

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



**ESTUDIO NUMÉRICO DEL POTENCIAL
ENERGÉTICO DEL OLEAJE EN LA ZONA DEL
PUERTO DE ACAJUTLA**

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA

PRESENTADO POR:

CARLOS JOSUÉ QUINTANILLA YANES

ASESORES:

M.Sc. FRANCISCO JOSÉ GAVIDIA MEDINA

B.Sc. ROBERTO JOSE DIMAS VALLE

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ALARCÓN

FISCAL GENERAL:

LIC. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARÍN

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
MATEMÁTICA**

DECANO:

LIC. MAURIO HERNÁN LOVO

SECRETARIO DE FACULTAD:

LIC. JAIME HUMBERTO SALINAS ESPINOZA

Índice general

1.	Resumen	VII
2.	Introducción	VIII
3.	Objetivos	1
4.	Marco Teórico	2
4.1.	Generalidades	2
4.2.	Elementos básicos de una ola	4
4.2.1.	Parámetros independientes	4
4.2.2.	Parámetros dependientes	4
4.3.	Clasificación del oleaje	6
4.3.1.	Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa	6
4.3.2.	Clasificación de las ondas según su periodo y frecuencia	6
4.3.3.	Oleaje generado por viento	7
4.3.4.	Oleaje local o <i>sea</i>	7
4.3.5.	Oleaje de fondo o <i>swell</i>	8
4.4.	Modelo SWAN	9
4.4.1.	Antecedentes históricos	9
4.4.2.	Ecuaciones gobernantes	10
4.4.3.	Términos fuente y sumideros	12
4.5.	Potencia del oleaje	15
5.	Metodología	17
5.1.	Recopilación de información	17
5.1.1.	Geometría de la Cuenca	17
5.1.2.	Campo de vientos	18
5.1.3.	Oleaje	19
5.2.	Simulación de oleaje	20
5.2.1.	Definición de mallas computacional	20
5.3.	Validación	21
5.4.	Calibración	23
6.	Resultados	24
6.1.	Junio 2017	24
6.2.	Julio 2017	25
6.3.	Agosto 2017	27
6.4.	Septiembre 2017	29
6.5.	Octubre 2017	31
6.6.	Noviembre 2017	33
6.7.	Diciembre 2017	35
6.8.	Enero 2018	37

ÍNDICE GENERAL

6.9.	Febrero 2018	39
6.10.	Marzo 2018	41
7.	Análisis de Resultados	43
7.1.	Climatología del oleaje	43
7.1.1.	Estaciones del año	43
7.1.2.	Estadísticas mensuales	44
8.	Conclusiones	47
9.	Recomendaciones	48
10.	Bibliografía	49
A. Conversión de componentes a magnitud y dirección de viento		51
B. Formato de datos de entrada		52

Índice de tablas

1.	Características del viento y oleaje.	3
2.	Clasificación de las olas por su periodo	6
3.	Definición de mallas computacionales	20
4.	Comparación estadística entre SWAN y ADCP. Julio 2017	25
5.	Comparación estadística entre SWAN y ADCP. Agosto 2017	27
6.	Comparación estadística entre SWAN y ADCP. Septiembre 2017	29
7.	Comparación estadística entre SWAN y ADCP. Octubre 2017	31
8.	Comparación estadística entre SWAN y ADCP. Noviembre 2017	33
9.	Comparación estadística entre SWAN y ADCP. Diciembre 2017	35
10.	Comparación entre SWAN y ADCP. Enero 2018	37
11.	Comparación entre SWAN y ADCP. Febrero 2018	39
12.	Comparación entre SWAN y ADCP. Marzo 2018	41
13.	Estadísticos estacionales de Altura significativa	43
14.	Estadísticos estacionales de Periodo	44
15.	Estadísticos estacionales de Dirección	44
16.	Estadísticos estacionales de Energía potencial	44
17.	Estadísticos mensuales de Altura significativa	45
18.	Estadísticos mensuales de Periodo	45
19.	Estadísticos mensuales de Dirección	46
20.	Estadísticos mensuales de Energía potencial del oleaje	46

Índice de figuras

1.	Mapa de resultados de periodo de modelo WAVEWATCHIII	IX
2.	Zona de estudio	2
3.	Características de una ola	5
4.	Periodo-energía de las ondas	7
5.	Zona de generación	8
6.	Mapa batimétrico de zona de estudio	17
7.	Nodos de forzamiento y punto de comparación	18
8.	Definición de malla computacional	21
9.	Mediciones en campo a partir de ADCP. Datos de altura significativa, periodo y dirección.	21
10.	Serie de calibración. Altura significativa, Junio 2017. Fuente: Elabo- ración propia	23
11.	Resultados de Junio 2017	24
12.	Potencia de Junio 2017	25
13.	Resultados de Julio 2017	25
14.	Energía potencial de Julio 2017	26
15.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN.Julio 2017. Fuente: Elaboración propia	26
16.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras.Julio 2017. Fuente: Elaboración propia	27
17.	Resultados de Agosto 2017	27
18.	Energía potencial de agosto 2017.Fuente: Elaboración propia	28
19.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN.Agosto 2017. Fuente: Elaboración propia	28
20.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras.Agosto 2017. Fuente: Elaboración propia	29
21.	Resultados de Septiembre 2017	29
22.	Energía potencial de septiembre 2017.Fuente: Elaboración propia	30
23.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN.Septiembre 2017. Fuente: Elaboración propia	30
24.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras.Septiembre 2017. Fuente: Elaboración propia	31
25.	Resultados de Octubre 2017	31
26.	Energía potencial de octubre 2017.Fuente: Elaboración propia	32
27.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Octubre 2017. Fuente: Elaboración propia	32

28.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Octubre 2017.Fuente: Elaboración propia	33
29.	Resultados de Noviembre 2017	33
30.	Energía potencial de noviembre 2017. Fuente: Elaboración propia . . .	34
31.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Noviembre 2017. Fuente: Elaboración propia	34
32.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras.Noviembre 2017. Fuente: Elaboración propia	35
33.	Resultados de Diciembre 2017	35
34.	Energía potencial de diciembre 2017.Fuente: Elaboración propia. . . .	36
35.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Diciembre 2017.Fuente: Elaboración propia.	36
36.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Diciembre 2017. Fuente: Elaboración propia.	37
37.	Resultados de Enero 2018	37
38.	Energía potencial de enero 2018. Fuente: Elaboración propia.	38
39.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Enero 2018.Fuente: Elaboración propia.	38
40.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Enero 2018. Fuente: Elaboración propia.	39
41.	Resultados de Febrero 2018	39
42.	Energía potencial de febrero 2018. Fuente: Elaboración propia.	40
43.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Febrero 2018. Fuente: Elaboración propia.	40
44.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Febrero 2018. Fuente: Elaboración propia.	41
45.	Resultados de Marzo 2018	41
46.	Energía potencial de marzo 2018. Fuente: Elaboración propia	42
47.	Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Marzo 2018. Fuente: Elaboración propia.	42
48.	Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Marzo 2018. Fuente: Elaboración propia.	43
0.1.	Formato de batimetría	52
0.2.	Formato de archivo de forzamiento	53

Lista de siglas y abreviaturas

- ADCP- Perfilador Acústico del efecto Doppler.
- CEPA- Comisión Ejecutiva Portuaria Autónoma.
- CFSv2- Sistema de Pronóstico Climático versión 2.
- Dp- Dirección de la ola.
- Hs- Altura significativa.
- MARN- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MM5- Modelo de mesoescala.
- NCEP- Centro Nacional para la Predicción Ambiental.
- NDBC- Centro Nacional de Datos de Boya.
- NOAA- Administración Oceánica y Atmosférica.
- POMA. Pronóstico de Oleaje con Modelos Acoplados.
- SWAN- Simulating Nearshore Waves.
- TOMAWAC- Modelo de propagación en zonas costeras.
- Tp- Periodo significativo.
- WAM- Wave Modeling.
- WW3- Wavewatch III.

1. Resumen

En este trabajo de graduación se implementó un modelo numérico local denominado Simulating Nearshore Waves (SWAN) a fin de determinar las principales características del oleaje (altura, periodo y dirección) frente a la zona del puerto de Acajutla, estimando el potencial energético que recibió este fragmento de la costa de El Salvador entre junio 2017 y marzo 2018. Para ello se utilizaron variables de entrada compuestas por la batimetría proporcionada por la Comisión Ejecutiva Portuaria Autónoma (CEPA), los datos de viento superficiales registrados por el Sistema de Pronóstico Climático versión 2 (CFS v2) del Centro Nacional para la Predicción Ambiental (NCEP), y para la condición de contorno del oleaje, se utilizaron datos procesados por el modelo global Wavewatch III (WW3).

El modelo se ejecutó en modo estacionario que tiene un desfase temporal al no contemplar el tiempo necesario para que el oleaje atreviese del área de interés. Para comparar los resultados obtenidos mediante la simulación se utilizó los valores medidos por un Perfilado Acústico de Efecto Doppler (ADCP) propiedad del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ubicado a 4km del puerto de Acajutla y a 20 metros de profundidad. Como resultado se obtuvo un coeficiente de correlación entre la simulación y la medición de -0.62 para el primer mes. Una vez corregido este desfase temporal el coeficiente de correlación fue de 0.79 para la serie de altura significativa entre simulación y medición. Además, se realizaron comparaciones entre el parámetro de contorno del oleaje descargados del WW3 con las simulaciones ejecutadas con SWAN, para evaluar la propagación del oleaje a lo largo del dominio del modelo.

Entre junio 2017 y marzo 2018 los valores promedio del oleaje obtenido numéricamente con en aguas poco profundas frente a la zona del puerto de Acajutla, presentó una altura significativa promedio de 0.99 metros, una dirección de 204.41° y un periodo de 14.67 segundos. De acuerdo a las simulaciones resultantes, la estación lluviosa contiene indicadores más energéticos con un valor promedio de **9.8 kW/m**. Los meses más energéticos fueron julio y octubre con datos promedio de **10.60 kW/m** y **11.27 kW/m** respectivamente, mientras que febrero disminuyó hasta **8.90 kW/m**, evidenciando la influencia de los vientos Norte en el país.

2. Introducción

A lo largo de los 321km de costa que pertenecen al espacio marítimo de El Salvador, se realizan actividades económicas, turísticas y deportivas que aprovechan el fenómeno del oleaje para su beneficio. Conocer el comportamiento de las olas, su generación y propagación a lo largo del territorio, es fundamental para garantizar el desarrollo sostenible de los fines antes mencionados.

En el 2007 ingenieros de la Universidad de El Salvador realizaron un estudio titulado: *Evaluación del potencial energético del oleaje en las costas de El Salvador* en el cuál tenían como objetivo de su investigación calcular el flujo de energía del oleaje marino, esto se realizó cuantificando las variables representativas: Altura significativa, periodo y dirección de propagación del oleaje. El lugar de la zona de estudio fue la playa Mizata, en las costas de La Libertad, donde se tenían datos medidos por una sonda oceanográfica ADV Triton instalada a 150 metros de la línea de costa, 6-8 metros de profundidad, registrando datos durante 42 días.

Recinos 2013 presentó resultados de la distribución espectral de la energía del oleaje en función de la frecuencia y dirección. Con esto se caracterizó y cuantificó la energía de las olas en Mizata, La Libertad. Esto se realizó para establecer si el oleaje generado por la fuerza del viento era una opción viable para utilizar como fuente de energía eléctrica. Para ello se midieron parámetros oceanográficos que se relacionan directamente con la cantidad de energía por la ola, velocidad y altura significativa, que fueron medidos por medio de un Velocímetro Acústico Doppler.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales con el fin de vigilar los procesos y fenómenos naturales que podían afectar a la población en la zona costera marina, instaló en septiembre de 2012 dos perfiladores acústicos de corriente y oleaje (AWAC/NORTEK) uno en la zona del Puerto de Acajutla y el otro en el puerto de La Unión. Con los resultados obtenidos con el ADCP del puerto de Acajutla se caracterizó el comportamiento del oleaje, teniendo como resultado el conocimiento de que la dirección del transporte depende del agente que transfiere cantidad de movimiento a la columna de agua.

El MARN utiliza el modelo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) por sus siglas en inglés, para predecir el comportamiento del oleaje a partir del campo de viento. Gracias a este modelo el MARN analiza el comportamiento del oleaje y a partir de ello, publica informes periódicos oceanográficos y emite alertas tempranas de sistemas atmosféricos que puedan ocasionar afectaciones en el país.

2. INTRODUCCIÓN

El modelo a gran escala utilizado por la NOAA es WAVEWATCH III (WW3) y se emplea en zonas de agua profunda. La figura 1. es un mapa vectorial del periodo que afecta a las costas de la región centroamericana, en el caso de El Salvador el periodo oscila entre 14 – 16 segundos. Además representa las limitaciones (zona en blanco) de las estimaciones posibles, a medida que se acerca a la zona costera. Por lo anterior, es necesario utilizar un modelo local que complemente y genere los datos de la zona marítima que no se recopila en el WW3.

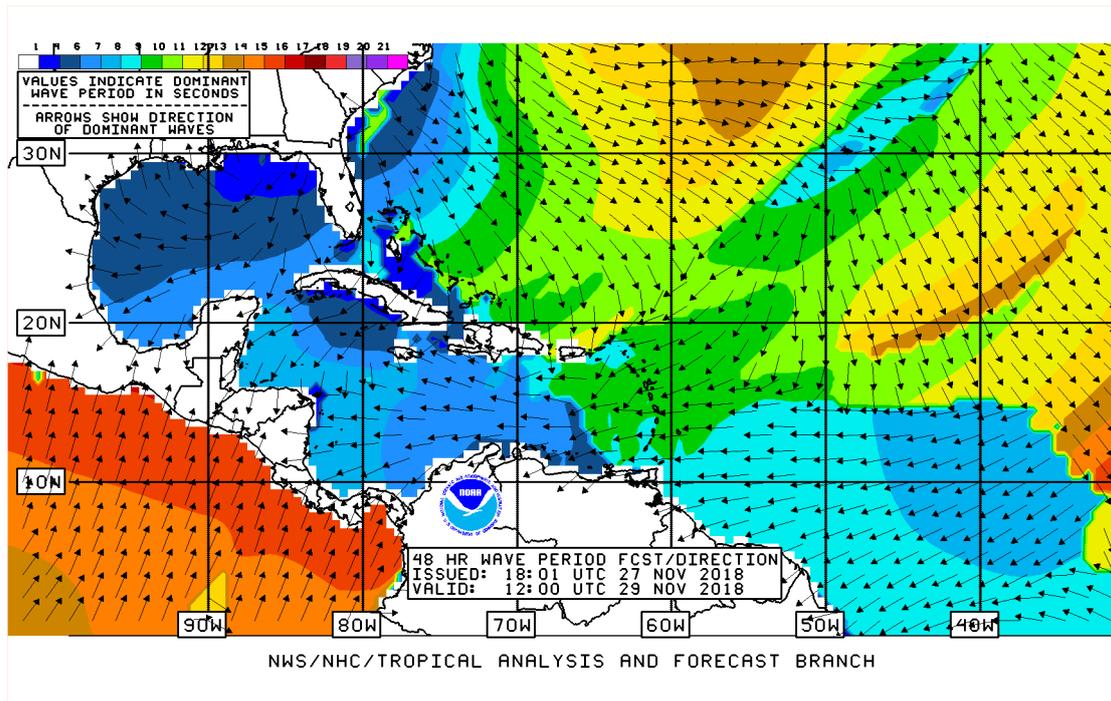


Figura 1: Resultado del modelo WAVEWATCH III a gran escala, imagen tomada de la NOAA.

SWAN es un modelo de tercera generación desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft, para obtener estimaciones realistas de parámetros de olas en áreas costeras, lagos y estuarios a partir del viento, el fondo (batimetría) y condiciones actuales. Al igual que el modelo utilizado por el MARN, es posible estimar el comportamiento del oleaje con la ventaja de considerar el fondo marino [Booij et al., 1997].

Este trabajo de grado utilizó información de la batimetría, viento y oleaje como condiciones iniciales para que el modelo propagará el oleaje desde zonas más profundas hasta zonas poco profundas, describiendo las tres principales variables oceanográficas del fenómeno en la zona del puerto de Acajutla: altura, periodo y dirección. La altura es el doble de la distancia vertical que hay desde el nivel del mar hasta la parte más alta de la ola conocida como cresta. El período es el tiempo que transcurre entre el paso de la cresta de una ola y la siguiente; y la dirección es de donde provienen las olas.

2. INTRODUCCIÓN

La red de vigilancia del estado del mar del MARN está conformado por 2 ADCP (Acajutla y La Unión), 3 mareógrafos (Acajutla, La Libertad y La Unión) y 2 cámaras (Acajutla y La Libertad) para monitoreo de los fenómenos del océano. Para validar la investigación se trabajó con los datos medidos por el ADCP ubicado a 4km del puerto de Acajutla, el cual contiene información de una serie de oleaje producido por el paso de fenómenos atmosféricos por el Pacífico que influenciaron significativamente entre junio de 2017 y marzo de 2018. Los resultados de la simulación deberán mostrar si el modelo captura de forma adecuada las tendencias de crecimiento y decrecimiento del oleaje medido tanto en la época de vientos débiles, como en la época de vientos fuertes. [Osorio Arias et al., 2010]

3. Objetivos

Objetivo General

- Describir las características físicas del oleaje en la zona del puerto de Acajutla por medio del modelo SWAN.

Objetivos específicos

- Generar la geometría de la cuenca del sistema para la predicción del oleaje en aguas someras.
- Generar un campo de viento como condiciones iniciales del sistema para la predicción del oleaje en aguas someras.
- Generar las condiciones de frontera (oleaje en aguas profundas) del sistema para la predicción del oleaje en aguas someras.
- Ejecutar el modelo SWAN para simular numéricamente el oleaje en la zona del puerto de Acajutla.
- Validar la simulación con las mediciones del oleaje obtenidas por el sensor ubicado en la zona de interés.

4. Marco Teórico

4.1. Generalidades

La línea de costa de El Salvador tiene una longitud de 321 kilómetros desde el río Paz, frontera con Guatemala hasta el golfo de Fonseca, compartido con Honduras y Nicaragua. La cordillera del Bálsamo, la sierra de Jucuarán, y el volcán de Conchagua, dividen el paisaje costero en varias secciones de oeste a este.

Enfocándonos en el área de estudio se encuentra la planicie costera de Occidente que se extiende entre el estuario del río Paz y punta Remedios y se caracteriza por playas extendidas intercaladas por estuarios que forman lagunas costeras. Un rasgo distintivo de la línea de costa en esta primera sección es punta Remedios al sureste del Puerto de Acajutla siendo una terraza extendida dentro del mar, constituyéndose en un arrecife rocoso con parches de coral a profundidades mayores a 20 metros. Otra sección es la costa acantilada asociada a la cordillera del Bálsamo que se extiende entre Acajutla y La Libertad y se caracteriza por farallones y terrazas formadas por las estrías de la sierra, con alturas mayor a 30 metros de altitud sobre el nivel del mar.(ver Figura 2) [MARN, 2007]

La batimetría de la zona se caracteriza por un cambio abrupto de profundidad en los primeros 50 metros de fondo marino donde es común encontrar paredes verticales de sustrato rocoso de 50 metros o más de profundidad. [MARN, 2007]

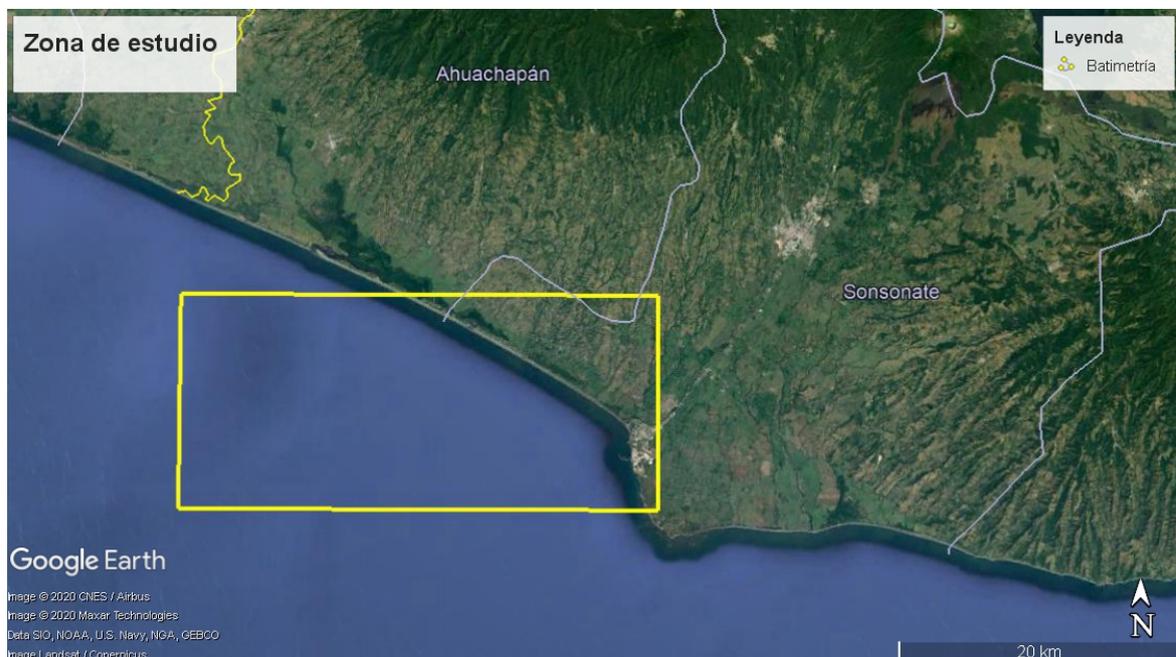


Figura 2: Zona de estudio con 596.23 km^2 de área.

4. MARCO TEÓRICO

El oleaje en aguas poco profundas en El Salvador tiene como características promedio: altura significativa, 1.2 ± 0.4 m; período, 12.5 ± 2.9 segundos, dirección, $197^\circ \pm 44^\circ$, por lo que se clasifica como altura pequeña generado por tormentas lejanas localizadas al Sur-suroeste. Períodos de entre 9.6 y 15.4 segundos, es decir, en su mayoría mar de leva de velocidad regular. El oleaje tiene direcciones entre 153° y 241° es decir en su mayoría proviene del cuadrante suroeste-sureste. El viento tiene como características promedio: velocidad del viento, 3.9 ± 2.0 m/s; dirección, $138^\circ \pm 107^\circ$, por lo que se clasifica de brisa suave a brisa moderada proveniente de los cuadrantes suroeste-sureste y sureste-noreste. Este tiene velocidades entre 1.9 y 5.9 m/s. El viento tiene direcciones entre 31° y 245° siendo la más frecuente 45° es decir noreste. [Herrera, 2009]

El oleaje en aguas profundas en cambio tiene como características promedio: altura significativa, 1.4 ± 0.4 m; período, 12.2 ± 3.3 segundos, dirección, $192^\circ \pm 53^\circ$, por lo que se clasifica como altura pequeña generado por tormentas lejanas localizadas al Sur-suroeste. Este tiene períodos entre 8.9 y 15.5 segundos. El oleaje tiene direcciones entre 139° y 245° , es decir, en su mayoría proviene del cuadrante suroeste-sureste.

El viento tiene como características promedio: velocidad del viento, 4.6 ± 2.6 m/s; dirección, $142^\circ \pm 107^\circ$, por lo que se clasifica de brisa suave a brisa moderada proveniente de los cuadrantes suroeste-sureste y sureste-noreste. Este tiene velocidades entre 2.0 y 7.2 m/s. El viento tiene direcciones entre 35° y 249° siendo la más frecuente 90° es decir este. [Herrera, 2009]

Tabla 1: Características del viento y oleaje.

	H_s (m)	T_p (s)	D_p (θ)	Viento (m/s)
Aguas Poco profundas	1.2 ± 0.4	12.5 ± 2.9	$197^\circ \pm 44^\circ$	3.9 ± 2.0 $138^\circ \pm 107^\circ$
Aguas Profundas	1.4 ± 0.4	12.2 ± 3.3	$192^\circ \pm 53^\circ$	4.6 ± 2.6 $142^\circ \pm 107^\circ$

Donde:

- H_s es la altura significativa.
- T_p es el periodo de la ola.
- D_p es la dirección de donde proviene el oleaje.

4.2. Elementos básicos de una ola

Las olas se caracterizan por tener elevaciones, llamadas, crestas, que es la convexidad hacia la superficie que se eleva sobre el nivel medio del mar y un valle que es la concavidad bajo el nivel medio del mar o depresiones (Figura 3).

Las olas se caracterizan por variables que pueden ser medidos directamente en campo (variables independientes) y variables que pueden ser obtenidas de las variables independientes, mediante fórmulas teóricas (variables dependientes).

4.2.1. Parámetros independientes

- **Altura (H):** Distancia vertical entre una cresta y un valle consecutivos. Las alturas de las olas del mar de fondo se clasifican en:

Baja	0-2 m
Moderada	2-4m
Grande	Más de 4m

- **Período(T):** Tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas (o dos valles) consecutivos por un mismo lugar.
- **Longitud (L):** Distancia entre dos crestas consecutivas, desde los valles o desde las crestas. La longitud de las olas de mar de fondo se clasifican en:

Corta	0-100m
Media	100-200m
Larga	Más de 200m

- **Profundidad (h):** Es la distancia vertical entre el nivel medio del mar y el fondo marino.
- **Dirección (D):** Es el ángulo de aproximación de la ola con respecto a un sistema de referencia (cartesiano u oceanográfico).

4.2.2. Parámetros dependientes

- **Amplitud (A):** Es la mitad de la altura total de la ola.
- **Celeridad (C):** O velocidad de propagación, que resulta de la longitud entre dos crestas (L) dividido entre el periodo (T).

En la figura 3 se muestra el esquema de la propagación de una ola en la dirección x .

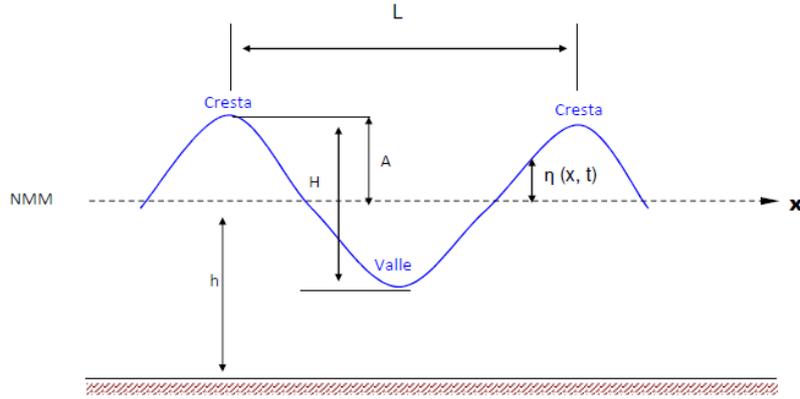


Figura 3: Características de una ola. [Macdonel et al., 1999]

Altura de la ola

Según [Holthuijsen, 2010] en un registro N de olas, la altura media de las olas \bar{H} se define como

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (1)$$

donde i es número de secuencia de la ola en el registro. Además de esta definición se utiliza otra altura de ola, denominada altura de ola significativa (H_s). Se define como la media del tercio más alto de ondas en el registro de olas:

$$\text{Altura significativa} = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2)$$

donde j no es el número de secuencia en el registro (es decir, secuencia en el tiempo) sino el número de rango de la ola, basado en la altura de la ola (es decir, $j = 1$ es la ola más alta, $j = 2$ es la segunda ola más alta, etc.)

Periodo de la ola

En analogía con la altura de ola significativa, el período de ola significativo T_p se define como el período medio del tercio más alto de olas, $T_{1/3}$:

$$\text{Periodo significativo} = T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_j \quad (3)$$

4.3. Clasificación del oleaje

4.3.1. Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa

Según [Silva, 2017] las ecuaciones que representan el oleaje que se propaga en cualquier profundidad relativa, h/L , se denominan de ondas en aguas intermedias o en zona de transición. Frecuentemente, este tipo de ecuaciones se simplifican asumiendo que las ondas sólo son dependientes de su longitud o periodo, T , y de la profundidad. Esto conlleva a dos extremos de aproximaciones según su profundidad relativa:

- **Aguas profundas.** Cuando la profundidad h es igual o mayor que la mitad de su longitud de onda, L , el oleaje no experimenta modificaciones debidas a la profundidad.
- **Aguas poco profundas.** Cuando la profundidad h es igual o menor que un vigésimo de su longitud de onda, L , el oleaje está completamente controlado por la profundidad del agua.

4.3.2. Clasificación de las ondas según su periodo y frecuencia

Las ondas que componen un registro de oleaje son de una amplia gama de periodos, alturas y longitudes. De acuerdo con su periodo, fuerza generadora y la cantidad de energía que normalmente portan, se pueden distinguir los siguientes tipos de ondas, que se presentan en la Tabla 2 y la Figura 4. [Kinsman, 1965]

Tabla 2: Clasificación de las ondas por su periodo. [Kinsman, 1965]

Nombre	Periodo	Longitud	Altura	Fuerza generadora
Capilares	0-0.1 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento
Ultragravedad	0.1-1 s	Centímetros	Centímetros	Viento
Gravedad	1-30 s	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 m	Viento
Infragravedad	30s-30min	100 a 200m	Pequeña	Viento
Periodo largo	5min-24h	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1-5m	Sismos, derrumbes atracción de cuerpos celestes
Transmarea	Más de 24h	-	0-12m	Oscilaciones climáticas

Como se ve en la Tabla 2 y la Figura 4, las ondas en el océano pueden ser clasificadas de varias formas; una clasificación usa las fuerzas que generan al oleaje, las cuales a su vez están asociadas con una longitud de onda característica. Así, por ejemplo:

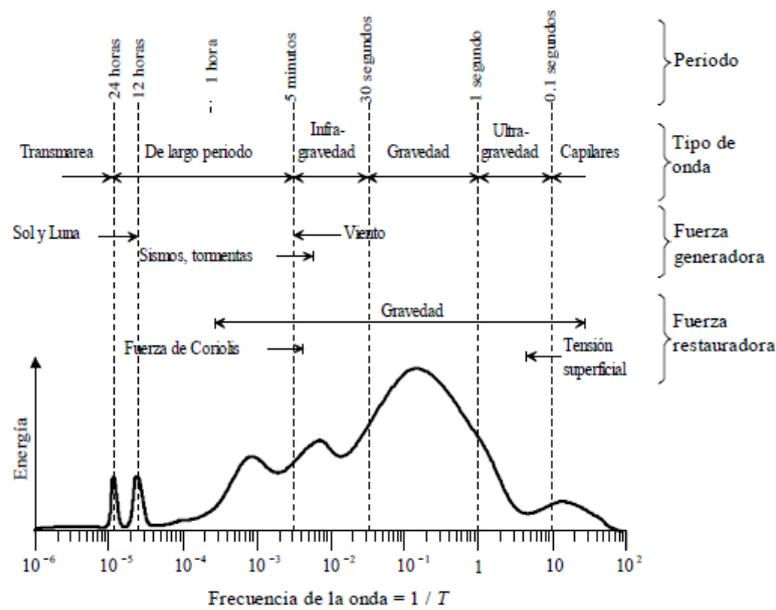


Figura 4: Periodo-energía de las ondas [Kinsman, 1965]

- Las fuerzas meteorológicas (viento, presión del aire) generan el oleaje local y distante.
- Los maremotos o terremotos generan grandes ondas conocidas como *tsunamis*, los cuales normalmente son clasificados como ondas en aguas poco profundas, ya que su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad donde se propagan.
- Las mareas (fuerzas astronómicas) siempre se propagan de acuerdo con su longitud de onda en aguas poco profundas, por lo que son consideradas como ondas largas.

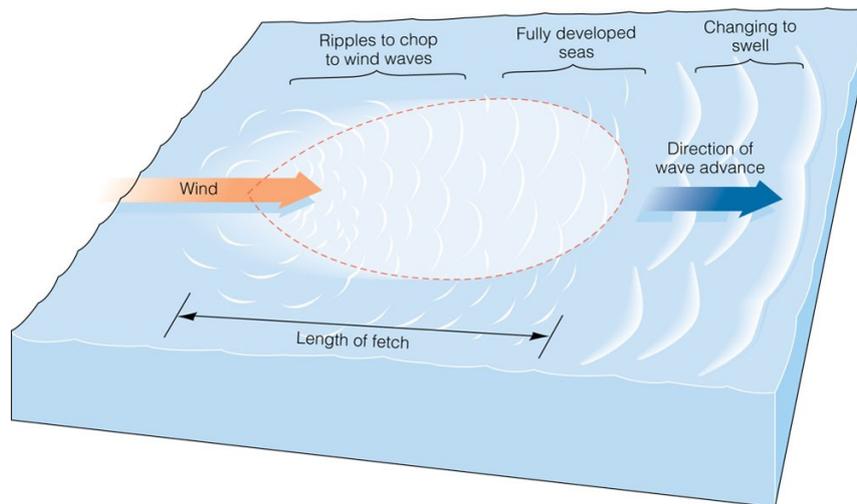
4.3.3. Oleaje generado por viento

En oceanografía física, se llama área de generación (*fetch*) a la región donde existe, transferencia del viento hacia la superficie del mar. Ahí el fenómeno es completamente aleatorio (Ver Figura 5). El oleaje se propaga en diferentes direcciones, aunque la dirección dominante es la del viento. Las olas pueden tener diversas características dependiendo de las fuerzas que influyen en su generación.

De acuerdo con su creación, se suelen distinguir dos tipos extremos de oleaje, entre los cuales existen un sinúmero de estados intermedios. Se denominan por las palabras inglesas, universalmente aceptadas, *sea* y *swell* o su traducción al español como *oleaje local* y *oleaje distante*, respectivamente.

4.3.4. Oleaje local o *sea*

Este tipo de oleaje se produce en la zona de generación en alta mar, donde raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar un periodo bien definido.



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Figura 5: Zona de generación (FETCH)

Las características que definen este tipo de oleaje son [Silva, 2005]

- Gran irregularidad, ya que la altura de la superficie líquida es impredecible, carece de periodicidad.
- Asimetría o gran desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas.
- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda.

4.3.5. Oleaje de fondo o *swell*

Son olas que no están bajo la influencia directa del viento, por lo tanto, la ola evoluciona libremente, desplazándose decenas de kilómetros desde su zona de origen y siguiendo la misma dirección del viento que las generó. Se propagan desde aguas profundas a aguas poco profundas. Las olas Sea se convierten en olas Swell una vez que salen del área de generación. Son ondulaciones con crestas y senos redondeados, presentan mayor longitud, altura, periodo en comparación de las olas de viento local. [Ramírez et al., 2007]

Este tipo de oleaje se puede observar sobre la plataforma costera, especialmente en profundidades reducidas, donde a los fenómenos descritos anteriormente se añade el de la refracción, que hace que las olas tiendan a progresar en forma paralela a las línea batimétricas. Así, el oleaje que se acerca a la costa es más regular, forma frentes de cresta muy grandes y las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas, surge una periodicidad, las direcciones no son tan dispersas, y se presentan ciertas direcciones predominantes. Todo esto proporciona un cierto orden al fenómeno [Silva, 2005]. Las olas SWELL, están sujetas a fenómenos de reflexión, refracción y difracción las cuales se describen a continuación:

- **Refracción.** Es el cambio de dirección que experimenta la ola, cuando esta se acerca a una zona de menor profundidad, dando como resultado, que el frente de ola se frena, la altura de la ola disminuye y su dirección de propagación se modifica. Este fenómeno se puede aprovechar para la conversión de la energía del oleaje, con técnicas de concentración de la ola.
- **Reflexión.** Se produce cuando la ola choca contra un obstáculo vertical, barrera; la ola se refleja con muy poca pérdida de energía.
- **Difracción.** Es la dispersión de la energía del oleaje cuando esta pasa al otro de una barrera, permitiendo la aparición de pequeños sistemas de olas en aguas protegidas por un obstáculos. La característica de este sistema de las olas es la disminución en su altura en esa zona, la celeridad y la longitud de onda de la ola no se modifica. El fenómeno de la difracción se puede aprovechar para el control del oleaje.

4.4. Modelo SWAN

La definición de aguas costeras en oceanografía física son aguas poco profundas que afectan a las olas, adyacentes a la costa, posiblemente con islas pequeñas, acantilados, mareas, arrecifes, estuarios, puertos, rompe olas etc con niveles de agua que varían con el tiempo y corrientes ambientales (inducidas por mareas o descargas de ríos). Las variaciones horizontales en la profundidad del agua causan shoaling y refracción. Shoaling es la variación de las olas en su dirección de propagación debido a cambios inducidos por la profundidad de la velocidad de grupo en esa dirección. Estos cambios en la velocidad de grupo generalmente aumentan la amplitud de las olas a medida que las olas se propagan en aguas menos profundas. [Booij et al., 1997]

4.4.1. Antecedentes históricos

Durante las últimas dos décadas, una serie de avanzados modelos espectrales de oleaje y viento, conocidos como modelos de tercera generación, han sido desarrollados como WAM [WAMDI Group, 1998], WAVEWATCH III [Tolman, 1991], TOMAWAC [Benoit et al., 1996] y SWAN [Booij et al., 1999]. Estos modelos resuelven la ecuación de balance de acción espectral sin restricciones en el espectro para la evolución del crecimiento de las olas.

Basado en ecuación de balance de acción de las olas con fuentes y sumideros, el modelo de onda de aguas poco profundas SWAN es una extensión del modelo de tercera generación de oleaje en aguas profundas. Incorpora formulaciones para el proceso de generación y disipación de ondas en aguas profundas y las interacciones onda-onda cuádruple del modelo WAM. En aguas poco profundas, estos procesos se han complementado con formulaciones para las disipaciones debidas a la fricción del fondo, las interacciones tríada onda-onda y la rotura inducida por la profundidad.

SWAN es completamente espectral (en todas las direcciones y frecuencias) y calcula la evolución del viento en regiones costeras con aguas poco profundas y corrientes ambientales.

4.4.2. Ecuaciones gobernantes

Descripción espectral de las olas generadas por viento

Las olas generadas por el viento tienen alturas y períodos de ola irregulares, causadas por la naturaleza irregular del viento. Debido a esta naturaleza irregular, la superficie del mar varía continuamente, lo que significa que no es factible un enfoque determinista para describir la superficie del mar. La elevación de la superficie de las olas en el océano, en cualquier lugar y en cualquier momento, puede verse como la suma de una gran cantidad de ondas armónicas, cada una de las cuales ha sido generada por vientos turbulentos en diferentes lugares y momentos. Según la teoría de las ondas lineales, permanecen independientes durante su viaje a través del océano. En estas condiciones, la elevación de la superficie del mar en una escala de tiempo de cien periodos característicos de onda se describe suficientemente bien como un proceso estacionario, gaussiano. La elevación de la superficie del mar en un punto en función del tiempo se puede describir según [Booij et al., 2004]

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \quad (4)$$

Con η como la elevación de la superficie del mar, a_i, σ_i, α_i elevación, amplitud y fase de la i -ésima componente la ola. Esto es llamado modelo de fase aleatoria.

Para ondas lineales, la frecuencia relativa viene dada por

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (5)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y d es la profundidad del agua.

En el campo de la teoría del oleaje es convencional definir un espectro $E(f)$ como:

$$E(f) = 2E'(f) \text{ para } f \geq 0 \quad \text{y} \quad E(f) = 0 \text{ para } f < 0 \quad (6)$$

La descripción del oleaje a través del espectro de densidad de varianza definido $E(f)$ se denomina descripción espectral de las olas. Se puede demostrar que la varianza de la elevación de la superficie del mar está dada por

$$\langle \eta^2 \rangle = C(0) = \int_0^{+\infty} E(f) df \quad (7)$$

lo que indica que el espectro distribuye la varianza entre las frecuencias. Por lo tanto $E(f)$ debe interpretarse como la densidad de varianza. Las dimensiones de $E(f)$ son m^2/Hz si la elevación es dada en m y la frecuencia en Hz .

La varianza $\langle \eta^2 \rangle$ es igual a la energía total E_{tot} de las olas por unidad de área si se multiplica por el coeficiente correctamente elegido:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho_w g \langle \eta^2 \rangle \quad (8)$$

En muchos casos no es suficiente definir la densidad de energía como función de la frecuencia. También se requiere principalmente distribuir la energía de las olas en la dirección. Este espectro, que distribuye la energía de las olas en frecuencias y direcciones, será denotado como $E(f, \theta)$. Como la densidad de energía total a una frecuencia f se distribuye en las direcciones θ en $E(f, \theta)$, se deduce que:

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (9)$$

Basado en el espectro de densidad de energía, se pueden obtener los parámetros de las olas. Estos parámetros se pueden expresar en términos del llamado n-ésimo momento del espectro de densidad de energía:

$$m_n = \int_0^{+\infty} f^n E(f) df \quad (10)$$

Entonces, la varianza de la elevación de la superficie del mar está dada por $m_o = \langle \eta^2 \rangle$. Los parámetros conocidos como **la altura significativa** de las olas:

$$H_s = 4\sqrt{m_o} \quad (11)$$

Y el **periodo de las olas**:

$$T_{m01} = \frac{m_o}{m_1}, \quad T_{m02} = \sqrt{\frac{m_o}{m_2}}, \quad T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (12)$$

donde m_{-1} y m_o son coeficientes derivados del espectro energético de la ola que muestran la variación de la misma, cuya aproximación se realiza también a través del periodo promedio mediante la ecuación $T_e = \gamma T_p$ donde T_p que se define como el periodo para el cual la función de la densidad espectral alcanza su máximo valor, de modo que indica el periodo que tiene más energía asociada y γ es el coeficiente que depende de la forma del espectro energético de la ola, cuyo valor oscila entre 0.8 y 1, la aproximación utilizada será de $\gamma = 0.9$ que es equivalente al que se obtiene mediante el programa JONSWAP. [González-Carrillo et al., 2015]

Ecuación de equilibrio de acción espectral

Toda la información sobre la superficie del mar está contenida en el espectro de variación de onda o densidad de energía $E(\sigma, \theta)$, distribuyendo la energía de las olas en frecuencias σ y la dirección de propagación θ . Generalmente, los modelos de ondas determinan la evolución de la densidad de acción $N(x, t; \sigma, \theta)$ en el espacio x y el tiempo t . La densidad de acción se define como $N = E/\sigma$ y se conserva durante la propagación en presencia de la corriente. Se supone que la corriente es uniforme con respecto a la coordenada vertical y se denota como \vec{U} . [Booij et al., 2004]

La evolución de la densidad N se rige por la ecuación de balance de acción, que dice [Mei, 1984] :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (13)$$

El lado izquierdo es la parte cinemática de esta ecuación. El segundo término denota la propagación de la energía de las olas en espacio geográfico bidimensional, con la velocidad de grupo $\vec{c}_g = \partial\sigma/\partial\vec{k}$ derivadas de la relación de dispersión $\sigma^2 = g|\vec{k}|\tanh(|\vec{k}|d)$ donde \vec{k} es el vector de número de onda y d la profundidad del agua. el tercer término representa el efecto del desplazamiento de la frecuencia en radianes debido a variaciones de profundidad y corrientes medias. El cuarto término representa la refracción inducida por la profundidad y la inducida por la corriente. Las cantidades c_σ y c_θ son las velocidades de propagación en el espacio espectral (σ, θ) . El término de la derecha contiene S_{tot} , el cuál es el término de fuente/sumidero que representa todos los procesos físicos que generan, disipan o redistribuyen la energía de la ola. Estos se encuentran definidos por la densidad de energía $E(\sigma, \theta)$.

Con respecto a las aplicaciones a escalas marinas o oceánicas, la ecuación de balance de acción puede ser reescrita en coordenadas esféricas :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_\lambda N}{\partial \lambda} + \frac{\partial c_\varphi N}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (14)$$

donde la densidad de acción N depende de la longitud λ y latitud φ . Es importante recalcar que θ es la dirección de la ola tomada en sentido anti horario desde el Este geográfico.

4.4.3. Términos fuente y sumideros

En aguas poco profundas, seis procesos contribuyen a S_{tot} :

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (15)$$

donde

- $S_{in} \equiv$ entrada atmosférica del viento.
- $S_{nl} \equiv$ interacciones no lineales entre componentes espectrales.
- $S_{ds,w} \equiv$ disipación de energía debido a *whitecapping*.
- $S_{ds,b} \equiv$ disipación de energía debido a la fricción con el fondo.
- $S_{ds,w} \equiv$ disipación de energía debido al rompimiento de olas inducido por la profundidad.

Entrada atmosférica de viento

La transferencia de energía del viento a las olas se describe con mecanismos de resonancia y un mecanismo de retro-alimentación.

Resonancia con fluctuaciones de presión inducidas por el viento

La distribución de la presión inducida por el viento en la superficie del mar es aleatoria. Al aplicar la transformada de Fourier se puede producir ondas de presión armónicas que se propagan con la velocidad del viento. Si esta onda de presión armónica permanece en fase con ondas de superficie armónicas libres, entonces la energía del viento se transfiere de la onda de presión a la onda de superficie. El aporte de energía por este mecanismo, que contribuye a las etapas iniciales del crecimiento de las olas, varía linealmente con el tiempo.

Resonancia con fluctuaciones de presión inducidas por el viento

Cuando una ola ha sido generada por un mecanismo de resonancia como se explicó anteriormente, se distorsiona el perfil del viento justo por encima de la superficie del agua. Esta distorsión da como resultado una “sobrepresión” en el lado del viento de la cresta de la ola y una “presión baja” en el lado de sotavento de la cresta. Significa que cuando la superficie del mar se mueve hacia arriba y hacia abajo, la presión también sigue los mismos movimientos, por lo que transfiere energía a la ola. Esta transferencia de energía es proporcional a la energía de la propia ola. Este efecto resulta exponencial en el tiempo.

Basado en los dos mecanismos de crecimiento de las olas; el crecimiento de las olas debido al viento se describe comúnmente como la suma del término de crecimiento lineal y exponencial de una componente de la ola:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (16)$$

Disipación de energía

El término de disipación de la energía de las olas está representado por la suma de tres contribuciones diferentes: whitecapping $S_{ds,w}$, fricción con el fondo marino $S_{ds,b}$ y rotura inducida por profundidad $S_{ds,br}$. De los términos mencionados, estudios previos argumentan que la refracción/somerización, el rompimiento de olas y las interacciones entre triadas, son los procesos que dominan en aguas someras. [Lizano Rodríguez et al., 2001]

Whitecapping está controlado principalmente por la pendiente de la ola. En los modelos de ondas de tercera generación que operan actualmente con la siguiente ecuación:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \theta) \quad (17)$$

donde Γ es un coeficiente dependiente de la pendiente, k es el número de onda, $\tilde{\sigma}$ y \tilde{k} es la frecuencia media y la media del número de ondas, respectivamente. Este valor implica que depende de la formulación de entrada de viento que se utilice.

En aguas poco profundas, los movimientos orbitales de las partículas de agua, inducidos por las ondas superficiales, se extienden hasta el fondo del mar. Esto da lugar a una interacción entre las ondas superficiales y el fondo. una descripción general de los diferentes mecanismos de interacción del fondo de la ola y de sus fortalezas relativas. Estos son: dispersión en las irregularidades del fondo, movimiento de un fondo blando, percolación en un fondo poroso y fricción en la capa límite del fondo turbulento. El primer proceso da como resultado una redistribución local de la energía de las olas mediante la dispersión de los componentes de las olas. Los últimos tres son disipativos. Su fuerza depende de las condiciones del fondo. Para los mares de la plataforma continental con fondos arenosos, el mecanismo dominante parece ser la fricción del fondo, que generalmente se puede expresar como:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (18)$$

en el C_b es el coeficiente de fricción. Considerando las grandes variaciones en las condiciones del fondo en las áreas costeras (material del fondo, longitud de la rugosidad del fondo, etc), no hay evidencia de datos de campo para dar preferencia a un modelo de fricción particular. Por este motivo, en SWAN se ha implementado el más simple de cada uno de estos tipos de modelos de fricción: el modelo empírico JONSWAP. El efecto de una corriente media sobre la disipación de energía de las olas debido a la fricción del fondo no se tiene en cuenta en SWAN.

Cuando las olas se propagan hacia la costa, los cambios de profundidad conducen a un aumento en la altura de las olas. Cuando la relación entre la altura de las olas y la profundidad del agua excede un cierto límite, las olas comienzan a romperse, disipando la energía rápidamente. En aguas poco profundas, este proceso se vuelve dominante sobre todos los demás procesos. La disipación total debida a este tipo de rompimiento de olas se puede modelar bien con la disipación de una perforación aplicada a las observaciones de olas rompientes. Al expandir su expresión para incluir direcciones, la expresión es:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (19)$$

donde E es la energía total de las olas y $D < 0$ es la tasa de disipación de la energía total debido a la ruptura de las olas. El valor de D depende críticamente del parámetro de ruptura $\gamma = H_{max}/d$ (donde H_{max} es la altura de ola individual máxima posible en la profundidad del agua local d).

Interacciones onda-onda no lineales

En aguas profundas, las interacciones cuádrupleta onda-onda dominan la evolución del espectro. Transfieren la energía de las ondas desde el pico espectral de frecuencias más bajas a frecuencias más altas donde la energía se disipa por whitecapping.

En aguas muy poco profundas, las interacciones tríada onda-onda transfieren energía de frecuencias más bajas a frecuencias más altas, lo que a menudo resulta en armónicos más altos.

Todos los procesos físicos mencionados anteriormente se explican más a detalle en el *USER MANUAL* de SWAN Cycle III version 40.51A [Booij et al., 2004].

4.5. Potencia del oleaje

Cuando se evalúa el potencial energético de las olas se trabaja con datos a corto plazo, los cuales son acotados en intervalos de tiempo relativamente cortos, pero lo suficientemente duraderos para ser fiables estadísticamente. Estos registros o acotaciones se denominan estados de mar. [Martín Amer, 2015a]

En estas evaluaciones se trabaja con el potencial medio de energía de un estado de mar concreto. Para ello se puede utilizar la descripción estadística o la descripción espectral del oleaje. Por el tipo de datos con los que se trabaja, obtenidos a partir del modelado numérico, se ha utilizado la teoría de la descripción espectral del oleaje.

Un espectro de energía $F(w)$ ($w = 2\pi/T$) representa la energía asociada a cada una de las frecuencias del oleaje (irregular) estudiado, pudiéndose distinguir dos extremos: espectros de oleaje de banda ancha y espectros de oleaje de banda estrecha. Un espectro de banda estrecha se caracteriza por presentar de un rango de frecuencias con contenido energético limitado y es característico de estados de mar desarrollados (fuera de la zona de generación del oleaje) es decir oleaje tipo *SWELL*. Por el contrario, el espectro de banda ancha representa una gran variedad de frecuencias y se corresponde con estados de mar más irregulares típicos de estado de mar tipo *SEA*. De forma general el espectro de energía será indicativo del estado de mar observado pudiéndose obtener espectros bimodales indicativos de estados de mar de tipo *SEA* y *SWELL* de forma simultánea. [Martín Amer, 2015b]

La energía media total por unidad de área viene definida de la siguiente forma para un estado de mar:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} F(w) dw$$

de modo que el flujo de energía, también denominado potencia del oleaje, será:

$$\bar{P} = \bar{E}c_g = \rho g \int_0^{\infty} F(w)c_g dw = \frac{\rho g^2}{4\pi i} \int_0^{\infty} \frac{F(w)}{w} dw$$

donde la celeridad se ha definido como:

$$c_{g0} = \frac{c_0}{2} = \frac{gT}{4\pi}$$

Aplicando las definiciones de los parámetros de altura de la ola significativa y del período energético nos da como resultado:

4. MARCO TEÓRICO

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H s^2$$

Para simplificar la ecuación obtenida se pueden aplicar los valores de los parámetros conocidos, tales como la densidad del fluido ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$) y la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), de modo que finalmente quede:

$$\bar{P} \cong 490.6 T_e H s^2 (\text{W/m})$$

Para aplicar esta ecuación en el tratamiento de los datos del estudio es preferible que esté expresada en kW/m (metro de cresta de ola), así que finalmente queda de la siguiente forma:

$$\bar{P} \cong 0.491 T_e H s^2 (\text{kW/m}) \tag{20}$$

5. Metodología

La metodología aplicada para el desarrollo de este estudio tiene 3 componentes fundamentales que son:

1. Recopilación de información para generar las condiciones de contorno (batimetría y oleaje en aguas profundas) e iniciales (viento local).
2. Simulación del oleaje en aguas someras en las inmediaciones del puerto de Acajutla.
3. Validación de la simulación del oleaje en aguas someras con las mediciones de oleaje del ADCP.

5.1. Recopilación de información

5.1.1. Geometría de la Cuenca

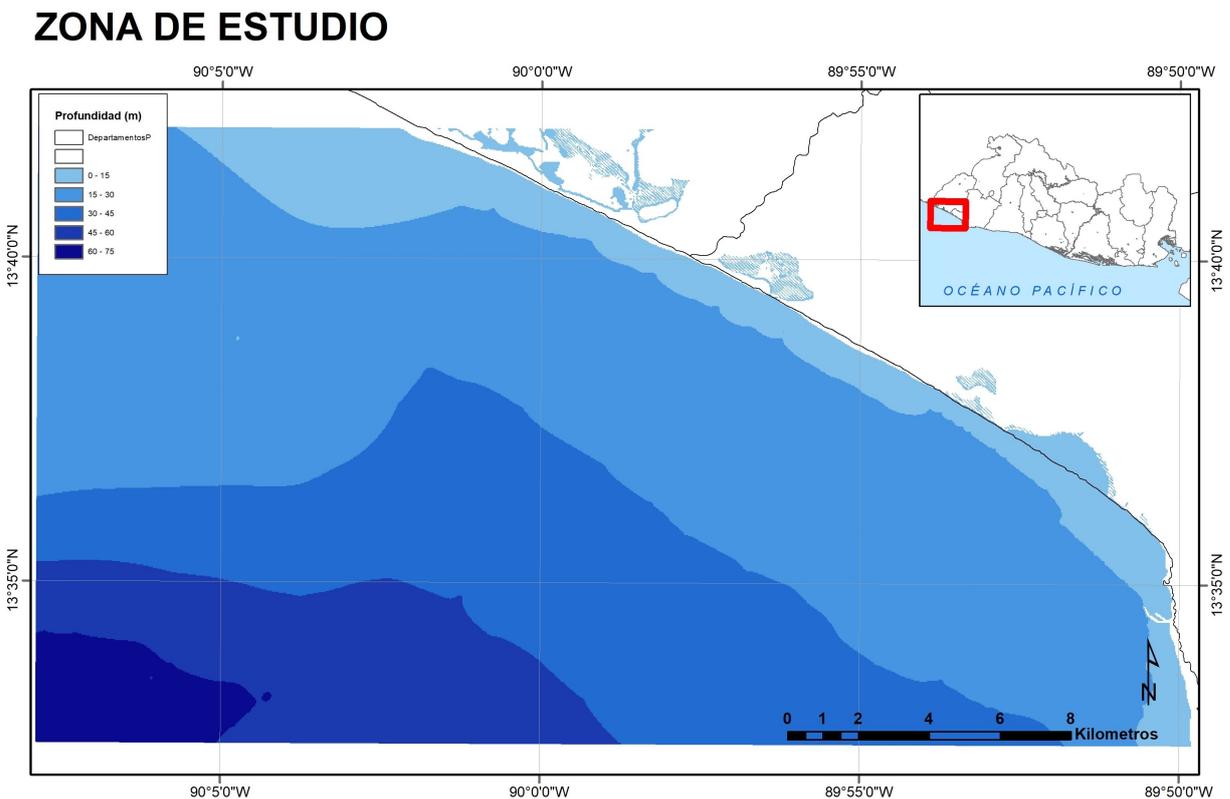


Figura 6: Mapa de batimetría con 30 metros de separación de la zona de estudio generado en QGIS. Fuente: Elaboración propia

Lo que realmente separa los modelos de olas cerca de la costa de los que se usan en aguas profundas es el fondo marino. Para que la física de aguas someras del modelo SWAN sea exacta, la batimetría debe serlo también. Es más, dado que el modelo solo muestra el fondo marino una vez en cada celda de la malla, el uso de una

5. METODOLOGÍA

batimetría de alta resolución no dará mejores resultados a menos que se ejecute el modelo con un nivel de resolución equivalente.

Los datos batimétricos fueron proporcionados por CEPA, con una extensión de 596.23 km^2 y separación entre los puntos de 30 m . La figura 6. es el mapa de la batimétrico y los tonos de azul denotan los cambios en las profundidades.

5.1.2. Campo de vientos

Para la condición de contorno de vientos superficiales, se utilizó la información registrada por CFSv2 del Centro Nacional para la Predicción Ambiental. [Saha et al., 2011]

Los datos fueron descargados por componentes: Las componentes de la velocidad X y Y del viento, mediante un código en MATLAB se calculó la magnitud. La velocidad del viento que se encuentra en los datos es la velocidad a 10 metros sobre el nivel del mar. Debido que el modelo es sensible con la cantidad de puntos de forzamiento y en vista que solo se desea comparar los resultados en una coordenada geográfica se utilizó 2 puntos de forzamiento para simular el punto donde se desea conocer los parámetros oceanográficos. Ver figura 7. El área total del campo es de 596.23 km^2 .

El periodo de descarga fue de junio-2017 a marzo-2018 esta fecha coincide con los datos medidos por el ADCP que se encuentra ubicado a 4km del puerto de Acajutla.

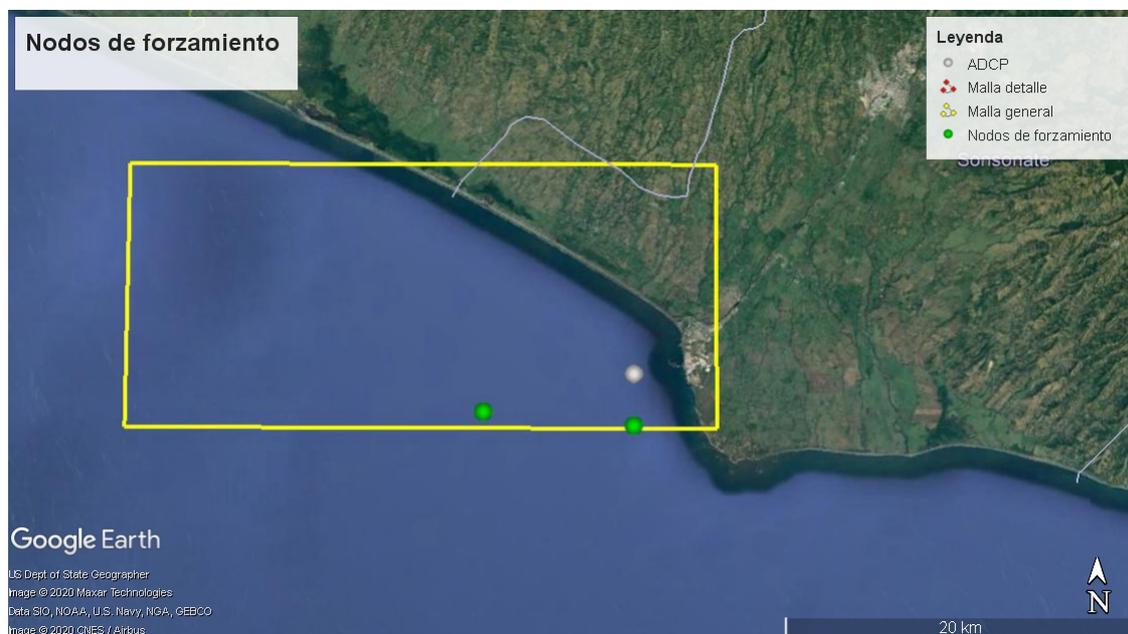


Figura 7: ● Nodos de forzamiento. ● Ubicación del sensor ADCP.

5.1.3. Oleaje

La condición de contorno del oleaje se utilizó datos procesados del modelo global WW3 para mar abierto y sin obstáculos para el viento, el cual logra predecir el comportamiento del oleaje en aguas profundas. Este modelo divide la tierra en puntos, conformando una malla, formando pequeños rectángulos que en sus vértices tienen nodos de análisis sobre el cual se obtienen los datos.

Con esta información se alimentó el modelo SWAN y se comparó los resultados entre las simulaciones obtenidas y los datos de campo.

5.2. Simulación de oleaje

La GUIH-SWAN v5.0 NOVIEMBRE 2017 es una herramienta desarrollada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, España. Este recurso es una GUI que facilita el pre-proceso y post-proceso de la información necesaria para la ejecución del modelo SWAN.

Los valores que se ingresan en el modelo SWAN deben estar expresadas en unidades del el Sistema Internacional: m , kg , s y las magnitudes compuestas como Newton (N) y Watt (W). Consecuentemente, la altura significativa y la profundidad están en m , el periodo de la ola en s . Para la dirección del viento y del oleaje se utilizó la convención náutica, es decir, la dirección de donde proviene el viento y la ola y están expresadas en grados ($^{\circ}$).

5.2.1. Definición de mallas computacional

La ejecución del modelo fue realizada en modo estacionario, es decir, solo se ejecutó una vez, con condiciones de frontera invariables. El modelo está preparado para propagar el oleaje en dos mallas: una general y una malla de detalle, que a su vez se encuentra inmersa en la general.

La idea es que el modelo propague el oleaje a lo largo de toda la malla general y que posteriormente siga propagando el oleaje en una malla de detalle asociada a la zona de estudio. El uso de dos mallas permite optimizar recursos CPU debido a que resuelve las ecuaciones de propagación, primero en un dominio con menor definición pero más grande en dimensiones, para posteriormente seguir la propagación en un dominio con mejor definición pero con menores dimensiones.

La asignación de dx y dy , tamaño de los elementos de discretización de la malla, es para diseñar el dominio computacional y debe responder a una adecuada definición de los contornos batimétricos y su complejidad en la proyección de la malla numérica. Entre menor sea el dx y dy se necesitará mayor tiempo computacional de cálculo de cada estado de mar. La figura 8 es la representación de las mallas para la propagación del oleaje y posterior comparación con el punto de interés.

Tabla 3: Discretización espacial

Malla General		
$dx= 0.2226 \text{ km}$	$dy= 0.2226 \text{ km}$	Área= 83.10 km^2
Malla Detalle		
$dx=0.0556 \text{ km}$	$dy= 0.0556 \text{ km}$	Área= 13.32 km^2



Figura 8: Definición de malla computacional

5.3. Validación

Los resultados de la validación deberán mostrar si el modelo captura de forma adecuada las tendencias de crecimiento y decrecimiento del oleaje medido tanto en la época de vientos débiles como en la época de vientos fuertes. [Osorio Arias et al., 2010]

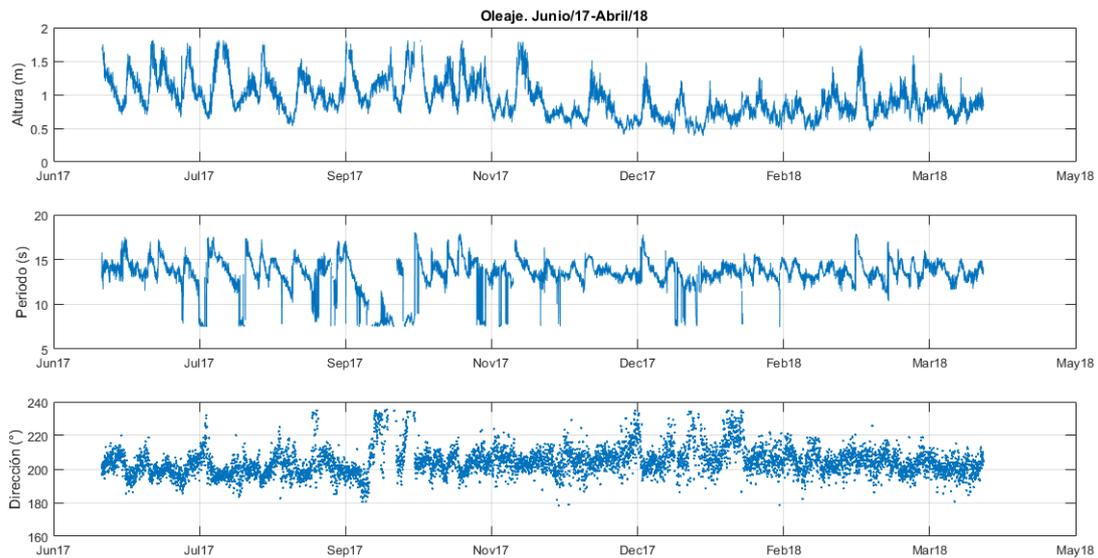


Figura 9: Mediciones en campo a partir de ADCP. Datos de Altura, Periodo y Dirección del oleaje. Fuente: Elaboración propia.

5. METODOLOGÍA

Para la validación se trabajó con los datos medidos por un Perfilador de Corriente Acústico Doppler Nortek (ADCP) que se encuentra ubicado a 4km del puerto de Acajutla en las coordenadas N 13°34'19.28", O 89°52'0.82" (Ver Figura 8) como punto de referencia para comparar los resultados obtenidos mediante la simulación. Se utilizó la serie de oleaje producido por el paso de fenómenos atmosféricos por el Pacífico entre junio del 2017 y marzo 2018 que han tenido influencia significativa en el oleaje de la zona del puerto de Acajutla. En la Figura 9 se muestra los resultados de las mediciones del sensor.

5.4. Calibración

Cuando ejecutamos el modelo SWAN en modo estacionario, esperamos que se produzca un error como resultado del desfase temporal entre nuestra predicción instantánea y el momento de llegada real de las olas porque no tiene en cuenta el tiempo necesario para que el oleaje atravesase el dominio del modelo. En un dominio grande, este desfase temporal puede alcanzar varias horas.

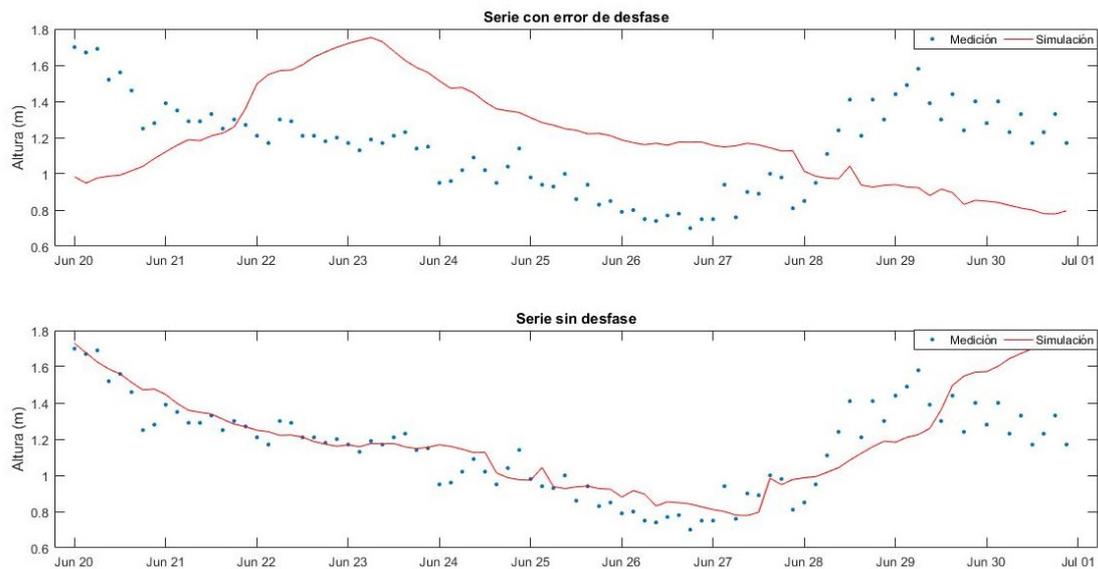


Figura 10: Serie de calibración. Altura significativa, Junio 2017. Fuente: Elaboración propia

La figura 10. muestra la comparación de la serie de altura significativa para el mes de junio 2017. La primera serie es con el error del desfase temporal con un coeficiente de correlación entre las variables de -0.62 . La segunda gráfica es la serie con la corrección en el tiempo con un coeficiente de 0.79 . Esta calibración se aplicó para las 3 componentes simuladas: altura significativa, periodo y dirección. Este ajuste se aplicó para todos los meses de predicción para comparar la serie simulada por SWAN y la serie medida por el ADCP.

6. Resultados

Los resultados se presentaron con series temporales mensuales de los parámetros oceanográficos simulados comparados con las mediciones in situ del equipo propiedad del MARN, esto con el fin de observar la eficacia del modelo para captar las tendencias de crecimiento y decrecimiento del fenómeno del oleaje. Además de la evaluación estadística del coeficiente de correlación entre las variables simuladas y medidas.

Una vez que se obtuvo las variables oceanográficas se estimó el potencial energético con la ecuación 20 y se representó nuevamente con series temporales para compararlos con el potencial energético de las mediciones.

6.1. Junio 2017

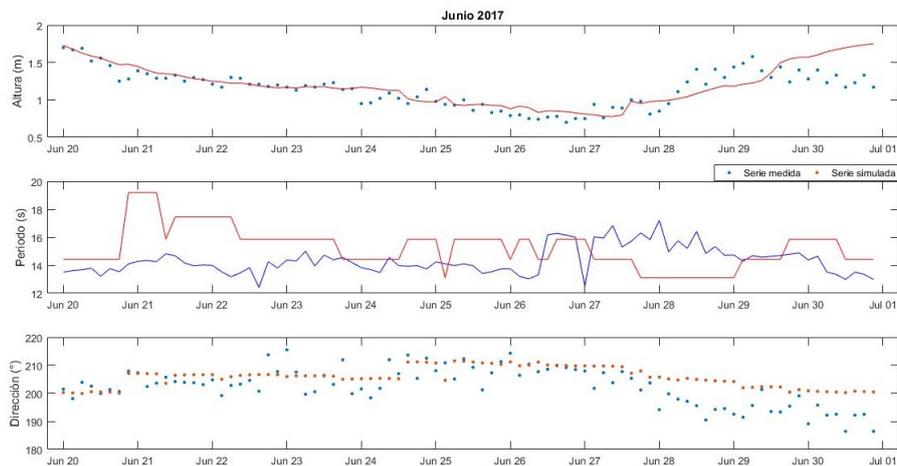


Figura 11: Mes de calibración del modelo. Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS

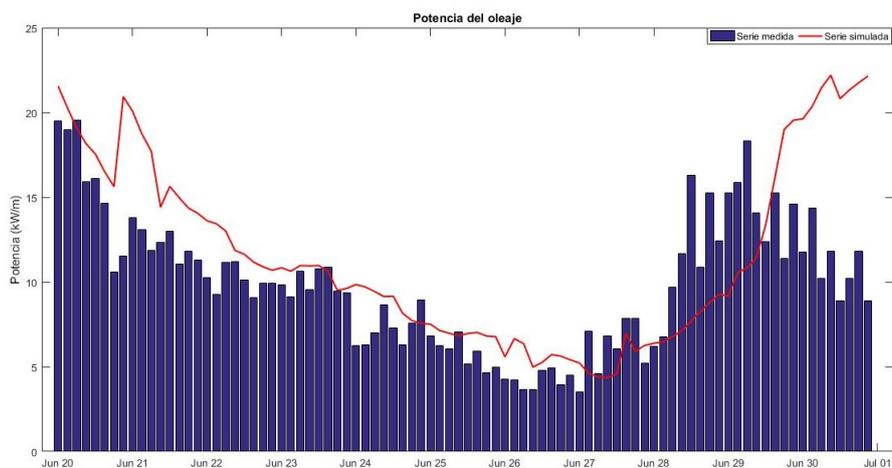


Figura 12: Mes de calibración del modelo. Fuente: Elaboración propia

6.2. Julio 2017

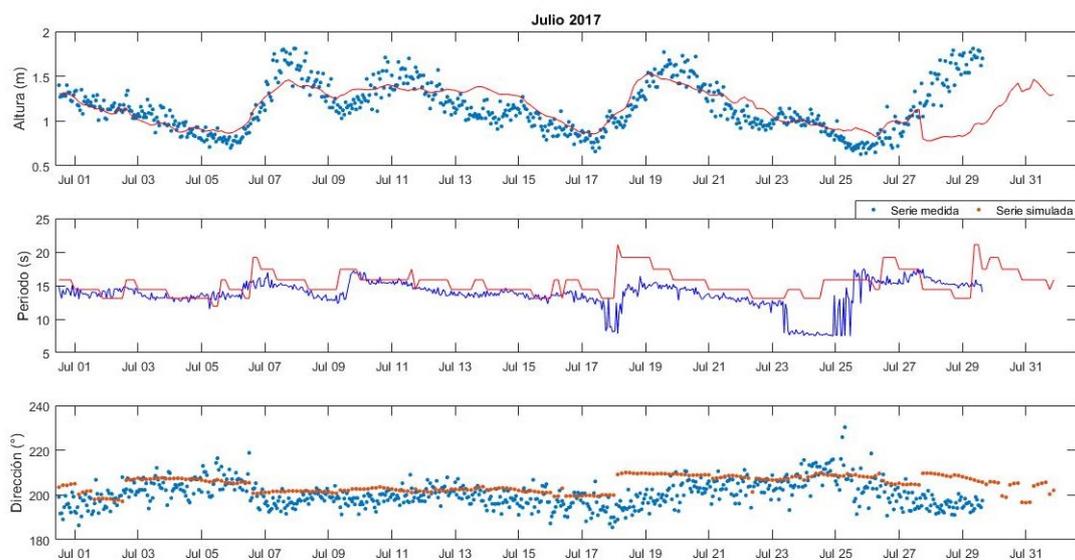


Figura 13: Parámetros oceanográficos simulados. Julio 2017. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4: Comparación entre SWAN y ADCP.

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.64
Tp	0.37
Dp	0.38

6. RESULTADOS

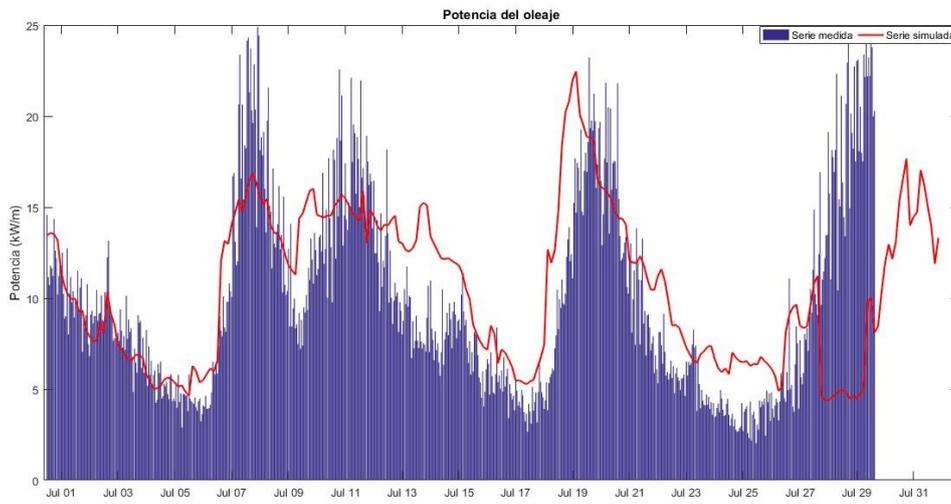


Figura 14: Energía potencial de julio 2017. Fuente: Elaboración propia

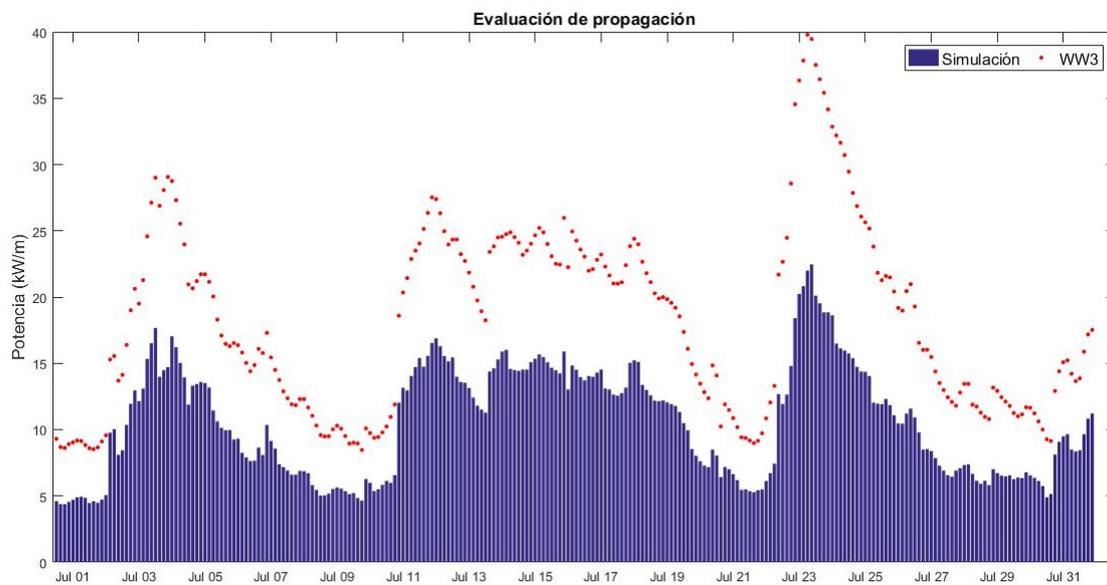


Figura 15: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Julio 2017. Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS

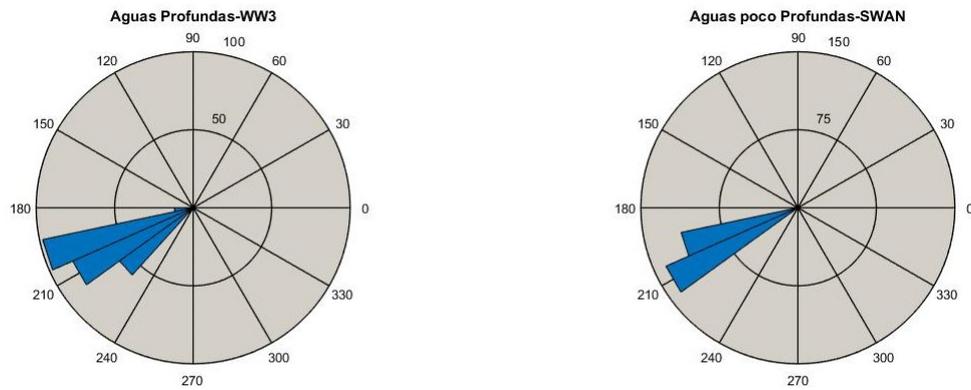


Figura 16: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Julio 2017. Fuente: Elaboración propia

6.3. Agosto 2017

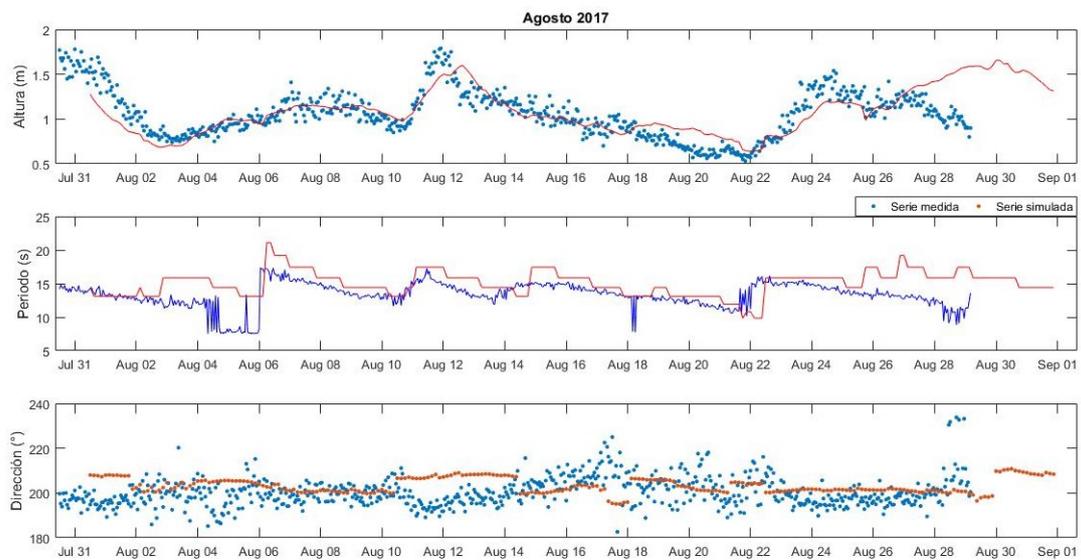


Figura 17: Parámetros oceanográficos simulados. Agosto 2017. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Comparación entre SWAN y ADCP.

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.74
Tp	0.123
Dp	0.10

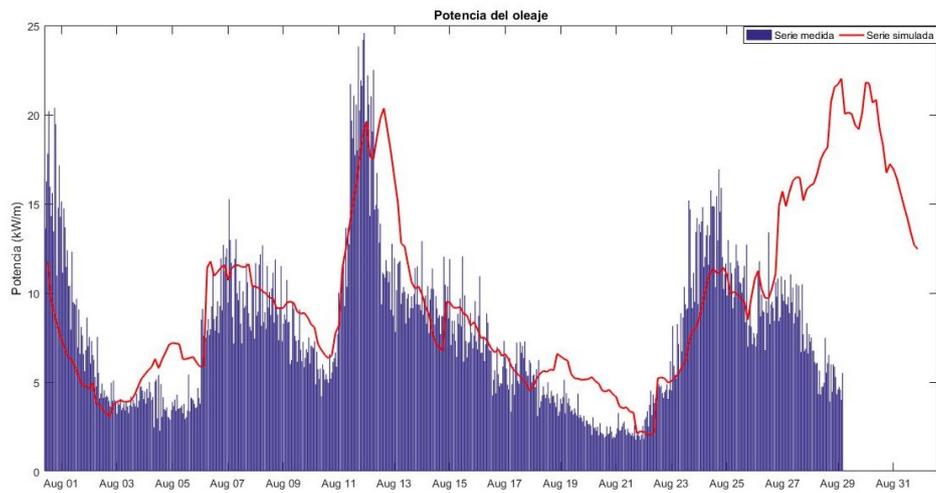


Figura 18: Energía potencial de agosto 2017. Fuente: Elaboración propia

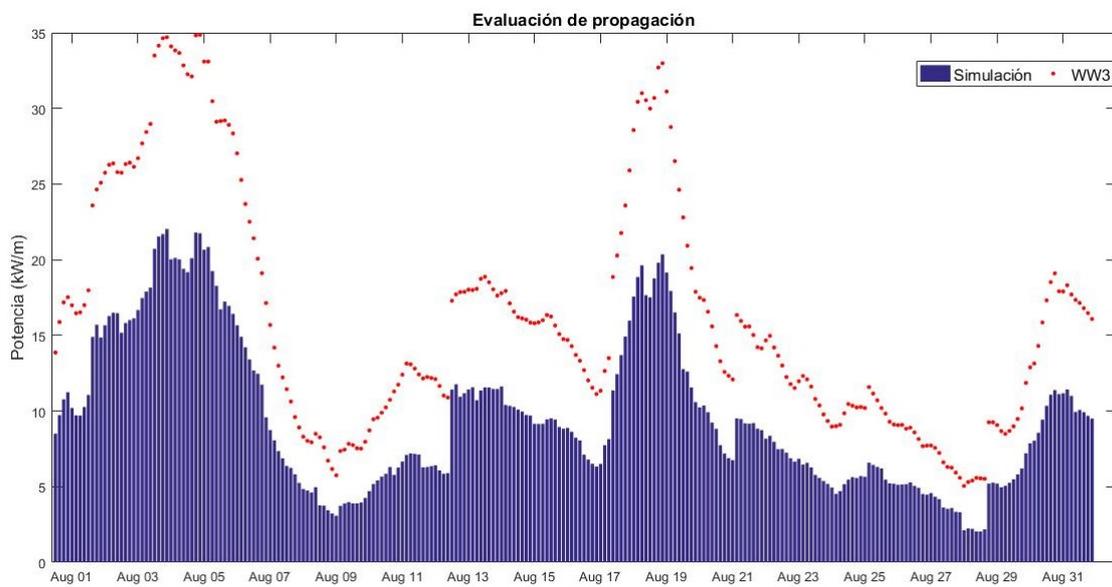


Figura 19: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Agosto 2017. Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS

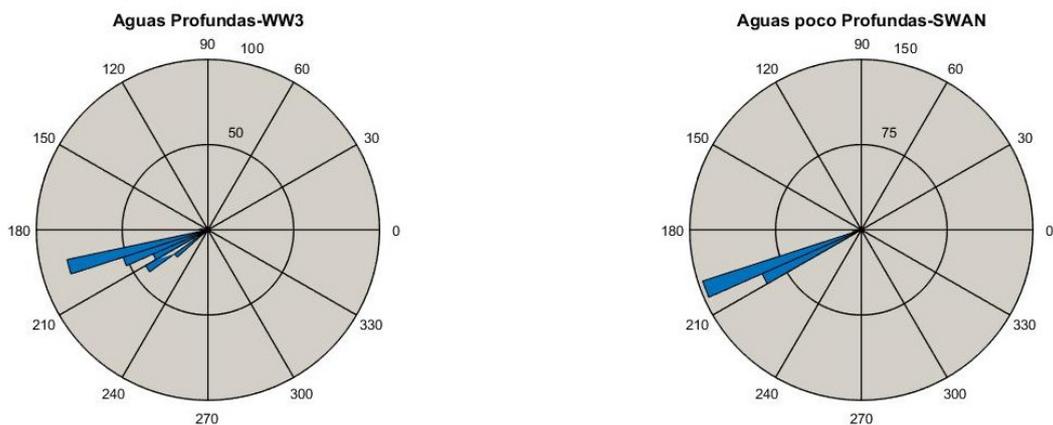


Figura 20: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Agosto 2017.
Fuente: Elaboración propia

6.4. Septiembre 2017

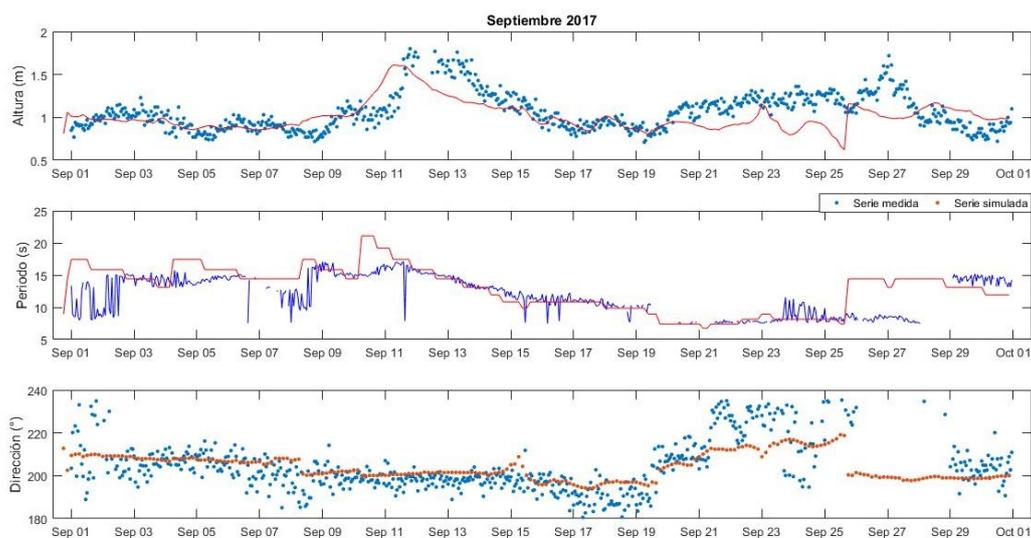


Figura 21: Parámetros oceanográficos simulados. Septiembre 2017. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Comparación entre SWAN y ADCP

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.46
Tp	0.58
Dp	0.66

6. RESULTADOS

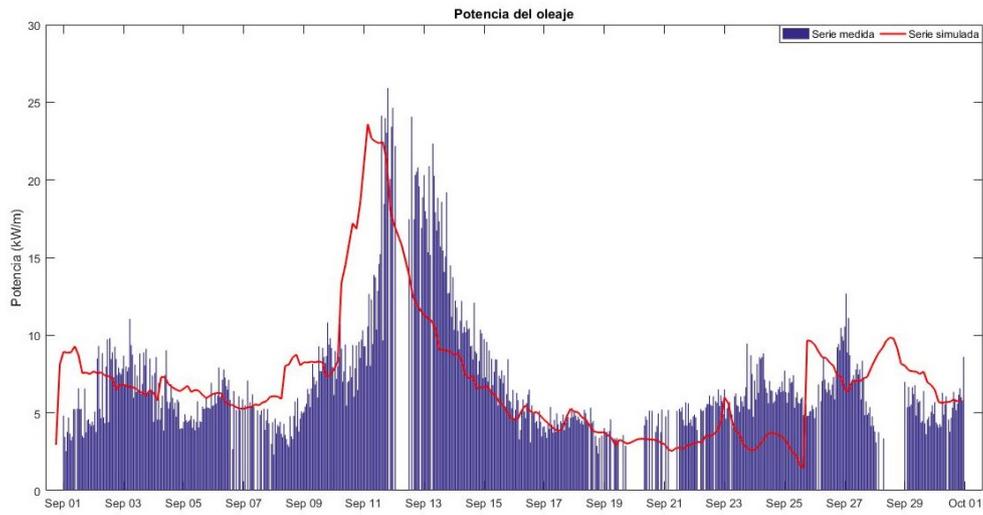


Figura 22: Energía potencial de septiembre 2017. Fuente: Elaboración propia

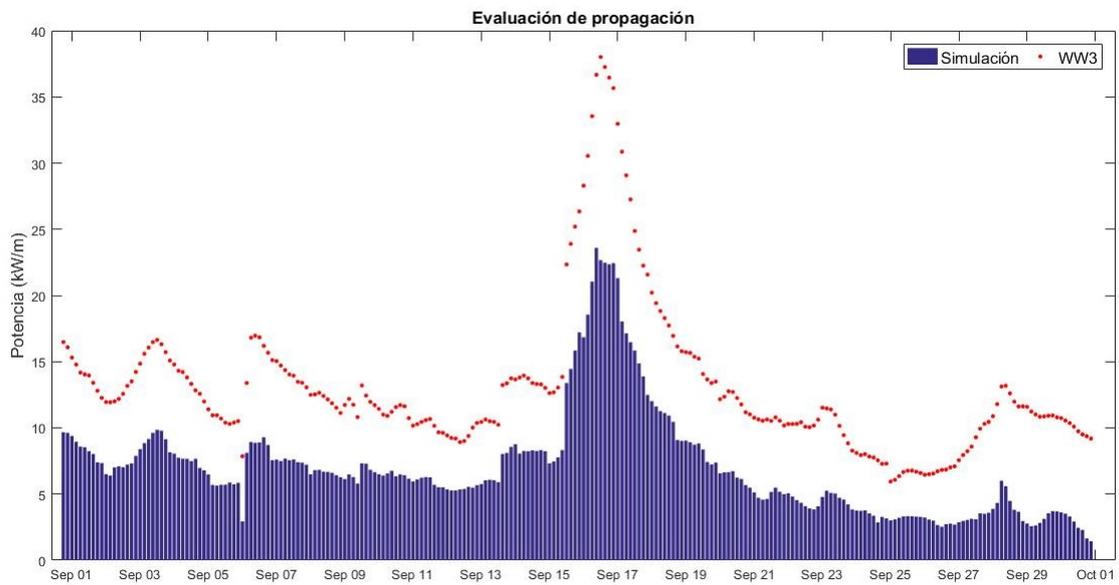


Figura 23: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Septiembre 2017. Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS

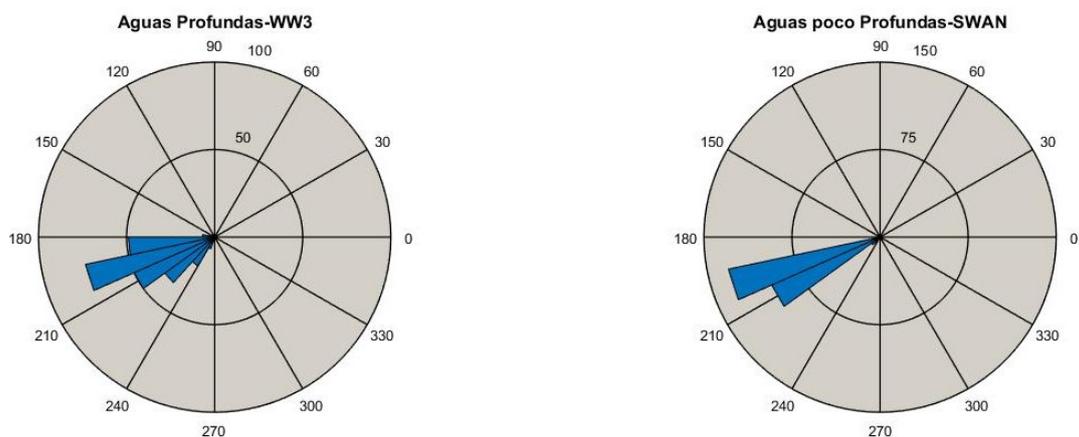


Figura 24: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Septiembre 2017. Fuente: Elaboración propia

6.5. Octubre 2017

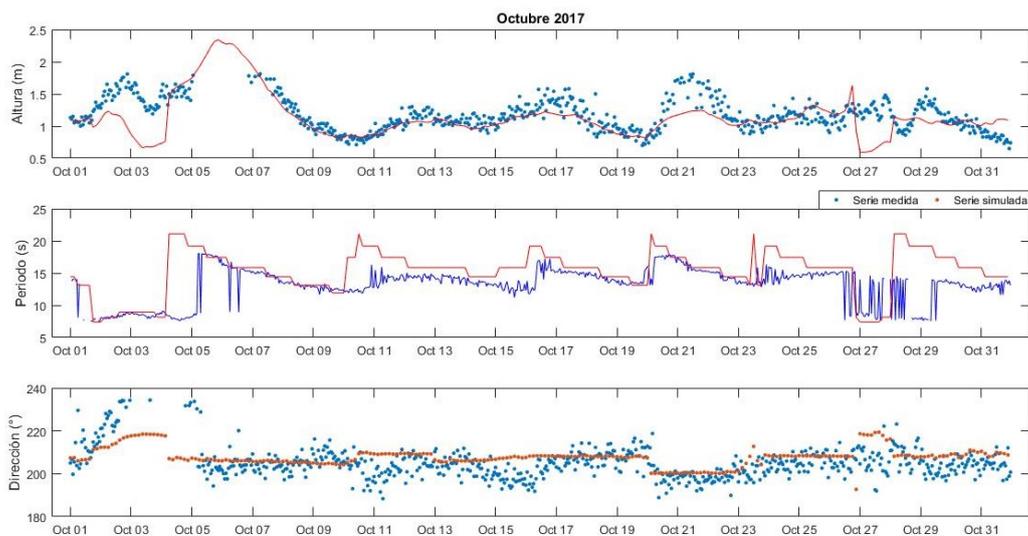


Figura 25: Parámetros oceanográficos simulados. Octubre 2017. Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Comparación entre SWAN y ADCP

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.44
Tp	0.36
Dp	0.41

6. RESULTADOS

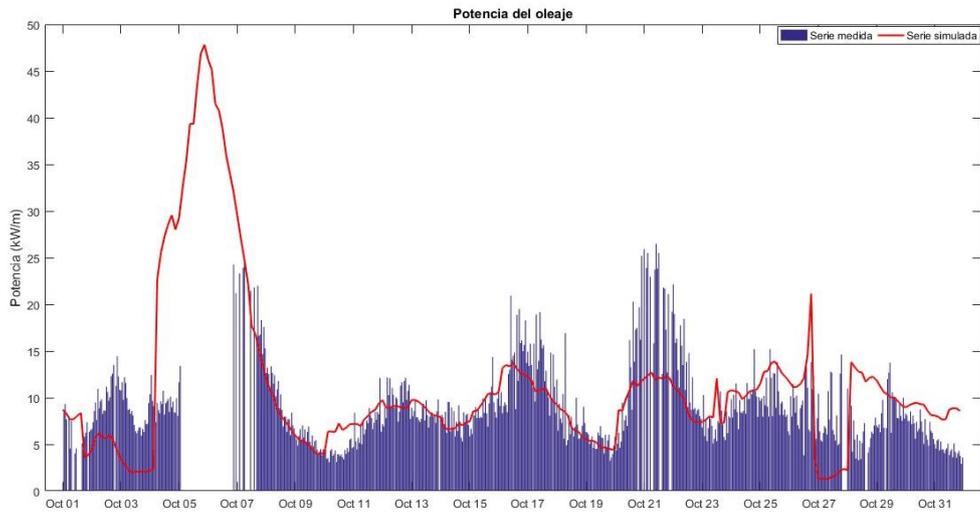


Figura 26: Energía potencial de octubre 2017. Fuente: Elaboración propia

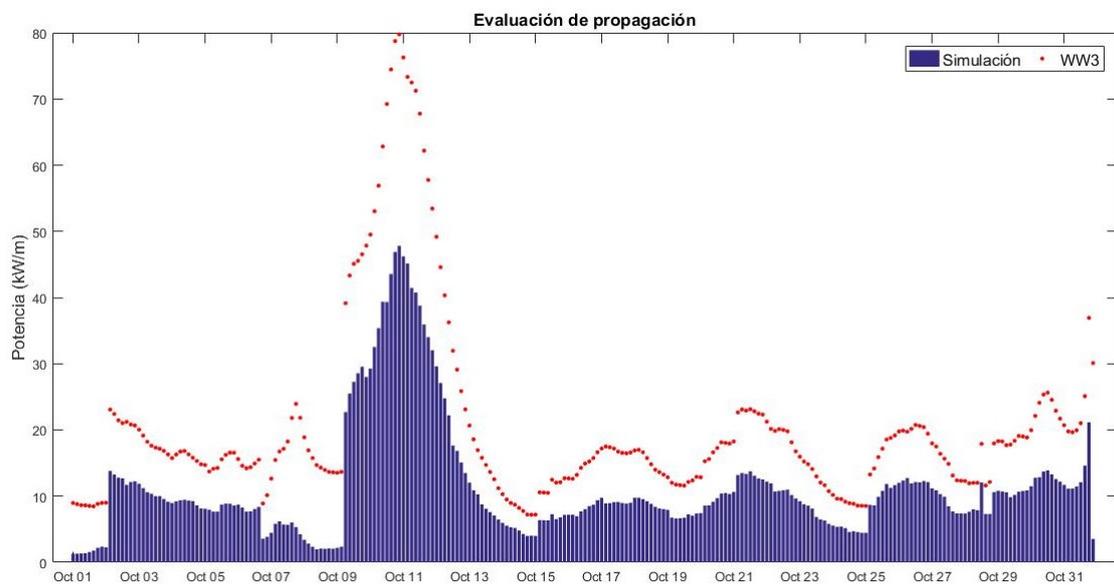


Figura 27: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Octubre 2017. Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS

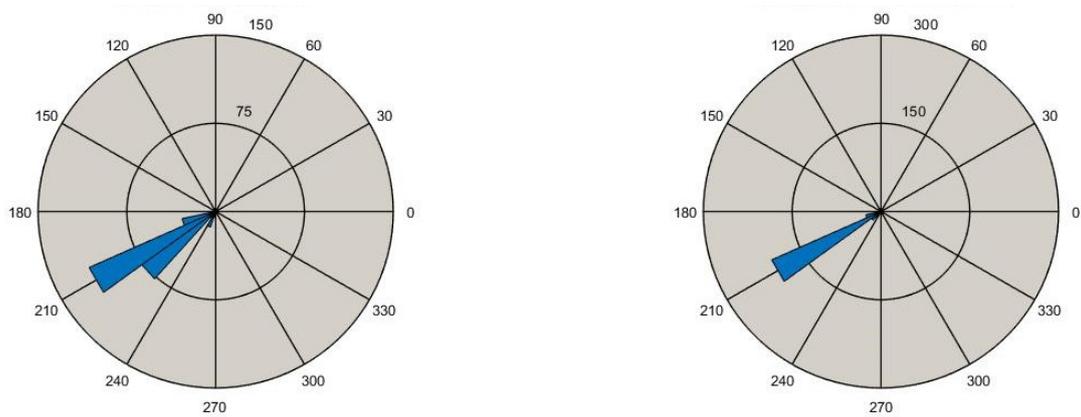


Figura 28: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Octubre 2017. Fuente: Elaboración propia

6.6. Noviembre 2017

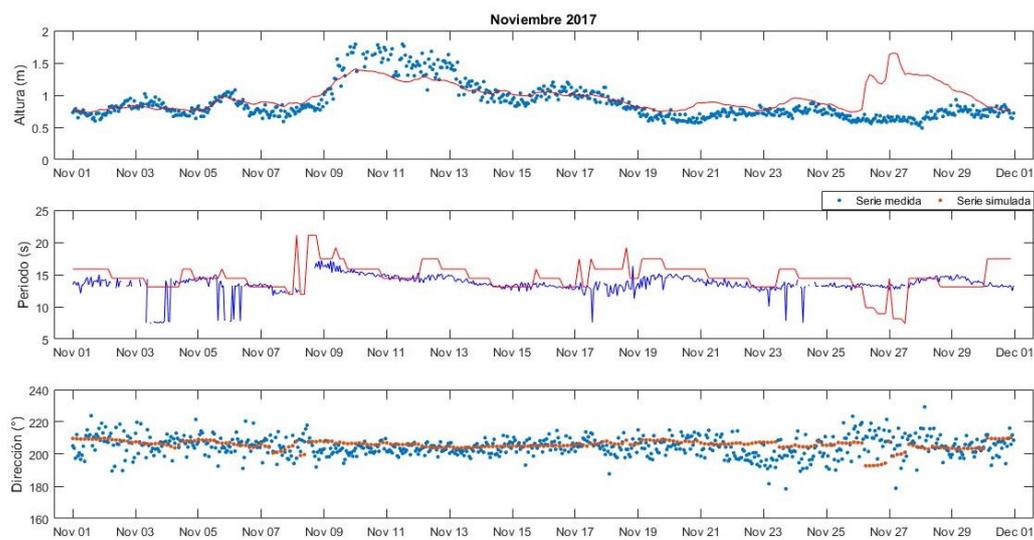


Figura 29: Parámetros oceanográficos simulados. Noviembre 2017. Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Comparación entre SWAN y ADCP

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.53
Tp	0.30
Dp	-0.025

6. RESULTADOS

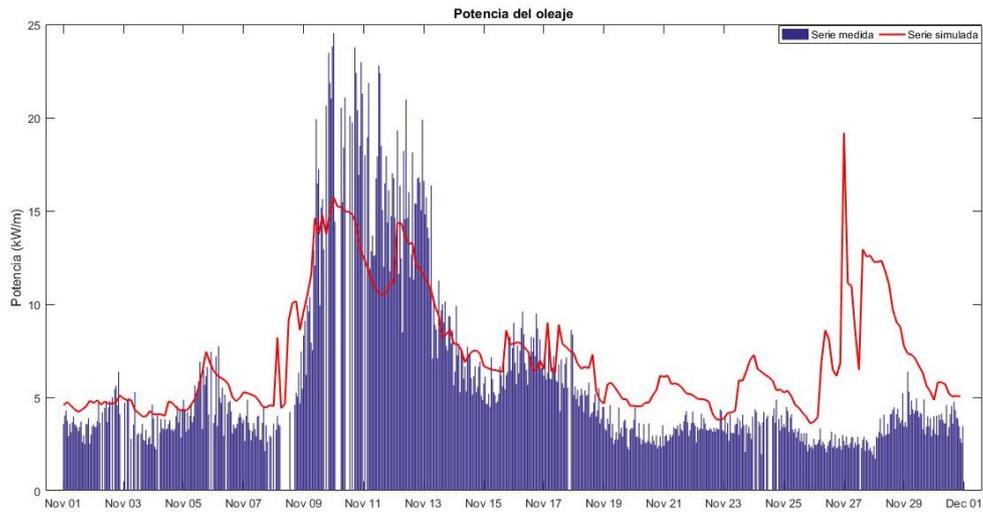


Figura 30: Energía potencial de noviembre 2017. Fuente: Elaboración propia

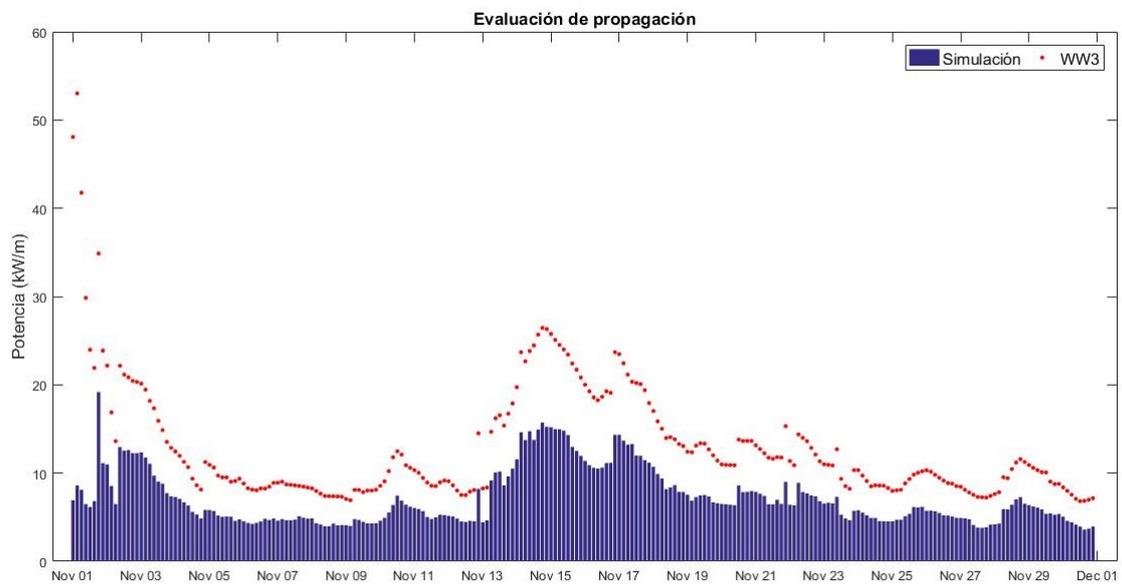


Figura 31: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Noviembre 2017. Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS

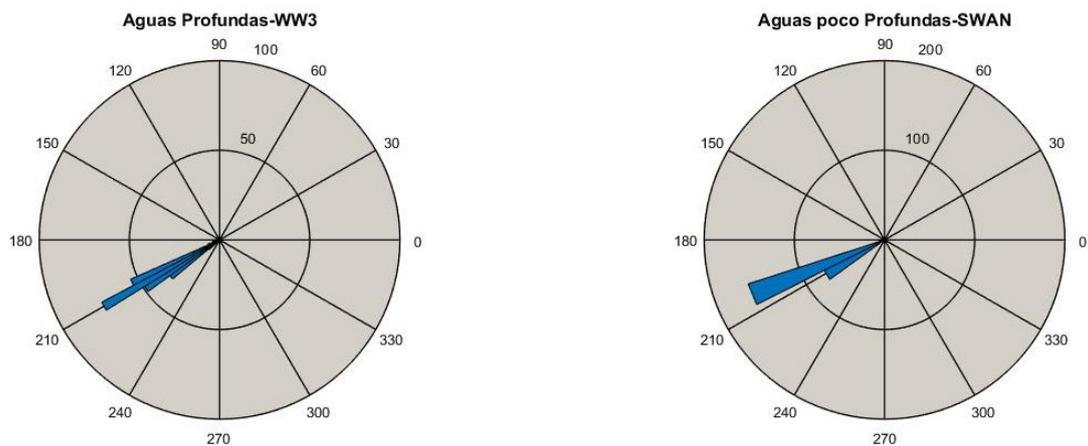


Figura 32: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Noviembre 2017. Fuente: Elaboración propia

6.7. Diciembre 2017

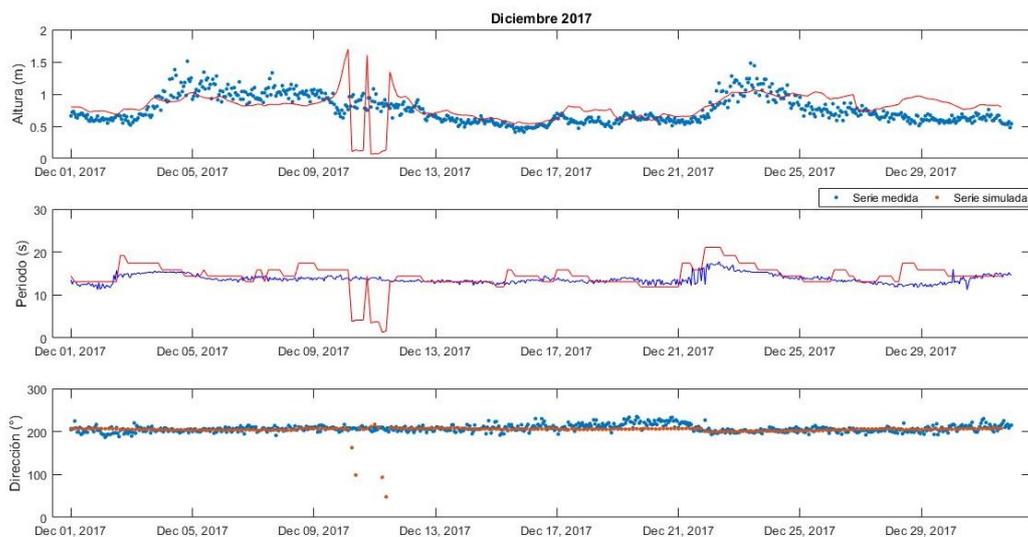


Figura 33: Parámetros oceanográficos simulados. Diciembre 2017. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Comparación entre SWAN y ADCP

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.66
Tp	0.60
Dp	0.27

6. RESULTADOS

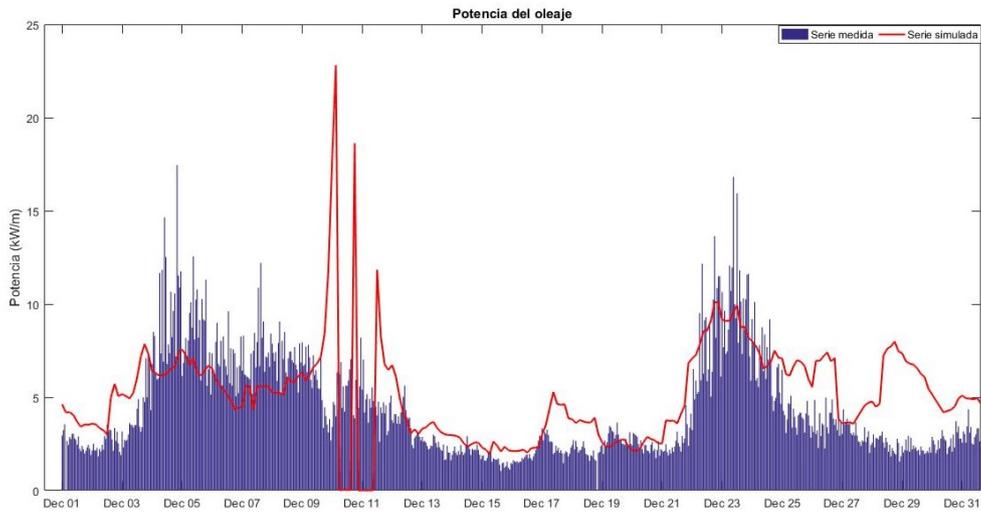


Figura 34: Energía potencial de diciembre 2017. Fuente: Elaboración propia.

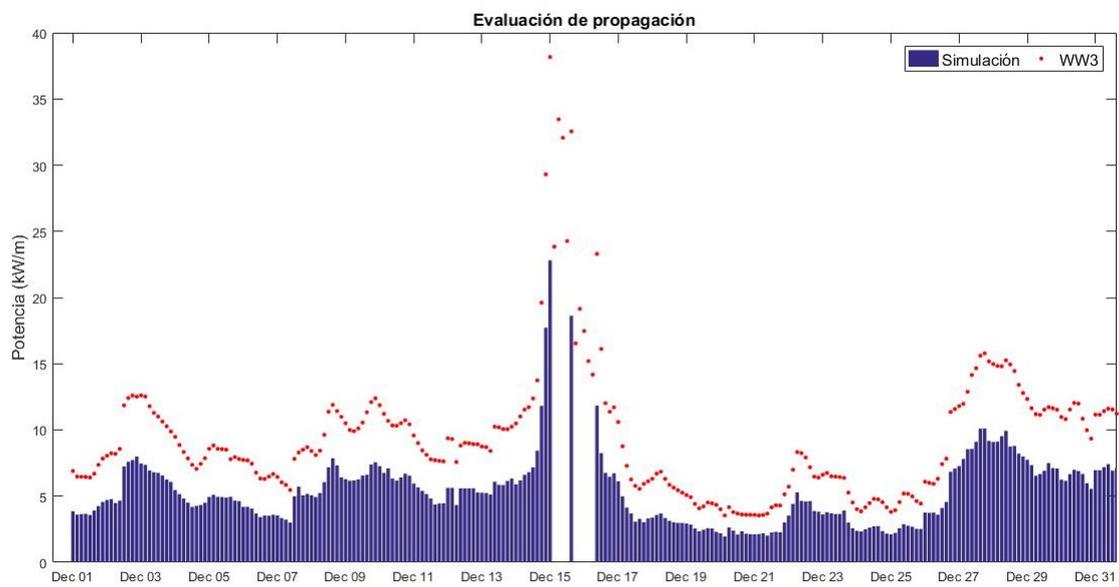


Figura 35: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Diciembre 2017. Fuente: Elaboración propia.

6. RESULTADOS

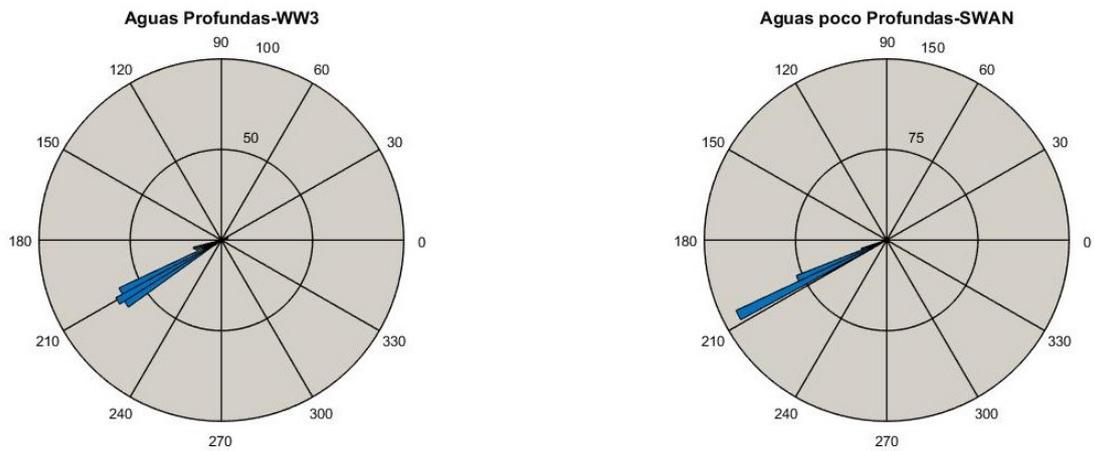


Figura 36: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Diciembre 2017. Fuente: Elaboración propia.

6.8. Enero 2018

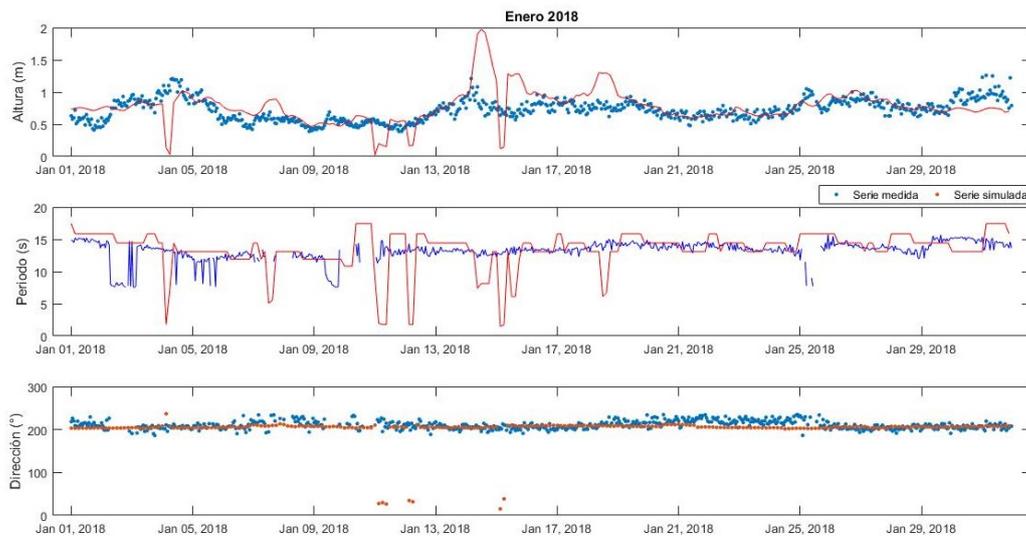


Figura 37: Parámetros oceanográficos simulados. Enero 2018. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Comparación entre SWAN y ADCP

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.57
Tp	0.24
Dp	0.007

6. RESULTADOS

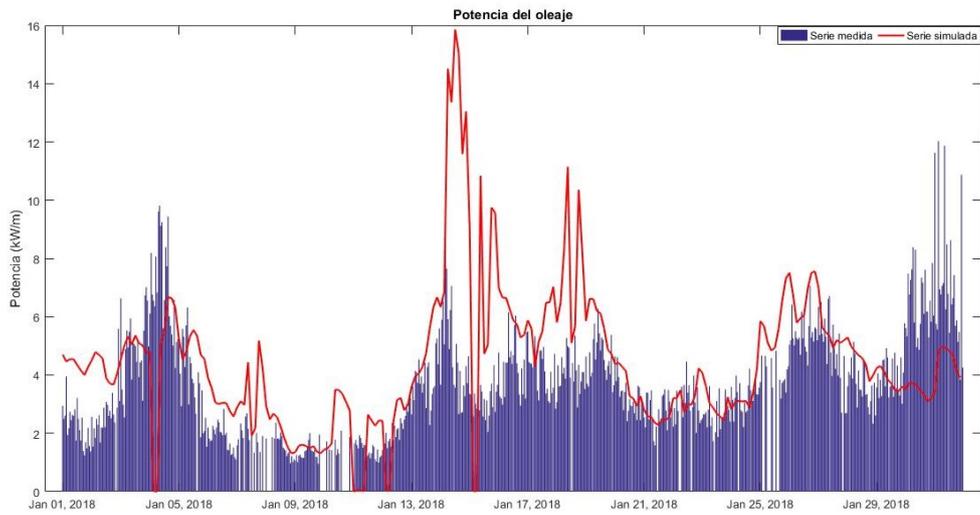


Figura 38: Energía potencial de enero 2018. Fuente: Elaboración propia.

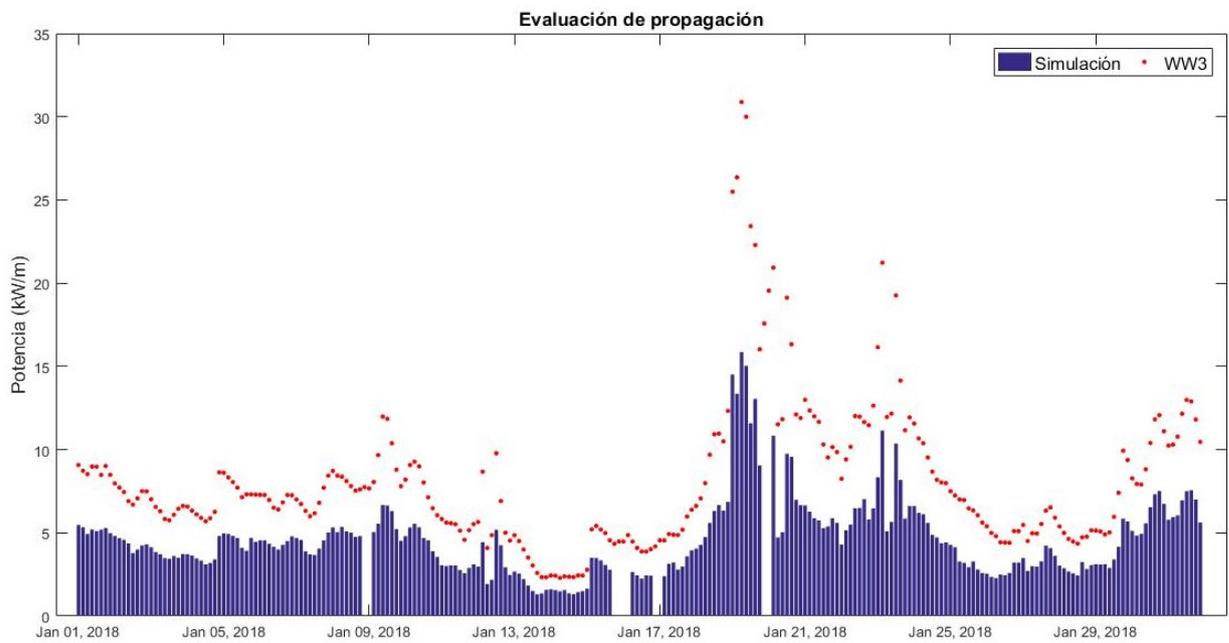


Figura 39: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Enero 2018. Fuente: Elaboración propia.

6. RESULTADOS

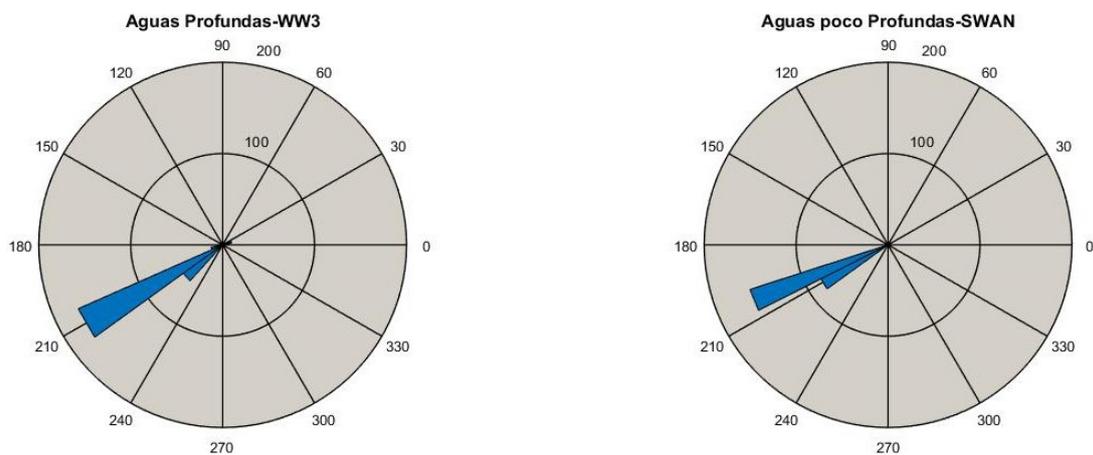


Figura 40: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Enero 2018. Fuente: Elaboración propia.

6.9. Febrero 2018

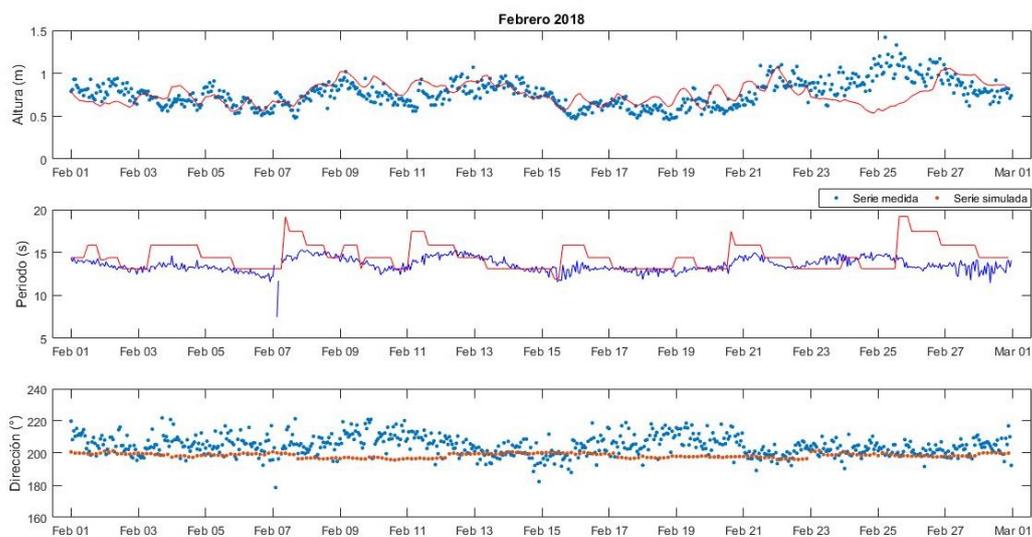


Figura 41: Parámetros oceanográficos simulados. Febrero 2018. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Comparación entre SWAN y ADCP

Parámetro	Coefficiente de correlación
Hs	0.28
Tp	0.24
Dp	-0.18

6. RESULTADOS

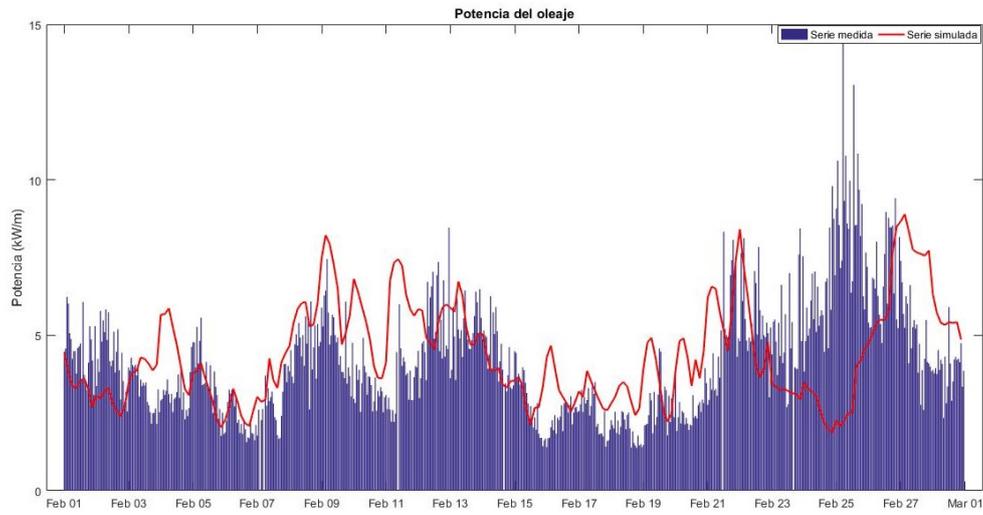


Figura 42: Energía potencial de febrero 2018. Fuente: Elaboración propia.

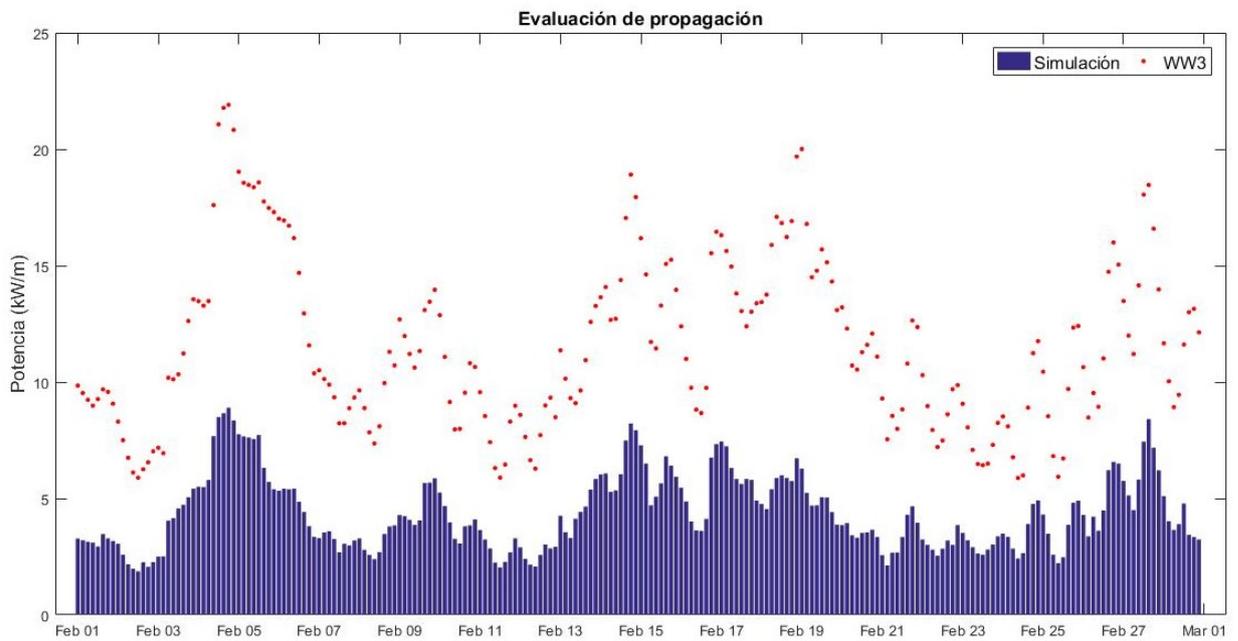


Figura 43: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Febrero 2018. Fuente: Elaboración propia.

6. RESULTADOS

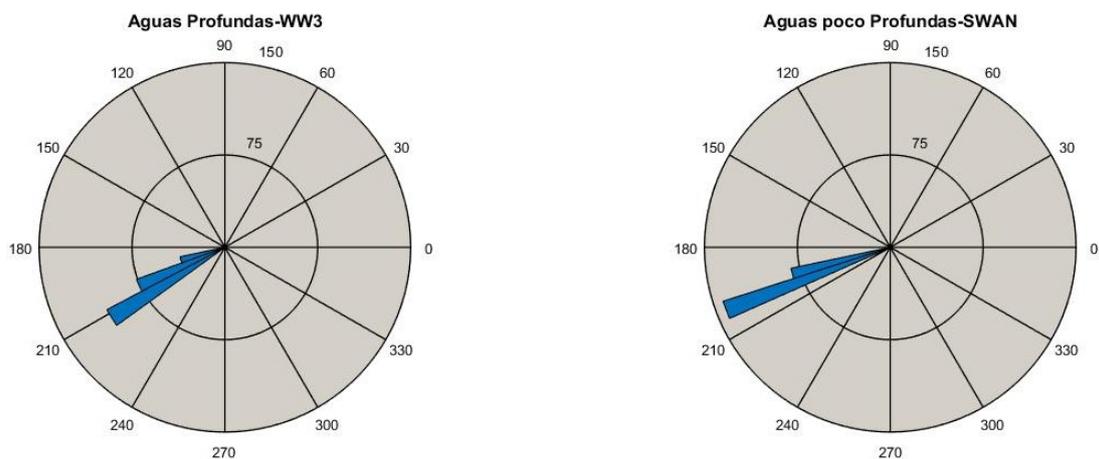


Figura 44: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Febrero 2018. Fuente: Elaboración propia.

6.10. Marzo 2018

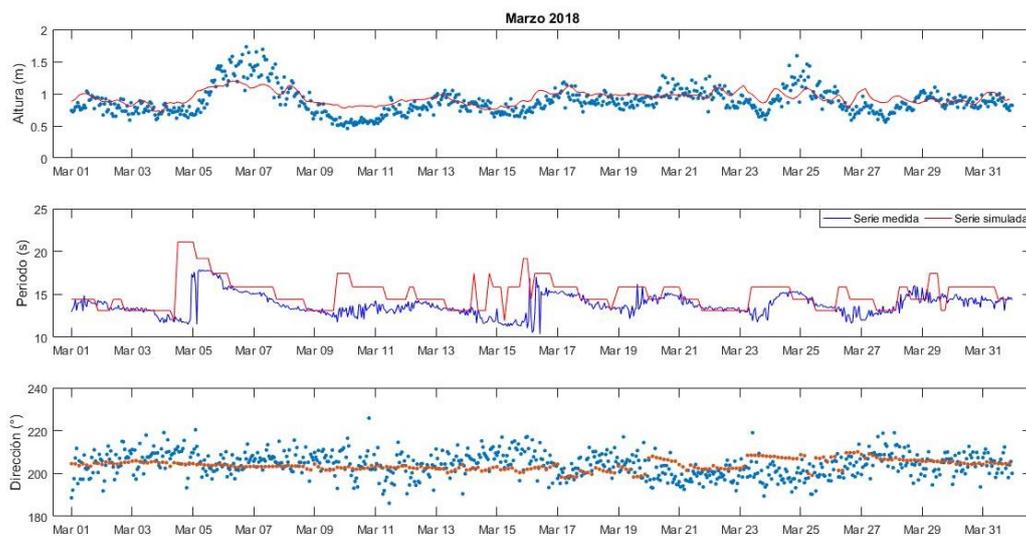


Figura 45: Parámetros oceanográficos simulados. Marzo 2018. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Comparación entre SWAN y ADCP

Parámetros	Coefficiente de correlación
Hs	0.66
Tp	0.24
Dp	-0.04

6. RESULTADOS

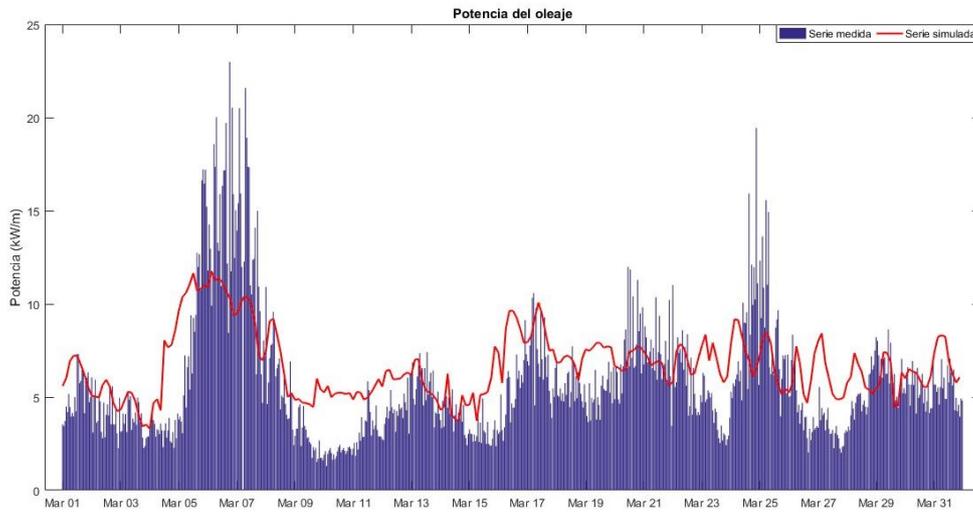


Figura 46: Energía potencial de marzo 2018. Fuente: Elaboración propia

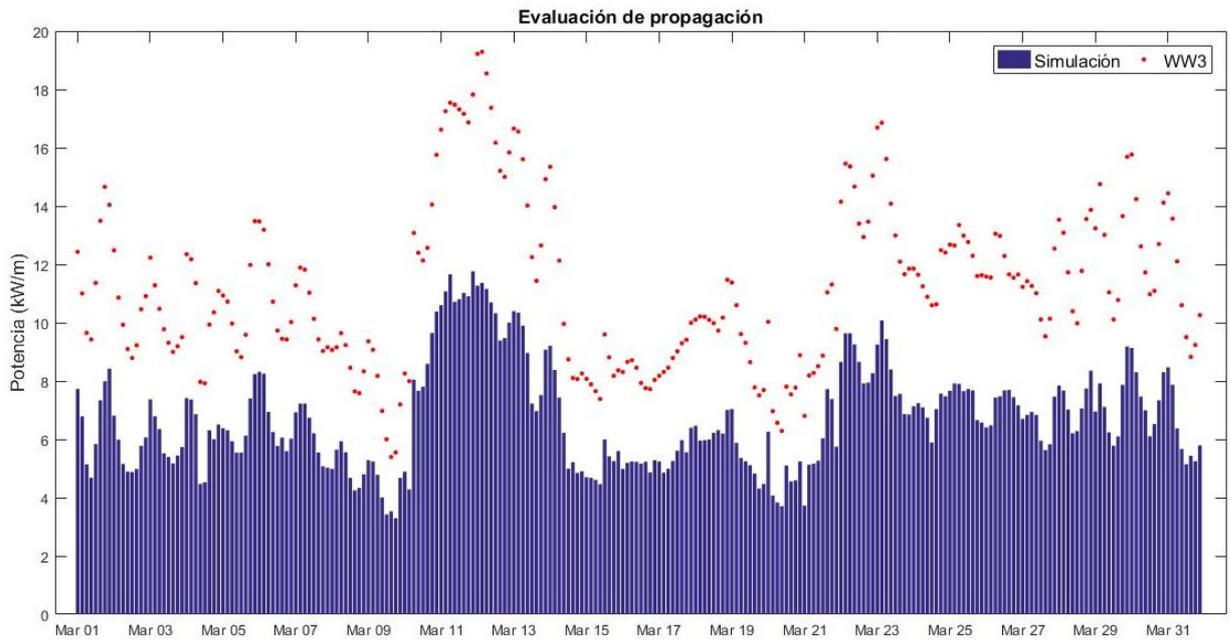


Figura 47: Comparación de energética entre modelo WW3-SWAN. Marzo 2018. Fuente: Elaboración propia.

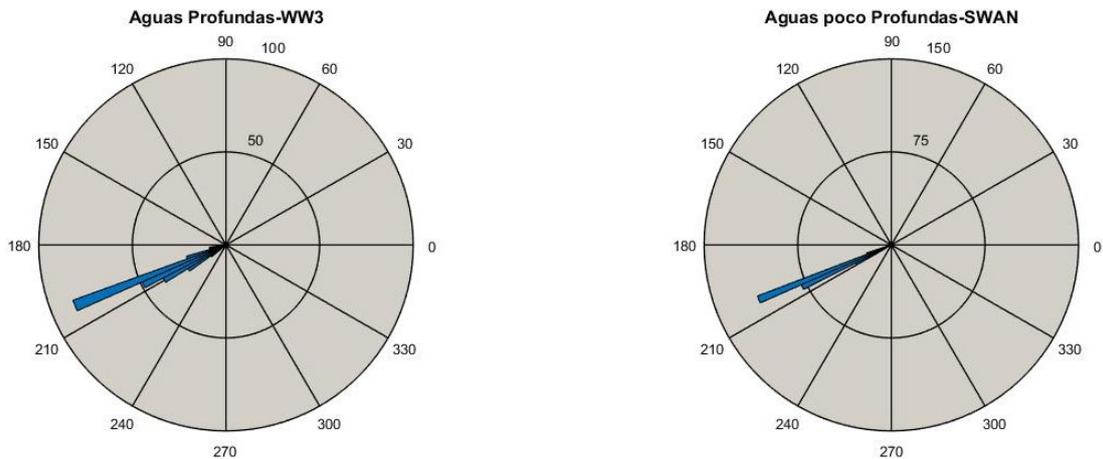


Figura 48: Espectro de dirección en aguas profundas y aguas someras. Marzo 2018. Fuente: Elaboración propia.

7. Análisis de Resultados

7.1. Climatología del oleaje

Se describe la climatología del oleaje tomando como rango temporal del tiempo de simulación: Junio-2017 a Marzo-2018. Se presenta la climatología como valores estadísticos por estación del año y mes del año.

7.1.1. Estaciones del año

Las tablas 13, 14 y 15 contienen la información referente a los valores de los estadísticos obtenidos en la simulación de los parámetros oceanográficos altura significativa, período y dirección. El Salvador experimenta dos estaciones climáticas durante el año, la estación seca y la estación lluviosa. Se consideró la estación lluviosa en el período que va desde la primera semana de junio hasta la última de octubre y la estación seca desde la primera semana de noviembre hasta la última de marzo.

De acuerdo a la tabla 13, la estación lluviosa posee el mayor promedio de altura con 1.11 metros mientras que la estación seca cuenta con un promedio de 0.85 metros.

Tabla 13: Estadísticos estacionales de Altura significativa (en metros)

Estación	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	2.34	0.60	1.11	0.98	1.06	0.26
Seca	1.97	0.07	0.85	0.87	0.85	0.20

La tabla 14, contiene los valores estadísticos de periodo para las estaciones que afectan a El Salvador. Se observa que la estación lluviosa tiene el periodo dominante

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

mayor con un promedio de 14.69 segundos, sin embargo, el valor de la estación seca tiene un promedio de 14.58 segundos.

Tabla 14: Estadísticos estacionales de Periodo (en segundos)

Estación	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	21.11	6.73	14.69	15.86	14.42	2.81
Seca	21.11	1.46	14.58	14.42	14.42	1.97

La tabla 15, muestra que la dirección del oleaje no tiende a cambiar significativamente durante los cambios estacionales. Los valores promedio oscilan entre 203 – 205 grados.

Tabla 15: Estadísticos estacionales de Dirección (en grados)

Estación	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	219.40	192.70	205.03	200.27	205.46	4.59
Seca	236.68	15.33	203.79	210.17	204.66	8.12

Según la tabla 16, la estación lluviosa presenta valores más energéticos comparados con la estación seca. El valor promedio es de $9.80kW/m$. Otro dato importante a mencionar es el valor máximo de la estación fue de $47.81kW/m$ y en la época seca con influencia de los vientos Norte, el valor mínimo de energía es $0.002kW/m$

Tabla 16: Estadísticos estacionales de Energía potencial (en kW/m)

Estación	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	47.81	1.31	9.80	9.16	8.37	6.06
Seca	22.81	0.002	5.59	5.40	5.19	2.69

7.1.2. Estadísticas mensuales

La tabla 17, contiene los valores estadísticos correspondientes a la altura significativa mensual del tiempo de simulación. Siendo julio 2017 el mes con mayor promedio y febrero el menor valor de altura.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 17: Estadísticos mensuales de Altura significativa(en metros)

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Junio 2017	1.75	0.79	1.19	1.17	1.17	0.27
Julio 2017	1.53	0.78	1.15	0.98	1.16	0.21
Agosto 2017	1.66	0.64	1.09	0.90	1.05	0.25
Septiembre 2017	1.61	0.62	1.01	0.98	0.98	0.17
Octubre 2017	2.34	0.60	1.14	1.11	1.08	0.34
Noviembre 2017	1.65	0.73	0.98	0.76	0.91	0.20
Diciembre 2017	1.70	0.07	0.80	0.84	0.82	0.21
Enero 2018	1.97	0.12	0.79	0.76	0.76	0.23
Febrero 2018	1.08	0.53	0.76	0.67	0.74	0.12
Marzo 2018	1.20	0.71	0.94	1.00	0.93	0.10

La tabla 18, muestra los estadísticos del periodo del oleaje mensual del tiempo de simulación. Se observa que los meses con mayor promedio son junio y octubre y el menor promedio se observa en septiembre y enero.

Tabla 18: Estadísticos mensuales de Periodo(en segundos)

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Junio 2017	19.19	13.11	15.26	15.86	15.86	1.46
Julio 2017	21.11	11.92	15.33	14.42	14.42	1.81
Agosto 2017	21.11	9.85	15.05	15.86	15.86	1.85
Septiembre 2017	21.11	6.73	12.84	14.42	13.11	3.44
Octubre 2017	21.11	7.40	15.29	15.86	15.86	3.34
Noviembre 2017	21.11	7.40	14.64	14.42	14.42	2.06
Diciembre 2017	21.11	11.92	14.79	14.42	14.42	1.90
Enero 2018	17.45	1.46	13.90	14.42	14.42	2.38
Febrero 2018	19.19	11.92	14.55	13.11	14.42	1.50
Marzo 2018	21.11	11.92	15.02	15.86	14.42	1.72

De acuerdo a la tabla 19 los estadísticos de la dirección del oleaje se mantienen prácticamente invariables durante los meses del año simulado. Enero tienen valores más dispersos que los demás meses con una desviación estándar de 16.39°.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 19: Estadísticos mensuales de Dirección (en grados)

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Junio 2017	211.56	199.95	205.82	199.95	206.05	3.55
Julio 2017	210.02	196.59	204.65	207.23	204.94	3.51
Agosto 2017	210.80	195.05	203.28	201.61	201.96	3.35
Septiembre 2017	219.13	194.09	204.11	205.36	201.86	5.92
Octubre 2017	219.40	192.70	207.79	205.96	207.97	4.22
Noviembre 2017	210.40	192.76	205.77	206.22	206.11	2.88
Diciembre 2017	216.55	199.63	205.31	206.56	205.74	2.23
Enero 2018	236.68	15.33	204.96	210.17	206.07	16.39
Febrero 2018	201.61	195.67	198.53	197.06	198.51	1.36
Marzo 2018	210.14	198.06	203.96	203.76	203.61	2.40

La tabla 20 muestra los valores de energía simulados de los diferentes meses. En promedio los meses mas energéticos son julio y octubre con valores promedio de $10.60kW/m$ y $11.27kW/m$ respectivamente.

Tabla 20: Estadísticos mensuales de Energía potencial (en kW/m)

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Junio 2017	22.20	4.36	11.54	10.97	10.59	5.40
Julio 2017	22.47	4.38	10.60	14.54	10.48	4.21
Agosto 2017	22.03	2.04	9.62	3.90	8.74	5.01
Septiembre 2017	23.60	1.43	7.03	7.56	6.41	4.05
Octubre 2017	47.81	1.31	11.27	8.72	9.11	8.90
Noviembre 2017	19.18	3.60	7.20	7.87	6.20	3.14
Diciembre 2017	22.81	0.01	5.12	5.58	4.93	2.77
Enero 2018	15.86	0.00	4.44	4.55	4.26	2.44
Febrero 2018	8.90	1.87	4.39	5.84	4.01	1.62
Marzo 2018	11.76	3.30	6.73	7.22	6.39	1.79

8. Conclusiones

- La calidad de los resultados de la simulación depende directamente de la calidad de datos de entrada y variables de contorno con los que inicia el modelo, al poseer una batimetría tan fina (30 metros) es posible mediante el uso de las mallas computacionales obtener mejores resultados.
- SWAN es muy sensible con la cantidad de nodos de forzamiento para la variable de entrada del viento y en vista que lo que se desea es conocer el potencial en un punto geográfico, fue posible reducir la cantidad de nodos y a su vez se redujo el tiempo que el modelo tarda en entregar los resultados de la simulación.
- Mediante la implementación de SWAN en una estación de trabajo de poca velocidad de procesador y memoria de almacenamiento, fue posible modelar el oleaje frente a las costas del Puerto de Acajutla y generar salidas de las magnitudes relacionadas.
- Con el trabajo de investigación realizado se obtuvo resultados consistentes con las mediciones del Perfilador Acústico del Efecto Doppler (ADCP) ubicado a 4km del puerto y a 20 metros de profundidad, en el periodo de estudio. Los valores conseguidos se presentaron como series temporales mensuales de altura significativos, período, dirección del oleaje y energía potencial del oleaje.
- Utilizar SWAN en modo estacionario generó que las series presentaran un desfase temporal de 3.3 días entre la predicción instantánea y el momento de llegada real de las olas, esto se debe a que el modelo no toma en cuenta el tiempo necesario para que el oleaje atraviese el dominio del modelo.
- Los valores de altura significativa varían desde 0.76 metros hasta 1.20 metros de altura, con un promedio de 0.96 metros en los 10 meses de simulación, siendo junio y octubre del 2017 los meses con mayor promedio del tiempo de estudio. Los valores de periodo del oleaje encontrados oscilan entre los 12.84 segundos a los 15.29 segundos, con un promedio de 14.63 segundos.
- El potencial energético encontrado varía entre 4.39 y 11.54 kW/m con un promedio de 7.69 kW/m, estos valores concuerdan con el potencial calculado a partir de las mediciones hechas in situ. La dirección de la componente más energética de las olas presenta una dirección predominante hacia el Noreste.

9. Recomendaciones

- Debido a las limitantes de la estación de trabajo con la que se realizaron las simulaciones no fue posible utilizar elementos de discretización semejantes a la batimetría por el tiempo de cálculo de cada estado de mar. Por ello es necesario utilizar una computadora con un mejor microprocesador y de mayor almacenamiento para realizar los cálculos en el menor tiempo posible.
- Para la condición de contorno de vientos superficiales, se utilizó la información registrada por CFS-v2 del Centro Nacional para la Predicción Ambiental con una resolución de 22km. Para mejor la precisión de las salidas del modelo se recomienda correr un modelo atmosférico mesoescalar, por ejemplo MM5, WRF, u otro para obtener valores de velocidad y dirección de viento a una escala local.
- Ya que la forma de ejecución del modelo permite encontrar las variables oceanográficas simuladas en una coordenada, es posible realizar más simulaciones e identificar puntos energéticos frente al puerto de Acajutla y/o en otra zona costera del país que sirvan como estudios de factibilidad para el aprovechamiento energético del potencial del oleaje.

10. Bibliografía

- [Booij et al., 2004] Booij, N., Haagsma, I., Holthuijsen, L. a., Kieftenburg, A., Ris, R., vd Westhuysen, A., and Zijlema, M. (2004). Swan user manual, swan cycle iii version 40.51. *Delft University of Technology*.
- [Booij et al., 1997] Booij, N., Holthuijsen, L., and Ris, R. (1997). The "swan" wave model for shallow water. In *Coastal Engineering 1996*, pages 668–676.
- [González-Carrillo et al., 2015] González-Carrillo, A., Ruiz-Cabrera, R., Hernández-Escobedo, Q., Fernández-García, A., and Manzano-Agugliaro, F. (2015). Evaluación del potencial energético del oleaje en la costa sur del golfo de méxico. *Dyna*, 82(193):49–55.
- [Herrera, 2009] Herrera, W. E. A. (2009). *Descripción del oleaje en El Salvador*. Undergraduate thesis, Universidad Centroamericana "José Simeon Cañas".
- [Holthuijsen, 2010] Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- [Kinsman, 1965] Kinsman, B. (1965). *Wind Waves. The Generation and Propagation on the Ocean Surface*. Prentice-Halle Incorporated.
- [Lizano Rodríguez et al., 2001] Lizano Rodríguez, O. G., Ocampo, F. J., Gamboa, A., Fernando, L., Vega, R., and Puig, J. M. (2001). Evaluación de modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico del oleaje en centroamérica y méxico.
- [Macdonel et al., 1999] Macdonel, G., Pindter, J., Herrejón, d. l. T., Pizá, O., and López, G. (1999). Ingeniería marítima y portuaria. *Editorial Alfa Omega, México, DF*.
- [MARN, 2007] MARN (2007). La zona costero marina de el salvador. *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
- [Martín Amer, 2015a] Martín Amer, C. (2015a). Evaluación del potencial de la energía del oleaje en la costa de marruecos.
- [Martín Amer, 2015b] Martín Amer, C. (2015b). Evaluación del potencial de la energía del oleaje en la costa de marruecos.
- [Mei, 1984] Mei, C. C. (1984). The applied dynamics of ocean surface waves.
- [Osorio Arias et al., 2010] Osorio Arias, A. F., Gómez Giraldo, E. A., Álvarez Silva, O. A., Molina Flórez, L. G., Osorio Cano, J. D., et al. (2010). Bases metodológicas para caracterizar el oleaje local (sea) y de fondo (swell) en el golfo de urabá.
- [Ramírez et al., 2007] Ramírez, G., de Dios, J., Mejía Fuentes, O. I., and Menjívar Pino, P. J. (2007). *Evaluación del potencial energético del oleaje en las costas de El Salvador*. Undergraduate thesis, Universidad de El Salvador.

BIBLIOGRAFÍA

- [Saha et al., 2011] Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., ya Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., and Becker, E. (2011). Ncep climate forecast system version 2 (cfsv2) selected hourly time-series products.
- [Silva, 2005] Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. *Instituto de Ingeniería UNAM. Serie Docencia*, 49:145–170.

Apéndice A

Conversión de componentes a magnitud y dirección de viento

Los datos de viento fueron descargados del CFS-v2 por componentes del viento. El siguiente código es para convertir las componentes en la magnitud del viento y para corregir la dirección en formato de convención náutica.

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 [D1,S]= xlsread('p1.xlsx');
5
6 %Punto -90.0, 13.39
7 u = D(:,2);           %componente u
8 v = D(:,3);           %componente v
9 wind=sqrt((u.^2)+(v.^2)); %magnitud
10 c=v./u;               %argumento para encontrar la direccion
11 teta=atand(c);        %direccion
12
13 %Esta seccion es para convertir los angulos en la convencion nautica
14 for i=1:9480;
15     if (u(i,1)>0 && v(i,1)>0)
16         beta(i,1)= 270-teta(i,1);
17
18     elseif (u(i,1)<0 && v(i,1)<0)
19         beta(i,1)=90-teta(i,1);
20
21     elseif (u(i,1)<0 && v(i,1)>0)
22         beta(i,1)=90+teta(i,1);
23
24     else (u(i,1)>0 && v(i,1)<0)
25         beta(i,1)=270+teta(i,1);
26     end
27 end
```

Apéndice B

Formato de datos de entrada

B1. Batimetría

Para que el modelo pueda leer el archivo de batimetría debe cumplir con un formato establecido. Ver Figura 49.

- Formato ASCII.
- Extensión .dat.
- Columnas en orden X Y Z, separadas por espacios.
- X representa Longitud, Y representa Latitud
- Z representa la batimetría (sondas en positivo, tierra negativo).
- Solo información numérica, no admite texto.

Longitud	Latitud	Profundidad
-90.13134	13.54191	69.011
-90.13106	13.54191	69.001
-90.13078	13.54191	68.991
-90.13049	13.54191	68.979
-90.13021	13.54191	68.962
-90.12993	13.54191	68.924
-90.12965	13.54191	68.868
-90.12936	13.54191	68.811
-90.12908	13.54191	68.755
-90.1288	13.54191	68.701
-90.12852	13.54191	68.648
-90.12823	13.54191	68.596
-90.12795	13.54191	68.546
-90.12767	13.54191	68.497
-90.12739	13.54191	68.448
-90.12711	13.54191	68.401

Figura 0.1: Formato de batimetría

B2. Archivo de Forzamiento

Este documento xls incluye información sobre resolución temporal, la localización de los nodos de oleaje y viento, descritos en la Figura 7. y las características del oleaje y viento. La velocidad del viento está dada en m/s , el periodo en s y para la dirección del viento y oleaje se utilizó la convención náutica, es decir, la dirección de donde proviene el viento y oleaje en grados $^{\circ}$.

Año	Mes	Día	Horas	Altura	Periodo	Dirección	Marea	Gama	Sigma	Wind	D_wind	ID
2017	9	31	18:00:00	1.51	14.45	195.86	0.413	3.3	20	2.3471046	35.1120112	id_1
2017	9	31	21:00:00	1.50	14.30	195.09	-0.813	3.3	20	3.18554548	24.8756373	id_2
2017	9	1	00:00:00	1.48	13.98	198.85	-0.309	3.3	20	2.95655205	46.370451	id_3
2017	9	1	03:00:00	1.46	13.87	197.57	0.984	3.3	20	3.2984845	22.8336542	id_4
2017	9	1	06:00:00	1.43	13.86	196.44	0.627	3.3	20	3.80573252	32.7714093	id_5
2017	9	1	09:00:00	1.42	13.92	195.49	-0.715	3.3	20	3.09182794	21.8358214	id_6
2017	9	1	12:00:00	1.41	14.04	192.85	-0.498	3.3	20	2.05236449	227.369508	id_7
2017	9	1	15:00:00	1.38	14.08	192.32	0.779	3.3	20	4.87179638	212.254711	id_8
2017	9	1	18:00:00	1.35	14.05	191.65	0.681	3.3	20	2.18817275	260.795959	id_9
2017	9	1	21:00:00	1.33	13.86	193.09	-0.668	3.3	20	2.76003623	55.3311048	id_10
2017	9	2	00:00:00	1.32	13.72	192.76	-0.607	3.3	20	2.37497368	54.7708134	id_11
2017	9	2	03:00:00	1.32	13.70	192.36	0.781	3.3	20	3.07870102	24.5671713	id_12
2017	9	2	06:00:00	1.32	13.78	191.84	0.921	3.3	20	3.2635257	18.7680601	id_13
2017	9	2	09:00:00	1.32	13.99	191.21	-0.487	3.3	20	1.34331679	66.297354	id_14
2017	9	2	12:00:00	1.33	14.21	187.14	-0.742	3.3	20	4.41376257	188.075028	id_15
2017	9	2	15:00:00	1.36	14.24	187.15	0.508	3.3	20	3.65815527	210.560839	id_16
2017	9	2	18:00:00	1.38	14.19	187.42	0.869	3.3	20	1.89855208	264.559668	id_17
2017	9	2	21:00:00	1.42	14.11	188.03	-0.344	3.3	20	0.80430094	231.562699	id_18

Figura 0.2: Formato de archivo de forzamiento