



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD MÉRIDA  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS DEL MAR

**CARACTERIZACIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE EN YUCATÁN**

Tesis que presenta  
Marcela Santana Guzmán

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias  
en la especialidad de Biología Marina

Director de tesis  
Dr. Ismael de Jesús Mariño Tapia

Mérida, Yucatán, México

Enero, 2021

## RESUMEN

En los años recientes el planeta ha estado sufriendo un gran deterioro derivado de las exigencias de la especie humana, lo que ha impulsado áreas de investigación que buscan aminorar el impacto, entre estas se encuentran el desarrollo de las energías renovables. En este estudio se analiza el recurso oleaje en la costa norte de la península de Yucatán como fuente de energía desde un enfoque teórico. Se compararon tres fuentes de datos disponibles para la zona, el modelo WAM, ERA-5 y MIKE 21, siendo este último el seleccionado para la caracterización. El modelo fue validado con observaciones disponibles a 10 y 5 metros de profundidad, obteniéndose resultados satisfactorios a 10 metros ( $r= 0.75$ ) pero deficientes a 5 metros ( $r=0.56$ ), por lo que se decidió emplear los nodos cercanos a 10 metros de profundidad para la caracterización del recurso, donde se encontró que para los 8 sitios analizados la observación más frecuente de Hs-Tp se encuentra en el rango 0.5-1metros y 3-5 segundos respectivamente, con dirección predominantemente noreste. Estas combinaciones generan una potencia de 0.5-2 kW/m la cual está presente en el 30% de las observaciones. Por su parte el puerto que presenta la mayor energía acumulada anual es Sisal con 75.6MWh, mientras que el puerto de menor energía acumulada fue Celestún con 54.59 MWh. Finalmente se aplicó a matriz de potencia del CEO Oyster a las condiciones de Sisal y sólo se logró obtener el 0.16% de la potencia extraíble con el dispositivo (290kW) lo que sugiere que es necesaria la investigación y desarrollo de dispositivos capaces de extraer la energía en las condiciones presentadas.

## ABSTRACT

In recent years the world has been suffering a substantial damage induced by the requirements of human beings, this has promoted research areas that seek to lessen the impact, among these are the development of renewable energy. In this study, the wave resource on the north coast of the Yucatan peninsula is analyzed as an energy source from a theoretical approach. Three sources of data available for the area were compared, the WAM, ERA-5 and MIKE 21 model, the latter being the one selected for characterization. The model was validated with observations available at 10 and 5 meters depth, obtaining satisfactory results at 10 meters ( $r = 0.75$ ) but deficient at 5 meters ( $r = 0.56$ ). Therefore, the nodes close to 10 meters depth were used for the characterization of the resource. For the 8 sites chosen along the northern coast of Yucatan, the most frequent observation of  $H_s$ - $T_p$  is in the range 0.5-1 meters and 3-5 seconds respectively, with a predominant northeasterly direction. These combinations generate a power of 0.5-2 kW / m which occurs 30% of the time. The site with the highest annual accumulated energy is Sisal with 75.6 MWh, meanwhile Celestún was the lowest with 54.59 MWh. Finally, the Oyster WEC power matrix was applied to the Sisal conditions and it was only possible to obtain 0.16% of the extractable power with the device (290kW), which suggests that further research and development of devices capable of extracting energy for this wave characteristics is still necessary.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al CONACYT por la beca otorgada para hacer posible el curso de mis estudios de maestría.

Al CINVESTAV por complementar mi formación académica y profesional.

Al CEMIE-Océano por las oportunidades y herramientas facilitadas para la elaboración de este proyecto.

A mi asesor, el Dr. Ismael por su paciencia y resiliencia durante la elaboración de este proyecto.

A mis revisores, el Dr. Alejandro Souza y el Dr. Christian Appendini por enriquecer mi trabajo con sus observaciones.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	i
ABSTRACT .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TABLA DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Las energías renovables oceánicas.....	1
Convertidores de energía del oleaje .....	2
Antecedentes de aprovechamiento del oleaje.....	4
II. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	7
III. MARCO TEÓRICO .....	8
Oleaje y sus características.....	8
Representación espectral del oleaje .....	10
Descripción estadística del oleaje.....	11
Evaluación del recurso de oleaje y su aprovechamiento .....	13
Cálculo de la energía y potencia del oleaje.....	13
Enfoques y herramientas para la evaluación de energía del oleaje .....	14
IV. METODOLOGÍA.....	18
Validación del modelo numérico MIKE 21 .....	18
Comparación entre modelos .....	21
Caracterización del recurso.....	22
Variabilidad temporal .....	23
Comparación con el recurso eólico .....	23
Mediciones en playa .....	25
Tratamiento de datos del velocímetro 3D.....	26
V. RESULTADOS.....	28
Validación del modelo numérico MIKE 21 .....	28
Comparación entre modelos numéricos .....	36

Caracterización del recurso.....	40
Variabilidad.....	50
Comparación con el recurso eólico .....	52
Mediciones en playa .....	54
VI. DISCUSIÓN.....	55
Validación del modelo numérico.....	55
Comparación de modelos.....	56
Caracterización del recurso.....	57
Medición en playa.....	59
VII. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	59
VIII. BIBLIOGRAFÍA .....	61
IX. ANEXOS.....	64
ANEXO I. Convertidores de energía del oleaje .....	64
ANEXO II. Teoría lineal.....	66
ANEXO III. Obtención de datos.....	71
ANEXO IV. Modelos numéricos .....	72
ANEXO V. Generación, propagación y transformación de oleaje .....	73
ANEXO VI. Matrices de potencia de los dispositivos evaluados .....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de los puntos comparados.....	19
Tabla 2. Periodos de registros instrumentales.....	20
Tabla 3. Ubicación y profundidad de los sitios de estudio.....	23
Tabla 4. Resumen de estadísticos de ajuste, medición a 10 metros contra simulación Mike 21 .....	30
Tabla 5 Resumen de estadísticos de ajuste, medición a 5 metros contra simulación...	34
Tabla 6 Estadística básica de las variables evaluadas para cada modelo .....	38
Tabla 7 Proyectos desarrollados en el mundo .....	65
Tabla 8 Parámetros para definir profundidad de acuerdo con la teoría lineal .....	69
Tabla 9 Propiedades basadas en la teoría lineal.....	70
Tabla 10 Matriz de potencia de Oyster 290, elaboración propia con información de EMEC.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Grados de libertad de un cuerpo rígido en el océano. ....	3
Figura 2 Clasificación de dispositivos según su sitio de instalación.....	3
Figura 3 Clasificación de los convertidores de energía de oleaje de acuerdo con la International Energy Agency (IEA).....	4
Figura 4 Densidad anual de potencia y dirección media del oleaje. (Gunn & Stock, 2012) .....	5
Figura 5. Representación sinusoidal de una onda .....	9
Figura 6. Esquema resumen de procedimiento propuesto por la IEC, tomado y modificado de Piche (2015).....	16
Figura 7 Representación de un espectro direccional de densidad de varianza (izq), y su visualización en un espectro no-direccional, tomado de Yang and Copping ( 2017) .....	17
Figura 8. Ubicación de las mediciones usadas para la validación del modelo numérico MIKE 21 y nodos del modelo.....	19
Figura 9. Ubicación de los nodos de los modelos numéricos para comparación de parámetros de oleaje .....	22
Figura 10 Distribución de los sitios para evaluación de oleaje y viento .....	24
Figura 11 Zona de instalación del instrumento .....	26
Figura 12 Esquema para el tratamiento de datos de campo .....	27
Figura 13. Comparación entre datos medidos (línea azul) y simulados (línea roja) a 10 m de profundidad, para los parámetros de Hs, Tp y Potencia para el Set 1 (a) y Set 2 (b).....	29
Figura 14. Diagramas de dispersión (curvas de nivel) y gráficos cuantil-cuantil de altura de ola (Hs), periodo pico (Tp) y potencia (P) de los datos observados a 10 metros contra los datos simulados por el modelo numérico .....	30

Figura 15 Coespectro, coherencia y fase del Set 1 (a) y Set 2 (b) de los datos a 10 metros de profundidad.....	31
Figura 16. Comparación entre datos medidos a 5 m de profundidad (línea azul), y los simulados (línea roja) para los parámetros de Hs, Tp y Potencia para el SET 1 y 2 (a) y Set 3(b).....	32
Figura 17. Diagramas de dispersión (curvas de nivel) y gráficos cuantil-cuantil para altura de ola (Hs), periodo (Tp) y potencia (P) de los datos observados a 5 metros contra los datos simulados por el modelo numérico.....	34
Figura 18 Coespectro, coherencia y fase del Set 1 (a) Set 2 (b) y Set 3 (c) de los datos a 5 metros de profundidad.....	36
Figura 19. Distribución empírica entre los modelos numéricos ERA 5 (naranja), MIKE 21 (azul) y WAM-HURAC (amarillo) para altura de ola (a), periodo pico (b) y potencia (c) durante el período del 01 de enero de 1979 al 31 de diciembre de 2007.....	37
Figura 20 Promedio anual (a) mensual (b) para ERA-5 (negro), MIKE 21 (gris oscuro) y WAM-HURAC (gris claro).....	39
Figura 21 Ubicación de los sitios de estudio.....	40
Figura 22. Caracterización Celestún: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	41
Figura 23 Caracterización Sisal: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	42
Figura 24 Caracterización Progreso: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	44
Figura 25 Caracterización Telchac: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	45
Figura 26 Caracterización Dzilam: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	46
Figura 27 Caracterización Rio Lagartos: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	47
Figura 28 Caracterización el Cuyo: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	48
Figura 29 Caracterización Holbox: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.....	49

Figura 30 Valores de energía anual acumulada total por sitio (MWh) donde: Celestún-amarillo, Sisal-cyan, Progreso-azul, Telchac-magenta, Dzilam-rojo, Rio Lagartos-verde, El Cuyo-oro, Holbox-negro .....	50
Figura 31 Promedio anual para todos los puertos estudiados .....	51
Figura 32 Promedio mensual para todos los puertos estudiados .....	51
Figura 33 Promedio horario para todos los puertos estudiados .....	52
Figura 34 Series de potencia para el recurso eólico 10m (gris) y oleaje (azul) donde a) Celestún, b) Sisal, c) Progreso, d) Telchac, e) Dzilam, f) Rio Lagarto, g) El Cuyo y h) Holbox .....	53
Figura 35. Parámetros de oleaje de las campañas realizadas y datos simulados por el modelo ERA-5.....	55
Figura 36. Movimiento de las partículas según profundidad .....	71
Figura 37. Esquema de generación y propagación de oleaje.....	74
Figura 38. Corte transversal de la costa, tomada y modificada de McGrawHill .....	75
Figura 39. Esquemas de los procesos de refracción (a) y difracción (b) .....	76
Figura 40 Curva de potencia del aerogenerador SG3.6MW-114 (Tomado de “windpower.net”) .....	76

## **I. INTRODUCCIÓN**

El acelerado crecimiento poblacional observado en las últimas décadas ha ocasionado la sobreexplotación de recursos para cubrir las necesidades de la población, esto aunado a que la esperanza de vida y los estándares de comodidad han aumentado, lo que exige una demanda energética mayor, principalmente de energía eléctrica, la cual está presente en los bienes y servicios de la vida diaria. Según datos de la Agencia Internacional de Energía la tasa de demanda energética crece en alrededor de 8% anual.

Hasta finales del siglo XX, esta energía había sido principalmente abastecida por medio de combustibles fósiles, cuyas reservas se han visto disminuidas en los últimos años, haciendo cada vez más complicada y costosa su extracción. A esto se suma que su uso ha sido identificado como una de las causas del cambio climático antropogénico, cuyas implicaciones son aún inciertas, pero potencialmente graves para nuestra forma de vida. Por esto surge, en las últimas décadas, la necesidad de explorar fuentes de energías alternas, también llamadas renovables debido a la naturaleza de los recursos que aprovechan.

Para el año 2018 las fuentes renovables en conjunto contribuyeron con el 24.5% de la generación eléctrica mundial, ocupando el segundo lugar sólo después del carbón (IEA 2018). De estas fuentes, la hidráulica ha sido las más explotada a nivel nacional y mundial, seguida de la energía eólica y fotovoltaica que presentan un rápido desarrollo. El océano por su parte, a pesar de ser un gran reservorio de energía y de cubrir el 70% de la superficie planetaria ha sido poco explotado como fuente de energía renovable.

### **Las energías renovables oceánicas**

El océano además de proveernos de alimento, recreación y materia prima también es capaz de brindarnos energía. Esta energía puede manifestarse por cambios en elevación del nivel del agua resultado de las mareas, como energía cinética de las corrientes marinas, por el gradiente térmico entre diferentes profundidades, por el gradiente salino entre el mar y otro cuerpo de agua de diferente salinidad (i.e. lagunas y ríos) y

por el movimiento de las olas, el cual contiene energía potencial por los cambios en elevación y energía cinética por el movimiento oscilatorio de sus partículas (Neil and Hashemi 2018; Pelc and Fujita 2002; Yang and Copping 2017).

A pesar de que la mayoría de los desarrollos tecnológicos para aprovechar los recursos energéticos arriba descritos se encuentran aún en fase de perfeccionamiento, el oleaje se ha diferenciado del resto por ofrecer muchas posibilidades en cuanto al diseño del dispositivo para su aprovechamiento. Actualmente se tienen registradas más de 1000 patentes, no obstante, el principio fundamental de operación es el mismo sin importar su diseño: Este principio consiste en un componente móvil que es impulsado por la fuerza del oleaje y regresa a su posición original al estar ligado a un punto fijo, que usualmente consiste en una estructura resistente al movimiento de las olas (Bhattacharyya and McCormick 2003).

El amplio catálogo de diseños se debe en parte a la naturaleza misma del recurso, ya que la irregularidad en el oleaje, es decir la diversidad en amplitud, fase y dirección de las olas dificulta la obtención de la máxima eficiencia del aparato y el establecimiento de un diseño estándar como ha sucedido con el sector eólico, lo que resulta en numerosas propuestas de prototipos que atienden las características particulares del sitio de interés. Aunado a lo anterior se suman las complicaciones que se derivan de las condiciones climáticas extremas como huracanes, donde la integridad estructural puede verse comprometida (Neil and Hashemi 2018).

### Convertidores de energía del oleaje

Los dispositivos capaces de transformar la energía mecánica presente en las olas, en energía eléctrica, son llamados convertidores de energía del oleaje (CEOs), o WEC por sus siglas en inglés (wave energy converter).

Un CEO es un cuerpo rígido, regularmente flotante, dispuesto en el agua, por lo que cuenta con 6 grados de libertad máximos, esto quiere decir que puede realizar seis

movimientos, tres rotacionales: pitch, roll, yaw y tres traslacionales: surge, heave y sway.

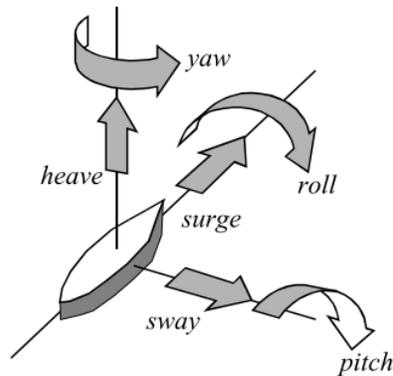


Figura 1 Grados de libertad de un cuerpo rígido en el océano.

Estos dispositivos pueden clasificarse según varios criterios, siendo los principales:

- Sitio de instalación: De acuerdo con la distancia con respecto a la línea de costa se pueden clasificar en costa afuera (offshore), cercano a la costa (nearshore) y en la costa (onshore)

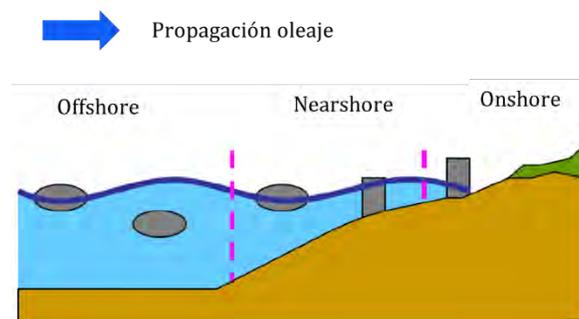


Figura 2 Clasificación de dispositivos según su sitio de instalación.

- Por su orientación e interacción con el oleaje:
  - Atenuador: Se localiza de forma paralela a la dirección predominante de propagación.

- Absorbedor puntual: Usualmente es de dimensión pequeña en relación con la longitud de onda, la dirección de propagación es indiferente a su funcionamiento
- Terminador: Su eje principal se encuentra de forma perpendicular a la propagación del oleaje para interceptar las olas.

➤ Principio de operación:

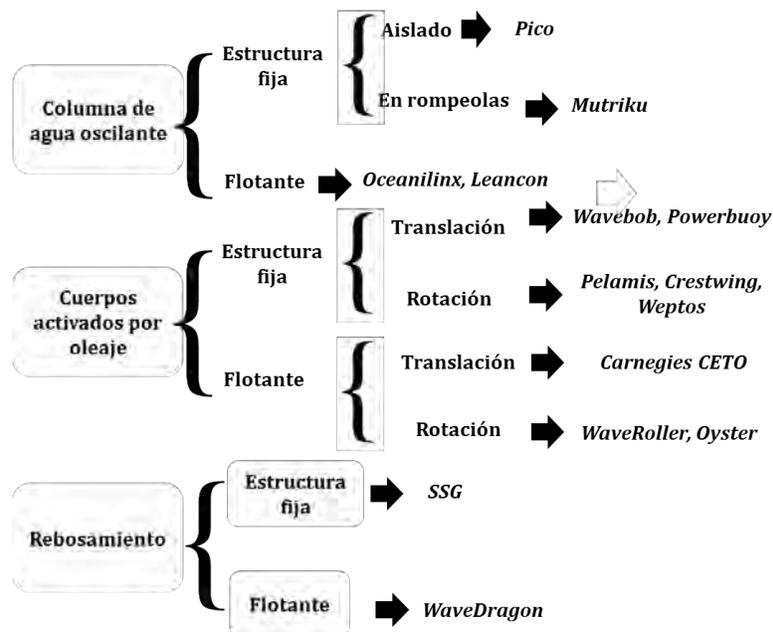


Figura 3 Clasificación de los convertidores de energía de oleaje de acuerdo con la International Energy Agency (IEA).

En el Anexo I se brinda información sobre algunos de los ejemplos mencionados en la clasificación anterior.

### Antecedentes de aprovechamiento del oleaje

En el año 2012 Gunn & Stock presentaron un mapa con las estimaciones de potencia a nivel mundial (Fig. 4), estos cálculos se hicieron con datos de salida del modelo numérico Wave Watch III (WWIII), con una resolución de 3 horas. El mapa muestra que

los valores más elevados de potencia se encuentran entre las latitudes de 40° y 60°. Esta distribución de energía coincide con lo reportado por Mork et al. (2010) quienes calcularon, a partir de datos de una base llamada WORLDWAVE, que el recurso a nivel global es de 3.7 TW.

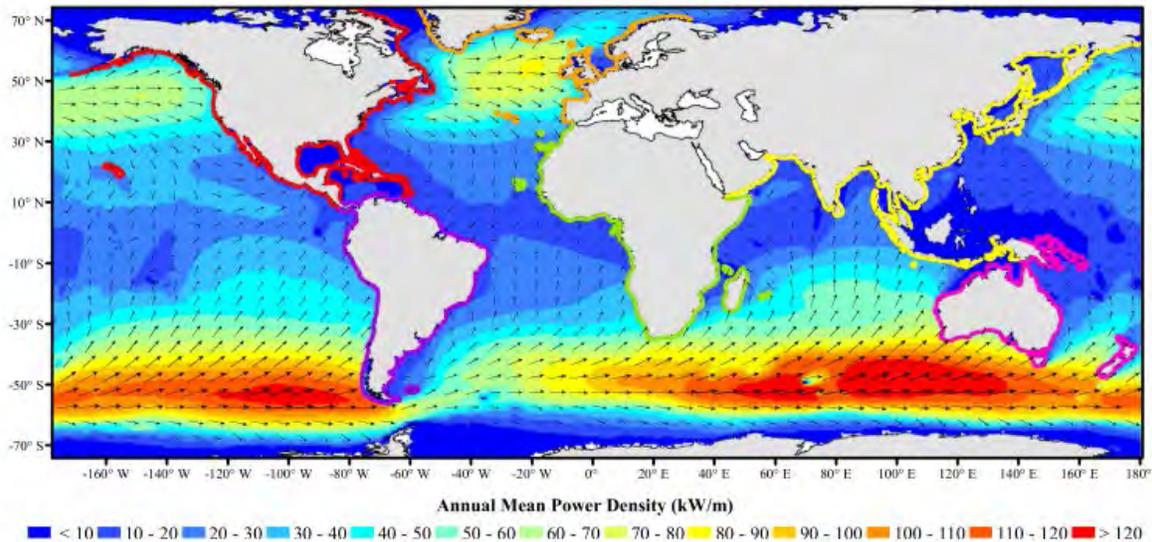


Figura 4 Densidad anual de potencia y dirección media del oleaje. (Gunn & Stock, 2012)

Los estudios más recientes se han centrado en estudiar a mayor resolución regiones específicas, tal es el caso de Besio et al. (2015) quienes a partir de 35 años de datos del WWIII exploraron la potencia del oleaje en el mar mediterráneo, encontrando regiones con valores de 10kW/m, pero mucha variabilidad temporal en el comportamiento del recurso. La región del Caribe, usualmente asociada como una zona de baja energía se estudió por Appendini et al. (2014) con datos del modelo MIKE 21, donde se lograron detectar regiones adecuadas para el aprovechamiento del recurso (8-14 kW/m) con marcados gradientes espaciales que deberían ser considerados previos a la instalación de un dispositivo.

También existen estudios como el de Sannasiraj y Sundar (2016) quienes, además de realizar un estudio detallado en las costas de la India con datos de salida del modelo WAM, proponen una estrategia para identificar zonas potenciales de instalación, así como criterios para seleccionar los dispositivos adecuados para operar en esas zonas.

De forma similar Quitaras et al. (2018) presenta un estudio en Filipinas, donde, además de estimar el flujo anual de energía y detectar los mejores sitios de instalación de dispositivos, realizan un análisis de viabilidad económica.

En México el estudio de la energía del oleaje es un tópico de auge reciente, impulsado por el Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Océano) quienes han examinado el recurso energético en distintas zonas del país y han propuesto dispositivos novedosos para lograr aprovechar la energía de acuerdo con las características de los sitios estudiados.

Entre estos estudios se encuentra el Atlas del Clima Marítimo para las Vertientes Atlántica y Pacífica del Litoral Mexicano, donde por medio de un modelo híbrido se generaron registros con las características de oleaje y viento cada hora para aguas profundas en un periodo que cubre del año 1948 al 2007 (Ruiz et al. 2008).

Por su parte Hernández-Fontes y colaboradores (2019) calcularon el potencial teórico de las distintas energías renovables oceánicas para el territorio nacional. Encontraron que los valores más altos de potencia de oleaje se encuentran en el noroeste de la república, que en Quintana Roo la energía por las corrientes es una fuente constante y potencialmente explotable y que los gradientes térmicos y salinos son más fuertes en el suroeste y sureste mexicano (Hernández-Fontes et al. 2019).

También se han realizado estudios como los de Felix (2019) y Hernández-Fontes (2020) donde se aborda la posible explotación del recurso oleaje desde una perspectiva más amplia, incluyendo aspectos logísticos, económicos, sociales y ambientales.

## II. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En la búsqueda de la diversificación de las fuentes de energías renovables, surge la posibilidad y la inquietud de aprovechar la energía existente en las olas, ante este escenario para un país como México con 11000 km de litoral, la energía del oleaje representa un potencial latente.

Hasta el momento la mayoría de los estudios y aplicaciones se han enfocado a zonas conocidas por tener altos potenciales, ubicadas entre los 40°-60° de latitud. Sin embargo, es importante avanzar en el diseño de CEOs adaptados para aprovechar oleaje de menor potencia, pero que contribuyan, a través de la micro-generación, a aliviar las necesidades de comunidades costeras.

Por otro lado, en regiones costeras se puede promover que los CEOs no solo tengan la capacidad de generar energía, sino que además cumplan la importante función de protección costera. Instalar los CEOs en la costa, tiene menores complicaciones de instalación y logística que cuando se realiza en altamar.

A pesar de las ventajas que pueda presentar el uso de energía del oleaje, previo a la instalación de un sistema es necesario un estudio minucioso del recurso para conocer las características del oleaje de la zona, esto permite identificar sitios potenciales y proporciona información para el diseño del dispositivo, pues como ya se ha mencionado la configuración de este depende totalmente de las condiciones del sitio.

De acuerdo con el POETCY, la zona costera de Yucatán comprende el 15% de la superficie total del estado y es el hogar del 6.5% de la población. A nivel estatal se tienen registros de que el 1.3% de las viviendas carecen de energía eléctrica, además que constantemente se enfrentan problemas de suministro eléctrico derivados de la creciente demanda y la poca infraestructura de generación eléctrica en la región, por lo que es necesario buscar urgentemente alternativas que contribuyan a la seguridad energética y que además tengan un bajo impacto en el medio ambiente.

Este trabajo busca caracterizar el oleaje de la costa norte de Yucatán, con el objetivo de estimar su energía y conocer su variabilidad a distintas escalas, para proveer

información útil para el diseño futuro de un dispositivo capaz de aprovechar la energía presente en la zona y así contribuir al suministro eléctrico en la región y con ello a la sustentabilidad y sostenibilidad energética.

### **III. MARCO TEÓRICO**

#### **Oleaje y sus características**

Para explicar el oleaje es necesario primero definir qué es una onda, así como las partes que las componen. Una onda es la propagación de energía resultado de la perturbación de un medio físico, es importante aclarar que las ondas que se propagan en aguas profundas transportan principalmente energía y poca masa. (Holthuijsen 2007)

En la figura 5 se observa una onda sinusoidal, la cual es la representación más simple. La altura se refiere a la distancia que existe entre la cresta (punto máximo) y valle (punto mínimo), la amplitud consiste en la mitad de la altura (H), la distancia que existe entre cresta y cresta o valle y valle es la longitud de onda (L), en la escala espacial, o periodo (T) en la escala temporal, la frecuencia corresponde al inverso del periodo, y el peralte (H/L) es la altura dividida entre la longitud de onda. Al tratarse de una función trigonométrica, para definirla adecuadamente se requiere determinar el número de onda ( $k=2\pi/L$ ) que representa el número de ciclos que existen en un metro y la frecuencia angular ( $\sigma = 2\pi/T$ ) que ofrece información respecto a la velocidad del desplazamiento rotacional (Dean and Dalrymple 1984).

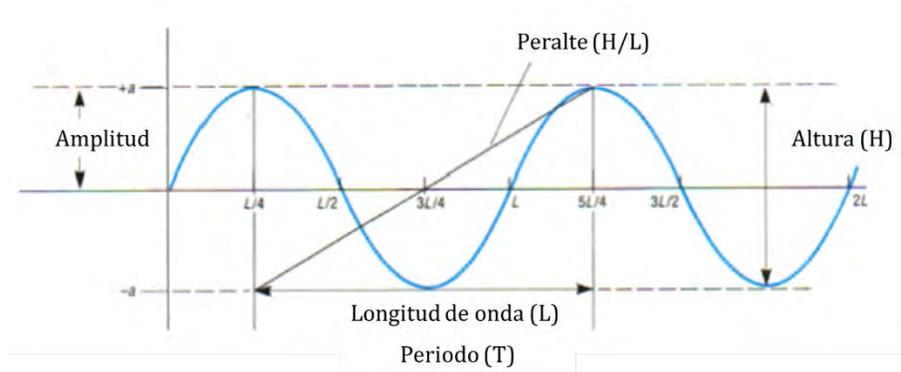


Figura 5. Representación sinusoidal de una onda

Debido a que el oleaje es un fenómeno complejo y aleatorio, existen varias teorías que han desarrollado complejos sistemas de ecuaciones para describirlo y abordarlo, una de ellas es la teoría lineal de Airy donde el oleaje es representado como una onda sinusoidal como la descrita en la Figura 5. Esta teoría plantea que las crestas de la onda son iguales en altura, equidistantes entre sí y mantiene un movimiento a velocidad constante sin cambio de forma, asume que el fluido es incomprensible, ignora los efectos de viscosidad, turbulencia y tensión superficial, considera que la profundidad ( $d$ ) es constante y la relación  $H/L$  y  $H/d$  es muy pequeña (Frigaard 2001; Laing et al. 1998; Neil and Hashemi 2018; Pecher et al. 2017). Para mayor información sobre la teoría de Airy consultar Anexo II.

Por otro lado, las teorías de amplitud finita no consideran que la altura de la cresta y la del valle son iguales, éstas en cambio suponen ondas con crestas altas y valles planos, también consideran un ligero transporte neto de fluido en la dirección de propagación (deriva de Stokes), contrario a lo que establece la teoría lineal con las orbitas cerradas. No obstante, estas teorías siguen considerando que el oleaje presenta un periodo único (monocromático), a diferencia de lo que sucede en el océano donde se pueden encontrar olas de diferentes alturas y periodos. (Frigaard 2001).

## Representación espectral del oleaje

Con el objetivo de tener una representación del océano que considere la aleatoriedad y diversidad de características de las olas que conforman el oleaje, surge el concepto del espectro, el cual considera que el oleaje puede aproximarse como una superposición de ondas de diferentes frecuencias, fases y amplitudes.

$$\eta = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \varepsilon_i) \quad (1)$$

Donde:  $a_i$  representa la amplitud,  $f_i$  es cada frecuencia, y  $\varepsilon_i$  representa una fase aleatoria.

Con análisis de Fourier se pueden determinar los valores de amplitud para cada frecuencia ( $f_i$ ):

$$\bar{a}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_{i,m} \quad (2)$$

Para todas las frecuencias  $f_i$

La varianza del registro se obtiene a partir de:

$$\sigma^2 = \overline{\frac{1}{2} a_i^2} \quad (3)$$

Sin embargo, hasta el momento se tiene un espectro de varianza discreto, para volverlo continuo es necesario multiplicarlo por un intervalo de frecuencia:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} E \left\{ \frac{1}{2} a^2 \right\} \quad (4)$$

El espectro de varianza brinda una descripción completa de la elevación de la superficie en un sentido estadístico, viendo este proceso como un proceso Gaussiano estacionario. Al conocer la forma del espectro se puede inferir el comportamiento del oleaje, si la banda de frecuencias donde se concentra la energía es pequeña, indica que el oleaje es regular, esto por lo general se presenta en oleaje tipo “swell” conocido también como

mar de leva y oleaje de tormenta lejana, en cambio, si la banda de frecuencia es ancha representa oleaje irregular y caótico, característico de un oleaje local conocido como oleaje tipo “sea”, en el cual los componentes contienen un amplio rango de frecuencias (Holthuijsen 2007).

### Descripción estadística del oleaje

Dada la naturaleza caótica del oleaje, durante su análisis estadístico se considera que el proceso cumple con tres hipótesis básicas:

- Estocástico: Se compone por un grupo de variables que tienen un comportamiento aleatorio a través del tiempo, es decir, las olas van cambiando en su frecuencia, amplitud y fase en función del tiempo.
- Estacionario: Las propiedades estadísticas son invariantes en el tiempo.
- Ergódico: Establece que, en un proceso aleatorio estacionario, el valor medio y su función de autocorrelación no difieren al ser calculados sobre diferentes muestras de un mismo ensamble, lo que indica que la estadística promediada en tiempo para una muestra particular es igual a la del promedio del ensamble.

Un estado de mar es entonces, el periodo de tiempo en el que el proceso permanece estacionario y representa las condiciones de oleaje para un tiempo y sitio determinado (Goda 2000; Holthuijsen 2007; Silva Casarín 2005).

### **Parámetros representativos del oleaje**

- Variación del nivel medio del mar:

$$\bar{n}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (5)$$

*Donde:  $n_i$  = elevación de la superficie libre en el tiempo  $t_i$  y  $N$  = número de eventos*

- Variación de la media cuadrática de la superficie del agua:

$$n_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i^2 \quad (6)$$

- Altura media:

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad (7)$$

Donde  $N_0$ =número de olas

- Altura cuadrática media:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (8)$$

- Asimetría:

$$Skw = \frac{1}{N_0 n_{rms}^3} \sum_{i=1}^N n_i^3 \quad (9)$$

- Altura de ola significativa:

Este parámetro es considerado uno de los más importantes al momento de caracterizar el oleaje, y pertenece a los estadísticos de orden, por lo que es necesario ordenar de mayor a menor el ensamble de altura de ola, para posteriormente calcular la media aritmética del tercio superior.

Siguiendo con la metodología propuesta por Goda (2000) este parámetro también puede obtenerse a partir del espectro del oleaje, para ello primero se obtiene el valor total de la energía  $m_0$ :

$$m_0 = \overline{n^2} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} n^2 dt \quad (10)$$

La relación de la raíz cuadrada media del valor de elevación de la superficie está dada por:

$$n_{rms} = \sqrt{\overline{n^2}} = \sqrt{\overline{m_0}} \quad (11)$$

El valor anterior guarda cierta relación con la altura de ola significativa, esta relación ha sido confirmada por muchos observadores:

$$H_{1/3} = 4.004n_{rms} = 4.004\sqrt{\overline{m_0}} \quad (12)$$

Este coeficiente de proporcionalidad también ha sido expresado como:

$$H_{1/3} \approx 3.8\sqrt{\overline{m_0}} \quad (13)$$

La relación anterior es adecuada para aguas profundas, pero se ha observado que, conforme la profundidad disminuye, el coeficiente de proporcionalidad tiende a incrementar hasta alcanzar un valor de 4 o ligeramente mayor.

El valor representativo del periodo que se puede obtener a partir del espectro es el periodo pico espectral el cual es calculado a partir del inverso del valor pico de frecuencia, utilizado en el cálculo de la potencia del oleaje.

## **Evaluación del recurso de oleaje y su aprovechamiento**

### Cálculo de la energía y potencia del oleaje

La energía mecánica total del oleaje resulta de la suma de la energía cinética y la energía potencial:

$$E = \frac{1}{16}\rho gH^2 + \frac{1}{16}\rho gH^2 = \frac{1}{8}\rho gH^2 \quad (1)$$

Para obtener la potencia, es decir la tasa de conversión de energía, es necesario multiplicar por una velocidad, en este caso dada por la celeridad de grupo:

$$P = ECg \quad (2)$$

De acuerdo con la teoría lineal, la celeridad de grupo relaciona el perfil de onda y la velocidad de fase y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Cg = n_c = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sin\left(\frac{4\pi d}{L}\right)} L \right] C \quad (16)$$

*Donde: d es la profundidad, L la longitud de onda y C la celeridad de fase.*

Es importante mencionar que ambas variables se expresan en función de la longitud del frente de onda (Dhanak and Xiros 2016; Neil and Hashemi 2018).

### Enfoques y herramientas para la evaluación de energía del oleaje

El aprovechamiento de energía de oleaje requiere de un análisis de largo plazo de las características del sitio donde se desea operar y de un dispositivo que permita extraer la energía bajo esas condiciones.

Dentro del análisis del recurso se reconocen tres enfoques o niveles, el primero es el teórico, el cual proporciona un valor promedio bruto de la energía disponible, el segundo es el técnico, que considera la extracción mediante el uso de algún dispositivo en particular, por último el tercer nivel es el práctico considerando cuestiones de restricción y viabilidad tecno económica (Neil and Hashemi 2018).

Para llevar a cabo la caracterización se requiere una serie de tiempo lo suficientemente larga que permita evaluar la variación a largo plazo (interanual) pero también con la resolución suficiente para observar las variaciones de pequeña escala, i.e. horarias, y por tormentas (Neil and Hashemi 2018).

Existen varios instrumentos oceanográficos capaces de registrar los parámetros de interés (para mayor detalle revisar Anexo III), no obstante, resultaría excesivamente

costoso, en tiempo y dinero, obtener series de tiempo en todos los sitios necesarios para poder evaluar el recurso energético de oleaje e identificar sitios aptos para esta actividad. Ante esta imposibilidad, surgen los modelos numéricos, los cuales simulan los procesos de generación, crecimiento y propagación del oleaje con una cobertura espacial y temporal adecuada para una estimación energética confiable. En el Anexo IV se menciona con mayor detalle las características de estos modelos.

En las últimas décadas varios estudios han propuesto diversas metodologías para llevar a cabo la evaluación del recurso, es por esto que, buscando estandarizar y establecer una línea base, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) se ha dado a la tarea de describir la metodología a seguir para la evaluación del recurso, estos pasos y sus requisitos dependen en gran parte del enfoque del estudio y su alcance (Piche et al. 2015; Yang and Copping 2017).

En la figura 6 se muestra un resumen de la metodología propuesta por la IEC, para mayor detalle se puede consultar el reporte de especificación técnica “IEC TS 62600-101:2015”

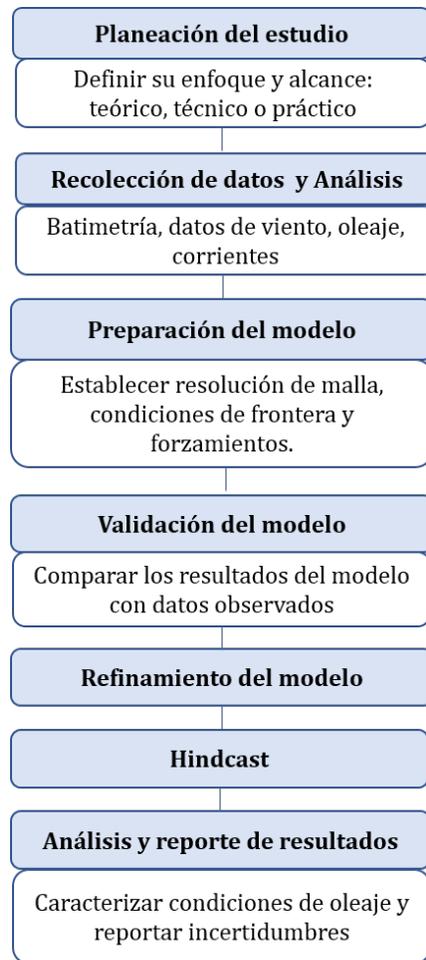


Figura 6. Esquema resumen de procedimiento propuesto por la IEC, tomado y modificado de Piche (2015).

Existen diversas maneras de abordar el último punto referente al análisis y reporte de resultados, el espectro direccional es la representación más completa del oleaje pues proporciona información sobre la distribución de la densidad de varianza con relación a la frecuencia y dirección. Sin embargo, para caracterizar las olas usualmente se usan parámetros derivados del espectro, como los son el periodo pico espectral, el ancho y la dispersión angular, de igual forma se pueden obtener parámetros integrales basados en momentos espectrales como la altura de ola significativa (Pecher et al. 2017; Piche et al. 2015; Yang and Copping 2017).

La Figura 7 ilustra la pérdida de información que conlleva el uso de las distintas representaciones del oleaje.

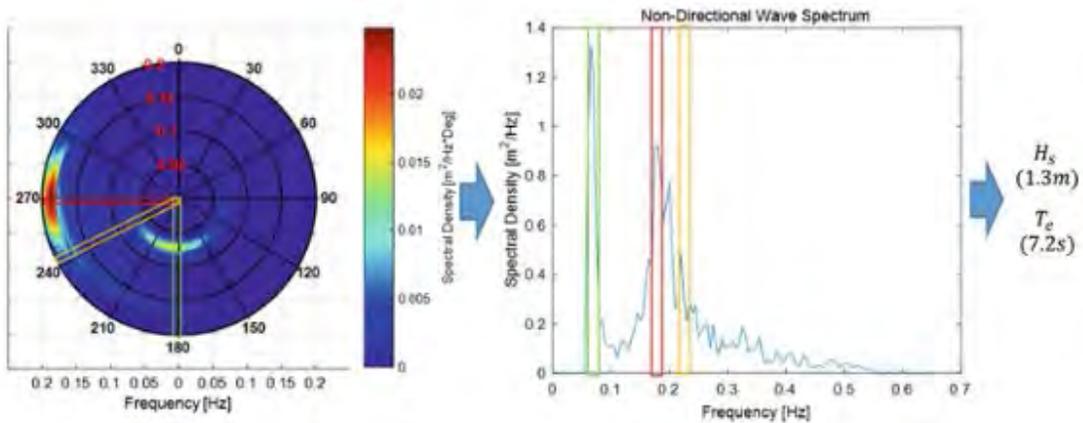


Figura 7 Representación de un espectro direccional de densidad de varianza (izq), y su visualización en un espectro no-direccional, tomado de Yang and Copping ( 2017)

A partir de la altura de ola significativa y el periodo representativo se elabora un histograma bivariado el cual proporciona información sobre las condiciones de oleaje más persistentes durante el tiempo estudiado, además para complementar, se elabora una rosa direccional la cual brinda información sobre la distribución direccional de energía.

Evidentemente las representaciones anteriores no reflejan la variabilidad temporal, lo cual es de suma importancia porque, como ya se mencionó, el oleaje presenta variaciones a distintas escalas temporales. Esto usualmente es abordado con graficas que representan el valor medio a escala interanual, mensual y horaria con el cálculo de su respectivo coeficiente de variación (Cornett 2009; Yang and Copping 2017).

Dentro de la caracterización de oleaje se encuentra el análisis de condiciones extremas, el cual evalúa las condiciones atípicas pero posibles que pudieran ocurrir en un sitio. Este punto resulta fundamental cuando el estudio se encuentra en la fase práctica ya que deben considerar los posibles escenarios que pueden impactar directamente en la integridad del convertidor de energía del oleaje. Autores como Goda (2000) y Forristall (2016) describen una metodología detallada para hacerlo.

#### **IV. METODOLOGÍA**

Como se mencionó en el capítulo anterior y se detalló en la Figura 7, la evaluación del recurso de oleaje y la identificación de sitios adecuados requiere necesariamente de un modelo numérico validado. Las mediciones en este contexto son útiles, por un lado, para validar estos modelos y por otro lado para evaluar aspectos más detallados del recurso como transformaciones espectrales e interacciones con otros procesos importantes (i.e. vientos y mareas).

En las siguientes secciones se describe la metodología utilizada con los resultados de los modelos numéricos, los cuales incluyen el modelo numérico de tercera generación MIKE 21, el cual fue validado y calibrado para la zona del Golfo de México y Caribe en 2009 (Appendini et al. 2014). El modelo numérico ERA-5 que es un modelo desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés), el cual provee información meteorológica y oceanográfica cada hora a partir de enero de 1950 hasta la fecha, con cobertura mundial y resolución de 31km (ECMWF, 2020). Otro recurso utilizado fue el modelo acoplado WAM-HURAC con el cual se modela el periodo comprendido entre 1948 al 2007 con una resolución de tres horas y 0.25 x 0.25 grados (Ruiz et al. 2008).

##### **Validación del modelo numérico MIKE 21**

Primero se presenta la metodología de validación para el modelo MIKE 21. Este modelo brinda información sobre altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo medio ( $T_m$ ), periodo pico espectral ( $T_p$ ), dirección del oleaje (MWD), velocidad y dirección del viento (WS, WD) del 01 de enero de 1979 al 31 de diciembre del 2008, con una resolución temporal de tres horas y una resolución espacial de 3.5 km para las zonas costeras.

Para comprender y evaluar qué tan acertadamente representa el modelo las condiciones reales de la zona se realizó una comparación con datos observados, los cuales provienen de dos distintas profundidades (5 y 10 m), estos se compararon con

los puntos más cercanos que ofrece el modelo numérico, la información general se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 1. Características generales de los puntos comparados

	Latitud (°)	Longitud (°)	Distancia a la costa (km)	Profundidad (m)
Medición 5m	21.36	-89.31	1.43	5
M21	21.36	-89.32	1.89	4.2
Medición 10m	21.42	-89.31	8.73	9.5
M21	21.42	-89.28	8.47	8.96

Los puntos anteriores se presentan de forma visual en la siguiente figura:

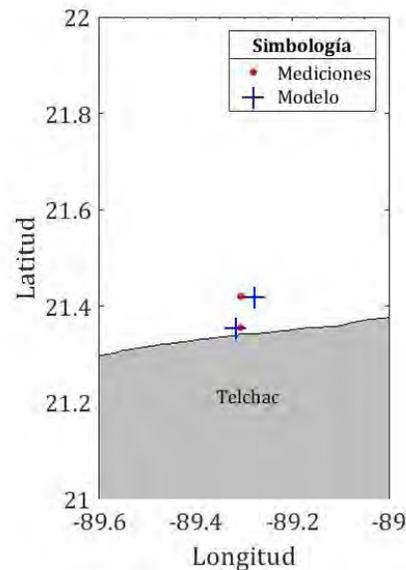


Figura 8. Ubicación de las mediciones usadas para la validación del modelo numérico MIKE 21 y nodos del modelo.

Los registros del instrumento localizado a 5 metros de profundidad se realizaron cada hora y se encuentran divididos en 3 sets, mientras que el ubicado a 10 metros tiene resolución de media hora y se divide en 2 sets.

Tabla 2. Periodos de registros instrumentales

<b>5 metros</b>			
	Inicio	Fin	Número de datos
SET 1	12/03/2004 20:00	07/06/2004 14:00	2083
SET 2	22/06/2004 19:00	11/09/2004 15:00	1941
SET 3	16/09/2005 17:00	10/11/2005 10:00	1314
<b>10 metros</b>			
SET1	04/04/2008 13:00	24/07/2008 14:00	5331
SET2	23/10/2008 15:00	31/12/2008 23:00	3329

Debido a que la resolución del modelo difiere con la de los datos observados, se llevó a cabo una interpolación para obtener la misma resolución temporal. Una vez que se generan series de tiempo de la misma longitud se procede al cálculo de los siguientes indicadores de ajuste:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (3)$$

Donde  $y_i$ = valores simulados,  $x_i$ =valores medidos

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (4)$$

$$si = \frac{rmse}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \quad (5)$$

$$slope = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i x_i} \quad (6)$$

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (7)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i| - |x_i|)^2} \right] \quad (21)$$

Además del cálculo de los parámetros anteriores se realizó un estudio de coherencia para evaluar la co-variabilidad temporal de las dos señales en función de la frecuencia (Emery & Thomson, 2004).

$$Co_{12}^2 = \frac{|S_{12}|^2}{S_1(f_k)S_2(f_k)} \quad (22)$$

Donde:  $S_n$  es el estimado espectral de las series de tiempo medida y modelada

### Comparación entre modelos

Además de los resultados del modelo MIKE 21 existen otros recursos disponibles con información para la zona, como son el ERA-5 (Copernicus Climate Change Service 2020) y el WAM-HURAC antes descritos.

Para realizar una comparación sobre las estimaciones que ofrecen los modelos se buscaron puntos coincidentes lo cual fue posible para el caso del WAM-HURAC y ERA-5, pero no para el MIKE 21 por lo que se seleccionó el punto más cercano, en la Figura 9 se observa la ubicación de los puntos.

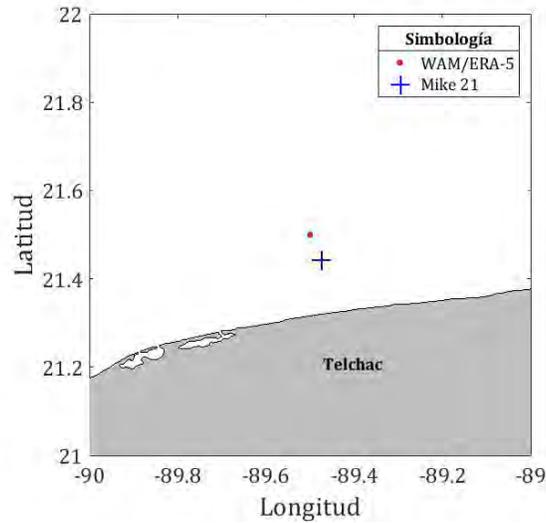


Figura 9. Ubicación de los nodos de los modelos numéricos para comparación de parámetros de oleaje

Con la información anterior se realizaron comparaciones de altura de ola, periodo pico y potencia y se realizan gráficos a diferentes escalas temporales para observar la respuesta de las series a la variabilidad temporal.

### Caracterización del recurso

Para describir el comportamiento del oleaje se utilizaron los parámetros de altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico espectral ( $T_p$ ) y dirección del oleaje (MWD) del modelo MIKE 21 considerando los 30 años de datos disponibles lo que da un total de 87664 registros. Se seleccionaron los nodos correspondientes a sitios representativos de la costa norte de la península de Yucatán ubicados aproximadamente a 10 metros de profundidad, que es donde la validación dio mejores resultados (Tabla 3).

El grupo de gráficos con los cuales se evalúa el recurso de oleaje en cada punto consiste en histogramas bivariados  $H_s$ - $T_p$  con isolíneas de potencia, rosa de distribución de energía del oleaje, un histograma bivariado de la potencia asociada a la ocurrencia de cada par  $H_s$ - $T_p$ , el cual permite identificar los estados de mar más energéticos en los sitios estudiados. Esta figura se construye al multiplicar la probabilidad de ocurrencia de los pares  $H_s$ - $T_p$  por su potencia asociada. Por último, se realizaron gráficos que

indican la persistencia de potencia, este consiste en un histograma que representa la probabilidad de que cierto rango de potencia ocurra.

Tabla 3. Ubicación y profundidad de los sitios de estudio

<b>Puerto</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Profundidad</b>
Celestún	20.96	-90.68	11.76
Sisal	21.36	-90.13	13.5
Progreso	21.44	-89.67	11.54
Telchac	21.50	-89.25	10.65
Dzilam	21.60	-88.96	11.36
Rio Lagartos	21.75	-88.18	10.95
El Cuyo	21.64	-87.65	10.13
Holbox	21.68	-87.31	10.6

Finalmente, para agrupar la información anterior se elaboró un mapa donde se muestra la energía acumulada anual por puerto, la cual resulta de sumar la contribución energética de todas las combinaciones presentes en el sitio.

#### Variabilidad temporal

Como ya se mencionó, el oleaje es un fenómeno variable a diversas escalas, para observarlo se realizaron gráficos de los valores promedios a diversas escalas temporales, con el cálculo correspondiente de su desviación estándar.

#### Comparación con el recurso eólico

Para ubicar el estatus en el que se encuentra este recurso respecto a otras fuentes renovables disponibles se hace una comparación con el recurso eólico de la zona marina, los datos de viento se tomaron del modelo NAM el cual fue validado y calibrado para la región por Cahuich et al. (2020). Se buscaron los puntos más cercanos a los sitios donde se había evaluado el oleaje y se tomaron las estimaciones a 10 y 114 metros de altura.

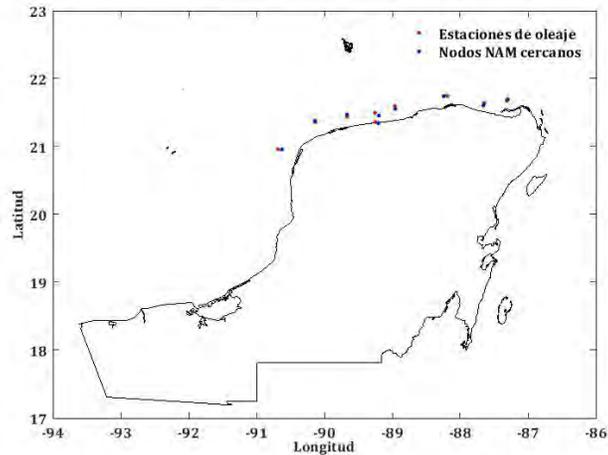


Figura 10 Distribución de los sitios para evaluación de oleaje y viento

Se calcula la potencia del viento (ecuación 22) y se compara con la potencia del oleaje en el periodo común.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (22)$$

Donde  $U$ =velocidad del viento promedio de 10 minutos;  $\rho$ = densidad del aire

Por último, se selecciona un sitio en común y se calcula la energía que se podría extraer de situar un dispositivo capaz de transformar la energía disponible siguiendo lo propuesto por Majidi (2020).

$$E_o = T \sum_{i=1}^N P_i f_i \quad (23)$$

Donde:  $f_i$  representa la probabilidad de ocurrencia de una combinación de altura de ola y periodo,  $P_i$  su potencia asociada según el CEO evaluado, y  $T$  el número de horas en un año.

También se relaciona la potencia eléctrica estimada por el oleaje con la potencia máxima del dispositivo mediante la fórmula siguiente:

$$P_{en} = \frac{P_e}{P_{max}} \times 100 \quad (24)$$

Para el viento se eligió el aerogenerador modelo SG-3.6MW-107 el cual ha sido instalado en parques offshore, mientras que para el oleaje se seleccionó la matriz de potencia del CEO "Oyster" (ANEXO VI) por ser de los pocos dispositivos que pueden instalarse en profundidades menores a los 20 metros (Majidi et al. 2020).

### **Mediciones en playa**

Como parte de los trabajos que se han realizado en el Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física, se está trabajando en CEOs que puedan instalarse cerca de la costa y funcionar como estructuras de doble propósito promoviendo la protección costera. Esto tiene la ventaja incrementada de facilitar el proceso de instalación, por realizarse cerca de la costa.

Como parte de las pruebas de este CEO (ver Sosa, et al 2019) se realizaron 2 campañas de campo para recolectar datos en la zona cercana a la playa y conocer la energía disponible en el sitio. Ambas campañas se realizaron en las inmediaciones de la estación marina del CINVESTAV, en las coordenadas 21.3434°N, 89.3082 W, al este de la escollera del puerto de Telchac. En el contexto de esta tesis, estos datos se incluyen para evaluar, con mediciones in-situ cerca de la costa, la disponibilidad de energía en esta región, y contrastarla con modelaciones en aguas profundas, no para validar ningún modelo, sino solo para ponerlas en contexto con las estimaciones realizadas en otras secciones de la tesis.

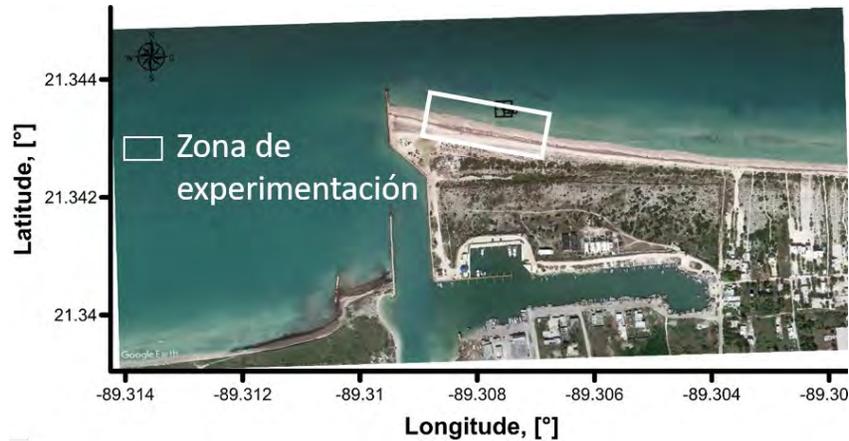


Figura 11 Zona de instalación del instrumento

Se instaló un velocímetro 3D (Nortek) programado para para medir de forma continua a 4 Hz la velocidad de la corriente marina (3D) y la presión del agua con un sensor piezométrico.

#### Tratamiento de datos del velocímetro 3D

La serie de tiempo correspondiente a las mediciones de presión se agrupan en intervalos de 17 minutos, que corresponde a 4096 elementos (Silva Casarín 2005; Thomson and Emery 2014).

El promedio de la superficie libre representa la elevación por marea y otros procesos que generan variaciones en el nivel del mar que se perciben como un desfase vertical en la señal, o incluso pueden generar una tendencia. Es necesario quitar esta influencia previa al procesamiento estadístico, para lograrlo se quita primero el promedio aritmético de la señal, y en caso de tener también una tendencia, esta se puede eliminar haciendo un ajuste de mínimos cuadrados de primer orden (recta), ó de segundo orden (parábola), según sea el caso (Goda, 2000).

Debido a que no existe en los datos una tendencia notable, para este estudio solo extrajimos el promedio aritmético de la señal:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (25)$$

Donde  $n_i$  representa la elevación de la superficie libre

$$\eta_{i\_Corregida} = \eta_{i\_original} - \bar{\eta} \quad (26)$$

Para obtener la altura de ola significativa ( $H_s$ ) se utilizó la expresión:

$$H_s = 4\sigma \quad (27)$$

Para obtener el periodo pico espectral ( $T_p$ ) se hace un análisis espectral, con el método del periodograma de Welch, utilizando una ventana tipo Hanning para evitar discontinuidades en los extremos de la señal (Thomson and Emery 2014).

Una vez conociendo los parámetros de altura de ola significativa ( $H_s$ ) y periodo pico espectral, se calcula la energía y potencia del oleaje dada por las ecuaciones 14 y 15.

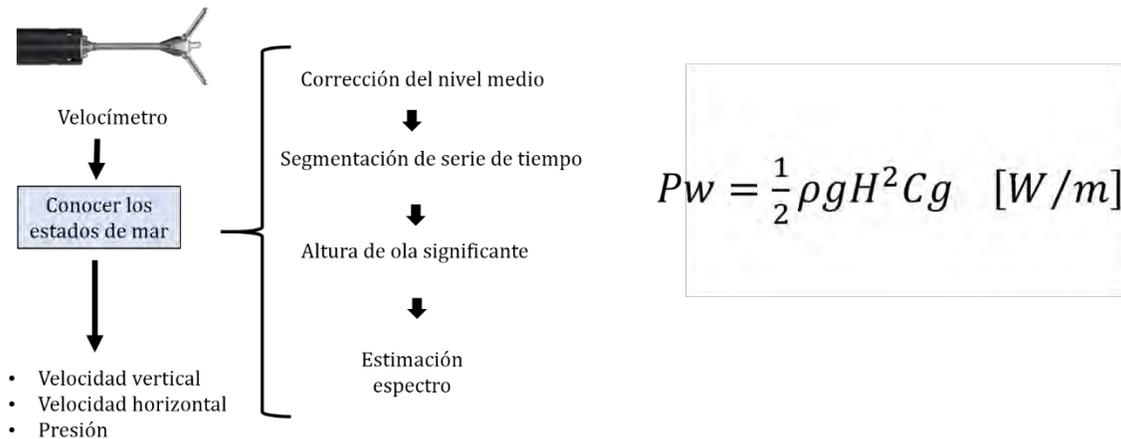
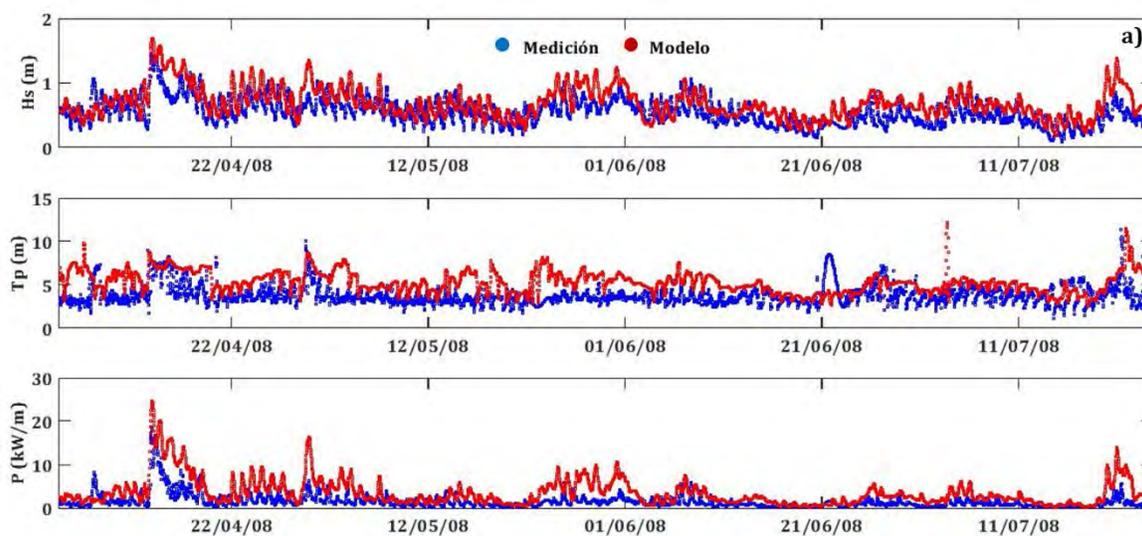


Figura 12 Esquema para el tratamiento de datos de campo

## V. RESULTADOS

### Validación del modelo numérico MIKE 21

En la Figura 13 se muestra una comparación entre los registros de altura de ola ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ) y potencia de los datos medidos a 10 metros de profundidad (línea azul) contra los simulados por el nodo más cercano del modelo numérico (línea roja). En general el modelo hace un buen trabajo en reproducir las variaciones de las tres variables, incluyendo la marcada variabilidad existente a frecuencias diurnas generadas por los vientos de brisas marinas (vientos locales), comportamiento que es más marcado en el Set 1 (abril a agosto 2008). A pesar de esto, la altura de ola y la potencia modeladas tienden a estar sobrestimadas ligeramente, y esta sobreestimación es aún mayor en los registros correspondientes al periodo pico. Para todos los casos el Set 1 tiene un desfase mayor que en el Set 2, al cual está más influenciado por procesos sinópticos (nortes) que parecen estar mucho mejor representados por los resultados del modelo. Es importante recordar que los puntos comparados difieren en la profundidad en la que se encuentran (Tabla 1).



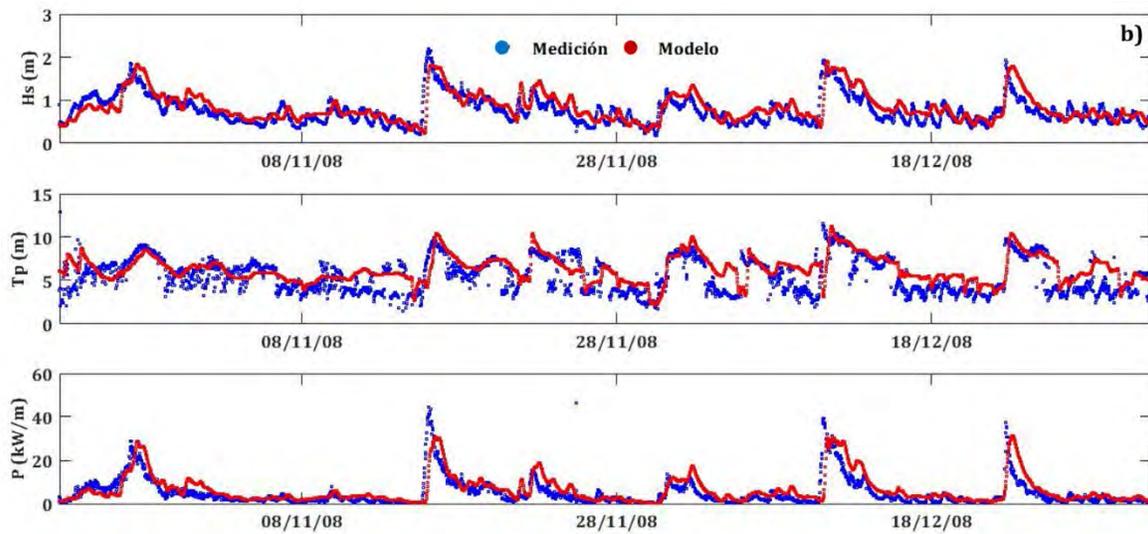


Figura 13. Comparación entre datos medidos (línea azul) y simulados (línea roja) a 10 m de profundidad, para los parámetros de Hs, Tp y Potencia para el Set 1 (a) y Set 2 (b).

Los diagramas de dispersión (Figura 14) muestran claramente la diferencia entre los valores observados y los simulados para ambos sets, siendo, como se mencionó anteriormente, en el Set 1 donde se presentan las dispersiones más marcadas. El mismo comportamiento se observa también en los resultados de los estadísticos de ajuste (Tabla 4) en los que el Set 2 presenta una mejor correlación lineal e índice de Wilmot que el Set 1 en todos los parámetros. La sobrestimación medida por el bias es especialmente alta en los valores de potencia ya que este parámetro depende del cuadrado de la altura y del período, por lo que propaga sus errores. El error cuadrático medio y el índice de dispersión son considerablemente elevados, por otro lado, los valores de pendiente indican que en general el modelo sobrestima (pendiente mayor a 1), aunque para el segundo set de datos se encuentra muy cercano a 1 que es el valor ideal.

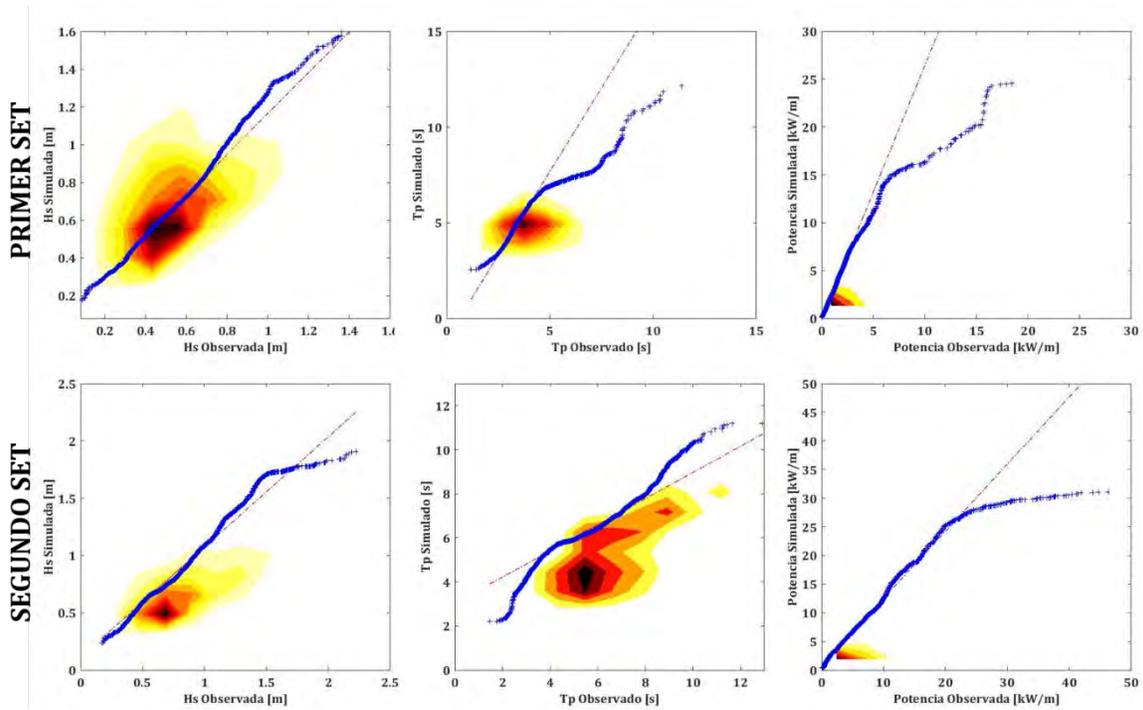


Figura 14. Diagramas de dispersión (curvas de nivel) y gráficos cuantil-cuantil de altura de ola (Hs), periodo pico (Tp) y potencia (P) de los datos observados a 10 metros contra los datos simulados por el modelo numérico

Tabla 4. Resumen de estadísticos de ajuste, medición a 10 metros contra simulación Mike 21

	SET 1			SET 2		
	Hs	Tp	P	Hs	Tp	P
Bias	0.14	1.51	2000.29	0.08	0.8	1439.98
Rmse	0.25	2.14	3118.48	0.24	1.72	4596.87
Scatter index	0.37	0.4	0.90	0.29	0.27	0.72
Pendiente	1.19	1.3	1.74	1.05	1.07	0.99
r	0.56	0.18	0.68	0.75	0.64	0.77
d	0.67	0.41	0.63	0.85	0.75	0.85

Por otro lado, el co-espectro de la Figura 15 muestra que para ambos sets los datos del modelo y las mediciones comparten energía (tienen comportamientos temporales similares) en frecuencias de un ciclo por día (efectos de brisas marinas) y mayores a 8 días, con valores de coherencia mayores a 0.85. La Figura 15 b muestra lo mismo que se ha comentado anteriormente, que el segundo set tiene valores de coherencia más

altos en muchas frecuencias, y la fase es también cercana a cero, lo que refuerza los resultados presentados en la tabla 4.

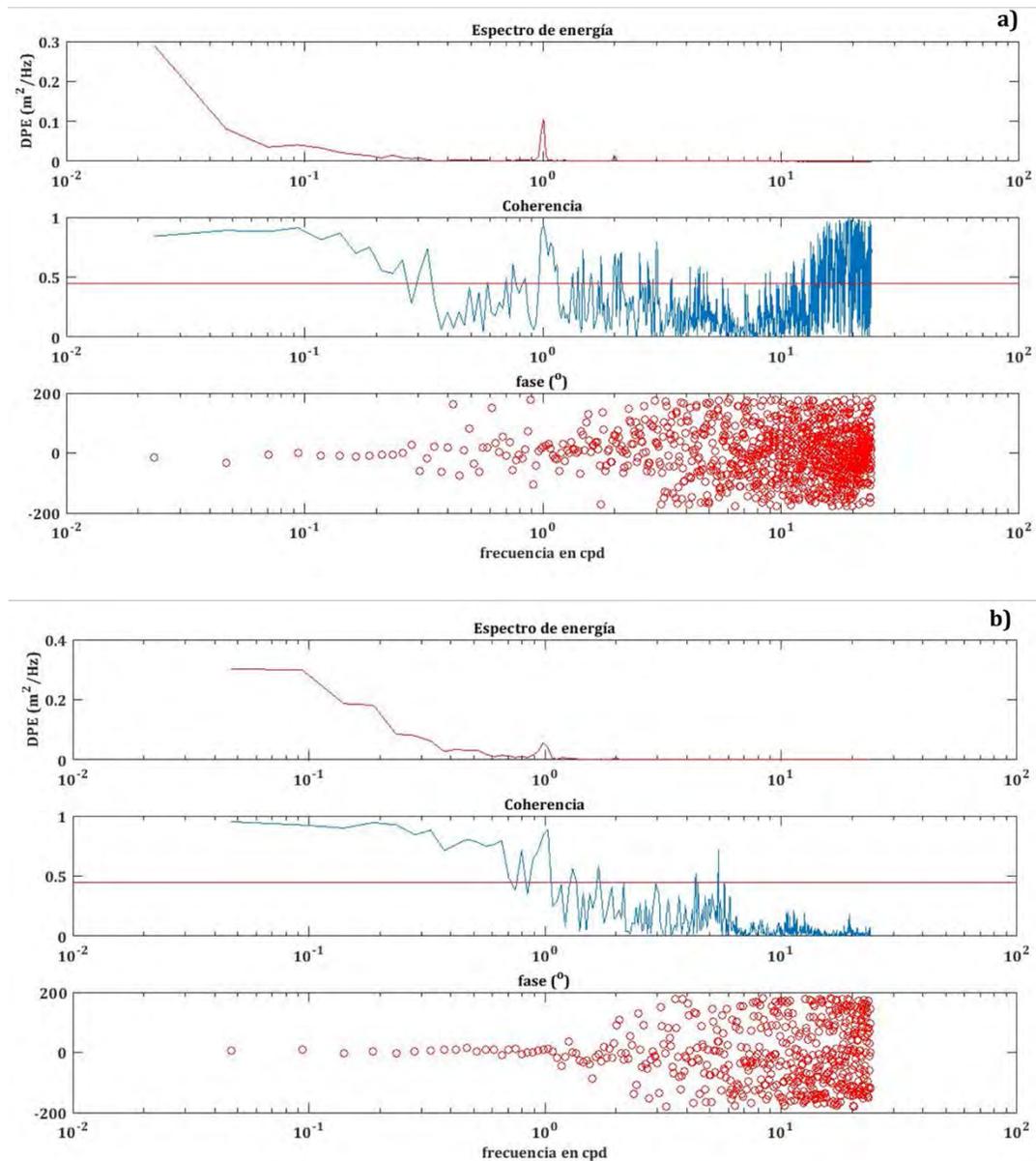


Figura 15 Coespectro, coherencia y fase del Set 1 (a) y Set 2 (b) de los datos a 10 metros de profundidad.

La serie de tiempo correspondiente a los registros a 5 metros de profundidad se ilustra en la Figura 16, esta serie se encuentra dividida en tres segmentos, la serie correspondiente a la altura de ola simulada por el modelo se encuentra en el mismo

nivel que la serie medida durante los dos primeros segmentos, sin embargo, el último set no sigue la tendencia de los registros observados. Por su parte, el periodo tiende a sobrestimar en los dos primeros segmentos y es en el último segmento donde se acopla a los datos observados. Las series de potencia presentan un comportamiento muy similar al de altura de ola y al igual que en esta serie, llama la atención el pico observado en el tercer segmento que no es reportado por los datos simulados.

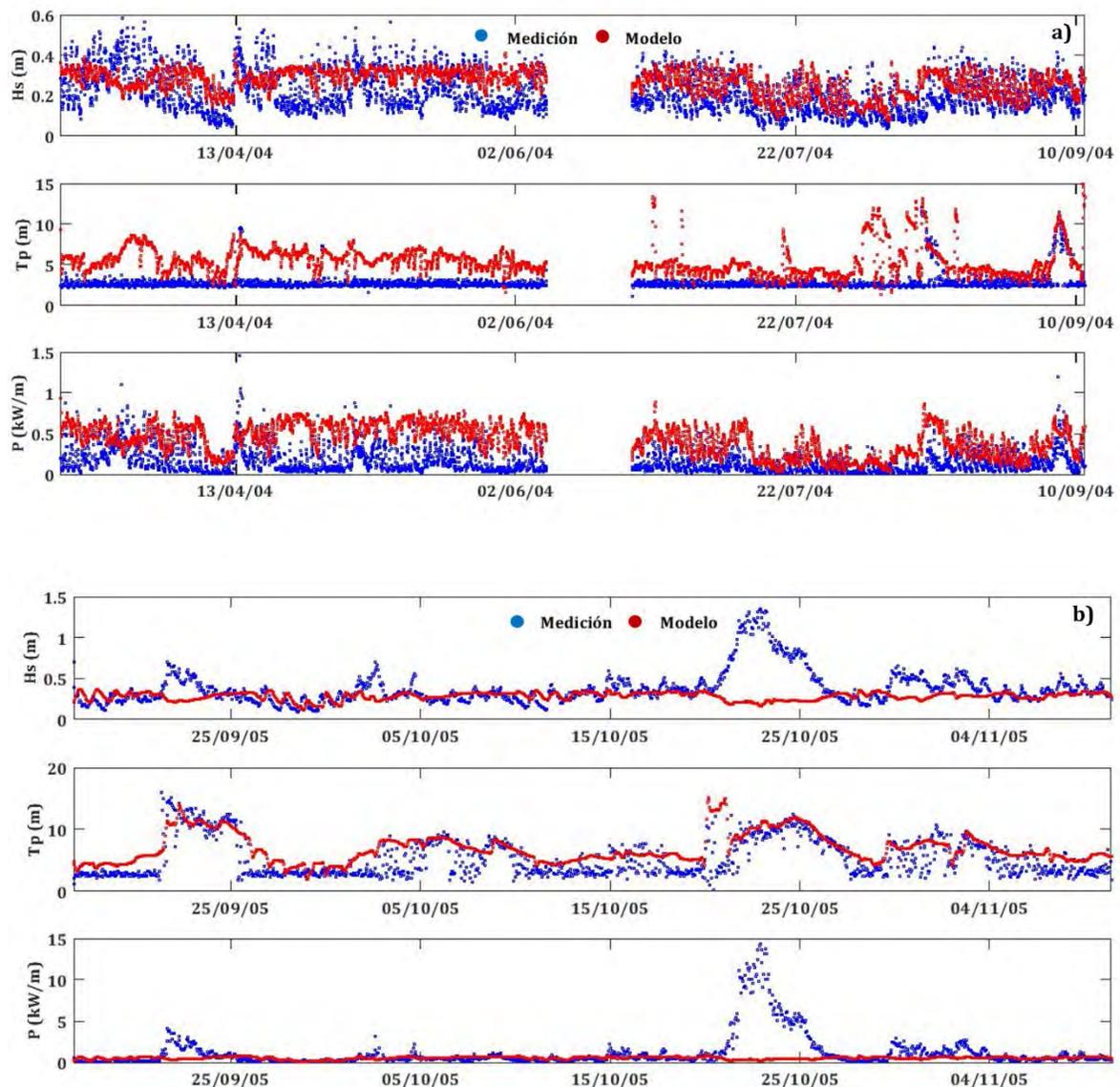


Figura 16. Comparación entre datos medidos a 5 m de profundidad (línea azul), y los simulados (línea roja) para los parámetros de Hs, Tp y Potencia para el SET 1 y 2 (a) y Set 3(b)

Para el caso de los resultados del modelo MIKE 21 cerca de la costa, el ajuste entre los datos observados y los datos simulados es bastante deficiente pues los eventos de oleaje no son adecuadamente representados. El ajuste más bajo existe durante la época de primavera-verano (abril-septiembre) cuando los procesos locales (brisas) tienden a dominar la variabilidad del viento (Cahuich López, et al. 2020), lo cual resulta aún más evidente al observar los gráficos de la Figura 17 que presentan una alta dispersión. Lo anterior es confirmado también al estimar los parámetros estadísticos de ajuste que resultan en valores muy pobres de correlación lineal, elevados índices de dispersión y de error cuadrático medio para todos los parámetros durante toda la serie de tiempo, excepto para el período durante temporada de nortes. Aunque hay que destacar que los valores de bias para altura de ola se encuentran en un rango similar a los anteriores (0.05-0.1 m).

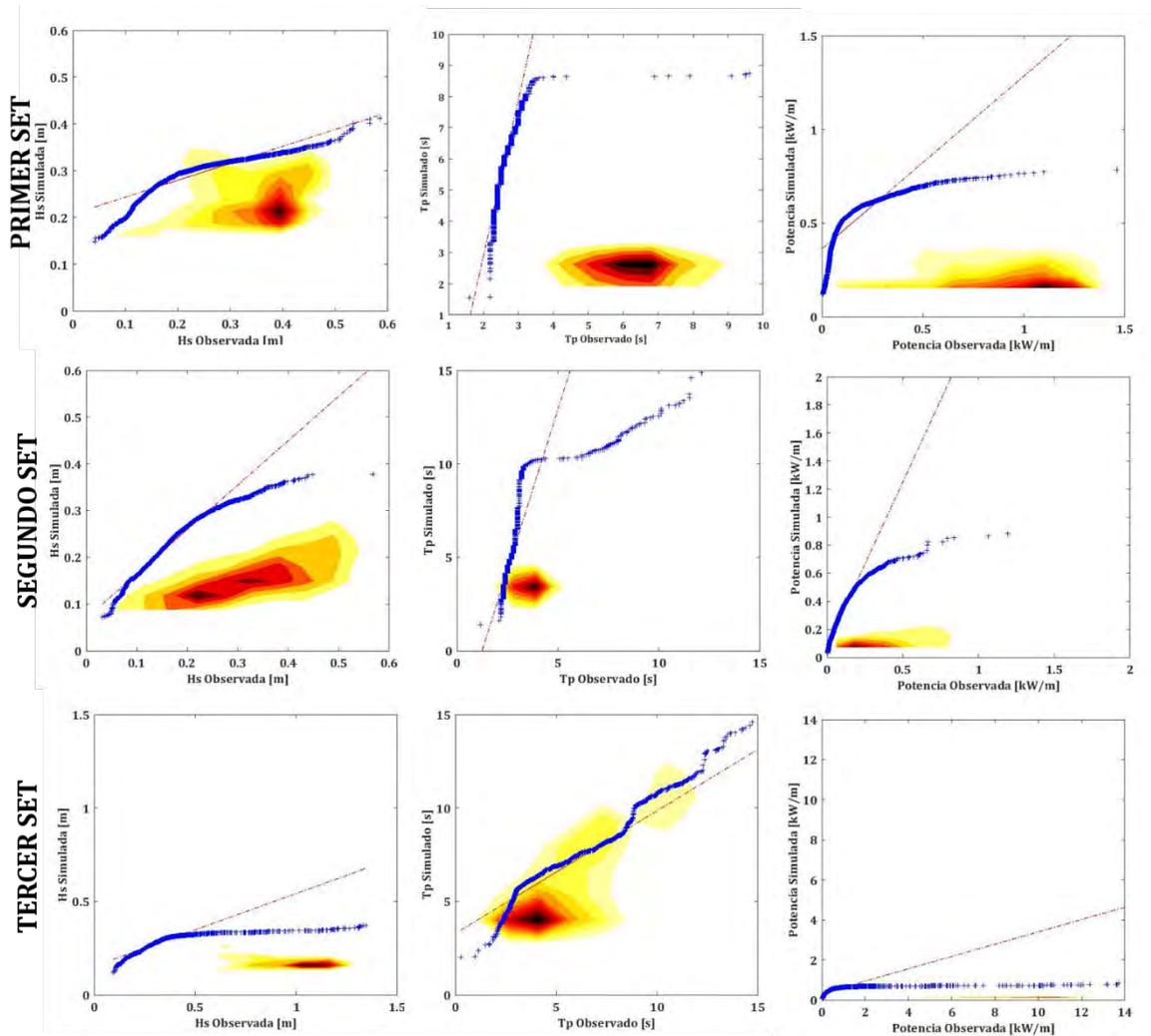
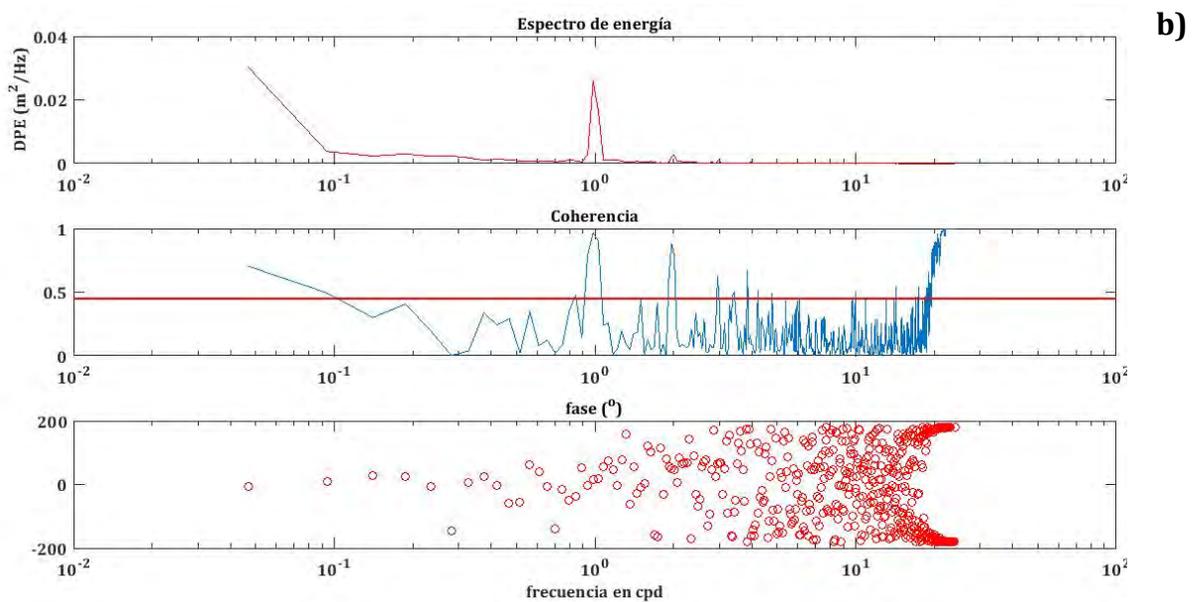
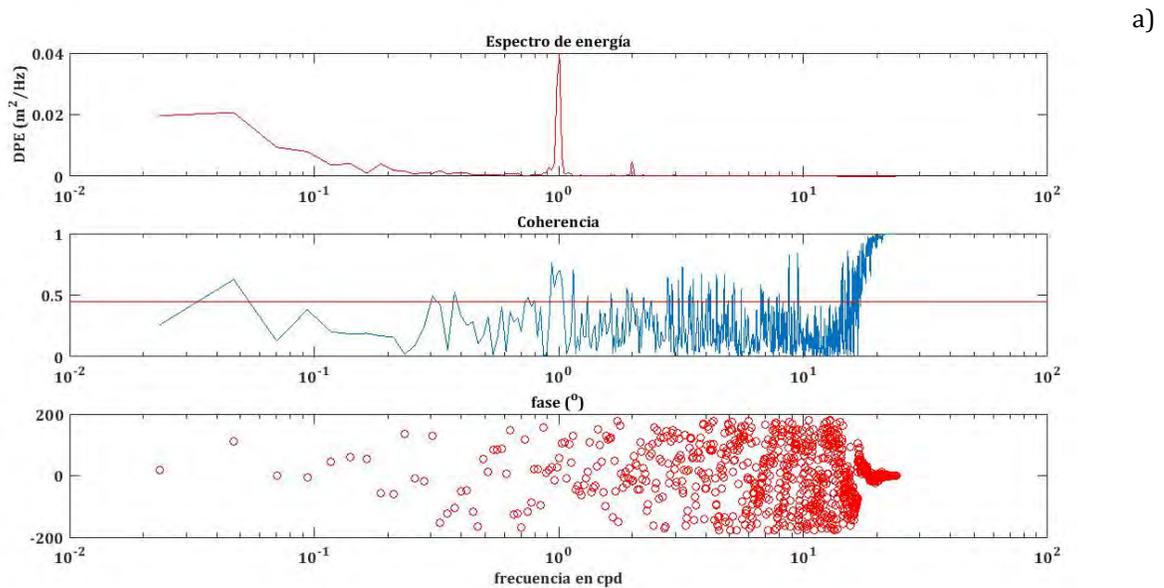


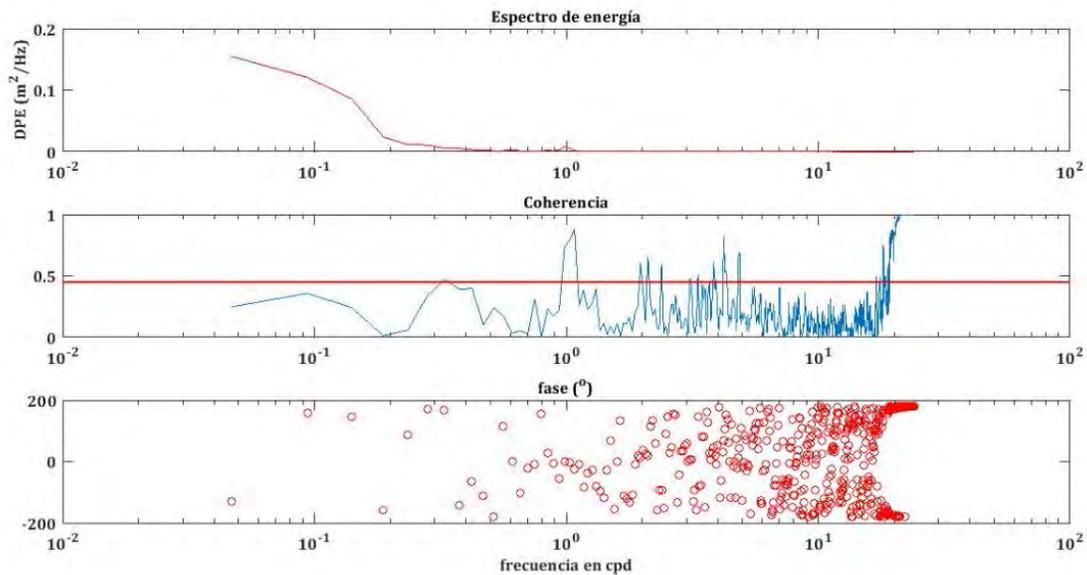
Figura 17. Diagramas de dispersión (curvas de nivel) y gráficos cuantil-cuantil para altura de ola (Hs), periodo (Tp) y potencia (P) de los datos observados a 5 metros contra los datos simulados por el modelo numérico

Tabla 5 Resumen de estadísticos de ajuste, medición a 5 metros contra simulación

	SET 1			SET 2			SET 3		
	Hs	Tp	P	Hs	Tp	P	Hs	Tp	P
Bias	0.05	3.08	323.01	0.05	2.31	203.00	0.10	1.64	-651.80
Rms	0.13	3.33	395.73	0.11	3.15	271.40	0.25	2.68	2233.52
Scatter index	0.43	0.58	0.77	0.45	0.61	0.85	0.88	0.39	4.36
Pendiente	1.01	2.07	1.48	1.11	1.59	1.65	0.55	1.13	0.09
r	-0.07	0.06	-0.04	0.22	0.32	0.28	-0.39	0.72	-0.31
d	0.36	0.13	0.35	0.48	0.38	0.38	0.30	0.77	0.23

Por otro lado, en el análisis de coherencia vemos que a pesar de que estas series presentan mayor dispersión en comparación con la serie a 10 metros y que sus índices de ajuste son más bajos, la energía se encuentra bien definida en un ciclo por día, alcanzando valores de coherencia mayores a 0.75





c)

Figura 18 Coespectro, coherencia y fase del Set 1 (a) Set 2 (b) y Set 3 (c) de los datos a 5 metros de profundidad.

### Comparación entre modelos numéricos

Dado que existen otras fuentes de información disponibles para poder hacer evaluaciones de la energía contenida en el oleaje, se comparan aquí los resultados de los modelos ERA5 y WAM-HURAC, contrastados con el modelo MIKE 21 a 10 m, el cual da resultados bastante razonables en cuanto a magnitudes y muy buenos en cuanto a caracterización de eventos (similitud de series de tiempo). Además, al utilizar los datos del MIKE 21 se pueden comparar a largo plazo las series de tiempo de todos los modelos, pues las mediciones solo incluyen unos meses, y el modelo WAM-HURAC no las abarca (hasta 2007).

La Figura 19 muestra la distribución empírica de las variables altura de ola, periodo pico y potencia de los diferentes modelos en su periodo común que comprende del 1 de enero de 1979 al 30 de diciembre de 2007 con registros cada hora.

En el inciso “a” referente a la altura de ola se observa que el modelo ERA-5 es el que alcanza valores más altos, mientras que el periodo sigue un comportamiento similar para todos los modelos. Por su parte la potencia mantiene relación con la altura de ola

siendo el WAM-HURAC el que tiene valores de potencia más bajos, seguido del Mike 21 y ERA-5.

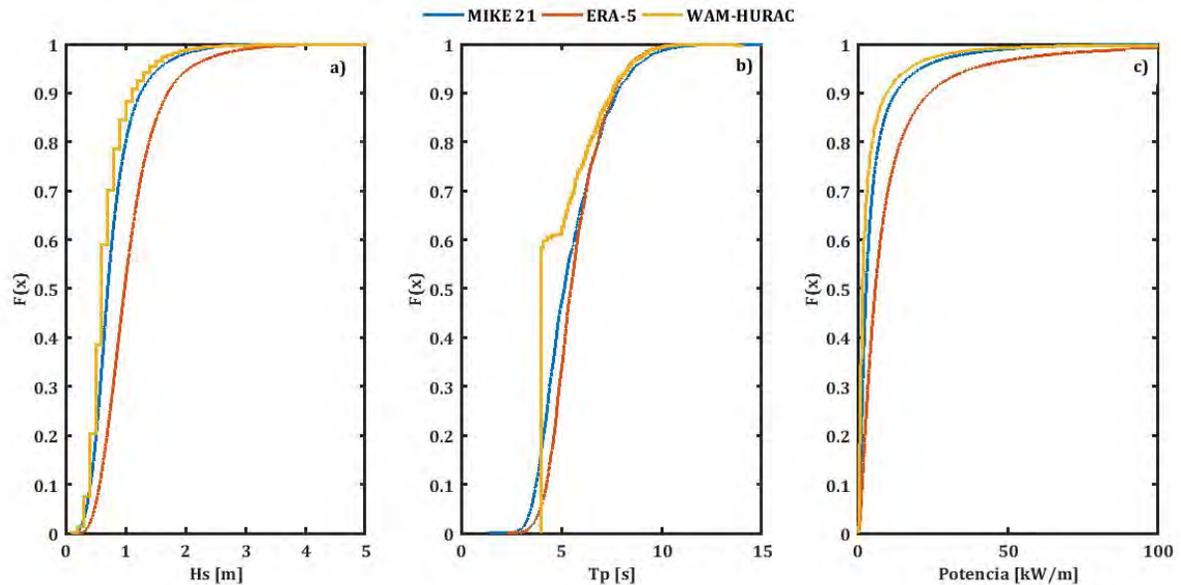


Figura 19. Distribución empírica entre los modelos numéricos ERA 5 (naranja), MIKE 21 (azul) y WAM-HURAC (amarillo) para altura de ola (a), periodo pico (b) y potencia (c) durante el período del 01 de enero de 1979 al 31 de diciembre de 2007

La tabla 6 indica los parámetros estadísticos de las series de tiempo, donde el modelo MIKE 21 es el que presenta menor desviación estándar para las estimaciones de altura de ola, debido a la carencia de datos extremos, aunque tiene un promedio mayor con respecto al WAM-HURAC, siendo el ERA-5 el que, además de tener el valor medio más alto, presenta la mayor desviación estándar. El valor máximo estimado es del WAM con un valor de 13.20m durante el huracán Gilberto, 10.06m mayor que el estimado por el MIKE 21, estos valores extremos parecen sobrestimados, pues para tener alturas de ola de 10 m de altura, las olas tendrían que haber roto, por efecto de fondo a  $\sim 12$  m de profundidad, lo cual es poco realista. Por su parte, la potencia al estar mayormente influenciada por la altura de ola presenta el mismo comportamiento que ésta.

En contraparte, los valores de periodo estimados presentan mayor dispersión en el modelo MIKE21 que en el resto de los modelos, también es el que registra el valor máximo.

Tabla 6 Estadística básica de las variables evaluadas para cada modelo

		MIKE 21	ERA-5	WAM
Hs	media	0.79	1.09	0.70
	D.S	0.39	0.52	0.41
	min	0.10	0.18	0.10
	max	3.14	8.66	13.20
Tp	media	5.49	5.71	5.06
	D.S	1.63	1.34	1.54
	min	1.40	2.20	4.00
	max	15.31	12.93	14.00
P	media	5688.15	11191.16	4807.09
	D.S	9080.17	19008.48	24126.11
	min	2.42	92.76	39.82
	max	100458.08	896967.24	2159528.52

Finalmente se calculó el promedio a escala anual y mensual, representado en la Figura 20 donde, además de proveer información sobre el comportamiento temporal de la serie, se ofrece información visual sobre la variación de las estimaciones.

Se percibe que sin importar la escala temporal el valor máximo de potencia lo estima el modelo ERA-5, seguido por MIKE 21 y siendo el WAM quien presenta los valores promedio menores. También se destaca que los modelos ERA 5 y MIKE 21 muestran una tendencia a un clima de oleaje más activo, lo que se refleja en un aumento en la potencia a lo largo de los años, mientras que el WAM-HURAC carece de este comportamiento. Por otro lado, los tres modelos muestran una estacionalidad (variación mensual) clara, con potencias (y alturas de ola) mayores en los meses de invierno y otoño (época de nortes).

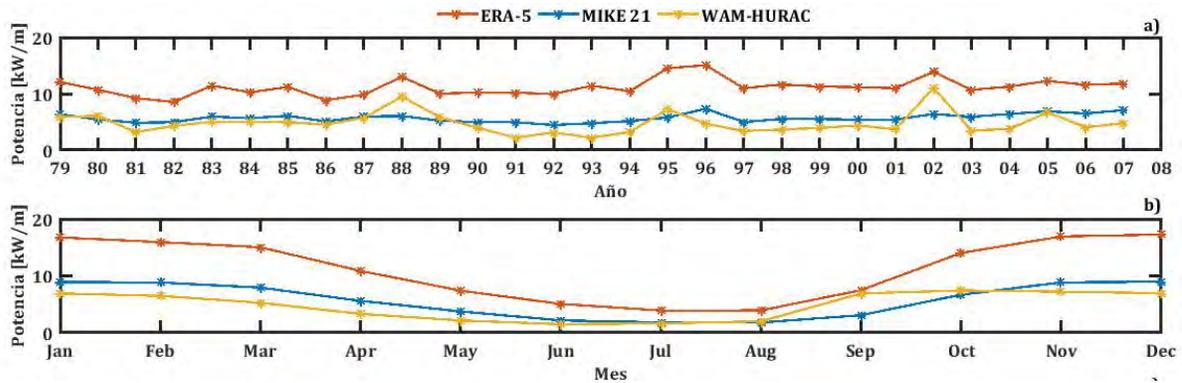


Figura 20 Promedio anual (a) mensual (b) para ERA-5 (negro), MIKE 21 (gris oscuro) y WAM-HURAC (gris claro)

Para concluir, se calcularon los parámetros estadísticos de ajuste de las series de potencia del modelo MIKE 21 respecto al ERA-5 y WAM-HURAC, donde se observa que el error cuadrático medio aumenta de forma considerable si se compara con lo obtenido al evaluar el modelo MIKE 21 con las mediciones (Tabla 4 y 6) donde se obtuvo un valor máximo de 4596.87 W/m, a su vez el valor de la pendiente de ERA-5/MIKE confirma lo observado en los gráficos anteriores donde el ERA-5 presenta valores más altos de potencia que el resto de los modelos. Si consideramos que al evaluar el modelo MIKE 21 con mediciones se encontró que éste sobreestimaba los valores de potencia y que, aun así, el ERA-5 presente valores por arriba del MIKE 21 indica una sobreestimación importante que podría tener repercusiones en la caracterización del recurso.

Tabla 7 Resumen de estadísticos de ajuste, simulación MIKE 21 vs ERA-5 y WAM-HURAC

	ERA-5/MIKE 21	WAM-HURAC/MIKE21
Bias	5503.49	-880.42
Rms	13750.46	22199.53
Scatter index	1.23	4.62
Pendiente	1.80	0.99
R	0.83	0.39

Con lo anterior, se observa que los modelos ERA-5 y WAM-HURAC no representan de forma satisfactoria las condiciones de la zona de estudio y que el modelo MIKE 21 a pesar de presentar una tendencia de sobreestimación de periodo respecto a las

mediciones, la potencia, que es el parámetro de interés, no se ve gravemente afectada puesto que el periodo juega un papel secundario en su cálculo.

### Caracterización del recurso

Para realizar la caracterización del recurso en la costa norte de la península de Yucatán se utilizaron solamente los resultados del MIKE 21 a 10 m de profundidad, cuyas evaluaciones respecto a las mediciones son mejores que el ERA5 o el WAM-HURAC, además de proveer mejor resolución espacial. En la Figura 20 se muestra la ubicación de los sitios de estudio seleccionados del modelo numérico MIKE 21.

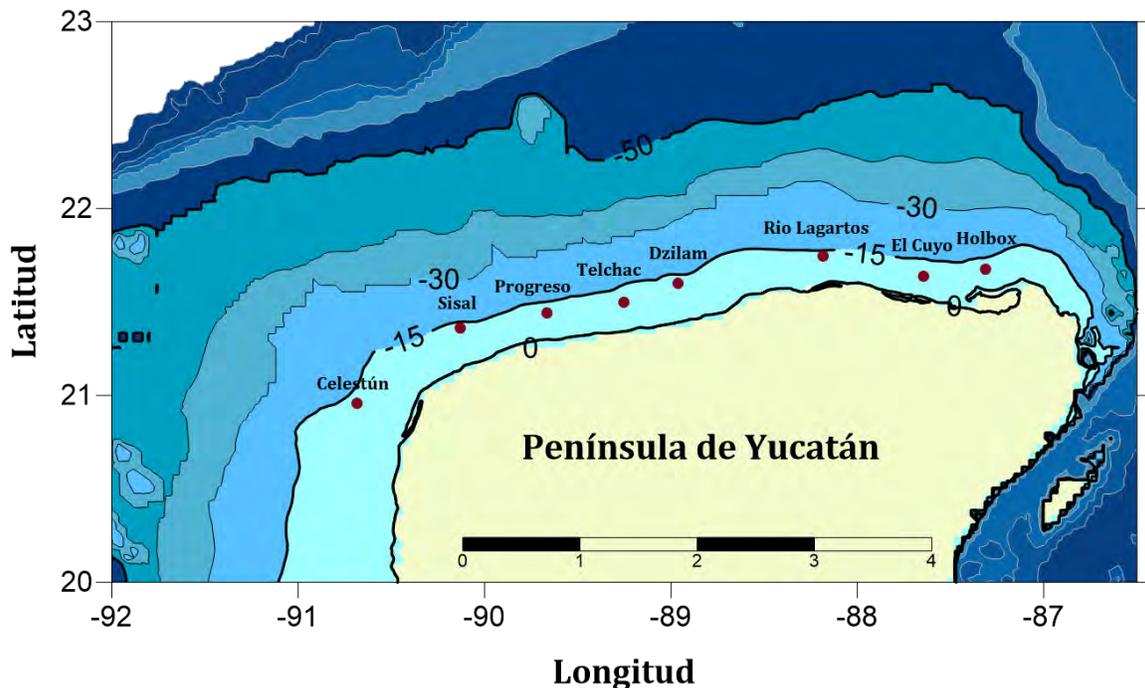


Figura 21 Ubicación de los sitios de estudio

#### Celestún

Este puerto se encuentra ligeramente al oeste de la península de Yucatán, aquí la combinación altura de ola-periodo con mayor ocurrencia es de 0.3-0.7 metros y 4-5 segundos con las cuales se obtendría una potencia teórica menor a 1 kW/m (Figura 14a), la altura máxima registrada es de 4 metros y el periodo de 16 segundos. La dirección predominante es este-noreste; sin embargo, las potencias más altas

proviene del norte (Figura 14b). Al observar el gráfico de energía anual (Figura 14c) se encuentra que el mayor aporte de energía está dado por las olas de 0.5 a 1 metros y 5-10 segundos, generadas por nortes, las cuales a pesar de no ser tan frecuentes están asociadas a potencias mayores. La potencia que más ocurre en la zona es de 0.5-1.5 kW/m, como se observa en el inciso d.

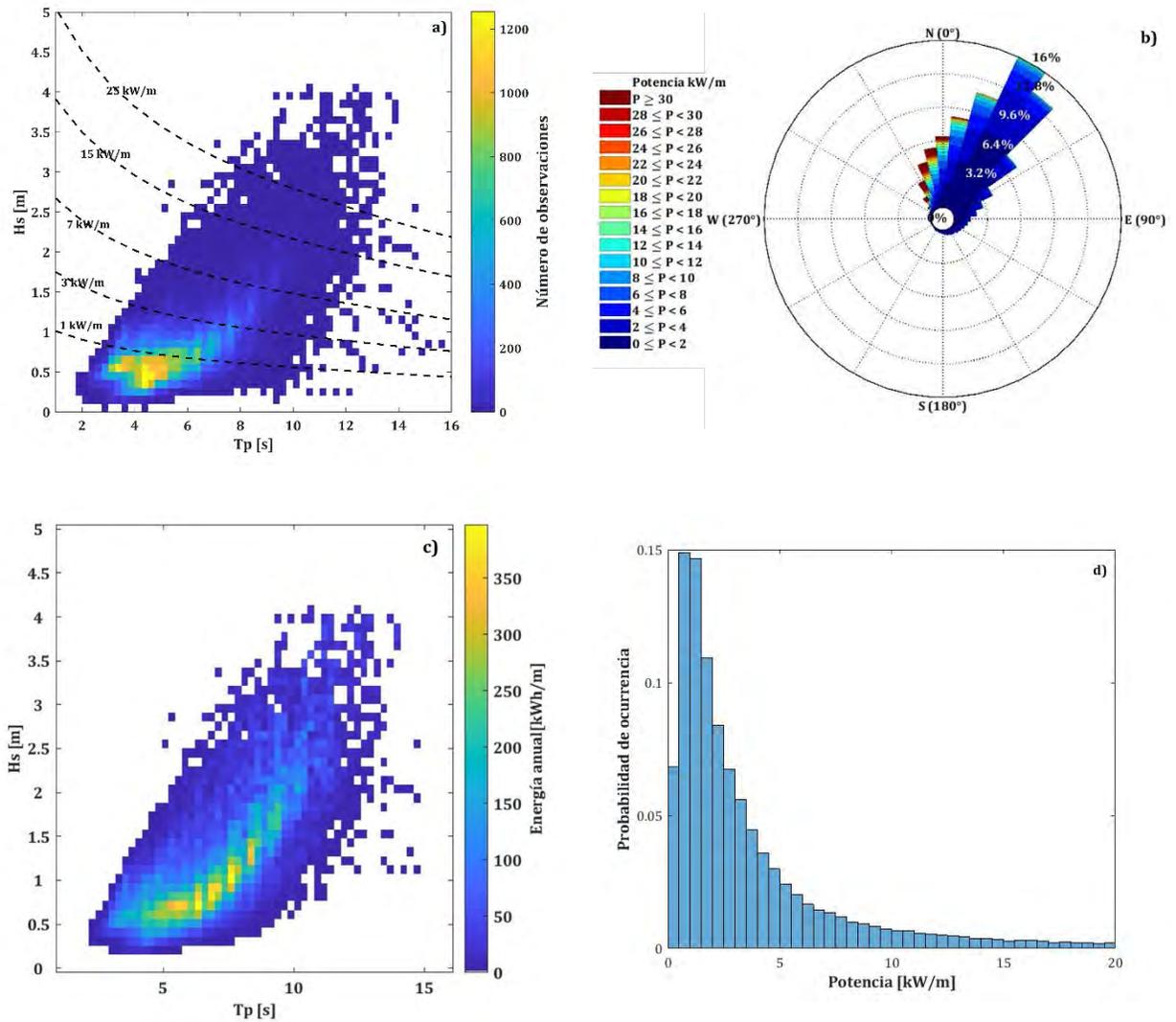


Figura 22. Caracterización Celestún: a) Histograma bivariado  $H_s$ - $T_p$ , b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

### Sisal

Para este puerto la mayoría de las observaciones se encuentran rondando la isolínea de 1kW/m con combinaciones de 0.4-0.8 metros de altura de ola y periodos de entre 4 y 5

segundos, también se observa que los valores máximos de altura de ola se acercan a los 5 metros. La dirección es predominantemente noreste, pero al igual que el sitio anterior la dirección asociada a potencias altas es la norte, por su parte en la distribución de energía se advierte que en este sitio las condiciones más frecuentes tienen una contribución importante en la energía anual, pero al igual que el anterior existe contribución de alturas y periodos mayores, pero menos frecuentes. El rango de potencia con mayor probabilidad de ocurrir se encuentra entre 1-2 kW/m.

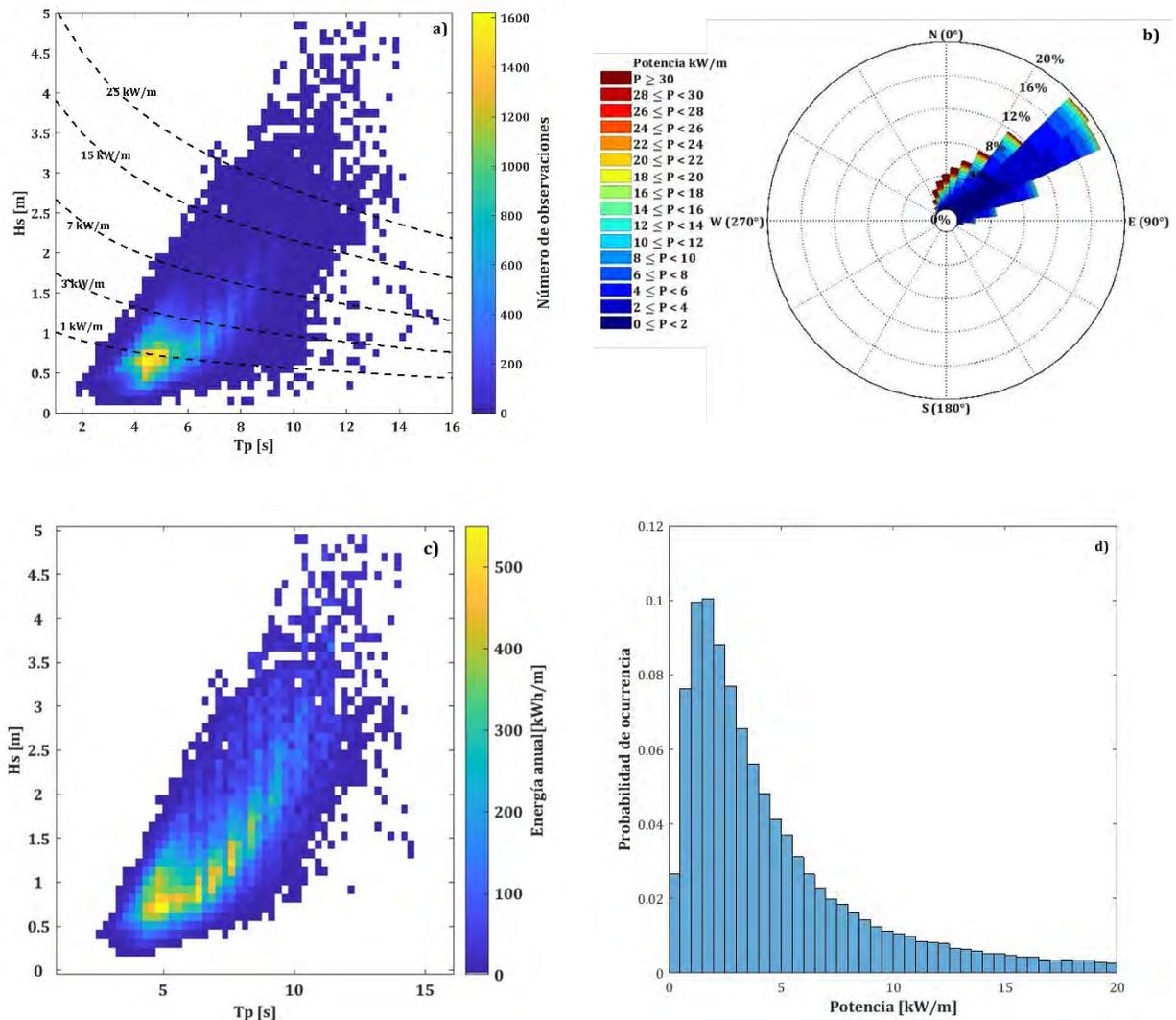


Figura 23 Caracterización Sisal: a) Histograma bivariado  $H_s$ - $T_p$ , b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

## Progreso

En este sitio la combinación con mayor frecuencia se encuentra entre 0.4-0.7 metros de altura de ola y 3-5 segundos, esta combinación genera una potencia menor a 1kW/m. La altura de ola máxima alcanza los 4 metros y 14 segundos de periodo. La dirección del oleaje es noreste con potencias máximas provenientes del norte. La contribución a la energía anual sigue la tendencia observada hasta el momento, mostrando que ciertas combinaciones de altura y periodo mayores al rango de las observaciones más frecuentes contribuyen de igual manera a la energía anual a pesar de tener menor ocurrencia. Para este sitio más del 10% de las observaciones se encontraron en valores de potencia entre 1-2 kW/h.

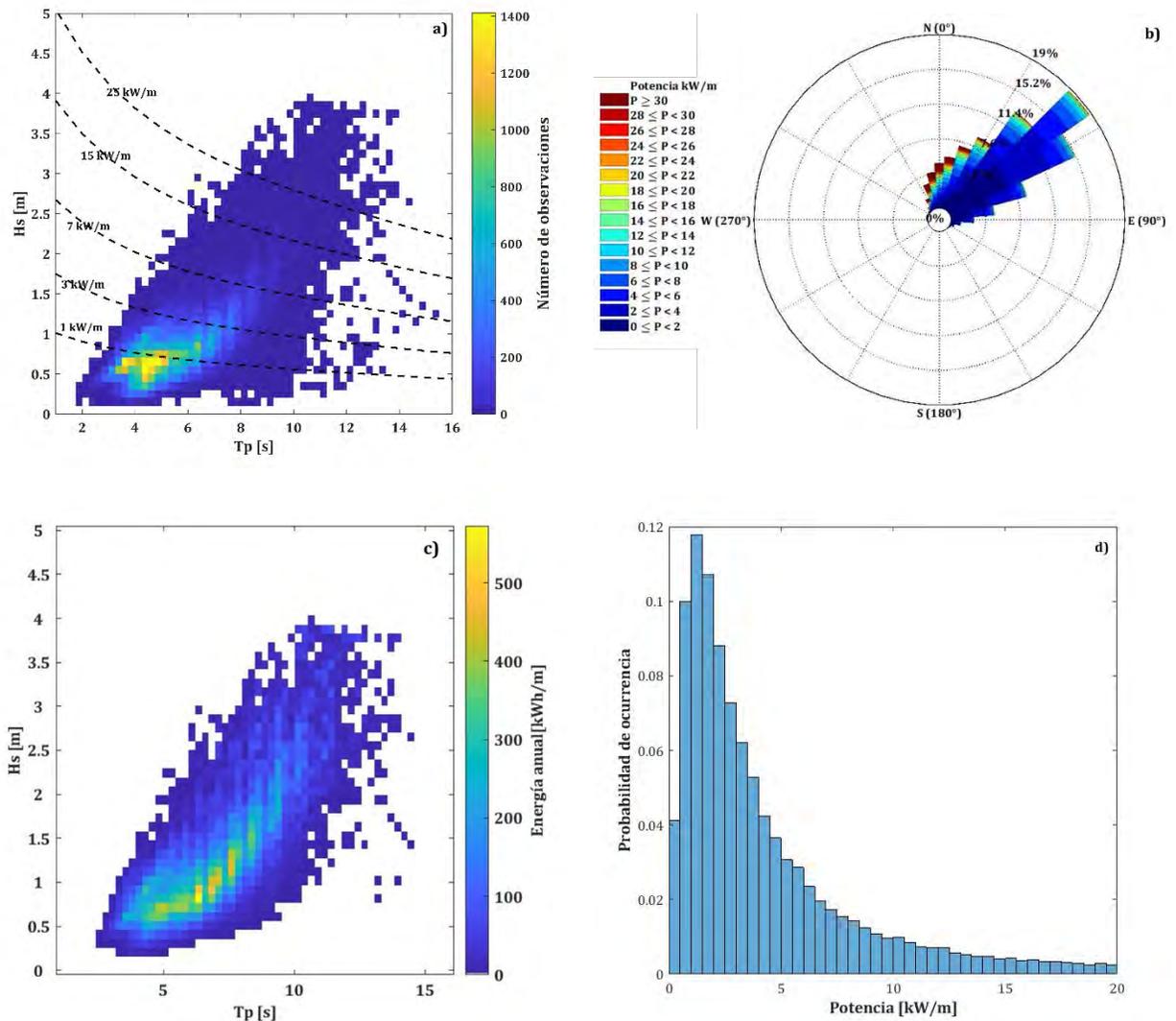
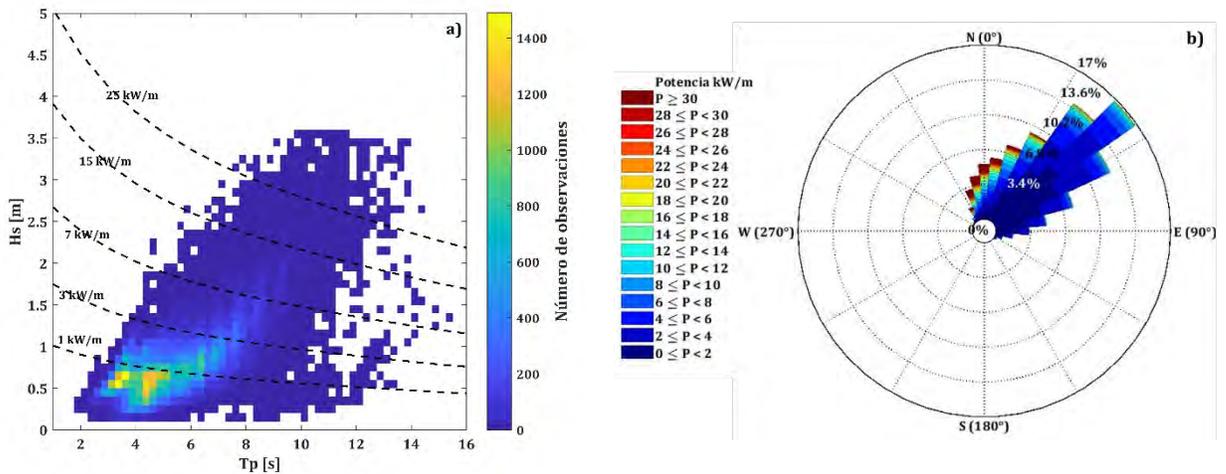


Figura 24 Caracterización Progreso: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

### Telchac

Presenta la mayor ocurrencia en alturas entre 0.4-0.7 metros y un periodo entre 3 y 5 segundos, con la cual se alcanza una potencia por debajo de 1kW/m. La altura máxima alcanzada es de 3.8 metros. La dirección del oleaje proviene principalmente del noreste, pero del norte proviene el oleaje con mayor potencial energético. En este sitio combinaciones de altura de ola y periodo que no figuran entre las más frecuentes tienen una contribución mayor a la energía anual como se puede observar en la figura 20c. Los valores de potencia más comunes se encuentran entre 0.5-2 kW/m



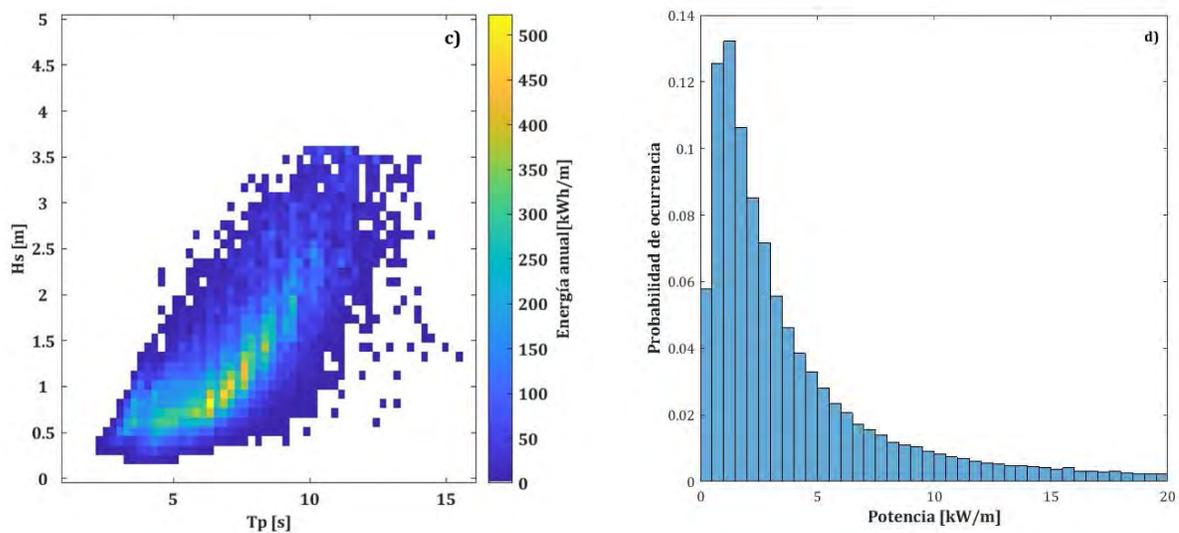


Figura 25 Caracterización Telchac: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

## Dzilam

En el histograma bivariado de este sitio se ilustra que las observaciones más frecuentes se encuentran en un rango más estrecho a comparación de lo que se había observado para sitios anteriores, especialmente para el periodo que oscila entre 4-5 segundos y la altura de ola que se encuentra entre 0.4 y 0.7 metros. La altura máxima de ola es de 4.5 metros. El noreste es la dirección predominante del oleaje y al igual que el resto de los sitios hasta ahora evaluados las potencias más altas se asocian al norte. La contribución a la energía anual también sigue el mismo comportamiento que se ha observado en el resto de los puertos, donde combinaciones de alturas y periodos que, aunque menos frecuentes se encuentran asociados a potencias mayores alcanzan valores de energía iguales o incluso superiores que las asociadas a las combinaciones más observadas. Por su parte más del 10% de los valores de potencia se encuentran entre 0.5-2 kW/m.

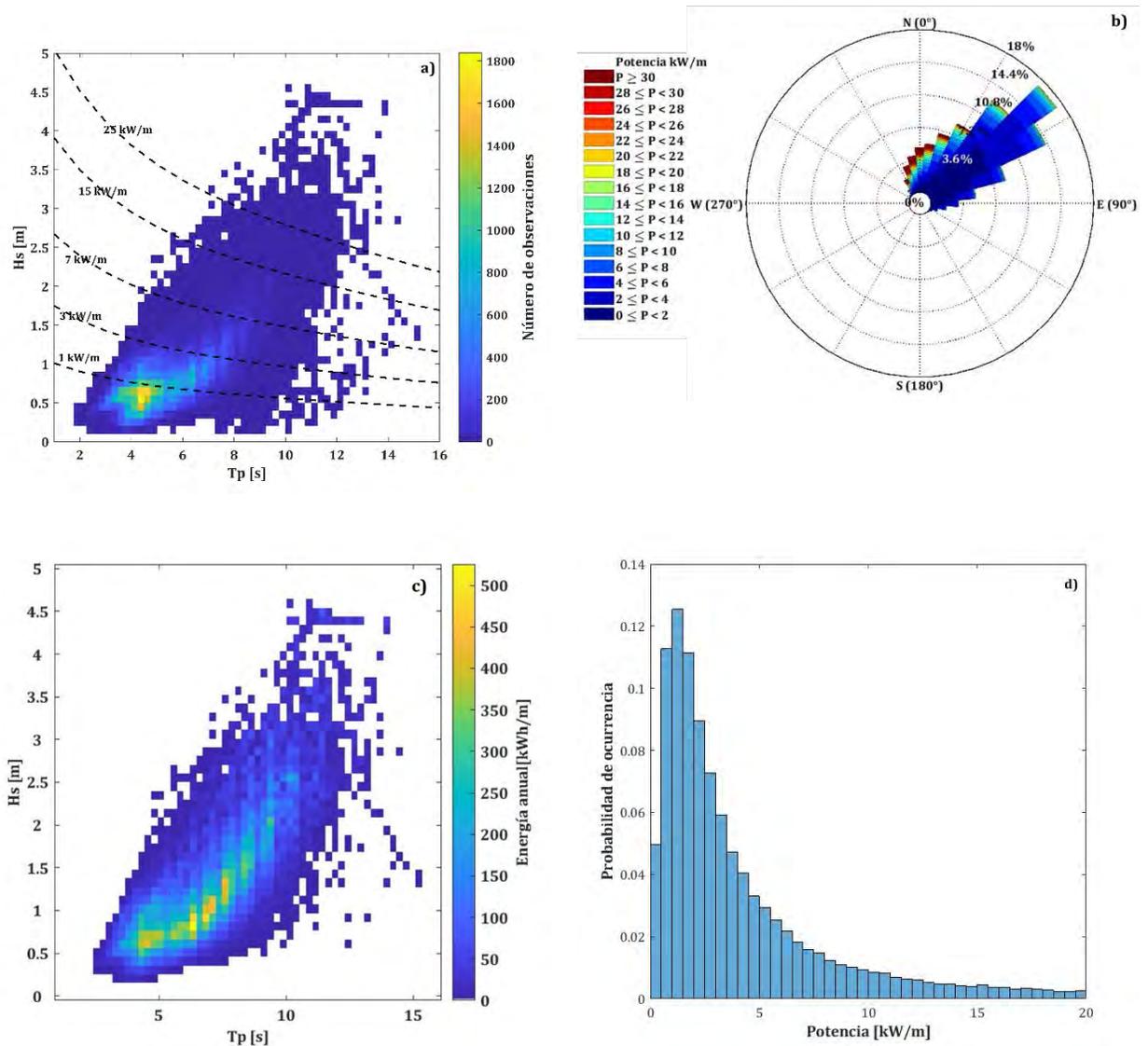


Figura 26 Caracterización Dzilam: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

### Rio Lagartos

Este sitio al igual que el anterior presenta menor dispersión en los datos más frecuentes, aquí incluso se puede identificar una combinación en particular como la más frecuente, la cual se compone de 0.6 metros y 4.5 segundos y se encuentra por debajo de la isolínea de potencia de 1 kW/m. La mayor altura de ola es de 4.28 metros y la dirección del oleaje mantiene la tendencia noreste con las potencias superiores asociadas al norte. En el gráfico de la energía anual se distingue que la combinación

asociada a mayor energía anual es de 1 metro de altura de ola y 7 segundos, la cual difiere de la combinación más observada, a su vez el rango de potencia que más se presenta es de 1-2 kW/m.

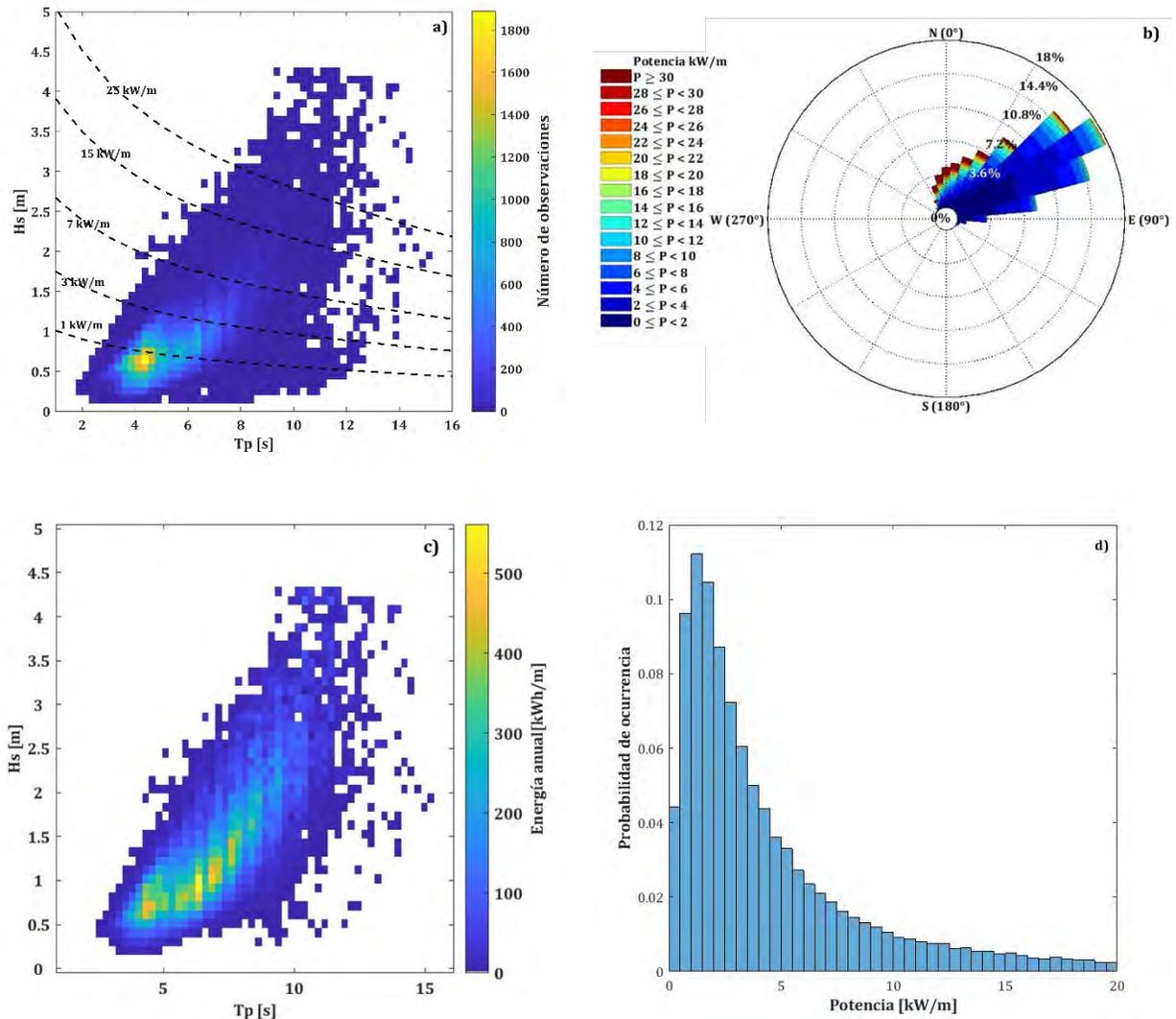


Figura 27 Caracterización Rio Lagartos: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

El Cuyo

Continuando con la tendencia de valores puntuales, en este sitio la combinación más frecuente es de 0.7 metros y 3.8 segundos, mientras que la ola más alta es de 3.3 metros. La rosa direccional indica que el noreste se mantiene como la dirección predominante

y los valores máximos de potencia nuevamente provienen del norte. Las olas entre 0.7-1.5 metros y 5.5-8 segundos presentan la mayor energía anual, mientras que el rango más frecuente de valores de potencia se encuentra entre 0.5-2 kW/m.

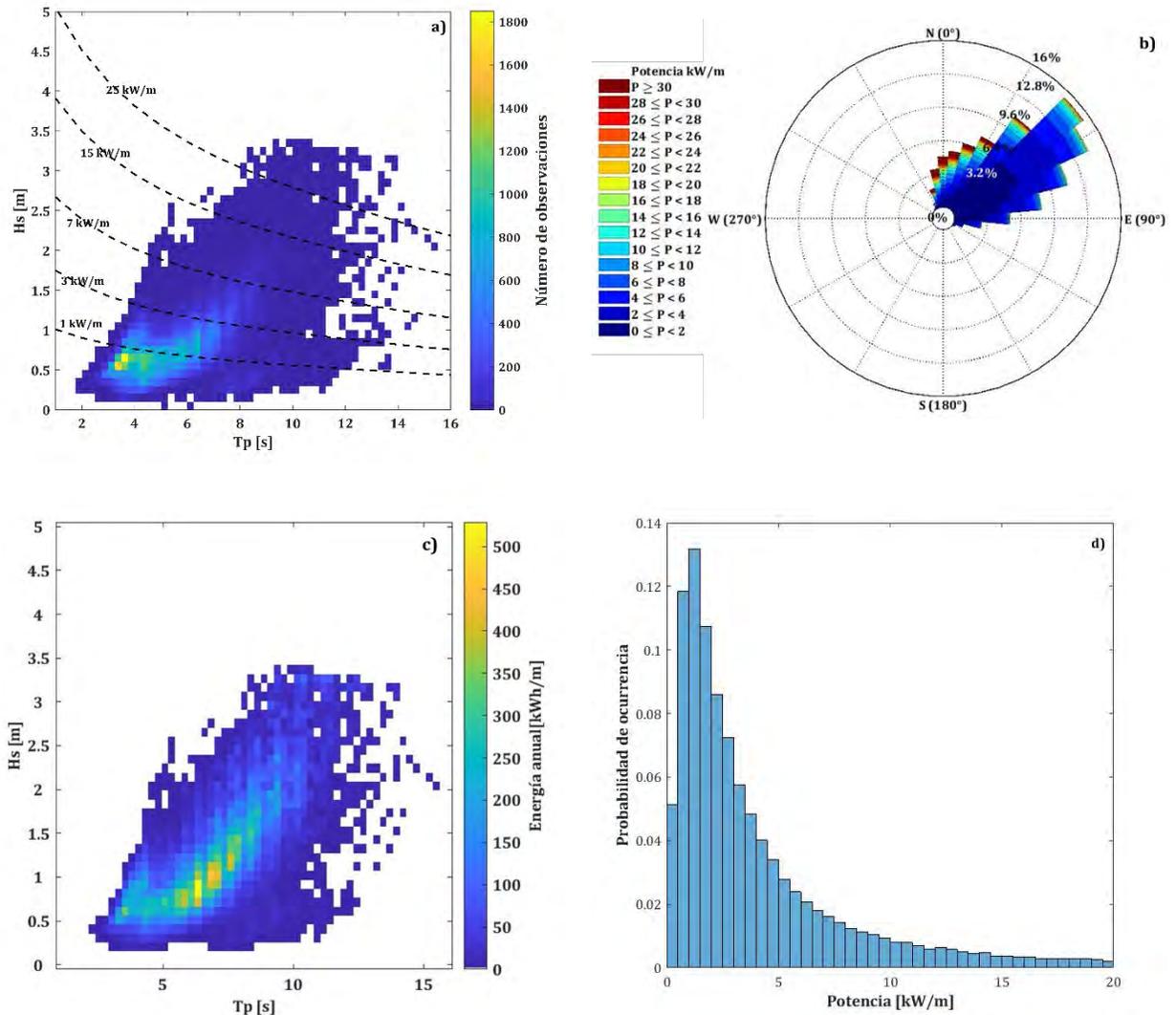


Figura 28 Caracterización el Cuyo: a) Histograma bivariado  $H_s$ - $T_p$ , b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

## Holbox

En el último de los sitios evaluados se observa que el rango para los valores del periodo que ocurren con mayor frecuencia es más amplio en comparación con el de altura de ola, siendo de 0.5-0.8 metros y 3.25 a 6.5 segundos, valores con los que se ronda la

potencia de 1 kW/m. El valor de altura de ola más alto registrado fue de 3.49 metros. La dirección conserva las características del resto de los puertos, con predominancia noreste y el norte asociado a las potencias superiores. Este sitio al igual que los demás clarifica cómo no necesariamente la combinación más frecuente es la que contribuye más a la energía anual, en este caso se observa que el color asociado a mayor energía se ubica en regiones diferentes a las más frecuentes. Los valores de probabilidad de ocurrencia también mantienen la tendencia observada en los sitios ya descritos, siendo el rango 1-2 kW/m el más observado.

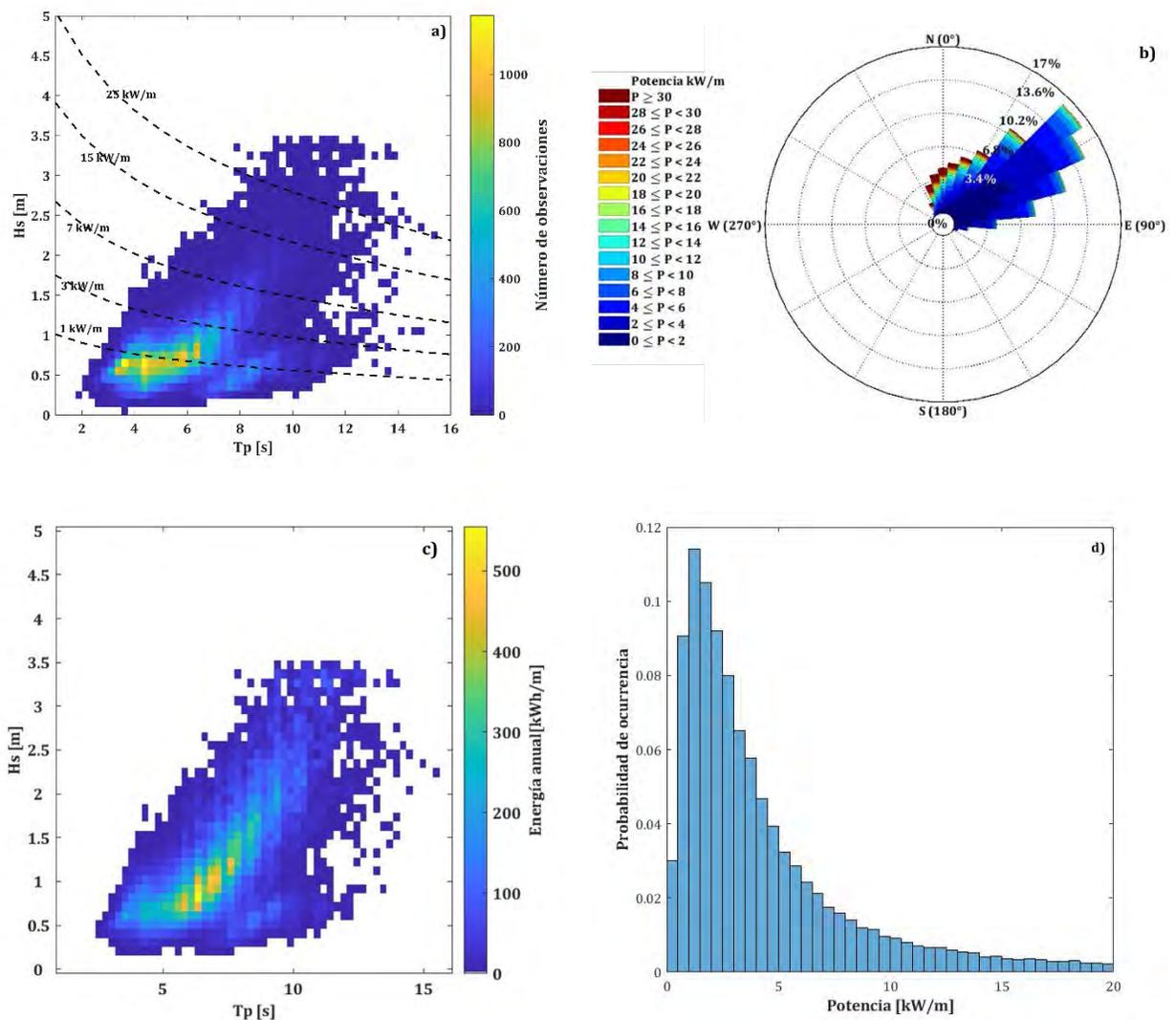


Figura 29 Caracterización Holbox: a) Histograma bivariado Hs-Tp, b) Rosa direccional de potencia, c) Distribución de la energía anual y d) Probabilidad de ocurrencia de potencia instantánea.

Finalmente, tras calcular la energía total anual disponible se obtienen los resultados presentados en la figura 30 donde se vislumbra que Sisal es el puerto con mayor energía acumulada anual, seguido de Rio Lagartos, Progreso, Dzilam, Holbox, Telchac, Progreso, El Cuyo y por último Celestún.

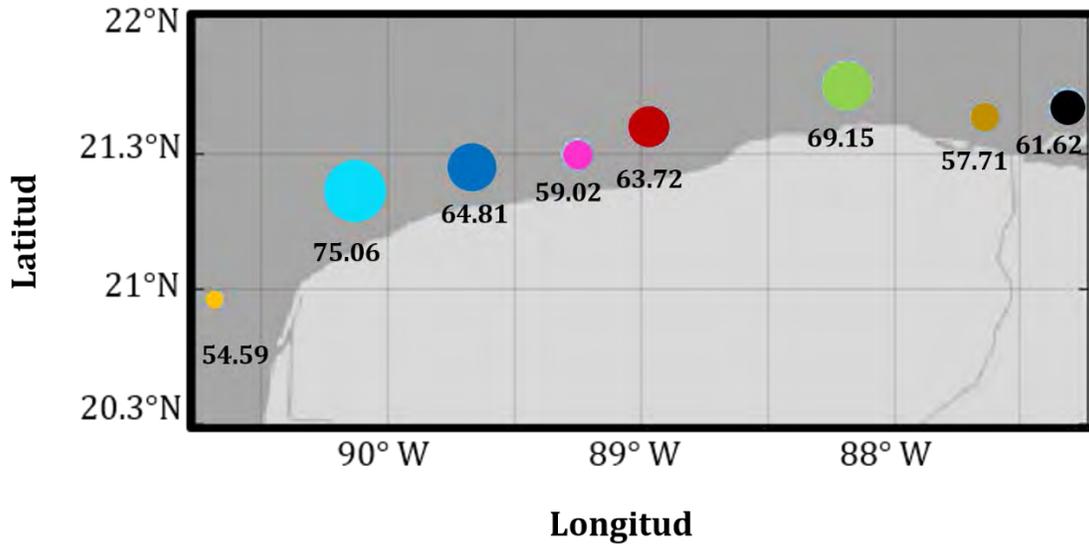


Figura 30 Valores de energía anual acumulada total por sitio (MWh) donde: Celestún-amarillo, Sisal-cyan, Progreso-azul, Telchac-magenta, Dzilam-rojo, Rio Lagartos-verde, El Cuyo-oro, Holbox-negro

### Variabilidad

Como se mencionó en secciones anteriores el oleaje presenta variaciones a diferentes escalas temporales, reflejando distintos procesos que lo influyen. En las figuras 31, 32 y 33 se presenta la variación de los promedios anual, mensual y horario para todos los puertos estudiados.

En la Figura 32 correspondiente a la variación anual se muestra como todos los puertos siguen la misma tendencia al paso de los años en sus valores de potencia, encontrándose algunos picos, como el del 88 vinculado con Gilberto, el del 95 vinculado con los huracanes Opal y Roxanne, el del 2005 vinculado con una temporada de huracanes muy activa (i.e. Wilma). Adicionalmente se observa a partir de 1997 una clara tendencia de la potencia de oleaje a incrementarse hasta 2008. Por otro lado, al observar la variación entre los meses (Fig.33) resalta el incremento en los valores de

potencia durante los meses de otoño e invierno, vinculados con los eventos de nortes (frentes fríos). En la escala diurna (Fig.34) se observa el comportamiento del sistema de brisas marinas observándose un aumento en los valores de potencia por la tarde (a partir de las 15 horas)

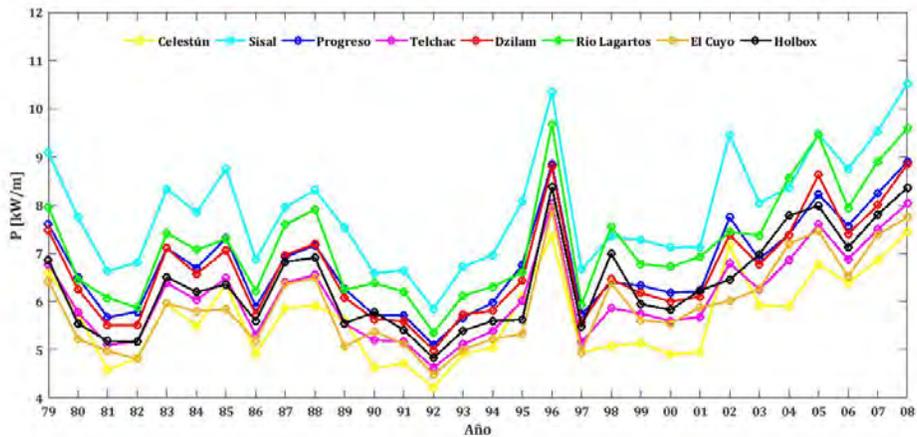


Figura 31 Promedio anual para todos los puertos estudiados

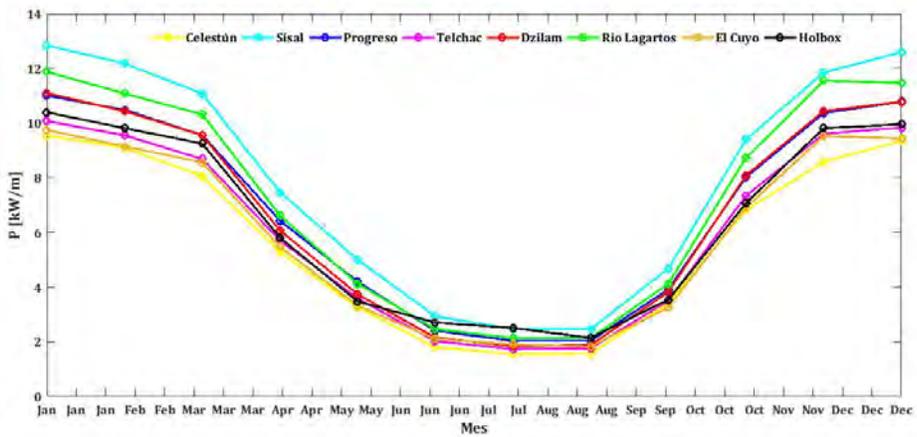


Figura 32 Promedio mensual para todos los puertos estudiados

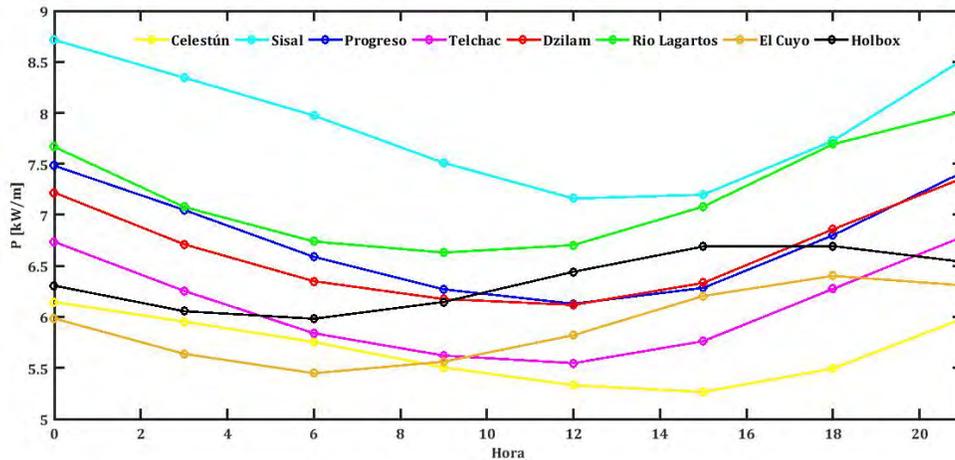


Figura 33 Promedio horario para todos los puertos estudiados

Para cuantificar la variación de los promedios a distintas escalas, se calculó la desviación estándar en las escalas arriba descritas (tabla 8), obteniéndose la mayor variación a escala mensual, es decir, los eventos de norte son los que más influyen en la potencia obtenida a lo largo del año, al ser un proceso sinóptico, esto es notorio en todos los puertos.

Tabla 8 Promedio y desviación estándar de potencia para los puertos estudiados

	Internauual		Mensual		Horaria	
	promedio	D.S	promedio	D.S	promedio	D.S
Celestún	5678.63	891.16	5694.16	3243.49	5678.78	327.29
Sisal	7893.45	1189.64	7912.74	4214.56	7893.72	594.59
Progreso	6752.37	992.93	6769.59	3677.37	6752.63	525.43
Telchac	6102.47	911.15	6118.48	3435.52	6102.72	484.93
Dzilam	6640.38	1031.89	6657.57	3800.52	6640.65	473.96
Rio lagartos	7200.68	1155.34	7218.64	4035.13	7201.02	525.99
El cuyo	5920.87	921.66	5935.97	3299.72	5921.15	360.60
Holbox	6356.93	993.09	6373.04	3362.98	6357.20	278.52

### Comparación con el recurso eólico

El periodo común de las dos bases de datos comprende del 26 de mayo del 2007 al 31 de diciembre de 2008. La Figura 34 representa los promedios mensuales, la línea gris representa el recurso eólico y la azul el oleaje, como se observa, a pesar de diferir en

magnitud siguen la misma tendencia, pues en la región están muy vinculados (el oleaje es localmente generado) con valores máximos en los meses de octubre y marzo-abril y valles pronunciados de mayo-agosto.

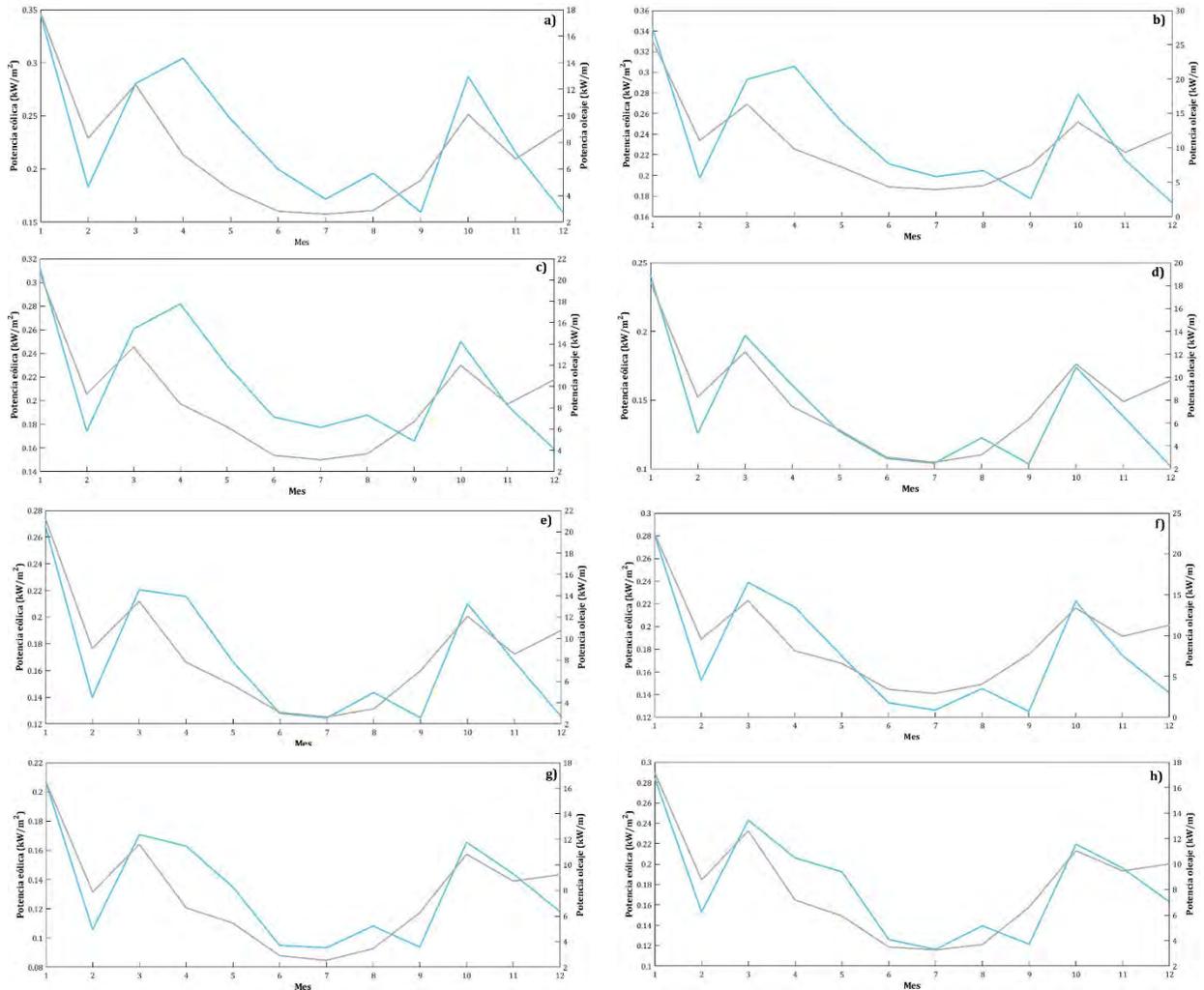


Figura 34 Series de potencia para el recurso eólico 10m (gris) y oleaje (azul) donde a) Celestún, b) Sisal, c) Progreso, d) Telchac, e) Dzilam, f) Rio Lagarto, g) El Cuyo y h) Holbox

Para hacer el cálculo considerando las matrices de potencia de los dispositivos se seleccionó el punto de Sisal por ser el que presentó mayor energía anual disponible. Al multiplicar la matriz de energía anual disponible por la matriz de potencia del dispositivo "Oyster" se obtuvo 0.47kW de los 290 kW de potencia extraíbles con este dispositivo, lo que da una eficiencia de tan sólo el 0.16%. Por su parte, al aplicar la curva de potencia a los datos de viento se obtuvo una potencia de 1088.40kW de los 3600 del

modelo. Al relacionar ambas potencias extraíbles se encuentra que el oleaje no es capaz de extraer ni el 0.05% de la que extrae el viento.

Tabla 9 Resumen de desempeño de energía eólica vs energía oleaje

	<b>Energía anual extraíble (MWh)</b>	<b>Eficiencia con relación al dispositivo (%)</b>
Oleaje	4.155272	0.16
Viento	10410.38	33.01

### **Mediciones en playa**

Uno de los aspectos que haría muy enriquecedor el utilizar CEOs en la región de Yucatán, es la posibilidad de emplearlos con un doble propósito; por un lado, para la generación de energía, y por otro lado como estructuras de protección costera. Debido a esto es muy importante evaluar el recurso cerca de la costa, especialmente si reconocemos que los productos existentes de oleaje no dan resultados adecuados cerca de la costa. Esta sección tiene el objetivo de evaluar directamente la energía disponible en la playa.

La primera campaña se llevó a cabo del día 08 al 09 de abril de 2019, la segunda campaña tuvo lugar del día 28 al 29 de enero de 2020. Ambas comenzaron a las 12 horas y terminaron a las 10 am del día siguiente.

La Figura 35 muestra en color azul los datos recabados con el velocímetro 3D, sin embargo, para poner en contexto estas mediciones con lo reportado en los capítulos anteriores, se utilizan los resultados del modelo disponible, el ERA-5, que de entrada sabemos que sobre-estima los valores observados con un factor de  $\sim 1.8$ . En verde se encuentran los datos simulados por el modelo numérico ERA-5 a 13m de profundidad, la línea continua representa la campaña de abril y la punteada la de enero.

Como es de esperarse los valores de altura de ola que estima el modelo son mucho mayores a los obtenidos por el instrumento, pero están en el orden de la sobreestimación que el ERA-5 mostró respecto al modelo MIKE21 (factor de  $\sim 2$ ).

Por otro lado, si sólo se comparan las campañas, se tiene que la altura de ola fue mayor en abril y por lo tanto lo fue también la potencia, mientras que el periodo siguió una tendencia similar en ambas campañas a excepción de las primeras 4 horas de mediciones.

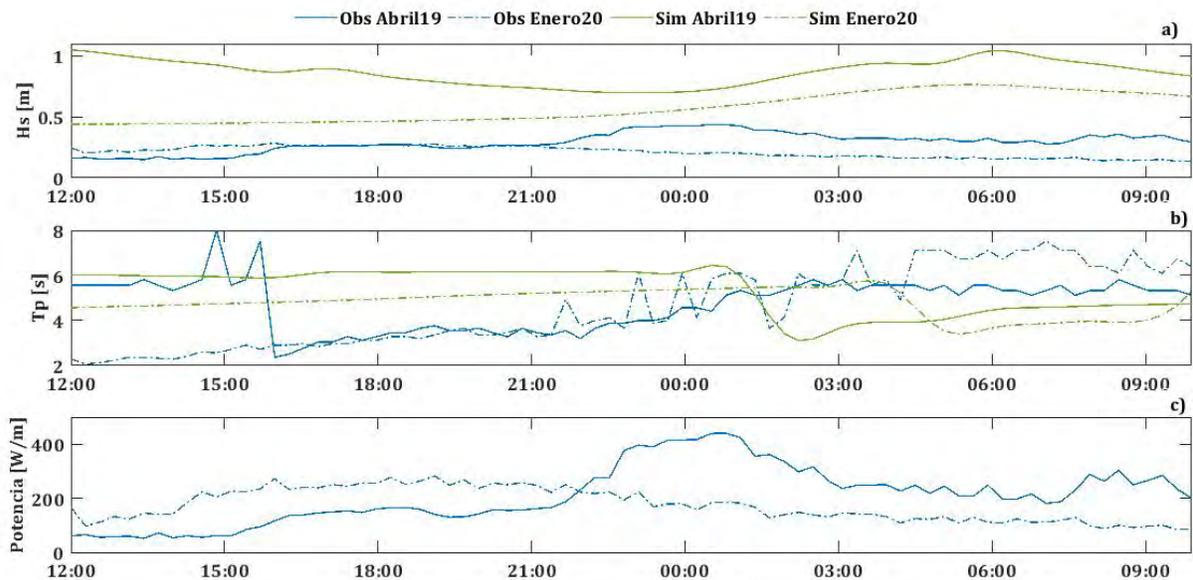


Figura 35. Parámetros de oleaje de las campañas realizadas y datos simulados por el modelo ERA-5.

La energía total obtenida en la campaña de abril fue de 16235 J, mientras que en enero fue de 13535 J, esto sigue la tendencia de la altura de ola significativa pues es el factor que más influye en su cálculo.

## VI. DISCUSIÓN

### Validación del modelo numérico

La diferencia entre los parámetros estadísticos de ajuste obtenidos en la serie de 10 metros respecto a la de 5 metros, indican que con esta configuración del modelo no se tienen resultados satisfactorios en aguas someras. Esto podría deberse en parte a la batimetría empleada en el modelo (ETOPO 1) la cual tiene una resolución de 1 arco

segundo, lo cual puede ser insuficiente para resolver de forma adecuada las transformaciones relativas a esta zona (ANEXO V).

Por otro lado, a pesar de que los diagramas de dispersión sugerían mucha disgregación en los datos, los valores obtenidos en los parámetros estadísticos de ajuste coinciden con lo reportado por otros autores, como ejemplo se mencionan un par que trabajaron también con modelo numérico MIKE 21, tal es el caso de Vengoupal (2015) quién realiza una evaluación del recurso en Escocia y obtiene valores de bias en un rango de -0.10 a +0.27m , error cuadrático medio de 0.25 a .0.45 m y un índice de dispersión entre 0.19 y 0.3 para la altura de ola, mientras que en este estudio se obtuvo 0.05-0.14m, 0.11-0.25 y 0.29-0.88 respectivamente (Venugopal and Nimalidinne 2015).

Otro ejemplo es la validación que llevó a cabo Appendini (2013) con los mismos datos empleados en este estudio, pero comparando con información de boyas situadas en el Golfo de México y Caribe, en sus resultados expone que el modelo tiene un mejor desempeño en la región del Golfo de México y disminuye hacia el Caribe. Para la zona de la península de Yucatán se aprecian valores de alrededor de 0.8 de coeficiente de correlación y un bias menor a 0.1 m, lo obtenido durante la validación en este estudio se acerca a los valores reportados 0.65-0.75 de correlación lineal y 0.08-0.14m de bias (Appendini et al. 2013). Otro asunto que tomar en cuenta es que el modelo MIKE21 representa adecuadamente la temporalidad de los eventos observados (coherencia alta) siendo las magnitudes las que presentan diferencias. Incluso es capaz de simular los efectos de brisas marinas de forma aproximada.

Es importante señalar que se estos parámetros se calculan en conjunto porque proporcionan información distinta y complementaria sobre las series de tiempo por lo que no hay que ser concluyentes tomando como referencia un solo valor.

### **Comparación de modelos**

Hay que recordar que los modelos numéricos de oleaje se encuentran alimentados por datos de viento, por lo que su desempeño depende en gran medida de la calidad de este dato, así como de la batimetría empleada.

Como primer punto es importante tener presente que uno de los dos puntos evaluados no compartía exactamente la ubicación geográfica con el resto, el nodo correspondiente al MIKE 21 se encuentra menor profundidad, lo cual justifica una parte de las diferencias observadas.

Por otro lado, hay que considerar que en la sección anterior se observó que el modelo MIKE 21 tiende a sobrestimar ligeramente los valores de altura de ola, y estos valores son a su vez superados por el modelo ERA-5, si tomamos en cuenta que el incremento en una unidad en altura de ola implica cuadruplicar el resultado en potencia, la sobrestimación es grande.

### **Caracterización del recurso**

Al comparar los valores de potencia obtenidos en este estudio con lo reportado por otros autores quienes consideraron la zona de la península de Yucatán en su trabajo, se observa que los valores aquí obtenidos se encuentran por debajo de lo reportado por Pérez (2012) quién evalúa el recurso con datos del modelo WAM para la república mexicana y establece que el rango de potencia para la costa yucateca es de 3-4 kW/m.

Por otro lado, el rango estimado de potencia por este trabajo (0.5-2 kW/m) coincide con los valores que describe Appendini (2015) en su estudio del Golfo de México y Caribe donde reporta que la potencia media anual para la costa norte de Yucatán es de 2kW/m (MIKE 21). También concuerda con lo reportado por Hernández-Fontes (2019) quienes estimaron la potencia para la república mexicana con el modelo ERA-5, siendo de 2Kw/m para la costa norte de la península de Yucatán.

Las diferencias entre los valores estimados por los distintos estudios se deben en parte al modelo numérico empleado, la batimetría y los datos de viento usados para el forzamiento. Cabe destacar que todos los estudios anteriores (Appendini et al. 2015; Hernández-Fontes et al. 2019; Pérez Peña 2012) se enfocan en cubrir grandes áreas y éste es el primer estudio enfocado a la península de Yucatán.

El hecho de que la variabilidad del recurso sea mayor entre los meses se explica en su totalidad por la influencia de los eventos “nortes” los cuales impactan en la península

de Yucatán entre los meses octubre a marzo (Cahuich-López et al, 2020), afectando las condiciones de viento y por tanto del oleaje. Por otro lado, aunque la variación horaria sea la menor entre las escalas analizadas, se encuentra claramente influenciada por los sistemas de brisas marinas. En cuanto a la variación entre los años, los picos se deben a actividad ciclónica intensa relacionados a huracanes: Alberto (1982), Gilberto (1988), Opal (1995), Isidoro (2002) y Wilma (2005). También es importante resaltar que se observa una tendencia al alza en las potencias alcanzadas resultado del incremento gradual de las alturas de ola.

El que los gráficos de promedios mensuales de potencia del viento y de oleaje sigan la misma tendencia era de esperarse, pues uno es la causa del otro para esta región (no hay swell), aunque resulta interesante que Kalogeri y colaboradores (2017) proponen que es deseable que exista poca correlación entre ambos recursos para poder usarse como fuentes complementarias. (Kalogeri et al. 2017). Por su parte la estimación de recurso eólico fue una aproximación usando las medidas disponibles a 114 metros, un análisis más detallado es requerido en caso de interesarse en el aprovechamiento de este recurso.

Aunque la eficiencia obtenida al aplicar la matriz de potencia de un dispositivo es poco alentadora, esto se debe en parte a que el convertidor evaluado fue diseñado para operar en la región de Escocia, la cual presenta condiciones muy diferentes a las aquí descritas. Como se puede observar en su matriz de potencia (ANEXO VI) los valores más altos que se pueden extraer ocurren en condiciones que en esta región no se presentan.

Por lo que, de aspirar a extraer energía del oleaje en esta región se requiere el diseño de un dispositivo adecuado para las condiciones de la costa yucateca. No obstante, no hay que perder de vista que, de la potencia disponible del recurso, un convertidor sólo es capaz de aprovechar aproximadamente el 30% por lo que es necesario tener un buen balance de energía requerida y energía extraíble para evaluar su factibilidad.

## **Medición en playa**

Finalmente resulta interesante que, contrario de lo que se esperaría, se obtuvieron valores mayores de altura de ola y por ende de potencia y energía en la campaña de abril, respecto a la campaña de enero, ya que como se habló en la sección número dos, este mes se encuentra dentro de los meses con alto potencial; Sin embargo, durante la campaña de abril se presentó el frente frío No.49 lo que generó condiciones de oleaje de tormenta usualmente atípicas para esa temporada.

## **VII. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS**

En este trabajo se evaluó el potencial energético del oleaje para la costa de Yucatán. Para ello se evaluaron distintas bases de datos de modelos de oleaje que permitieron tener una estimación del potencial energético más robusta en base a varios años de información.

Los modelos analizados, MIKE 21, ERA5 y WAM-HURAC, mostraron una buena representación del oleaje medido a 10 m de profundidad, pero una mala representación a 5 m. Si bien el modelo MIKE 21 resulto ser el modelo con mejor representación de las mediciones a 10m, su desempeño a 5 m fue deficiente, por lo que resulta necesario refinar los resultados para aguas someras, lo que requeriría de una batimetría más fina con mejor descripción de la zona cercana a la costa donde suceden procesos que afectan de forma importante el comportamiento del oleaje.

La caracterización del recurso se realizó con los datos del modelo Mike 21. Las observaciones más frecuentes para todos los puertos oscilan en el rango de 3-5 segundos ( $T_p$ ) y 0.5-1 metros ( $H_s$ ) con dirección predominantemente noreste.

El rango de potencia con mayor probabilidad de ocurrencia es de 0.5-2kW/m, representando el 30% de las observaciones en todos los puertos; sin embargo, aunque poco comunes existen observaciones por arriba de 10kW/m. Lo anterior es un parámetro importante a la hora de diseñar un convertidor de energía del oleaje para

procurar su mayor eficiencia, también es importante considerar eventos extremos que puedan poner en peligro la integridad de la instalación. De los sitios estudiados Sisal es el que tiene mayor energía acumulada anual mientras que Celestún es el menor.

El oleaje presenta una variación entre meses muy marcada y claramente afectada por fenómenos de “nortes”, de igual forma se observa la influencia de los sistemas de brisas que promueven variación horaria con olas más altas por la tarde.

Resulta indispensable el desarrollo de tecnología propia adecuada a las condiciones del sitio de interés ya que a diferencia de la energía eólica no existe y probablemente nunca llegue a existir un diseño estándar para aprovechar la energía de las olas, pues es un fenómeno muy caótico donde interactúan varios procesos que deben considerarse para obtener lo mejor de ellos.

Aunque para que una fuente pretenda proveer energía eléctrica, y figurar en el sistema eléctrico nacional, se requiere que tenga un desarrollo tecnológico maduro, no se descarta el uso de estas tecnologías para sistemas aislados como islas, campamentos etc. Además de la utilidad que estos dispositivos pueden tener como sistemas de protección costera.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., López, J., & Mendoza, E. T. (2013). Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment. *Applied Ocean Research*, 39, 20-30.
- Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., López-González, J., & Mendoza, E. T. (2014). Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30-yr wave hindcast. *Journal of Climate*, 27(4), 1619-1632.
- Appendini, C. M., Urbano-Latorre, C. P., Figueroa, B., Dagua-Paz, C. J., Torres-Freyermuth, A., & Salles, P. (2015). Wave energy potential assessment in the Caribbean Low Level Jet using wave hindcast information. *Applied energy*, 137, 375-384.
- McCormick, M. E. (2013). *Ocean wave energy conversion*. Courier Corporation.
- Cahuich-López, M. A., Mariño-Tapia, I., Souza, A. J., Gold-Bouchot, G., Cohen, M., & Valdés-Lozano, D. (2020). Spatial and temporal variability of sea breezes and synoptic influences over the surface wind field of the Yucatán Peninsula. *Atmósfera*, 33(2), 123-142.
- Christine Miller (Agosto 2004) "A brief history of wave and tidal energy experiments in San Francisco and Santa Cruz. Recuperado en:  
<https://www.outsidelands.org/wave-tidal.php>
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate . Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 15/05/2020  
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Cornett, A. M. (2008, January). A global wave energy resource assessment. In *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Evans, D. V., & Antonio, F. D. O. (Eds.). (2012). *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization: IUTAM Symposium Lisbon/Portugal 1985*. Springer Science & Business Media.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1984). Water wave mechanics for engineers and scientists. In *Unknown Host Publication Title*. Prentice-Hall Inc.

- Dhanak, M. R., & Xiros, N. I. (Eds.). (2016). *Springer handbook of ocean engineering*. Springer.
- Antonio, F. D. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 899-918.
- Felix, A., V Hernández-Fontes, J., Lithgow, D., Mendoza, E., Posada, G., Ring, M., & Silva, R. (2019). Wave energy in tropical regions: deployment challenges, environmental and social perspectives. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(7), 219.
- Young, I. R. (1999). *Wind generated ocean waves*. Elsevier.
- Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*. World scientific.
- Brown, E. (1999). *Waves, tides and shallow-water processes* (Vol. 4). Gulf Professional Publishing.
- Hernández-Fontes, J. V., Felix, A., Mendoza, E., Cueto, Y. R., & Silva, R. (2019). On the marine energy resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 191.
- Hernández-Fontes, J. V., Martínez, M. L., Wojtarowski, A., González-Mendoza, J. L., Landgrave, R., & Silva, R. (2020). Is ocean energy an alternative in developing regions? A case study in Michoacan, Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 121984.
- Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2013). Conociendo Yucatán .  
Recuperado en:  
[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/YUCATAN.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/YUCATAN.pdf)
- Kalogeri, C., Galanis, G., Spyrou, C., Diamantis, D., Baladima, F., Koukoura, M., & Kallos, G. (2017). Assessing the European offshore wind and wave energy resource for combined exploitation. *Renewable energy*, 101, 244-264.
- Bouws, E., Draper, L., Shearman, E. D. R., Laing, A. K., Feit, D., Mass, W., ... & Battjes, J. A. (1998). Guide to Wave analysis and forecasting. WMO-No. 702. *World Meteorological Organization*.
- Majidi, A. G., Bingölbali, B., Akpınar, A., & Rusu, E. (2020). Dimensionless Normalized Wave Power in the Hot-spot Areas of the Black Sea. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 173, p. 01001). EDP Sciences.
- Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). *Fundamentals of ocean renewable energy: generating electricity from the sea*. Academic Press.

- Pecher, A., & Peter Kofoed, J. (2017). *Handbook of ocean wave energy*. Springer Nature.
- Pelc, R., & Fujita, R. M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471-479.
- Pérez Peña, Abril Ichel. 2012. "Estimación Del Clima Marítimo y La Energía de Oleaje Disponible En Las Costas Mexicanas." Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Piche, S., Cornett, A., Baker, S., & Nistor, I. (2015, May). Appraisal of the IEC technical specification for assessment of wave energy resources. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 56574, p. V009T09A034). American Society of Mechanical Engineers.
- Pickard, G. L., & Emery, W. J. (2016). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Elsevier.
- Ruiz, Gabriel, Rodolfo Silva, Gregorio Posada, and J.C. Espinal. 2008. "Atlas de Clima Marítimo Para Las Vertientes Atlántica y Pacífica Del Litoral Mexicano." In *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Cartagena de Indias, Colombia*.
- Sannasiraj, S. A., & Sundar, V. (2016). Assessment of wave energy potential and its harvesting approach along the Indian coast. *Renewable Energy*, 99, 398-409.
- Sheng, Wanan. 2019. "Wave Energy Conversion and Hydrodynamics Modelling Technologies: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 109: 482–98. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119302424> (July 10, 2019).
- Silva Casarín, Rodolfo. 2005. *Análisis y Descripción Estadística Del Oleaje*. Ciudad de México.
- Sosa, Carlos (2019). "Modelación numérica para la optimización de un dispositivo convertidor de la energía del oleaje". Simposio de de estudiantes de posgrado del departamento de física aplicada 2019. Mérida, Yucatán 03/12/2019.
- The WindPower (4 Junio 2018) SW3.6-107. Recuperado en:  
[https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_20\\_siemens\\_swt-3.6-107.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_20_siemens_swt-3.6-107.php)
- Thomson, Richard E, and William J Emery. 2014. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Third. ed. Elsevier.

Venugopal, Vengatesan, and Reddy Nemalidinne. 2015. "Wave Resource Assessment for Scottish Waters Using a Large Scale North Atlantic Spectral Wave Model." *Renewable Energy* 76: 503–525.

Yang, Zhaoqing, and Andrea Copping. 2017. *Engineering Marine Renewable Energy: Resource Characterization and Physical Effects*. ed. Springer.

## **IX. ANEXOS**

### **ANEXO I. Convertidores de energía del oleaje**

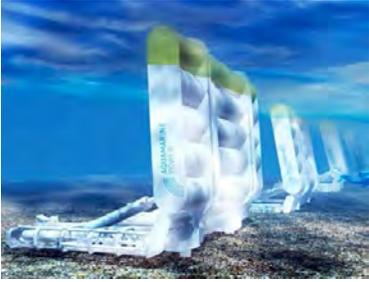
La historia del desarrollo de convertidores de energía del oleaje tiene registro desde inicios del siglo XIX (outsidelands 2000-2020), posteriormente en la época moderna se reconoce al japonés Yoshio Masuda como el pionero en el desarrollo de esta tecnología quien inicio su investigación desde 1945, pero fue hasta el año 1947 que probó en el mar su primer dispositivo que consistía en tres flotadores conectados con armaduras que, al oscilar con el oleaje generaba una rotación de la manivela del flotador central que se encontraba conectada a un generador eléctrico, este modelo tenía 15 metros de longitud y logró una generación eléctrica de 200W. (David and Falcão 1985). Posteriormente desarrolló una boya acoplada a una turbina de aire la cual fue comercializada en Japón y Estados Unidos en el año 1965 (Falcão 2010)

No fue sino hasta el año 1973 que la crisis del petróleo motivó la investigación de tecnologías renovables cuando un artículo publicado por Stephen Salter en 1974 atrajo la atención de la comunidad científica para la investigación de la energía del oleaje.

En los años siguientes creció el interés y el desarrollo de propuestas para el aprovechamiento de la energía principalmente en Europa y Japón (David and Falcão 1985), sin embargo, la hidrodinámica de la absorción de energía del oleaje es un fenómeno complejo donde todas las transformaciones del oleaje deberían ser consideradas, si a esto se suma la variabilidad del recurso y la supervivencia del dispositivo en condiciones extremas como lo es el mar han dificultado la estandarización de la tecnología.

Tabla 7 Proyectos desarrollados en el mundo

Nombre	Imagen	País/Año	Generación	Estado
Pico		Portugal 1999	Pico máximo en 7000 kWh	Cerrada en octubre 2018
Mutriku		España 2006	300 kW	Trabajando
Leancon		Hanstsholm Dinamarca 2004	8.8 MWh	Trabajando
Power buoy		Estados Unidos 1994	300W	Trabajando
Pelamis		Portugal 2004	750kW	En pausa desde 2009
CETO		Australia 2014	240 kW	Trabajando

Nombre	Imagen	País/Año	Generación	Estado
Oyster		Escocia 2009	800 kW	En pausa
SSG		Noruega 2004	10-20 GWh/año	En desarrollo
Wave- dragon		Dinamarca 2002	1.5-12 MW	Funcionando

Como es posible apreciar en la tabla anterior los diseños de los dispositivos son muy diversos y no se sigue un patrón estándar como sucede con los aerogeneradores, también varios de los proyectos han pausado en su etapa de escalamiento o incluso una vez instalados han sido retirados de la zona de prueba por fallas las cuales son principalmente mecánicas, seguido de complicaciones con el generador eléctrico, o porque el precio de la electricidad generada resulta elevado por los costos de operación, mantenimiento y distribución. (Falcão 2010; Sheng 2019)

## ANEXO II. Teoría lineal

A pesar de que el oleaje es un fenómeno no lineal y que existen varias teorías que han desarrollado complejos sistemas de ecuaciones para abordarlo, resulta válido estudiarlo desde la teoría lineal de Airy, donde el oleaje es representado como una onda sinusoidal como la descrita en la figura 3, esta teoría plantea que las crestas de la onda son iguales en altura, equidistantes entre sí y mantiene un movimiento a velocidad constante sin cambio de forma, asume que el fluido es incomprensible, ignora los

efectos de viscosidad, turbulencia y tensión superficial, considera que la profundidad es constante y la relación  $H/\lambda$  y  $H/d$  es muy pequeña (Frigaard 2001; Laing et al. 1998; Neil and Hashemi 2018; Pecher et al. 2017)

Las ecuaciones gobernantes que deben resolverse comienzan en la ecuación de conservación de masa de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

Donde  $x$  es el desplazamiento en la horizontal y  $z$  en la vertical, el potencial de velocidad  $\phi$  está en términos de los componentes horizontal ( $u$ ) y vertical ( $w$ ) de la velocidad y del tiempo ( $t$ );

$$u(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (9)$$

$$w(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (10)$$

La conservación del momento se representa por la ecuación inestable de Bernoulli:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho w} + gz = 0 \quad (11)$$

Donde  $p$  es presión,  $\rho w$  la densidad del fluido y  $g$  es la aceleración de la gravedad, para resolver las ecuaciones anteriores es necesario establecer un dominio y definir sus límites, los cuales se definen a continuación:

Condiciones de frontera dinámica en la superficie libre:

Al ser  $z=n$ ,  $p=0$ , entonces: (12)

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho w} + gz = 0$$

Condiciones de frontera cinemática en la superficie libre:

$$w = \frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} \quad (13)$$

cuando  $z=n$

Sustituyendo con la ecuación 3 y considerando que la pendiente de la superficie es pequeña y que  $z = 0$ :

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (14)$$

cuando  $z=0$

Condiciones de frontera cinemática en el fondo

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

cuando  $z=-d$

La solución a este set de ecuaciones se encuentra mediante el método de separación de variables:

$$\phi(x, z, t) = \frac{ag \cos[k(d+z)]}{\omega \cos[kd]} \cos(kx - \omega t) \quad (16)$$

El perfil en una superficie libre está dado por:

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z=0} \quad (17)$$

Al substituir (9) para  $\phi$  en la ecuación 10 y diferenciar respecto al tiempo:

$$\eta = a \sin(kx - \omega t) \quad (18)$$

Lo que indica que la superficie del agua varía de forma sinusoidal y periódica en espacio (longitud de onda) y tiempo (periodo).

Al combinar la ecuación 5 y 7 se obtiene:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{1}{g} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (19)$$

cuando  $z=0$

Sustituyendo la ecuación 9 en la 12 y evaluando para  $z=0$ :

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (20)$$

La ecuación anterior establece que existe una relación única entre  $\omega$ ,  $k$  y  $d$  o  $T$ ,  $\lambda$  y  $d$ . Y que, al conocer dos de los elementos anteriores es posible conocer el faltante; Esta es la llamada ecuación de dispersión, la cual es una característica importante en las ondas oceánicas, ya que, al ser dispersivas, la energía de la ola no viaja a la misma velocidad que el perfil de esta, además esta relación proporciona una base para definir la profundidad del agua. (Dean and Dalrymple 1984; Dhanak and Xiros 2016; Frigaard 2001; Neil and Hashemi 2018)

Tabla 8 Parámetros para definir profundidad de acuerdo con la teoría lineal

Aguas profundas	Intermedia	Somera
$kh \geq \pi$	$kh \geq \pi \leq \pi/10$	$kh \geq \pi/10$
$h \geq L/2$	$h \geq L/2 \leq L/20$	$h \geq L/20$

Además de la ecuación de dispersión, la teoría lineal proporciona información sobre otras propiedades del oleaje las cuales se resumen en la tabla siguiente

Tabla 9 Propiedades basadas en la teoría lineal

Perfil de onda	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[ \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$
Velocidad de fase	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right)$
Longitud de onda	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right)$
Velocidad de grupo	$C_g = n_c = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/L}{\sin \left( \frac{4\pi d}{L} \right)} L \right] C$
Velocidad de partículas Horizontal	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$
Vertical	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$
Aceleración de partículas Horizontal	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$
Vertical	$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$
Desplazamiento de partículas Horizontal	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta$
Vertical	$\xi = \frac{H}{2} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \cos \theta$
Presión en la superficie	$\rho = \rho g n \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$

Las ecuaciones de la tabla anterior pueden simplificarse con la ecuación de dispersión según la profundidad en la que se encuentren.

La figura siguiente muestra un resumen gráfico de los cambios que suceden a distintas profundidades, se observa que, en aguas profundas el oleaje no tiene efecto en el

movimiento de las partículas en toda la columna de agua, conforme disminuye la profundidad, la amplitud del movimiento elíptico de las partículas también decrece. Algunas características como celeridad, longitud de onda y altura permanecen constantes al estar en aguas profundas, al entrar en aguas intermedias, también llamadas transicionales, la longitud de onda y celeridad disminuyen mientras que la altura de ola aumenta y va aumentando su peralte, finalmente al entrar en aguas someras la ola rompe. (Pecher et al. 2017)

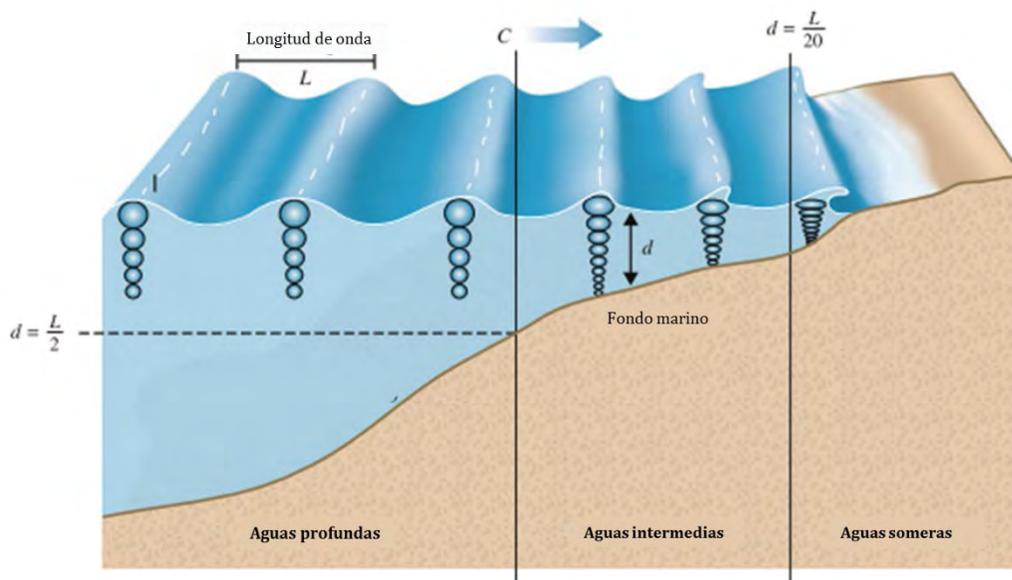


Figura 36. Movimiento de las partículas según profundidad

### ANEXO III. Obtención de datos

#### -Mediciones in situ

Corresponden a datos recolectados directamente en el sitio de estudio, los instrumentos para su medición pueden localizarse en la superficie, en el fondo o sobre la superficie atados a alguna plataforma, ejemplo de esto son:

Boyas: Proporcionan información sobre la variación tridimensional de la superficie del océano a través del tiempo, calculan la elevación de la superficie mediante la doble integración de la aceleración vertical.

Cables de resistencia y capacitancia: Se colocan de forma paralela y se encuentran aislados en sus extremos inferiores, de tal forma que se crea un circuito con el agua, la resistencia de este circuito se relaciona con la profundidad que los cables están sumergidos y por lo tanto con la elevación de la superficie libre.

Sensores de presión: Las fluctuaciones en los valores de presión están directamente vinculados con las variaciones en el nivel del mar, por lo que estos datos pueden ser tratados para obtener características del oleaje.

### **-Sistemas remotos**

A comparación de los instrumentos para mediciones in situ los sistemas remotos permiten cubrir mayor área y se basan en la recepción de la reflexión de la luz visible o infrarroja o energía de radar de la superficie del mar

Estereofotografía: Consiste en tomar fotografías desde un avión a una frecuencia alta en una misma área, la desviación angular de la posición aparente (parallax) en la superposición de fotografías puede convertirse a elevaciones.

Altimetría: Proporciona información sobre la distancia vertical que existe del instrumento a la superficie del océano, puede realizarse con láser, ecosondas o radares.

(Frigaard 2001; Holthuijsen 2007; Reddy 2001)

### **ANEXO IV. Modelos numéricos**

Surgen ante la necesidad de caracterizar las condiciones de oleaje de un sitio, para lo cual es necesario tener un set de datos robusto, lo que con instrumentación resultaría costoso en tiempo y dinero.

Actualmente existe una gran variedad de modelos de oleaje, los cuales se clasifican en dos categorías principales: modelos de resolución de fase, los cuales resuelven las ecuaciones fundamentales con aproximaciones rigurosas, además la resolución de la malla debe ser más fina que la longitud de onda, son adecuados para resolver fenómenos de radiación y difracción cuando la escala es pequeña ya que son muy demandantes computacionalmente. Por otro lado, están los modelos espectrales que

calculan la evolución del espectro en espacio y tiempo resolviendo la ecuación de balance de acción del oleaje (EBAO), estos modelos se utilizan cuando se quiere realizar modelar a amplia escala.

Ecuación de balance de acción del oleaje:

Generalmente los modelos de oleaje resuelven la evolución de la densidad de acción  $N = (\vec{x}, t, \sigma, \theta)$  en espacio y tiempo. La densidad de acción representa la energía del oleaje dividida por su frecuencia intrínseca y está dada por:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (21)$$

El cambio en la densidad de acción  $N$  en un punto en el espacio  $(\vec{x}, \sigma, \theta)$  se gobierna por la ecuación de balance de acción:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla x \cdot [\vec{Cg} + \vec{U}]N + \frac{\partial C_{\sigma}N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{\theta}N}{\partial \theta} = \frac{s_{tot}}{\sigma} \quad (22)$$

El primer término corresponde a la variación cinética del oleaje en el tiempo, el segundo representa la propagación de la energía del oleaje en el espacio geográfico en dos dimensiones, el tercero denota el efecto de las variaciones en frecuencia debido a los cambios en profundidad y corrientes medias, el cuarto representa la refracción inducida por la profundidad y la corriente, del otro lado de la igualdad se encuentra la parte no conservativa que representa a los procesos físicos que generan, disipan o redistribuyen la energía.

## **ANEXO V. Generación, propagación y transformación de oleaje**

Como ya se mencionó las olas se generan a partir de la transferencia de energía dada por la interacción de dos fluidos en contacto (viento y agua) que viajan a diferente velocidad, al sitio donde se da la transferencia de energía del viento a la superficie del océano se le conoce como fetch este junto con la intensidad y duración con la que sopla

el viento caracterizan el oleaje en la zona de generación, el cual es conocido como oleaje local y como se observa en la figura X genera una superficie caótica así como un perfil de elevación irregular, conforme las ondas se alejan de su lugar de generación tienden a formar grupos que resultan en una superficie organizada y un perfil de elevación un tanto regular, este tipo de oleaje conocido como distante o “swell” es del que comúnmente gozamos un día en la playa.

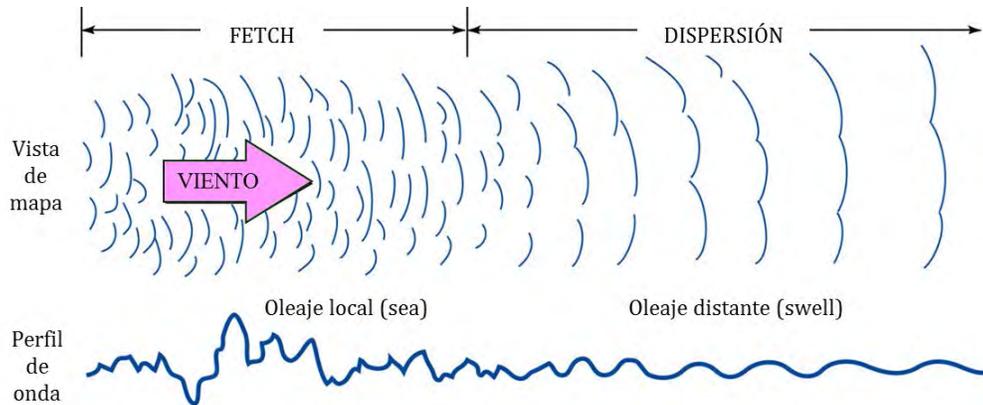


Figura 37. Esquema de generación y propagación de oleaje.

Sin embargo, esa no es la única modificación que sufre el oleaje en su camino.

-Interacciones no lineales (cuadrupletas): Consiste en la transferencia de energía de un componente a otro, para lograrlo se requiere que la suma de las frecuencias y de los números de onda de las olas que están interactuando sea igual a cero, esto resulta en una distribución conservativa de la energía (Holthuijsen 2007; Laing et al. 1998)

-Rompimiento en aguas profundas (“White-capping”): Este proceso no lineal involucra interacciones en un amplio rango de escalas espacial y temporal, conforme la ola crece llega un punto donde su relación altura, longitud de onda es tan grande hasta alcanzar un punto crítico donde rompe. (Holthuijsen 2007; Laing et al. 1998)

-Transformaciones en aguas someras:

Asomeramiento: Conforme disminuye la profundidad, la longitud de onda decrece, mientras que la altura de ola aumenta, como puede observarse en la figura siguiente.

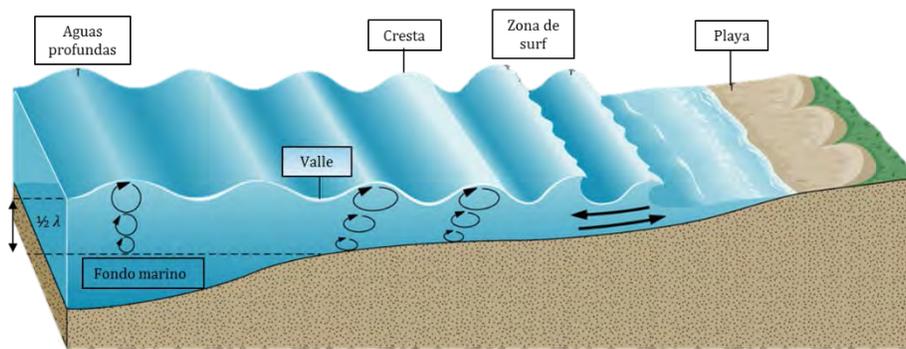


Figura 38. Corte transversal de la costa, tomada y modificada de McGrawHill

Este fenómeno puede describirse con la siguiente ecuación que relaciona la altura de ola a dos puntos de profundidad diferentes:

$$K_S = \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0 C_0}{n C}} \quad (23)$$

**Fricción de fondo:** Como se observa en la figura 37 las órbitas correspondientes al movimiento de las partículas se achatamos conforme disminuye la profundidad lo que resulta en una pérdida de energía (Bhattacharyya and McCormick 2003)

**Reflexión:** Al igual que la luz, cuando la ola se topa con un obstáculo, rebota conservando el ángulo con el que incidió.

**Refracción:** Este fenómeno ocurre cuando existe un cambio en la profundidad en la que viaja la onda, las que pasan a aguas someras disminuyen su velocidad, mientras que las que permanecen en aguas profundas la mantienen, lo que genera un cambio en la alineación de los frentes de ola que se vuelven paralelos a la costa, esto lleva a que, como se observa en la figura 38a) la energía tiene a concentrarse en superficies elevadas (Brooke 2003; Hall n.d.; Holthuijsen 2007; )

**Difracción:** Cuando la ola se encuentra con un obstáculo se ve obligada a cambiar de dirección, en la figura 38b) se ilustra como al encontrarse con el islote la dirección de

oleaje que en un principio era perpendicular a la línea de costa, cambia de dirección rodeando el islote.

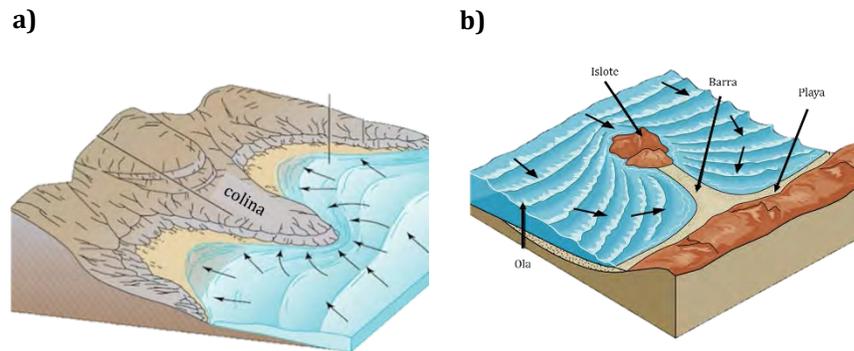


Figura 39. Esquemas de los procesos de refracción (a) y difracción (b)

Ambos procesos dependen directamente de los cambios en batimetría del sitio y generan un proceso de redistribución de energía.

## ANEXO VI. Matrices de potencia de los dispositivos evaluados

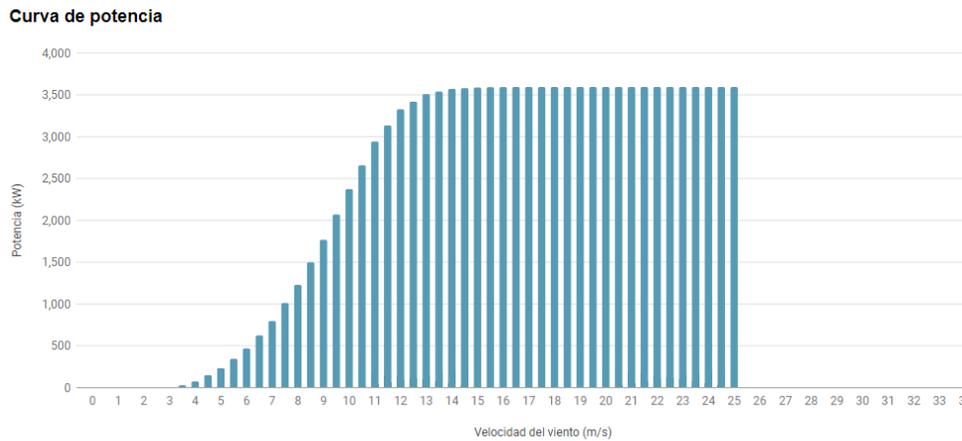


Figura 40 Curva de potencia del aerogenerador SG3.6MW-114 (Tomado de “windpower.net”)

Tabla 10 Matriz de potencia de Oyster 290, elaboración propia con información de EMEC

<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.5	0	0	0	0	0	0	1	3	3
1	20	30	38	42	44	44	45	47	45
1.5	80	85	92	97	102	103	104	100	104
2	140	147	152	158	155	155	160	161	156
2.5	192	197	208	202	203	209	211	201	204
3	241	237	237	241	243	230	236	231	235
3.5	0	271	272	269	268	267	270	260	260
4	0	291	290	290	280	287	276	278	277
4.5	0	291	290	290	280	287	276	278	277
5	0	0	290	290	280	287	276	278	277
5.5	0	0	290	290	280	287	276	278	277
6	0	0	290	290	280	287	276	278	277