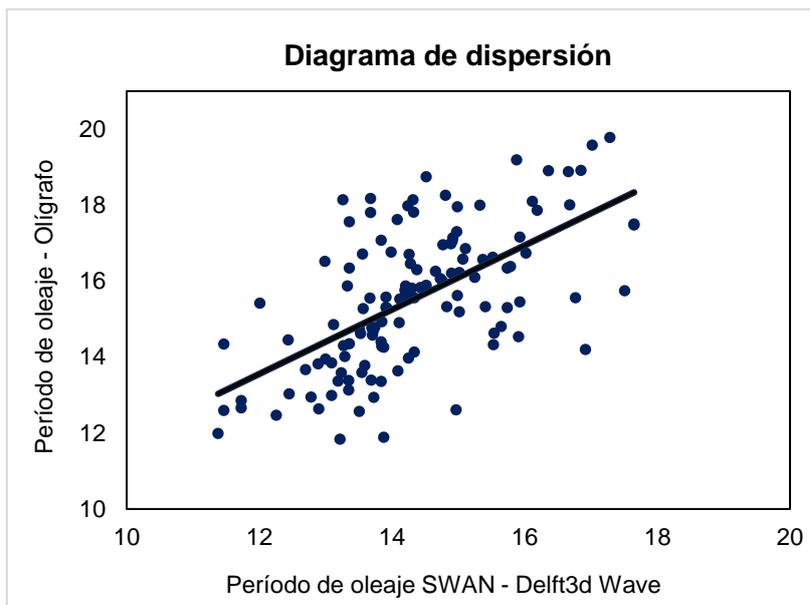


Figura 3.6 Diagrama de dispersión Período Olígrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).

En la Figura 3.7 se observa la serie de datos para dirección donde la tendencia es muy variada, teniendo áreas donde el ajuste es casi perfecto, al igual que zonas donde el modelo sobreestima los registros.

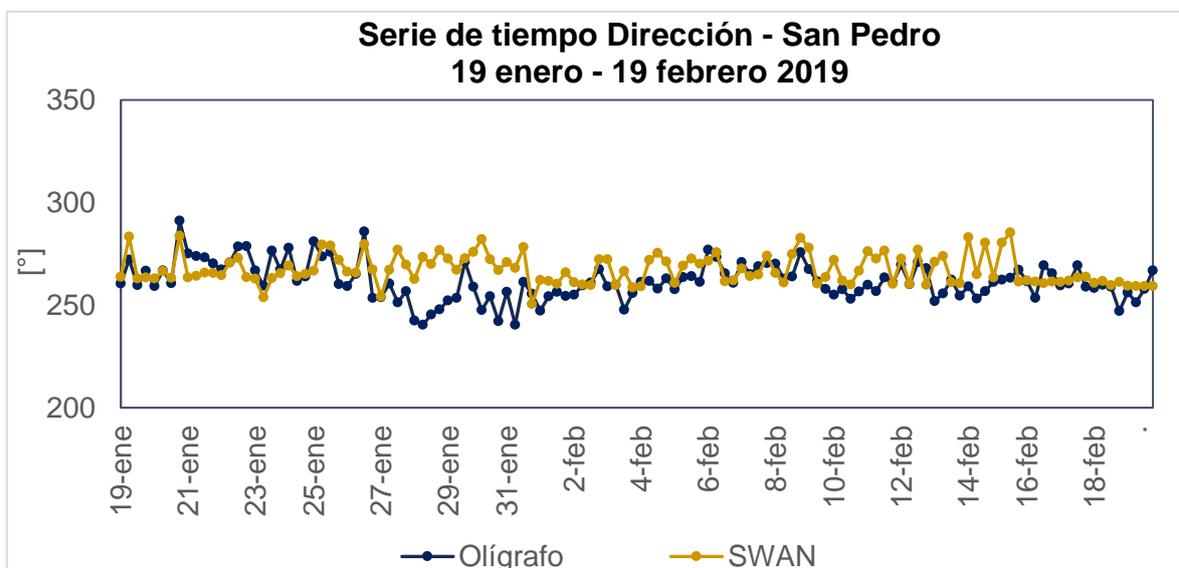


Figura 3.7 Serie de tiempo de Dirección Olígrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).

En la Figura 3.8 se observa el diagrama de dispersión de dirección donde la línea de mejor ajuste es ligeramente inclinada, se observan agrupamientos de datos por

encima y debajo de la línea, se no indica una tendencia marcada con datos bastante dispersos.

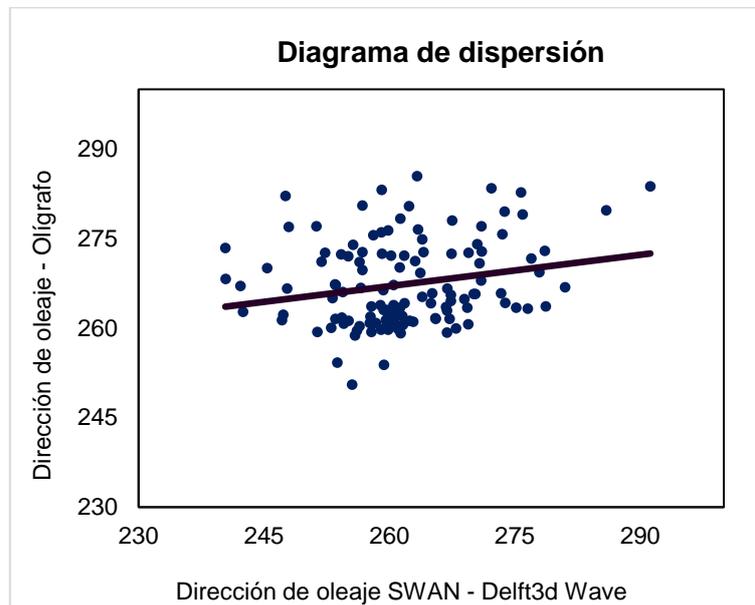


Figura 3.8 Diagrama de dispersión Dirección Olígrafo vs. SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).

En la Tabla 3.3 se encuentra el resumen de los estadísticos obtenidos, para el caso de H_s tiene una correlación moderada de $R=0.58$, $BIAS = -0.02$ m lo que indica subestimaciones leves y el $RMSE = 0.18$ m indicando que los valores predichos se encuentran muy cercanos a los observados, dado que ambos son menores a 0.5 m se considera la calidad de ajuste aceptable, lo mismo que se complementa con el IA de 0.77 que indica que la estimación del grado de error es aceptable.

Analizando el período la correlación es > 0.6 , el $BIAS$ es > 1 por lo que el modelo sobreestima las observaciones como se observa en la Figura 3.5, el $RMSE$ tiene un valor bajo con relación al rango de datos de 10 a 20 s, el IA es > 0.6 lo que indica un valor de confianza moderado.

En el caso de la dirección, la correlación es > 0.2 siendo este un ajuste bajo debido a la relación débil entre los datos, el $BIAS$ es > 5 por lo que sobreestima valores bajos como se observa en la Figura 3.7, a su vez el $RMSE$ es $> 10^\circ$ estos valores son bajos debido a que sus valores medios son muy parecidos, el IA es > 0.5 que indica un valor de confianza bajo. Esta variable tiene la particularidad de que el rango

de valores es muy amplio entre 250° – 290°, por lo que el ológrafo registra valores mayores en comparación al modelo.

Tabla 3.3 Resumen de estadísticos para las variables de interés entre el modelo y el ológrafo. Fuente: (Autoras, 2022).

Variables	R	BIAS	RMSE	IA
Altura	0.58	-0.02 m	0.18 m	0.77
Período	0.61	1.20 s	1.90 s	0.66
Dirección	0.22	5.54 °	11.62 °	0.51

En base a lo antes mencionado, se indica que los resultados tienen concordancia con otras investigaciones que utilizan el modelo SWAN y un ológrafo, como es el caso de (Enríquez, Marcos, Álvarez-Ellacuría, Orfila, & Gomis, 2017) que muestra un RMSE de 29.20° para un equipo fondeado a 12 m, donde se menciona que las discrepancias en la dirección del oleaje probablemente sean producto de la inhabilidad del modelo a representar la difracción dependiendo de la forma del área de estudio, lo cual está ligado a la resolución de la batimetría. Con respecto al R, en el caso de (Chaves Herrera, 2017) el ajuste es pobre dado que es menor a 0.1 teniendo una relación débil para un equipo fondeado a 20 m cerca de la punta de Cabo Blanco en Costa Rica.

En (P. A. & Behera, 2021) se indica que los errores asociados a los datos pueden ser producto de las propias limitaciones del modelo como la precisión de la batimetría y el forzamiento del viento, dado que se usan datos globales que usualmente no reflejan la magnitud de ciertos eventos (Muliati, Lukman Tawekal, Wurjanto, Kelvin, & Setiyo Pranowo, 2018); este último al considerar un único valor para toda la simulación dado que incide directamente en el comportamiento del oleaje, lo cual se evidenció al simular los meses de enero y febrero con valores diferentes.

Cabe destacar que otra de las razones para las bajas correlaciones es que la influencia del viento local no es considerada entre los parámetros de calibración; además se menciona en (Seibt, Peeters, Graf, Sprenger, & Hofmann, 2013) que la tasa de disipación de energía por whitecapping es considerada también una variable sensible.

3.2 Resultados SWAN vs. Imagen satelital

Se realizó el modelamiento para el 1 de marzo de 2019 debido a que se buscaba comparar la dirección del oleaje con la dirección de los trenes de onda de una imagen satelital Sentinel 2A. En las rosas de oleaje se observa la predominancia del oleaje del Oeste, con valores de altura entre 0.6 – 1.4 metros y período entre 12-14 segundos, valores característicos de la zona.

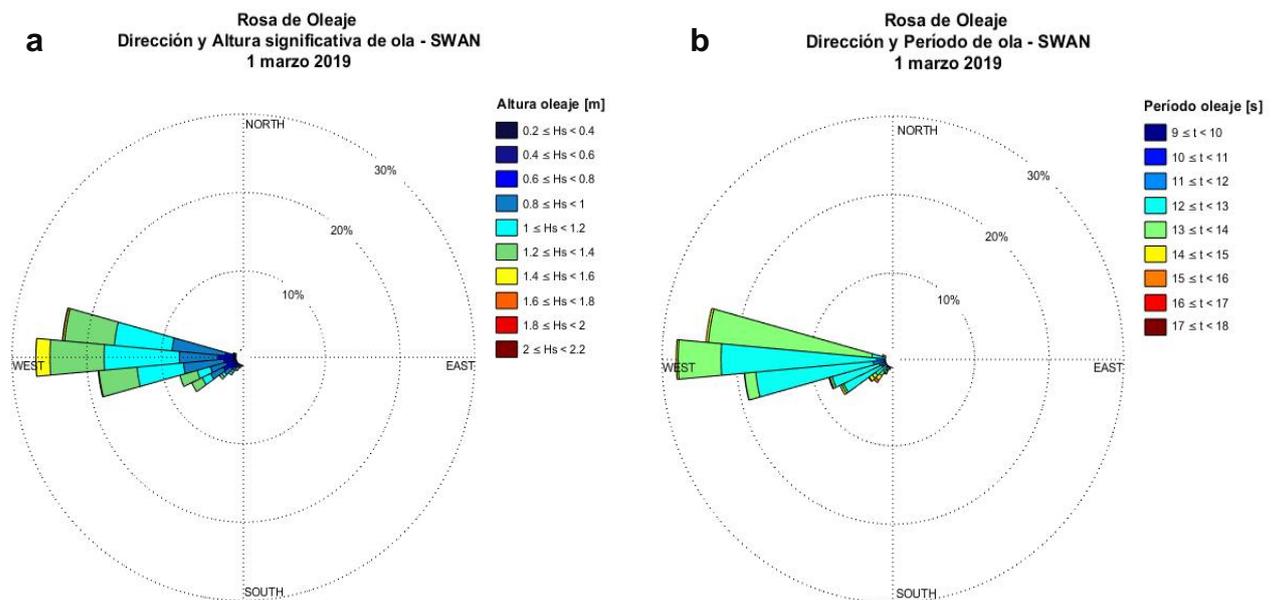


Figura 3.9 Rosa de Oleaje obtenidas con SWAN. a) Altura significativa y dirección. b) Período y dirección. Fuente: (Autoras, 2022).

Se muestran a continuación los ráster de altura, dirección y período de oleaje para la bahía de Santa Elena que fueron parte de los datos de entrada para la calibración del modelo SWASH.

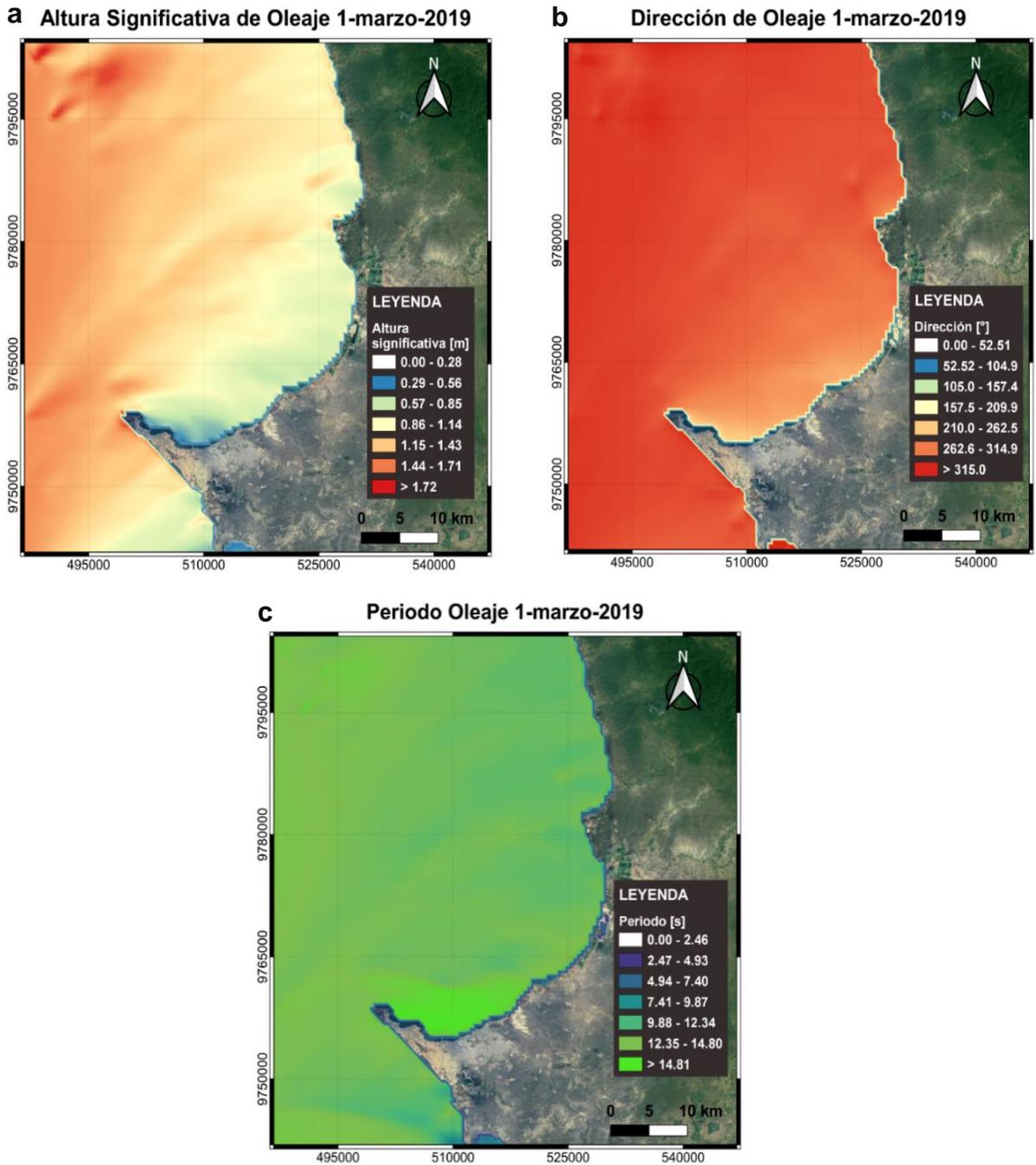


Figura 3.10 Mapas ráster. a) Altura significativa. b) Dirección. c) Período. Fuente: (Autoras, 2022).

Tal como se menciona en el capítulo anterior, parte de la validación de SWAN consistía en comparar el ajuste entre los vectores de dirección y los trenes de onda tal como se observa en la Figura 3.11, de manera general para la Bahía de Santa Elena y en acercamiento a la zona de San Pedro.

Santa Elena 1-marzo-2019

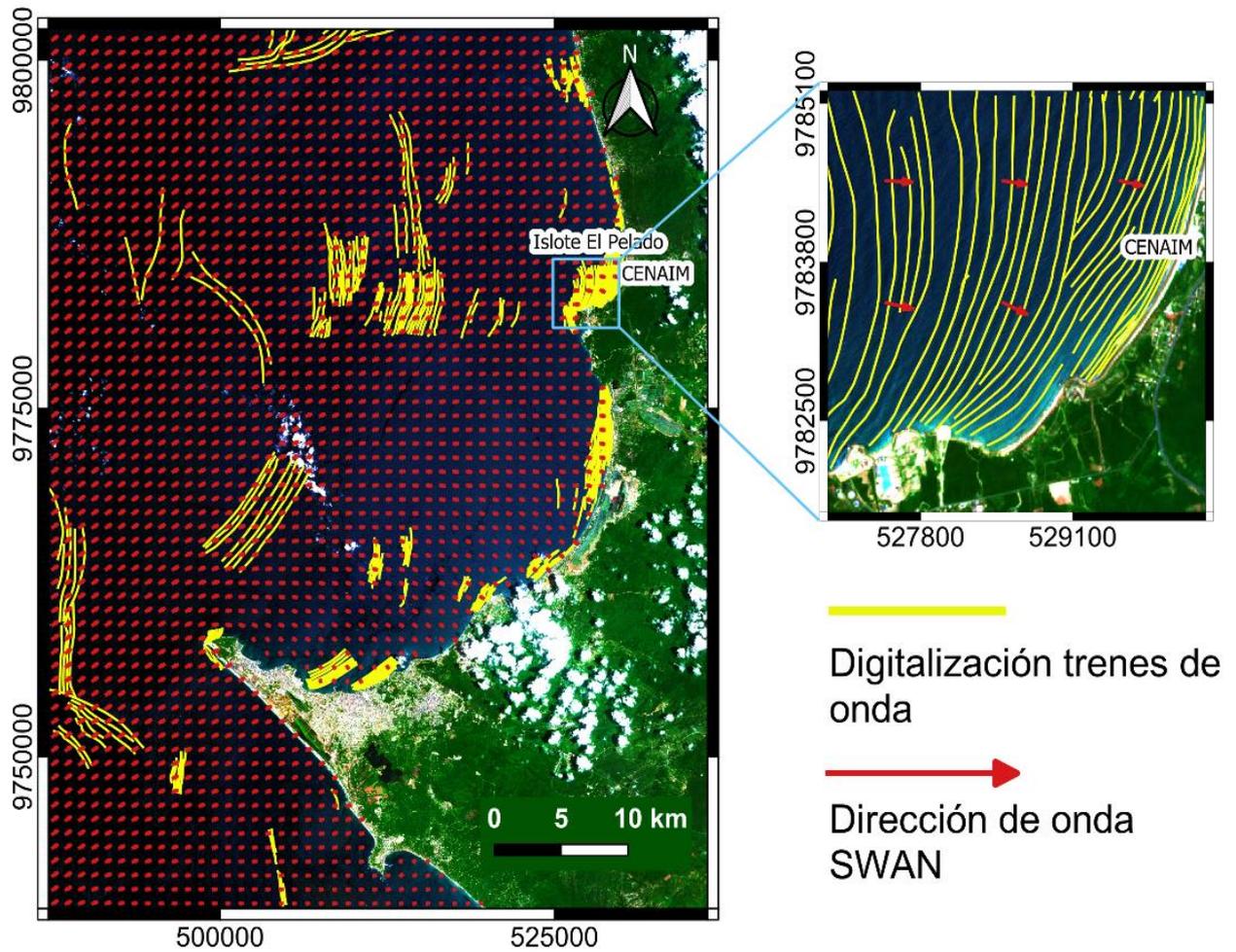


Figura 3.11 Trenes de onda vs. Dirección de onda SWAN. Fuente: (Autoras, 2022).

La comparación se realizó de dos formas, visualmente los vectores son casi perpendiculares a los frentes de onda, sin embargo, estadísticamente se determinó el error absoluto entre los vectores de dirección y la dirección perpendicular, siendo el error absoluto promedio entre ellos de 18.27° . A continuación, se muestran en la Tabla 3.4 los valores promedios y las desviaciones estándar para el modelo y la imagen, esta variable para ambos casos presenta desviaciones mayores a 20° con respecto a los valores medios, en consecuencia, a las restricciones propias del modelo.

Tabla 3.4 Resumen de estadísticos descriptivos SWAN vs. Imagen Satelital. Fuente: (Autoras, 2022).

	Dirección promedio	Desviación estándar	Error absoluto promedio
SWAN	256.45°	22.76°	18.27°
IMAGEN	268.71°	25.45°	

3.3 Resultados SWASH vs. Datos de campo

Una vez procesados los datos de SWAN, se procedió a obtener los resultados en aguas someras usando una malla con resolución de 5 metros, en la Figura 3.12 se muestran los valores promedios de altura significativa para la simulación. La estación 2 presenta valores de Hsig sobre los 0.96 m, lo cual indica que es más energética con respecto a las demás estaciones, además se observa la forma de algunos trenes de onda.

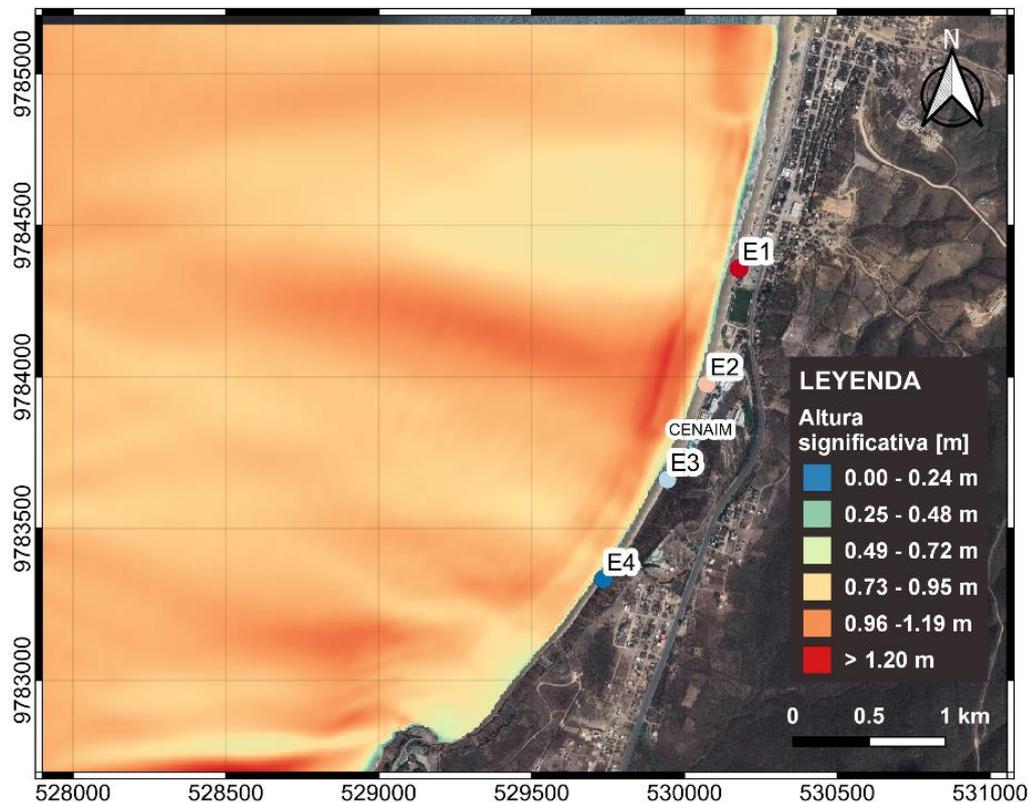


Figura 3.12 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 5 m. Fuente: (Autoras, 2022).

Parte del estudio se centra en determinar los parámetros más sensibles del modelo, sin embargo, tal como menciona P. A. & Behera, (2021) se dificulta modificar ciertos parámetros, ya que no se tiene suficiente información de la zona de estudio. La fricción de fondo es un término que requiere conocer información de rugosidad y el tipo de fondo marino lo que conlleva a trabajar con valores universales como es el caso del coeficiente de Manning (P. A. & Behera, 2021). Bajo este contexto se determinó que la resolución de la malla es un parámetro que se puede modificar libremente, por lo cual se analizó cuatro mallas diferentes con resolución de 2 m, 5 m, 10 m y 25 m, las mismas que se compararon con datos de Hsig levantados en campo para el período de 2018-2021.

La principal diferencia entre la malla de 2 m y la de 5 m, es que los valores de Hsig son mayores, debido a que la batimetría es más gruesa que la resolución de la malla, por lo cual se sobreestiman los resultados.

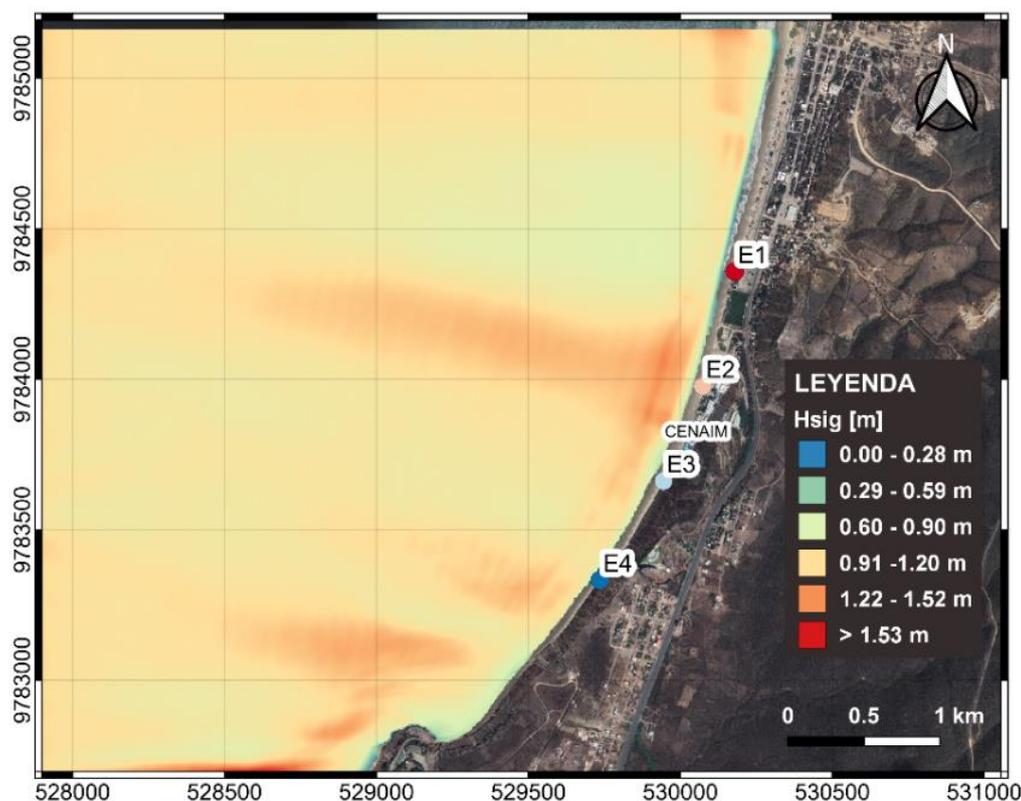


Figura 3.13 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 2 m.
Fuente: (Autoras, 2022).

A diferencia de las mallas anteriores, con una resolución de 10 m los valores se están subestimando, se aprecia la formación de 2 trenes de onda entre las estaciones 1 y 3 dado que la batimetría es más fina.

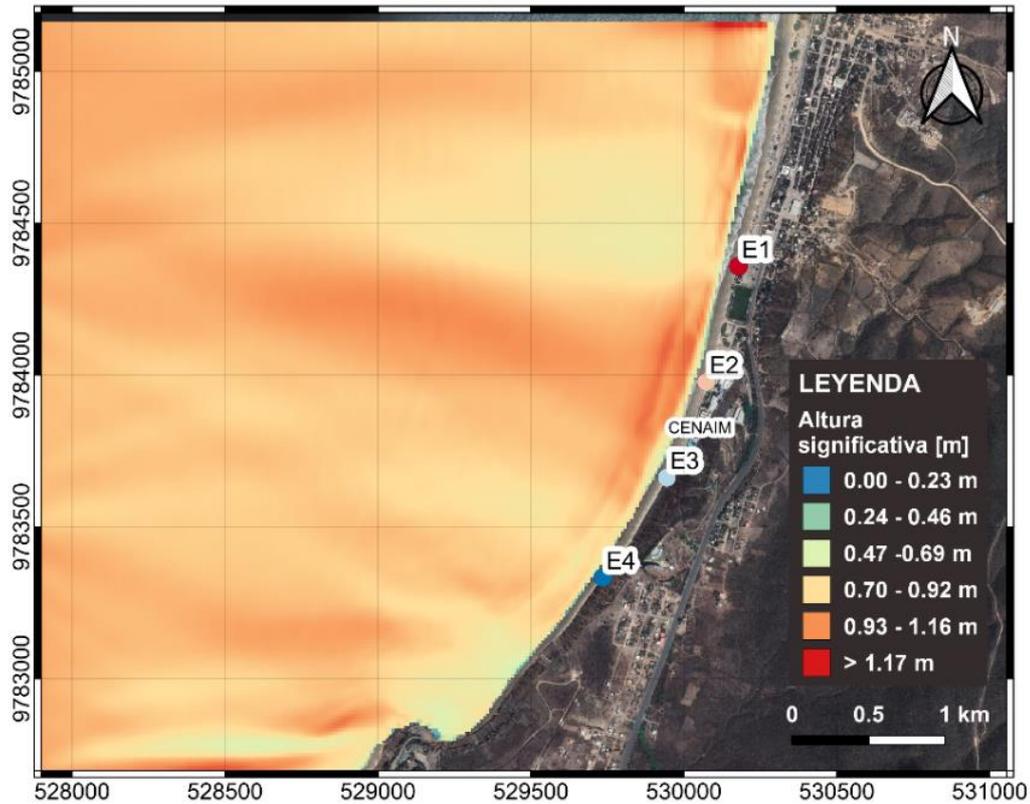


Figura 3.14 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 10 m.

Fuente: (Autoras, 2022).

Para la malla de 25 m tenemos que los píxeles o cuadrículas de la malla son muy notorios en la imagen y distorsionados, para esta simulación los valores de Hsig disminuyen considerablemente siendo el máximo 0.87 m.

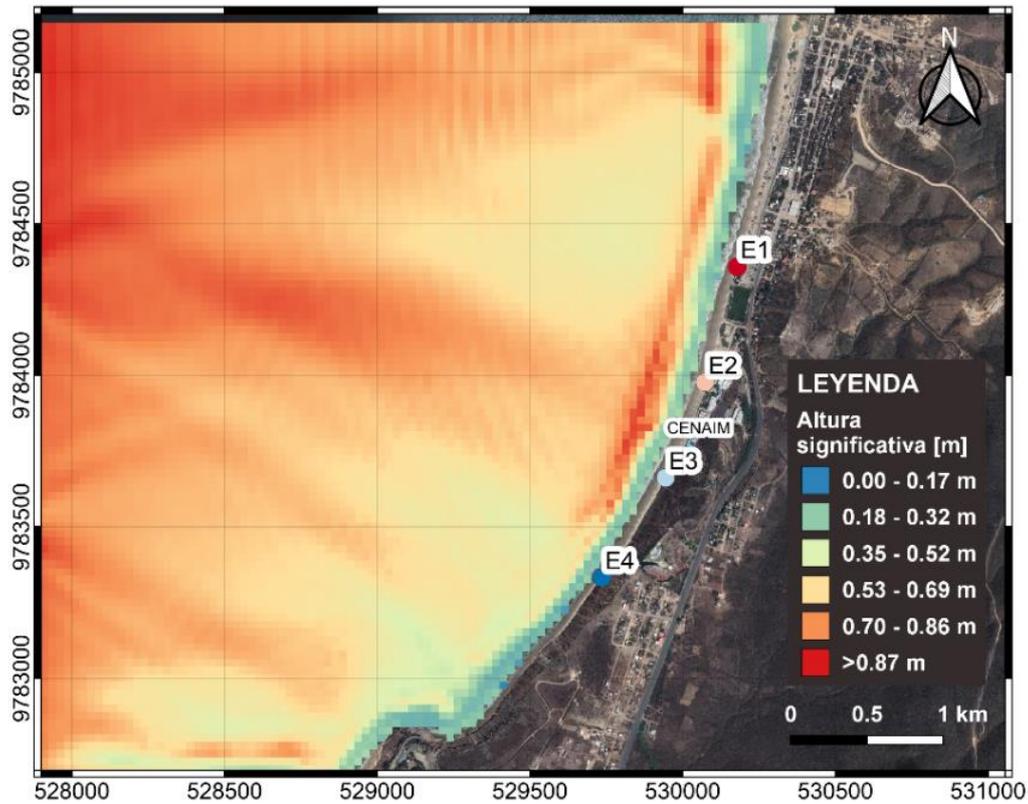


Figura 3.15 Altura significativa – San Pedro 1 de marzo de 2019. Malla de 25 m.
Fuente: (Autoras, 2022).

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados para cada resolución de malla evaluada y los respectivos valores medidos en campo correspondientes a Hsig para 2018-2021, siendo la estación 3 la que presenta valores menores con respecto a las demás estaciones, mientras que la estación 2 presenta los valores más altos lo cual se puede explicar por la batimetría más fina en esa zona de la playa.

Tabla 3.5 Resultados de Hsig de salida de campo vs. diferentes resoluciones de malla. **Fuente:** (Autoras, 2022).

Salidas de campo		MR (2 m)	MR (5 m)	MR (10 m)	MR (25 m)
E1	0.74 m	0.78 m	0.75 m	0.74 m	0.64 m
E2	0.96 m	1.08 m	1.00 m	0.89 m	0.74 m
E3	0.67 m	0.86 m	0.72 m	0.82 m	0.45 m
E4	0.87 m	0.83 m	0.80 m	0.70 m	0.54 m

En cuanto a los errores presentados en la Tabla 3.6 entre las diferentes resoluciones de malla, se observa que cuando la malla es más fina que la batimetría se sobreestiman los resultados, para el caso en el cual la malla es mucho más grande que la batimetría los resultados son subestimados. El mejor ajuste lo presenta la malla de 5 m ya que el error que presenta esta entre el 5% y el 10% según (Gómez Lahoz, 2014).

Tabla 3.6 Resumen de errores relativos para las diferentes resoluciones de malla.

Fuente: (Autoras, 2022).

	MR (2 m)	MR (5 m)	MR (10 m)	MR (25 m)
E1	6%	2%	1%	13%
E2	13%	4%	7%	23%
E3	28%	7%	22%	33%
E4	4%	8%	19%	38%

3.4 Resultados SWASH vs. Imagen satelital

Debido a que SWASH no muestra resultados para la variable dirección, pero esta es de interés para el estudio se procedió a compararlos visualmente, en la Figura 3.16 se observa el arribo del oleaje en la rampa de color azul y la superposición de los trenes de onda digitalizados de la imagen Sentinel 2A, donde se observó una buena aproximación, sin embargo, hay secciones con diferencias notables debido a que el modelo no refleja con exactitud el instante captado por la imagen.

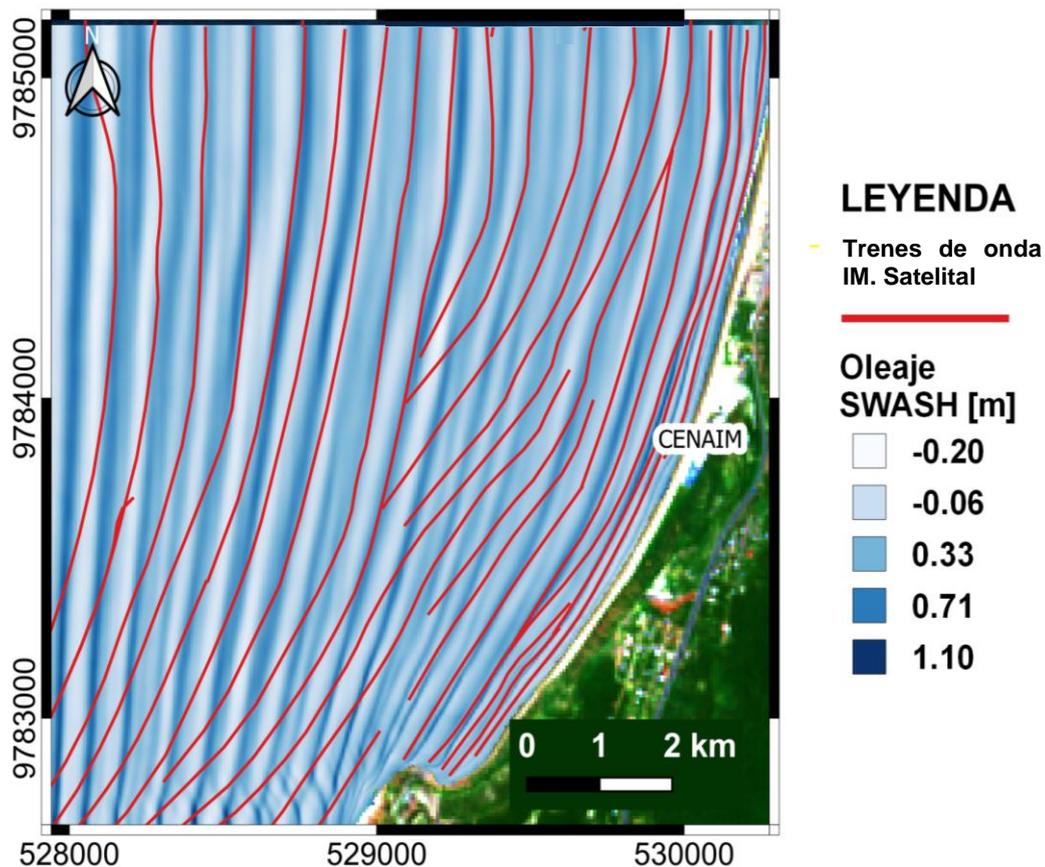


Figura 3.16 Trenes de ondas de la imagen satelital vs. Trenes de SWASH. Fuente: (Autoras, 2022)

3.5 Aplicaciones

Existen diferentes áreas de aplicación en la que se puede utilizar este trabajo como por ejemplo en ingeniería costera y gestión de riesgos. En el campo de la gestión de riesgo se podría utilizar como parte de los Sistemas de Alerta Temprana generando distintos escenarios del alcance máximo horizontal del oleaje (inundación o run-up) incluyendo aumento del nivel del mar y cambio climático. Un ejemplo de esto lo podemos observar en la Figura 3.17 en donde se muestra la simulación para condiciones normales y condición de aguaje mostrando el alcance horizontal de la misma en color azul, con las que se puede identificar las zonas más vulnerables y expuestas a inundaciones.

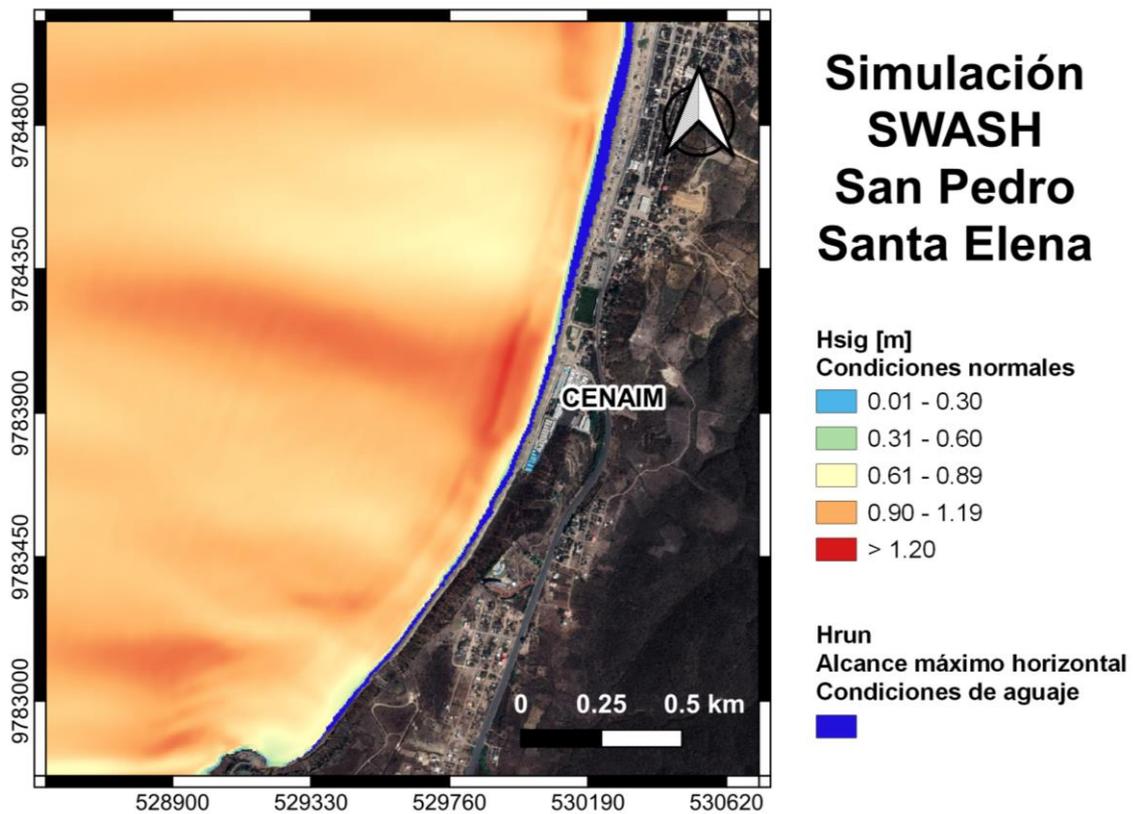


Figura 3.17. Comparación de Altura significativa vs alcance máximo horizontal.

Fuente: (Autoras, 2022)

En el campo de la ingeniería costera se podría estudiar la dinámica del oleaje en respuesta a la implantación de varios tipos de estructuras de protección costeras clásicas, como espigones y rompeolas u otras soluciones basadas en la naturaleza. Un ejemplo de lo mencionado se puede observar en las Figuras 3.18, 3.19 y 3.20 donde se evidencia los efectos de difracción y reflexión al encontrarse con este tipo de estructuras de protección en la zona de estudio, siendo estos aspectos de gran importancia para el diseño e implementación.

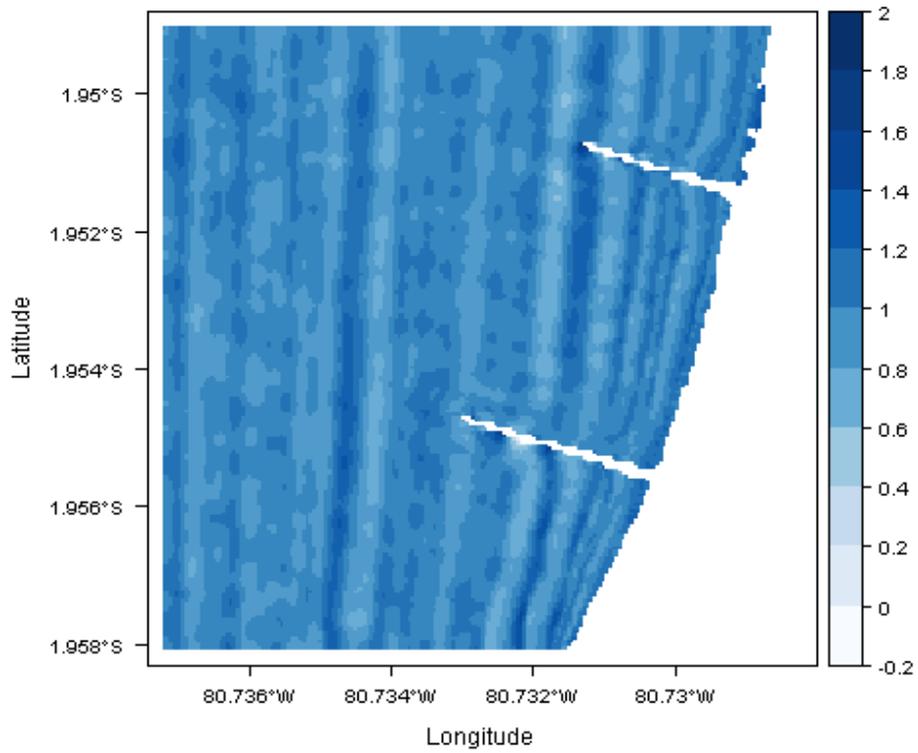


Figura 3.18 Simulación de batería de espigones. Fuente: (Autoras, 2022)

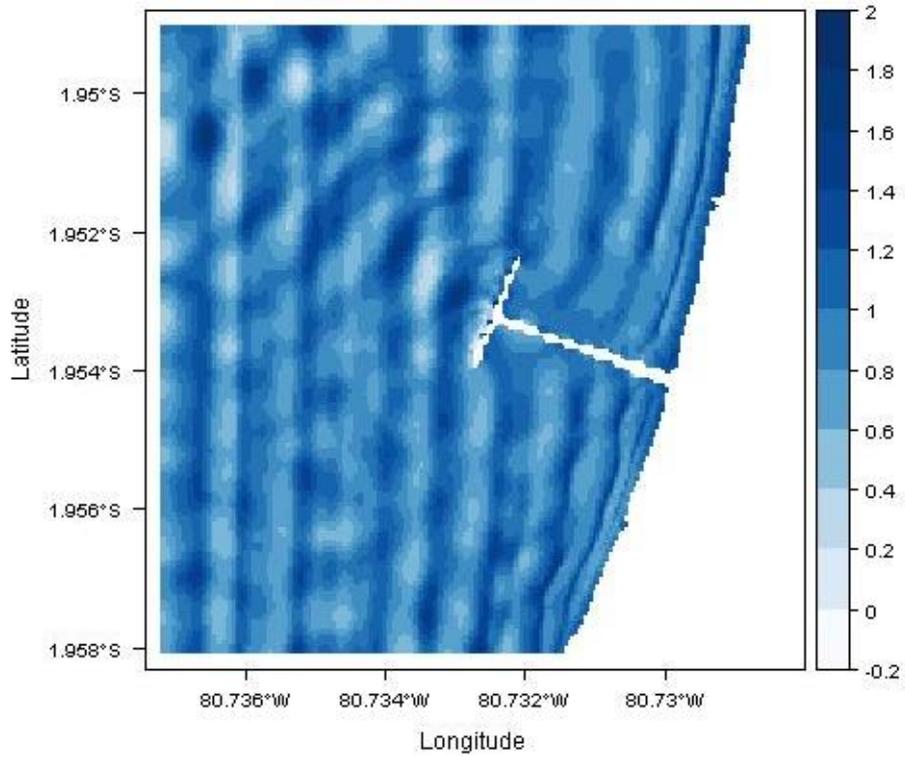


Figura 3.19 Simulación de rompeolas en T. Fuente: (Autoras, 2022)

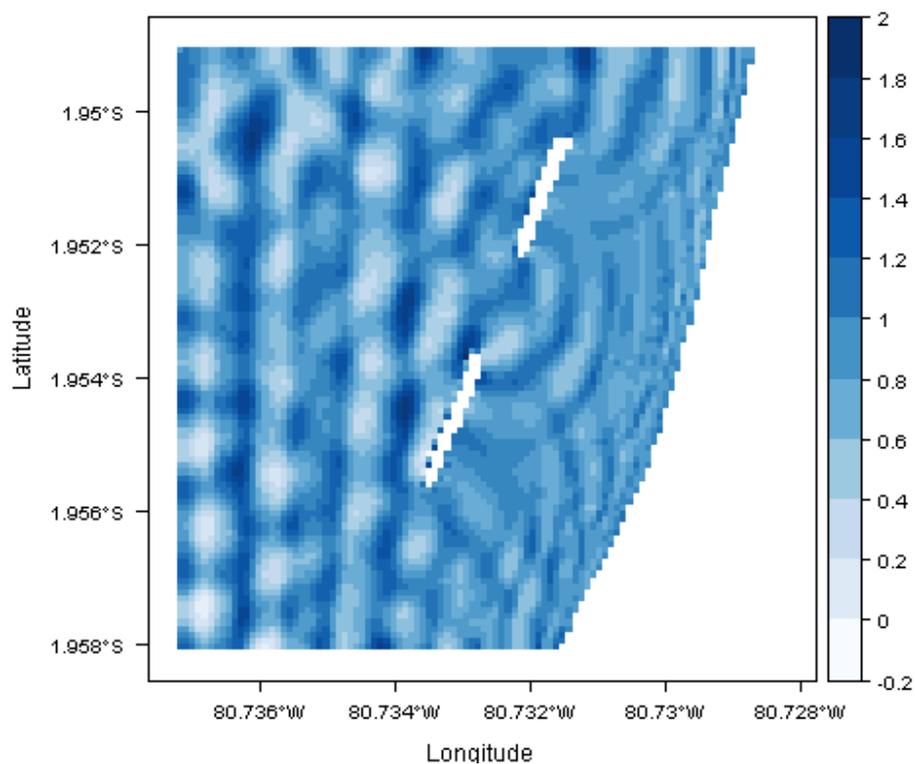


Figura 3.20 Simulación de rompeolas paralelos. Fuente: (Autoras, 2022)

3.6 Análisis de costos

En la Tabla 3.7 se muestra el detalle de los costos asociados al proyecto, por un lado, los softwares, modelos y datos no tuvieron costo alguno debido a que son de libre acceso, mientras que los costos de equipos y demás actividades fueron cubiertos por FIMCM – ESPOL, a diferencia del costo de la computadora que es propio del usuario.

**Tabla 3.7 Costos de los elementos usados en la realización del proyecto. Fuente:
(Autoras, 2022)**

Tipo	Elemento	Costos	Descripción
Software	DELFT 3D	N/A	Libre acceso
	SWASH	N/A	Libre acceso
	QGIS	N/A	Libre acceso
	R	N/A	Libre acceso
Equipos	Laptop	\$1 500	Procesador AMD RYZEN 7 5800U RAM 16 GB Almacenamiento 1 TB SSD Tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE 3050
	ADCP	\$34 000	FIMCM - ESPOL
Salida de campo	Transporte, alimentación, alojamiento, equipos.	N/A	FIMCM - ESPOL
Información	Imágenes satelitales, oleaje, vientos, mareas, rugosidad, batimetría global.	N/A	Libre acceso
	Cartas náuticas	\$20 c/u, \$40 total	CN_GEO_IOA105_2ED, CN_GEO_IOA1051_1ED, proporcionadas por el INOCAR en formato digital bajo ningún costo ya que fueron utilizadas con fines académicos.
	Información interna (Datos de oleaje)	N/A	FIMCM - ESPOL

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Los resultados obtenidos en punto estudiado en el modelo SWAN muestran un ajuste moderado en sus resultados respecto al olígrafo tanto para la altura y el período, indicando que el modelo replica estas variables adecuadamente, para el caso de la dirección se muestra un menor ajuste debido a la interferencia o ruido que genera la presencia del islote “El Pelado”.
- El uso de modelos computacionales integrados presenta un buen ajuste pues describe adecuadamente el oleaje de aguas profundas a someras, al finalizar las simulaciones y validaciones la altura significativa a lo largo de la playa de San Pedro presentó un error relativo menor al 10% entre el modelo SWASH y los datos de campo, destacando que frente al CENAIM se tienen las alturas de ola más altas siendo considerada la zona más energética de la playa.
- El uso de imágenes satelitales Sentinel 2A permite realizar una comparación visual y estadística con los modelos SWAN y SWASH obteniendo una buena alineación, al comparar los vectores de la dirección de oleaje extraídos de SWAN con las direcciones perpendiculares a los trenes se tiene un error absoluto promedio de 18.27° , por otro lado, la resolución de estas imágenes es buena pero no óptima y el proceso de vectorización está sujeto a la experticia del usuario.
- La sensibilidad de los parámetros de calibración de ambos modelos se evaluó de acuerdo a las limitaciones de cada uno; en el caso de SWAN son múltiples parámetros a modificar lo que conlleva un aumento de demanda computacional asociado a las múltiples corridas y a su vez la cantidad de archivos de salida a procesar es mayor, se analizó el caso particular del viento ya que se ingresa un valor puntual para toda la simulación lo que compromete los resultados, para el caso de SWASH los parámetros a modificar son limitados, de manera que se restringe el análisis a la variación de la resolución de la malla. Para ambos modelos la batimetría es un limitante ya que proviene de modelos globales con resolución gruesa y de levantamientos locales cuya resolución no es lo suficientemente fina.

- El proceso de validación de los modelos SWAN y SWASH es fundamental para evaluar la precisión y confiabilidad de los resultados, por lo que es necesario disponer de datos con buena resolución espacial y temporal, los cuales deben estar asociados a un buen registro y procesamiento, caso contrario se compromete la calidad de los resultados.
- Los resultados obtenidos muestran la importancia de implementar batimetrías con una resolución fina, es decir escalas menores a 1:25000 en áreas con presencia de obstáculos y que experimenten efectos de asomeramiento. Para el caso, la presencia del Islote El Pelado provocó inestabilidad en la dirección del oleaje del modelo SWAN, lo cual se puede asociar a la resolución de la batimetría utilizada puesto que no se describe de manera real el fondo marino, por ende, no simula de manera adecuada algunos procesos como difracción y reflexión. Por otro lado, al ser un modelo espectral los resultados en aguas someras están ligados a las restricciones propias del modelo.
- El modelo es replicable en otras zonas costeras utilizando la información disponible en modelos globales y datos locales en cuanto a calibración, sin embargo, para la validación es necesario tener datos de campo, en caso de no disponer de estos, realizar una visita de reconocimiento al lugar para definir puntos de monitoreo y posteriormente realizar levantamientos de información de manera periódica de acuerdo con las necesidades del proyecto.

4.2 Recomendaciones

Recomendaciones para el usuario:

- Utilizar una computadora con las siguientes características mínimas que igualen o superen los procesadores Intel i5 con al menos cuatro procesadores lógicos y cuatro núcleos, 4GB de RAM y 4GB de espacio libre en el disco duro.
- Priorizar el uso de batimetrías con resoluciones finas y actualizadas en zonas que presentan obstáculos como: islas, islotes, puertos, estructuras de protección, entre otras, para generar mayor precisión en los resultados obtenidos. Para esto se recomienda hacer levantamientos hidrográficos en transectos separados cada 50 o 60 m, y a lo largo de las mismas registrar datos de profundidad cada 1 o 2 m.
- Explorar el uso de imágenes satelitales Radar pues estas no se ven afectadas por la nubosidad, sin embargo, se debe considerar que es

necesario tener un conocimiento previo en el tema, requieren mayor tratamiento en el pre y postproceso y así mismo cada imagen tiene un tamaño considerable.

Recomendaciones para el cliente

- De acuerdo con la disponibilidad de datos globales y locales, además considerando que se usó cartas náuticas de aproximación a la costa de escala 1:25000 se le recomienda probar una resolución de grilla que se adapte a las características de la zona de estudio.
- Replicar este estudio en una zona con diferentes características morfológicas y evaluar la confiabilidad del modelo para definir en qué tipo de playas se describe mejor el comportamiento del oleaje.

Recomendaciones para ESPOL-FIMCM

- Realizar salidas de campo en las dos épocas del año como son la húmeda y seca, puesto que se cuenta con pocos datos que no consideran las variaciones estacionales del Ecuador, esto podrían ser realizado como parte de programas de vinculación y proyectos de los cursos.
- Extender el período de mediciones con el olígrafo (ADCP AWAC Nortek) incluso considerando otras zonas de estudio, para obtener series de tiempo más extensas y también realizar mantenimientos programados al equipo una vez fondeado, para evitar la acumulación de organismos marinos (biofouling) en los transductores lo que puede comprometer la calidad de los datos, además realizar un filtrado de estos para remover el ruido provocado por efectos de difracción y reflexión.
- Considerando la importancia del Islote El Pelado en el proceso de aprendizaje y formación de nuevos profesionales, se recomienda realizar un levantamiento hidrográfico (batimétrico) del lugar, explorar nuevos sitios de fondeo para el olígrafo y fomentar la participación de los estudiantes en el proceso.
- Para futuros levantamientos de datos de oleaje en la playa coordinar las fechas de sicigia/cuadratura, el paso del satélite y complementarlo con un levantamiento con dron para tener diversas fuentes de datos para el proceso de calibración y validación de los modelos computacionales.

- Por otro lado, explorar el uso del modelo SWASH como una herramienta académica ya que es un modelo de libre acceso que resuelve la fase de la onda y tiene aplicaciones dentro de la planificación y gestión costera ante amenazas como erosión e inundación.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, A., Benavides, A., & Jara, C. (2012). *Evaluación del uso turístico y recreativo del mirador de San Pedro (Issue 9)*.
- Andrade, G., & Maquilón, B. (2019). *Evaluación de diseños ingenieriles ante procesos erosivos costeros, utilizando modelos numéricos. Caso de Estudio: San Pedro, Santa Elena - Ecuador*. Guayaquil: ESPOL.
- Ayon, H., Boothroyd, J. C., Robadue, D. D., Visconez, J. J., & Noboa, R. (1994). *Características de la línea costera del Ecuador y recomendaciones para su manejo*. Guayaquil: ISBN 1-885454-00-7.
- Butunoiu, D., & Rusu, E. (2012). Sensitivity Tests with Two Coastal Wave Models. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 1332-1349. Recuperado el 04 de 01 de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/235923007_Sensitivity_tests_with_two_coastal_models?utm_source=twitter&rgutm_meta1=eHNsLUisWXdzQIVFcGZR U2x6QmRKSIlvVzQ1RFNkVVZkT0Q3RzBwekdQcHNvVWg2RWdrbmJucEVtS1FRQ0FRN1cxaWZuVXg1d1Y1Q0JjNmdlB2VJbHkrSkJNWW8%3D
- Cavaleri, L., Abdalla, S., Benetazzo, A., Bertotti, L., Bidlot, J.-R., Breivik, Ø., . . . Van der Westhuysen, A. (2018). Wave modelling in coastal and inner seas. *Progress in Oceanography*, 167, 164-233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.03.010>.
- Chaves Herrera, A. (2017). *Evaluación de la viabilidad de una red de boyas en aguas indefinidas mediante modelación numérica en la costa del Pacífico de Costa Rica*. Santander - España.
- De Ridder, M. (2018). *Non-hydrostatic wave modelling with improved dispersive behavior*. Deltares. Obtenido de https://www.slideshare.net/Delft_Software_Days/dsdint-2018-nonhydrostatic-wave-modelling-of-nearshore-processes-with-improved-dispersive-behaviour-de-ridder
- Deltares. (2018). *Delft3D-WAVE Simulation of short-crested waves with SWAN User Manual Hydro-Morphodynamics Version: 3.05*. The Netherlands: DELTARES.
- Enríquez, A., Marcos, M., Álvarez-Ellacuría, A., Orfila, A., & Gomis, D. (2016). *Changes in beach shoreline due to sea level rise and waves under climate change scenarios: application to the Balearic Islands (western Mediterranean)*. European Geosciences Union.

- GAD Parroquial Manglaralto. (2018). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019 – 2023*.
- Gómez Lahoz, M. (2014). Modelos de predicción de viento y oleaje. *II Maestría Interuniversitaria en Ingeniería de Puertos y Costas*. Las Palmas de Gran Canaria. Obtenido de <https://www.puertos.es/es-es/ROM/Documents/Modelos%20para%20prediccion%20de%20viento%20y%20oleaje.pdf>
- INOCAR. (2015). *Atlas Marino Costero del Ecuador*. Guayaquil: INOCAR.
- INOCAR. (2022). *Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada*. Obtenido de Monitoreo Oceánico: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/monitoreo-oceanico>
- Kar, A. (2017). *Wave transformation on shallow foreshores a study with SWAN and SWASH*. Holanda.
- MAATE, & PLANACC. (2021). *Programa de Capacitación sobre el modelo SWASH (Modelo numérico hidrodinámico de simulación de olas hasta la costa)*. Guayaquil.
- Muliati, Y., Lukman Tawekal, R., Wurjanto, A., Kelvin, J., & Setiyo Pranowo, W. (2018). Application of SWAN model for hindcasting wave height in Jepara coastal waters, North Java, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 15, 114-120. doi:<https://doi.org/10.21660/2018.48.56067>
- Munita, D. (2020). *Modelado de onda larga en el puerto de San Antonio, Chile, comparación entre MIKE 21 BW y SWASH*. Santiago de Chile.: Universidad de Chile.
- P. A., U., & Behera, M. R. (2021). On the improvements in nearshore wave height predictions using nested SWAN-SWASH modelling in the eastern coastal waters of India. *Ocean Engineering*, 236. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109550>
- Palemón, L. (2015). *Determinación del clima marítimo a partir de fallas en estructuras costeras: un problema inverso*. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rijnsdorp, D. (2016). *Modelling waves and their impact on moored ships*. DELTARES.
- Ruiz, V. (2002). *Estudio preliminar de la variación anual del hiperbentos intermareal de una playa arenosa de la provincia del Guayas (CENAIM-SAN PEDRO)*. ESPOL.
- Secretaria Nacional de Planificación. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial provincial 2015 – 2019*. Obtenido de http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0968580510001

_PDyOT%20%20SANTA%20ELENA%20DOCUMENTO_FINAL_16-05-2016_09-31-46.pdf

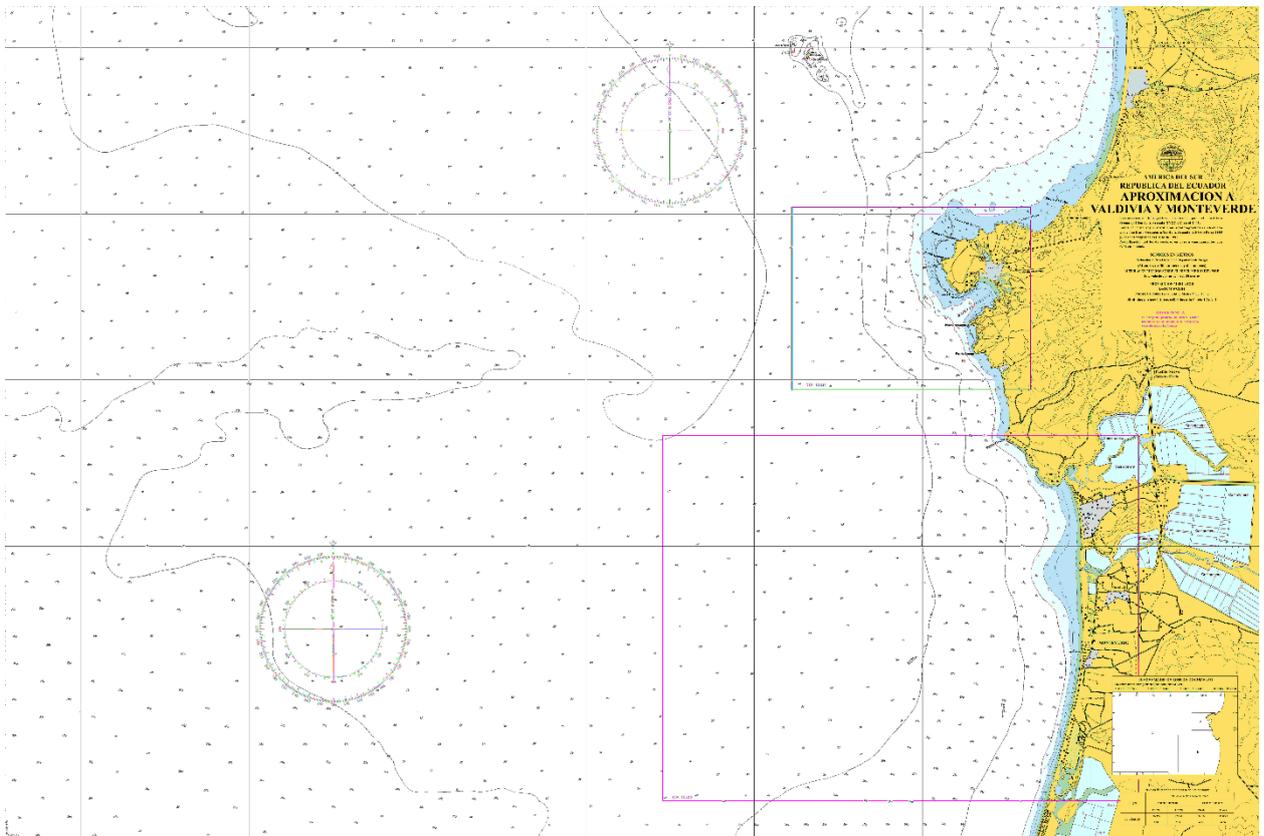
- Seibt, C., Peeters, F., Graf, M., Sprenger, M., & Hofmann, H. (2013). Modeling wind waves and wave exposure of nearshore zones in medium-sized lakes. *Limnology and Oceanography*, 58, 26-36. doi:10.4319/lo.2013.58.1.0023
- SIPA - MAG. (2021). *Sistema de Información Pública Agropecuaria del Ecuador*. Obtenido de GeoPortal del Agro Ecuatoriano: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Suzuki, T., Bolle, A., & Verwaest, T. (2012). *Wave penetration into a shallow marinacase study for Blankenberge in Belgium*. In *Book of abstracts of the 4th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection-Coastlab12* (pp. 17-20).
- The SWAN team. (2021). *User manual SWAN Cycle III version 41.31 AB*. Obtenido de https://swanmodel.sourceforge.io/online_doc/swanuse/swanuse.html
- The SWASH team. (2020). *SWASH user manual SWASH version 7.01*. Obtenido de https://swash.sourceforge.io/online_doc/swashuse/swashuse.html
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., . . . Rowe, C. M. (1985). Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. *Journal of Geophysical Research*, 90, 8995-9005.
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: an operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992 - 1012. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>.

APÉNDICES

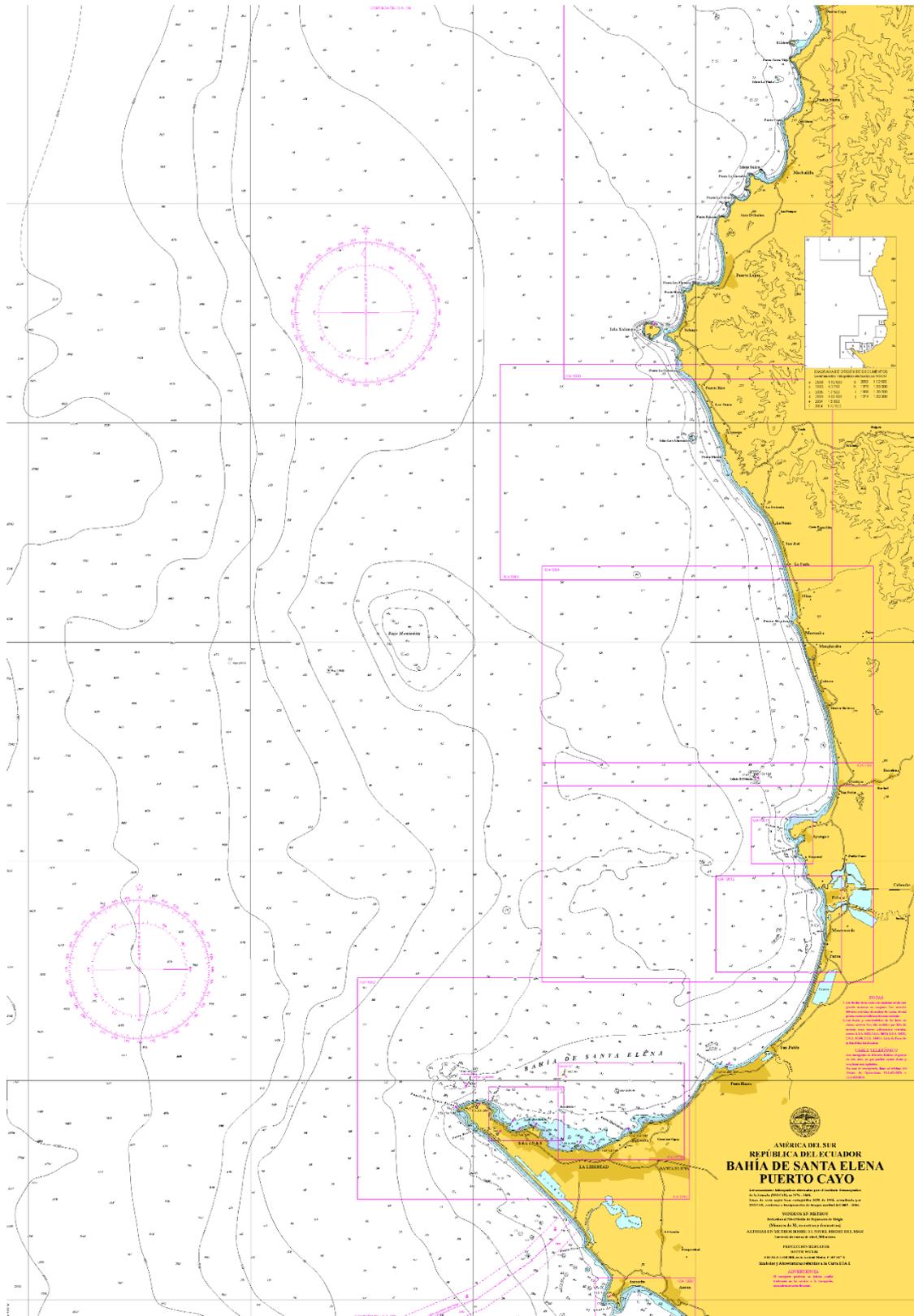
APÉNDICE A

CARTAS NÁUTICAS

CN_GEO_IOA1051_1ED_28112005



Apéndice A.1 Carta Náutica Aproximación Valdivia-Monteverde. Fuente: (INOCAR, 2005)



Apéndice A.2 Carta Náutica Bahía de Santa Elena – Puerto Cayo. Fuente: (INOCAR, 2012)

APÉNDICE B

DESCARGA DE DATOS ERDDAP

ERDDAP Easier access to scientific data log in | English Brought to you by NOAA/NMFS SWFSC ERD

ERDDAP > griddap > Data Access Form

Dataset Title: **WaveWatch III (WW3) Global Wave Model** [RSS](#)

Institution: Pacific Islands Ocean Observing System (PacIOOS) (Dataset ID: NWW3_Global_Best)

Information: [Summary](#) | [License](#) | [FGDC](#) | [ISO 19115](#) | [Metadata](#) | [Background](#) | [Make a graph](#)

Dimensions	Start	Stride	Stop	Size	Spacing
<input checked="" type="checkbox"/> time (UTC)	2022-02-28T18:00:00Z	1	2022-02-28T18:00:00Z	98122	1h 0m 37s (uneven)
<input checked="" type="checkbox"/> depth (m)	0.0	1	0.0	1	(just one value)
<input checked="" type="checkbox"/> latitude (degrees_north)	-77.5	1	77.5	311	0.5 (even)
<input checked="" type="checkbox"/> longitude (degrees_east)	0.0	1	359.5	720	0.5 (even)

Grid Variables (which always also download all of the dimension variables) [Check All](#) [Uncheck All](#)

- Tdir (peak wave direction, degrees)
- Tper (peak wave period, second)
- Thgt (significant wave height, meters)
- sdir (swell peak wave direction, degrees)
- sper (swell peak wave period, seconds)
- shgt (swell significant wave height, meters)
- wdir (wind peak wave direction, degrees)
- wper (wind peak wave period, seconds)
- whgt (wind significant wave height, meters)

File type: [\(more information\)](#)
 .htmlTable - View a UTF-8 .html web page with the data in a table. Times are ISO 8601 strings.
 Just generate the URL:
[\(Documentation / Bypass this form\)](#)

Submit (Please be patient. It may take a while to get the data.)

Apéndice B.1 Ventana de ERDDAP. 1) Especificaciones para la descarga de datos: Tiempo, profundidad, longitud y latitud. 2) Variables a descargar. 3) Tipo de archivo. 4) Generar datos. Fuente: (ERDDAP, 2021)

a

Dimensions	Start	Stride	Stop	Size	Spacing
<input checked="" type="checkbox"/> time (UTC)	2019-01-19T18:00:00Z	1	2019-02-19T18:00:00Z	98122	1h 0m 37s (uneven)
<input checked="" type="checkbox"/> depth (m)	0.0	1	0.0	1	(just one value)
<input checked="" type="checkbox"/> latitude (degrees_north)	-2.5	1	-1.5	311	0.5 (even)
<input checked="" type="checkbox"/> longitude (degrees_east)	278.5	1	279.5	720	0.5 (even)

b Click on the map to specify a new center point.
 Zoom: [Data](#) | [Out 8x](#) | [Out 2x](#) | [Out 1x](#) | [In 2x](#) | [In 8x](#)

Apéndice B.2 Especificaciones para la descarga de datos. a) Ingreso de los valores de acuerdo con los datos requeridos, b) Coordenadas de longitud y latitud se ingresadas de manera automática con la ayuda del visor de mapa. Fuente: (ERDDAP, 2021)

- Grid Variables** (which always also download all of the dimension variables)
- Tdir (peak wave direction, degrees) ?
 - Tper (peak wave period, second) ?
 - Thgt (significant wave height, meters) ?
 - sdir (swell peak wave direction, degrees) ?
 - sper (swell peak wave period, seconds) ?
 - shgt (swell significant wave height, meters) ?
 - wdir (wind peak wave direction, degrees) ?
 - wper (wind peak wave period, seconds) ?
 - whgt (wind significant wave height, meters) ?

Apéndice B.3 Selección de variables a descargar. Fuente: (ERDDAP, 2021).

The screenshot shows a dropdown menu with the following options:

- .asc - View OPeNDAP-style ISO-8859-1 comma-separated text.
- .csv - Download a ISO-8859-1 comma-separated text table (line 1: names; line 2: units; ISO 8601 times).
- .csvp - Download a ISO-8859-1 .csv file with line 1: name (units). Times are ISO 8601 strings.
- .csv0 - Download a ISO-8859-1 .csv file without column names or units. Times are ISO 8601 strings.
- .das - View the dataset's metadata via an ISO-8859-1 OPeNDAP Dataset Attribute Structure (DAS).
- .dds - View the dataset's structure via an ISO-8859-1 OPeNDAP Dataset Descriptor Structure (DDS).
- .dods - OPeNDAP clients use this to download the data in the DODS binary format.
- .esriAscii - Download an ISO-8859-1 ESRI ASCII file (latitude longitude data only; longitude must be all below or all above 180).
- .fgdc - View the dataset's UTF-8 FGDC .xml metadata.
- .graph - View a Make A Graph web page.
- .help - View a web page with a description of griddap.
- .html - View an OPeNDAP-style HTML Data Access Form.
- .htmlTable - View a UTF-8 .html web page with the data in a table. Times are ISO 8601 strings.
- .iso19115 - View the dataset's ISO 19115-2/19139 UTF-8 .xml metadata.
- .itx - Download an ISO-8859-1 Igor Text File. Each axis variable and each data variable becomes a wave.
- .json - View a table-like UTF-8 JSON file (missing value = 'null'; times are ISO 8601 strings).
- .jsonCSV1 - View a UTF-8 JSON Lines CSV file with column names on line 1 (mv = 'null'; times are ISO 8601 strings).
- .jsonCSV - View a UTF-8 JSON Lines CSV file without column names (mv = 'null'; times are ISO 8601 strings).
- .jsonKVP - View a UTF-8 JSON Lines file with Key:Value pairs (missing value = 'null'; times are ISO 8601 strings).
- .mat - Download a MATLAB binary file.
- .htmlTable - View a UTF-8 .html web page with the data in a table. Times are ISO 8601 strings.

Below the dropdown, there is a text input field with the URL: `https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/NWW3_Global_Best.htmlTable` and a button labeled "Just generate the URL:". To the right, a label says "Select the type of file you want to download." Below the URL field, there is a link: "(Documentation / Bypass this form) ?".

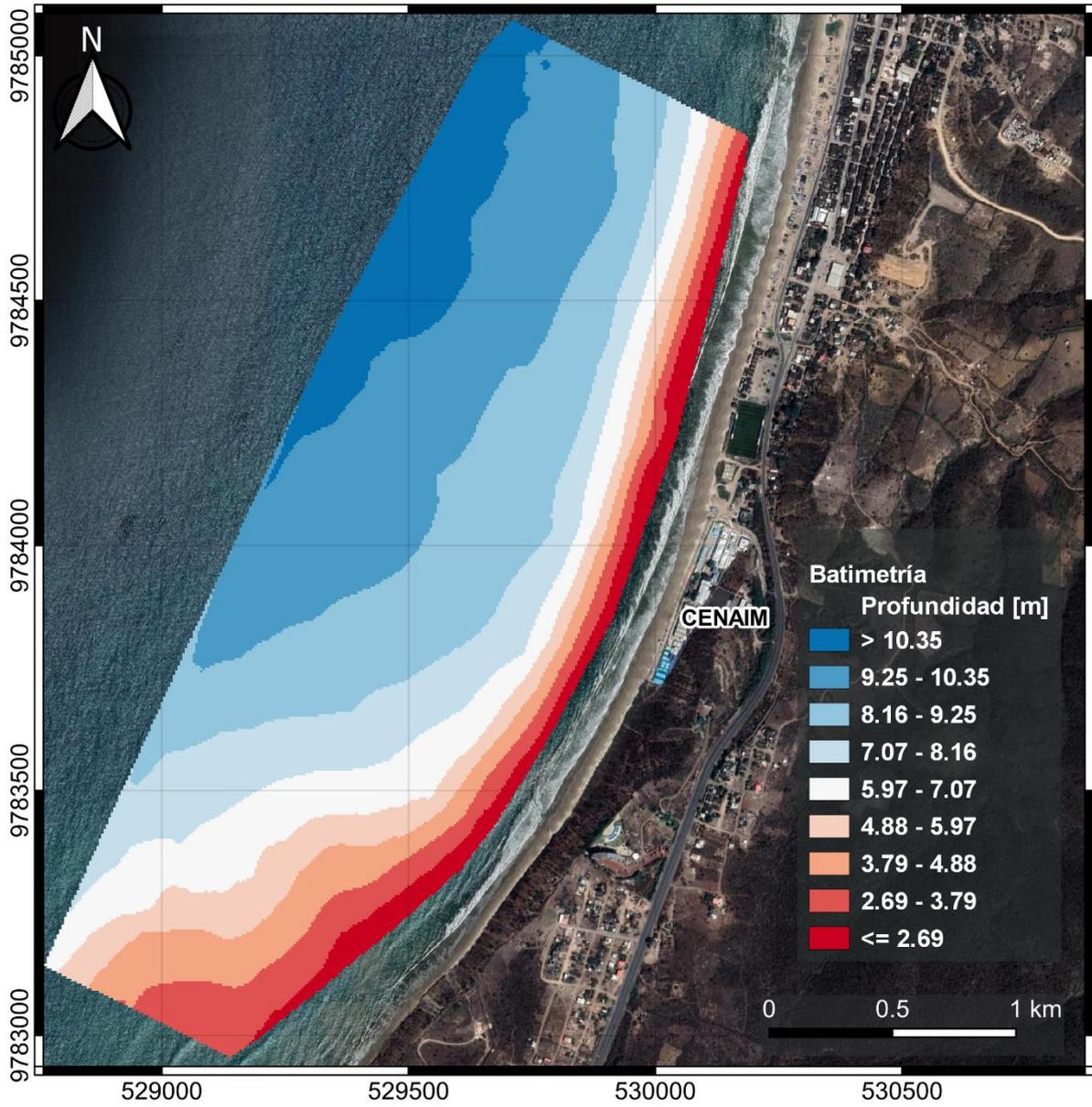
Apéndice B.4 Selección de tipo de archivo a generar. Fuente: (ERDDAP, 2021).

(Please be patient. It may take a while to get the data.)

Apéndice B.5 Generación de datos, Fuente: (ERDDAP, 2021)

APÉNDICE C

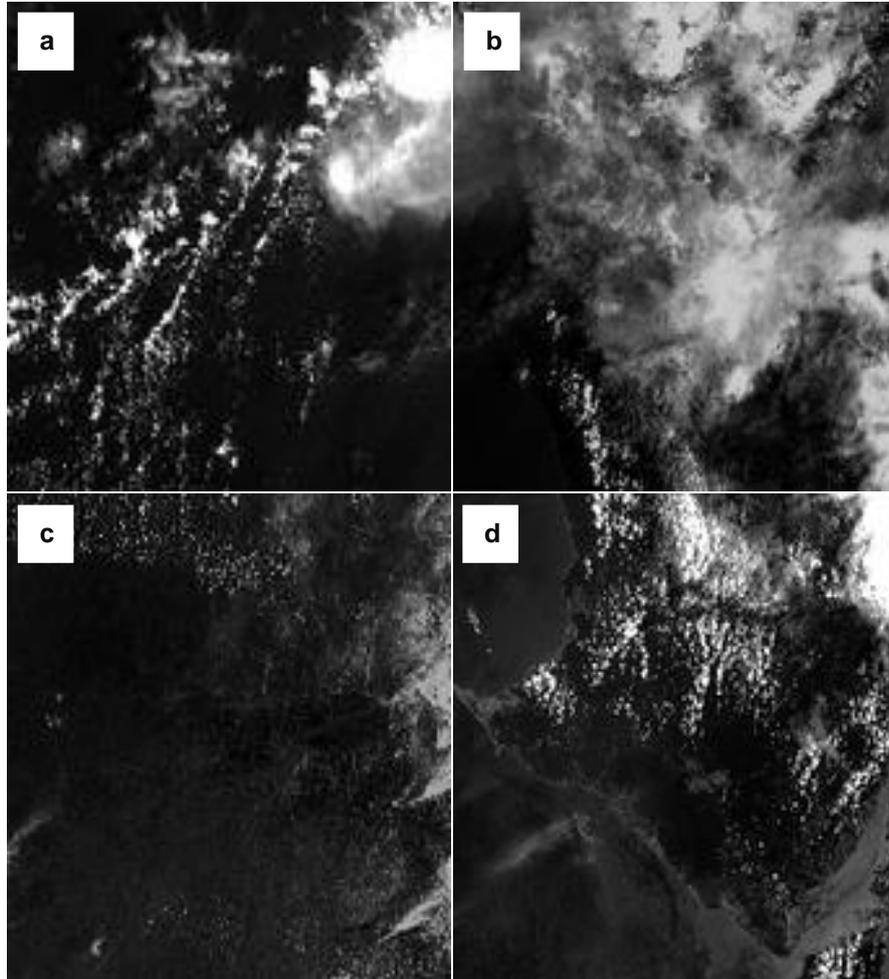
BATIMETRÍA SAN PABLO



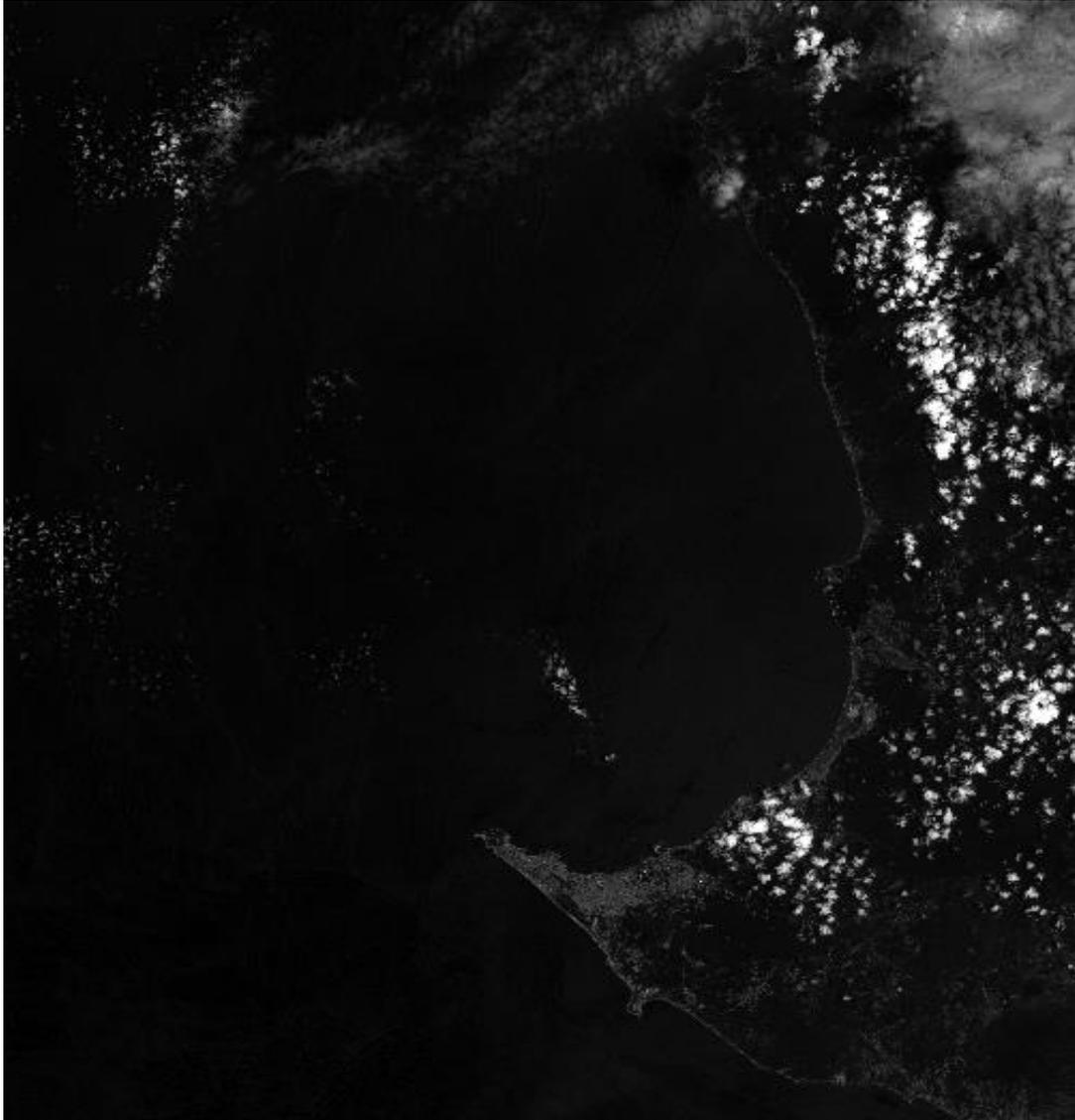
Apéndice C.1 Batimetría de San Pedro referida al NMM, Fuente: (ESPOL, 2019)

APÉNDICE D

IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2A: 1 DE MARZO DEL 2019



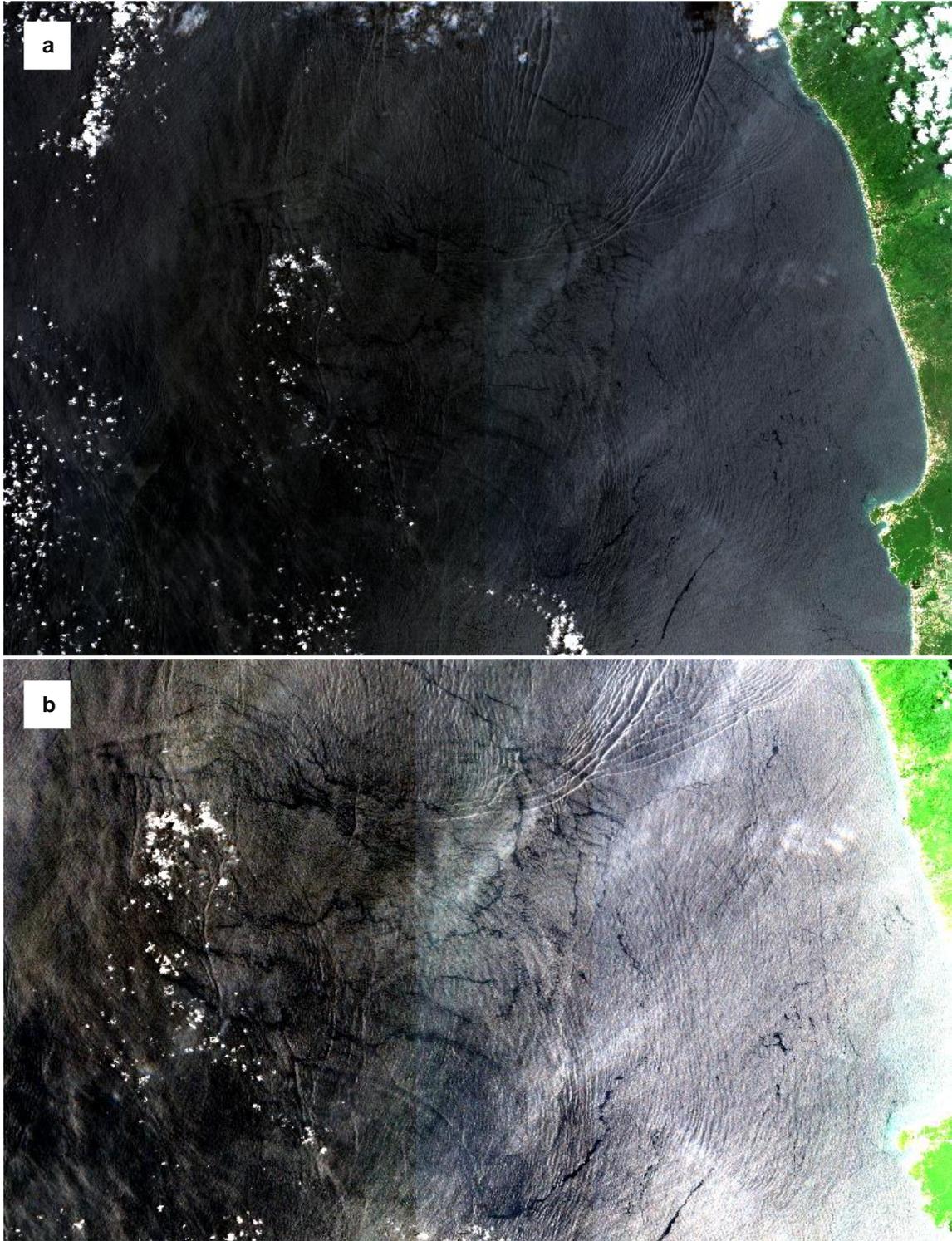
Apéndice D.1 Imágenes satelitales sin corrección atmosférica. a) y c) Área océano pacifico frente a Santa Elena. d) y d) costa y extensión de Santa Elena. Fuente: (Autoras, 2022).



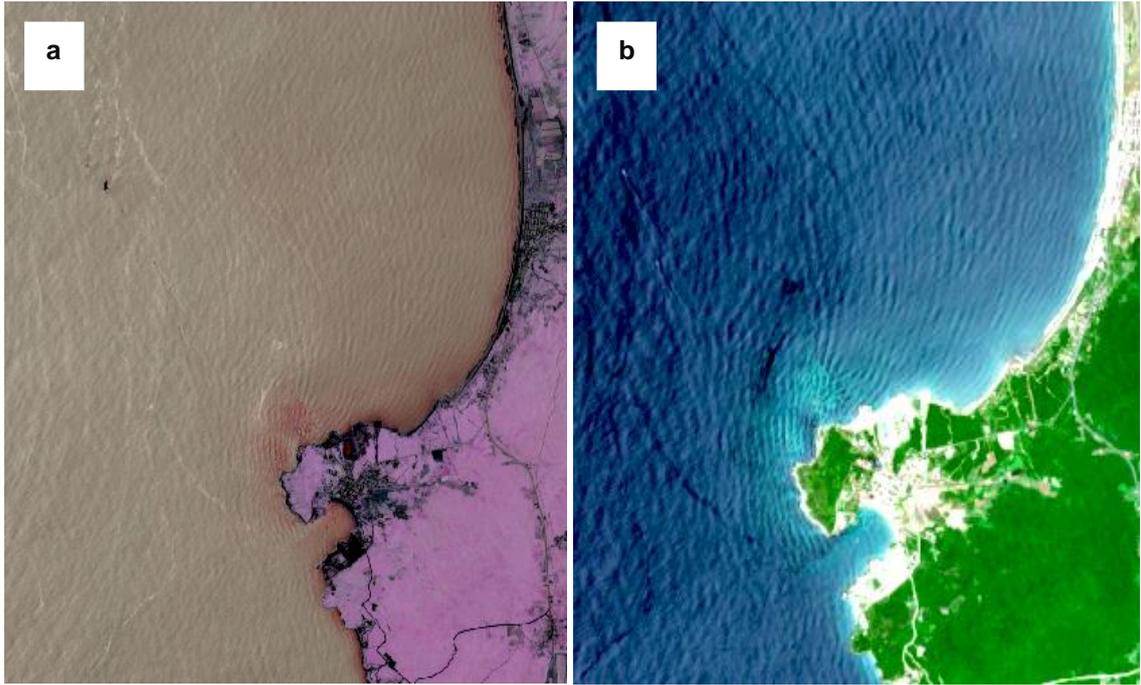
Apéndice D.2 Mosaico: Imagen satelital 1 de marzo 2019 Santa Elena. Fuente: (Autoras, 2022).



Apéndice D.3 Mosaico composición a color real, Imagen satelital 1 de marzo 2019 Santa Elena. Fuente: (Autoras, 2022).



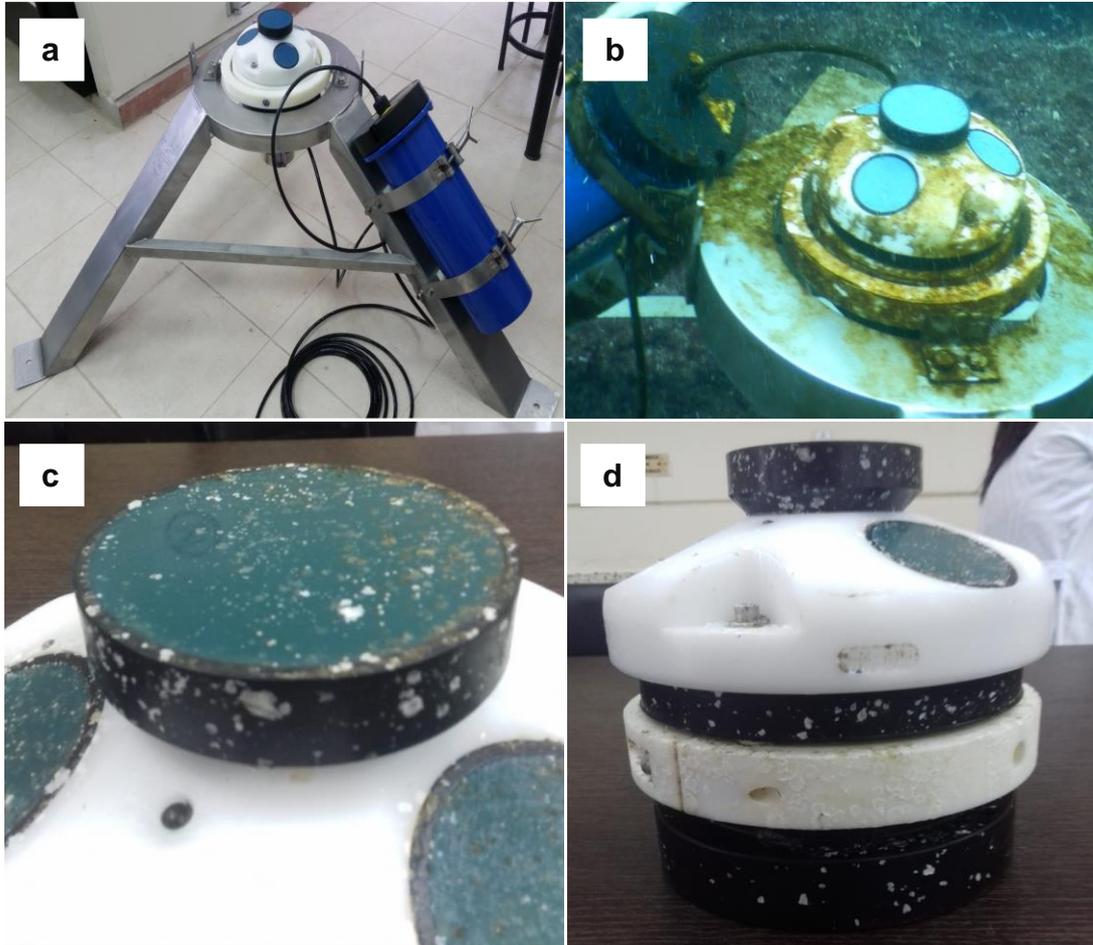
**Apéndice D.4 a) y b) Acercamientos y configuración de brillo, contraste y saturación.
Fuente: (Autoras, 2022)**



Apéndice D.5 Filtros y suavizados. Fuente: (Autoras, 2022)

APÉNDICE E

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO: OLÍGRAFO (ADCP AWAC NORTEK)



Apéndice E.1 a) Olígrafo (ADCP AWAC Nortek) posicionado en el armazón; b) Olígrafo fondeado a 10 m; c) Equipo recuperado luego de su misión, transductores con marcas de biofouling; d) Vista lateral del equipo recuperado. Fuente: (FIMCM, 2019).

Apéndice E.2 Tabla: especificaciones del fondeo.

Parámetros	Especificaciones
Coordenada	(9786233, 523096) UTM 17S
Profundidad	10 m
Celda	1 m
Sensor	AST, registra $[\eta]$
Registro de datos	Cada hora
Tasa de muestreo	1 Hz (ciclos/s).

APÉNDICE F

CÓDIGO PARA EJECUTAR SWASH

Adaptado y modificado del Programa de Capacitación sobre el modelo SWASH (Modelo numérico hidrodinámico de simulación de olas hasta la costa) (MAATE & PLANACC, 2021)

```
$*****HEADING*****  
$  
PROJ 'San Pedro' 'r01'  
$  
$***** INPUT*****  
$  
SET level = 0.2 depmin = 0.005 temp = 29.12 salinity = 33.09 NAUTICAL  
$  
MODE NONST TWOD  
$  
COORDINATES CART  
$  
CGRID REG xpc = 530322 ypc = 9782664 alpc = -270 xlenc = 2500 ylenc = 2500 mxc =  
499 myc = 499  
$  
VERT 1  
$  
INPGRID BOTTOM REG xpinp = 521741.762909349985 ypinp =  
9779357.824659999460 mxinp = 1369 myinp = 1244 dxinp = 10 dyinp = 10 EXCeption  
excval = -9999  
$  
INPGRID FRiction REG xpinp = 526952.190722186351 ypinp = 9782112.125721504912  
mxinp = 367 myinp = 355 dxinp = 9.960700742117 dyinp = 9.960700742117  
$  
INPGRID WIND REG xpinp = 522287.162444824 ypinp = 9779921.57949175 mxinp = 1  
myinp = 1 dxinp = 12999.999999999999 dyinp = 12900
```

\$

INPGRID PResure REG xpinp = 522287.162444824 ypinp = 9779921.57949175 mxinp
= 1 myinp = 1 dxinp = 12999.9999999999 dyinp = 12900

\$

READINP BOTTOM 1 'input.bot' 1 0 FREE

READINP FRiction 0.001 'input.rug' 1 0 FREE

READINP WIND 1 'input.wnd' 1 0 FREE

READINP PResure 1 'input.prs' 1 0 FREE

\$

INIT CON wlev = 0.2 vx = 0 vy = 0 tke = 0 epsilon = 0

\$

BOU SHAP JONswap

\$

BOU SEGMENT IJ 1 500 166 500 BTYPE WEAKrefl CON SPECT h= 0.85 per= 13 dir=
270.14 dd= 0 cycle= 30 MIN

\$

BOU SEGMENT IJ 167 500 333 500 BTYPE WEAKrefl CON SPECT h= 0.79 per= 13 dir=
270.39 dd= 0 cycle= 30 MIN

\$

BOU SEGMENT IJ 334 500 500 500 BTYPE WEAKrefl CON SPECT h= 0.86 per= 13 dir=
270.52 dd= 0 cycle= 30 MIN

\$

BOU SEGMENT IJ 1 1 500 1 BTYPE SOMMERfeld

\$

WIND FIT REL

\$

FRIC MANN

\$

VISC H SMAGorinsky

\$VISC V KEPS

\$

BREaking 0.6 0.3

\$

NONHYD BOX PREConditioner ILUD

\$
DISCRET UPW UMOM H BDF
DISCRET UPW WMOM H BDF
DISCRET UPW UMOM V FIRST
DISCRET UPW WMOM V FIRST
DISCRET CORRDEP MUScl
\$
BOTCEL MIN
\$
TIMEI METH EXPL 0.25 0.5
\$
\$***** REQUESTS *****
\$
QUANTITY HSIG WATL DEP VMAG VDIR MVMAG MVDIR HRUN BRKP SETUP excv
= -999
QUANTITY HSIG HRUN BRKP SETUP MVMAG MVDIR dur 25 min
OUTPut OPTIons BLOck 4 9999
\$
POINTS 'GAUGE1' 528093 9783909
POINTS 'GAUGE2' 528631 9783537
\$
TABLE 'GAUGE1' NOHEAD 'res_var_g1.tbl' TSEC WATL DEP VMAG VDIR OUTPUT
tbegblk = 000000.000 deltblk = 1 SEC
TABLE 'GAUGE2' NOHEAD 'res_var_g2.tbl' TSEC WATL DEP VMAG VDIR OUTPUT
tbegblk = 000000.000 deltblk = 1 SEC
\$
TABLE 'GAUGE1' NOHEAD 'avg_g1.tbl' HSIG MVMAG MVDIR SETUP
TABLE 'GAUGE2' NOHEAD 'avg_g2.tbl' HSIG MVMAG MVDIR SETUP
\$
GROUP 'RASTER' SUBGrid ix1=1 ix2=500 iy1=1 iy2=500
\$
BLO 'RASTER' NOHEAD 'ras_watl.asc' WATL OUTPUT tbegblk = 000800.000 deltblk =
10 SEC
\$

```
BLO 'RASTER' NOHEAD 'average_hsig.asc' HSIG
BLO 'RASTER' NOHEAD 'average_hrun.asc' HRUN
BLO 'RASTER' NOHEAD 'average_vmag.asc' MVMAG
BLO 'RASTER' NOHEAD 'average_vdir.asc' MVDIR
$
COMPUTE tbegin = 000000.000 deltc = 0.05 SEC tendc = 003000.000
STOP
```