



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio para el aprovechamiento de
energía marina en Cabo San Lucas,
Baja California Sur**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Víctor Mauricio de la Cruz Juárez

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dra. Valeria Chávez Cerón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradecimientos

A toda mi familia, especialmente a mis padres y mi hermano por su inconmensurable apoyo en todas las formas posibles.

A ti, Jad, mi ser más cercano en estos tiempos difíciles, por tu apoyo, fuerza e inspiración.

A mi directora de tesis por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados, así como al proyecto CEMIE – Océano por el apoyo económico recibido para la realización de este trabajo y durante mi servicio social.

Índice

Introducción	1
Justificación.....	2
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos particulares	3
1 Estado del arte	4
1.1 Fuentes de energía marina.....	4
1.1.1 Oleaje	4
1.1.2 Corrientes oceánicas.....	5
1.1.3 Gradiente térmico.....	6
1.1.4 Gradiente salino	8
1.1.5 Mareas	9
1.2 Recursos energéticos marinos en Baja California Sur	11
2 Descripción de la zona de estudio	14
2.1 Aspectos sociales.....	15
2.2 Aspectos ambientales.....	19
2.3 Geomorfología	21
3 Metodología	23
3.1 Caracterización del clima marítimo	23
3.1.1 Temporadas climáticas	24
3.1.2 Rosas de altura y periodo de ola.....	24
3.1.3 Parámetros estadísticos de altura de ola y periodo	25
3.1.4 Probabilidad conjunta altura contra periodo de ola y altura contra dirección de ola	26
3.2 Evaluación del recurso energético	28
3.2.1 Propagación local del oleaje	28
3.2.2 Valoración de la potencia del oleaje y alternativas de aprovechamiento	29
3.2.3 Alternativas tecnológicas para el aprovechamiento	31

4	<i>Resultados y discusión</i>	32
4.1	Clima marítimo	32
4.1.1	Temporadas Climáticas	32
4.1.2	Rosas de altura de ola y periodo.....	34
4.1.3	Parámetros estadísticos de altura de ola y periodo	39
4.1.4	Probabilidad conjunta altura contra periodo de ola y altura contra dirección de ola	44
4.2	Recurso energético del oleaje	46
4.2.1	Hidrodinámica local	46
4.2.2	Alternativas para aprovechamiento de la energía del oleaje.....	50
5	<i>Conclusiones y futuras líneas de investigación</i>	57
	<i>Referencias</i>	59
	<i>Anexos</i>	66
	Anexo 1: Clima marítimo	66
	Rosas de Altura de Ola y Periodo en años del Niño, de La Niña y neutros.....	66
	Parámetros estadísticos de altura de ola y periodo	82
	Probabilidad conjunta altura y periodo de ola 22.5 °N 109.5 °W	88
	Probabilidad conjunta altura y dirección de ola 22.5 °N 109.5 °W.....	94
	Anexo 2: Matrices de potencia de los convertidores de oleaje	95
	Anexo 3: Índice de tablas y figuras	96

Introducción

Las consecuencias del cambio climático ya son tangibles en territorio mexicano, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2020), el país ha promediado un incremento de alrededor de 0.85 °C por encima de la normal climatológica en los últimos 50 años. Los efectos de este fenómeno han resultado en desequilibrios ecosistémicos frenéticos, esto ha puesto en riesgo los derechos humanos, especialmente, de los grupos en situación de vulnerabilidad social, económica y ambiental, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2019).

México es parte de los 20 países más emisores del planeta, de acuerdo con la SEMARNAT (2020), se proyecta que en 2030 se emitirán 991 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO_{2e}) si no se implementan políticas de mitigación. En 2016, México ratificó los Acuerdos de París de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los cuáles tienen como objetivo “reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza” (ONU, 2015). El país se comprometió a reducir sus emisiones para el año 2030 en 210 MtCO_{2e} de manera no condicionada y 137 MtCO_{2e} extra si en este periodo se consolidan adecuadamente los mecanismos internacionales de transferencia tecnológica, recursos financieros de bajo costo, etc., según datos de la SEMARNAT (2020).

Una de las prioridades nacionales para cumplir las metas de mitigación, de acuerdo con la SEMARNAT (2020), es innovar permanentemente en sector energético para impulsar la presencia de las energías limpias en la red eléctrica nacional, mejores sistemas de almacenamiento y redes inteligentes. Ante este panorama, Hernández-Fontes et al (2019) reportan que las costas mexicanas tienen un gran potencial para aprovechar diversos tipos de energía marina, lo que significaría una seria alternativa al uso de combustibles fósiles. Para atender a las necesidades del avance en el estado del conocimiento del

aprovechamiento de la energía marina, en México se ha consolidado el apoyo a la investigación a través del proyecto CEMIE-Océano (Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano) del Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACYT, que dio inicio en 2017.

Justificación

Pasando del escenario nacional a uno local, la comunidad de Cabo San Lucas vive una condición muy particular en cuanto a suministro eléctrico se refiere. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), el 23% de la población de Baja California Sur (BCS) se encuentra en esta pequeña zona costera cuya principal actividad económica es el turismo. El auge del sector de servicios en las últimas décadas ha derivado en una creciente demanda de energía eléctrica, según datos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2020). Sin embargo, la ciudad de Cabo San Lucas no tiene una planta de generación eléctrica cercana. Este es uno de los principales motivos por los cuales se han presentado diversos apagones en la zona en años recientes.

El aprovechamiento de la energía marina tiene el potencial para contribuir a la solución del problema, una fuente de microgeneración eléctrica cercana ayudaría a satisfacer el consumo local de la comunidad. Por otro lado, el uso de la energía marina también contribuiría a la diversificación de la matriz energética del Sistema Baja California Sur (SBCS), ya que, de acuerdo con datos CFE (2020), todas las plantas de generación eléctrica de este sistema utilizan tecnologías que dependen totalmente de combustibles fósiles para operar.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el recurso energético del oleaje disponible en la zona costera de la ciudad de Cabo San Lucas, Baja California Sur, para identificar sitio(s) de aprovechamiento favorable y, posteriormente, analizar alternativas tecnológicas que permitan generar energía eléctrica.

Objetivos particulares

- Caracterizar el clima marítimo de la zona costera de Cabo San Lucas, Baja California Sur.
- Describir la hidrodinámica local para identificar el sitio(s) más favorable(s) para el aprovechamiento de la energía marina en la zona de estudio.
- Analizar alternativas de tecnologías existentes para aprovechamiento de la energía del oleaje en la zona de estudio.

1 Estado del arte

1.1 Fuentes de energía marina

1.1.1 Oleaje

Las olas, entre otros factores, son resultado de la interacción del viento con la superficie del mar. Es posible aprovechar la energía cinética o la potencial contenida en su movimiento para producir electricidad (Hernández-Fontes et al., 2019). La energía del oleaje, también llamada undimotriz, es una de las energías marinas renovables más prometedoras para ser aprovechadas a gran escala (García et al., 2018). De acuerdo con Hernández-Fontes et al. (2019), esta fuente de energía tiene el potencial para competir con los combustibles fósiles al ser una de las más abundantes en el mundo.

Las principales ventajas de la energía del oleaje son que es frecuente, su comportamiento es periódico y predecible, y fluye de manera natural desde el lugar donde se genera hasta la costa. Los dispositivos que aprovechan esta energía y la transforman en electricidad son conocidos como convertidores de energía del oleaje CEOs, también conocidos como WECs por sus siglas en inglés (*Wave Energy Converters*). Estos se clasifican por su ubicación de instalación respecto a la costa (*on-shore, nearshore y off-shore*) y por su sistema de captación de energía (García et al., 2018; Güereca et al., 2021).

Los diferentes sistemas de captación de energía que existen son: columna oscilante de agua, absorbedores puntuales, atenuadores y totalizadores, y de rebasamiento. El desempeño o rendimiento de los WECs depende marcadamente de la variabilidad temporal y espacial del estado de mar dominante, de su ubicación respecto a la costa, de la profundidad y características del fondo marino, etc. (García et al., 2018; Güereca et al., 2021).

De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER, 2017), los principales retos y necesidades tecnológicas para el aprovechamiento de la energía del oleaje en México a gran escala son: Desarrollar una base de datos nacional con información de variables del oleaje; evaluar a fondo el recurso energético en sitios con alto potencial; desarrollar dispositivos propios eficientes para las características de los sitios potenciales en México; y desarrollar protocolos de pruebas tanto de laboratorio como de campo para los dispositivos del oleaje.

1.1.2 Corrientes oceánicas

Las corrientes oceánicas son flujos continuos de agua en el océano moviéndose en una dirección específica (Hernández-Fontes et al., 2019). Las mareas, los vientos y los gradientes de densidad contribuyen de forma variable y dinámica a la generación de estas corrientes, sus características y su evolución (Magar et al., 2020). Su comportamiento es persistente, cercano a ser constante en el tiempo, lo que las podría convertir en una fuente de energía hidrocínética renovable significativa, de acuerdo con Hernández-Fontes et al. (2019). Sin embargo, comúnmente se presentan restricciones ambientales y socioeconómicas que representan una barrera para la conversión de este tipo de energía (Bárcenas et al., 2021).

Para aprovechar las corrientes oceánicas primero se debe identificar la disponibilidad y persistencia de energía hidrocínética, luego, se deben obtener los datos de un sitio (latitud, longitud, profundidad, periodo de tiempo) donde se haya calculado que puede haber un potencial energético significativo. Después, se debe tener suficiente información de la literatura acerca de las curvas de potencia de cada dispositivo generador de energía para poder compararlos y elegir el más adecuado. Las curvas de potencia varían en función de las características de diseño de las turbinas como la eficiencia del generador, los subsistemas de las turbinas y otras pérdidas de energía (Bárcenas et al., 2021).

De acuerdo con la SENER (2017), los principales retos y necesidades tecnológicas para el aprovechamiento de la energía de corrientes oceánicas en México son:

- Desarrollar un mapeo en el Canal de Yucatán y Golfo de California de la energía proveniente de las corrientes marinas.
- Desarrollar protocolos para evaluar el impacto ambiental de estos proyectos en las etapas de instalación, operación, mantenimiento y retiro de infraestructura.
- Disponer de materiales duraderos ante agentes marinos y la corrosión, de alta calidad y de bajo mantenimiento, así como, desarrollar protocolos de evaluación de este tipo de materiales resistentes a ambientes extremos.

1.1.3 Gradiente térmico

Hernández-Fontes et al. (2019) afirman que “la energía de gradiente térmico se produce cuando hay un intercambio de calor entre fluidos de diferente temperatura”. La tecnología que hace posible esta generación eléctrica recibe el nombre de Conversión de Energía Térmica Oceánica, conocida como OTEC por sus siglas en inglés (*Ocean Thermal Energy Conversion*). Las aguas superficiales de los mares son más cálidas que las de las profundidades debido a que los océanos retienen el 15% de la energía solar como calor (Garduño et al., 2017).

La tecnología OTEC emplea los ciclos termodinámicos de Rankine. Utiliza la diferencia de temperatura entre agua fría de las profundidades y agua tibia de la superficie para evaporar un fluido de trabajo, este a su vez hace girar turbinas para producir energía eléctrica (Güereca et al., 2021). Se debe tener un gradiente térmico de columna de agua (con profundidad de 1,000 m aproximadamente) mayor a 20 °C para una buena eficiencia de las OTEC (Garduño et al., 2017).

Las plantas OTEC pueden basar su operación en 3 tipos de ciclo de acuerdo con Garduño et al. (2017):

- Ciclo abierto: El agua marina es el fluido de trabajo. Este se somete a una bomba de vacío para evaporarla al disminuir su presión, luego, una turbina es impulsada por este vapor; produciendo así energía eléctrica mediante un generador. Después, el fluido se

dirige a un condensador para obtener agua líquida desalinizada a 15 °C, se utiliza agua fría de las profundidades como fluido refrigerante y se regresa al mar al cumplir su función. Con este ciclo es factible alcanzar una producción diaria de 1 MW a 10 MW de electricidad neta y de 1,700 m³ a 3,500 m³ de agua dulce en una planta de pequeñas dimensiones. Por otro lado, las principales desventajas son el costo del mantenimiento de los equipos por la corrosión y que se consume entre el 20% y 30% de lo generado durante los procesos de bombeo.

- Ciclo cerrado: Se utilizan compuestos con bajo punto de ebullición (amonio, propano freón, etc.) como fluido de trabajo, el cual pasa a un evaporador. Con el agua marina superficial tibia se efectúa un intercambio de calor para vaporizar el fluido de trabajo y mover la turbina. Posteriormente, el agua fría de las profundidades es empleada para condensar el fluido de trabajo, se recupera en forma líquida y se bombea nuevamente al evaporador para cerrar el ciclo. La diferencia fundamental respecto al ciclo abierto es que en el cerrado el agua marina nunca se evapora; no se obtiene agua dulce como un producto del proceso. Entre sus ventajas destaca que se corroen en menor medida los equipos y que se puede generar más electricidad con plantas de menor tamaño.
- Ciclo híbrido: Junta características de los ciclos anteriores para aprovechar sus ventajas. Para iniciar el ciclo, se evapora agua de mar de la superficie, como en el ciclo abierto. El calor del vapor resultante de este proceso se utiliza para vaporizar el fluido de trabajo. Al igual que en el ciclo cerrado, se utilizan fluidos no corrosivos y de bajo punto de ebullición como fluido de trabajo (encargado de mover la turbina), este se condensa al final para ser utilizado nuevamente. Por otro lado, el vapor proveniente del agua de mar se condensa después de cumplir su función para obtener agua desalinizada.

De manera general, las plantas OTEC cuentan con un rango de operación entre 20 kW a 100 MW. Actualmente, no hay plantas OTEC comerciales funcionando ya que la mayoría de los proyectos son piloto (Güereca et al., 2021). Se espera que en 2030 ya se encuentren tecnologías comercialmente disponibles (Garduño et al, 2017).

De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER, 2017), los principales retos y necesidades tecnológicas para el aprovechamiento de la energía de gradiente térmico son: Elaborar un mapa nacional de energía de gradiente térmico; desarrollar nuevas tecnologías de materiales para tuberías y equipos, fluidos de trabajo, almacenamiento y transmisión de energía; y desarrollar protocolos de evaluación de materiales, fluidos y dispositivos para las tecnologías de gradiente térmico.

1.1.4 Gradiente salino

Cuando se mezcla un fluido con baja salinidad como el agua de un río con un fluido de alta concentración salina como el agua de mar se libera energía del gradiente salino (SGE). Los dispositivos adecuados pueden convertir este fenómeno en energía eléctrica (Hernández-Fontes et al., 2019). De acuerdo con Marín et al. (2020), “se estima que aproximadamente 2.3 MJ se liberan en forma de calor cuando un metro cúbico de agua de río ingresa al mar”.

Actualmente, los proyectos de este tipo se encuentran en etapas tempranas. Para utilizar este tipo de energía es necesario fabricar pilas segmentadas y separadas por membranas de intercambio iónico. Los estudios sobre SGE se están enfocando en buscar mejores técnicas y materiales para aumentar la competitividad y viabilidad de estas tecnologías (Güereca et al., 2021; Marín et al., 2020).

Marín et al. (2020) indican que existen diferentes tipos de proceso con los que se puede extraer la SGE:

- Procesos de intercambio iónico: El transporte de cationes y aniones es el mecanismo que se encarga de disminuir el cambio de concentración en las corrientes con distinta salinidad. Además, el método puede requerir o no membranas.
- Procesos osmóticos: El transporte de un disolvente (agua) es el mecanismo que se hace cargo del cambio en la concentración salina de dos soluciones. Una membrana

osmótica separa las soluciones; se presenta un transporte de agua de la solución diluida a la solución concentrada provocado por el potencial químico entre ambas.

- Procesos de mezcla directa: No se utilizan membranas ya que la solución disolvente y los iones de ambas masas de agua son mezclados directamente.
- Procesos de adsorción y desorción: Primero se suprime el disolvente de una corriente de agua por medio de materiales de absorción, luego, se deposita en la otra mediante desorción.
- Procesos basados en la diferencia de presión de vapor: Ambas corrientes de agua son evaporadas en cámaras individuales. La presión de vapor de la corriente de alta salinidad es menor que la de la corriente de baja salinidad. Se coloca una turbina entre ambas y se deja fluir el vapor para generar energía eléctrica.

De acuerdo con la SENER (2017), los principales retos y necesidades tecnológicas para el aprovechamiento de SGE en México son: Desarrollar un mapa nacional de energía de gradiente térmico; elaborar protocolos de evaluación de materiales, fluidos y dispositivos para las tecnologías de SGE; elaborar metodologías para que los dispositivos de gradiente térmico se puedan escalar; y desarrollar nuevos materiales para membranas de separación.

1.1.5 Mareas

El aprovechamiento de las corrientes de marea y las oceánicas es muy parecida, la diferencia principal es que las corrientes de mareas no siempre fluirán en la misma dirección a lo largo del tiempo; los dispositivos que aprovechen este tipo de energía deben poder adaptarse a este cambio de dirección (Güereca et al., 2021). Estos dispositivos emplean la energía cinética del agua en movimiento para hacer girar turbinas, las cuales son conceptualmente similares a las turbinas utilizadas para captar energía eólica (Mejía-Olivares et al., 2020).

La energía cinética de una corriente está definida por la velocidad total con la que se mueve la corriente a través de un eje horizontal (Mejía-Olivares et al., 2020). Las turbinas para la explotación de este tipo de energía están formadas por paletas sujetas a un buje formando un rotor, una caja de máquinas y un generador. Estos dispositivos tienen un sistema de sujeción de gravedad, apilados o flotante. La energía producida es enviada a tierra a través de cables (Güereca et al., 2021).

Por otro lado, también es posible aprovechar la energía potencial que existe entre dos masas de agua a diferente nivel durante la subida y bajada de la marea a través de un área embalsada (Mejía-Olivares et al, 2020). De acuerdo con López-González et al. (2009), una instalación mareomotriz de este tipo puede operar (pasar el agua por turbinas) cuando la marea está entrando, saliendo y en ambos sentidos, utilizando alguno de los siguientes modos de operación:

- Modo de flujo: La energía eléctrica se genera cuando el flujo de agua es del mar hacia el embalse, es decir cuando la marea está ascendiendo y el embalse tiene un nivel inferior al de la marea.
- Modo de reflujos: Cuando la marea asciende, se abren unas compuertas para que entre agua al embalse hasta alcanzar su nivel máximo. Cuando la marea desciende, el flujo de agua se produce del embalse hacia el mar pasando por las turbinas.
- Modo de flujo y reflujos: Se utiliza una combinación de ambos modos para aprovechar el ascenso y descenso de la marea en la generación eléctrica.

De acuerdo con la SENER (2017), los principales retos y necesidades tecnológicas para el aprovechamiento de la energía de corrientes oceánicas en México son: Elaborar un mapa nacional de la energía mareomotriz; identificar sitios factibles y cuantificar la energía aprovechable de acuerdo a las condiciones específicas de cada lugar; y desarrollar protocolos para evaluar el impacto ambiental de este tipo de proyectos.

1.2 Recursos energéticos marinos en Baja California Sur

En años recientes, diversos autores han realizado estudios para evaluar el potencial de los recursos energéticos marinos presentes en Baja California Sur. En 2018, García et al. hicieron una investigación para encontrar los mejores lugares para ser explotados con tecnología OTEC en las costas del Océano Pacífico mexicano. Se enfocaron en lugares que tuviesen un gradiente térmico (TG por sus siglas en inglés) mayor a los 20 °C y que estuviesen a menos de 10 km de la costa. Sus resultados señalaron que en la zona sur de la península de BCS, cerca de la zona de Los Cabos, existen áreas con un TG de 20 °C a 23 °C. Los autores destacaron que estos lugares tienen la ventaja de estar muy cerca de ciudades con alta demanda de electricidad, aire acondicionado y agua desalinizada, además de tener sitios de gran profundidad (más de 1000 m) cercanos a la costa. Sin embargo, el estudio concluyó que estos sitios presentan un TG inadecuado (menor a 20 °C) durante una parte significativa del año (principalmente durante el invierno). Aun así, los investigadores afirmaron que otras aplicaciones, como el uso del agua fría, podrían ser de gran interés.

Mejía-Olivares et al. realizaron un trabajo en 2018 cuyo objetivo fue evaluar el recurso energético de corrientes de marea en el GC. Los investigadores encontraron cuatro sitios donde la velocidad de las corrientes excedía 1.0 m/s, esto ocurre en el canal entre las islas de San Lorenzo y San Esteban, en el canal formado entre la península de Baja California y la isla de San Lorenzo, en el canal definido por las islas de San Esteban y Tiburón, y en el canal Ballenas al norte del área de estudio. En este estudio, los investigadores tampoco reportan haber encontrado sitios con potencial significativo en la zona del GC perteneciente a BCS. Consecuentemente, para su siguiente estudio a principios de 2020, Mejía-Olivares et al. evaluaron el recurso aprovechable teórica y técnicamente de la energía potencial de las mareas, pero enfocándose solamente en la zona norte del GC. Los autores reportaron que en las cercanías del golfo de Santa Clara y la bahía de San Felipe se presenta un rango aprovechable de hasta 8 m. A finales de 2020, Mejía-Olivares et al. realizaron un último estudio en la zona para estudiar cómo afecta la elección de la información batimétrica en

la cuantificación del recurso energético de las corrientes marinas en el GC. Los investigadores concluyeron que el recurso energético es mayor cuando se utiliza información batimétrica de mayor resolución.

Magar et al. realizaron un estudio en 2020 donde analizaron las velocidades máximas de las corrientes de marea durante la primavera, las densidades de energía mareomotriz (TPD por sus siglas en inglés) medias anuales y la producción potencial de energía anual en las áreas del océano Pacífico de BCS y el golfo de California. Los autores concluyeron que existen dos zonas al norte golfo de California (GC) con TPD medias anuales de 141 W/m^2 a 173 W/m^2 . Sin embargo, los investigadores no reportan haber encontrado sitios con potencial significativo al sur del GC ni en el Pacífico de BCS.

Por parte de la energía del oleaje, García et al. realizaron un estudio en 2018 para evaluar el desempeño de diferentes WECs para satisfacer un esquema eléctrico descentralizado en la región de Todos Santos, BCS. Primero evaluaron la disponibilidad de la energía, su variabilidad espacial y temporal. Después, cuantificaron la capacidad extractiva de 7 WECs diferentes, los cuales cuentan con distintos sistemas de captación y distintos rangos de operación. Los investigadores concluyeron que el área de estudio presenta varios lugares adecuados para la extracción de energía. Reportaron que los valores más comunes de altura de ola significativa (H_s) y de periodo pico (T_p) son 0.75 m a 1.25 m y 12 s a 14 s respectivamente. Los dispositivos Wave-Dragon y Pelamis fueron los que tuvieron mayor capacidad extractiva en su rango de operación, sin embargo, Pelamis fue el más eficiente y mejor adaptado a las condiciones de oleaje locales.

En su estudio de 2022, Ventura et al. analizaron las características de la energía del oleaje de la costa del océano Pacífico en la península de Baja California para identificar sitios de costa rocosa factibles para su aprovechamiento. En el estudio únicamente se tomaron en cuenta dispositivos con tecnología de columna de agua oscilante ya que presentan grandes ventajas en este tipo de costas. Los autores concluyeron que el valor promedio de energía

del oleaje a lo largo de toda la zona de estudio fue menor a los 20 kW/m desde 1979 hasta 2018. Sin embargo, reportan que a lo largo de 370 km sería viable instalar dispositivos de generación de energía cercanos a la costa para, potencialmente, proveer de servicio eléctrico a 1.4 millones de habitantes de asentamientos cercanos a la costa, muchos de los cuales no están conectados a la red eléctrica. Los investigadores también reportaron que los valores más altos de energía están principalmente al norte de la península pero en el sur también hay algunos sitios potenciales interesantes.

Tomando en cuenta los resultados de los estudios citados en esta sección, del grupo de energías marinas, la energía undimotriz es la más prometedora para ser aprovechada en Baja California Sur.

2 Descripción de la zona de estudio

La zona costera de la ciudad de Cabo San Lucas está ubicada en la delegación que lleva el mismo nombre y que pertenece al municipio de Los Cabos en el estado de Baja California Sur, México. Como polígono de estudio para el análisis del aprovechamiento potencial de energía del oleaje, se definió dentro de la zona un área de 7 km de largo por 3 km de ancho, la cual va desde las coordenadas $22^{\circ}51'59.29''$ N hasta $22^{\circ}53'34.22''$ N y de $109^{\circ}57'23.04''$ W hasta $109^{\circ}53'19.10''$ W (Figura 1).

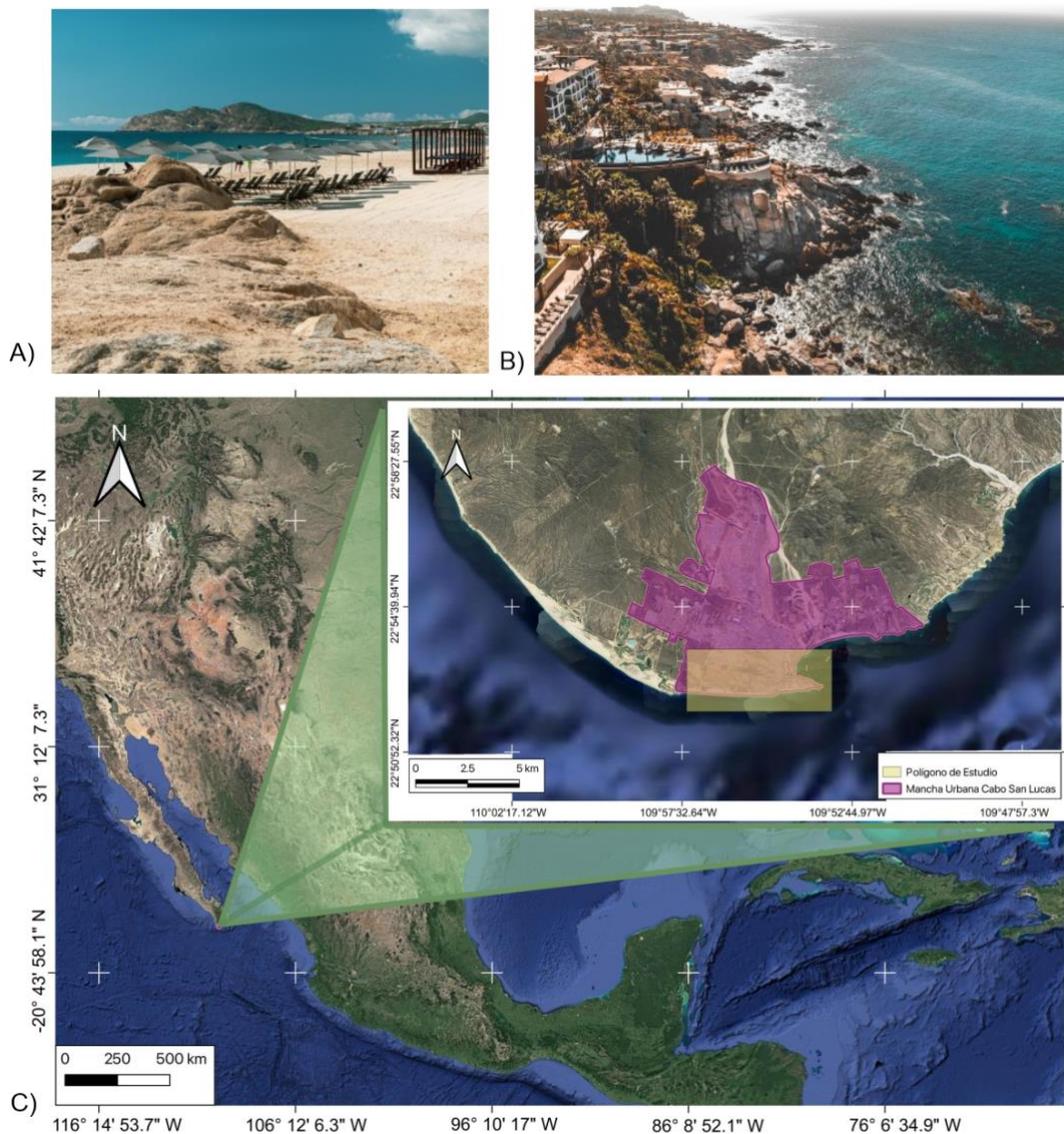


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en Cabo San Lucas, Baja California Sur, México. .
A) y B) fotografías tomadas de Unsplash; C) Ubicación

2.1 Aspectos sociales

El desarrollo demográfico del estado de Baja California Sur se ha focalizado drásticamente en las últimas décadas, actualmente, los municipios de La Paz y Los Cabos concentran al 80.58% de la población total del estado. El municipio de Los Cabos tiene 3,751.5 km² de superficie, cuenta con 351,111 habitantes, 101,934 viviendas particulares habitadas y un promedio de 3.4 ocupantes por vivienda según el censo de población y vivienda 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Esto significa que el 44% de la población total de Baja California Sur está concentrada en tan solo el 5.02% de su territorio.

Este fenómeno se acentúa dentro del propio municipio de Los Cabos. De acuerdo con el plan de desarrollo municipal 2018-2021, más del 90% de la población del municipio se encuentra en las localidades urbanas de San José del Cabo y Cabo San Lucas. De manera general, se puede decir que aproximadamente el 23% de la población total de Baja California Sur está concentrada en la pequeña ciudad costera de Cabo San Lucas. En la Figura 2 se muestra la pirámide poblacional del municipio.

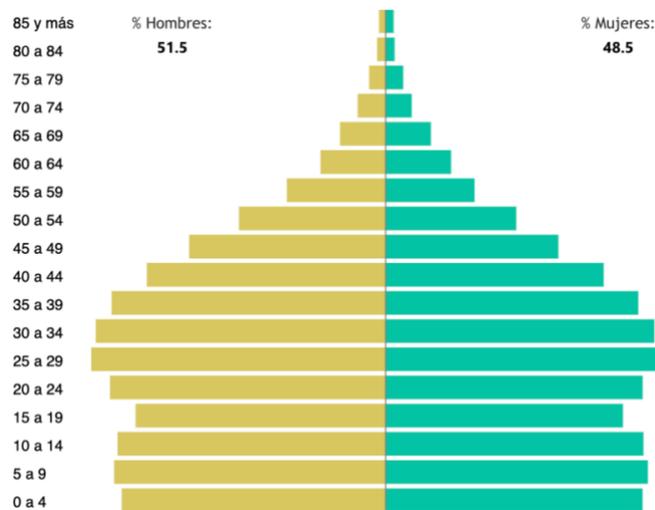


Figura 2. Pirámide poblacional del municipio Los Cabos, BCS. INEGI (2020)

El turismo es la actividad económica por excelencia en Cabo San Lucas. De acuerdo con el gobierno del municipio, para 2015, en los hoteles y restaurantes laboraba el 36.3% de la

población; el 26.3% lo hacía en el comercio; 12.9% en transporte y servicios y el restante 24.5% en otras actividades. Esta es una tendencia presente para todo el estado de Baja California Sur, donde el sector terciario aportó hasta el 72% de PIB en 2015 de acuerdo con el gobierno del estado, dejando al sector secundario y primario con 23% y 5% respectivamente.

De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER, 2016), el municipio de Los Cabos por sí mismo consume el 44% del consumo total del estado de Baja California Sur, esto es un indicador más de la relevancia que tiene esta zona. La energía es indispensable para que esta región pueda impulsar su actividad económica predominante, prueba de ello es que en promedio se necesitan 0.3157 kWh de energía para producir un dólar del PIB municipal, lo que no es un valor para nada bajo comparado con otras ciudades del país.

Es importante recalcar que, a diferencia del resto del país, la población de Baja California Sur recibe el servicio eléctrico mediante dos sistemas eléctricos aislados e independientes, Mulegé provee el servicio a la parte norte del estado mientras que el sistema Baja California Sur se ocupa de la parte sur. Estos sistemas están separados del Sistema Interconectado Nacional (SIN) por lo que cada uno está obligado a generar su propia energía eléctrica para satisfacer la demanda del servicio.

La ciudad de Cabo San Lucas es abastecida de energía eléctrica por el sistema Baja California Sur, el cual tiene una capacidad neta de 693 MW, de lo cuales 638 MW los provee la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y 55 MW están a cargo de empresas privadas. La parte de CFE está constituida principalmente por las centrales eléctricas de la Tabla 1, de acuerdo con datos de 2020 de CFE. Se puede observar que solo se genera energía mediante diésel, gas natural y combustóleo.

Tabla 1. Centrales eléctricas CFE en el sistema de Baja California Sur (CFE 2020)

Centrales CFE	Tecnología	Capacidad neta (MW)
CT Punta Prieta	Central termoeléctrica	104
TG Los Cabos	Turbogás	84
Los Cabos UME	Combustión interna	74
TG La Paz	Turbogás	25
TG Constitución	Turbogás	28
CI BCSI	Combustión interna	188
CI San Carlos	Combustión interna	93
BCS UME	Combustión interna	26
TG Los Cabos UME 12	Combustión interna	17
Total		638

En la Figura 3 se muestra que la demanda de energía eléctrica en el sistema de Baja California Sur seguirá creciendo drásticamente durante los siguientes años según proyecciones de CFE.NO

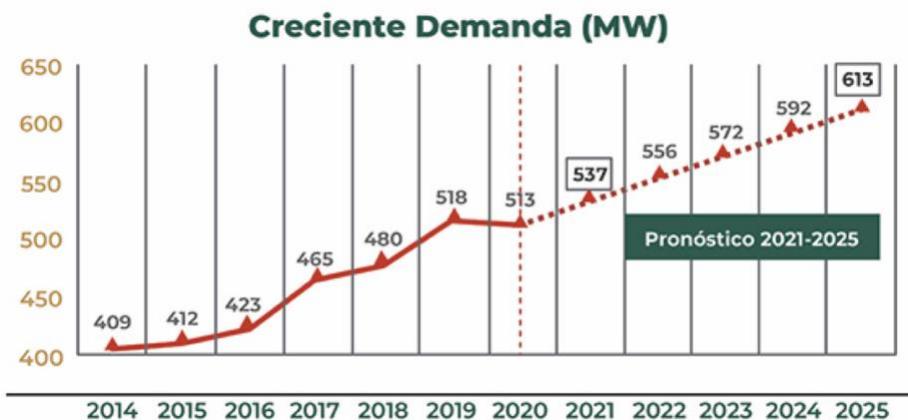


Figura 3. Demanda de energía eléctrica en MW del sistema de Baja California Sur 2014-2025 (INEGI 2020)

La capacidad neta del sistema es mayor a la demanda esperada actual, sin embargo, de acuerdo con datos de la CFE, se registraron 31 apagones en este sistema de 2016 a 2020. Esto se debe a que la capacidad de generación instalada se ve superada por la demanda en distintos puntos de la red, a la poca flexibilidad operativa al utilizar diésel y combustóleo y a la falta de mantenimiento de las centrales, provocando indisponibilidad.

La localidad urbana de Cabo San Lucas recibe energía eléctrica principalmente desde la planta termoeléctrica de Punta Prieta en la ciudad de la Paz. La ciudad padece de una dependencia energética ya que no cuenta con una fuente de generación eléctrica cercana. La CFE tiene dos subestaciones eléctricas operando en la ciudad, estas ayudan a transformar los niveles de tensión, facilitando el transporte y la distribución de la energía.

A continuación, se muestra la mancha urbana de Cabo San Lucas y la ubicación del polígono de estudio para analizar la zona costera más cercana a este importante centro de consumo (Figura 4).

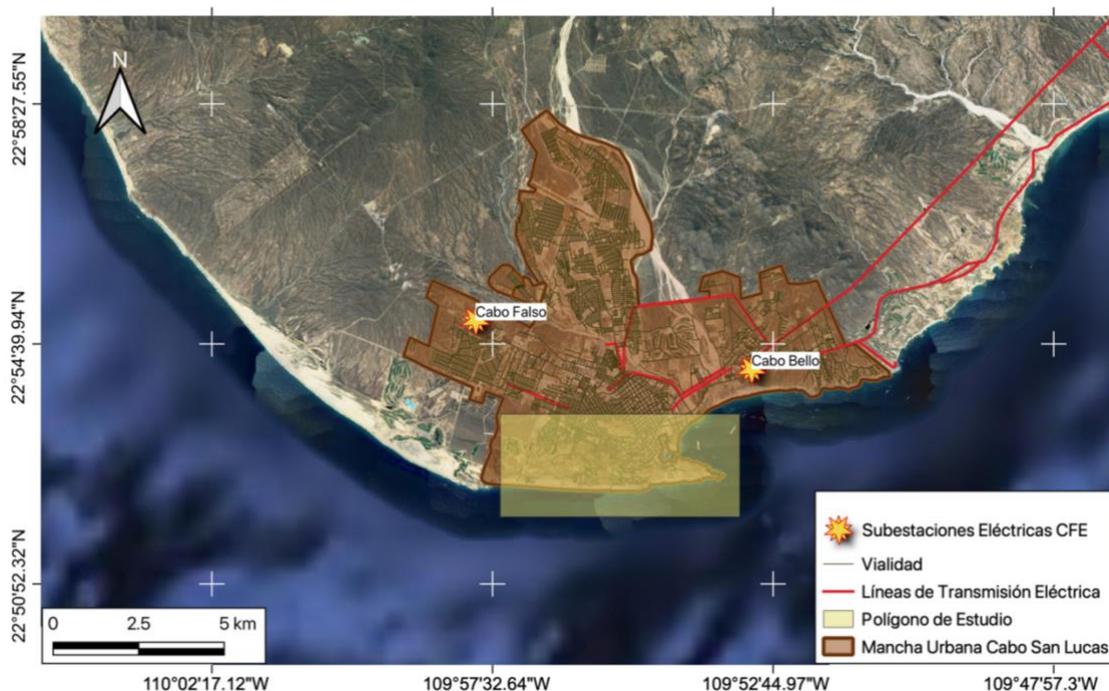


Figura 4. Cabo San Lucas, subestaciones eléctricas CFE y líneas de transmisión eléctrica, coordenadas geográficas (imagen modificada de Google Earth)

2.2 Aspectos ambientales

En el extremo este de la zona de estudio se encuentra el Área de Protección de Flora y Fauna Bahía de Cabo San Lucas (APFFCSL), en 2001 se le dio esta clasificación (Figura 5). El APFFCSL cuenta con una superficie total de 3996.04 ha. de acuerdo con la Comisión Nacional de Aguas Protegidas (CONANP). Los límites del APFFCSL están definidos por el polígono de rectángulo perfecto trazado por las coordenadas $22^{\circ} 54''$ N, $22^{\circ}50' 50''$ S; $109^{\circ}54'$ O y $109^{\circ}50'$ E. Esta zona destaca por su belleza natural y por su biodiversidad. Ha sido nombrada como parte del patrimonio mundial por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) desde 2005.

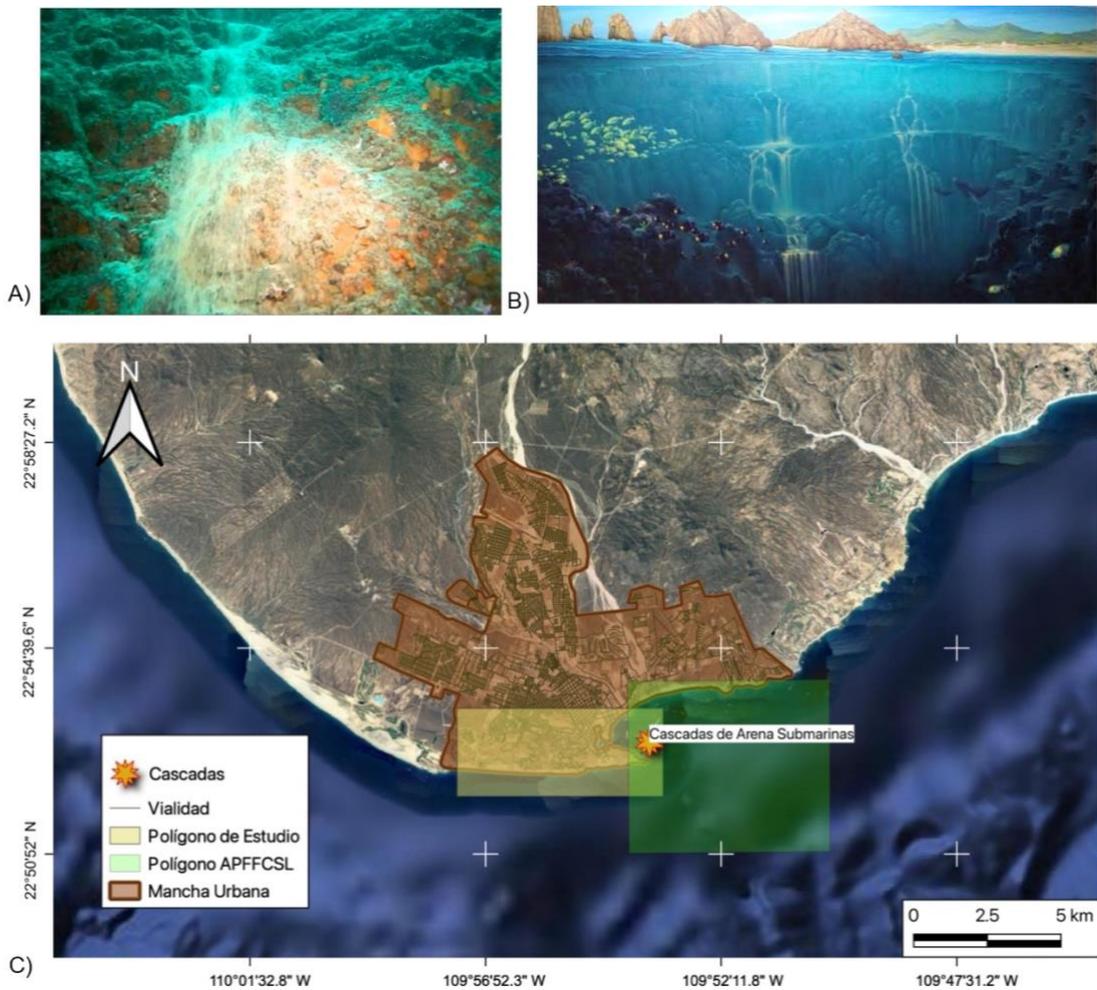


Figura 5. A) Foto de las CAS (BCS Noticias, 2017); B) Ilustración de las CAS (Silva et al. 2017); C) Ubicación de las CAS y el APFFCSL coordenadas geográficas (imagen modificada de Google Earth)

De acuerdo con Moctezuma (2021), la zona fue declarada como Área Natural Protegida por decreto presidencial desde el 29 Noviembre de 1973 al ser considerada como un refugio submarino de flora, fauna y condiciones ecológicas del fondo. Para que esto fuera posible fue indispensable el descubrimiento de las espectaculares cascadas de arena submarinas (CAS) en 1959 por Francis Shepard.

Silva et al (2017) reporta que las CAS están ligadas a la presencia de un enorme cañón submarino y se dan gracias a un fenómeno de transporte activo de sedimentos muy complejo y único en el mundo. Las corrientes de gravedad son las responsables del transporte de sedimentos que da vida a las CAS, estas corrientes son resultado de los procesos hidrodinámicos y sedimentarios que se generan cerca de la entrada o de la “cabeza” de cañones submarinos. Es así como la presencia o ausencia de estos cañones determina los caminos y condiciones de propagación de las aguas en cascada.

Moctezuma (2021), también recalca que para la preservación de las CAS y de su belleza natural, se establecieron ciertas restricciones en la zona por decreto presidencial. El área debe estar libre de explotación pesquera para conservar el ecosistema y la belleza del lugar. Además, está prohibido anclar embarcaciones, arrojar sustancias tóxicas o nocivas a las especies, usar explosivos o abandonar desperdicios de pesca en las playas adyacentes a dicha zona.

2.3 Geomorfología

La zona de estudio está conformada por costa de tipo rocosa (Figura 6), la cual tiene playa en prácticamente toda la línea de costa. De acuerdo con la Secretaría de Turismo (SECTUR, 2017), las playas localizadas en esta zona costera presentan una pendiente de 10 %, amplitud de 45 a 50 m y una altura media de 2.5 m.

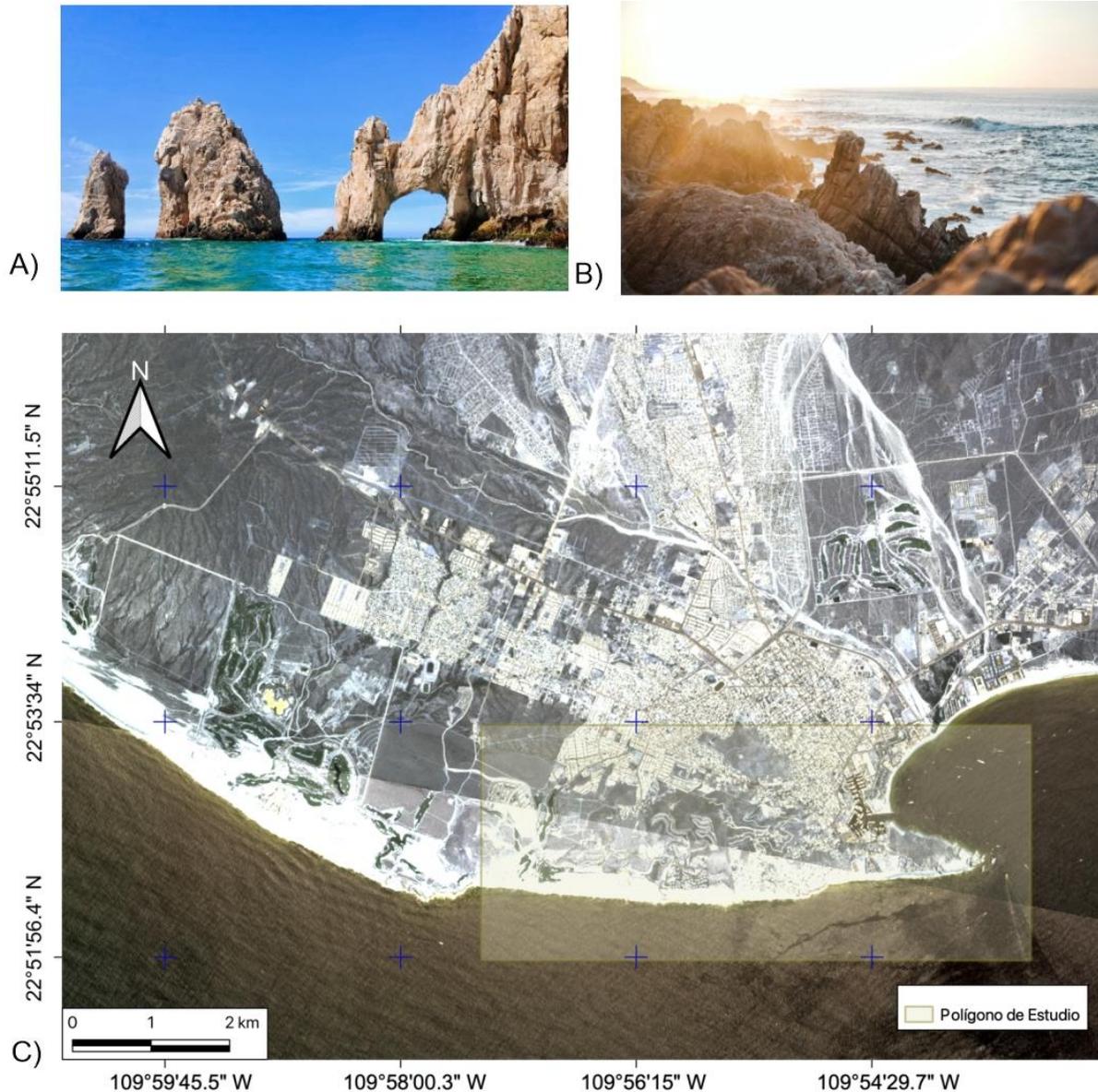


Figura 6. A) y B) Costa rocosa en la zona de estudio (fotografías tomadas de Unsplash); C) Imagen Satelital de la zona de estudio tomada el 4 de Junio de 2021, coordenadas geográficas

Se reporta que los sedimentos de las playas de la zona están compuestos en su mayoría por arenas gruesas (65%) y arenas muy gruesas (29%). Estas presentan una composición de tipo feldsarenítica, de acuerdo con la clasificación mineralógica de arenas (Folk, 1973), lo cual indica que existe una fuente cercana de sedimentos con condiciones de alta energía.

Al Este del polígono de estudio se encuentra la icónica bahía Cabo San Lucas (ver Figura 6), esta formación costera provee una enorme protección contra el oleaje a la parte interior de la bahía. De acuerdo con el estudio de Cruz et al (2019), toda la zona costera del sitio de estudio está clasificada con un grado de antropización alto.

3 Metodología

3.1 Caracterización del clima marítimo

Utilizando los datos del reanálisis atmosférico ERA5 (Copernicus, 2020), se realizó la caracterización de las variables del clima marítimo para la zona de estudio, utilizando datos horarios de altura de ola significativa, periodo pico de ola y de dirección del oleaje de 1979 a 2019. Dado que para las variables de oleaje el modelo cuenta con una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, se analizaron los datos de los cuatro nodos más cercanos a Cabo San Lucas. En la Figura 7 se muestran el polígono de estudio y nodos analizados.

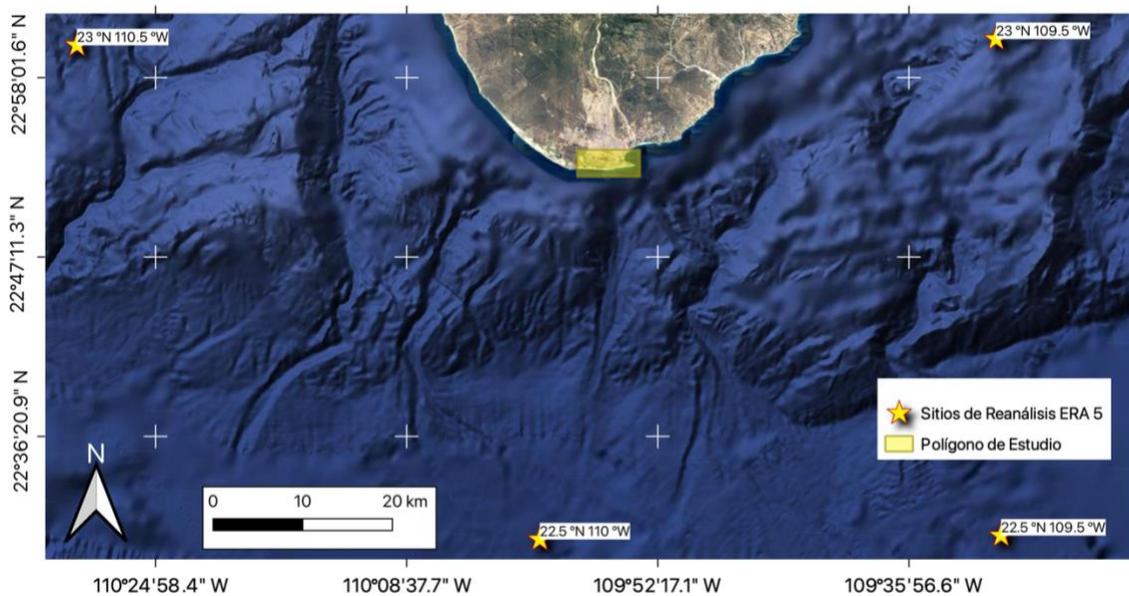


Figura 7. Ubicación de los puntos de reanálisis numérico, coordenadas geográficas, (imagen modificada de Google Earth)

Se hizo una distinción entre los datos en años del Niño y de La Niña para compararlos con los obtenidos en los años en que no se presentaron estos fenómenos (años neutro). Con base en la información obtenida del sitio web del *National Weather Service* de los Estados Unidos de América, los años de 1979 hasta 2019 se clasificaron como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución de años del Niño y de La Niña

Años del Niño	Años de La Niña	Años Oleaje Neutro
1979, 1980, 1982, 1983, 1986, 1987, 1991, 1992, 1994, 1995, 1997, 1998, 2002, 2004, 2005, 2006, 2009, 2014, 2015 y 2019	1984, 1985, 1988, 1989, 1996, 1999, 2000, 2001, 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2016, 2017 y 2018	1981, 1990, 1993 , 2003 y 2013

3.1.1 Temporadas climáticas

De acuerdo con Cervantes (2011) la temporada climática es la condición típica de la atmósfera o de presencia de un fenómeno meteorológico que ocurre en un periodo de meses.

Para definir las temporadas climáticas (TC) de interés en Cabo San Lucas se tomó en cuenta la precipitación promedio a lo largo del año. Estas variables se obtuvieron a partir de datos climáticos diarios del Climate Computing Project (CLICOM) del SMN a través de su plataforma web (<http://clicom-mex.cicese.mx>) y del estudio realizado por Troyo et. al. (2014).

3.1.2 Rosas de altura y periodo de ola

A partir de los datos de ERA5, se realizaron rosas de altura y periodo de ola para los 4 puntos de reanálisis considerados en el presente trabajo.

Estas se realizaron para el periodo de análisis completo y para cada una de las temporadas climáticas identificadas. Además, para cada caso se realizaron rosas distinguiendo entre años donde se presentaron los fenómenos del Niño y La Niña.

3.1.3 Parámetros estadísticos de altura de ola y periodo

Se utilizó el lenguaje de programación Python 3 para obtener los parámetros estadísticos de altura de ola y periodo de los datos de los cuatro nodos de ERA5 considerados en este trabajo, con base en la teoría descrita por Silva (2005):

- Altura de ola media

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

donde

- N_0 es el número de datos de reanálisis considerados para el cálculo
 - H_i son los valores de altura de ola
- Altura de ola cuadrática media

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

- Altura de ola máxima

La altura de ola más grande registrada en el periodo de análisis

- Altura de ola un medio

Se realizó el promedio del 50% de las olas más altas

- Altura de ola significativa

Se obtuvo el promedio del 33% de las olas más altas

- Altura de ola un décimo

Se realizó la media aritmética del 10% de las olas más altas

- Altura de ola un centésimo

Se obtuvo el promedio del 1% de olas con mayor altura

- Altura de ola un milésimo

Se realizó la media aritmética del 0.1% de las olas con mayor altura

- Periodo de ola media

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \dots (3)$$

donde

- T_i refiere a cada uno los valores de periodo de ola
- Periodo de ola máximo

El periodo de ola más grande registrada en el periodo de análisis

- Periodo de ola un medio

Se obtuvo la media aritmética de los periodos asociados al 50% de las olas más altas del registro

- Periodo de ola significativo

Se realizó el promedio de los periodos de ola asociados al 33% de las olas más altas del registro

- Periodo de ola un décimo

Se obtuvo el promedio de los periodos asociados al 10% de las olas con mayor altura

- Periodo de ola un centésimo

Realizó la media aritmética de los periodos de ola asociados al 1% de las olas más altas

- Periodo de ola un milésimo

Se obtuvo el promedio de los periodos asociados al 0.1% de las olas más altas del registro

3.1.4 Probabilidad conjunta altura contra periodo de ola y altura contra dirección de ola

En esta sección fue requerido estudiar dos variables aleatorias continuas conjuntamente distribuidas. De acuerdo con Devore J. (2008), la probabilidad de que el valor observado de un par de variables aleatorias continuas X y Y quede en un conjunto de dos dimensiones se puede representar como un rectángulo, el cual es el resultado de integrar una función llamada función de densidad conjunta.

Se utilizó esta representación de la probabilidad conjunta como rectángulos, cada conjunto de dos dimensiones fue representado en una sola gráfica junto con su probabilidad. Sin embargo, no se utilizó la función de densidad conjunta para obtener las probabilidades, en su lugar, simplemente se dividió el número de casos favorables entre el número total de casos para cada evento analizado.

Se utilizó el lenguaje de programación Python 3.0 para analizar los 359400 datos horarios de ERA5 desde 1979 hasta 2019, obteniendo la probabilidad conjunta de altura de ola y periodo de ola, y la probabilidad conjunta de dirección de ola contra potencia del oleaje, por temporada climática. Además, para cada temporada se hizo una comparación entre años en los que se presentó el fenómeno del Niño, de La Niña o años neutros. Este análisis se realizó únicamente para la locación de reanálisis más representativo para la zona de estudio.

.

3.2 Evaluación del recurso energético

3.2.1 Propagación local del oleaje

Se realizó una malla digital georreferenciada con base en datos de batimetría tomados de las cartas náuticas de Cabo San Lucas, B.C.S. y de Bahía de San Lucas realizadas en 2012 por la Secretaría de Marina (SEMAR). Además, se incluyeron datos de levantamientos topográficos y batimétricos proporcionados por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Se utilizó el software Global Mapper para introducir la información topográfica y batimétrica de la zona de estudio. Por otro lado, se utilizó en software Grapher para generar la malla de topo-batimetría georreferenciada de 3 km de ancho por 7 km de largo, con un ancho de celda de 10 m y que va verticalmente desde las coordenadas $22^{\circ}51'59.29''$ N hasta $22^{\circ}53'34.22''$ N y horizontalmente desde las coordenadas $109^{\circ}57'23.04''$ W hasta $109^{\circ}53'19.10''$ W.

Se utilizó programa computacional MWAPO4 para modelar la propagación del oleaje en la zona de estudio del presente trabajo. Este programa provee una solución de ondas lineales propagándose por un fondo que puede ser variable, utiliza la ecuación modificada de la pendiente suave para llevarlo a cabo. Es capaz de reproducir fenómenos de refracción difracción sombra mientro reflexión y disipación introducida por flexión de fondo y la cultura de los viajes de acuerdo con Silva (2010). Como datos de salida del software se obtienen los resultados de amplitud máxima de ola y la superficie libre instantánea (Martínez et al., 2013).

Como datos de entrada fue necesario introducir la malla de topo-batimetría georreferenciada y parámetros del oleaje como altura, periodo y dirección del oleaje (obtenidos de la caracterización del clima marino realizado anteriormente). Con base en las

direcciones principales obtenidas de las rosas de oleaje, se eligieron los valores de altura de ola más probables para cada una mediante las gráficas de probabilidad conjunta de altura y dirección de ola. De manera análoga, se obtuvieron los valores más probables de periodo de ola para cada caso utilizando las gráficas correspondientes. El análisis se realizará para cada temporada climática identificada y se hará bajo condiciones de oleaje reinante, es decir el más probable que ocurra.

3.2.2 Valoración de la potencia del oleaje y alternativas de aprovechamiento

De acuerdo con Hernández-Fontes et al. (2019), el potencial teórico de cualquier tipo de energía marina es el máximo físico de energía utilizable presente en una región en un periodo de tiempo. Los autores explican que solo una fracción del potencial teórico puede ser extraída debido a limitaciones o restricciones ecológicas, técnicas y económicas.

Para obtener el potencial teórico de la energía undimotriz por metro de frente de ola, se utiliza la teoría lineal de oleaje y se calcula con la siguiente expresión (Hernández-Fontes et al., 2019):

$$P_{OW} = \frac{W \rho g^2 T_{01} H_s^2}{64 \pi} \dots (4)$$

donde

- W es el frente de ola, normalmente se calcula para un frente de 1 m de ola
- ρ es la densidad del agua de mar, 1025 kg/m³
- H_s es la altura de ola significativa, en metros
- T₀₁ es el periodo, en segundos

El potencial teórico de energía undimotriz se obtuvo con los datos de la estación de reanálisis 22.5 °N 109.5 °W.

De acuerdo con Matco et al. (2021), el coeficiente de variación (C_v) de la temporalidad del oleaje influye en la viabilidad de los dispositivos WEC, se requiere un C_v menor a 1 para afirmar que las condiciones del oleaje son estables. El C_v está dado por la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{P_o}} \dots (5)$$

donde

- σ es la desviación estándar
- $\overline{P_o}$ es la potencia promedio

La potencia promedio está definida por:

$$\overline{P_o} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \dots (6)$$

donde

- P_i es el valor de potencia teórica obtenido con cada registro de datos
- n es el número de registros en la muestra

De acuerdo con (Devore, J. L., 2008), la desviación estándar está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \dots (7)$$

donde

- \bar{x} es la media
- x_i es un elemento de la muestra

Sustituyendo las literales correspondientes, la desviación estándar de la potencia queda de la siguiente manera:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \overline{P_o})^2}{n - 1}} \dots (8)$$

Los cálculos estadísticos correspondientes se realizaron mediante el lenguaje de programación Python 3.

3.2.3 Alternativas tecnológicas para el aprovechamiento

Existen distintos WECs en el mercado, en este estudio, para analizar cuánta energía eléctrica realmente se podría producir en la zona se escogieron los dispositivos Wave-Dragon y Oyster. Estos dispositivos tienen rangos de operación aceptables para las condiciones del sitio de estudio y, sobre todo, existe información disponible en la bibliografía acerca de sus matrices de potencia. En su estudio, Silva et al. (2013), indican que el dispositivo Wave-Dragon debe operar en aguas de 25 m a 40 m de profundidad, mientras que Oyster opera en profundidades alrededor de los 15 m. Además, los autores proporcionan las matrices de potencia de ambos dispositivos en los anexos de su trabajo (Tabla 23 y Tabla 24).

La elección del sitio más adecuado para la operación cada dispositivo dentro de la zona de estudio se realizó teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Que se encuentre fuera del APFFCSL
- Que esté lo más cerca posible a la población de Cabo San Lucas
- Que cumpla con la profundidad necesaria para la adecuada operación de los equipos
- Que los resultados de la propagación de oleaje local sean favorables en el sitio, es decir, que se presenten alturas de ola altas la mayor parte del año

Para los sitios identificados, se hizo una estimación de la producción energética en función de las matrices de potencia de los WECs, los resultados obtenidos altura de ola de la propagación de oleaje, y gráficas de probabilidad conjunta para obtener su periodo significativo asociado.

La probabilidad de ocurrencia de cada caso de estudio en un año está determinada por la probabilidad de ocurrencia de su temporada climática (secas, lluvias intensas o lluvias ligeras) y por la probabilidad de que el oleaje se presente en su dirección de estudio (W, SW o S) en cada temporada climática. La potencia anual que podría producir cada dispositivo se obtuvo con el promedio ponderado de la potencia que generan para cada caso de estudio según su probabilidad de ocurrencia durante el año.

4 Resultados y discusión

4.1 Clima marítimo

4.1.1 Temporadas Climáticas

A continuación, se muestran en las gráficas obtenidas de los datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web y los mostrados en los resultados del estudio realizado por Troyo et. al. (2014) (Figura 8 y Figura 9).

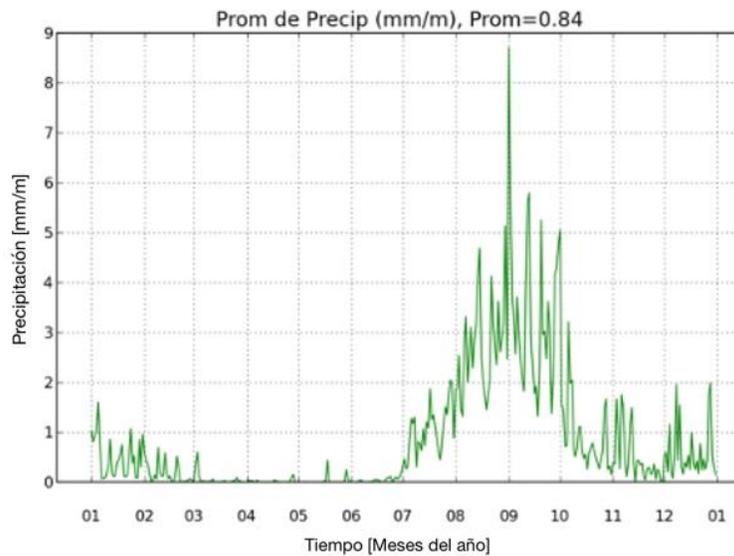


Figura 8. Precipitación promedio a lo largo del año, Cabo San Lucas

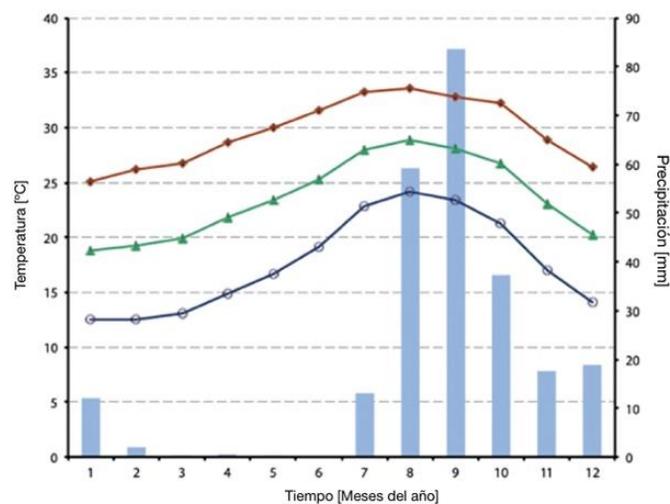


Figura 9. Temperatura y precipitación promedio a lo largo del año, Cabo San Lucas

La distinción de temporadas climáticas, con base en la precipitación del lugar, permite distinguir 3 meses en los cuales prácticamente no hay precipitación, 5 meses en donde hay precipitaciones ligeras (por debajo de los 3 mm de lluvia) y tres meses donde la precipitación es marcadamente más intensa. La clasificación final se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Temporadas climáticas en el año según la precipitación promedio

De acuerdo con estos resultados, teóricamente la temporada de secas tendría 122 días al año, la temporada de lluvias ligeras 151 días y la temporada de lluvias intensas 92 días.

4.1.2 Rosas de altura de ola y periodo

4.1.2.1 22.5 °N 110 °W

A continuación, se muestra la rosa de altura de ola correspondiente a los 359400 datos desde 1979 hasta 2019 para la ubicación 22.5 °N 110 °W. En ella se puede observar que hay 5 direcciones de oleaje principales: WNW, W, WSW, SW y SSW. Además, se observa que en su mayoría se registraron olas entre 1.5 y 2 metros de altura y periodos de ola entre 12 y 16 segundos (Figura 11).

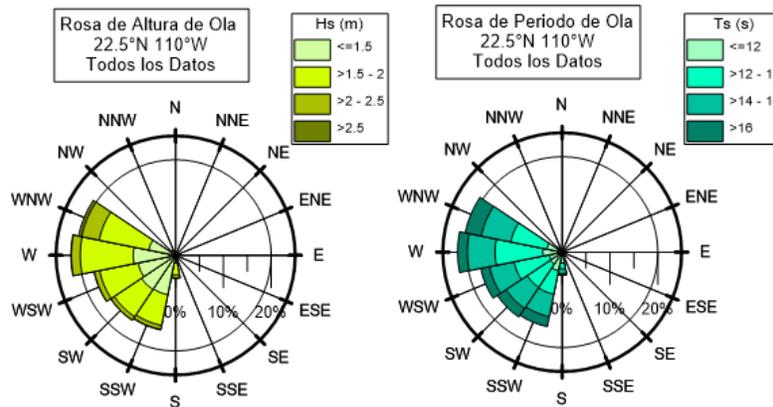


Figura 11. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W Todos los datos

En esta ubicación, la dirección predominante de arriba es W y WSW. En su mayoría se registran alturas de ola entre 1.5 y 2 metros, así como periodos entre 12 y 16 segundos (Anexo 1: Figura 22 y Figura 23). Para la temporada de lluvias ligeras, la dirección principal es WNW. En esta época del año se presenta un aumento en el porcentaje de olas menores a 1.5 m y periodos entre 12 y 16 segundos. En la temporada de lluvias intensas, las direcciones principales son SW y SSW, se registran en su mayoría olas menores a 2 metros y se nota un incremento en el porcentaje de periodos de ola menores a 12 segundos (Anexo 1: Figura 22 y Figura 23).

Comparando entre los datos registrados en años en los que se presentaron los fenómenos del Niño, de La Niña y en años neutro (Anexo 1: Figura 24, Figura 26 y Figura 28), se encontró que cuando se presentan estos fenómenos se registran alturas de ola más grandes. Se observa que aumentan los datos de olas mayores a 2 metros de altura, en años del Niño

este efecto se acentúa más. Por otro lado, no se perciben cambios importantes en el periodo de ola en los años en donde se presentan estos fenómenos (Anexo 1: Figura 25, Figura 27 y Figura 29). Finalmente, se percibe que la dirección principal del oleaje es muy similar en años del Niño y de La Niña pero presenta una ligera variación en años neutros.

4.1.2.2 23 °N 109.5 °W

En la Figura 12 se muestran las rosas de altura y periodo de ola correspondientes a los 359400 datos provenientes del reanálisis para el nodo 23 °N 109.5 °W. En ella se puede observar que hay 2 direcciones de oleaje principales: S y SSW. Además, se observa que en su gran mayoría se registraron olas menores a 1.5 metros de altura y periodos entre 12 y 16 segundos.

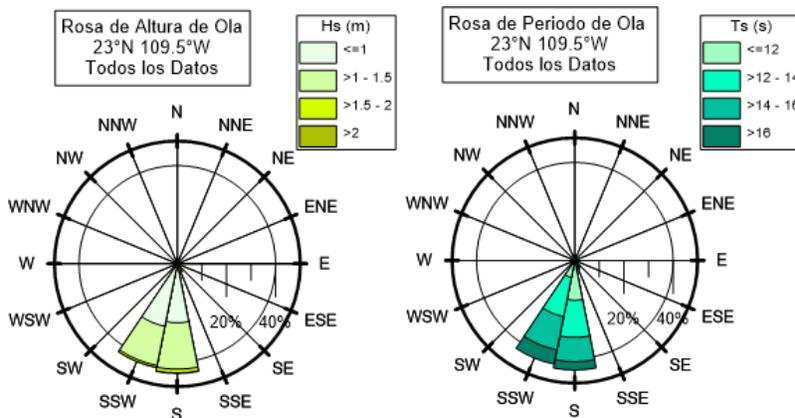


Figura 12. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W Todos los datos

Durante la temporada de secas, el oleaje se da principalmente hacia SSW con más del 60% de los datos. Predominan alturas de ola entre 1 y 1.5 metros con el 50% de los datos aproximadamente y periodos de ola entre 12 y 16 segundos (Anexo 1: Figura 30 y Figura 31). En la temporada de lluvias ligeras los datos se concentran hacia las direcciones S y SSW (35 y 45% respectivamente), además, se presenta un mayor porcentaje de olas con alturas menores a 1 m y un marcado incremento en las olas con periodo menor a 12 segundos. Para la temporada de lluvias intensas, la dirección principal es S con más del 60% de los datos. Además, se obtuvieron en su mayoría olas entre 1 y 1.5 m y se observó un incremento en las olas con periodo menor a 12 segundos en la dirección sur (Anexo 1: Figura 30 y Figura 31).

Al comparar los datos de los años en los que se presentaron los fenómenos del Niño, de La Niña y años neutro (Anexo 1: Figura 32, Figura 34, Figura 36), no se encontraron diferencias significativas para este nodo en la altura de las olas, ni en su dirección, ni en su periodo (Anexo 1: Figura 33, Figura 35 y Figura 37).

4.1.2.3 23 °N 110.5 °W

Las siguientes rosas de altura y periodo de ola contienen la totalidad de datos recabados desde 1979 hasta 2019 para la ubicación 23 °N 110.5 °W. En ellas se puede observar que hay 5 direcciones de oleaje principales: WNW, W, WSW, SW y SSW. Además, se observa que en su mayoría se registraron olas entre 1.5 y 2 metros de altura y periodos de ola entre 12 y 16 segundos (Figura 13).

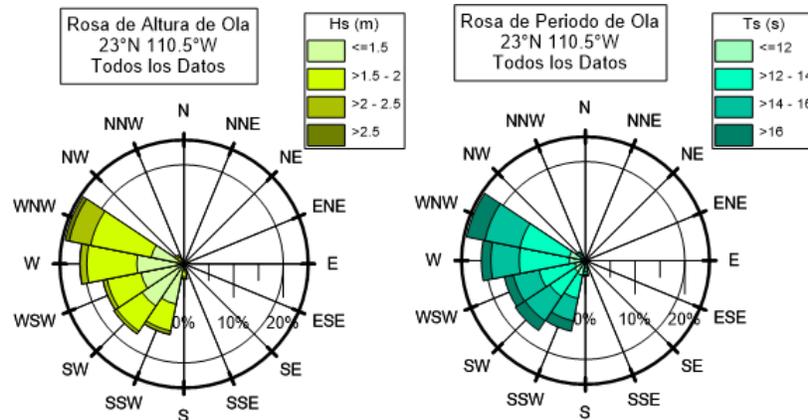


Figura 13. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W Todos los datos

Para esta ubicación, en la temporada de secas, el oleaje se da principalmente hacia W y WSW, tiene una altura de entre 1.5 y 2 metros en su mayoría, así como periodo entre 12 y 16 segundos (Anexo 1: Figura 38 y Figura 39). En la temporada de lluvias ligeras, la dirección principal es WNW, además, predominan periodos de ola mayores a 14 segundos. En ambas temporadas se presenta un mayor porcentaje de olas con alturas mayores a los 2 m. Para la temporada de lluvias intensas las direcciones principales son SW y SSW. Se observa un aumento en el porcentaje de olas menores a entre 1.5 de altura y en periodos de ola menores a 12 segundos (Anexo 1: Figura 38 y Figura 39).

Comparando entre los datos de años del Niño, de La Niña, y neutros, se encontró que las alturas de ola son más grandes durante estos fenómenos, especialmente en años del Niño (Anexo 1: Figura 40, Figura 42 y Figura 44). No se aprecian diferencias significativas en las rosas de periodo de ola en años en donde se presentan estos fenómenos (Anexo 1: Figura 41, Figura 43 y Figura 45). Por último, se aprecia que la dirección principal del oleaje es muy similar en años del Niño y de La Niña pero presenta una ligera variación en años neutros. Los resultados encontrados en este nodo fueron muy similares a los del nodo 22.5 °N 110 °W.

4.1.2.4 22.5 °N 109.5 °W

Las siguientes rosas de altura y periodo de ola contienen todos los datos recabados desde 1979 para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W. En ellas se puede observar que WSW, SW y SSW son las 3 direcciones de oleaje principales. Además, se observa que en su mayoría se registraron olas entre 1.5 y 2 metros de altura y periodos de ola entre 12 y 16 segundos (Figura 14).

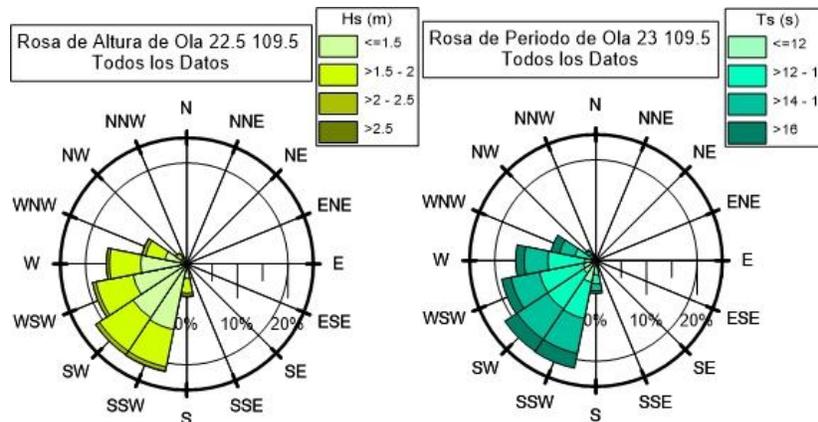


Figura 14. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W Todos los datos.

En la temporada de secas, SW y WSW son las direcciones más recurrentes de arribo del oleaje (Anexo 1: Figura 46 y Figura 47), en su mayoría se registran alturas de ola entre 1.5 y 2 metros, así como periodos entre 12 y 16 segundos. Para la temporada de lluvias ligeras, se puede observar que la dirección principal es W. En esta época del año se presenta un aumento en el porcentaje de olas menores a 1.5 m y periodos entre 12 y 16 segundos. En

la temporada de lluvias intensas, la dirección principal es SSW, se registran en su mayoría olas menores a 2 metros y periodos entre 12 y 16 segundos (Anexo 1: Figura 46 y Figura 47).

Comparando los registro de años del Niño y de La Niña para este nodo, se encontró que hay un porcentaje mayor de olas de más de 2.5 metros cuando se presentan (Anexo 1: Figura 48, Figura 50 y Figura 52). No se aprecian diferencias significativas en los datos de periodo de los durante estos fenómenos (Anexo 1: Figura 49, Figura 51 y Figura 53).

4.1.3 Parámetros estadísticos de altura de ola y periodo

4.1.3.1 22.5 °N 110 °W

En esta estación, contabilizando los registros de 1979 a 2019, se obtuvo una altura de ola significativa (H_s) de 1.99 m y un periodo de ola significativa (T_s) de 13.80 segundos. En la Tabla 3 y la Tabla 4 se muestran el resto de los parámetros estadísticos.

Tabla 3. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 110 °W

Parámetro	Altura de Ola (m)
Altura de ola cuadrática media	1.648
Altura de ola máxima	8.144
Altura de ola un medio	1.867
Altura de ola significativa	1.987
Altura de ola un décimo	2.335
Altura de ola un centésimo	3.343
Altura de ola un milésimo	5.145

Tabla 4. Parámetros estadísticos periodo de ola 22.5 °N 110 °W

Parámetro	Periodo (segundos)
Periodo de ola cuadrático medio	13.630
Periodo de ola máximo	23.362
Periodo de ola un medio	13.717
Periodo de ola significativa	13.795
Periodo de ola un décimo	13.791
Periodo de ola un centésimo	12.052
Periodo de ola un milésimo	11.134

El intervalo de altura más frecuente fue de 1.4 a 1.6 metros con más del 25%, mientras que los intervalos de 1.2 a 1.4 y 1.6 a 1.8 metros también tuvieron una recurrencia importante con aproximadamente el 20% cada uno (Anexo 1: Figura 54). El intervalo de periodo de ola más frecuente fue de los 13 a 14 segundos con más del 20% de los datos en todo el periodo de medición, seguido de los intervalos de 14 a 15 y de 12 a 13 segundos (Anexo 1: Figura 55).

En la comparación de los parámetros estadísticos en los años de niño, de La Niña y neutros (Anexo 1: Tabla 14 y Tabla 15), se observó que en los años neutros se registraron alturas de ola menores que en años del Niño y de La Niña a lo largo de todo en año, con excepción de la temporada de secas. Se encontró que en años de La Niña el periodo es más largo durante prácticamente todas las estaciones del año.

4.1.3.2 23 °N 109.5 °W

En esta estación, en la totalidad del registro desde 1979, se obtuvo una altura de ola significativa de 1.30 m y un periodo de ola significativa de 13.41 segundos. En la Tabla 5 y la Tabla 6 se muestran el resto de los parámetros estadísticos.

Tabla 5. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 109.5 °W

Parámetro	Altura de Ola (m)
Altura de ola cuadrática media	1.047
Altura de ola máxima	7.211
Altura de ola un medio	1.202
Altura de ola significativa	1.296
Altura de ola un décimo	1.602
Altura de ola un centésimo	2.633
Altura de ola un milésimo	4.388

Tabla 6. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 109.5 °W

Parámetro	Periodo (segundos)
Periodo de ola cuadrático medio	13.199
Periodo de ola máximo	23.281
Periodo de ola un medio	13.384
Periodo de ola significativa	13.413
Periodo de ola un décimo	13.046
Periodo de ola un centésimo	10.277
Periodo de ola un milésimo	11.058

El intervalo de altura más recurrente fue 0.8 a 1 metros con más del 35%, por otro lado, los intervalos de 0.6 a 0.8 y 1 a 1.2 metros también tuvieron una recurrencia significativa con aproximadamente el 25% y 20% respectivamente (Anexo 1: Figura 56). El rango de valores más frecuentes de periodo pico fue de los 13 a los 14 segundos con casi el 20% de los datos en todo el periodo de medición.

Comparando entre los parámetros estadísticos obtenidos en los años del Niño, de La Niña y neutros, se observó que en los años neutros hay alturas de ola menores a lo largo de todo en año, con excepción de la temporada de secas (Anexo 1: Tabla 16 y Tabla 17). Se observó que en años de La Niña se registraron periodos de ola más largos durante prácticamente todas las estaciones del año.

4.1.3.3 23 °N 110.5 °W

Para esta ubicación, se obtuvo una altura de ola significativa de 1.96 m y un periodo de ola significativa de 14.01 segundos. En la Tabla 7 y la Tabla 8 se muestran el resto de los parámetro estadísticos.

Tabla 7. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 110.5 °W

Parámetro	Altura de Ola [m]
Altura de ola cuadrática media	1.623
Altura de ola máxima	6.682
Altura de ola un medio	1.843
Altura de ola significativa	1.963
Altura de ola un décimo	2.302
Altura de ola un centésimo	3.139
Altura de ola un milésimo	4.541

Tabla 8. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 110.5 °W

Parámetro	Periodo [segundos]
Periodo de ola cuadrático medio	13.813
Periodo de ola máximo	23.381
Periodo de ola un medio	14.014
Periodo de ola significativa	14.142
Periodo de ola un décimo	14.302
Periodo de ola un centésimo	13.432
Periodo de ola un milésimo	11.730

El intervalo de altura más recurrente fue de 1.4 a 1.6 metros con más del 25%, los intervalos de a 1.2 a 1.4 y 1.6 a 1.8 metros también tuvieron una recurrencia significativa con valores cercanos al 20% cada uno (Anexo 1: Figura 58). El intervalo de periodo de ola pico más frecuente fue de 13 a 14 segundos con más del 20% de los datos en todo el periodo de medición (Anexo 1: Figura 59).

Se observó que en los años neutros hay alturas de ola menores a lo largo de todo el año, en comparación con los años del Niño y La Niña, con excepción de la temporada de secas (Anexo 1: Tabla 18 y Tabla 19). Se observó que en años de La Niña se registraron periodos de ola más largos durante prácticamente todas las temporadas climáticas del año.

4.1.3.1 22.5 °N 109.5 °W

En este nodo de ERA5, contabilizando los registros desde 1979, se obtuvo una altura de ola significativa de 1.85 m y un periodo de ola significativa de 13.88 segundos. En la Tabla 9 y la Tabla 10 se muestran el resto de los parámetros estadísticos.

Tabla 9. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 109.5 °W

Parámetro	Altura de Ola (m)
Altura de ola cuadrática media	1.543
Altura de ola máxima	7.726
Altura de ola un medio	1.742
Altura de ola significativa	1.853
Altura de ola un décimo	2.186
Altura de ola un centésimo	3.252
Altura de ola un milésimo	5.190

Tabla 10. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 109.5 °W

Parámetro	Periodo (segundos)
Periodo de ola cuadrático medio	13.731
Periodo de ola máximo	23.290
Periodo de ola un medio	13.384
Periodo de ola significativa	13.877
Periodo de ola un décimo	13.637
Periodo de ola un centésimo	11.212
Periodo de ola un milésimo	11.100

Los intervalos de altura más recurrentes fueron de 1.2 m a 1.4 m y de 1.4 m a 1.6 m con más del 27% cada uno (Anexo 1: Figura 60 **Error! Reference source not found.**). Los valores más frecuentes de periodo pico se dieron de 13 a 14 segundos y de 14 a 15 segundos con más del 20% de los datos cada uno (Anexo 1: Figura 61).

En comparación con los años del Niño y La Niña, se observó que en los años neutros hay alturas de ola menores a lo largo de todo el año, con excepción de la temporada de secas (Anexo 1: Tabla 20 y Tabla 21). Además, en años de La Niña se presentan periodos de ola pico más largos durante prácticamente todas las temporadas climáticas del año.

4.1.4 Probabilidad conjunta altura contra periodo de ola y altura contra dirección de ola

La información de oleaje del nodo 22.5 °N 109.5 °W se definió como la más representativa para la zona de interés dada la similitud de las transformaciones que puede sufrir el oleaje en la dicha zona respecto a los nodos analizados (ver Figura 6):

- En este nodo de ERA5 el oleaje se verá afectado por la difracción que provoca el cabo, a diferencia de lo que se observaría en los nodos de latitudes de 110° o menores.
- En este nodo de ERA5 el oleaje no se verá afectado por la zona de sombra que se genera al Este (latitudes mayores a 22.5°) por la presencia de la misma península.

De acuerdo con el método descrito en la metodología para esta sección, se definieron rangos apropiados para las variables de altura de ola y periodo de ola. Para altura de ola, se utilizaron rangos de 0.5 m tomando 4 m como el valor mínimo y 8.5 m como el valor máximo. Por otro lado, en el caso del periodo de ola, se utilizaron los rangos de 1 s, considerando 4 s como el valor mínimo y 24 s como el valor máximo. En la Figura 15, se muestra la gráfica que contiene la información de la probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para todo el año.

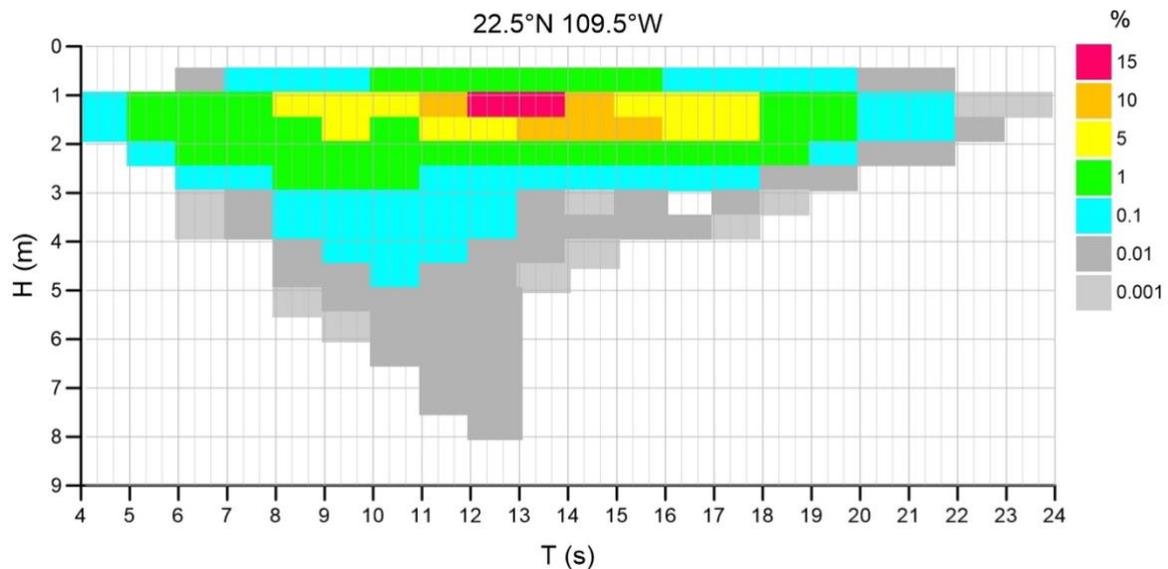


Figura 15. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W

Los dos eventos con más probabilidad de ocurrencia de acuerdo con este análisis son alturas de ola de 1 a 1.5 m con periodo de 13 a 14 segundos (probabilidad del 13.03%) y alturas de ola entre 1 a 1.5 metros con periodo de 12 a 13 segundos (11.41% de probabilidad de ocurrencia).

Comparando las gráficas de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola de años niño, años niña y años neutro, se observó que durante los años de La Niña se registran alturas de ola ligeramente más altas. Esto se acentúa en la temporada de secas, donde incluso el periodo de las olas es más largo (Anexo 1: Tabla 22).

La mayoría de los datos de este nodo de ERA5 se encuentran agrupados desde el azimut con ángulo de 180° (S) y hasta los 270°(W), de acuerdo con las gráficas de probabilidad conjunta de altura de ola contra dirección (Anexo 1: Figura 77, Figura 78 y Figura 79). Por lo tanto, las 3 direcciones principales del oleaje tomadas en cuenta serán W, SW y S.

4.2 Recurso energético del oleaje

4.2.1 Hidrodinámica local

A continuación, se presenta la topobatemetría del polígono de estudio resultado de la malla digital georreferenciada que se realizó (Figura 16). En él se puede apreciar claramente el enorme cráter submarino que da origen a las cascadas de arena.

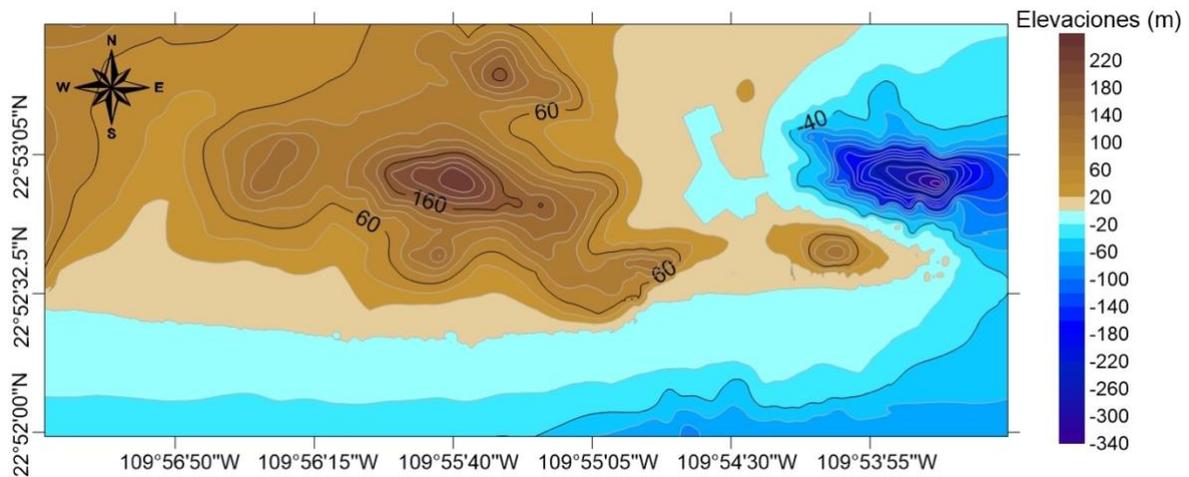


Figura 16. Topobatemetría del polígono de estudio, coordenadas geográficas

Como resultado del análisis de propagación local del oleaje, para cada caso analizado, se obtuvieron dos mapas con los trenes de ola resultantes en el sitio de estudio para amplitud máxima y para superficie libre instantánea. Sin embargo, se hizo énfasis en los resultados de amplitud máxima.

Se definieron 3 direcciones principales del oleaje (W, SW y S) con base en los resultados de la caracterización del clima marítimo. Se realizó un análisis tomando en cuenta oleaje reinante para cada una y para cada temporada climática; se analizaron 9 casos de estudio en total.

La condición de oleaje reinante refiere al caso más probable según el análisis estadístico realizado previamente. Entonces, se utilizaron las gráficas de probabilidad conjunta altura

contra dirección de ola (Anexo 1: Figura 77, Figura 78 y Figura 79) para asociar cada dirección de ola estudiada con su altura de ola más probable en cada temporada climática. Después, de manera análoga, se utilizaron las gráficas de probabilidad conjunta de altura de ola y periodo (Anexo 1: Figura 62, Figura 63 y Figura 64) para asociar la altura de ola con el periodo de ola más probable. En la Tabla 11 se muestran los parámetros más probables obtenidos para cada caso de estudio, así como el valor de la probabilidad conjunta para cada par de valores $H_s - T_p$ (el cual resultó ser mayor a 10% para todas las temporadas climáticas). La modelación de la propagación del oleaje local en el software MWAPO4 se realizó con base en estos parámetros.

Tabla 11. Valores de altura, dirección y periodo de ola considerados para modelación de la propagación del oleaje local con MWAPO4

Caso	Temporada	Altura (m)	Amplitud (m)	Periodo (s)	Valor de probabilidad conjunta H-T	Dirección Oleaje
1	Lluvias Intensas	1.37	0.875	13.5	10.95%	W
2						SW
3						S
4	Lluvias Ligeras	1.25	0.625	13.5	15.84%	W
5						SW
6						S
7	Temporada de Secas	1.5	0.75	13.5	12.46%	W
8						SW
9						S

En la Figura 17 se muestran los 9 mapas que incluyen los resultados de la hidrodinámica local. Además, estos incluyen las zonas de operación de los WECs analizados, el APFFCSL y las manzanas de la zona urbana cercana categorizadas por cantidad de habitantes.

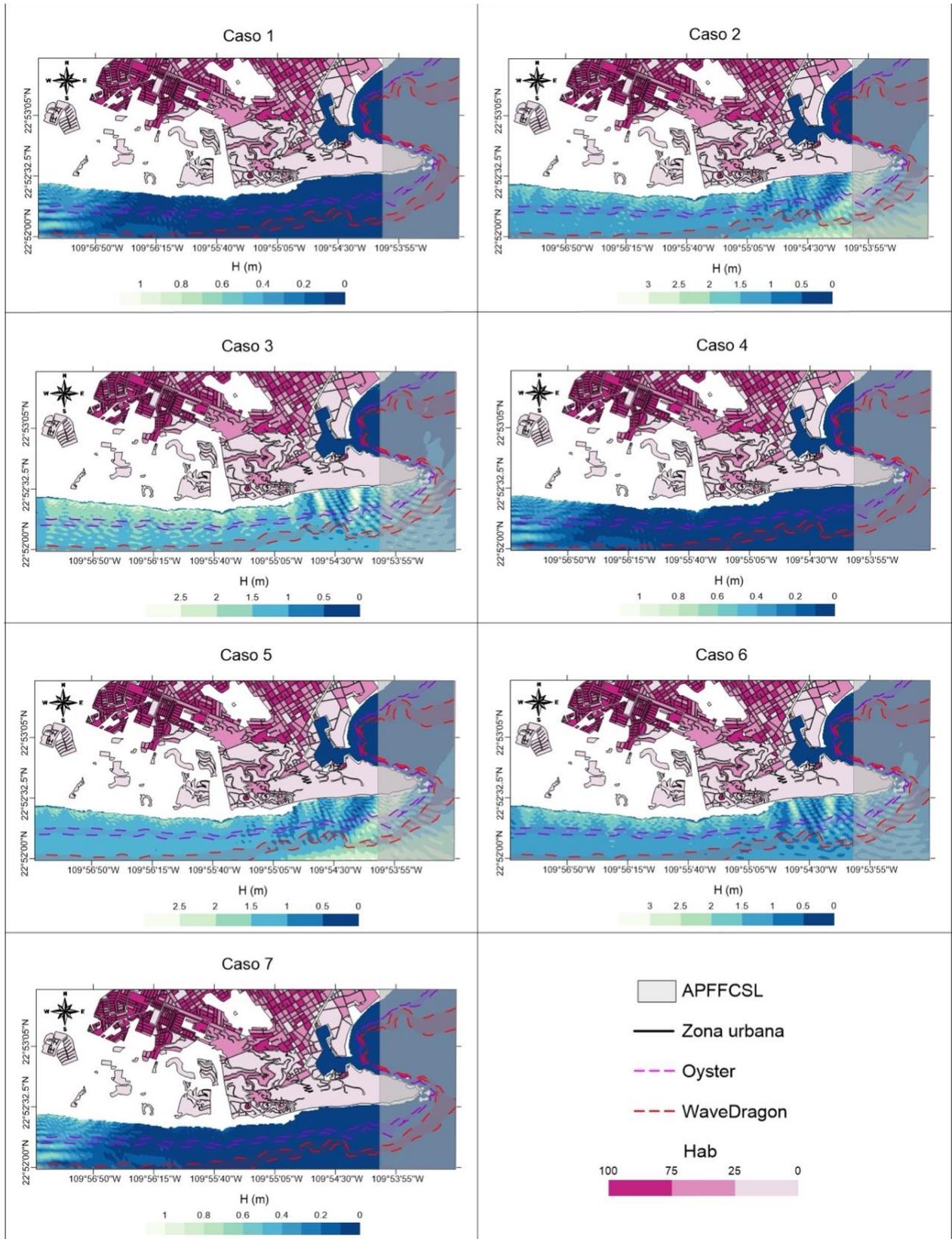


Figura 17. Resultados de propagación del oleaje y elementos ambientales, sociales y físicos de interés.

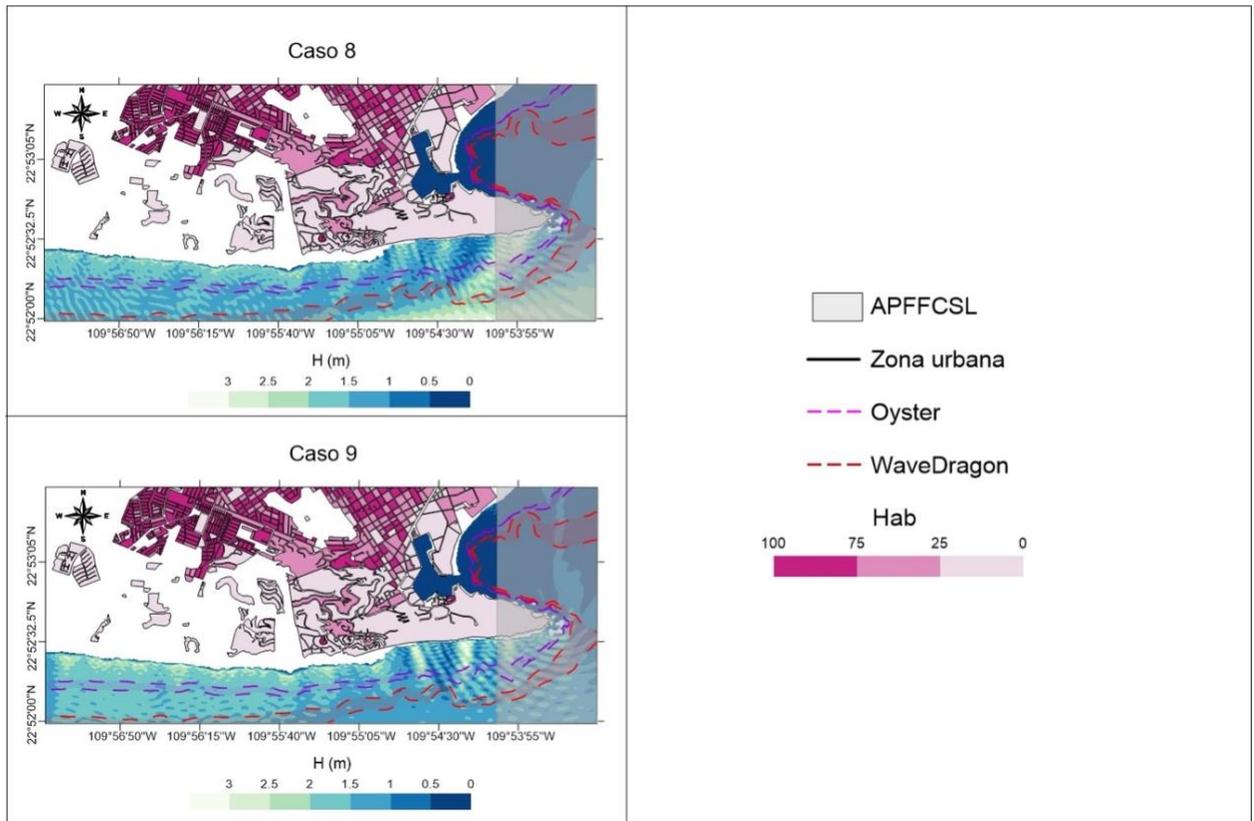


Figura 17 (continuación). Resultados de propagación del oleaje y elementos ambientales, sociales y físicos de interés.

4.2.2 Alternativas para aprovechamiento de la energía del oleaje

4.2.2.1 Potencia del oleaje en aguas profundas

En la Figura 18, se presenta la gráfica de probabilidad conjunta de potencia teórica (ec. 4) contra dirección del oleaje para el nodo 22.5 °N 109.5 °W. Se puede observar que las direcciones donde se concentra la mayoría de los datos tienen un azimut de 180 a 270 grados, es decir, van desde el sur hasta el este. También se puede apreciar que los valores de potencia teórica más probables están entre los 10 y los 20 MW por metro de ola.

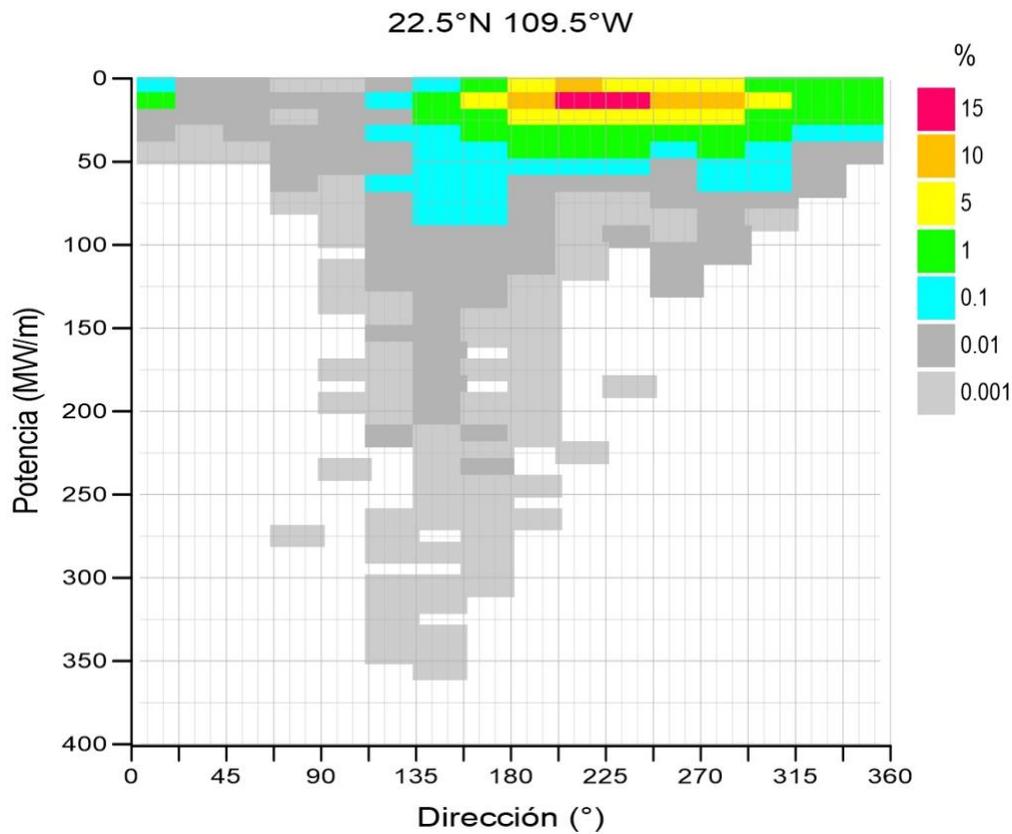


Figura 18. Gráfica de probabilidad conjunta de potencial teórico y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W

Por otro lado, en la misma figura se aprecia que hay ocasiones durante el año donde se alcanzan valores extremos de potencia teórica, superando los 350 MW por metro de ola. Esto se debe a eventos climatológicos extremos que propician olas de altura y periodo muy grandes, la gráfica hace evidente que estos eventos vienen mayormente desde el sur y el sureste.

Se realizó el cálculo estadístico necesario para obtener el coeficiente de variación de la potencia teórica del oleaje. Se obtuvo una potencia teórica promedio de:

$$\overline{P_o} = 15.829 \text{ MW/m}$$

La desviación estándar de la potencia teórica resultó de:

$$\sigma = 14.032 \text{ MW/m}$$

Por lo tanto, el coeficiente de variación resultó de:

$$C_v = 0.886$$

El C_v es menor a 1, por lo que se puede afirmar que se presenta una baja variabilidad temporal del oleaje; la zona de estudio cuenta con las condiciones de estabilidad del oleaje necesarias para que los WECs puedan tener un funcionamiento adecuado.

4.2.2.2 Sitios potenciales para el aprovechamiento

Con base en los resultados de la Figura 17, se determinó el sitio donde se pudiera generar más energía durante el año para cada dispositivo, teniendo en cuenta todas las temporadas climáticas. Se llegó a la conclusión de que el sitio con mayor potencial para el dispositivo Oyster se encuentra ubicado en las coordenadas 109°55'10.61" W y 22°52'09.28" N. Por otro lado, el sitio con mayor potencial para Wave-Dragon tiene las coordenadas 109°54'12.59" W y 22°52'01.65" N. Ambos puntos tienen un área de factibilidad o buffer de 45 metros de radio aproximadamente en la cual arrojan parámetros de altura de ola similares y, sobretodo, se mantienen dentro de las zonas de operación de cada dispositivo de acuerdo con la batimetría. En la Figura 19, se muestra la ubicación de estos sitios.

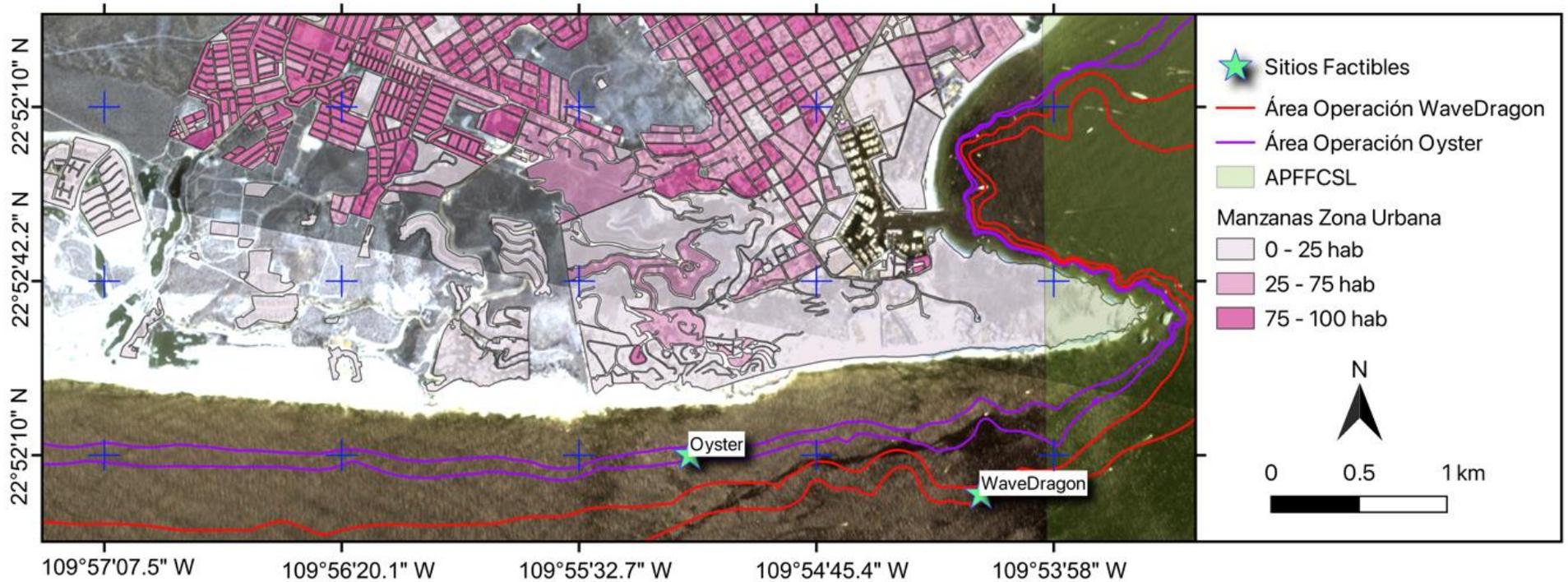


Figura 19. Mapa de la ubicación de los sitios factibles con mayor potencial energético para cada dispositivo WEC analizado, coordenadas geográficas

Con las ubicaciones ya determinadas y con los mapas con los resultados de la hidrodinámica local, se obtuvieron las alturas de ola resultantes para cada caso de estudio. Mediante las gráficas de probabilidad conjunta de altura contra periodo de ola se determinaron los valores de periodo más probables para cada caso analizado. Los resultados de este proceso se encuentran en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros de altura y periodo en los sitios factibles para cada caso de estudio y cada dispositivo WEC..

Temporada climática	Parámetros de análisis en MWAPO4			Resultados sitio factible para Oyster		Resultados sitio factible para Wave Dragon	
	Altura (m)	Periodo Ola (s)	Dirección Oleaje	Altura (m)	Periodo (s)	Altura (m)	Periodo (s)
Lluvias Extremas	1.37	13.5	W	0.1	0	0.1	0
			SW	1.5	13.5	2	14
			S	1.25	13.5	1.25	13.5
Lluvias Ligeras	1.25	13.5	W	0.1	0	0.1	0
			SW	1.25	13.5	1.75	14
			S	1.25	13.5	1	13.5
Temporada de Secas	1.5	13.5	W	0.1	0	0.1	0
			SW	1.75	14	2	14
			S	1.5	13.5	1.5	13.5

Se utilizaron las matrices de potencia de los dispositivos (Anexo 2) para obtener cuánta energía se podría generar con cada uno para cada caso analizado. En la Figura 20 se muestran los resultados obtenidos, la temporada de secas es la que arroja mejores resultados y, en general, se genera más energía cuando el oleaje viene del suroeste. Por otro lado, la temporada de lluvias ligeras es en la que menos energía se genera y cuando el oleaje viene desde el oeste no se genera nada debido a las características geomorfológicas de la zona de estudio y a la ubicación de los sitios seleccionados.

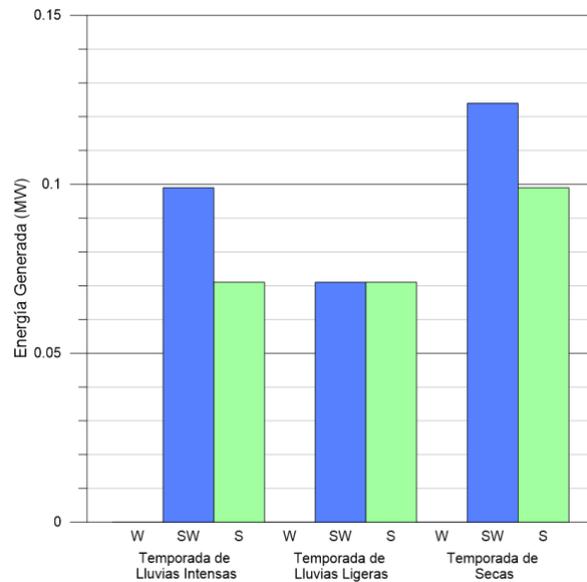


Figura 20. Energía generada por el dispositivo Oyster para cada caso de estudio

Los resultados obtenidos para el dispositivo Wave-Dragon se encuentran en la Figura 21. Se alcanzan los valores de energía generada más altos en las temporadas de lluvias intensas cuando el oleaje viene del suroeste. Para este sitio, tampoco se genera nada de energía cuando el oleaje viene desde el oeste.

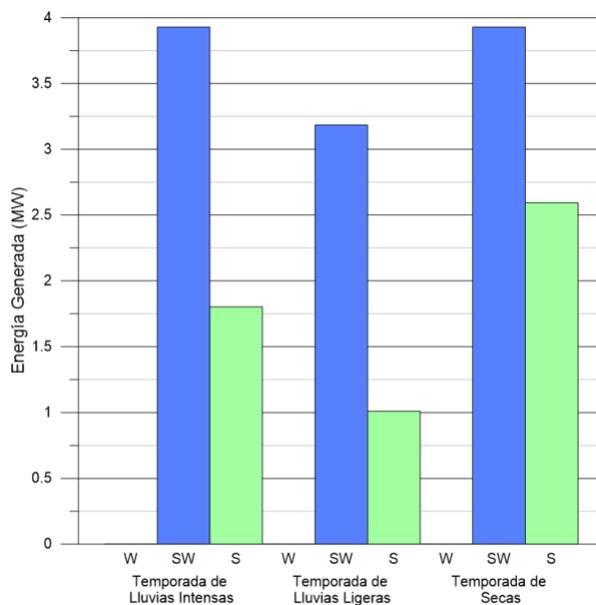


Figura 21. Energía generada por el dispositivo Wave-Dragon para cada caso de estudio

En la Tabla 13 se muestra la potencia promedio que se generaría con cada dispositivo para cada temporada climática y anualmente. En la columnas 1 y 2 se muestran las temporadas climáticas y las direcciones del oleaje analizadas, este par de datos definen a cada caso de estudio.

Cada temporada climática tiene una probabilidad de ocurrencia que está en función de su duración teórica en el año, estas se encuentran expresadas en la columna 3. Por otro lado, cada dirección principal se presenta en mayor o menor porcentaje en cada temporada climática (Anexo 1: Figura 46), en la columna 4 están desglosadas estas probabilidades. Los datos en las 3 direcciones principales no representan el 100% de la muestra pero están muy cerca de hacerlo. Para la temporada de lluvias intensas solo el 0.5% de los datos se registró en otras direcciones, 6.8% en la temporada de lluvias ligeras y 0.3% para la temporada de secas. En todos los casos, se consideró, por practicidad, que los registros fuera de las direcciones de estudio no aportan energía a los promedios temporales y anuales. Finalizando con las probabilidades, en la columna 5 se muestra la probabilidad de ocurrencia total de cada caso de estudio. Cabe señalar que la suma no da 100% por los registros fuera de las direcciones principales mencionados anteriormente.

En las columnas 6 y 7 se muestra la energía en MW que cada dispositivo podría generar para cada caso de estudio. Para obtener el promedio ponderado de energía generada por temporada climática se multiplicaron los valores de la columna 3 por los de las columnas 6 y 7 respectivamente, la suma de los resultados para cada TC se encuentra expresada en MW en las columnas 8 y 9.

Finalmente, se multiplicaron los valores de la columna 5 por los de las columnas 6 y 7 respectivamente para obtener el promedio ponderado de energía anual generada por cada dispositivo WEC, los resultados se muestran al final de las columnas 10 y 11.

Tabla 13. Cálculo del poder generado por los WECs para cada temporada climática y promedio ponderado anual de la potencia que generaría cada uno.

Temporada Climática (TC) [1]	Dirección Oleaje (DO) [2]	Probabilidades de ocurrencia			Potencia para cada caso (MW)		Promedio ponderado de potencia por TC (MW)		Promedio ponderado de potencia anual (MW)	
		TC [3]	DO [4]	Total [5]	Wave Dragon [6]	Oyster [7]	Wave Dragon [8]	Oyster [9]	Wave Dragon [10]	Oyster [11]
Lluvias Intensas	W	0.2521	0.0627	0.0158	0	0	2.796	0.081	0	0
	SW		0.5245	0.1322	3.93	0.099			0.520	0.011
	S		0.4078	0.1028	1.803	0.071			0.185	0.003
Lluvias Ligeras	W	0.4137	0.5207	0.2154	0	0	1.024	0.029	0	0
	SW		0.2801	0.1159	3.185	0.071			0.369	0.013
	S		0.1306	0.0540	1.01	0.071			0.055	0.006
Temporada de Secas	W	0.3342	0.3769	0.1260	0	0	2.359	0.075	0	0
	SW		0.5624	0.1880	3.93	0.124			0.739	0.019
	S		0.0571	0.0191	2.595	0.099			0.050	0.006
Total		1.000		0.9692	-	-	-	-	1.917	0.058

Cada dispositivo Wave-Dragon instalado generaría una media anual de 1.917 MW de energía eléctrica, mientras que cada equipo Oyster generaría una media anual de 0.058 MW. Existe una marcada diferencia entre el potencial de ambos equipos. La temporada de lluvias intensas es la época del año en que se podría producir más energía con un promedio de prácticamente 2.8 MW para cada dispositivo Wave-Dragon. No obstante, en la temporada de lluvias ligeras la producción promedio caería dramáticamente a 1.024 MW por cada dispositivo instalado. Esto se debe a que en esta época del año la mayor parte del oleaje llega por el oeste, como ya se había mencionado anteriormente, esta dirección no genera energía.

En las matrices de potencia es posible observar que ambos equipos operan con una eficiencia relativamente buena con las características del sitio de estudio (en periodos de ola entre 13 y 14 segundos). Sin embargo, ninguno de ellos opera con una eficiencia óptima, esta se encuentra con periodos de ola entre 7 y 8 segundos para Oyster y en periodos entre 11 y 12 segundos para Wave-Dragon.

5 Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se realizó una evaluación del recurso energético del oleaje disponible en la zona costera de la ciudad de Cabo San Lucas, Baja California Sur. Con los resultados de este análisis, se identificó un sitio de aprovechamiento favorable para los dispositivos de conversión de energía del oleaje Oyster y Wave-Dragon, además, se logró evaluar el desempeño de cada uno.

En la caracterización del clima marítimo se encontró que hay 3 temporadas climáticas en la zona: Temporada de lluvias intensas, temporada de lluvias ligeras y temporada de secas. También se encontró que la ubicación de reanálisis 22.5 °N 109.5 °W contiene los datos más significativos para la zona de estudio. El oleaje presenta en su mayoría valores de Hs entre 1 m a 1.5 m y 13 a 14 segundos en Ts, las direcciones principales del oleaje son W, SW y S.

Los diferentes sitio de reanálisis presentan rangos de Hs y direcciones de oleaje diferentes pero todos coinciden en que los valores más probables de Ts se encuentran entre 13 y 14 segundos. Además, el análisis arrojó que, de manera general, en años neutro se presentan alturas de ola ligeramente más bajas que en años de La Niña y años del Niño. También se observó que en años de La Niña se presentan valores de Ts ligeramente más altos.

La potencia teórica promedio del oleaje fue de 15.8 MW/m \pm 14 MW/m con un coeficiente de variación de 0.886, la zona de estudio cuenta con las condiciones de estabilidad del oleaje necesarias ($C_v < 1$) para que los WECs puedan tener un funcionamiento adecuado.

El estudio de la hidrodinámica local, en los 9 casos analizados, arrojó que el sitio con mayor potencial para el dispositivo Oyster se encuentra en las coordenadas 109°55'10.61" W y 22°52'09.28" N, mientras que para Wave-Dragon se ubica en 109°54'12.59" W y 22°52'01.65" N. Esos sitios están fuera del APFFCSL, cerca de la zona urbana y dentro del rango de operación de cada dispositivo en cuanto a profundidad del sitio.

En la evaluación de las alternativas de tecnologías para la generación de energía, se encontró que el dispositivo Wave-Dragon es el de mejor rendimiento, cada equipo instalado generaría una media anual de 1.917 MW de energía eléctrica. Durante la temporada de lluvias intensas la media sube a 2.796 MW, para la temporada de secas baja a 2.359 MW y en la temporada lluvias ligeras cae hasta 1.024 MW. Se observó ambos dispositivos operan con una eficiencia relativamente buena con las características del sitio de estudio (T_s entre 13 y 14 segundos). Sin embargo, ninguno de ellos opera con una eficiencia óptima. Además, haría falta validar el modelo numérico que se utilizó con datos medidos en campo.

Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que el dispositivo Wave-Dragon tiene el potencial para ser una fuente de microgeneración de energía eléctrica para la ciudad costera de Cabo San Lucas ya que la comunidad no tiene fuentes de generación cercanas.

Como futuras líneas de investigación se podría desarrollar un dispositivo que tenga su máxima eficiencia en periodos de ola entre 13 y 14 segundos. Este rango de T_s se presenta a lo largo de toda la región; otras ciudades cercanas como San José del Cabo también se podrían beneficiar del desarrollo de este equipo. Otra línea de investigación futura sería la de diseñar un arreglo de una granja con varios dispositivos Wave-Dragon para potenciar la energía que entregada a la ciudad de Cabo San Lucas, así como analizar la factibilidad espacial, económica y ambiental del proyecto. Finalmente, se propone una línea de investigación para analizar el cambio del recurso energético disponible a largo plazo, debido a la variabilidad climática.

Referencias

Ayuntamiento de Los Cabos (2018). Plan de Desarrollo Municipal 2018-2021. Recabado de: <https://transparencialoscabos.gob.mx/wp-content/uploads/2019/05/PDM2019.pdf>

Bárceñas, J., Fontes, J., Garcia, H. & Silva, R. (2021). Assessing Hydrokinetic Energy in the Mexican Caribbean: A Case Study in the Cozumel Channel. *Energies* 2021, 14,4411. Recabado de: <https://doi.org/10.3390/en14154411>

Cervantes, J. (2011). Estaciones del Año y Temporadas Climáticas. Recabado de: Dirección de Comunicación de la Ciencia, Universidad Veracruzana. Recabado de: <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/estacionesdelanoytemporadasclimaticas/>

Copernicus. (2020). Copernicus Climate Data Store. ERA5 Hourly Data on Single Levels from 1979 to Present. Recabado de: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2019). Cambio climático y derechos humanos: contribuciones desde y para América Latina y el Caribe. Recabado de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44970/4/S1901157_es.pdf

Comisión Federal de Electricidad (2021). Boletín del día 21 de Febrero 2021: Programa de Inversión para Generación de Energía Eléctrica en BCS. Recabado de: <https://www.cfe.mx/cdn/2019/Archivos/Boletines/Mamparas%20BCS.pdf>

Cruz, C.J., Mendoza, E., Silva, R., & Chávez, V. (2019). Assessing degrees of anthropization on the coast of Mexico from ecosystem conservation and population growth data. In: Silva, R.; Martínez, M.L.; Chávez, V., and Lithgow, D. (eds.), *Integrating Biophysical Components*

in Coastal Engineering Practices. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 92, pp. 136-144. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Devore, J. L. (2008). Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias (7.a ed.). CENEGE Learning.

Folk, R. L. (1974). Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphills Eds. Austin. 159 p.

García, A., Rodríguez, Y., Silva, R., Mendoza, E., & Vega, L. (2018). Determination of the Potential Thermal Gradient for the Mexican Pacific Ocean. Journal of Marine Science and Engineering, 6(1), 20. MDPI AG. Recabado de: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse6010020>

Garduño, E., García, A., Rodríguez, Y., Bárcenas, F., Alatorre, M., Cerezo, E., Tobal, J., Romero, M. & Silva, R. (2017). Conversión de Energía Térmica Oceánica (otec) Estado del Arte. Cemie-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 123 p. Recabado de: <https://cemieoceano.mx/downloads/libros/Gradiente%20Salino%20CEMIE-Océano.pdf>

Gobierno del Estado de Baja California Sur (2015). Plan Estatal de Desarrollo 2015 – 2021. Recabado de: <https://contraloria.bcs.gob.mx/wp-content/uploads/2019/07/PLAN-ESTATAL-DE-DESARROLLO-2015-2021.pdf>

Gobierno de México. Secretaría de Energía (2016). Evaluación Rápida del Uso de la Energía en Los Cabos, Baja California Sur, México. Recabado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171264/17__Los_Cabos.pdf

Gobierno de México, Secretaría de Energía (2017). Cartera de Necesidades de Innovación y Desarrollo Tecnológico: Energía del Océano. Recabado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279711/NT_OCEANO_VERSION_2510_17__rev1.pdf

Gobierno de México. Secretaría de Marina (2012). Carta Náutica “Bahía de San Lucas, B.C.S.”. Dirección general de investigación y desarrollo SEMAR. México, D.F.

Gobierno de México. Secretaría de Marina (2012). Carta Náutica “Cabo San Lucas, B.C.S.”. Dirección general de investigación y desarrollo SEMAR. México, D.F.

Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2020). Contribución Determinada a nivel Nacional: México. Versión actualizada 2020. Recabado de: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Mexico%20First/NDC-Esp-30Dic.pdf>

Gobierno de México. Secretaría de Turismo (2017). Estudio de Vulnerabilidad y Programas de Adaptación ante la Variabilidad Climática y el Cambio Climático en Diez Destinos Turísticos Estratégicos, así como Propuesta de un Sistema de Alerta Temprana a Eventos Hidrometeorológicos Extremos. Sección V. Vulnerabilidad Del Destino Turístico Los Cabos. Recabado de: <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2014/09/SECCION-V.-LOS-CABOS.pdf>

Güereca, L., Zamorano, S., León-Lira, R., Paredes, G., Rivera-Huerta, A., Ruiz, D., García, M. & Rolón, I. (2021). Guía para el Desarrollo de Análisis de Ciclo de Vida de Energías del Océano. Cemio-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 124 p. Recabado de: <https://cemiooceano.mx/downloads/libros/Ciclo-de-vida.pdf>

Hernández-Fontes, J., Felix, A., Mendoza, E., Rodríguez, Y. & Silva, R. (2019). On the Marine Energy Resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 191. MDPI AG. Recabado de: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse7060191>

H. XII Ayuntamiento de Los Cabos (2018). Plan de Desarrollo Municipal 2018-2021. Recabado de: <https://transparencialoscabos.gob.mx/wp-content/uploads/2019/05/PDM2019.pdf>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2020). Censo General de Población y Vivienda 2020. México: INEGI.

López-González, J., Hiriart-Le, G. & Silva-Casarín, R. (2009). Cuantificación de energía de una planta mareomotriz. Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XI. Núm. 2. 2010 233-245, ISSN1405-7743 FI-UNAM.

Magar, V., Godínez, V., Gross, M., López-Mariscal, M., Bermúdez-Romero, A., Candela, J., & Zamudio, L. (2020). In-Stream Energy by Tidal and Wind-Driven Currents: An Analysis for the Gulf of California. Energies, 13(5), 1095. MDPI AG. Recabado de: <http://dx.doi.org/10.3390/en13051095>

Marín, E., Roldán, M., Sánchez, C., Enríquez, C., Félix, A., Silva, R. & Mendoza, E (2020). Energía del Océano. Energía del Gradiente Salino. CEMIE-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 57 p. Recabado de: <https://cemieoceano.mx/downloads/libros/Gradiente%20Salino%20CEMIE-Océano.pdf>

Marco, U., Hernández-Goitortua, R., Silva, R., Mendoza, E., Félix, A. & Díaz-Maya, M. (2021). Wavestar: Un convertidor de energía del oleaje viable para el Golfo de México.

Martínez, R., Ordériz, I., Mendoza, E. & Silva, R. (2013). WAPO and COCO models. Quick Guide. Engineering Institute, National University of Mexico.

Mejia-Olivares, C., Haigh, I., Angeloudis, A., Lewis, M. & Neill, S. (2020). Tidal range energy resource assessment of the Gulf of California, Mexico. *Renewable Energy*, Volume 155. Pages 469-483. Recabado de: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.086>.

Mejia-Olivares, C., Haigh, I., Lewis, M. & Neill, S. (2020). Sensitivity assessment of bathymetry and choice of tidal constituents on tidal-stream energy resource characterisation in the Gulf of California, Mexico. *Applied Ocean Research*, Volume 102. Recabado de: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102281>.

Mejia-Olivares, C., Haigh, I., Wells, N., Lewis, M. & Neill, S. (2018). Tidal-stream energy resource characterization for the Gulf of California, México. *Energy*, Volume 156. Pages 481-491. Recabado de: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.074>.

Moctezuma, M., Godínez, C., & Narro, C. (2021). Área Protegida de Flora y Fauna de Cabo San Lucas. *Derecho Ambiental y Ecología*, 85, 59–63.

National Weather Service. (n.d.). Cold & Warm Episodes by Season. Recabado de: Climate Prediction Center: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Organización de las Naciones Unidas (2015). Convención: Marco sobre el Cambio Climático. Aprobación del Acuerdo de París. Recabado de: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09r01s.pdf>

Redacción BCS Noticias. (2017, 4 marzo). Esperan que se recuperen solas, las cascadas de arena en Los Cabos dañadas por 'Odile'. BCS Noticias. Recabado de: <https://www.bcsnoticias.mx/esperan-que-se-recuperen-solas-las-cascadas-de-arena-en-los-cabos-danadas-por-odile/>

Silva, D., Rusu, E., & Soares, C. (2013). Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore. *Energies*, 6(3), 1344–1364. MDPI AG. Recabado de: <http://dx.doi.org/10.3390/en6031344>

Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Instituto de Ingeniería UNAM. México.

Silva, R. (2010). Manual del usuario y documento de referencia del programa MWAPO4. Instituto de Ingeniería UNAM. México.

Silva, R., Montiel, J., Alcérreca, J. & Divers, A. (2017). Estudios para el Monitoreo, Conservación y Manejo de los Recursos Naturales de las Cascadas de Arena Submarinas de Cabo San Lucas, 2017 - Seguimiento y Continuación de Estudios en CAS de CSL, Análisis de Vulnerabilidad y Erosión del Historial asociado a las CAS de CSL. CONANP. Recabado de: <https://inefectividad.conanp.gob.mx/inefectividad/PBCPN/APFF%20Cabo%20San%20Lucas/CONTEXTO%20Y%20PLANEACION/Informacion%20sobre%20recursos%20naturales/Cascadas%202017.pdf>

Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación (SIMEC), Consulta de Fichas ANP Cabo San Lucas. Recabado de: https://simec.conanp.gob.mx/ficha_pdf.php?anp=113®=1

SMN, Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>)

Troyo, E., Mercado, G., Cruz, A., Nieto, A., Valdez, R., García, J. y Murillo, B. (2014), “Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 85, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 66-81, dx.doi.org/10.14350/ig.32404.

UNESCO World Heritage Centre. (s. f.-b). UNESCO World Heritage Centre - List of World Heritage in Danger. UNESCO. Recuperado 1 de agosto de 2021, de <http://whc.unesco.org/en/danger/>

UNESCO World Heritage Centre. (s. f.). Islands and Protected Areas of the Gulf of California. UNESCO. Recuperado 1 de agosto de 2021, de <http://whc.unesco.org/en/list/1182>

Unsplash, U. (s. f.). Beautiful Free Images & Pictures. Unsplash. <https://unsplash.com>

Ventura, Y., Rodríguez, Y., Odériz, I., Chávez, V., Mori, N., Felix, A., Cerdeira-Estrada, S. & Silva, R. (2022). New assessment of wave energy in relation to geomorphological and demographic characteristics on the Pacific coast of Baja California, Mexico (Aceptado). *Frontiers in Marine Science*.

Anexos

Anexo 1: Clima marítimo

Rosas de Altura de Ola y Periodo en años del Niño, de La Niña y neutros

22.5 °N 110 °W

Registro completo

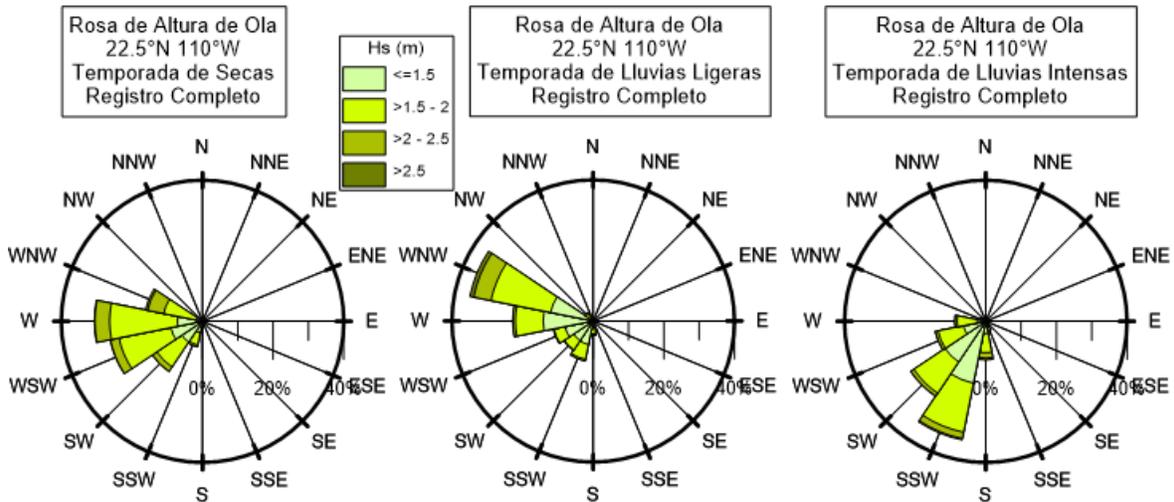


Figura 22. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

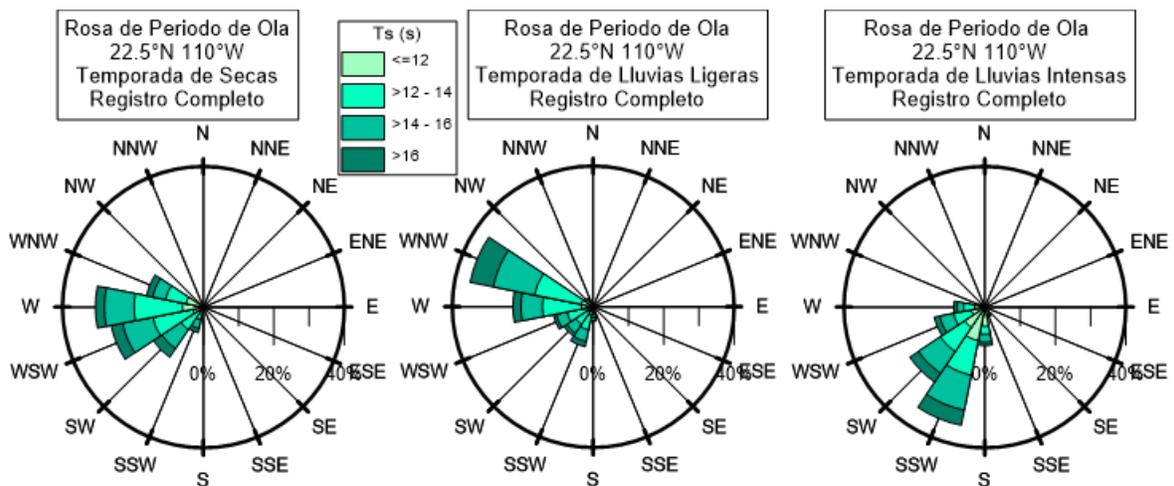


Figura 23. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

Temporada de Secas

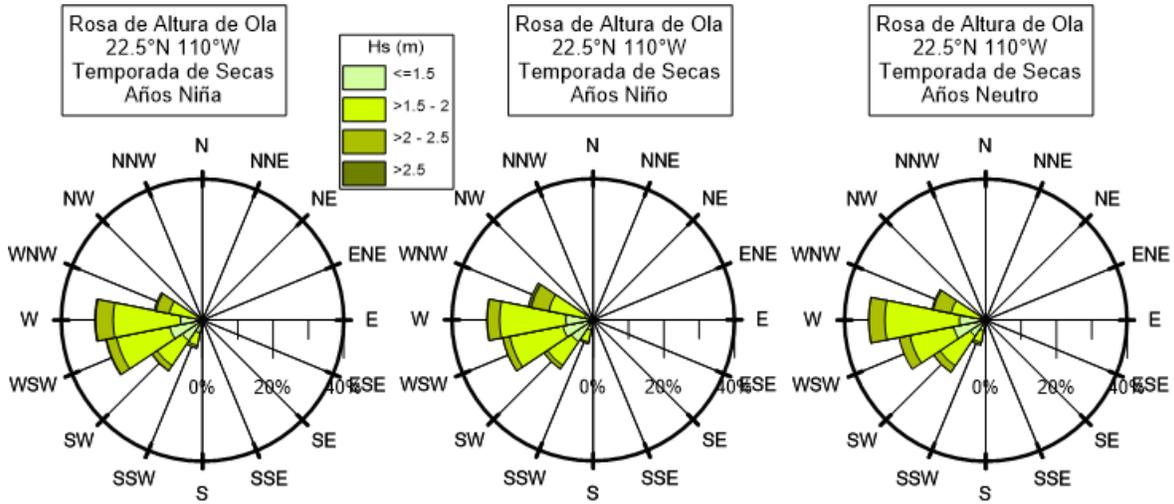


Figura 24. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

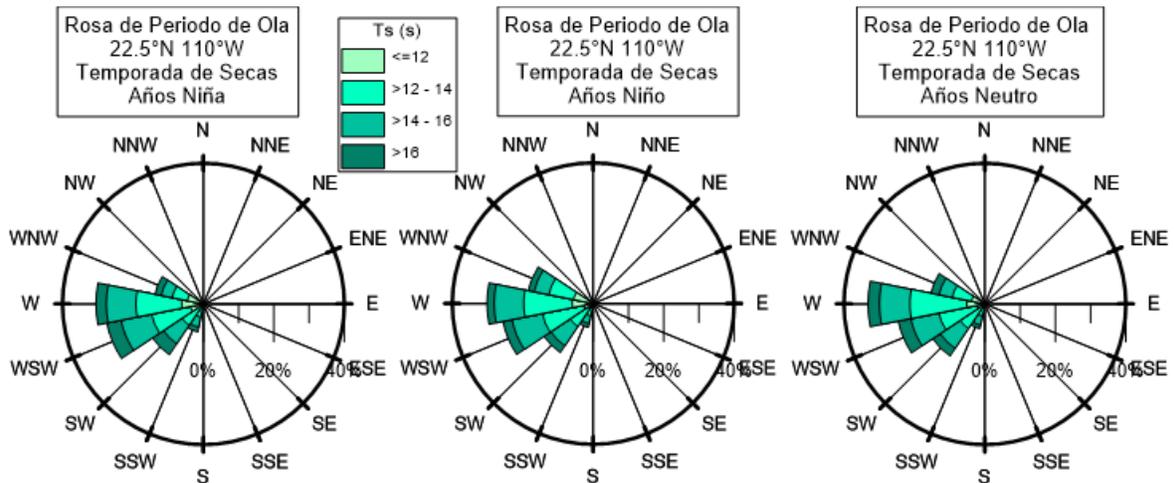


Figura 25. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der)

Temporada de Lluvias Ligeras

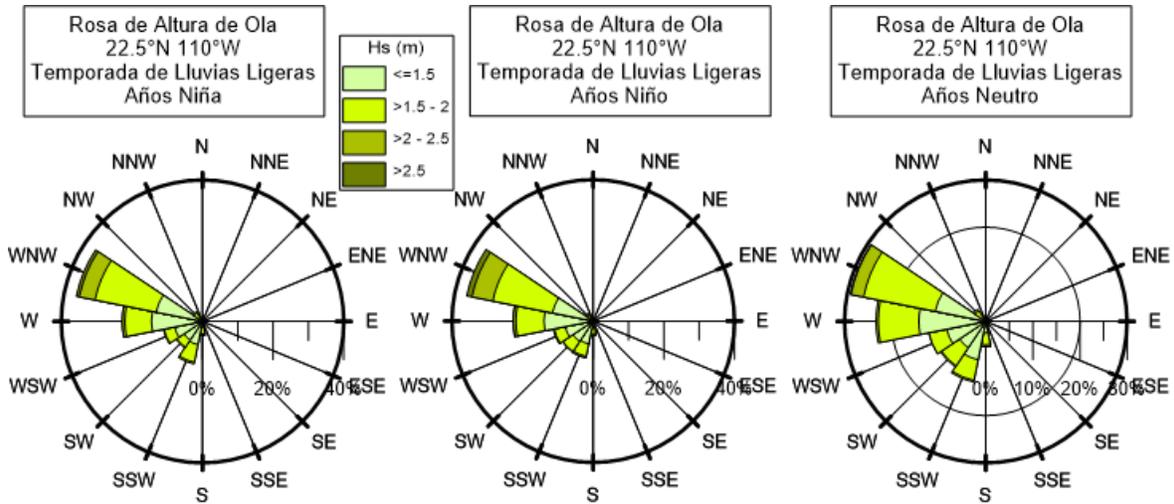


Figura 26. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

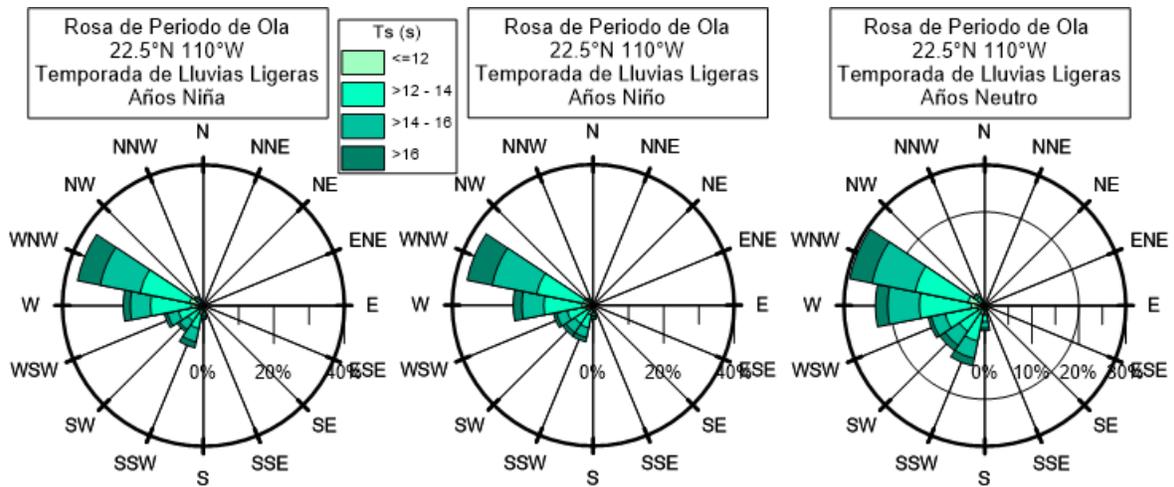


Figura 27. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Temporada de Lluvias Intensas

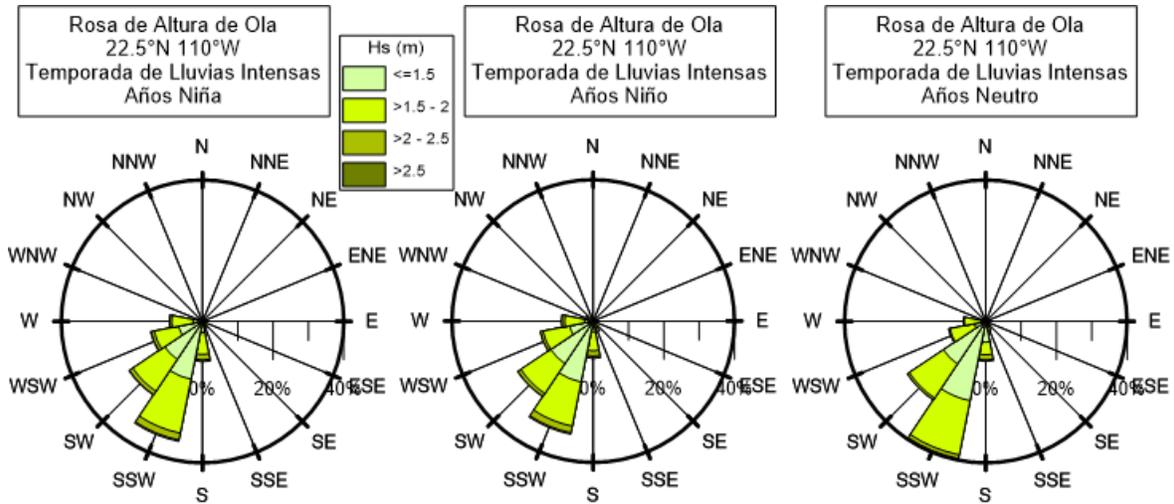


Figura 28. Rosas de Altura de Ola 22.5°N 110°W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

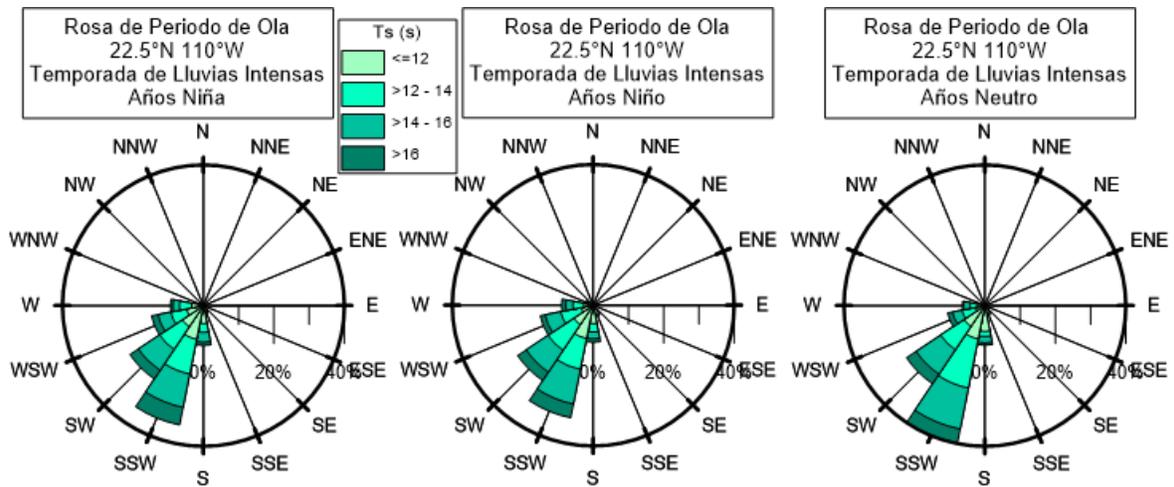


Figura 29. Rosas de Periodo de Ola 22.5°N 110°W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

23 °N 109.5 °W

Registro completo

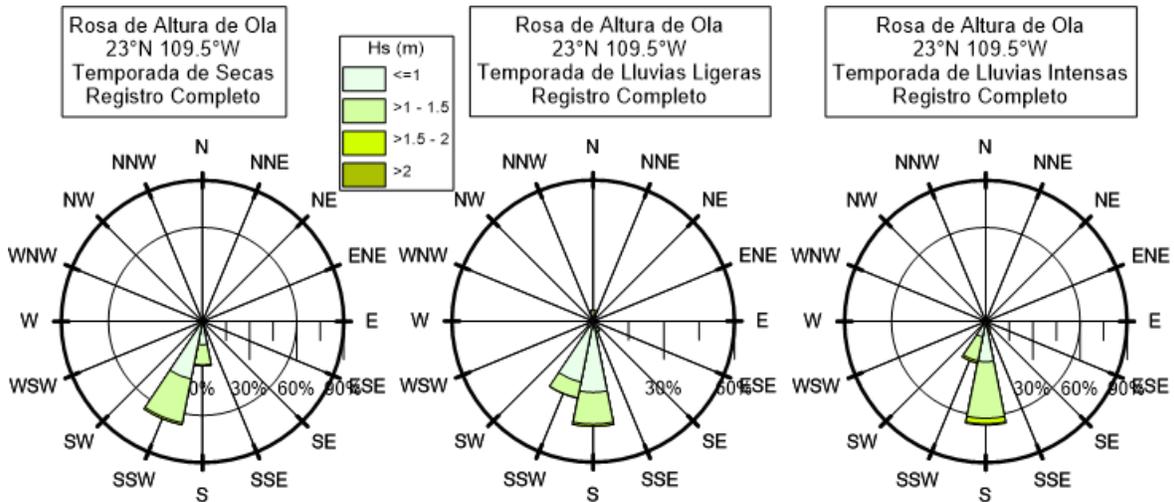


Figura 30. Rosas de Altura de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

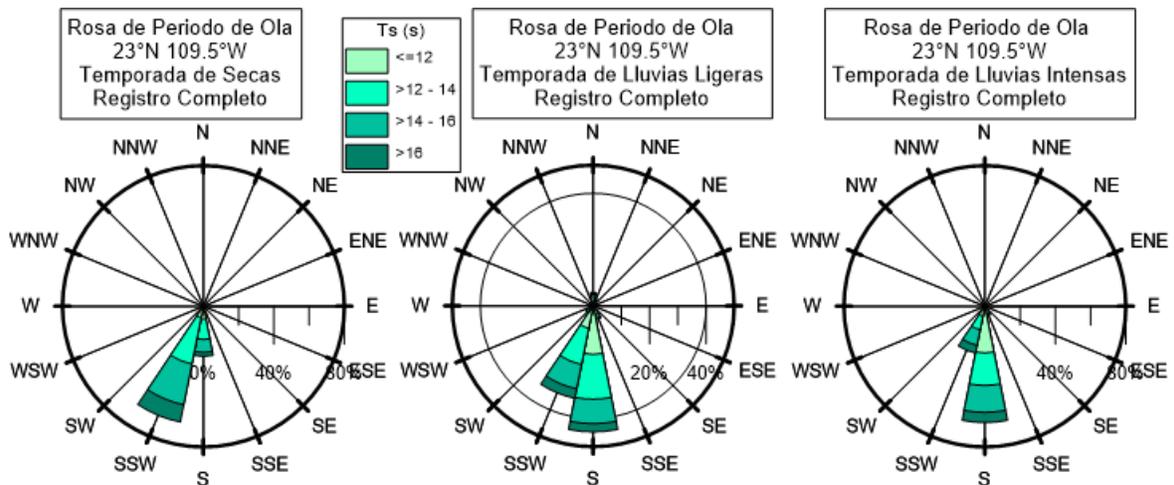


Figura 31. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

Temporada de Secas

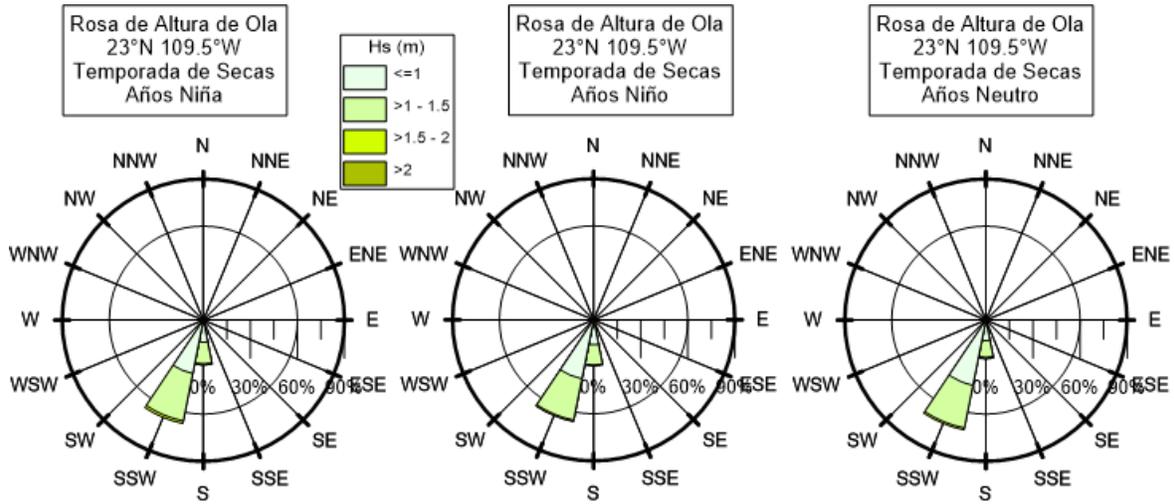


Figura 32. Rosas de Altura de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

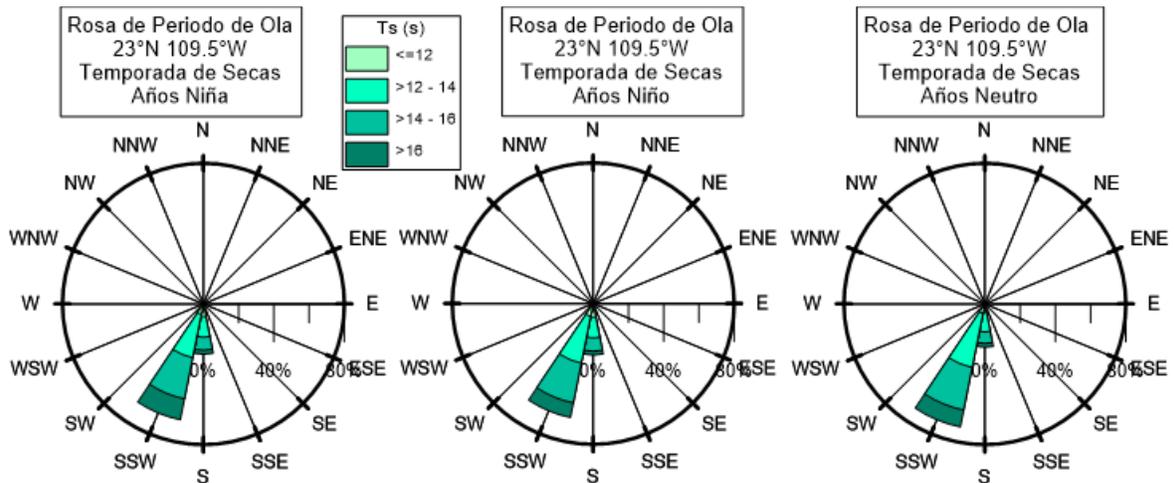


Figura 33. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Temporada de Lluvias Ligeras

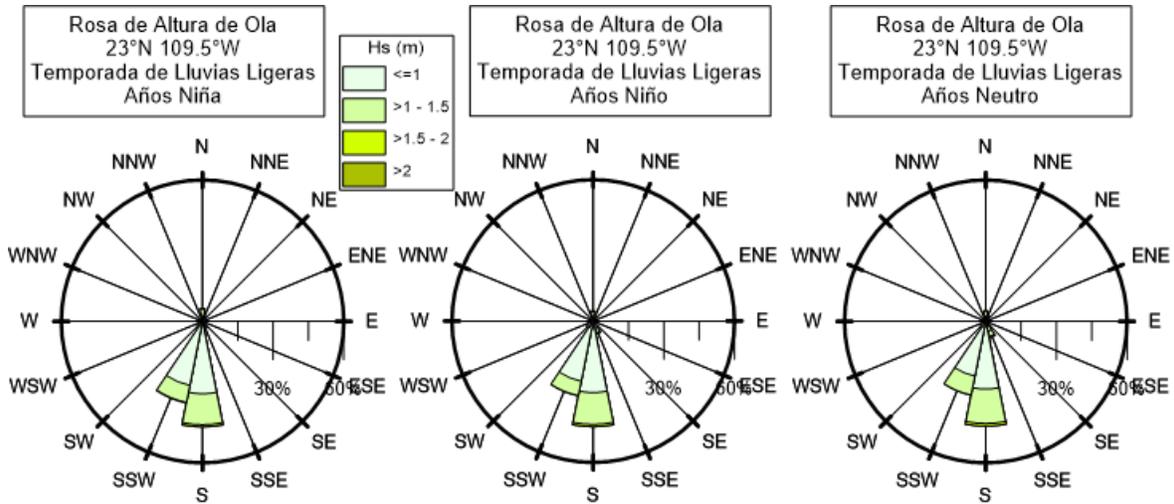


Figura 34. Rosas de Altura de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

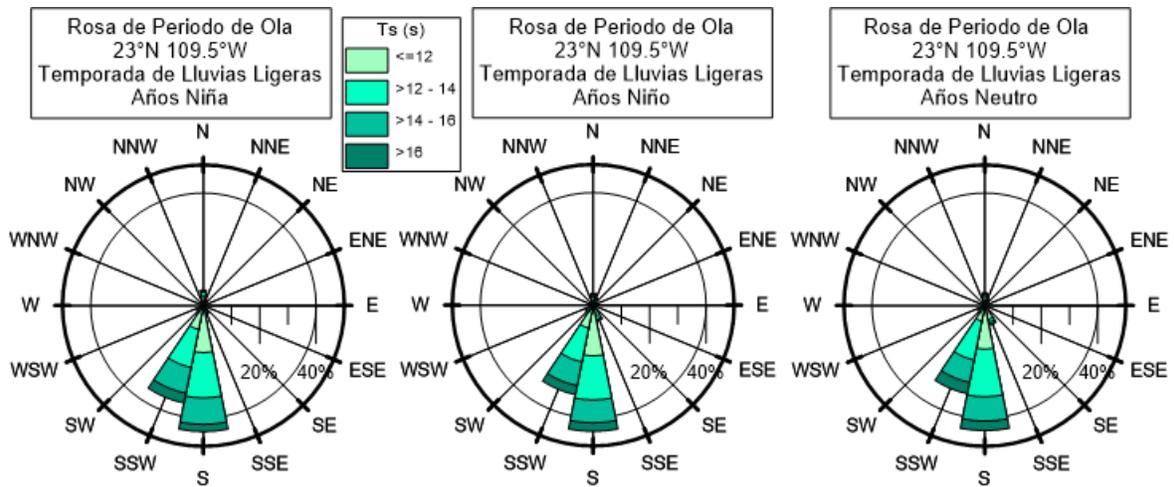


Figura 35. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Temporada de Lluvias Intensas

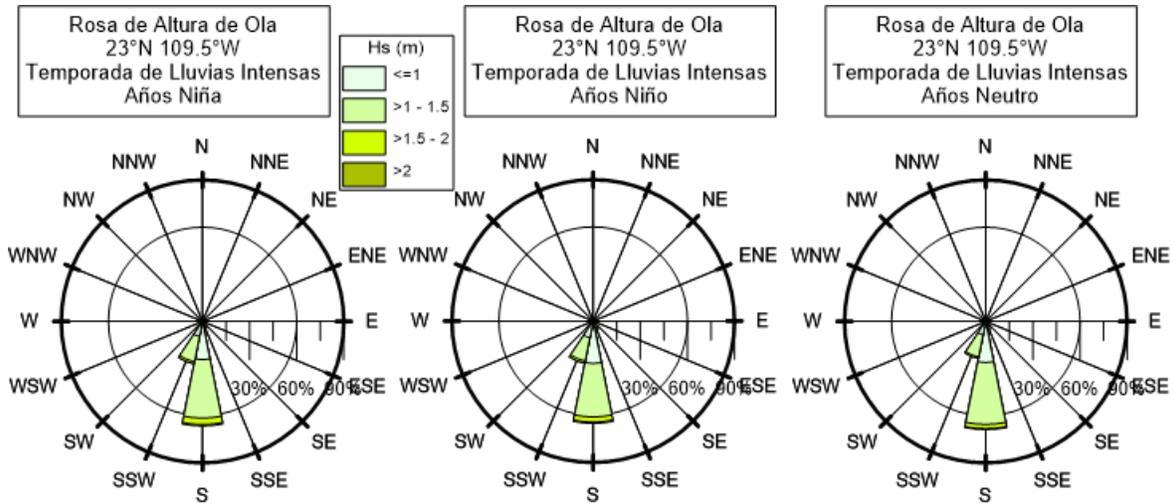


Figura 36. Rosas de Altura de Ola 23°N 109.5°W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

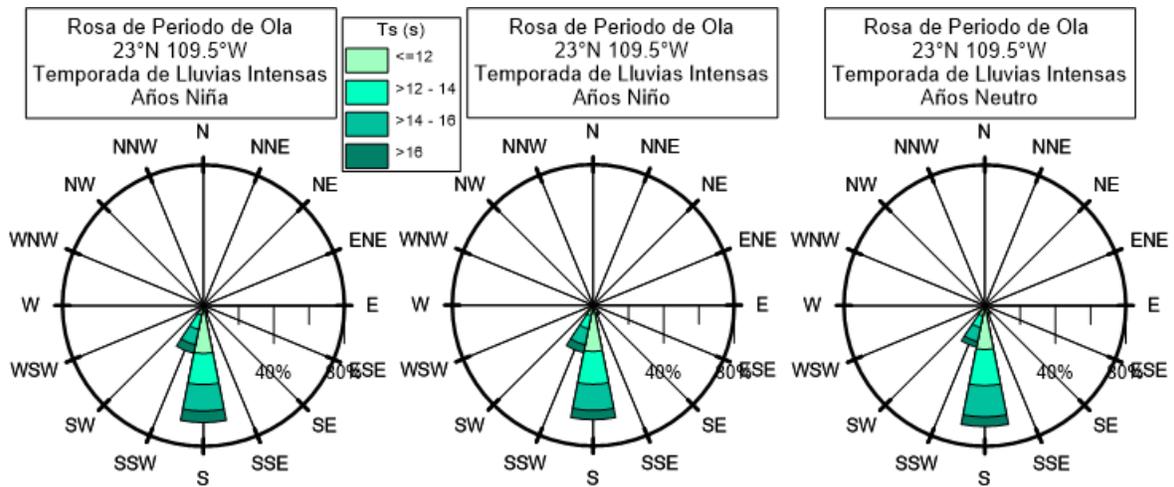


Figura 37. Rosas de Periodo de Ola 23°N 109.5°W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der)

23 °N 110.5 °W

Registro Completo

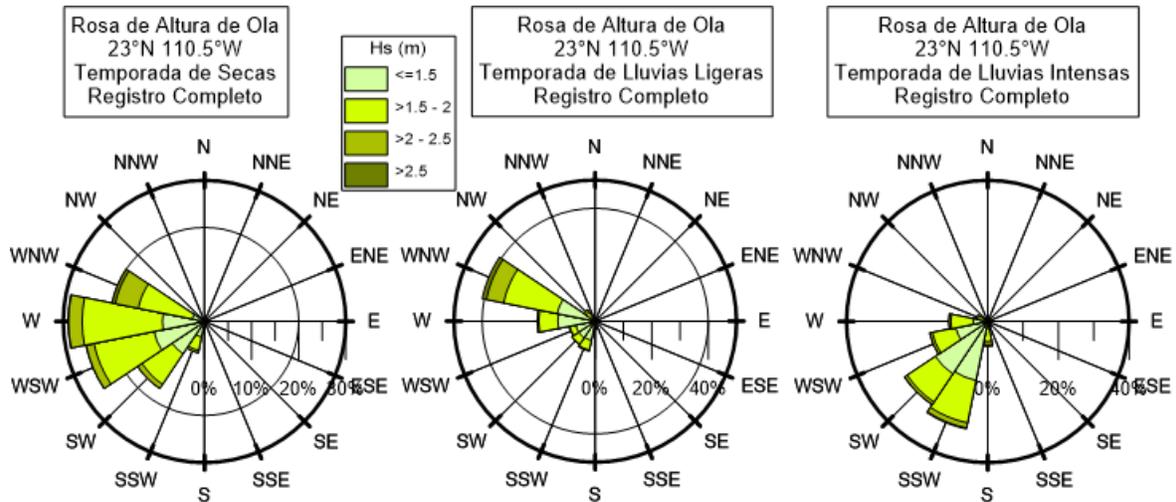


Figura 38. Rosas de Altura de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

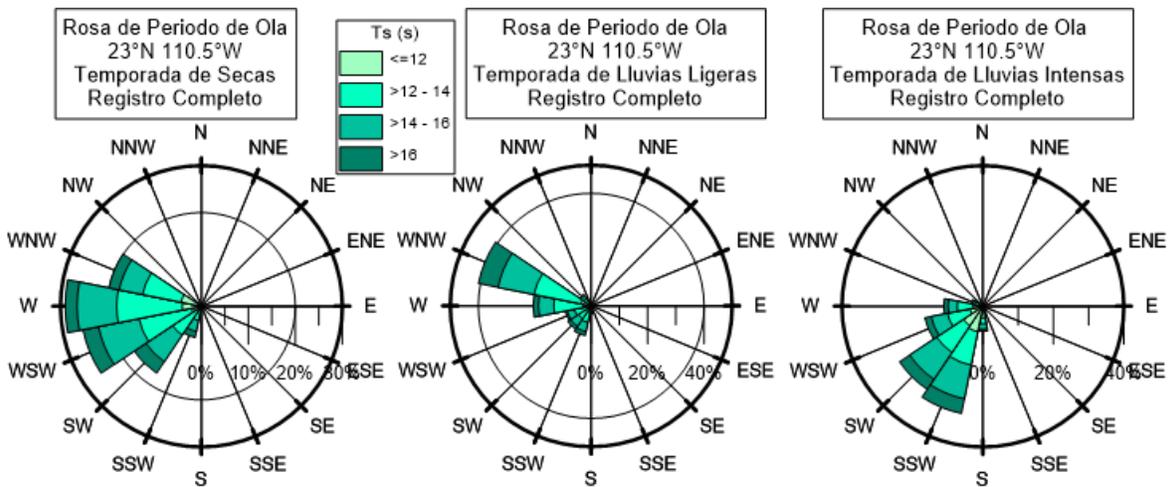


Figura 39. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

Temporada de Secas

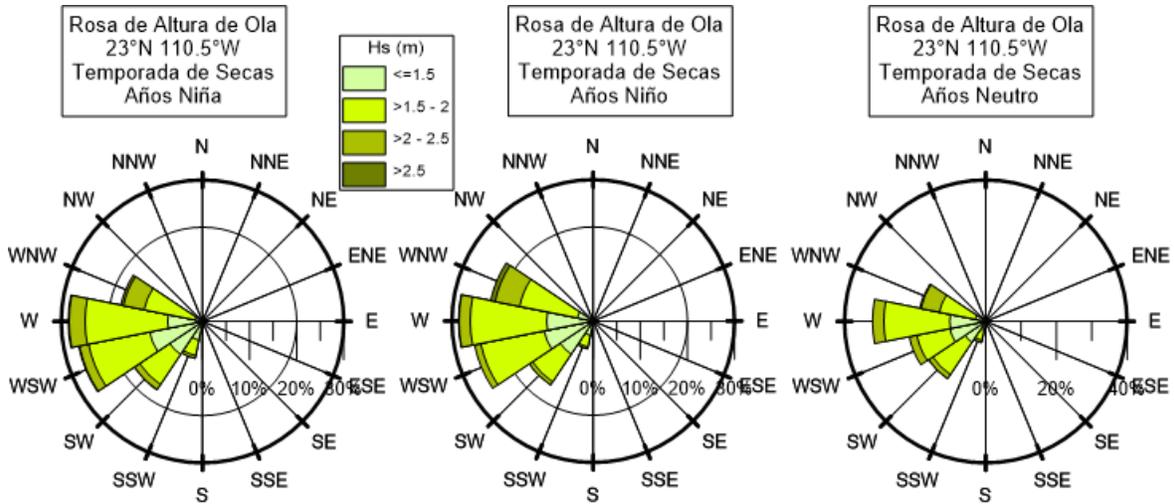


Figura 40. Rosas de Altura de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

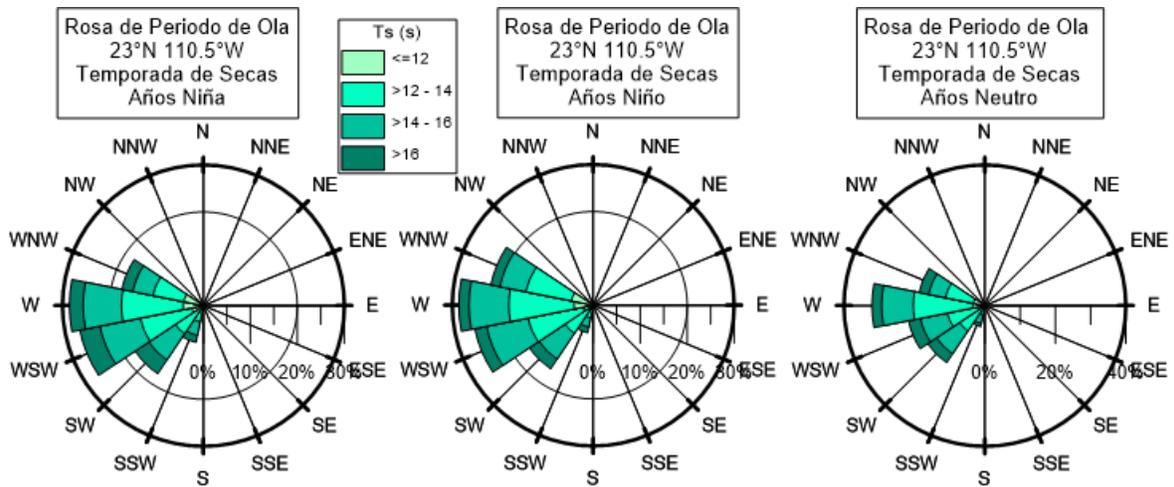


Figura 41. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Temporada de Lluvias Ligeras

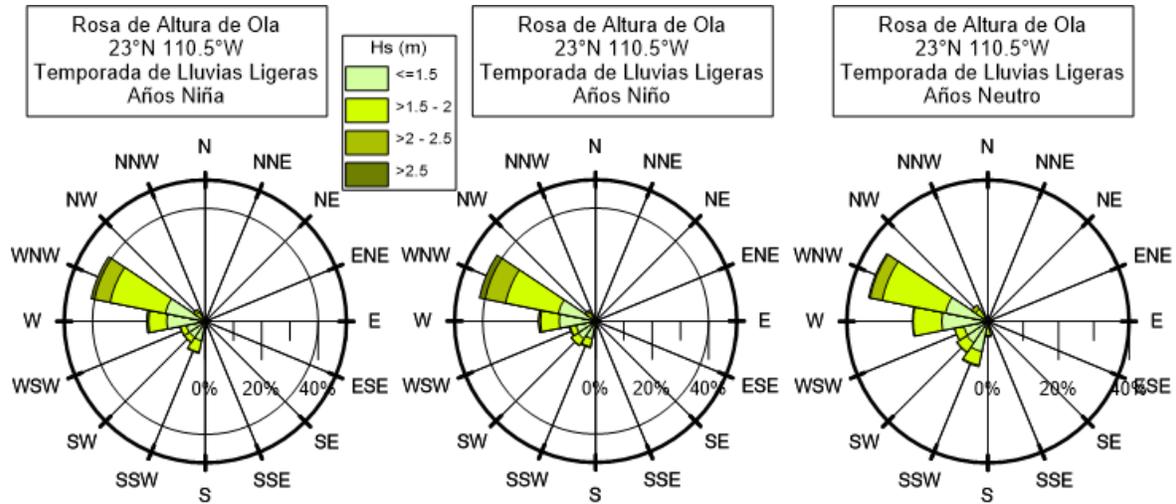


Figura 42. Rosas de Altura de Ola $23^{\circ}\text{N } 110.5^{\circ}\text{W}$ temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

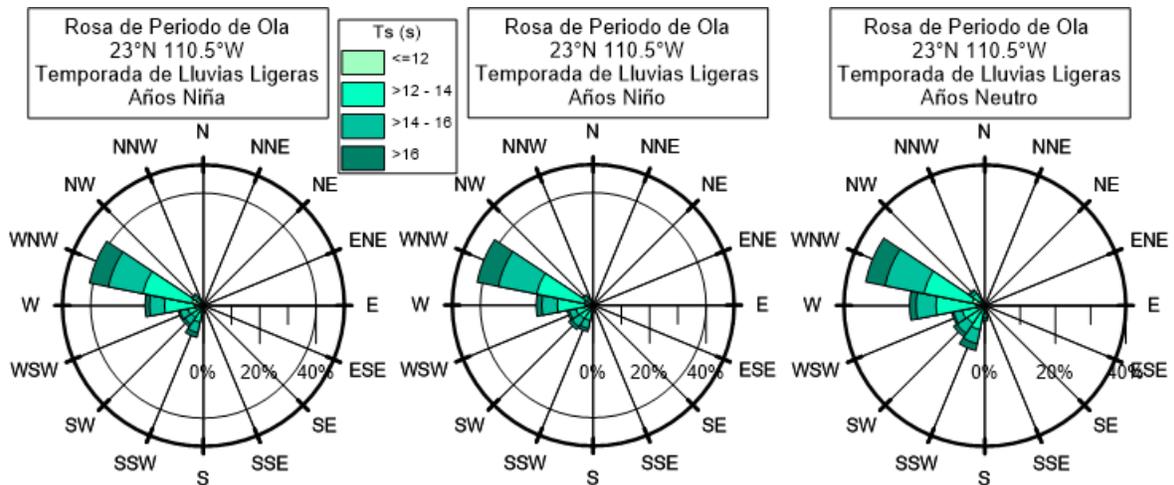


Figura 43. Rosas de Periodo de Ola $23^{\circ}\text{N } 110.5^{\circ}\text{W}$ temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Temporada de Lluvias Intensas

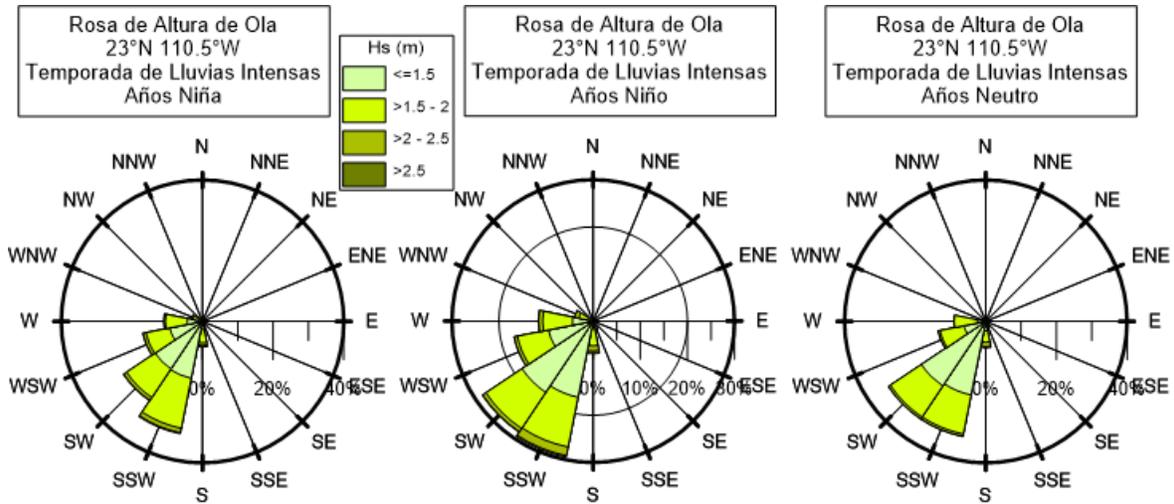


Figura 44. Rosas de Altura de Ola $23^{\circ}\text{N } 110.5^{\circ}\text{W}$ temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

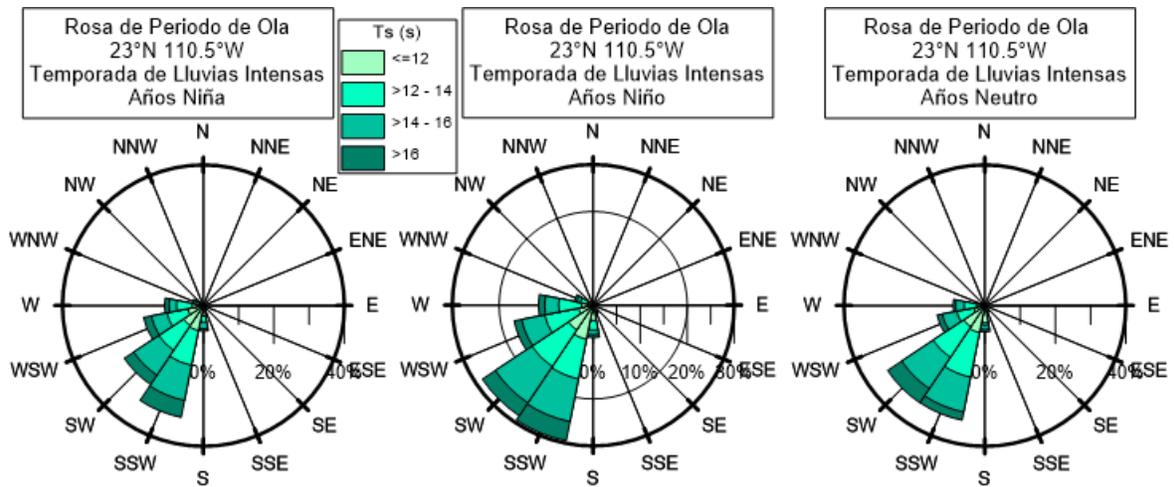


Figura 45. Rosas de Periodo de Ola $23^{\circ}\text{N } 110.5^{\circ}\text{W}$ temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

22.5 °N 109.5 °W

Registro Completo

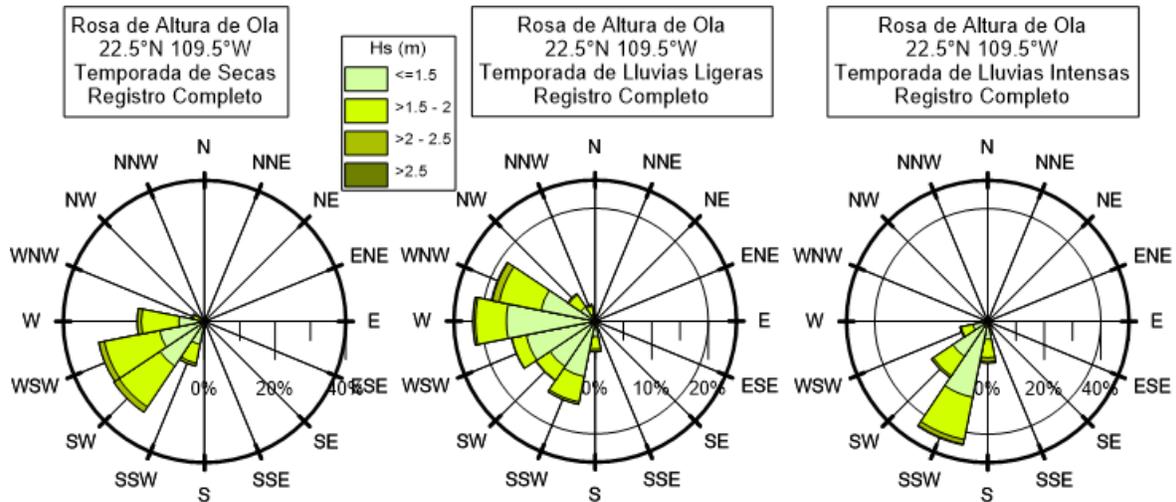


Figura 46. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

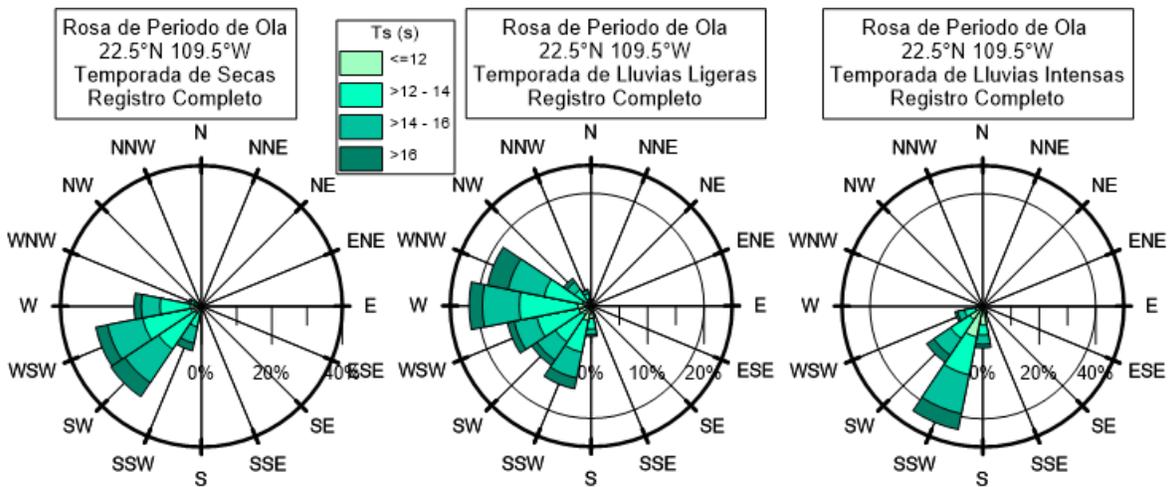


Figura 47. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)

Temporada de Secas

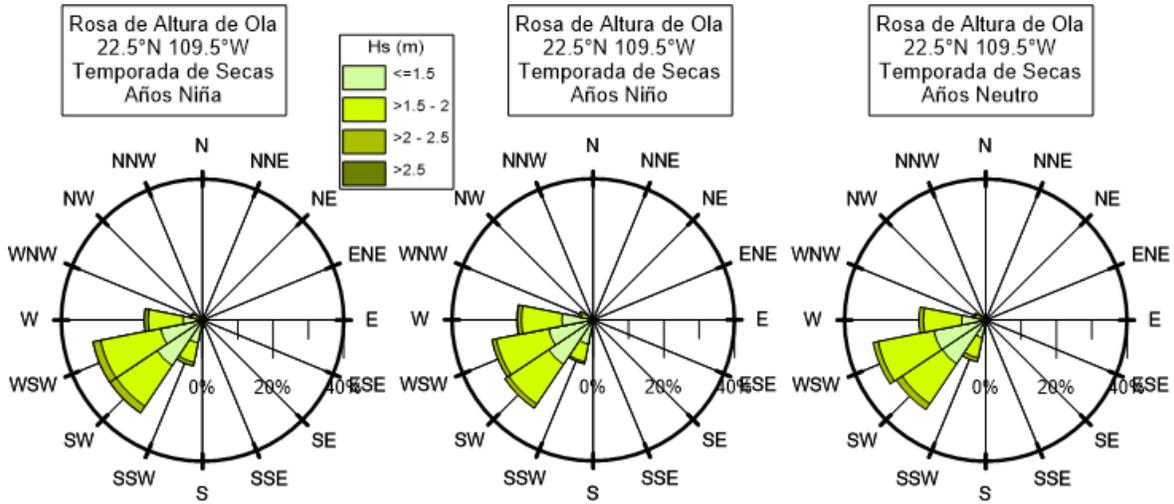


Figura 48. Rosas de Altura de Ola 22.5°N 109.5°W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

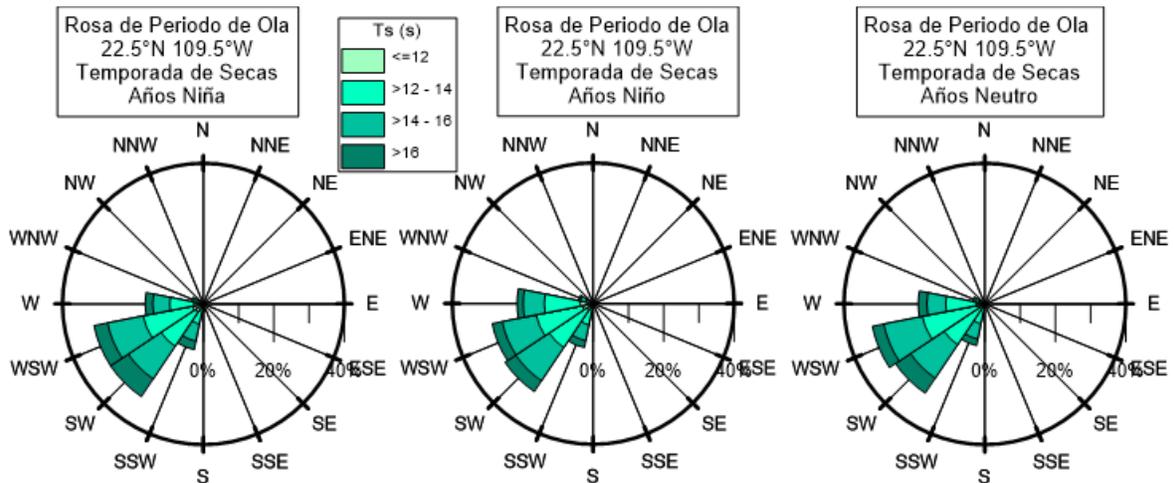


Figura 49. Rosas de Periodo de Ola 22.5°N 109.5°W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Temporada de Lluvias Ligeras

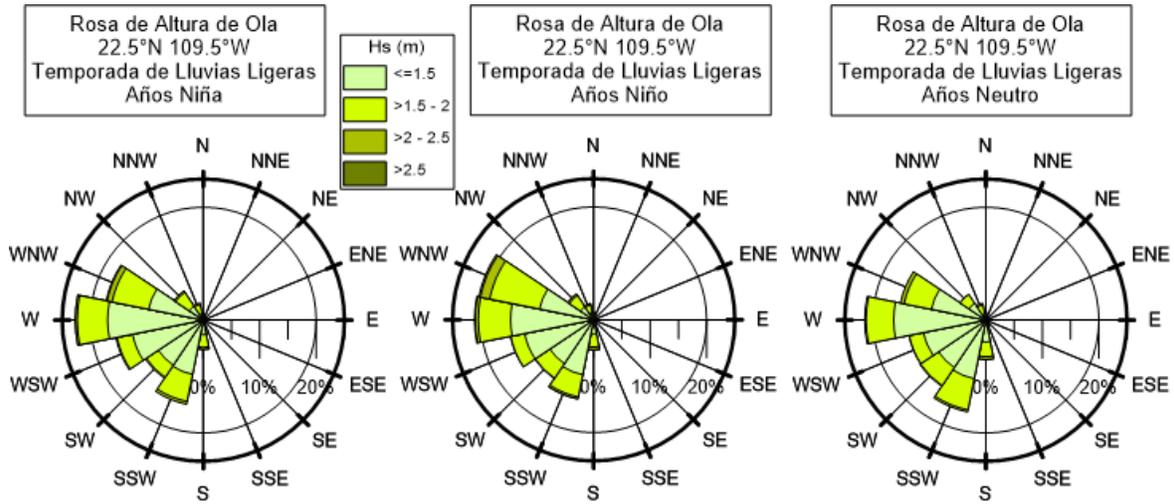


Figura 50. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

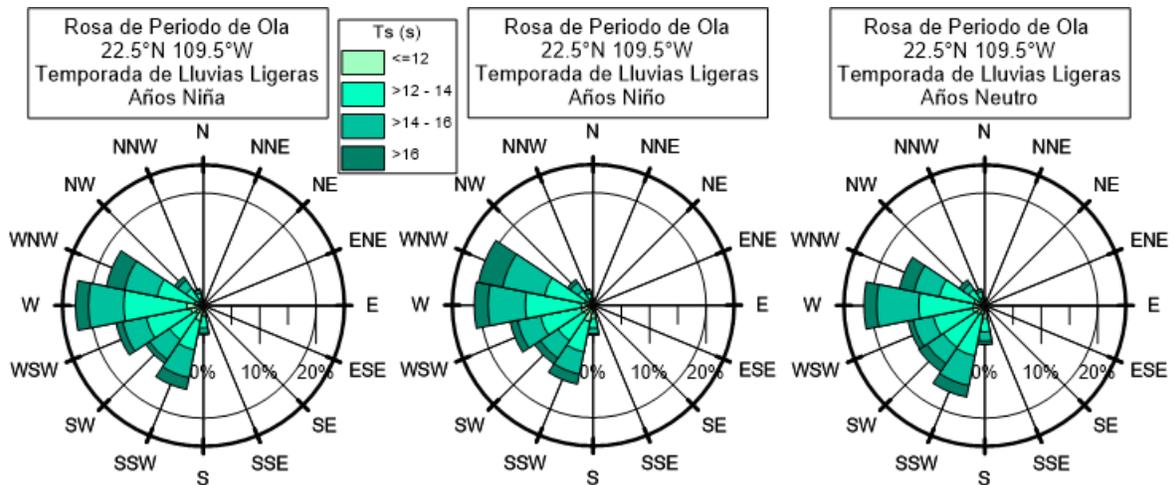


Figura 51. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Temporada de Lluvias Intensas

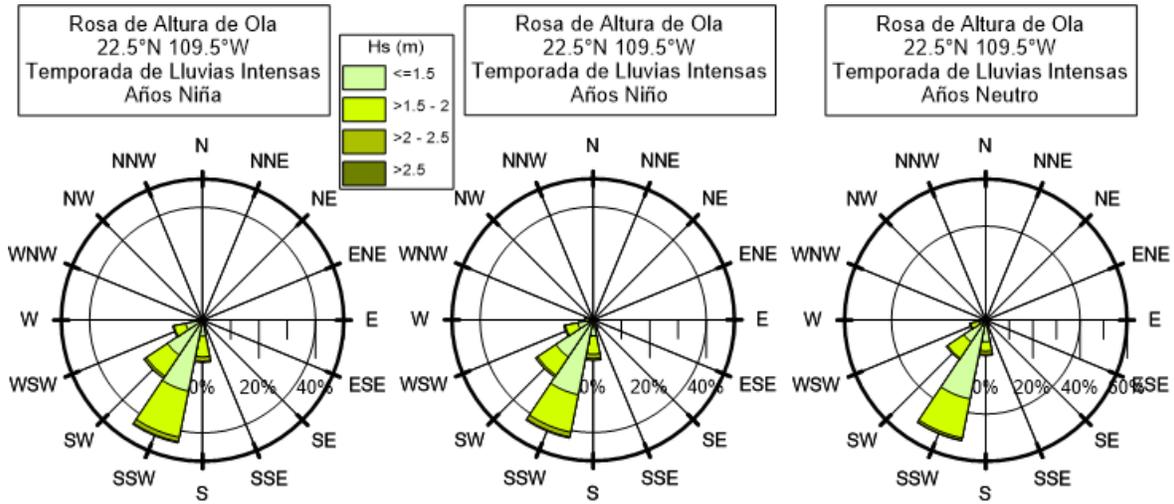


Figura 52. Rosas de Altura de Ola 22.5°N 109.5°W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

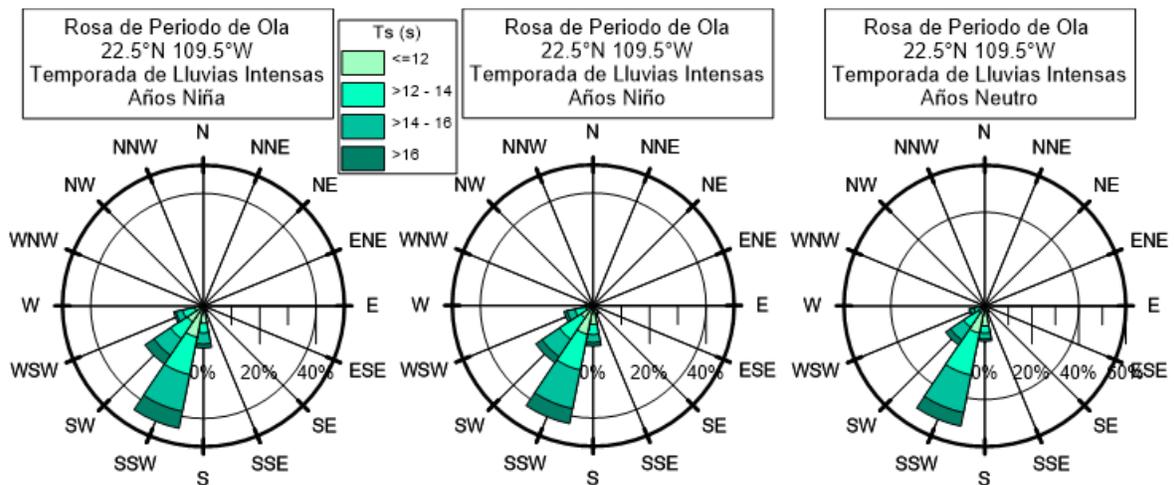


Figura 53. Rosas de Periodo de Ola 22.5°N 109.5°W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).

Parámetros estadísticos de altura de ola y periodo

22.5 °N 110 °W

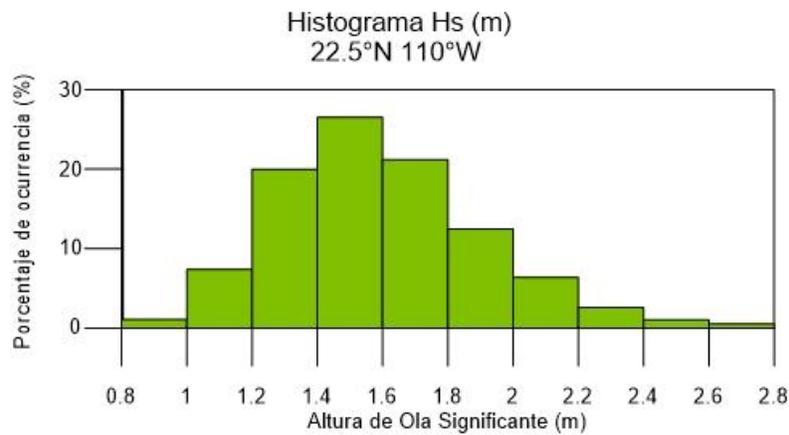


Figura 54. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 22.5 °N 110 °W

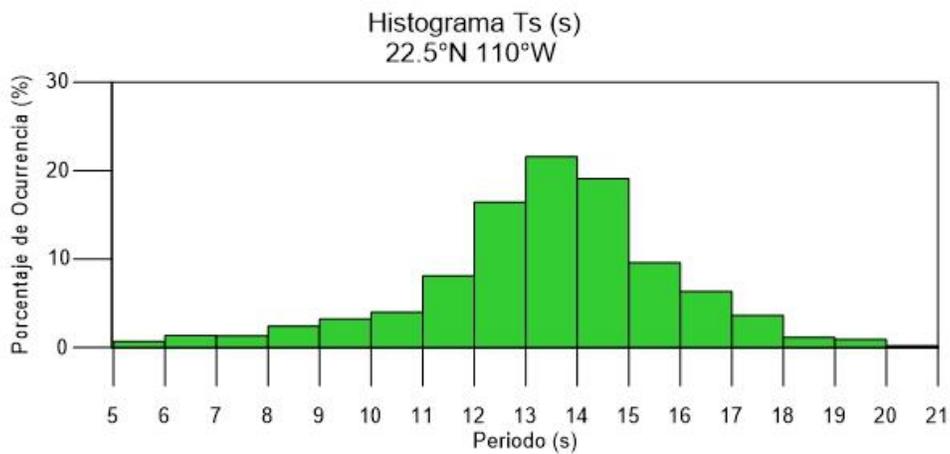


Figura 55. Histograma de frecuencias periodo de ola pico 22.5 °N 110 °W

Tabla 14. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 110 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Altura de Ola Significante (m)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	2.003	1.982	1.939
Temporada de lluvias intensas	2.036	2.003	1.936
Temporada de lluvias ligeras	1.962	1.890	1.825
Temporada de secas	2.013	2.046	2.039

Tabla 15. Parámetros estadísticos periodo de ola 22.5 °N 110 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Periodo de Ola Significante (segundos)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	13.718	13.917	13.722
Temporada de lluvias intensas	12.807	13.225	12.801
Temporada de lluvias ligeras	14.380	14.313	14.156
Temporada de secas	13.687	14.047	13.992

23 °N 109.5 °W

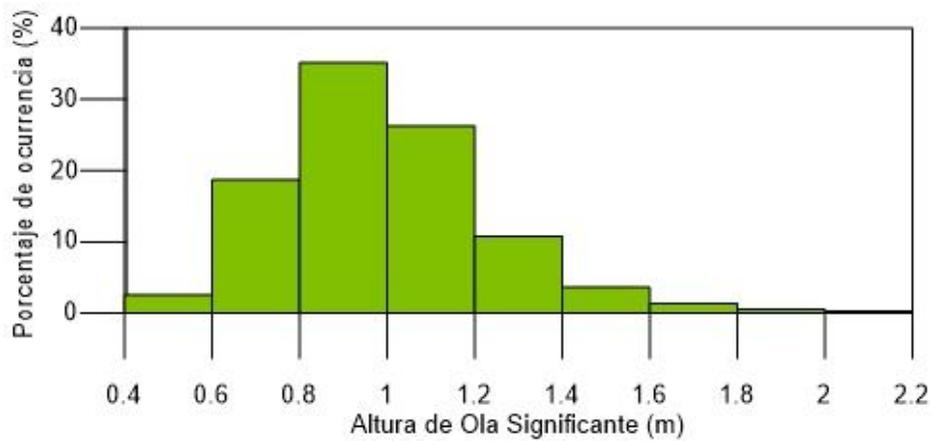


Figura 56. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 23 °N 109.5 °W

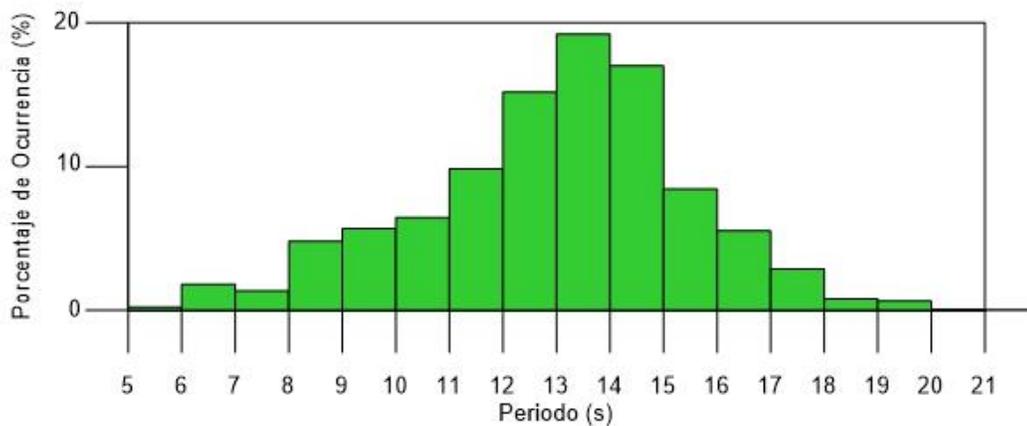


Figura 57. Histograma de frecuencias periodo de ola pico 23 °N 109.5 °W

Tabla 16. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Altura de Ola Significante (m)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	1.287	1.307	1.299
Temporada de lluvias intensas	1.504	1.511	1.469
Temporada de lluvias ligeras	1.185	1.184	1.204
Temporada de secas	1.213	1.257	1.259

Tabla 17. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Periodo de Ola Significante (segundos)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	13.279	13.576	13.413
Temporada de lluvias intensas	12.613	13.154	12.571
Temporada de lluvias ligeras	12.612	12.887	12.981
Temporada de secas	14.354	14.566	14.555

23 °N 110.5 °W

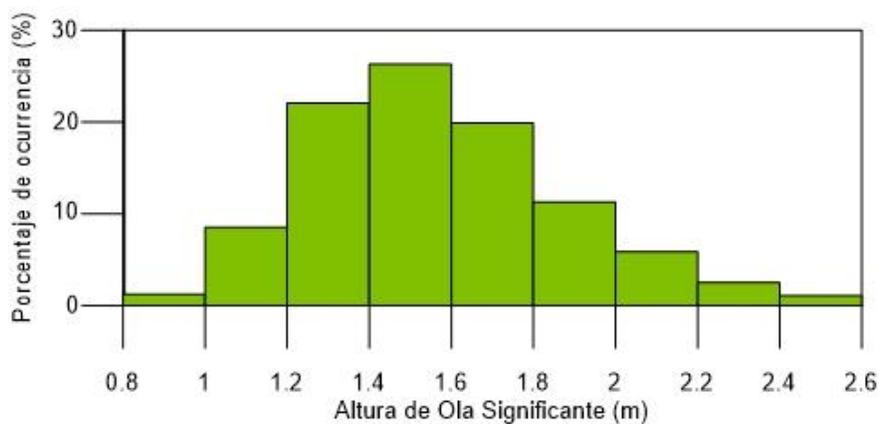


Figura 58. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 23 °N 110.5 °W

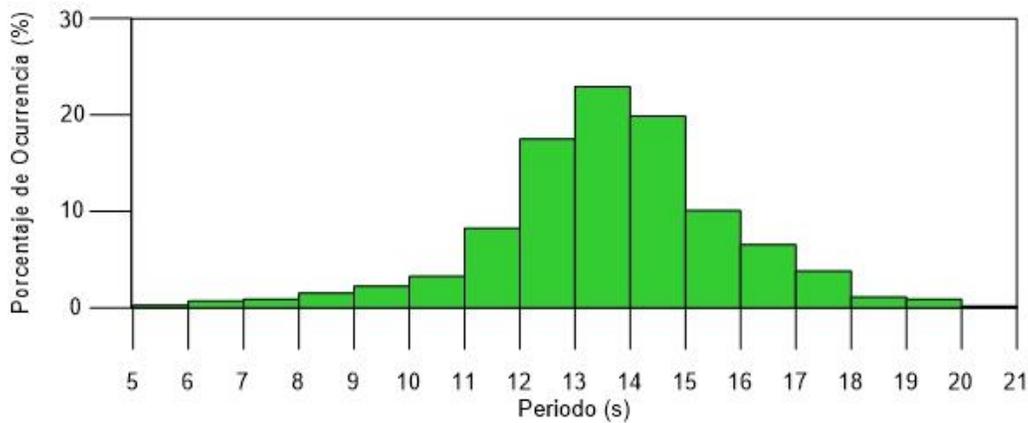


Figura 59. Histograma de frecuencias periodo de ola pico 23 °N 110.5 °W

Tabla 18. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 110.5 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Altura de Ola Significante (m)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	1.983	1.955	1.903
Temporada de lluvias intensas	1.942	1.919	1.834
Temporada de lluvias ligeras	2.003	1.924	1.847
Temporada de secas	1.980	2.004	1.996

Tabla 19. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 110.5 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Periodo de Ola Significante (segundos)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	14.083	14.222	14.112
Temporada de lluvias intensas	13.295	13.624	13.419
Temporada de lluvias ligeras	14.517	14.425	14.337
Temporada de secas	14.128	14.432	14.393

22.5 °N 109.5 °W

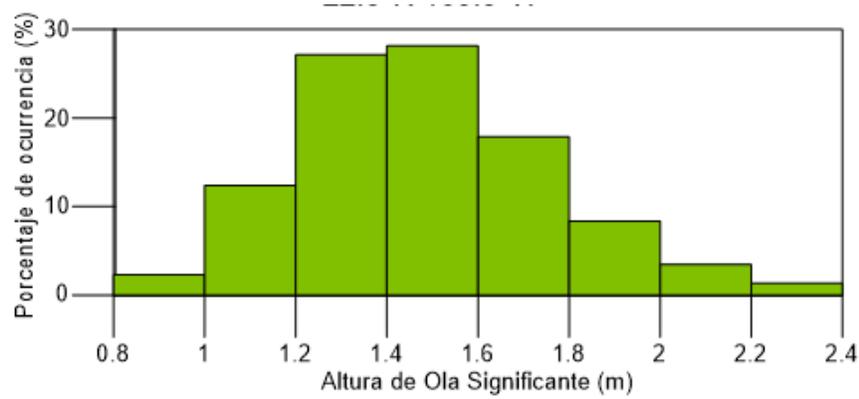


Figura 60. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 22.5 °N 109.5 °W

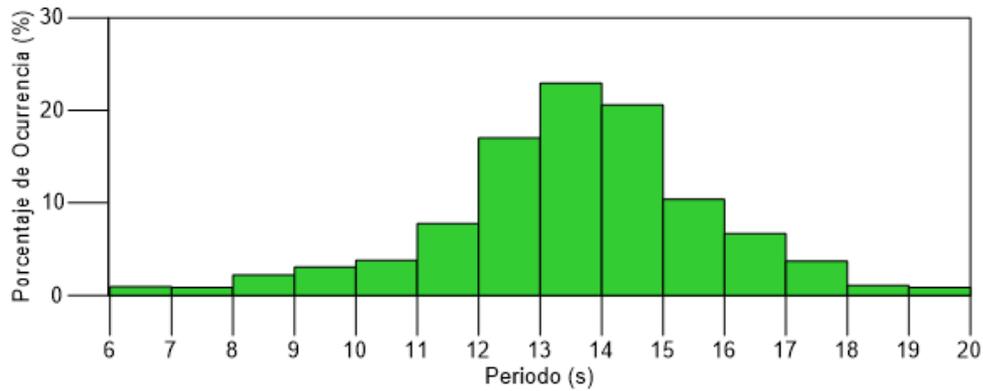


Figura 61. Histograma de frecuencias periodo de ola significativa 22.5 °N 109.5 °W

Tabla 20. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Altura de Ola Significante (m)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	1.861	1.853	1.828
Temporada de lluvias intensas	1.962	1.943	1.897
Temporada de lluvias ligeras	1.794	1.744	1.709
Temporada de secas	1.853	1.893	1.891

Tabla 21. Parámetros estadísticos periodo de ola 22.5 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña.

Conjunto de datos	Periodo de Ola Significante (segundos)		
	Años del Niño	Años de La Niña	Años neutros
Año completo	13.791	14.026	13.780
Temporada de lluvias intensas	12.919	13.334	12.791
Temporada de lluvias ligeras	13.948	13.927	13.729
Temporada de secas	14.255	14.598	14.465

Probabilidad conjunta altura y periodo de ola 22.5 °N 109.5 °W

Registro Completo

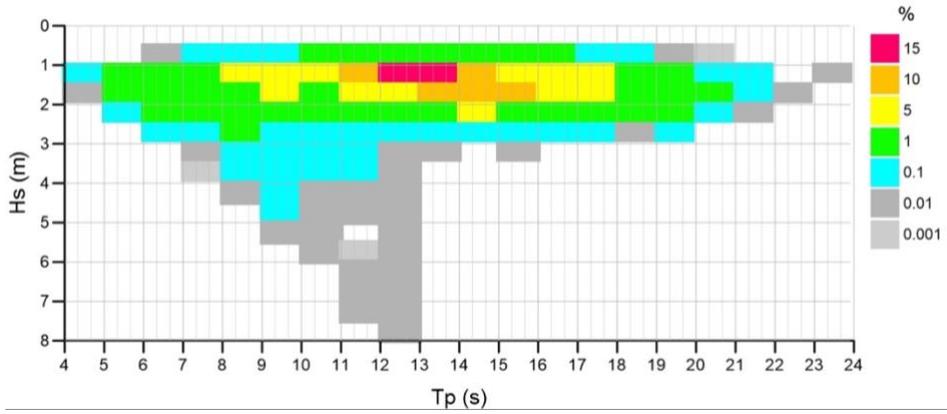


Figura 62. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W registro completo años niña.

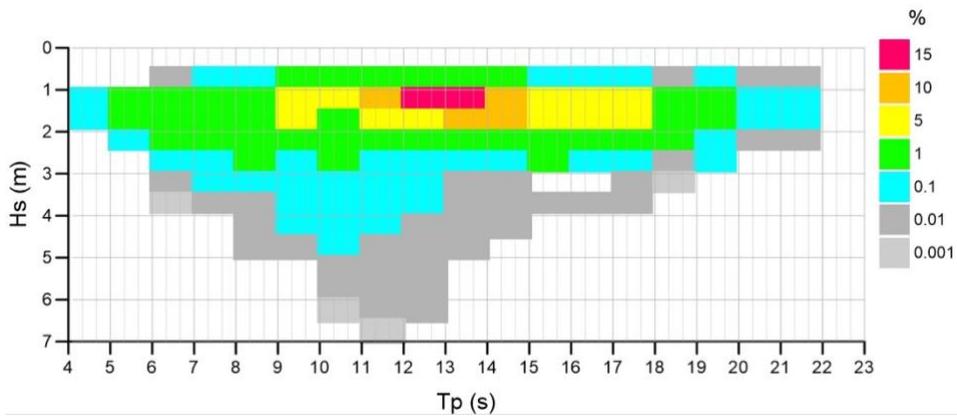


Figura 63. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W registro completo años niño.

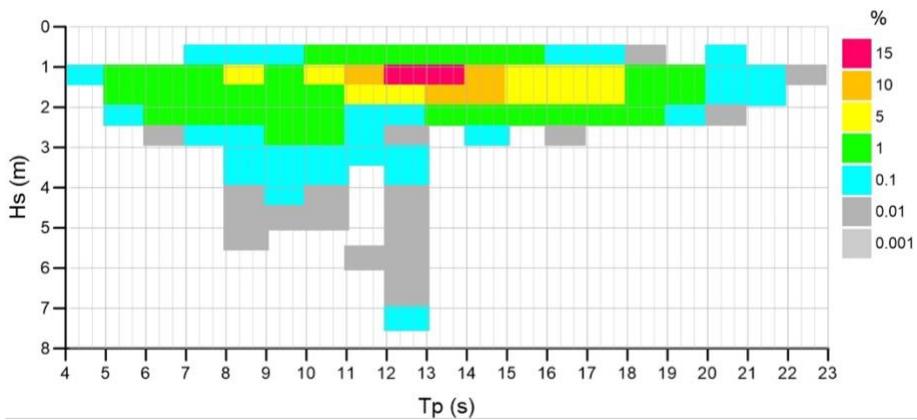


Figura 64. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W registro completo años neutro.

Temporada de Secas

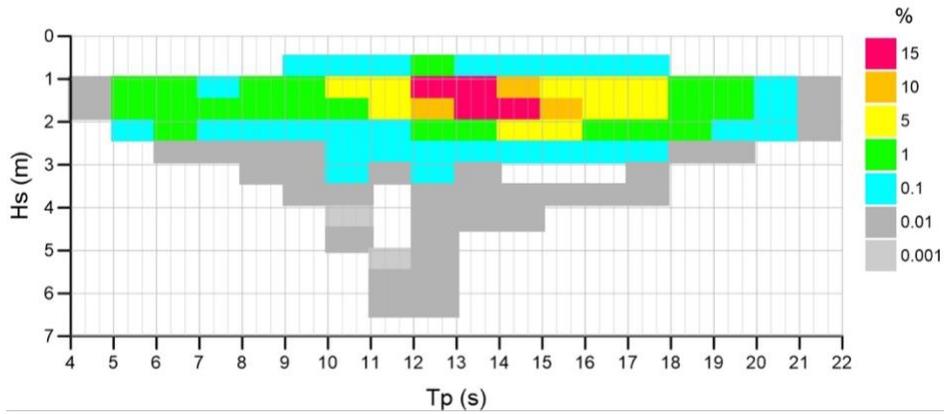


Figura 65. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas.

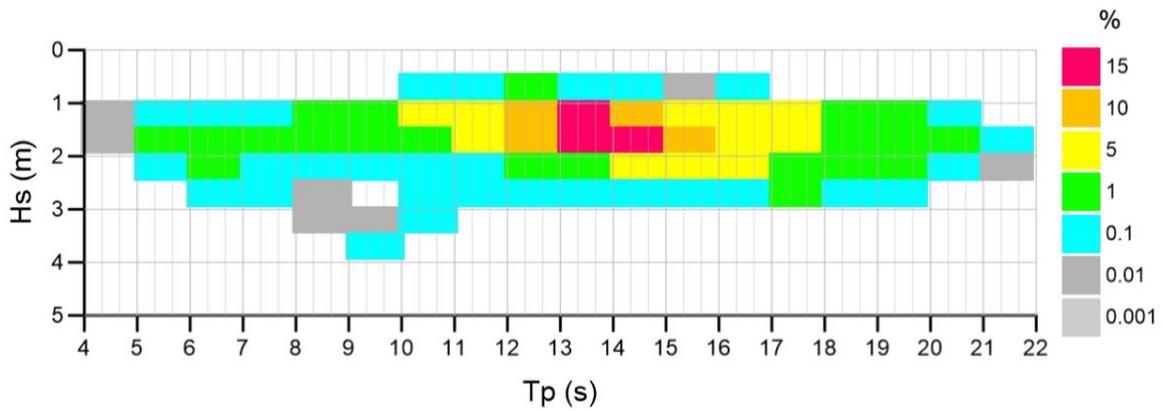


Figura 66. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas años niña.

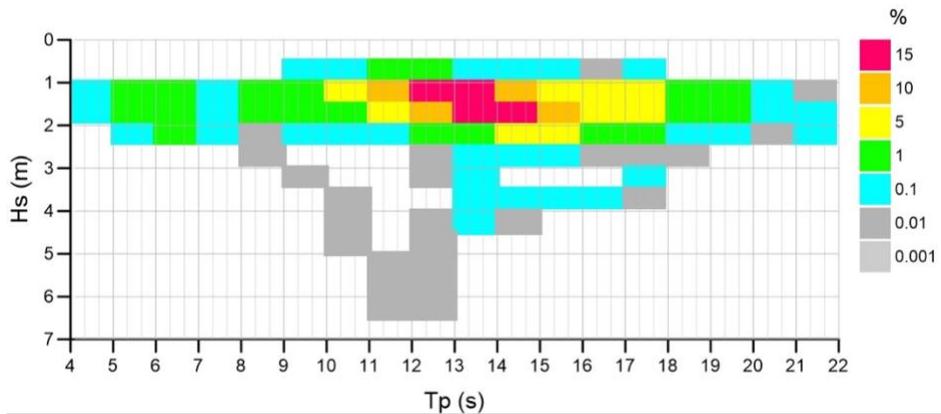


Figura 67. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas años niño.

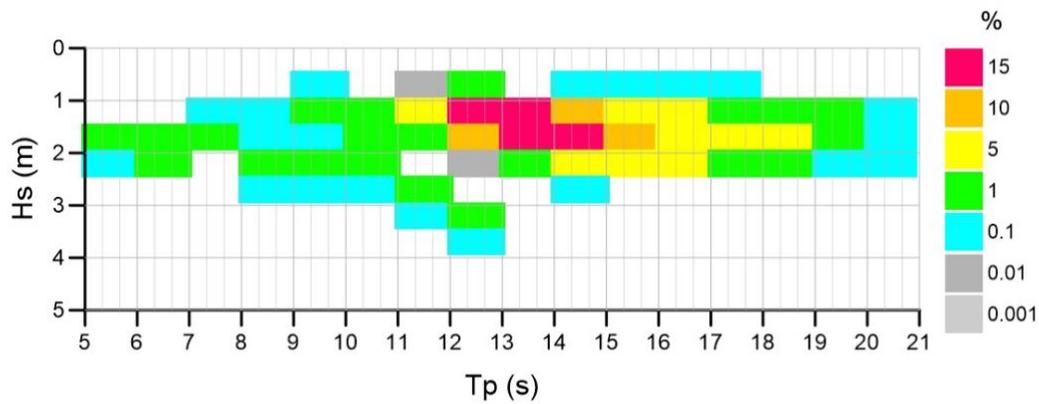


Figura 68. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas años neutro.

Temporada de Lluvias Intensas

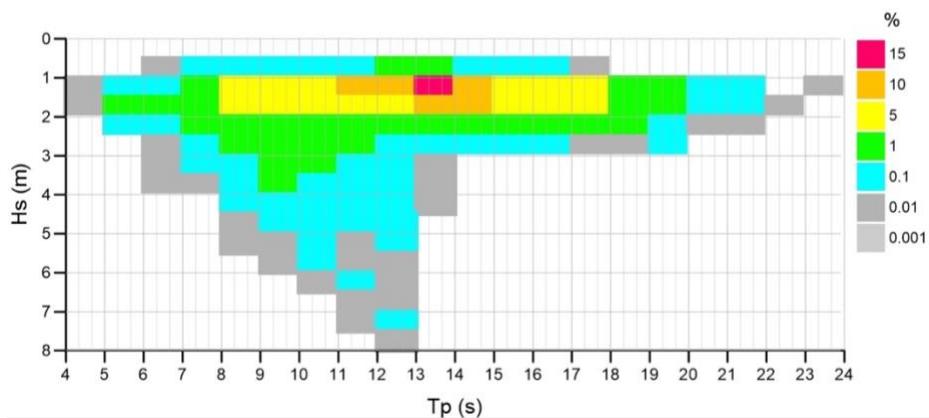


Figura 69. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas.

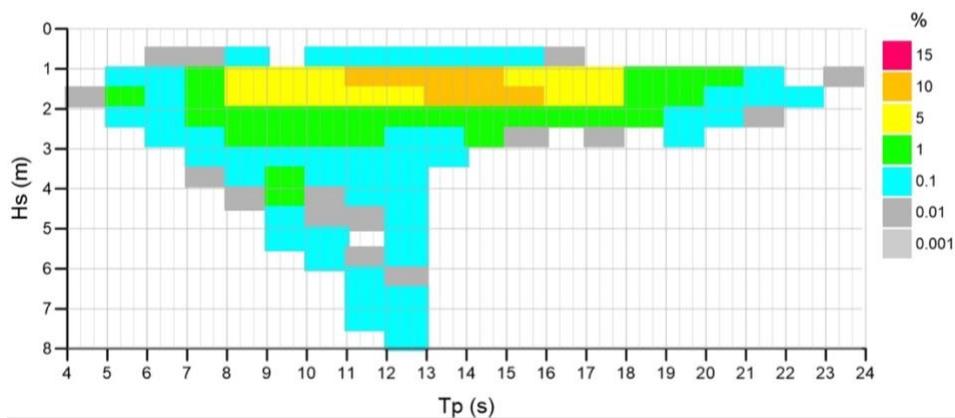


Figura 70. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas años niña.

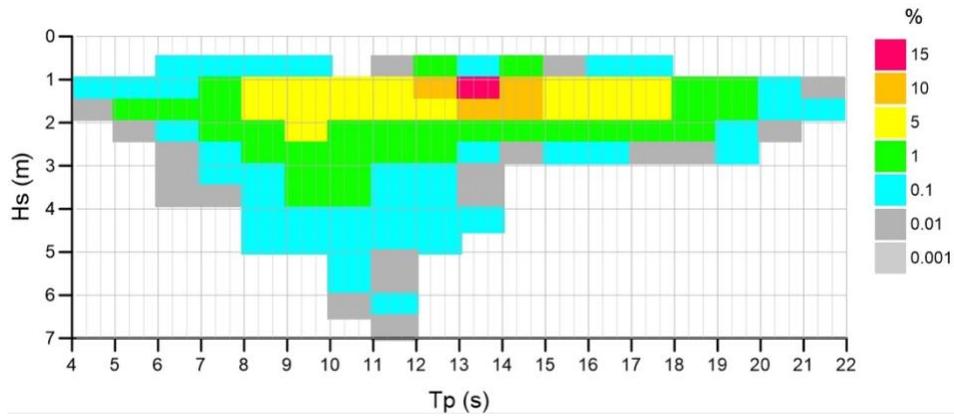


Figura 71. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas años niño.

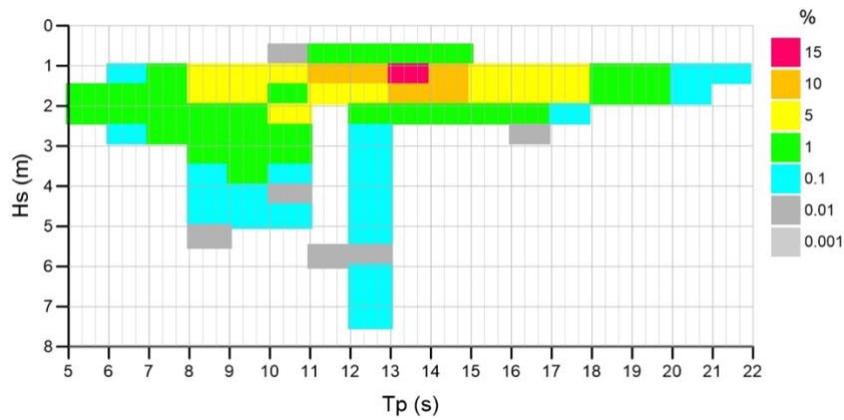


Figura 72. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas neutro.

Temporada de Lluvias Ligeras

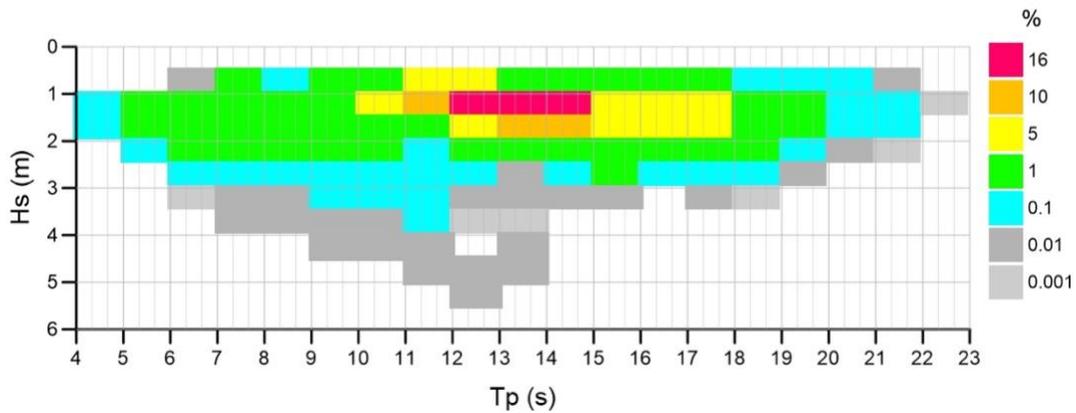


Figura 73. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras.

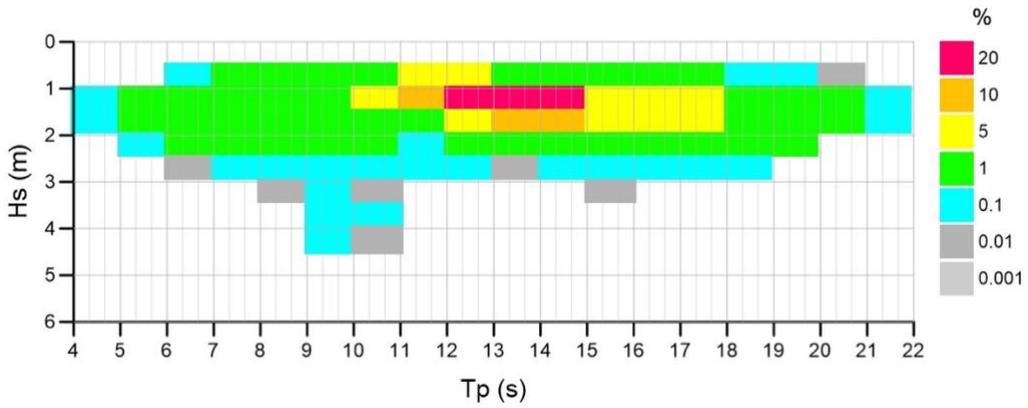


Figura 74. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras niña.

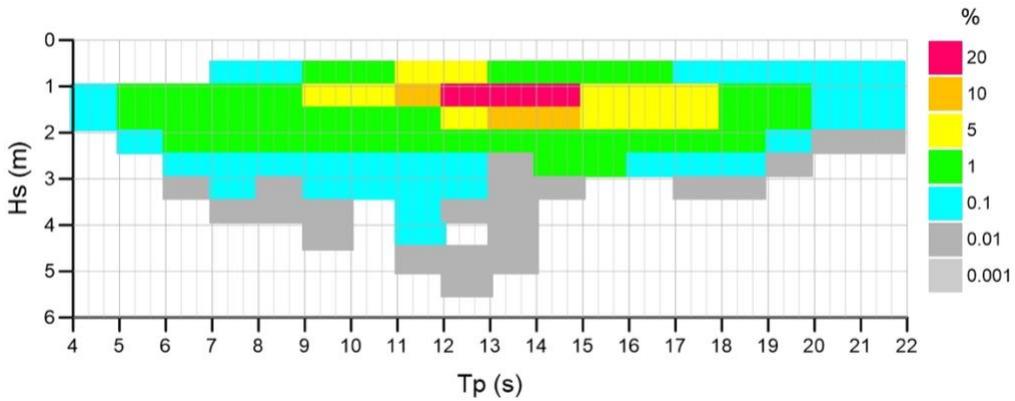


Figura 75. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras niño.

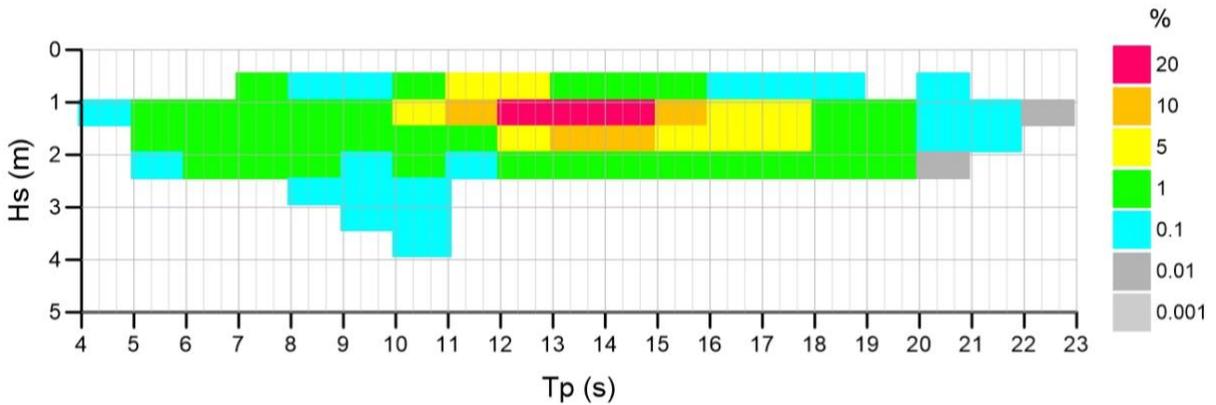


Figura 76. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras año neutro.

Tabla 22. Resumen de pares de valores de altura y periodo de ola más probables para cada temporada del año en años de La Niña, El Niño y neutros.

Temporada	Años	Altura de ola (m)	Periodo de ola (s)
Lluvias Intensas	Niña	1.5	13.5
	Niño	1.25	13.5
	Neutro	1.25	13.5
Lluvias Ligeras	Niña	1.25	13.5
	Niño	1.25	13.5
	Neutro	1.25	13.5
Temporada de Secas	Niña	1.75	13.75
	Niño	1.5	13.5
	Neutro	1.5	13.5
Registro Anual	Niña	1.5	13.5
	Niño	1.25	13.5
	Neutro	1.25	13.5

Probabilidad conjunta altura y dirección de ola 22.5 °N 109.5 °W

Temporada de Secas

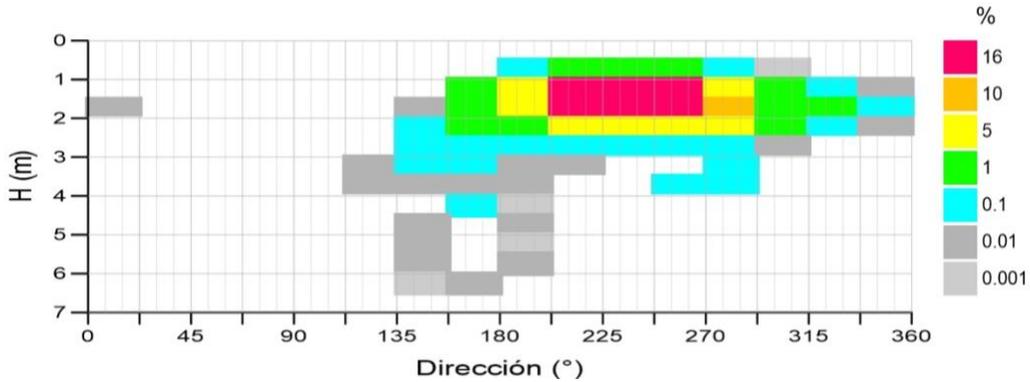


Figura 77. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas.

Temporada de Lluvias Intensas

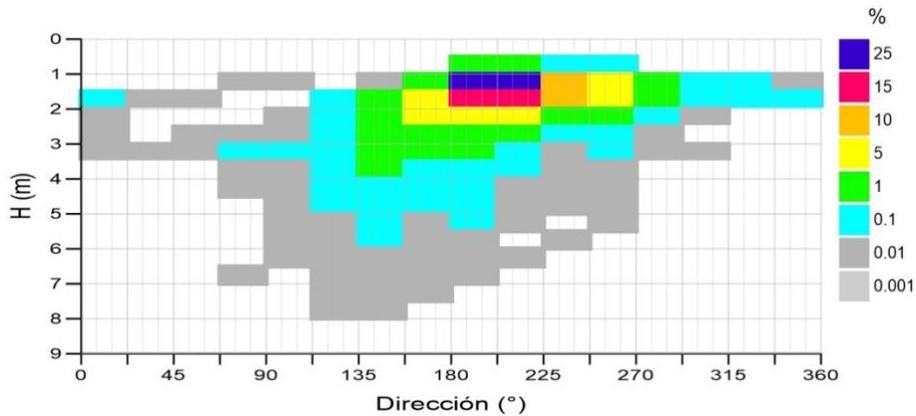


Figura 78. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas.

Temporada de Lluvias Ligeras

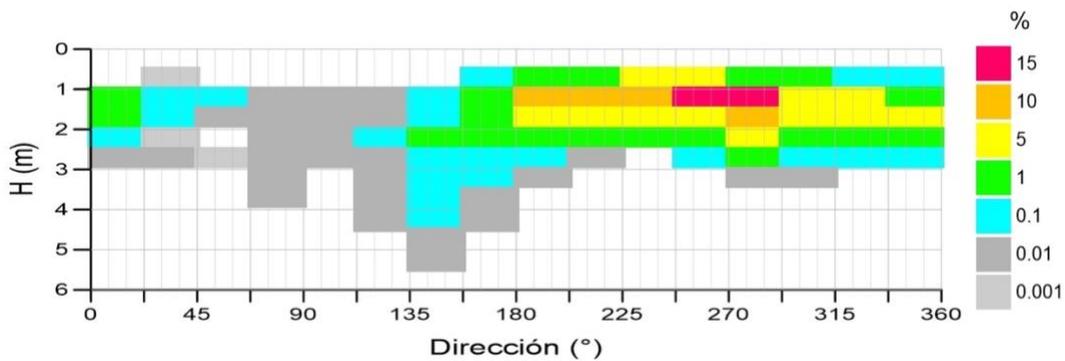


Figura 79. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras.

Anexo 2: Matrices de potencia de los convertidores de oleaje

Tabla 23. Matriz de poder del dispositivo Wave-Dragon (Silva et al., 2013)

$T_p(s)H_s(m)$	Power matrix (kW)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0.5	160	250	360	360	360	360	360	360	320	280	250	220	180
1	640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	950	830	710	590
1.5	0	1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	2100	1840	1570	1310
2	0	0	2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3930	3440	2950	2460
2.5	0	0	0	4610	5320	6020	7000	7000	6790	6090	5250	3950	3300
3	0	0	0	0	6720	7000	7000	7000	7000	7000	6860	5110	4200
3.5	0	0	0	0	0	7000	7000	7000	7000	7000	7000	6650	5740

Tabla 24. Matriz de poder del dispositivo Oyster (Silva et al., 2013)

$T_p(s)H_s(m)$	Power matrix (kW)									
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0.5	0	0	0	0	0	0	1	3	3	3
1	20	30	38	42	44	44	45	47	45	43
1.5	80	85	92	97	102	103	104	100	104	108
2	140	147	152	158	155	155	160	161	156	151
2.5	192	197	208	202	203	209	211	201	204	207
3	241	237	237	241	243	230	236	231	235	239
3.5	0	271	272	269	268	267	270	260	260	260
4	0	291	290	290	280	287	276	278	277	276
4.5	0	291	290	290	280	287	276	278	277	276
5	0	0	290	290	280	287	276	278	277	276
5.5	0	0	290	290	280	287	276	278	277	276
6	0	0	290	290	280	287	276	278	277	276

Anexo 3: Índice de tablas y figuras

Listado de tablas

<i>Tabla 1. Centrales eléctricas CFE en el sistema de Baja California Sur (CFE 2020).....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2. Distribución de años del Niño y de La Niña.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 110 °W.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4. Parámetros estadísticos periodo de ola 22.5 °N 110 °W.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 109.5 °W.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 6. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 109.5 °W.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 7. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 110.5 °W.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 8. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 110.5 °W.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 9. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 109.5 °W.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 10. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 109.5 °W.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 11. Valores de altura, dirección y periodo de ola considerados para modelación de la propagación del oleaje local con MWAPO4.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 12. Parámetros de altura y periodo en los sitios factibles para cada caso de estudio y cada dispositivo WEC.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 13. Cálculo del poder generado por los WECs para cada temporada climática y promedio ponderado anual de la potencia que generaría cada uno.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 14. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 110 °W comparación años del Niño y de La Niña. ...</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 15. Parámetros estadísticos periodo de ola 22.5 °N 110 °W comparación años del Niño y de La Niña. ...</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 16. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña. ...</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 17. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña. ...</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 18. Parámetros estadísticos altura de ola 23 °N 110.5 °W comparación años del Niño y de La Niña. ...</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 19. Parámetros estadísticos periodo de ola 23 °N 110.5 °W comparación años del Niño y de La Niña. ...</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 20. Parámetros estadísticos altura de ola 22.5 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña. ...</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 21. Parámetros estadísticos periodo de ola 22.5 °N 109.5 °W comparación años del Niño y de La Niña.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 22. Resumen de pares de valores de altura y periodo de ola más probables para cada temporada del año en años de La Niña, El Niño y neutros.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 23. Matriz de poder del dispositivo Wave-Dragon (Silva et al., 2013)</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 24. Matriz de poder del dispositivo Oyster (Silva et al., 2013)</i>	<i>95</i>

Listado de Figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en Cabo San Lucas, Baja California Sur, México. . A) y B) fotografías tomadas de Unsplash; C) Ubicación.....	14
Figura 2. Pirámide poblacional del municipio Los Cabos, BCS. INEGI (2020)	15
Figura 3. Demanda de energía eléctrica en MW del sistema de Baja California Sur 2014-2025 (INEGI 2020). 17	
Figura 4. Cabo San Lucas, subestaciones eléctricas CFE y líneas de transmisión eléctrica, coordenadas geográficas (imagen modificada de Google Earth)	18
Figura 5. A) Foto de las CAS (BCS Noticias, 2017); B)Ilustración de las CAS (Silva et al. 2017); C) Ubicación de las CAS y el APFFCSL coordenadas geográficas (imagen modificada de Google Earth).....	19
Figura 6. A) y B) Costa rocosa en la zona de estudio (fotografías tomadas de Unsplash); C) Imagen Satelital de la zona de estudio tomada el 4 de Junio de 2021, coordenadas geográficas	21
Figura 7. Ubicación de los puntos de reanálisis numérico, coordenadas geográficas, (imagen modificada de Google Earth)	23
Figura 8. Precipitación promedio a lo largo del año, Cabo San Lucas	32
Figura 9. Temperatura y precipitación promedio a lo largo del año, Cabo San Lucas	32
Figura 10. Temporadas climáticas en el año según la precipitación promedio.....	33
Figura 11. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W Todos los datos.....	34
Figura 12. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W Todos los datos.....	35
Figura 13. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W Todos los datos.....	36
Figura 14. Rosa de Altura de Ola y Rosa de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W Todos los datos.....	37
Figura 15. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W .	44
Figura 16. Topobatemetría del polígono de estudio, coordenadas geográficas	46
Figura 17. Resultados de propagación del oleaje y elementos ambientales, sociales y físicos de interés.	48
Figura 18. Gráfica de probabilidad conjunta de potencial teórico y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W.....	50
Figura 19. Mapa de la ubicación de los sitios factibles con mayor potencial energético para cada dispositivo WEC analizado, coordenadas geográficas.....	52
Figura 20. Energía generada por el dispositivo Oyster para cada caso de estudio	54
Figura 21. Energía generada por el dispositivo Wave-Dragon para cada caso de estudio.....	54
Figura 22. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas (Izq.), llluvias ligeras (centro) y llluvias intensas (Der).....	66
Figura 23. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas (Izq.), llluvias ligeras (centro) y llluvias intensas (Der).....	66
Figura 24. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).....	67

<i>Figura 25. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 26. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 27. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 28. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	<i>69</i>
<i>Figura 29. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 110 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	<i>69</i>
<i>Figura 30. Rosas de Altura de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 31. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32. Rosas de Altura de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 33. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 34. Rosas de Altura de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	<i>72</i>
<i>Figura 36. Rosas de Altura de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	<i>73</i>
<i>Figura 37. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der)</i>	<i>73</i>
<i>Figura 38. Rosas de Altura de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 39. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 40. Rosas de Altura de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 41. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).....</i>	<i>75</i>

<i>Figura 42. Rosas de Altura de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	76
<i>Figura 43. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	76
<i>Figura 44. Rosas de Altura de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	77
<i>Figura 45. Rosas de Periodo de Ola 23 °N 110.5 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	77
<i>Figura 46. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)</i>	78
<i>Figura 47. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas (Izq.), lluvias ligeras (centro) y lluvias intensas (Der)</i>	78
<i>Figura 48. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der)</i>	79
<i>Figura 49. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der)</i>	79
<i>Figura 50. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	80
<i>Figura 51. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	80
<i>Figura 52. Rosas de Altura de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	81
<i>Figura 53. Rosas de Periodo de Ola 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas en años de La Niña (Izq.), del Niño (centro) y neutros (Der).</i>	81
<i>Figura 54. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 22.5 °N 110 °W</i>	82
<i>Figura 55. Histograma de frecuencias periodo de ola pico 22.5 °N 110 °W</i>	82
<i>Figura 56. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 23 °N 109.5 °W</i>	83
<i>Figura 57. Histograma de frecuencias periodo de ola pico 23 °N 109.5 °W</i>	83
<i>Figura 58. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 23 °N 110.5 °W</i>	84
<i>Figura 59. Histograma de frecuencias periodo de ola pico 23 °N 110.5 °W</i>	85
<i>Figura 60. Histograma de frecuencias altura de ola significativa 22.5 °N 109.5 °W</i>	86
<i>Figura 61. Histograma de frecuencias periodo de ola significativa 22.5 °N 109.5 °W</i>	86
<i>Figura 62. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W registro completo años niña.</i>	88

<i>Figura 63. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W registro completo años niño.</i>	88
<i>Figura 64. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W registro completo años neutro.</i>	88
<i>Figura 65. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas.</i>	89
<i>Figura 66. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas años niña.</i>	89
<i>Figura 67. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas años niño.</i>	89
<i>Figura 68. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas años neutro.</i>	90
<i>Figura 69. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas.</i>	90
<i>Figura 70. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas años niña.</i>	90
<i>Figura 71. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas años niño.</i>	91
<i>Figura 72. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas neutro.</i>	91
<i>Figura 73. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras.</i>	91
<i>Figura 74. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras niña.</i>	92
<i>Figura 75. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras niño.</i>	92
<i>Figura 76. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y periodo de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias ligeras año neutro.</i>	92
<i>Figura 77. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de secas.</i>	94
<i>Figura 78. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas.</i>	94
<i>Figura 79. Gráfica de probabilidad conjunta de altura y dirección de ola para la ubicación 22.5 °N 109.5 °W temporada de lluvias intensas.</i>	94