



Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Investigaciones Oceanológicas

Facultad de Ciencias Marinas



Programa de Maestría en Ciencias en Oceanografía Costera.

"Evaluación de la conversión de la energía del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores, Ensenada, B.C., México."

Tesis que presenta:

Caleb Abraham Rodríguez Muñoz,

para obtener el título de Maestro en Ciencias.

Agosto de 2021.

Ensenada, B.C.

Resumen.

Entre los recursos energéticos renovables, el potencial energético del oleaje es de los más densos por unidad de área a nivel mundial. Su evaluación permite una primera aproximación de las áreas que pueden ser susceptibles para aprovechamiento de este recurso para la generación de electricidad u otras formas de energía. Se realizó la evaluación de la potencia del oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos y sus alrededores con datos obtenidos mediante la modelación numéricas del oleaje con una alta resolución espacio temporal durante 10 años (2008 a 2017). Además, se realizaron calculos de la cantidad de energía extraible en diferentes sitios del área utilizando 8 dispositivos extractores de energía del oleaje.

La potencia promedio en el área varía espacialmente, es mayor fuera de la bahía y menor dentro debido a la configuración de la costa y el efecto de sombra de la Isla Todos Santos. En general, cerca de la costa, en el área se observan valores entre 5 y 12 kW/m. La potencia del oleaje presenta una marcada estacionalidad con potencias mayores en invierno y menores en el verano.

Los valores de potencia obtenidos indican la viabilidad para el aprovechamiento de la energía del oleaje en al menos cuatro sitios dentro del área de estudio, Punta Santo Tomás con un valor promedio de 15.93 kW/m, Punta Banda con 10.57 kW/m, el Bajo de San Miguel con 10.30 kW/m, la Isla de Todos Santos con 8.12 kW/m y Punta Morro con 5.25 kW/m. De los ocho dispositivos analizados para el aprovechamiento de la potencia del oleaje en los sitios antes mencionados, los valores sobresalientes se obtuvieron de tres convertidores principalmente, el tipo Oyster en primer lugar, con una eficiencia de 83.25%, el Pontoon en segundo y el Wavestar en tercero.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**EVALUACIÓN DE LA CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE EN LA BAHÍA
DE TODOS SANTOS Y ALREDEDORES,
ENSENADA, B.C., MÉXICO.**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

Caleb Abraham Rodríguez Muñoz


Aprobada por:



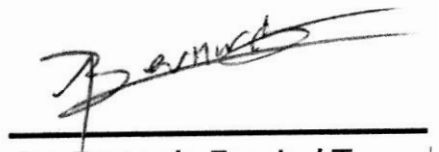
Dr. Héctor García Nava
Director



Dr. Francisco Ocampo Torres
Sinodal



Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal



Dr. Bernardo Esquivel Trava.
Sinodal

Agosto 2021

Agradecimientos.

A los Dres. Francisco Ocampo Torres, Bernardo Esquivel Trava y Rafael Hernández Walls miembros de mi comité de tesis, quienes me apoyaron para la realización del presente trabajo mediante sus valiosas observaciones, paciencia y sugerencias.

Mi mayor agradecimiento corresponde al Dr. Héctor García Nava, mi director de tesis, quien me apoyó en todo momento y gracias a quien pude concluir el presente trabajo. Doc, muchas gracias por tu confianza, comprensión y sobre todo paciencia.

A los Dres. Bryson Robertson y Brad Buckham, quienes amablemente me aceptaron en su laboratorio y me brindaron todo el apoyo necesario para poder realizar mi estancia de investigación en la Universidad de Victoria en los mejores términos.

A todos mis profesores del programa de Maestría en Oceanografía Costera, cuyo compromiso y gusto por su labor quedó vigente en todas y cada una de sus clases.

A todo el personal de la Facultad de Ciencias Marinas y del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, quienes siempre se distinguen por su amabilidad y vocación de servicio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca No. 495867 de la convocatoria 291239 otorgada para el desarrollo de mis estudios de maestría y por la beca de movilidad 291250 para la realización de la estancia académica en la Universidad de Victoria de Agosto de 2018 a Enero de 2019.

Dedicatoria.

A toda la gente que me apoyó durante esta etapa tan significativa de mi vida, y que me conminó a que concluyera de la mejor manera este trabajo tan deseado. A mi Padre y Madre, mi Hermano, mi novia, y mis amistades de Ensenada.

A las amistades tan bellas que hice en Victoria, quienes a la distancia siguieron mostrando interés por mi y la conclusión de mis estudios de maestría.

Contenido.

Resumen.	1
Agradecimientos.	3
Dedicatoria.	4
Contenido.	5
I Introducción.	12
II Marco Teórico.	13
II.I Conceptos de energía y potencia.....	13
II.II Potencia del oleaje.....	14
II.III Antecedentes del aprovechamiento del potencial energético de las olas.	15
III Objetivos.	17
Objetivo general.....	17
Objetivos particulares	17
IV Área de estudio.....	18
IV.I Batimetría.....	18
IV.II Oleaje.	19
IV.III Vientos.....	20
V Metodología.	21
V.I Modelación numérica.	22
V.II Análisis de factibilidad técnico-económica.	23
VI Resultados y discusiones.....	25
VI.I Validación del modelo SWAN para la Bahía de Todos Santos.....	25
VI.I.1 Playa Hermosa.....	26
VI.I.2 Punta Morro.	29
VI.I.3 Isla Todos Santos.	31
VI.II Potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores.	33
VI.II.1 Sitios con mayores valores de Potencia del Oleaje.	39

VI.III	Análisis de dispositivos convertidores de energía del oleaje.	47
VI.III.1	Boya con anclaje al fondo (Small bottom-referenced heaving buoy)...	49
VI.III.2	Boya sumergida con anclaje al fondo (bottom-referenced submerged heave-buoy).	50
VI.III.3	Convertidor flotante de dos cuerpos (floating two body heaving converter).	52
VI.III.4	Arreglo de boyas con anclaje al fondo (Bottom fixed heave buoy array).	53
VI.III.5	Arreglo de boyas flotantes (Floating heavy buoy array).	55
VI.III.6	Aleta oscilante fija en la parte inferior (Bottom-fixed oscillating flap)..	56
VI.III.7	Aleta oscilante flotante de tres cuerpos (Floating three-body oscillating flap device).	58
VI.III.8	Columna de agua oscilante flotante (Floating oscillating water column).	59
VI.IV	Potencia extraíble en con diferentes convertidores de energía del oleaje en los sitios seleccionados.....	61
VI.V	Factibilidad de la instalación de uno o más convertidores de energía de las olas en los sitios analizados.	65
VI.V.1	Consideraciones técnicas.....	67
VI.V.2	Consideraciones económicas.....	69
VII	Conclusiones.	75
	Bibliografía.....	77

Índice de Figuras

Figura 1. Componentes energéticas de una ola (CRES,2006).....	14
Figura 2.Mapa batimétrico de la Bahía de Todos Santos y alrededores.....	19
Figura 3. Localización geográfica de los perfiladores acústicos (círculos rojos) dentro de la Bahía de Todos Santos.	23
Figura 4. Altura significativa observada (azul) y modelada (rojo) en Playa Hermosa.	26
Figura 5. Comparación de la altura significativa observada y modelada para Playa Hermosa.	26

Figura 6. Periodo asociado al pico espectral observado (azul) y modelado (rojo) en Playa Hermosa.....	27
Figura 7. Comparación de periodo asociado del pico espectral observado y modelado para Playa Hermosa.....	27
Figura 8. Dirección promedio del oleaje medida (azul) y modelada (rojo) en Playa Hermosa.	28
Figura 9. Comparación de la dirección del oleaje observada y modelada para Playa Hermosa.	28
Figura 10. Altura significativa observada (azul) y modelada (rojo) en Punta Morro.	29
Figura 11. Comparación de la altura significativa observada y modelada para Punta Morro...	29
Figura 12. Periodo asociado al pico espectral observado (azul) y modelado (rojo) en Punta Morro.	30
Figura 13. Comparación de periodo asociado del pico espectral observado y modelado para Punta Morro.....	30
Figura 14. Altura significativa observada (azul) y modelada (rojo) en la Isla Todos Santos. ..	31
Figura 15. Comparación de la altura significativa observada y modelada para la Isla Todos Santos.....	31
Figura 16. Periodo asociado al pico espectral observado (azul) y modelado (rojo) en la Isla Todos Santos.....	32
Figura 17. Comparación de periodo asociado del pico espectral observado y modelado para Isla Todos Santos.....	32
Figura 18. Potencia promedio (8.42 kW/m) en la Bahía de Todos Santos, durante los años de 2008 a 2018.	34
Figura 19. Valores mensuales promedio de Potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores.....	35
Figura 20. Valores anuales promedio de Potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores de 2008 a 2017.....	35
Figura 21. Potencia promedio para los meses de Primavera-Verano de 2008 a 2018.....	37
Figura 22. Potencia promedio para los meses de Otoño-Invierno de 2008 a 2018.	37

Figura 23. Sitios seleccionados para análisis técnico-económico.	38
Figura 24. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en Punta Morro de enero de 2008 a diciembre de 2017.	39
Figura 25. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo de Punta Morro.	39
Figura 26. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje frente al espigón del Puerto de Ensenada de enero de 2008 a diciembre de 2017.	40
Figura 27. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo frente al Espigón del Puerto de Ensenada.	40
Figura 28. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en el Bajo de San Miguel de enero de 2008 a diciembre de 2017.	41
Figura 29. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Bajo de San Miguel.	41
Figura 30. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en la Isla de Todos Santos de enero de 2008 a diciembre de 2017.	42
Figura 31. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Isla de Todos Santos.	42
Figura 32. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en Punta Banda de enero de 2008 a diciembre de 2017.	43
Figura 33. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Punta Banda.	43
Figura 34. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en Punta Santo Tomás de enero de 2008 a diciembre de 2017.	44
Figura 35. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp) y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Punta Santo Tomás.	44
Figura 36. Las diversas tecnologías de energía undimotriz (modificado de Falcao, 2010).	48
Figura 37. CEO Seabased (tomado de Babarit et al., (2012) y Seabased.com)	49
Figura 38. Matriz de potencia del dispositivo tipo boya superficial con anclaje al fondo (Babarit et al., 2012).	50
Figura 39. CEO CETO (tomada de Babarit et al., 2012 y Carnegiece.com).	51

Figura 40. Matriz de potencia del dispositivo tipo boya subsuperficial con anclaje al fondo. ...	51
Figura 41. CEO flotante de dos cuerpos (tomado de Babarit et al., 2012 y Researchgate.net).	52
Figura 42. Matriz de potencia del dispositivo flotante de dos cuerpos (Babarit et al., 2012)..	53
Figura 43. CEO compuesto por arreglo de boyas con anclaje al fondo (tomado de Babarit et al., (2012) y Wavestarenergy.com).	54
Figura 44. Matriz de potencia del dispositivo compuesto por arreglo de boyas con anclaje al fondo.	54
Figura 45. CEO compuesto por boyas flotantes y Pontoon WEC (tomada de Babarit et al., (2012) y Pontoon.no).	55
Figura 46. Matriz de potencia del dispositivo matriz de boyas flotantes (Babarit, et al., 2012).	56
Figura 47. CEO Aleta oscilante fija en la parte inferior y Oyster, tomada de Babarit et al., (2012) y www.hydro-international.com.....	57
Figura 48. Matriz de potencia del dispositivo Aleta oscilante (Babarit et al., 2012).	57
Figura 49. CEO Aleta oscilante flotante de tres cuerpos y dispositivo Langlee. Tomada de Babarit et al., (2012) y www .europapress.es	58
Figura 50. Matriz de potencia del dispositivo Aleta oscilante de tres cuerpos.	59
Figura 51. CEO Columna oscilante de agua flotante y dispositivo Ocean Energy Buoy (Tomada de Babarit et al., (2012) y oceanenergy.ie).	60
Figura 52. Matriz de potencia del dispositivo Columna oscilante de agua flotante.	60
Figura 53. Zona costera de la Universidad Autónoma de Baja California en Punta Morro.	64
Figura 54. Espigón del Puerto de Ensenada. (Fotografía de Hutchison, 2021).....	65
Figura 55. Descripción general de la evaluación del recurso de la energía de las olas (Carbon Trust, 2012).....	66
Figura 56. Servicio Eléctrico Nacional en la zona costera del área de estudio.....	68
Figura 57. Consumo energético de una industria portuaria en 2015-2016.	72

Índice de Tablas

Tabla I. Clases de evaluación del recurso energético del oleaje.	21
Tabla II. Coordenadas geográficas de los sensores dentro de la Bahía de Todos Santos.	22
Tabla III. Estadísticos de la comparación de los datos in situ y los obtenidos mediante el modelo numérico de altura significativa (Hs).	25
Tabla IV. Valores mensuales promedio de Potencia (P) en kilowatts por metro de frente de ola (kW/m) obtenidos mediante el modelo SWAN para el área de estudio.	35
Tabla V. Valores anuales promedio de Potencia (P) en kilowatts por metro de frente de ola (kW/m) obtenidos mediante el modelo SWAN para el área de estudio.	35
Tabla VI. Valores mínimo, promedio y máximo de potencia del Oleaje en los nodos seleccionados.....	46
Tabla VII. Convertidores de energía del oleaje considerados en la multiplicación matricial. ..	61
Tabla VIII. Potencia promedio extraíble (kW) para cada sitio con los convertidores de energía analizados.....	61
Tabla IX. Potencia del oleaje disponible por sitio (kW/m).....	62
Tabla X. Potencia promedio extraíble (kW) para cada sitio con los convertidores de energía analizados.....	72
Tabla XI. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) registrados mediante sensor en Playa Hermosa de octubre de 2013 a septiembre de 2017.	80
Tabla XII. Valores promedio mensuales de Altura significativa (Hs) del modelo de Playa Hermosa.....	80
Tabla XIII. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) registrados mediante sensor en Punta Morro de diciembre de 2016 a octubre de 2019.	81
Tabla XIV. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) del modelo de Playa Hermosa para el nodo más cercano al sensor de Punta Morro.....	81
Tabla XV. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) registrados mediante sensor en la Isla de Todos Santos de septiembre de 2010 a mayo de 2019.	82
Tabla XVI. Valores promedio mensuales de Altura significativa (Hs) del modelo de Playa Hermosa.....	82

Tabla XVII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores obtenidos mediante el modelo numérico de enero de 2008 a diciembre de 2017.	83
Tabla XVIII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de Punta Morro de enero de 2008 a diciembre de 2017.	83
Tabla XIX. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo frente al Espigón del Puerto de Ensenada de enero de 2008 a diciembre de 2017.	84
Tabla XX. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo del Bajo de San Miguel de enero de 2008 a diciembre de 2017.	84
Tabla XXI. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de la Isla de Todos Santos de enero de 2008 a diciembre de 2017.	85
Tabla XXII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de Punta Banda de enero de 2008 a diciembre de 2017.	85
Tabla XXIII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de Punta Santo Tomás de enero de 2008 a diciembre de 2017.	86

I Introducción.

El efecto adverso de los combustibles fósiles en el ambiente y la demanda creciente de energía han dado lugar a la necesidad de diversificar la matriz energética a nivel mundial, lo que ha despertado el interés en la investigación y desarrollo de fuentes alternas de energía, con énfasis en las energías renovables (Acuña y Monardéz, 2007 y Arinaga y Cheung, 2012).

Entre las fuentes de energía renovable, la energía del océano en cualquiera de sus formas (gradiente térmico; gradientes de salinidad; oleaje, corrientes y mareomotriz) es la que menor desarrollo ha tenido, esto debido a los retos ingenieriles que representa el medio marino. Sin embargo, se ha determinado que la energía de las olas es la que cuenta con mayor densidad de potencia por unidad de área, en comparación con el viento o el Sol (CRES, 2006).

La energía de las olas es una forma de almacenamiento de la energía solar. El Sol produce un calentamiento diferencial del planeta que genera el movimiento de masas de aire sobre la superficie del océano en forma de viento. El viento, a su vez, genera el oleaje. Las olas pueden viajar cientos de kilómetros con pérdida mínima de energía (CRES, 2006).

El potencial teórico mundial de la energía obtenida del oleaje se ha calculado en 29,500 TWh/año (Mork, et. al., 2010), el cual representa 115% del consumo de electricidad mundial registrado en 2017 (25,570 TWh) (Ponce, J.M. 2018). En realidad, el porcentaje práctico utilizable de la energía del oleaje a nivel global no puede ser del 100%, sin embargo, es viable que mediante este recurso se pueda abastecer un porcentaje significativo de la demanda energética mundial actual.

El presente estudio tiene como objetivos: primero, cuantificar y analizar la potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y sus alrededores, y segundo, relacionar los sitios que se determinen con mayor potencial energético con dispositivos convertidores de energía del oleaje cuya matriz de eficiencia los defina como viables para su emplazamiento.

Aunado a la propuesta técnica se realizará un análisis económico para determinar el costo que implicaría la instalación de uno o varios dispositivos con base en su ubicación y capacidad de generación.

II Marco Teórico.

II.I Conceptos de energía y potencia.

Energía y potencia son dos de los conceptos clave en el sector energético en general y de las energías renovables en particular. La palabra energía etimológicamente proviene de los términos griegos (*en*, en) y (*ergon*, trabajo) (Boyle, 2004 en ELREN,2007).

La energía es la capacidad de los sistemas físicos para generar trabajo, desde el punto de vista de la mecánica, la energía puede verse como la capacidad para producir el movimiento de un objeto. Dicho objeto puede ser sólido, líquido o gaseoso. Por lo tanto, se desarrolla trabajo cuando se mueve un objeto sólido, o cuando se bombea el agua o el aire.

Estos procesos requieren de energía. La unidad estándar de energía (sistema internacional de medidas) es el Julio (denominado así por James Joule, 1818-1889) y el símbolo del Julio es "J". (ELREN, 2007).

La potencia es la razón a la que la energía se convierte de una forma a otra, la tasa a la que se efectúa el trabajo. Por ejemplo, una turbina que convierte la energía cinética del oleaje en energía eléctrica (electricidad) será capaz de producir una mayor cantidad de energía eléctrica en un periodo de tiempo mientras mayor sea su potencia. La unidad de potencia es el vatio o watt (w) (denominado así por James Watt, 1736-1819) (ELREN, 2007).

La potencia es igual a un vatio (watt) si el trabajo se desarrolla a razón de un julio por segundo (J/s). Así que, por definición, un vatio equivale a un julio por segundo. Una bombilla con una potencia de 100 vatios convierte la energía eléctrica en luz a una razón de 100 julios por segundo.

Un julio es una cantidad muy pequeña de energía - una barra de chocolate contiene alrededor de 1 millón de julios de energía-. El kilovatio hora o, más comúnmente kilowatt hora (kWh) es una unidad más útil de energía para el sector de las energías renovables por dos razones: la primera es que el kWh es una unidad mayor de energía que el julio – un kWh equivale a 3,600,000 julios; la segunda es que la definición de kWh se utiliza normalmente en los aparatos que consumen o producen energía (ELREN,2007).

La definición de kWh se utiliza para calcular el consumo o producción energética de los equipos. Un kWh se define como la cantidad de energía consumida (o producida) por un aparato de 1 kW (1,000 watts) en una hora. Por lo tanto, hay una relación entre el consumo o producción energéticos y la potencia del aparato. La relación se muestra en la fórmula:

Consumo o Producción Energéticos = Potencia x Tiempo (1)

La naturaleza de las olas hace que sea complicado referirse a la potencia por unidad de área, tenemos que considerar que la acción de las olas se produce en toda la columna de agua. La potencia se calcula como el flujo de energía promediado en un periodo e integrado en la vertical. Lo que es equivalente a la potencia generada por una onda plana con un metro de ancho de frente de ola y, por lo tanto, nos referimos a la potencia del oleaje en unidades de potencia entre unidades de longitud, es decir, en kilowatts por metro de frente de ola (kW/m) (Open University, 2020).

II.II Potencia del oleaje.

Una ola contiene tanto energía cinética como energía potencial gravitatoria (Figura 1).

El flujo de energía o potencia del oleaje se define como la tasa media de transferencia de energía por unidad de ancho a través de un plano vertical perpendicular a la dirección del oleaje. La potencia de una ola depende de su altura (H) y su período (T) (CRES,2006).

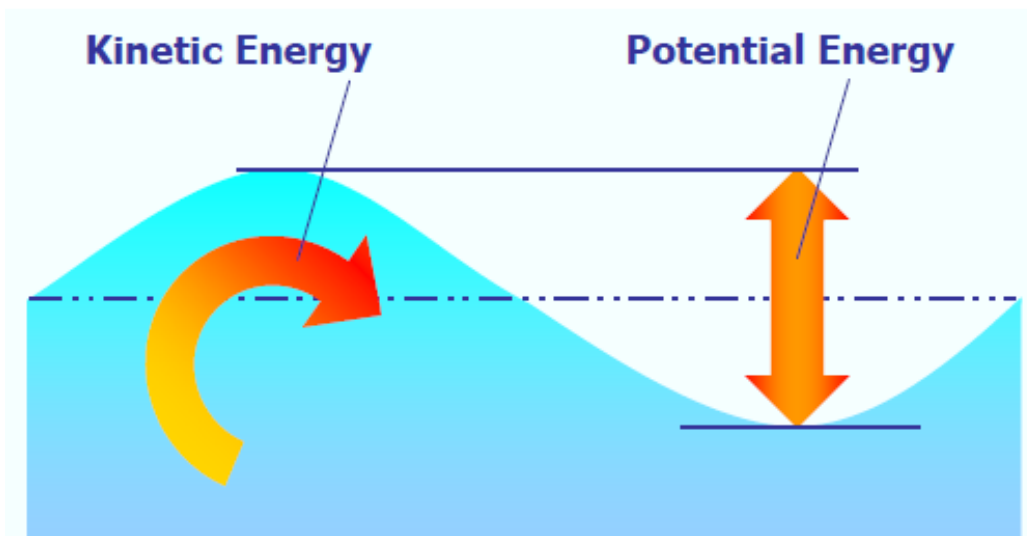


Figura 1. Componentes energéticas de una ola (CRES,2006).

Para una onda monocromática, utilizando las expresiones del campo de velocidades y presiones obtenidas de la teoría lineal del oleaje y promediando en un período de ola, la potencia integrada en toda la columna de agua (P) está dada por (Holthuisen, 2007)

$$P = \frac{\rho g}{8} H^2 C_g (T, h) \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, g es la constante de aceleración gravitatoria, C_g es la velocidad de grupo y h la profundidad.

Para ondas irregulares la potencia del oleaje se puede obtener como

$$P = \rho g \int S(f) Cg(f, h) df,$$

donde $S(f)$ es el espectro de densidad de varianza y f es la frecuencia. Utilizando el concepto de momentos espectrales, la potencia en aguas profundas está dada por

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e,$$

donde H_s es la altura significativa y T_e el periodo energético. Para aguas intermedias no hay una solución analítica pero la potencia se puede aproximar como (Cornett, 2008),

$$P = \frac{\rho g}{16} H_s^2 Cg(T_e, h)$$

Para caracterizar la potencia del oleaje es conveniente contar con series de tiempo de espectros direccionales o de frecuencia que permitan realizar un calculo certero de la potencia. Si no se cuenta con ellos se pueden usar las aproximaciones de aguas profundas o someras, según corresponda, para obtener una estimación a partir de parámetros integrales del oleaje.

II.III Antecedentes del aprovechamiento del potencial energético de las olas.

Los primeros testimonios sobre la utilización de la energía de las olas se encuentran en China, en donde en el siglo XIII empiezan a operar molinos por acción del oleaje. La posibilidad de obtener energía de las olas también se estudió en la época de la Revolución Francesa. La primera patente de un dispositivo para aprovechamiento del oleaje se llevó a cabo en 1799 por un parisino de apellido Girard y su hijo (Falcão, 2010).

A principios del siglo XX, el francés Bouchaux-Pacei suministra electricidad a su casa en Royan, mediante un sistema neumático, parecido a las actuales columnas oscilantes de agua. Desde 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60 m con una potencia de 400W (Falcão, 2010).

A mediados de los ochenta entran en servicio varias plantas piloto de distintos tipos en Europa y Japón. Sin embargo, es a partir de los años 90 cuando un cierto número de empresas en varios lugares del mundo comienzan a involucrarse en el diseño y desarrollo de dispositivos para el aprovechamiento de la energía de las olas. Entre estas empresas pueden señalarse: AquaEnergy Group (USA), Archimedes Wave Swing (Países Bajos), Energetech Australia (Australia), Ocean Power Delivery (Reino Unido), Wavegen (Reino Unido), Wave Plane Internacional (Dinamarca) y Wave Mill Energy (Canadá).

Los convertidores de energía undimotriz capturan la energía cinética y potencial de las olas para obtener productos, como la electricidad. Los convertidores de energía undimotriz son

generalmente pequeños (~ 1 MW) y están destinados a ser modulares e instalados en parques de múltiples unidades (Huckerby, et. al., 2012).

Debido a la naturaleza del oleaje y la gran variabilidad espacial de sus características, parece improbable que domine un único concepto. Por el contrario, se espera que un reducido número de conceptos utilice las diferentes opciones de este vasto recurso, por ejemplo, el desplazamiento horizontal o ascenso y descenso de las olas.

La mayoría de los convertidores de energía del oleaje deben de ser capaces de operar en una amplia gama de condiciones de mar y sobrevivir a condiciones extremas en caso de tormentas. Por lo tanto, los dispositivos tienen que ser diseñados o adaptados con las condiciones locales, en continuo cambio y ser lo suficientemente robustos para funcionar sin supervisión.

III Objetivos.

Objetivo general

Analizar la factibilidad de realizar la conversión de la energía del oleaje en la Bahía Todos Santos y sus alrededores, Baja California, México.

Objetivos particulares

- Calcular el potencial energético mediante modelaciones numéricas de alta resolución para los últimos diez años en la Bahía Todos Santos.
- Determinar los sitios más aptos para el aprovechamiento de la energía del oleaje en la Bahía Todos Santos y alrededores considerando tanto la disponibilidad del recurso como las características del sitio.
- Identificar el convertidor de energía del oleaje más eficiente y analizar la factibilidad para su instalación en los sitios seleccionados.

IV Área de estudio

La Bahía de Todos Santos (Figura 2) presenta una superficie aproximada de 180 km², tiene una forma de "U", cuyos límites son: al Norte con Punta San Miguel, al Sur con Punta Banda, al Este con la ciudad de Ensenada y barra del Estero de Punta Banda y al Oeste con dos conexiones al mar abierto, separadas por las Islas de Todos Santos Norte y Sur (SEMAR).

La bahía presenta una amplia comunicación con el mar adyacente, la entrada entre Punta San Miguel e Isla Todos Santos Norte, tiene una amplitud de alrededor 11.7 km, profundidad máxima de 50 m y en sus inmediaciones existe un bajo con profundidades mínimas de 5.5 m, denominado bajo San Miguel. La entrada entre Punta Banda e Isla Todos Santos Sur, tiene una anchura de 6.4 km, con profundidad máxima de aproximadamente 390 m en el Cañón Submarino de Todos Santos. La mayor parte del interior de la Bahía presenta profundidades entre 20 y 50 m. (Figura 2) (SEMAR).

IV.I Batimetría

La configuración batimétrica de la bahía es irregular. Los rasgos más sobresalientes son: 1) el bajo de San Miguel y 2) el cañón submarino entre Punta Banda y las islas de Todos Santos, con profundidades de hasta 550 m (Ulloa, 1989).

El cañón submarino es una depresión que se localiza al Suroeste de la bahía entre las Islas del mismo nombre y Punta Banda internándose ligeramente al centro de la bahía, la batimetría en las inmediaciones del cañón tiene forma de un valle aluvial con profundidades de 50 m, y cambia abruptamente hasta llegar a 390 metros de profundidad. Este cañón submarino abarca un área de aproximadamente 30 km² (SEMAR).

El bajo San Miguel, ubicado entre Punta San Miguel y las islas de Todos Santos, en 31° 51.0´N, 116°48.5´W, tiene una profundidad mínima de 5.5 m.

Además, existen otras dos zonas de bajos menos extensas, una entre el faro de Punta Banda y las rocas que se hallan hacia el SE del mismo en dirección a Punta Banda y otra frente a la zona de Punta Morro.

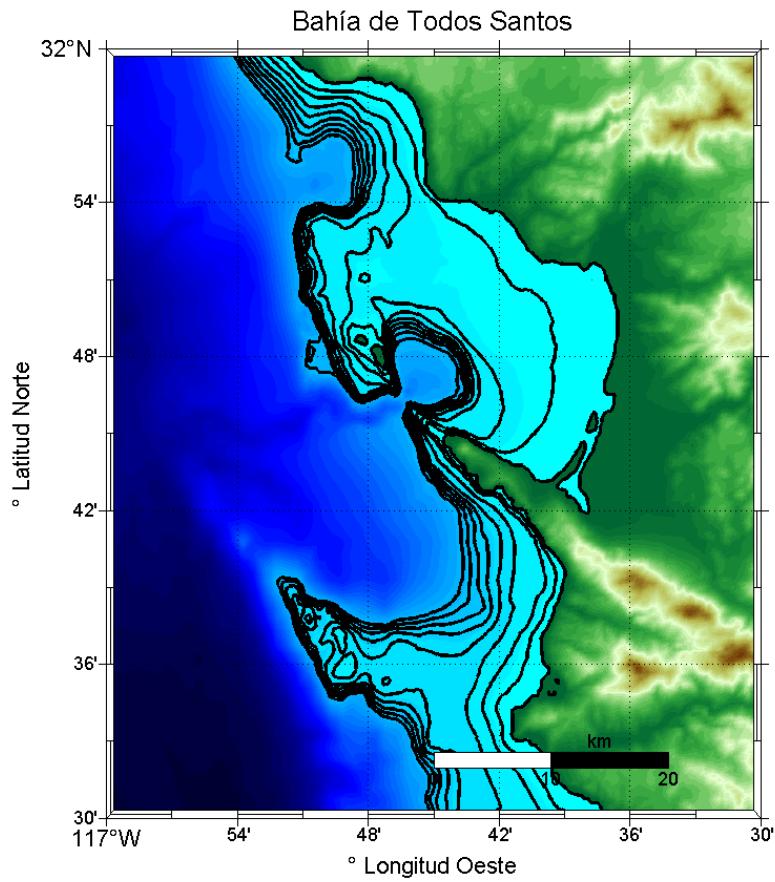


Figura 2. Mapa batimétrico de la Bahía de Todos Santos y alrededores.

IV.II Oleaje.

El oleaje que arriba a las costas occidentales de Baja California puede caracterizarse de acuerdo a su origen en oleaje proveniente del hemisferio Norte, oleaje proveniente del hemisferio Sur y oleaje local (Appendini, 1998).

Durante la temporada invernal (octubre-abril), el oleaje que arriba al área de estudio es proveniente principalmente del hemisferio Norte, es el oleaje con mayor altura del año; se origina por los vientos de tormentas en el Golfo de Alaska y por los vientos de tormentas en el Pacífico Central (Hawaii) desplazándose a latitudes medias y por los vientos dominantes del Pacífico Nororiental (Appendini, 1998).

En el otoño se presenta también el oleaje de los ciclones tropicales generados en el Pacífico Mexicano. Este oleaje arriba desde una banda de direcciones centrada en la dirección Oeste (Appendini, 1998).

Dentro de la Bahía de Todos Santos se han registrado alturas máximas de ola de 3.73 m frente a El Ciprés con periodos de 20 s, lo cual indica oleaje que se origina en lugares lejanos, mientras que en la boca del Estero de Punta Banda, Punta Morro y la boca de la rada del Puerto de Ensenada, se han registrado alturas entre 1.5 y 2 m, cuyos periodos en promedio registran de 19 a 20 segundos (SEMAR).

El oleaje local se genera por los fenómenos meteorológicos que ocurren cerca de la costa y por los eventos intensos de brisas locales. Este oleaje tiene un periodo corto, generalmente poca altura y su dirección principal depende del viento que lo genera (Appendini, 1998).

La batimetría de la Bahía de Todos Santos ocasiona una refracción intensa del oleaje en la región somera que se encuentra entre las Islas de Todos Santos y Punta San Miguel. Los principales rasgos batimétricos que modifican la trayectoria de las ortogonales en esta zona son: El Bajo de San Miguel y el Bajo de Punta El Sauzal (Ulloa, 1989).

IV.III Vientos.

Durante la primavera y verano (marzo-octubre) el viento predominante sopla del NW con magnitud de 9 a 18 km/h; pudiendo ocurrir vientos fuertes de más de 46 km/h durante la primavera; mientras que, en el invierno el paso de tormentas invernales asociadas a frentes fríos procedentes del Golfo de Alaska pueden llegar a propiciar vientos hasta de 90 km/h del NW (SEMAR).

Durante el otoño e invierno, en la región NW de Baja California pueden soplar vientos del NE denominados "Vientos de Santa Ana", con magnitud de más de 40 km/h. La brisa marina (vientos de mar a tierra durante el día y en sentido opuesto durante la noche) durante el verano es persistente y fuerte de hasta 9.7 nudos (18 km/h) , mientras que en el invierno es débil (SEMAR).

V Metodología.

El primer paso en la evaluación técnico-económica de una planta de generación eléctrica a partir de la energía del oleaje, es la cuantificación del recurso disponible. Dicha cuantificación se lleva a cabo mediante modelos numéricos que se deben validar comparando los resultados obtenidos con datos medidos *in situ*.

Para la evaluación del potencial energético existen tres diferentes clases de estudios; De reconocimiento, factibilidad y diseño, los cuales se definen en la Tabla I. Los estudios de la clase 1, reconocimiento, son típicamente de baja y media resolución, y abarcan áreas relativamente grandes (mayores a 300 km), y las estimaciones que se obtienen son con una incertidumbre considerable (IEC, 2015).

Tabla I. Clases de evaluación del recurso energético del oleaje.

Clase	Descripción	Incertidumbre en la evaluación del potencial energético de las olas.	Extensión de la costa
Clase 1	Reconocimiento	Alta	Mayor de 300 km
Clase 2	Factibilidad	Media	20 km a 500 km
Clase 3	Diseño	Baja	Menor de 25 km

Con base en lo anterior y en el área que abarca nuestra área de estudio ($1/2^\circ \times 1/2^\circ$, 55 km x 55 km) podemos determinar que el presente estudio corresponde a la clase 2, es decir, de factibilidad, en donde la incertidumbre en la evaluación del potencial energético del oleaje es media.

Una vez determinada la potencia disponible del oleaje se identificaron los sitios con mayor potencial y en ellos se realizó el análisis de factibilidad técnica y económica. A continuación se describen con cierto detalle las simulaciones numéricas realizadas y, posteriormente, el análisis de factibilidad.

V.I Modelación numérica.

En este trabajo, para la evaluación del recurso disponible, se utilizó el modelo de oleaje SWAN (Simulating WAVes Nearshore) desarrollado por la Universidad de Delft. El modelo SWAN es un modelo espectral de oleaje de tercera generación que describe la evolución del oleaje incluyendo los procesos de refracción, asomeramiento, generación y disipación.

El modelo se implementó para la Bahía de Ensenada y sus alrededores utilizando una malla regular con 250 m de resolución que abarcó de los 31.5° a los 32° latitud Norte y de los -116.5° a los 117° longitud Oeste. Se realizaron simulaciones numéricas para un periodo de tiempo de diez años (2008-2017) utilizando como condiciones de frontera salidas del análisis retrospectivo IOWAGA. Como salidas se solicitaron parámetros integrales y espectrales en toda la malla con una periodicidad de una hora. La potencia del oleaje se calculó como la magnitud del transporte de energía a partir del transporte de energía meridional (T_x) y zonal (T_y) obtenidos para cada hora.

La validación de las simulaciones, se realizó a partir de la comparación con las observaciones disponibles en el área. Los parámetros utilizados en la comparación fueron la altura significativa (H_s), el periodo asociado al pico espectral (T_p) y la dirección media del oleaje (Dir) en los nodos del modelo coincidentes con los datos obtenidos in situ. Las observaciones corresponden a mediciones del oleaje realizadas con sensores ADCP en tres sitios de la Bahía de Todos Santos: Punta Morro (desde 2017 a la fecha), Playa Hermosa (2014 a la fecha) e Isla de Todos Santos (2008 a la fecha) (Figura 2 y Tabla II).

Con los salidas del modelo se realizó la caracterización de la potencia disponible. Para ello se calcularon los valores medios y extremos, la variabilidad interanual y estacional, y las tendencias a largo plazo.

Tabla II. Coordenadas geográficas de los sensores dentro de la Bahía de Todos Santos.

Ubicación del sensor	Latitud	Longitud
Isla Todos Santos	31.817700°	-116.814200°
Punta Morro	31.855400°	-116.666700°
Playa Hermosa	31.806800°	-116.637300°

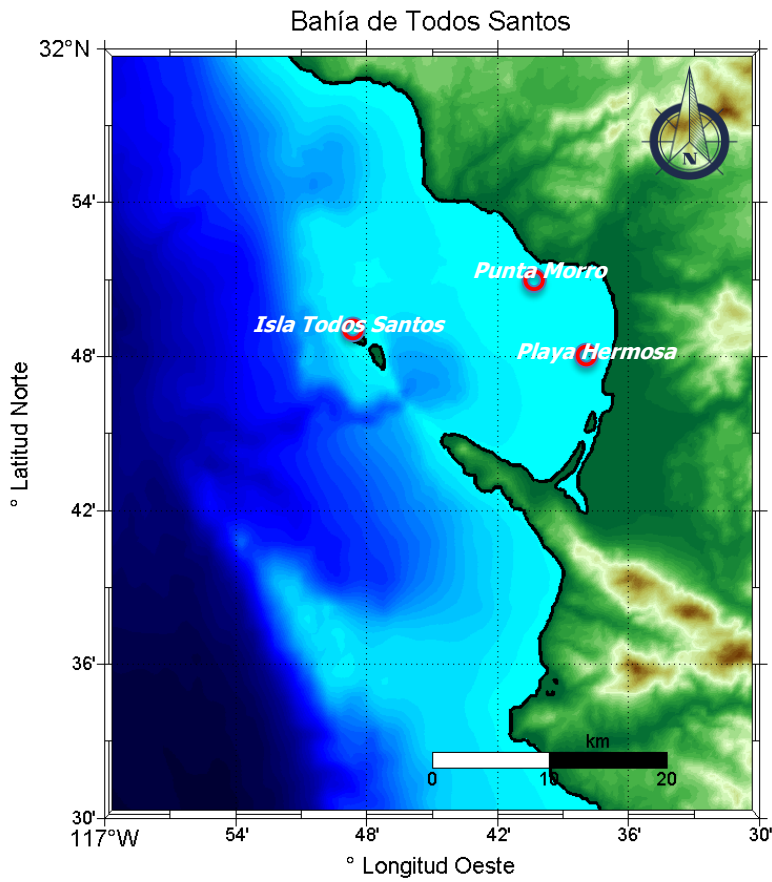


Figura 3. Localización geográfica de los perfiladores acústicos (círculos rojos) dentro de la Bahía de Todos Santos.

V.II Análisis de factibilidad técnico-económica.

A partir de los resultados de la modelación numérica se localizaron geográficamente los sitios con los mayores valores de potencia del oleaje, para así desarrollar la evaluación técnico económica de la instalación de uno o varios dispositivos convertidores de energía del oleaje.

Para la evaluación técnica y económica se utilizó el programa de acceso libre denominado InVest (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs; Valoración integrada de servicios y compensaciones de ecosistemas. InVest, por sus siglas en inglés), desarrollado por el Proyecto de Capital Natural de la Universidad de Stanford, en California, EE.UU.

Para la valoración técnica se compararon las tecnologías seleccionadas con referencia a un conjunto de medidas cuantitativas que se pueden relacionar con los costos de instalación, operación y mantenimiento y la cantidad de energía absorbida anual, la cual representa los ingresos de un proyecto de energía undimotriz.

Para determinar el costo-beneficio del emplazamiento de algún dispositivo convertidor de energía del oleaje en cualquiera de los sitios, es indispensable determinar la cantidad de energía que se puede obtener de cada sitio con base en el desempeño que tendría el dispositivo que se utilice.

Para ello, se calculó la potencia extraíble, con diferentes dispositivos, en cada sitio seleccionado. La potencia extraíble se calculó a partir de la multiplicación de las matrices de distribución conjuntas de cada sitio por las matrices de eficiencia de los convertidores de energía del oleaje reportadas (Babarit et al., 2012).

VI Resultados y discusiones.

La evaluación de la potencia de la energía del oleaje en un sitio determinado, en este caso la Bahía de Todos Santos y sus alrededores, es un procedimiento que consta de diferentes etapas, y la primera de estas etapas tuvo como objetivo la cuantificación del recurso disponible.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de cada una de las etapas que componen la evaluación técnico económica para el aprovechamiento de la potencia del oleaje en la B.T.S. así como las discusiones concernientes a cada etapa.

VI.I Validación del modelo SWAN para la Bahía de Todos Santos.

Como se explicó en el apartado V.I para este estudio se realizaron simulaciones numéricas del oleaje con el modelo SWAN para la Bahía de Ensenada y sus alrededores para el periodo de 2008 a 2017. Una parte crucial en la evaluación del recurso es la validación de las simulaciones realizadas. En este apartado se presentan los resultados de la validación realizada comprando las salidas del modelo con mediciones realizadas con ADCPs en los tres sitios de referencia: Playa Hermosa, Punta Morro e Isla de Todos Santos (Figura 3).

En la tabla III se resumen la validación realizada y en las figuras subsecuentes (Fig. 4 a Fig. 17) se muestran de forma gráfica las comparaciones entre las salidas del modelo y los observaciones de altura significativa, el periodo asociado al pico espectral (T_p) y la dirección promedio del oleaje. Adicionalmente, en el Anexo I se encuentran las tablas con los valores promedio de cada mes para los diferentes años registrados tanto por los sensores como los datos obtenidos mediante la modelación numérica en los tres sitios.

Tabla III. Estadísticos de la comparación de los datos in situ y los obtenidos mediante el modelo numérico de altura significativa (Hs).

	Isla Todos Santos		Punta Morro		Playa Hermosa	
	Sensor	Modelo	Sensor	Modelo	Sensor	Modelo
Max Hs (metros)	5.35	5.30	4.45	3.50	4.59	3.70
Media Hs (metros)	1.29	1.22	0.91	0.87	1.02	0.89
Min Hs (metros)	0.35	0.3501	0.34	0.28	0.28	0.19
Desviación estándar	0.53	0.46	0.44	0.37	0.52	0.40
Coef. de correlación, ρ	0.88		0.90		0.93	
Error cuadrático medio	0.22 m		0.21 m		0.16 m	

VI.I.1 Playa Hermosa.

VI.I.1.1 Altura significativa (Hs).

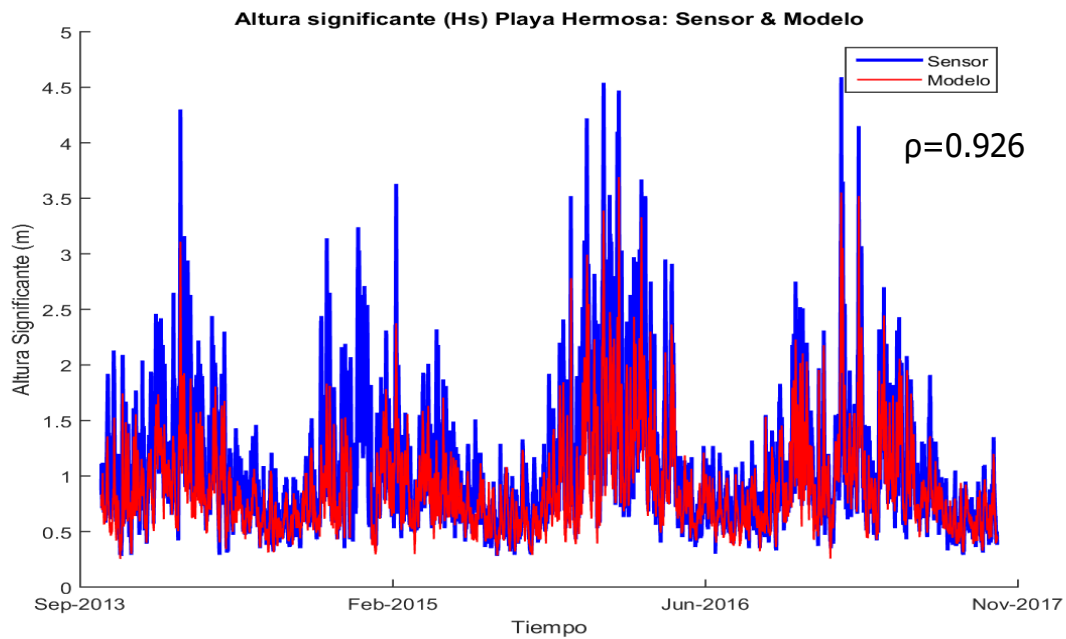


Figura 4. Altura significativa observada (azul) y modelada (rojo) en Playa Hermosa.

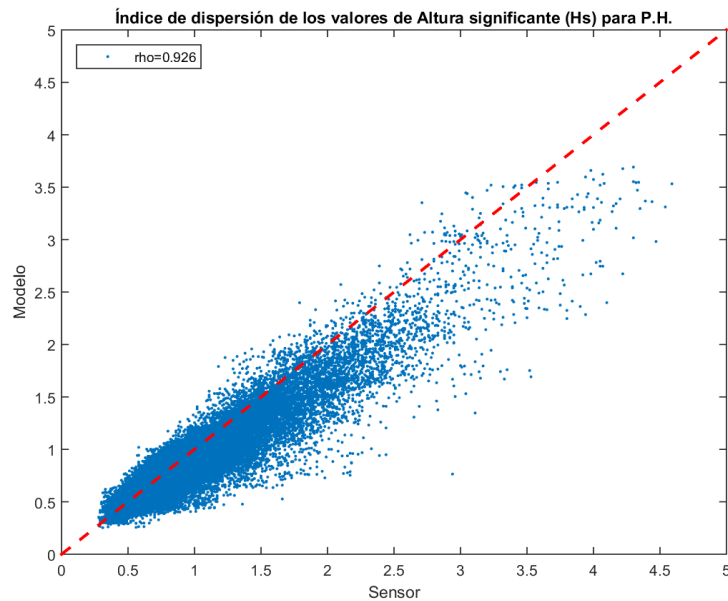


Figura 5. Comparación de la altura significativa observada y modelada para Playa Hermosa.

VI.I.1.2 Período pico (T_p).

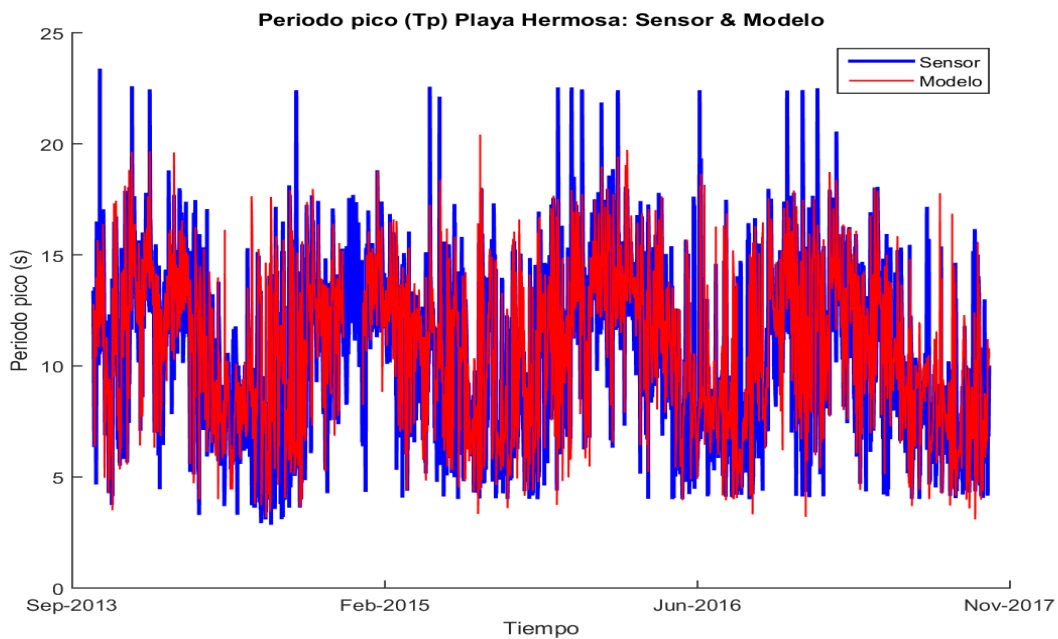


Figura 6. Período asociado al pico espectral observado (azul) y modelado (rojo) en Playa Hermosa.

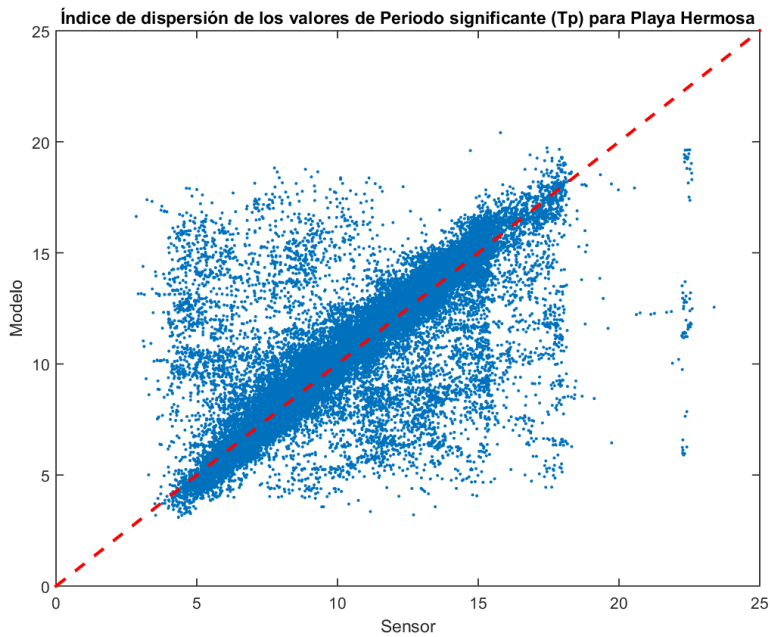


Figura 7. Comparación de período asociado del pico espectral observado y modelado para Playa Hermosa.

VI.I.1.3 Dirección del oleaje.

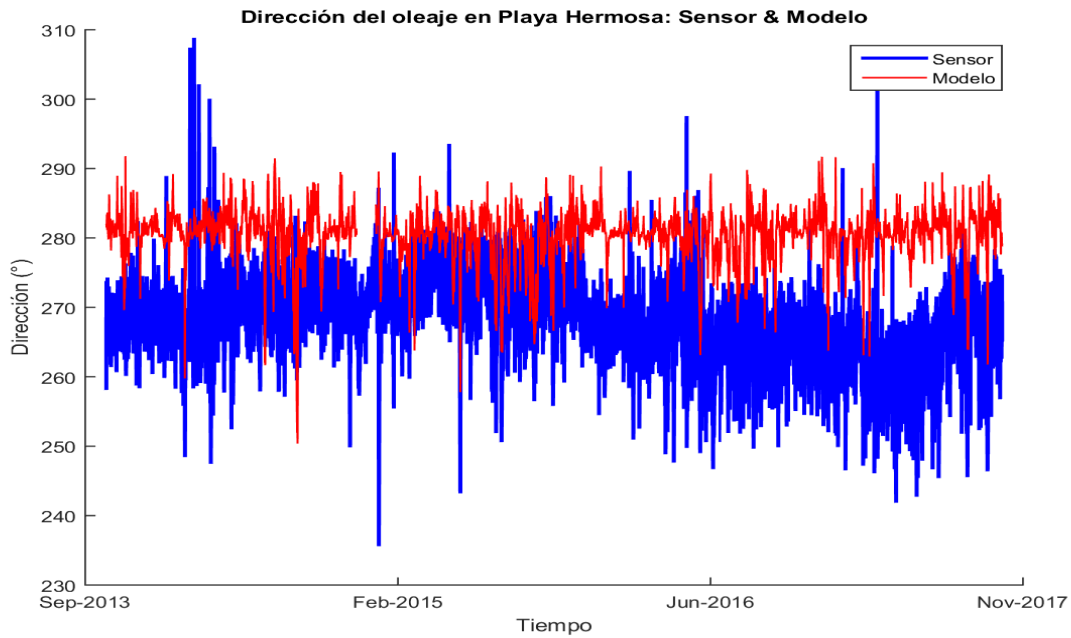


Figura 8. Dirección promedio del oleaje medida (azul) y modelada (rojo) en Playa Hermosa.

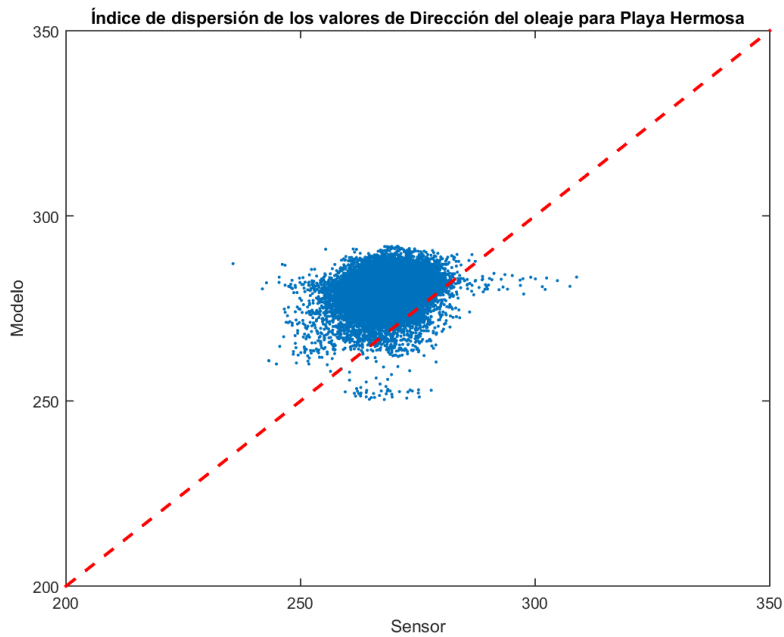


Figura 9. Comparación de la dirección del oleaje observada y modelada para Playa Hermosa.

VI.I.2 Punta Morro.

VI.I.2.1 Altura significativa.

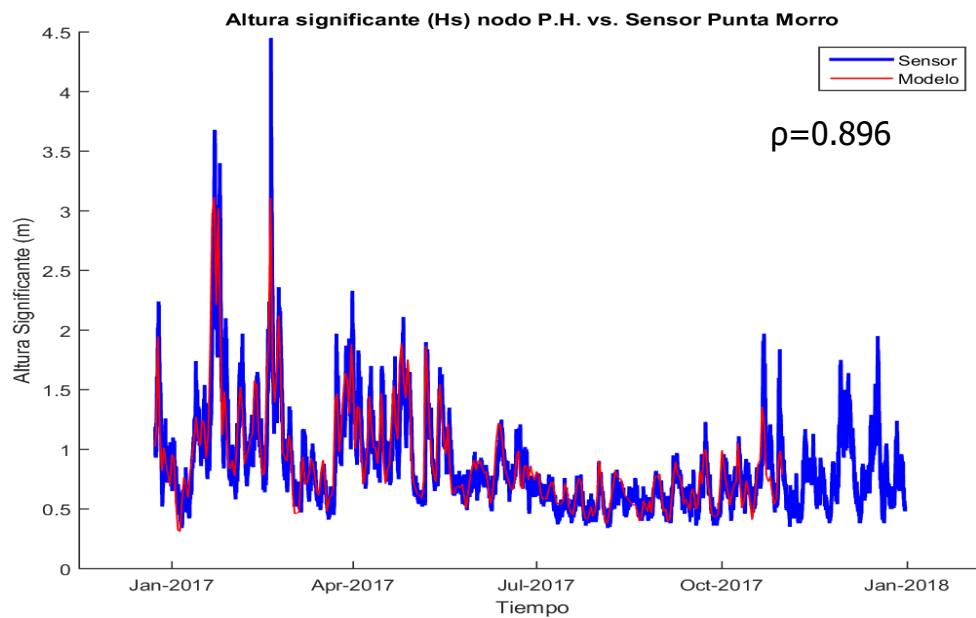


Figura 10. Altura significativa observada (azul) y modelada (rojo) en Punta Morro.

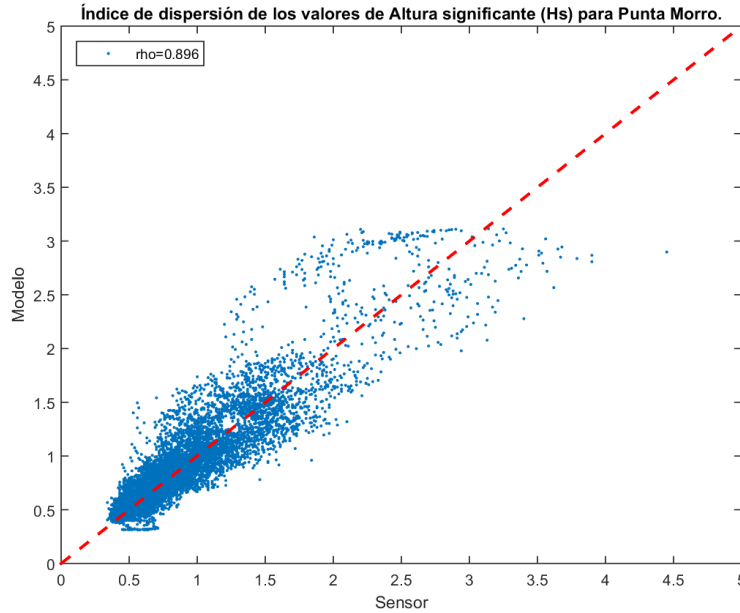


Figura 11. Comparación de la altura significativa observada y modelada para Punta Morro.

VI.I.2.2 Período pico (T_p).

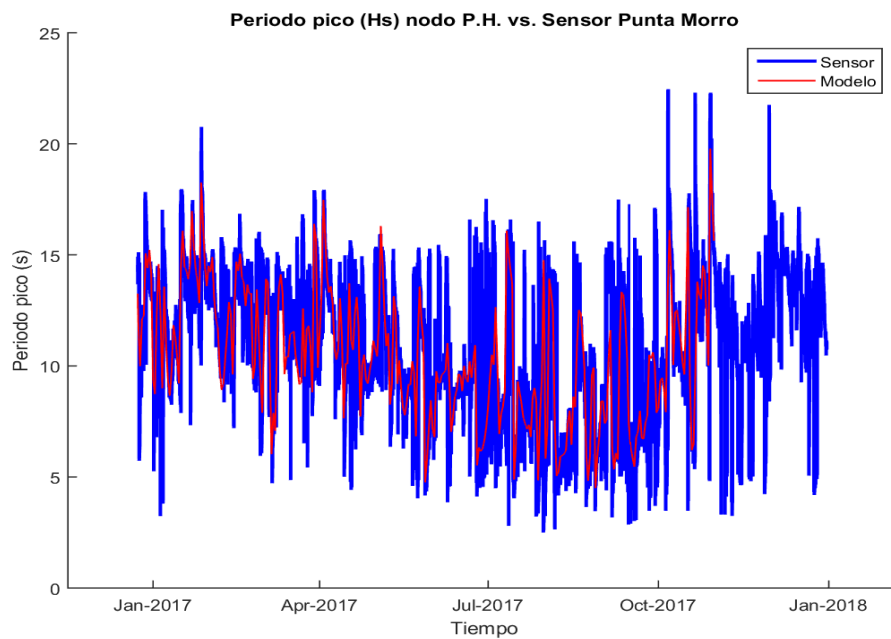


Figura 12. Período asociado al pico espectral observado (azul) y modelado (rojo) en Punta Morro.

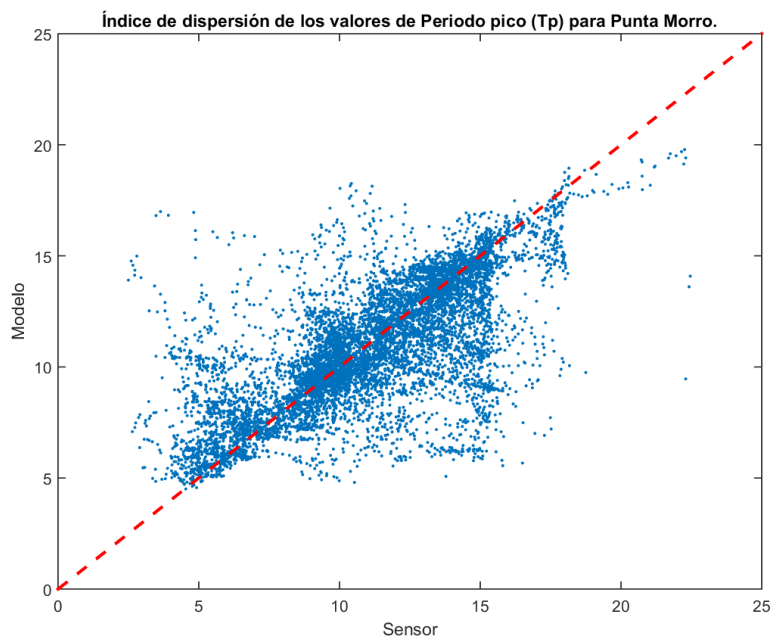


Figura 13. Comparación de periodo asociado del pico espectral observado y modelado para Punta Morro.

VI.I.3 Isla Todos Santos.

VI.I.3.1 Altura significativa.

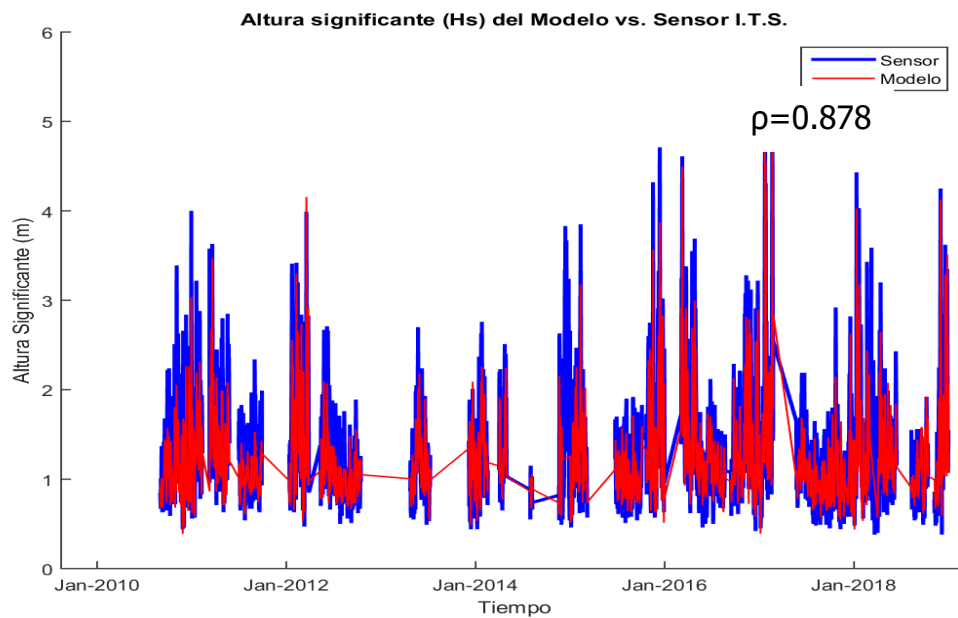


Figura 14. Altura significativa observada (azul) y modelada (rojo) en la Isla Todos Santos.

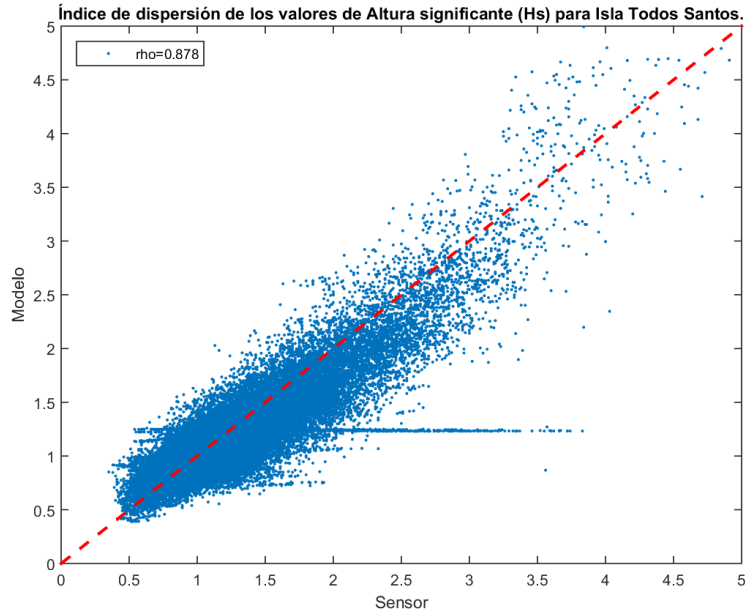


Figura 15. Comparación de la altura significativa observada y modelada para la Isla Todos Santos.

VI.I.3.2 Período pico (T_p).

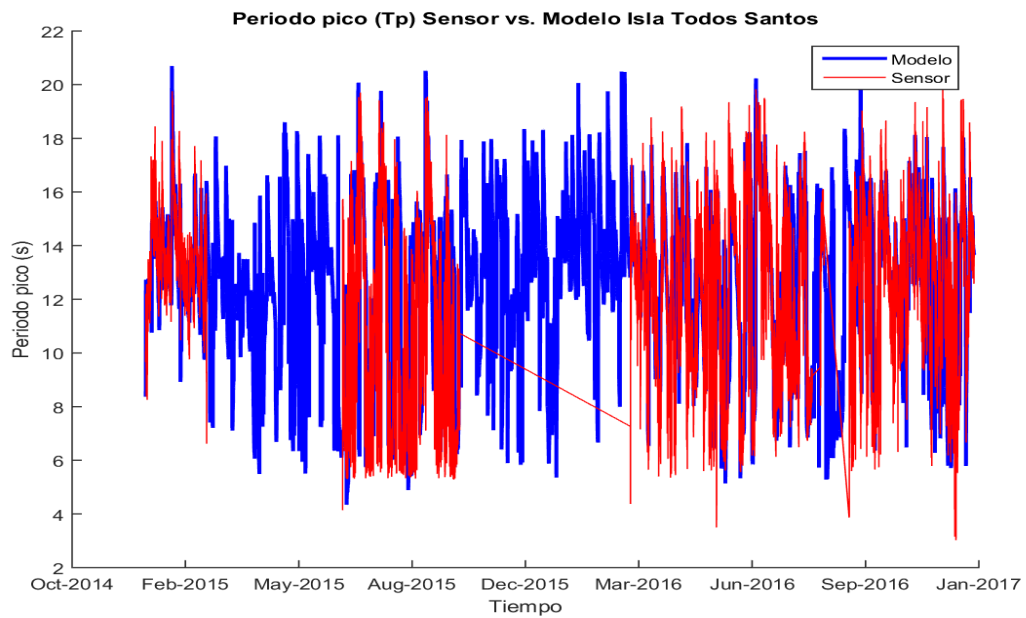


Figura 16. Período asociado al pico espectral observado (azul) y modelado (rojo) en la Isla Todos Santos.

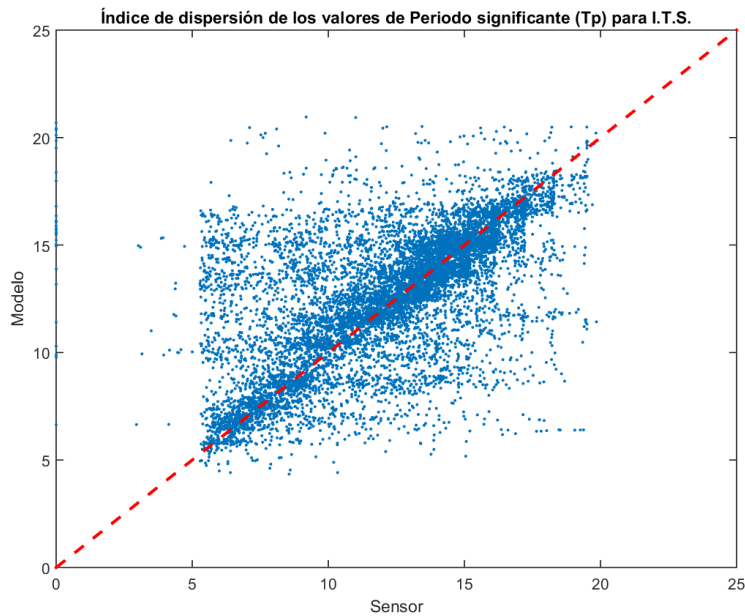


Figura 17. Comparación de período asociado del pico espectral observado y modelado para Isla Todos Santos.

El coeficiente de correlación de Spearman (ρ), es una medida de la asociación o interdependencia entre dos variables aleatorias (tanto continuas como discretas). Los coeficientes de determinación obtenidos fueron positivos y cercanos a uno en los tres sitios, el promedio de los tres sitios es 0.91. Lo que indica que sí existe una estrecha correlación entre los datos medidos y los modelados. Además, el error cuadrático medio (ECM) es alrededor de 0.2 m en los tres sitios por lo que las simulaciones realizadas son confiables y se pueden utilizar para la caracterización del recurso.

VI.II Potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores.

A medida que las olas se propagan hacia la costa, se modifican de manera compleja por los efectos del fondo, tales como refracción, difracción, fricción del fondo y rompimiento de las olas. Por estas razones, la caracterización del recurso de energía de las olas en aguas poco profundas (< 50 m de profundidad) comunmente se realiza solo para sitios específicos donde se planea desplegar plantas de aprovechamiento de la energía del oleaje (Falcao, 2010).

La climatología de la potencia para el periodo analizado se puede observar en la Figura 18. Como se puede observar la potencia promedio en la zona exterior de la Bahía Todos Santos es entre 10 y 14 kW/m, valores que concuerdan de manera razonable con lo reportado por Barstow et al. (2008) y Cornnett (2008), quienes reportan valores de potencia entre los 10 y 25 kW/m para las aguas oceánicas frente a la región de estudio.

Aunque la Figura 18 sólo nos muestra el valor promedio de potencia del oleaje para toda el área de estudio, también nos permite apreciar las zonas con valores de mayor magnitud, tales como la zona denominada como Bajo de San Miguel, Punta Banda y de manera sobresaliente, Punta Santo Tomás. Los valores de potencia en el área de estudio en general y en los puntos más sobresalientes en particular, están influenciados por procesos que tienen lugar a lo largo del año (anuales) y en ocasiones de un año a otro (interanuales), y que se manifiestan principalmente en la dirección de arribo del oleaje a la Bahía y sus alrededores, y que se aprecia en los patrones de refracción del oleaje o incluso dando lugar a que las islas generen un efecto sombra, influyendo en la energía del oleaje que percibimos en la zona costera.

En la Tabla IV y la Figura 19 se muestran la climatología mensual de la potencia del oleaje en el área de estudio. En ellas claramente se observa la estacionalidad de la potencia a lo largo del año, con valores mayores en la época de invierno y menores en el verano. De igual manera, los valores de la desviación estándar presentan un aumento en la época invernal, esto se debe a que los eventos de tormenta son de diferente intensidad y periodicidad de manera interanual. Esto también se puede observar en las series de tiempo de la potencia promedio diaria en los

sitios de interés (Figuras 25, 27, 29, 31 y 33) y se aborda de manera más detallada en un apartado posterior.

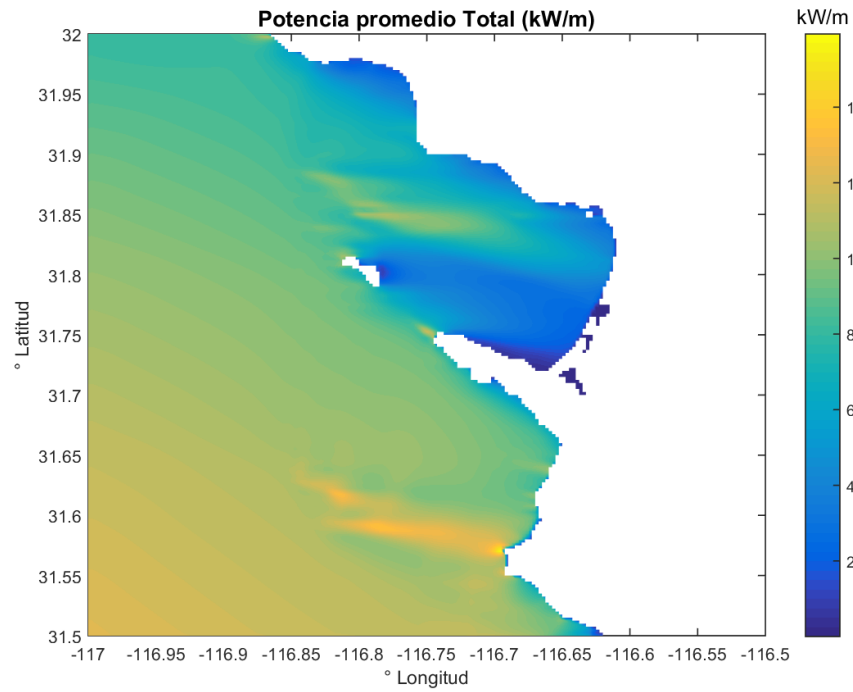


Figura 18. Potencia promedio (8.42 kW/m) en la Bahía de Todos Santos, durante los años de 2008 a 2018.

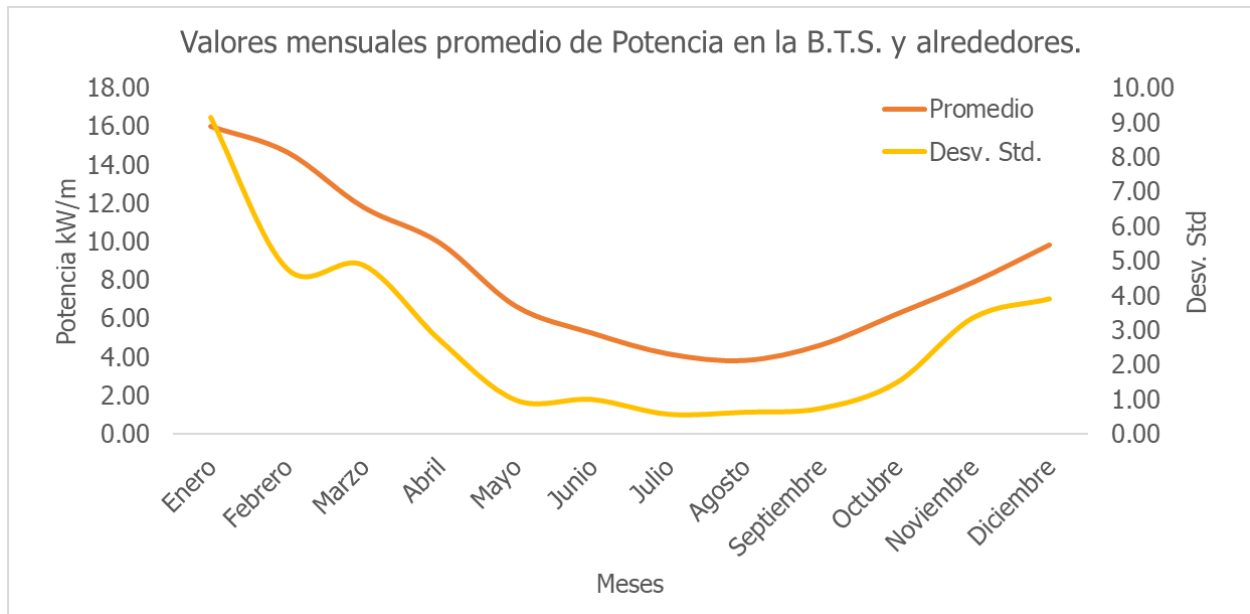


Figura 19. Valores mensuales promedio de Potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores.

Tabla IV. Valores mensuales promedio de Potencia (P) en kilowatts por metro de frente de ola (kW/m) obtenidos mediante el modelo SWAN para el área de estudio.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	16.01	14.67	11.82	9.98	6.68	5.28	4.20	3.86	4.66	6.27	7.92	9.86
Desv.Std	9.15	4.78	4.88	2.72	0.98	1.00	0.57	0.63	0.74	1.49	3.36	3.90

La Tabla V y Figura 20. Valores anuales promedio de Potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores de 2008 a 2017. muestran el comportamiento de la potencia del oleaje de manera anual desde 2008 hasta 2017, en ella se puede observar que en los años 2010 y 2016 hubo una mayor potencia, aunada a una mayor variabilidad, probablemente debida a la ocurrencia de un mayor número de tormentas o la ocurrencia de tormentas con mayor intensidad. Adicionalmente, en el Anexo I se encuentra la Tabla XVII completa con los valores promedio mensuales de Potencia del oleaje para la Bahía de Todos Santos.

Tabla V. Valores anuales promedio de Potencia (P) en kilowatts por metro de frente de ola (kW/m) obtenidos mediante el modelo SWAN para el área de estudio.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Promedio	8.08	7.25	11.12	7.44	8.39	6.93	7.27	7.48	11.65	8.52
Desv.Std	3.63	3.61	9.07	3.15	4.59	3.12	3.42	3.91	8.22	5.88

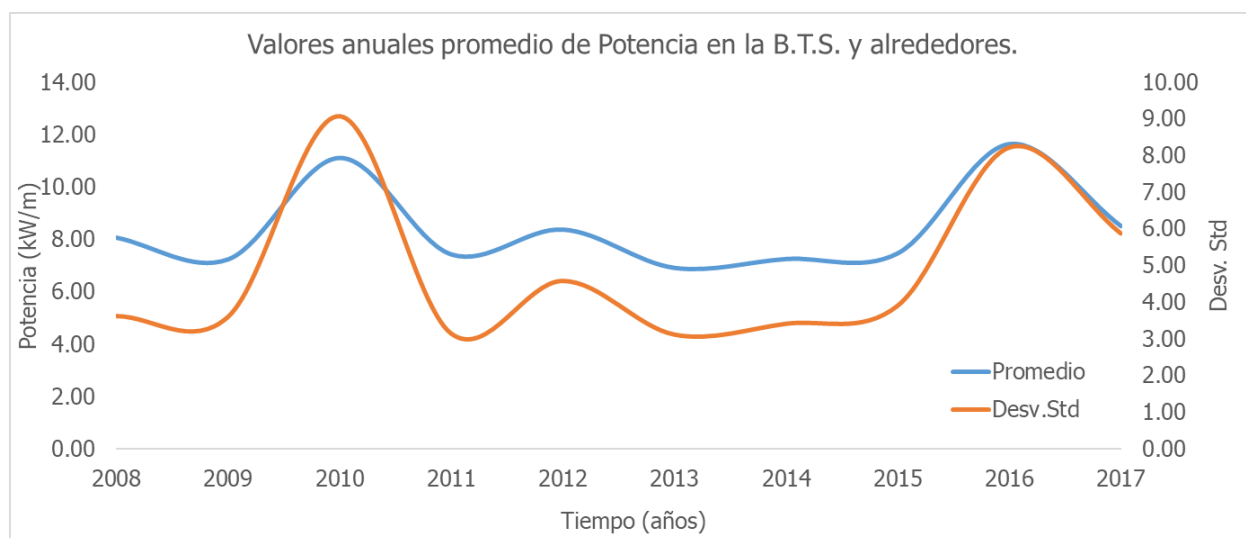


Figura 20. Valores anuales promedio de Potencia del oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores de 2008 a 2017.

A través de la Tabla IV y Tabla V podemos analizar el comportamiento de la Potencia del oleaje en el área de estudio de manera mensual a lo largo del año, y de manera anual de 2008 a 2017, sin embargo, el primer criterio para la selección de áreas a analizar a detalle como sitios potenciales para la instalación de uno o varios convertidores de energía del oleaje, fue la apreciación visual de los mapas de Potencia anual (Figura 21) y de las estaciones Primavera-Verano (Figura 21) y Otoño-Invierno (**Figura 22**), mediante los cuales se detectaron las áreas con mayores valores de potencia.

La estacionalidad del oleaje queda de manifiesto en los valores obtenidos para el área de estudio, los cuales son de 5.78 kW/m para la época de primavera-verano (Figura 21) y aumentan a 11.11 kW/m para la época de otoño-invierno (**Figura 22**). Cabe destacar que estos valores son promedios para toda el área de estudio y se utilizan para facilitar la comparación entre diferentes periodos de tiempo.

En los mapas de Potencia promedio total y de la época de primavera-verano se aprecian como sitios con valores sobresalientes de Potencia disponible en orden de importancia, la zona denominada Punta Santo Tomás, al Sur de la ciudad de Ensenada, Punta Banda, la punta Norte de la Isla de Todos Santos y el Bajo de San Miguel.

Dichos valores de Potencia se incrementan de manera sobresaliente en la época de Otoño-Invierno, sobre todo en Punta Santo Tomás, donde ocurren valores promedio de hasta 22 kW/m (**Figura 22**).

En general, se considera como sitios con buenas condiciones para la explotación del recurso undimotriz la ubicaciones en alta mar con una potencia promedio anual mayor a los 20 kW/m (Barstow, et. al., 2008) pero, se reconoce como redituable la explotación, con la tecnología actual, en sitios con una potencia promedio mayor a 10 kW/m.

La Figura 23 muestra los sitios seleccionados para la evaluación técnico-económica. Entre los sitios a evaluar, se consideró relevante incluir Punta Morro, debido a la cercanía de la Universidad Autónoma de Baja California (F.C.M. e I.I.O.), ya a que podría ser un sitio para el desarrollo de experimentos en esta área de investigación y la zona frente al rompeolas del Puerto de Ensenada, esta última debido a que existe información de muchos dispositivos costeros que se han instalado sobre rompeolas y a que este sitio cuenta con fácil acceso a redes eléctricas y mantenimiento de los dispositivos.

Para la evaluación de la Potencia del oleaje en estos sitios, además de la serie de tiempo de los valores de potencia en el nodo de interés, se presentan las matrices de disponibilidad, las

cuales son histogramas de distribución conjunta de la ocurrencia de una altura significativa (H_s) y periodo pico (T_p) dados.

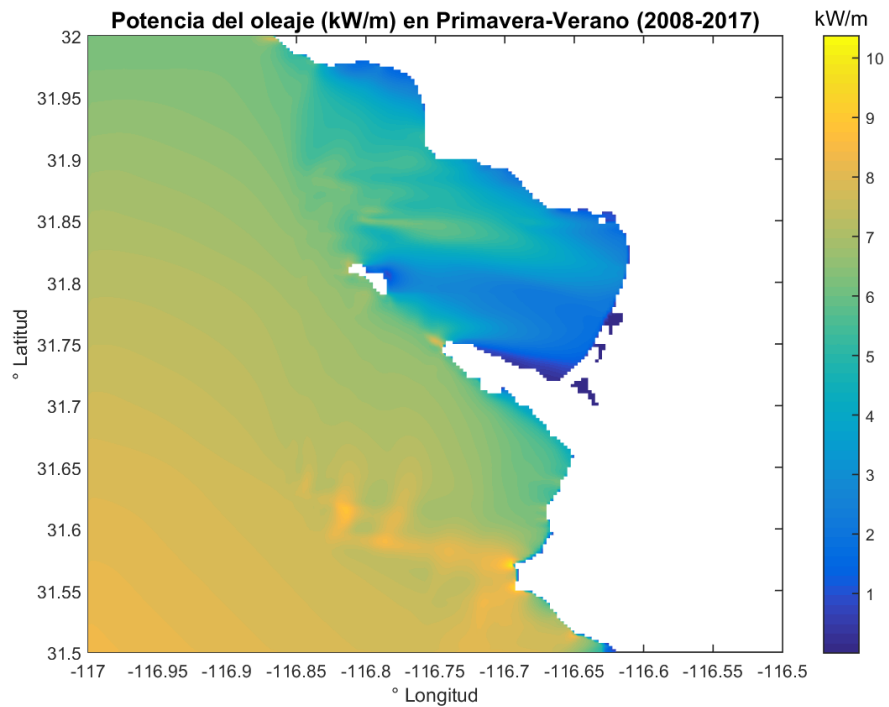


Figura 21. Potencia promedio para los meses de Primavera-Verano de 2008 a 2018.

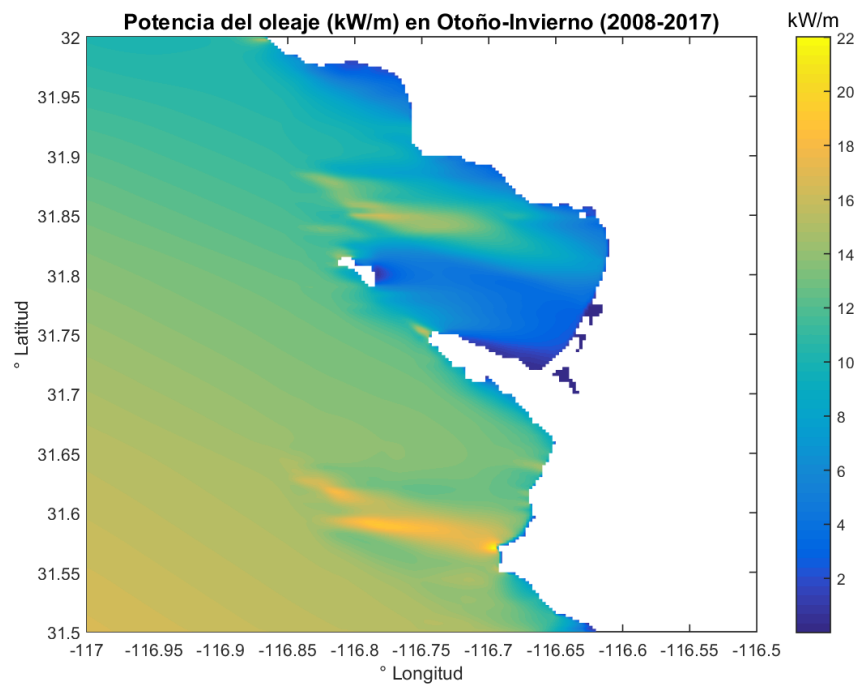


Figura 22. Potencia promedio para los meses de Otoño-Invierno de 2008 a 2018.

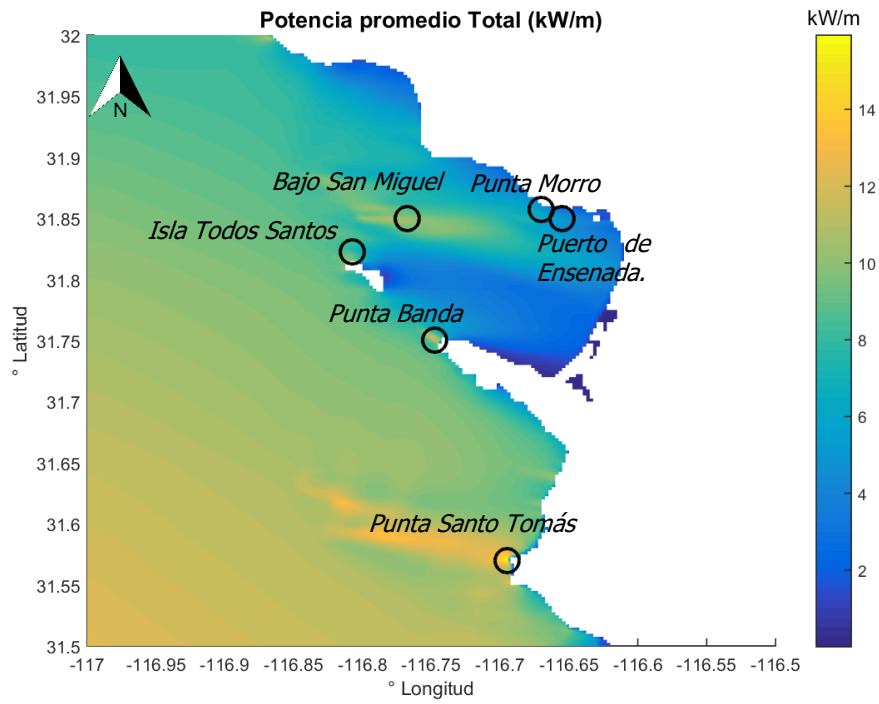


Figura 23. Sitios seleccionados para análisis técnico-económico.

VI.II.1 Sitios con mayores valores de Potencia del Oleaje.

VI.II.1.1 Punta Morro.

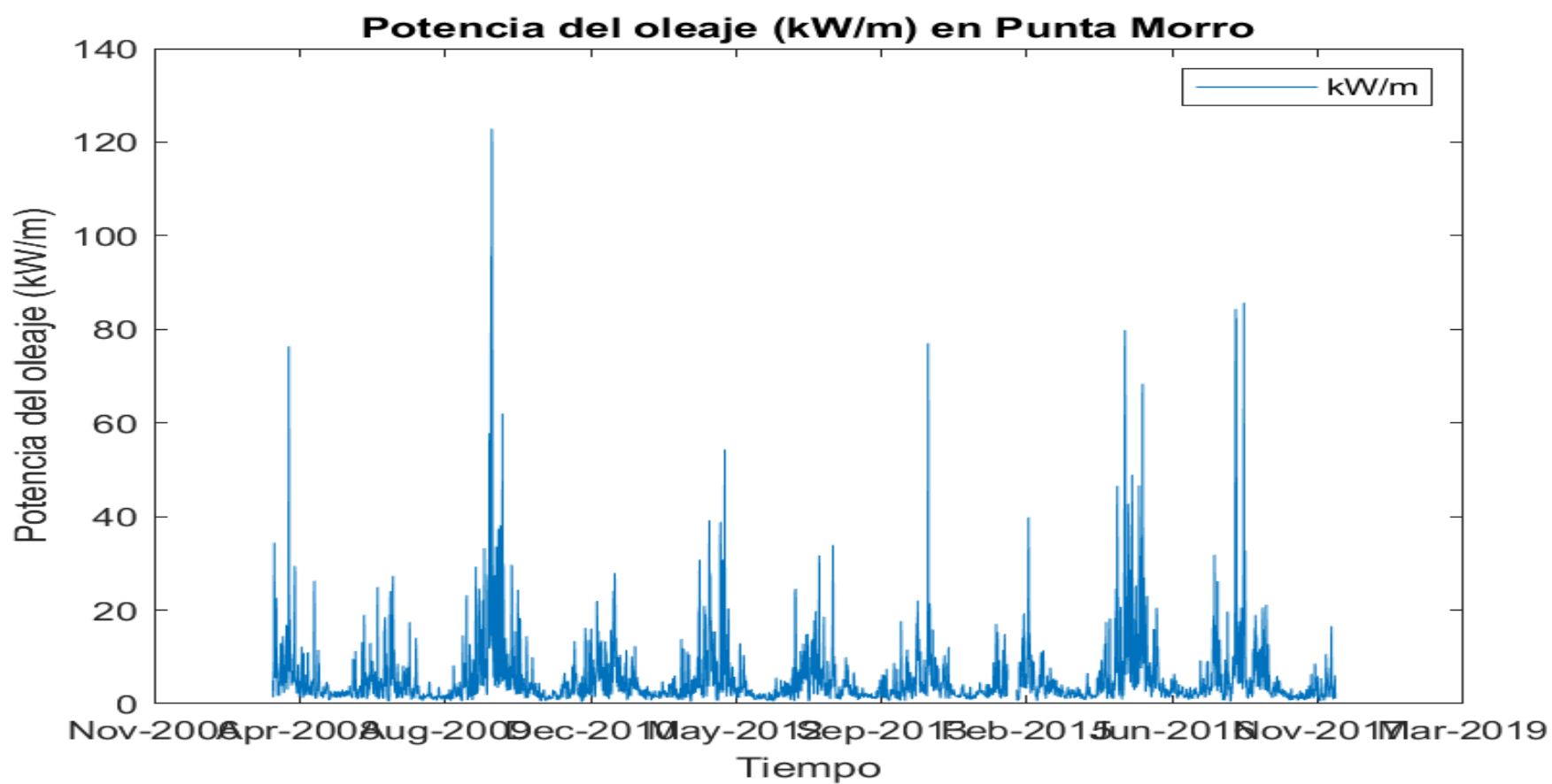


Figura 24. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en Punta Morro de enero de 2008 a diciembre de 2017.

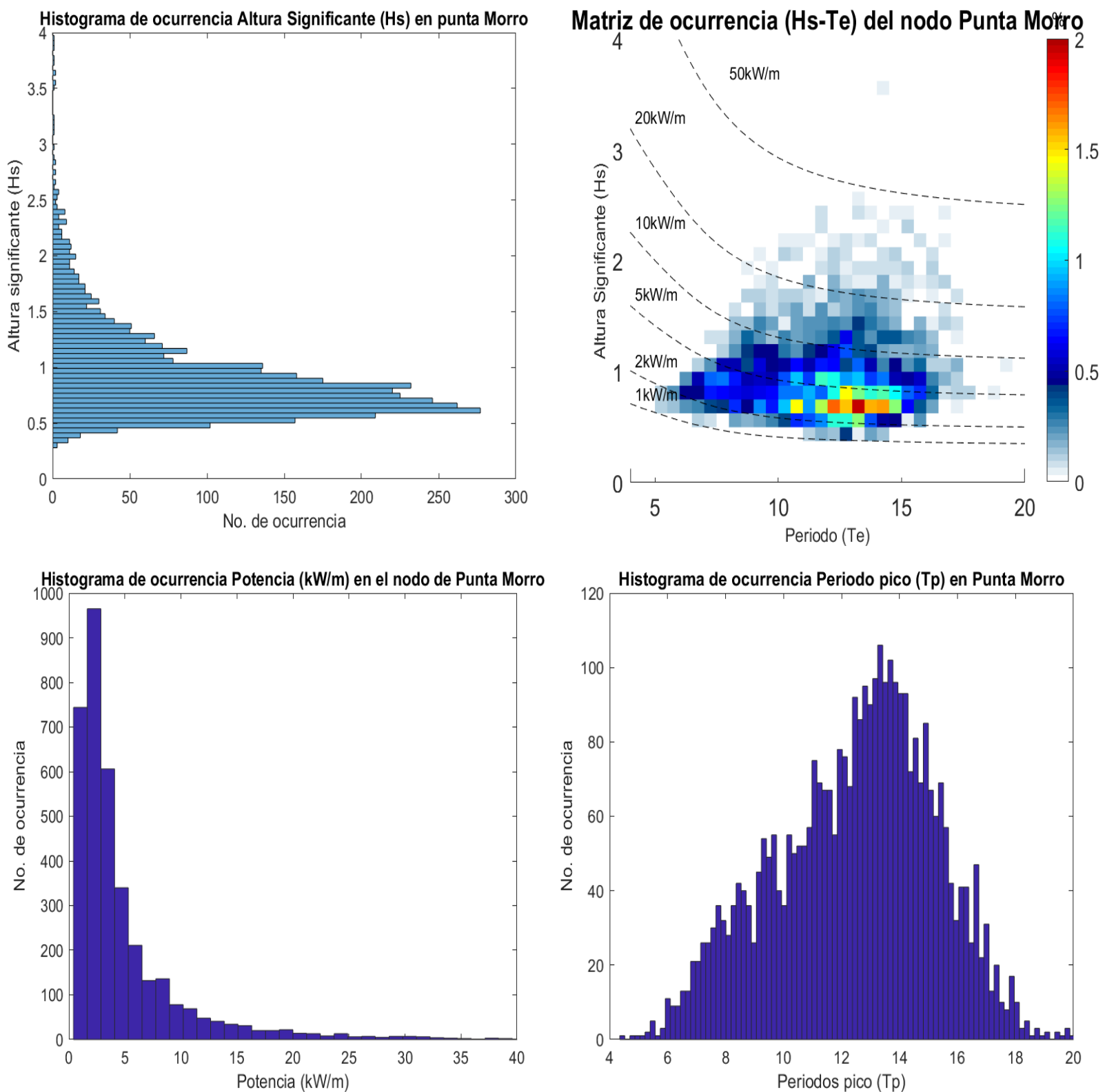


Figura 25. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo de Punta Morro.

VI.II.1.2 Espigón del Puerto de Ensenada.

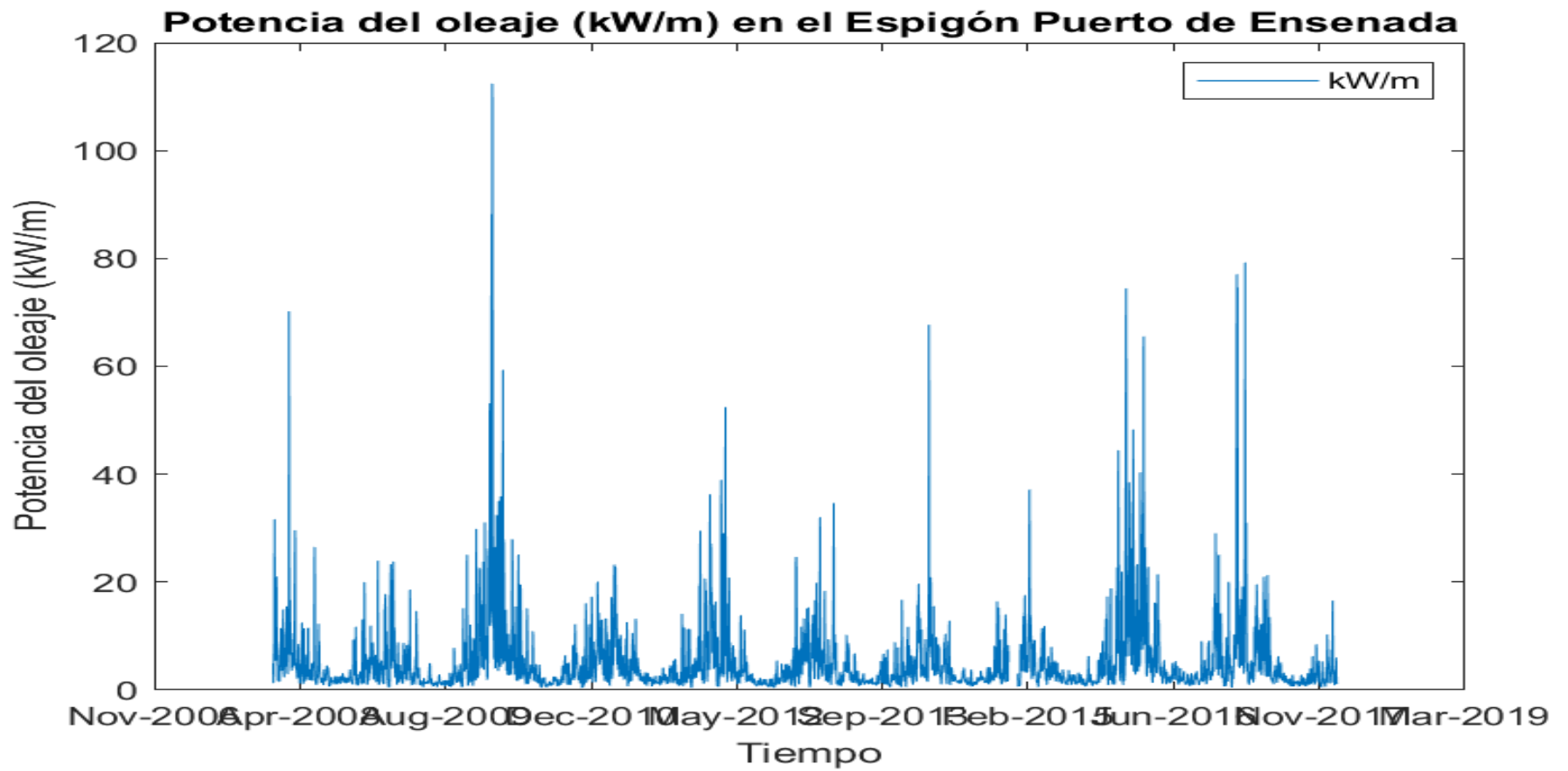


Figura 26. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje frente al espigón del Puerto de Ensenada de enero de 2008 a diciembre de 2017.

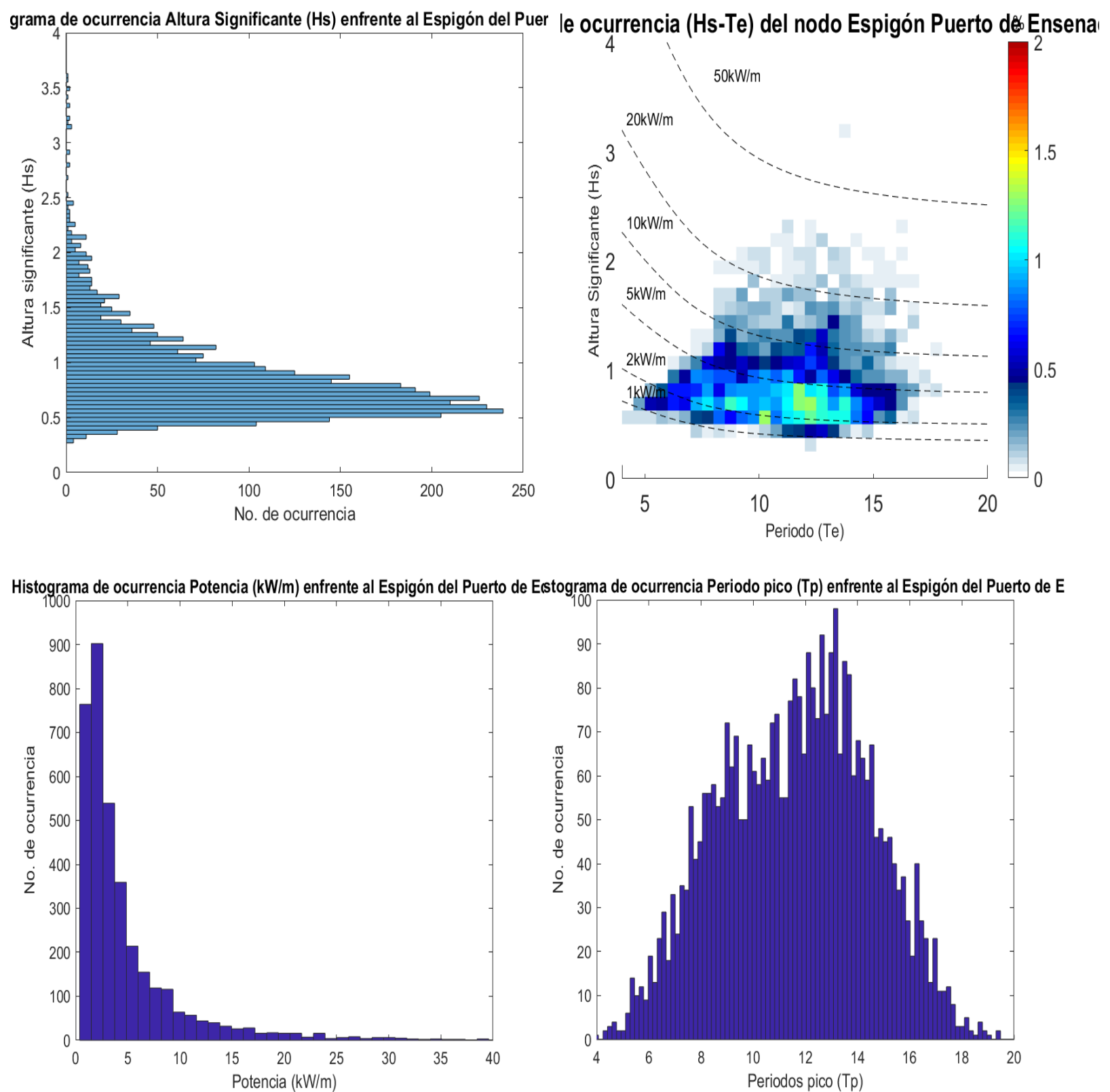


Figura 27. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo frente al Espigón del Puerto de Ensenada.

VI.II.1.3 Bajo San Miguel

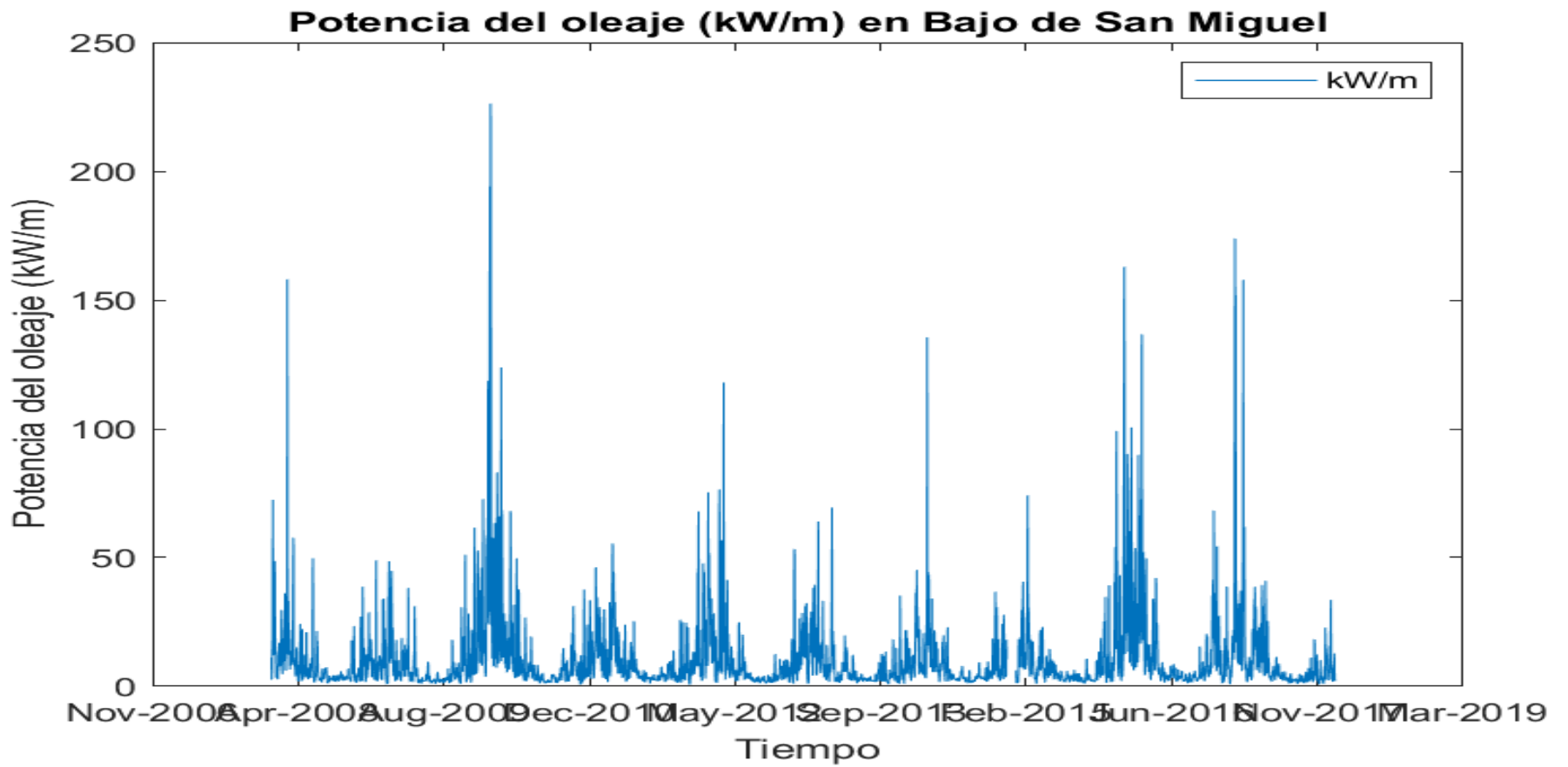


Figura 28. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en el Bajo de San Miguel de enero de 2008 a diciembre de 2017.

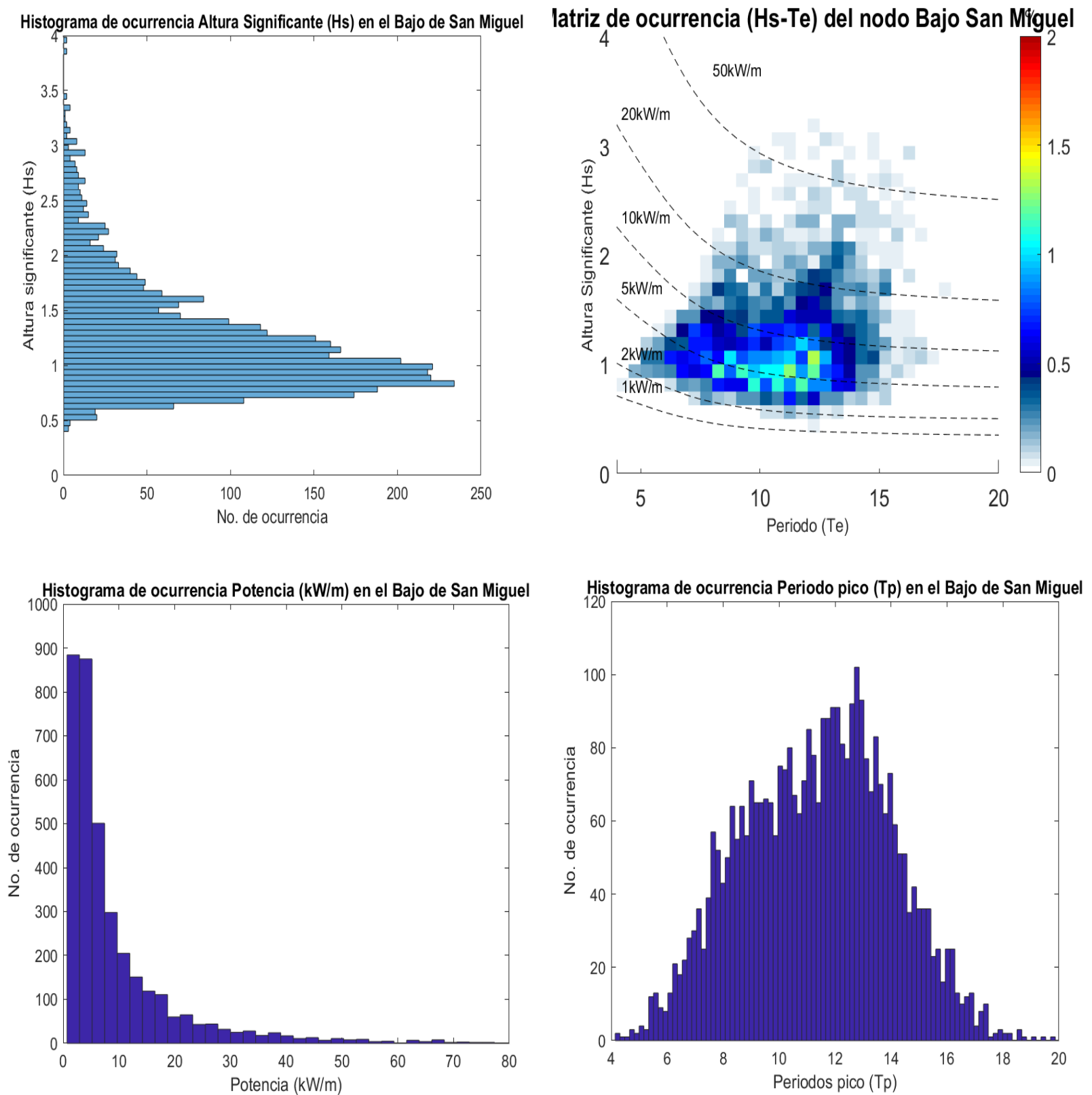


Figura 29. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Bajo de San Miguel.

VI.II.1.4 Isla Todos Santos

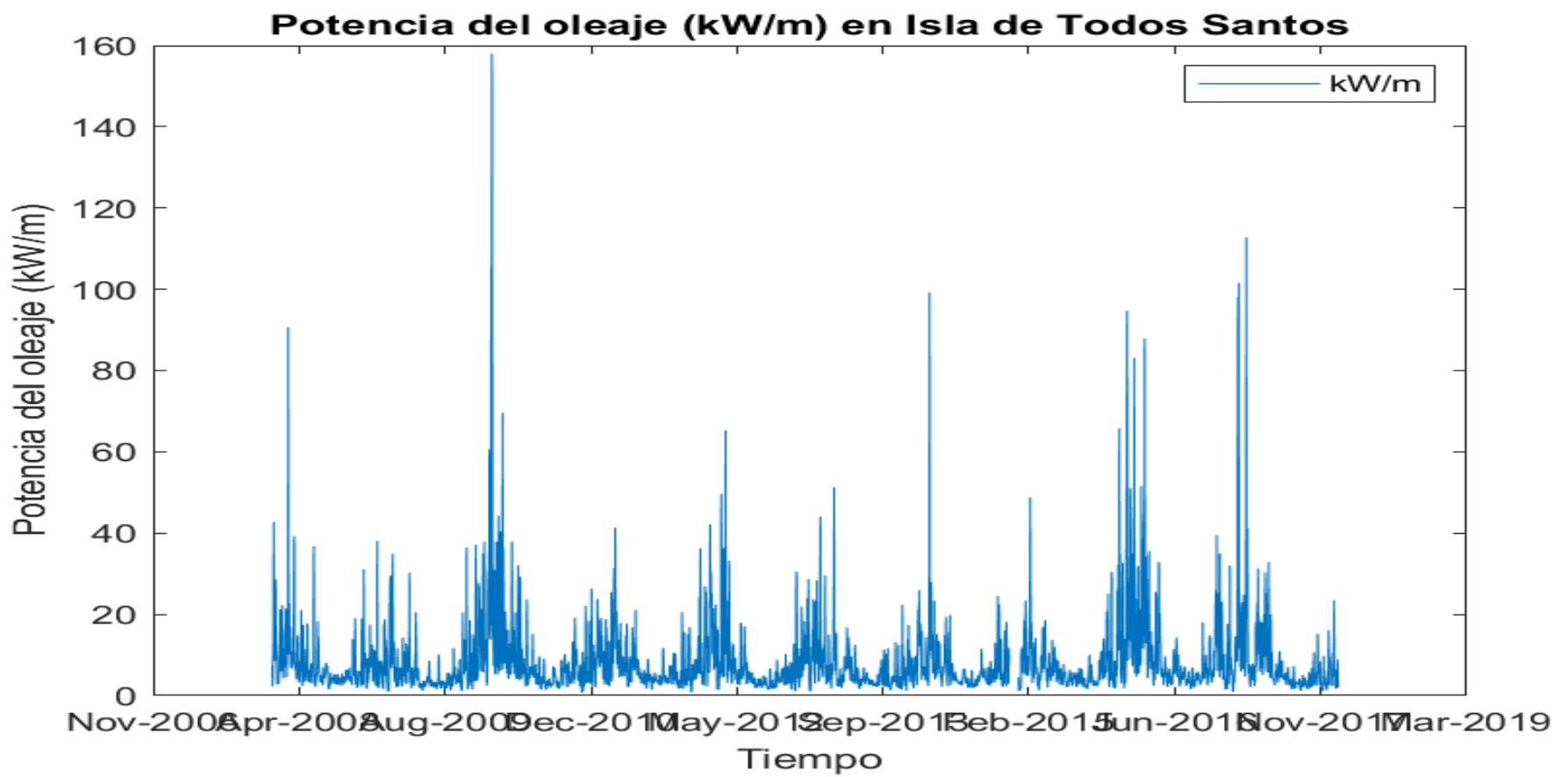


Figura 30. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en la Isla de Todos Santos de enero de 2008 a diciembre de 2017.

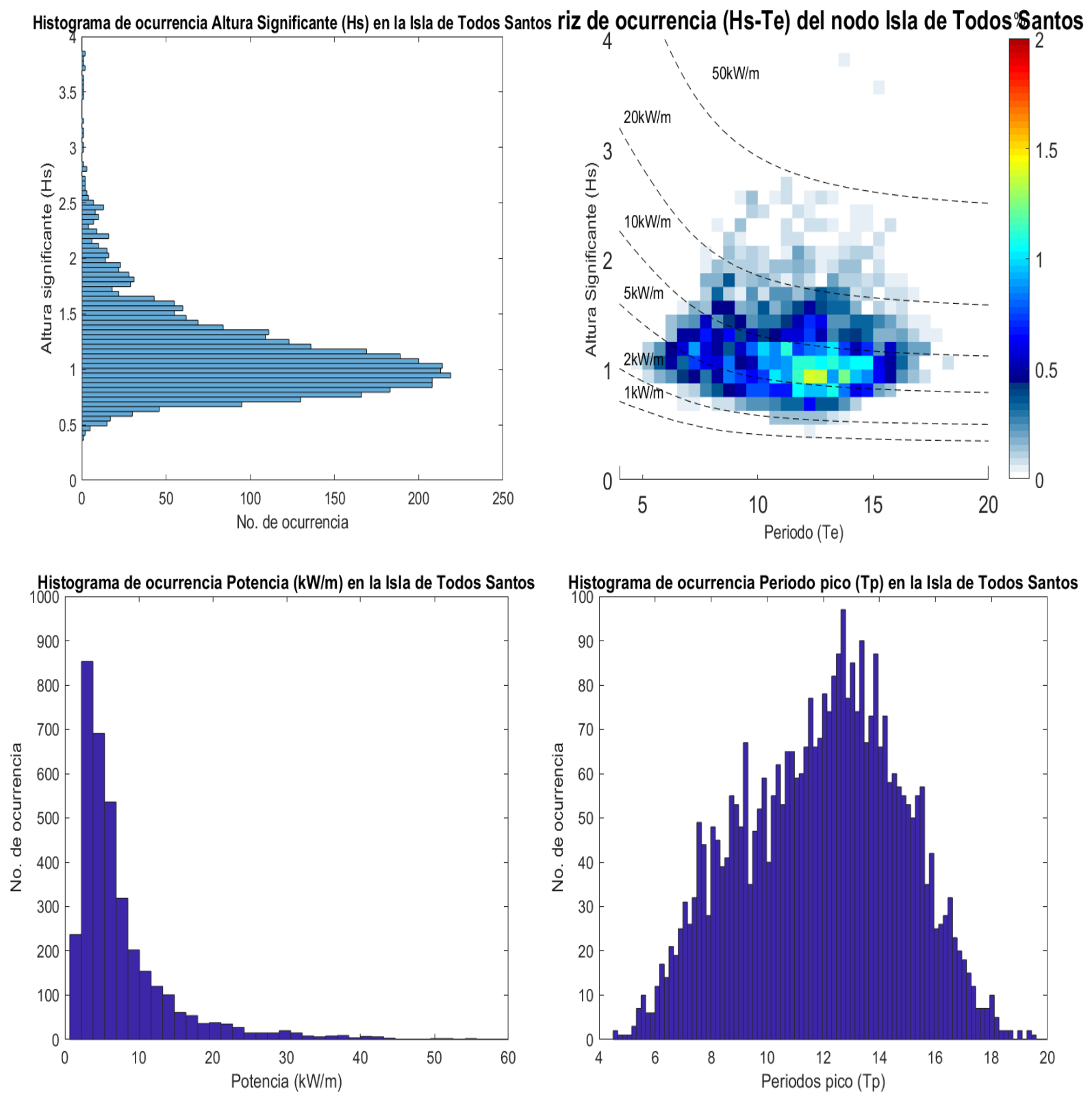


Figura 31. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Isla de Todos Santos.

VI.II.1.5 Punta Banda

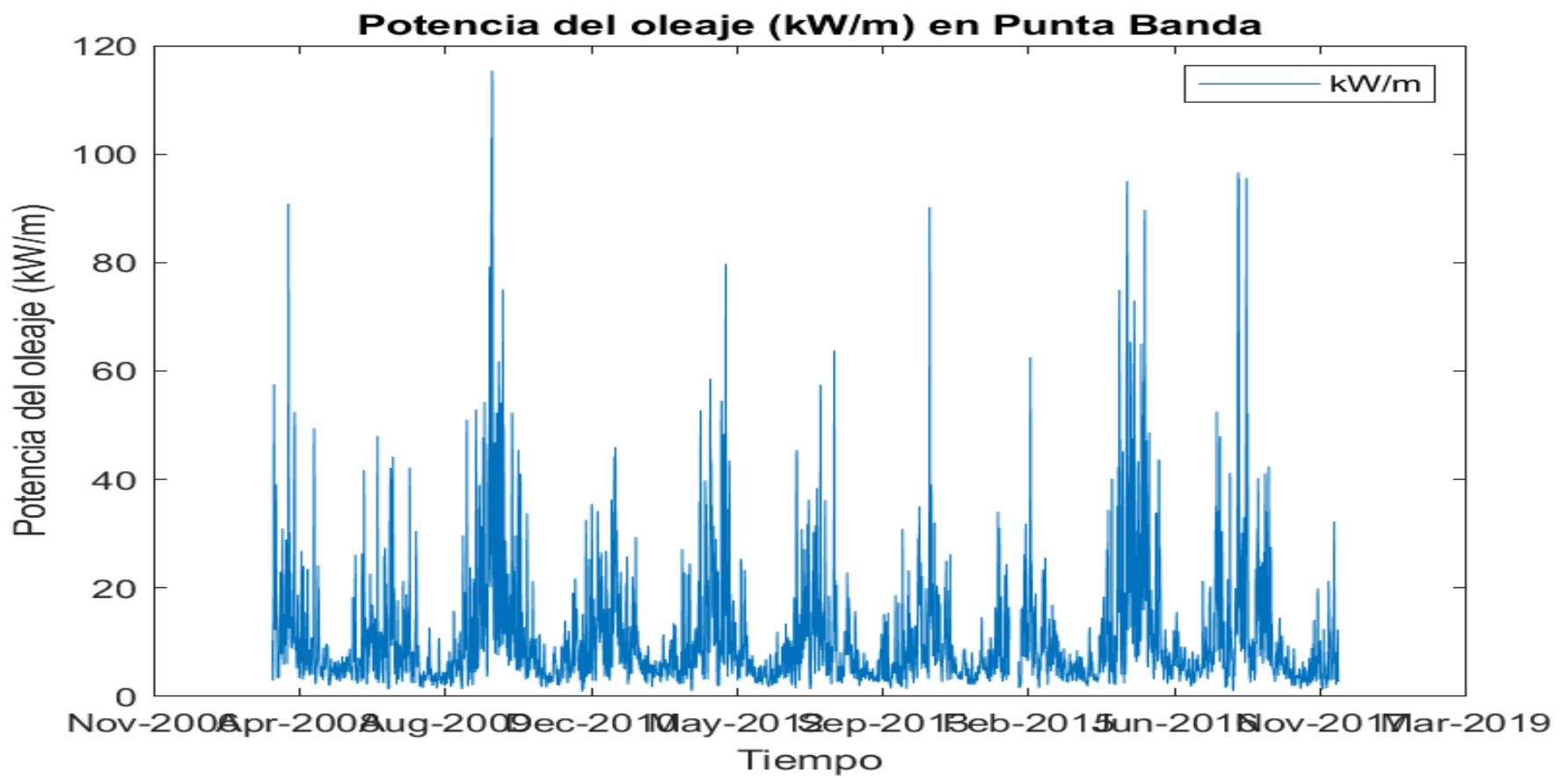


Figura 32. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en Punta Banda de enero de 2008 a diciembre de 2017.

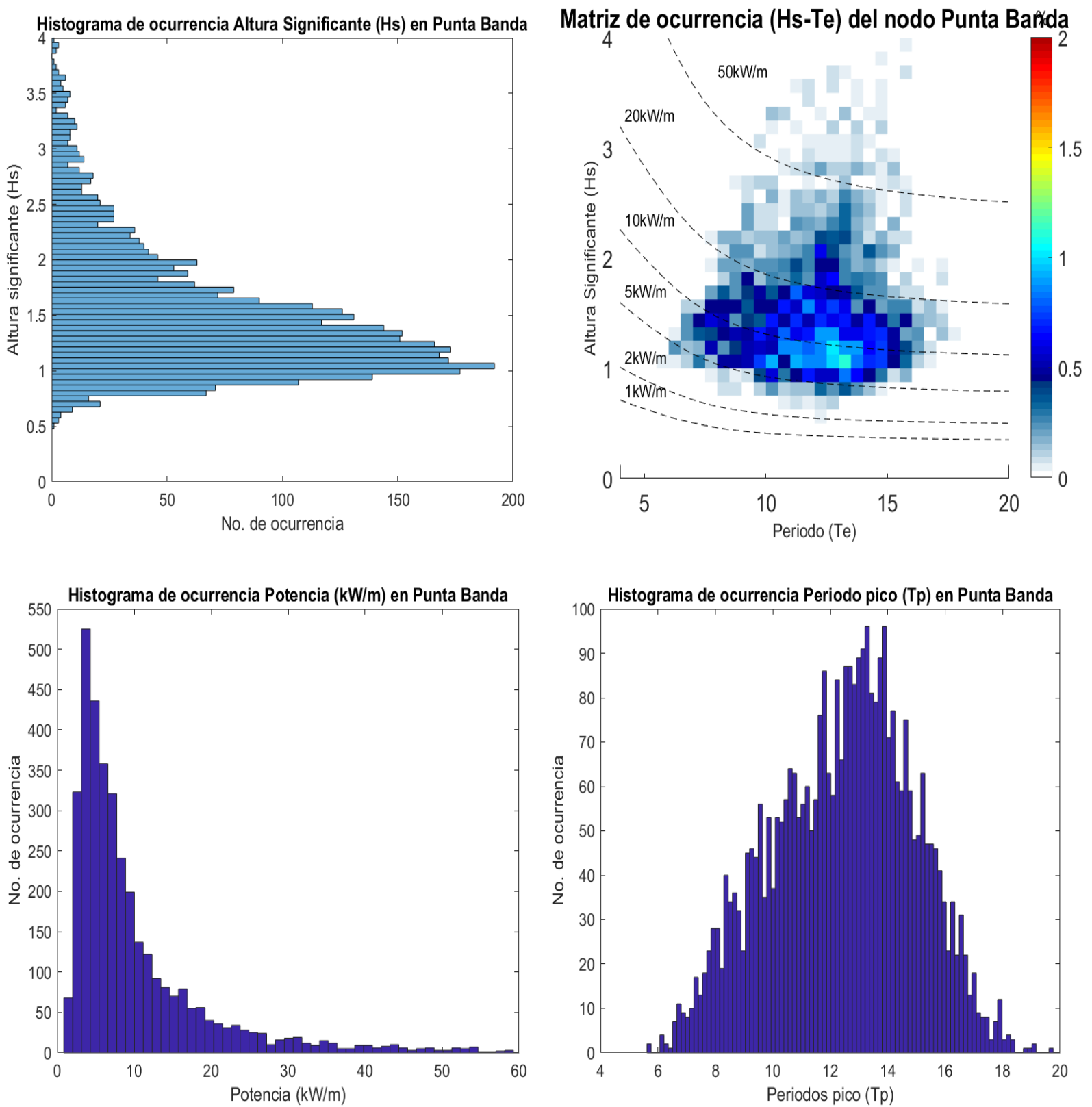


Figura 33. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp), Potencia y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Punta Banda.

VI.II.1.6 Punta Santo Tomás

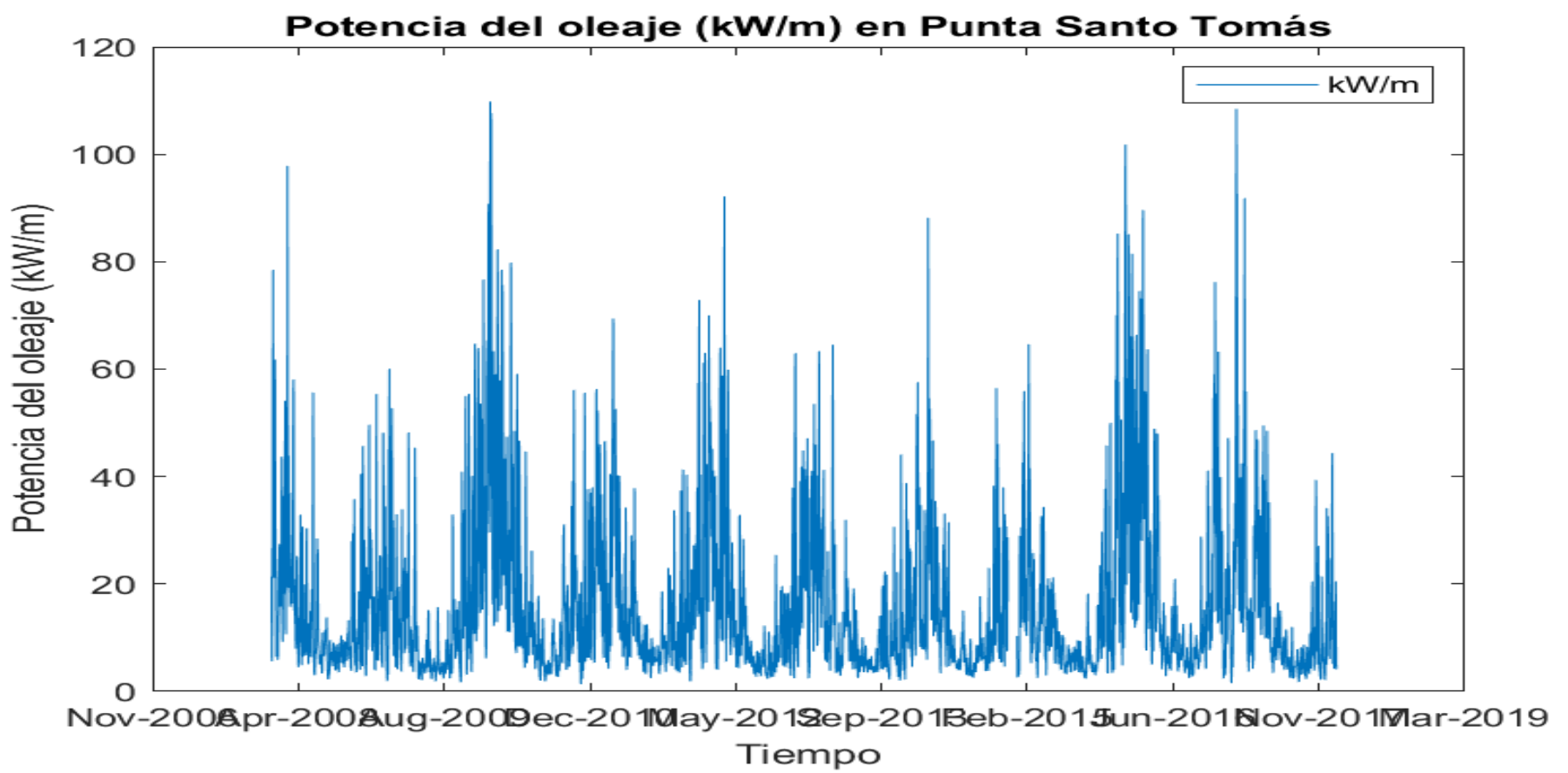


Figura 34. Serie de tiempo de los valores de Potencia del Oleaje en Punta Santo Tomás de enero de 2008 a diciembre de 2017.

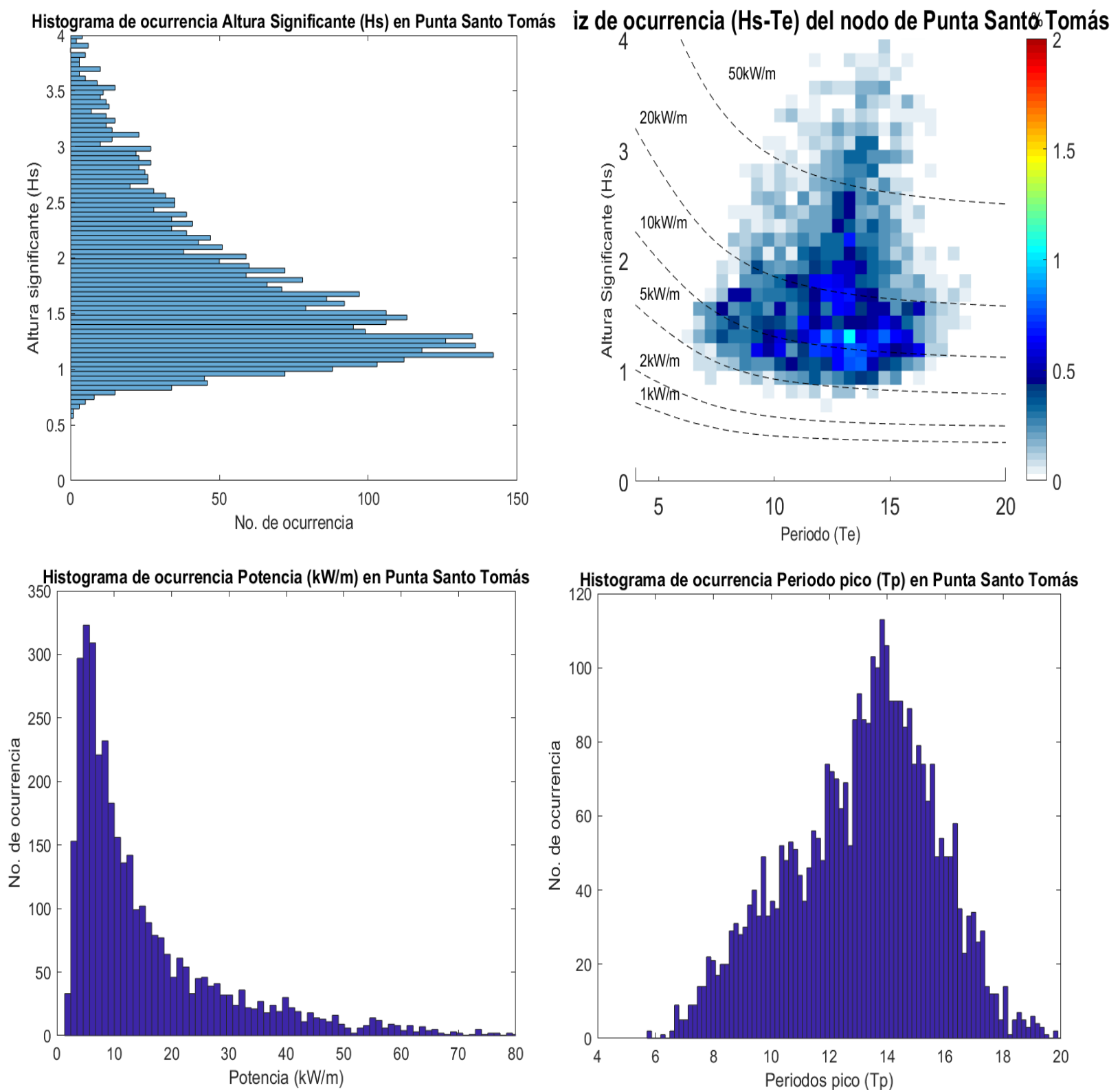


Figura 35. Histogramas de altura significativa (Hs), Periodo pico (Tp) y Matriz de ocurrencia (Hs y Tp) del nodo Punta Santo Tomás.

En las Figuras 24, 26, 28, 30, 32 y 34 se muestran las series de tiempo del promedio diario de la potencia del oleaje para los 6 sitios seleccionados. En ellas se aprecia la estacionalidad del recurso con potencias disponibles mayores durante el invierno y menores en el verano. Además de la ocurrencia de eventos extremos durante el invierno con máximos que pueden superar los 100 kw/m.

Los histogramas de ocurrencia, ya sea de altura significativa, periodo energético, o su representación conjunta en las matrices de disponibilidad, permiten visualizar a detalle qué valores de estos parámetros se presentaron en mayor medida y cómo es la distribución de estos.

Con base en lo anterior, al revisar a detalle las matrices de ocurrencia conjunta de cada uno de los sitios podemos determinar que existen valores predominantes tanto de altura como de periodo para el interior de la Bahía de Todos Santos, los cuales están entre 0.5 y 2 metros de altura significativa, entre 8 y 16 segundos de periodo pic y que dan como resultado valores entre 1 y 12 kW/m.

Los histogramas de potencia nos permiten determinar como es la distribución de los valores que tuvieron lugar en el sitio del que se trata. La distribución de dichos valores es coincidente en cada uno de los sitios con los valores que nos muestran las isolíneas de potencia en las matrices de ocurrencia. Los valores predominantes de potencia del oleaje al interior de la Bahía de Todos Santos están entre 1 y 12 kW/m.

En orden descendente de valores de potencia, el primer lugar lo ocupa Punta Santo Tomás con valores promedio de 15.93 kW/m y con un máximo de 109.83 kW/m, seguido de Punta Banda, con un valor promedio de 10.57 kW/m y un máximo de 115.40 kW/m, que con base en la Figura 32 podemos observar que corresponde a un evento extremo que tuvo lugar en toda la Bahía de Todos Santos en la época de otoño de 2009.

Con base en los valores promedio, en tercer lugar se ubica el Bajo de San Miguel, con 10.30 kW/m, y con un valor máximo sobresaliente de 226.25 kW/m (Figura 32). El cuarto lugar lo ocupa la punta Norte de la Isla de Todos Santos con un valor promedio de 8.12 kW/m, y con un valor extremo de 158.0 kW/m; seguido por Punta Morro, con un valor promedio de 5.25 kW/m y un máximo de 122.86 (Figura 24) y por último se encuentra el nodo frente al Espigón del Puerto de Ensenada con un valor promedio de 5.0 kW/m y un máximo de 112.41 kW/m (Figura 26).

Tabla VI. Valores mínimo, promedio y máximo de potencia del Oleaje en los nodos seleccionados.

	Valores de Potencia del Oleaje (kW/m) de 2008 a 2017.		
	Mínimo	Promedio	Máximo
Punta Morro	0.40	5.25	122.86
Espigón Puerto de Ensenada	0.38	5.08	112.41
Bajo de San Miguel	0.70	10.29	226.26
Isla Todos Santos	0.65	8.12	158.0
Punta Banda	0.86	10.57	115.38
Punta Santo Tomás	1.35	15.93	109.83.44

Aunque los valores máximos reportados en la Tabla VI para cada uno de los sitios de estudio corresponden a un evento extremo ocurrido en algún momento durante el otoño de 2009, dichos valores nos brindan información de como la dirección de arribo y la batimetría, permiten la manifestación del oleaje que arriba a la Bahía de Todos Santos con diferentes intensidades, dependiendo la zona.

Tal es el caso del Bajo de San Miguel, en donde se registró oleaje con altura significativa de 5.5 metros, misma que está asociada a una potencia de 226.25 kW/m.

Aunque los datos que concentra la Tabla VI nos permiten darnos una idea general de la potencia del oleaje disponible en cada uno de los sitios que estamos analizando, son las matrices de ocurrencia conjunta las que nos permitirán realizar un análisis más detallado de la energía que podríamos aprovechar mediante algún(os) dispositivo(os) convertidor(es) de energía del oleaje.

Para capturar energía de las olas del mar, es necesario utilizar un dispositivo que reaccione de manera adecuada a las fuerzas que las olas le aplican. La pregunta ¿qué convertidor de energía es el más conveniente? no se responde de manera trivial y para ello es indispensable determinar la potencia extraíble, esto se puede realizar al multiplicar la matriz de disponibilidad de cada sitio por la matriz de eficiencia de un dispositivo convertidor de energía del oleaje.

En las secciones subsecuentes primero se analizan la tecnología actual de convertidores de energía del oleaje, después se realizan cálculos de la potencia extraíble con diferentes dispositivos en los sitios seleccionados y, finalmente, se realizan consideraciones de factibilidad de instalación de dichos dispositivos.

VI.III Análisis de dispositivos convertidores de energía del oleaje.

Actualmente hay una amplia variedad de tecnologías para la extracción de energía de las olas, resultado de las diferentes maneras en que la energía puede ser absorbida del oleaje, y también dependiendo de la profundidad del agua y de la ubicación (litoral, cerca de la costa, mar adentro). Los dispositivos convertidores de energía del oleaje se clasifican de acuerdo a su modo de operación, ubicación del dispositivo y su geometría (Figura 36).

En un dispositivo montado en tierra, la estructura está firmemente fijada a algún sitio en la costa y las olas hacen que el agua se mueva de manera útil (Open University, 2020). Para otros tipos de dispositivos, una parte de la estructura puede estar fija, tal vez anclada al fondo marino, pero otra parte puede ser un flotador que se mueve en respuesta a las olas tirando contra el anclaje. En este caso, el movimiento relativo entre el anclaje y el flotador brinda la oportunidad de extraer energía (Open University, 2020).

Las revisiones recientes identificaron alrededor de cien proyectos en diversas etapas de desarrollo. El número no parece disminuir: los nuevos conceptos y tecnologías reemplazan o superan en número a los que están siendo abandonados (Falcao, 2010).

La absorción de la energía de las olas es un proceso hidrodinámico de dificultad teórica considerable, en el cual los fenómenos de difracción y radiación de ondas tiene un papel importante (Falcao, 2010).

Una dificultad adicional está relacionada con el concepto de "Mecanismo de extracción de potencia" (Power take off) el cual permite la producción de energía útil (e.g. turbina de aire, hidráulica de potencia, generador eléctrico, etc.). El problema aquí radica en la variabilidad del flujo de energía absorbido por las olas, en varias escalas de tiempo: ola a ola (unos segundos), estados del mar (horas o días) y variaciones estacionales. Naturalmente, la capacidad de supervivencia en condiciones extremas es otro aspecto importante a considerar (Falcao, 2010).

Como parte de esta investigación se realizó la estimación de la producción media de energía que pueden llevar a cabo algunos modelos de convertidores de energía undimotriz en los sitios seleccionados. A continuación se describen las principales características de cada uno de los dispositivos utilizados en dicho análisis, junto con la matriz de eficiencia que se utilizó y en la sección VI.IV se presentan los resultados de la potencia extraíble en cada sitio.

Clasificación de Convertidores de Energía del Oleaje con base en su modo de operación y ubicación.

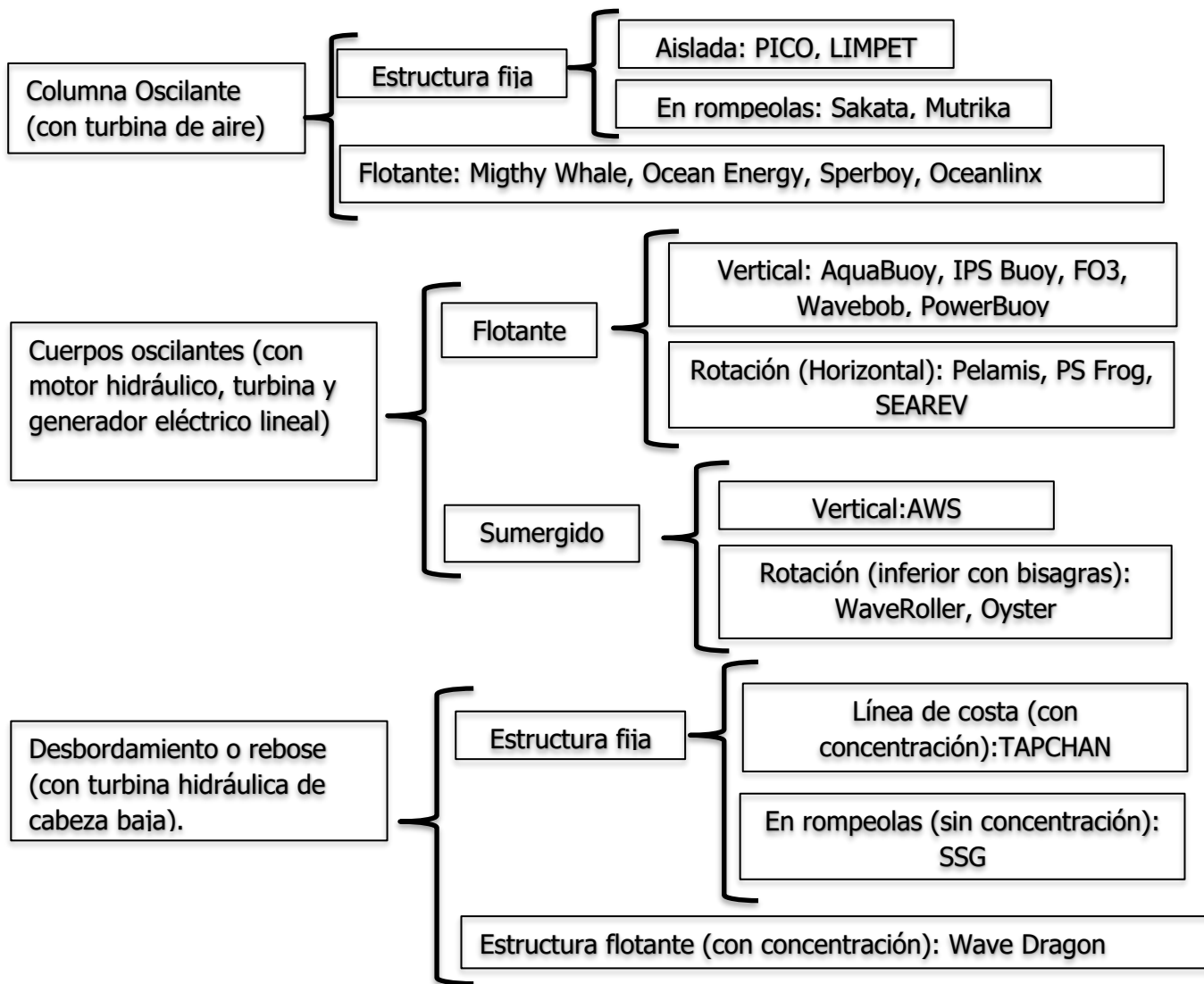


Figura 36. Las diversas tecnologías de energía undimotriz (modificado de Falcao, 2010).

VI.III.1 Boya con anclaje al fondo (Small bottom-referenced heaving buoy).

El convertidor de energía "Boya con anclaje al fondo", está inspirado en el CEO Seabased, el cual fue desarrollado en Suecia. La Figura 37 muestra sus diferentes componentes.

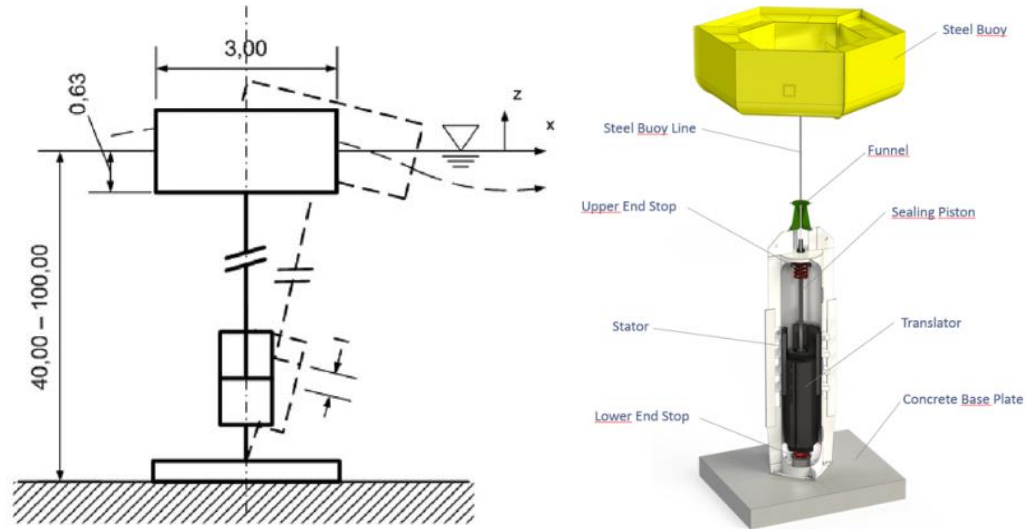


Figura 37. CEO Seabased (tomado de Babarit et al., (2012) y Seabased.com)

El dispositivo consiste en una boya simétrica con una sección elipsoidal que flota en la superficie del océano, conectada al sistema de conversión de energía situada en el fondo del mar mediante un cable. El sistema de conversión de energía consta de un generador lineal colocado dentro de un casco de acero montado sobre una estructura de lastre de hormigón.

Es importante resaltar que la superficie característica que abarca la boya se estimó en 42 m^2 y la masa en 31 toneladas.

Bajo la acción de las olas, la boya se mueve en el eje horizontal y vertical, lo que genera un tirón del cable que a su vez impulsa el generador.

De acuerdo a la clasificación de la Figura 36, el dispositivo Seabased corresponde a los cuerpos oscilantes, y en este caso su esquematización lo muestra como flotante en la superficie, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

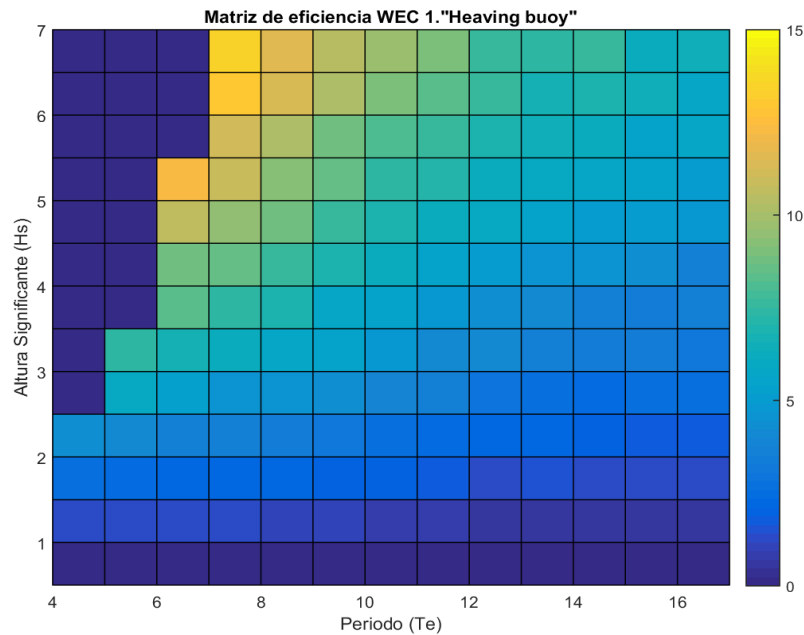


Figura 38. Matriz de potencia del dispositivo tipo boya superficial con anclaje al fondo (Babarit et al., 2012).

VI.III.2 Boya sumergida con anclaje al fondo (bottom-referenced submerged heave-buoy).

El convertidor "Boya sumergida con anclaje al fondo" está basado en el dispositivo CETO, que fue desarrollado en Australia por la empresa *Carnegie Clean Energy* y también en Francia. Su nombre está basado en la diosa griega del mar Ceto (Keto) y el principio de funcionamiento de este dispositivo es similar al anterior.

Las principales diferencias con el Seabased son: 1) la boya CETO tiene el doble de diámetro y está completamente sumergida y 2) el sistema de conversión de energía (power take off) es hidráulico. Aún así, el sistema de conversión de energía se coloca en el fondo del mar y se conecta a la boya a través de cable de forma similar al dispositivo Seabased. El área característica se estimó en 220 m² y la masa en 200 toneladas.

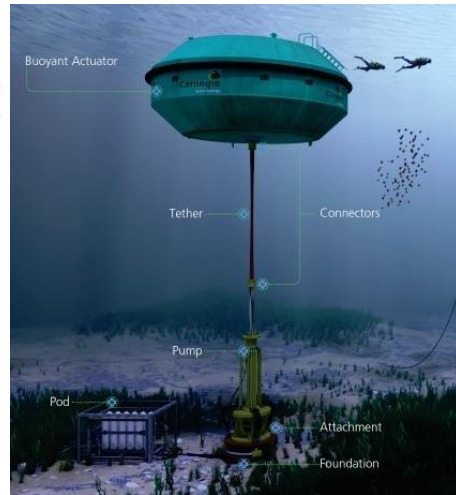
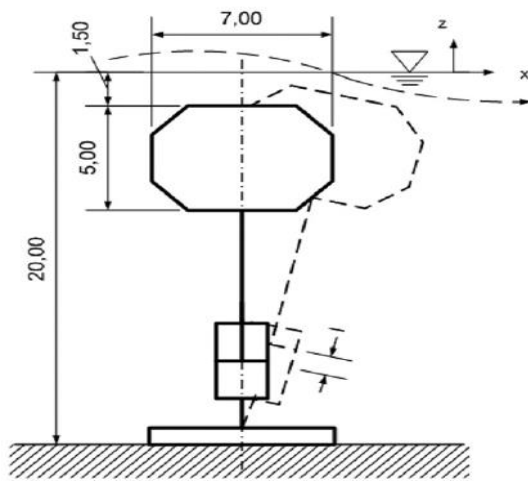


Figura 39. CEO CETO (tomada de Babarit et al., 2012 y Carnegiece.com).

Al igual que el CEO Seabased, la boya de este dispositivo responde a movimientos elipsoidales (en el eje horizontal y vertical), lo que genera un tirón del cable que a su vez impulsa el generador.

De acuerdo a la clasificación de la Figura 37, el dispositivo CETO corresponde a los cuerpos oscilantes, y en este caso su esquematización lo muestra como subsuperficial, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

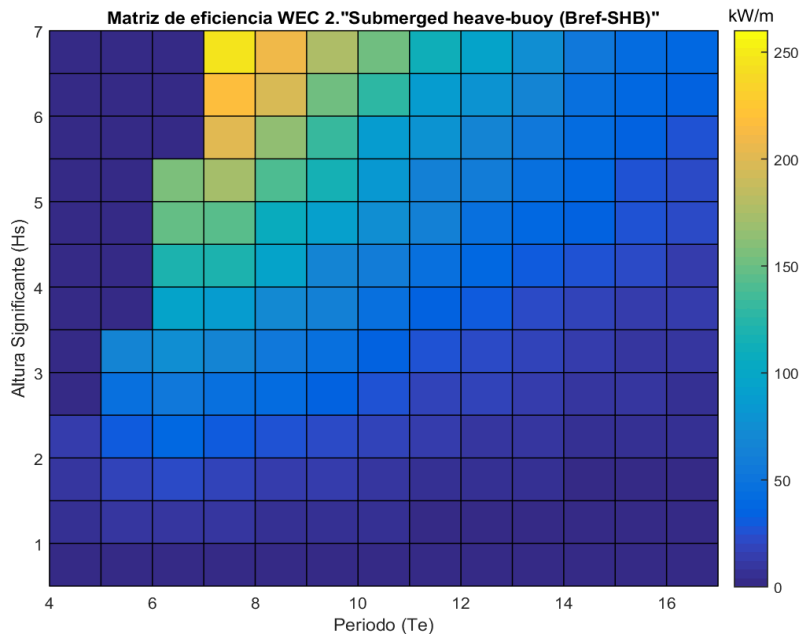


Figura 40. Matriz de potencia del dispositivo tipo boya subsuperficial con anclaje al fondo.

VI.III.3 Convertidor flotante de dos cuerpos (floating two body heaving converter).

El dispositivo "Convertidor flotante de dos cuerpos" está basado en el CEO Wavebob, el cual fue desarrollado en Irlanda y consta de un sistema de dos cuerpos de reacción automática, simétrico, que funciona en el modo de elevación. Está compuesto por un toroide de bajo tiro que se desliza a lo largo de un flotador de alto tiro. Tiene un sistema de conversión de energía hidráulico, que es impulsado por el movimiento relativo entre los dos cuerpos.

A diferencia de los dos primeros sistemas, este sistema no necesita reaccionar contra el fondo marino, por lo que puede instalarse en aguas profundas. La función del sistema de amarre es contrarrestar la deriva y las fuerzas de la corriente. Por lo tanto, se espera que el peso de amarres y anclajes sea pequeño, por lo que no se tuvo en cuenta en la estimación de superficie y masa del sistema. La masa característica es de 5,700 toneladas aproximadamente y la superficie mojada de 2,100 m².

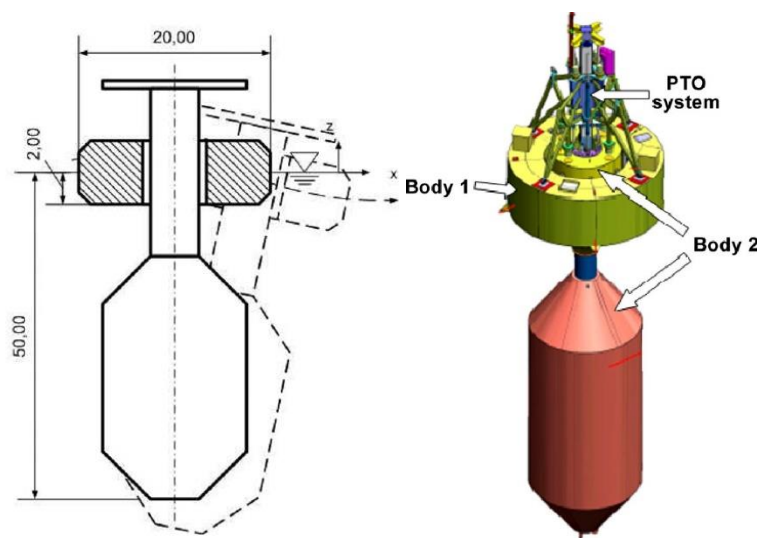


Figura 41. CEO flotante de dos cuerpos (tomado de Babarit et al., 2012 y Researchgate.net).

De acuerdo a la clasificación de la Figura 36, este dispositivo corresponde a los cuerpos oscilantes flotantes verticales, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

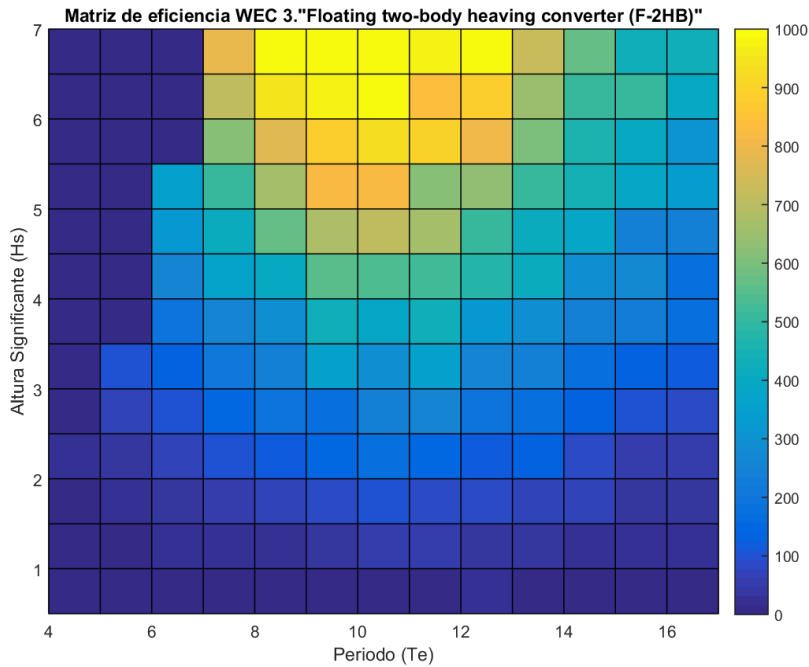


Figura 42. Matriz de potencia del dispositivo flotante de dos cuerpos (Babarit et al., 2012).

VI.III.4 Arreglo de boyas con anclaje al fondo (Bottom fixed heave buoy array).

El dispositivo compuesto "Arreglo de boyas con anclaje al fondo" está basado en el CEO Wavestar desarrollado en Dinamarca, y está compuesto por muchos flotadores conectados a una sola estructura auto elevable. La estructura auto elevable se encuentra sobre una base que surge desde el fondo del mar y proporciona una referencia fija a los flotadores. Los flotadores son medias esferas. Cada uno está conectado a la estructura principal mediante un brazo y una bisagra.

Con la acción de las olas cada flotador se mueve hacia arriba y hacia abajo. El movimiento relativo entre los flotadores y la estructura se convierte en energía útil mediante pistones hidráulicos. La superficie característica se estimó en aproximadamente 4,350 m² y la masa característica en aproximadamente 1,600 toneladas.

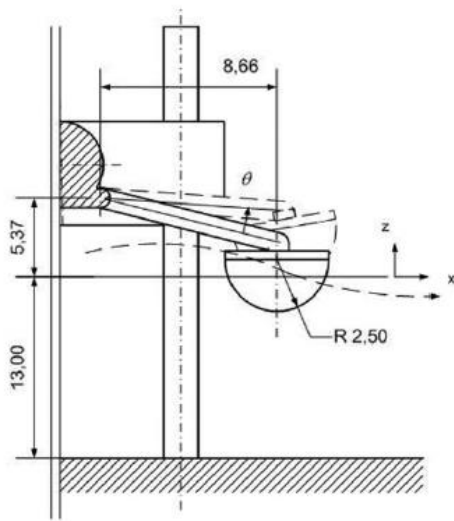


Figura 43. CEO compuesto por arreglo de boyas con anclaje al fondo (tomado de Babarit et al., (2012) y Wavestarenergy.com).

De acuerdo a la clasificación de la Figura 37, este dispositivo corresponde a los cuerpos oscilantes flotantes verticales, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

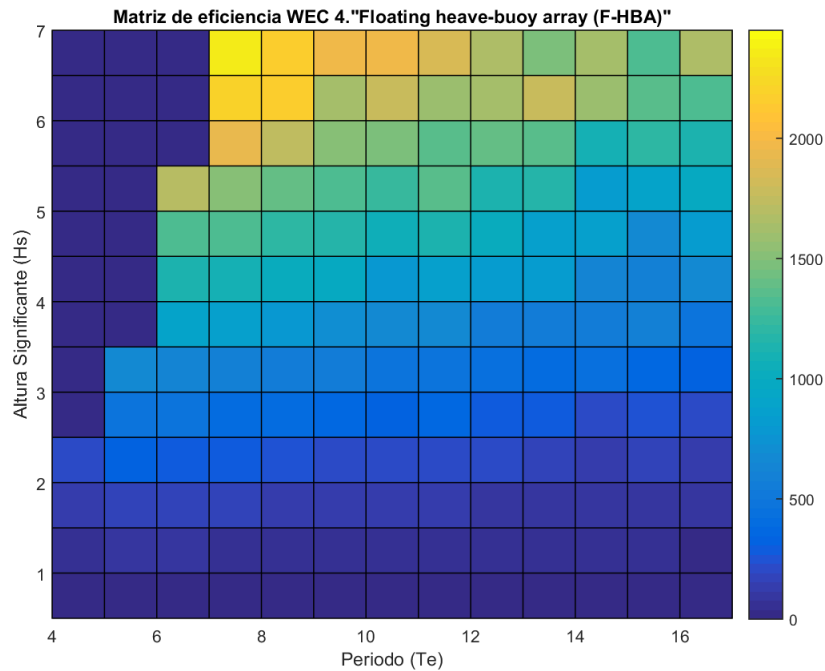


Figura 44. Matriz de potencia del dispositivo compuesto por arreglo de boyas con anclaje al fondo.

VI.III.5 Arreglo de boyas flotantes (Floating heavy buoy array).

Este dispositivo está inspirado en el CEO Pontoon desarrollado en Noruega. Como su nombre lo indica, está compuesto por un arreglo de boyas flotantes, las cuales están conectadas a una estructura común, misma que se encuentra sumergida. Las boyas están conectadas a través de cables tensores.

La fuerza de flotabilidad total de las boyas se equilibra con las fuerzas de gravedad netas del puente y las redes de lastre. Las boyas están conectadas a la estructura sumergida a través de un sistema de conversión de energía hidráulico.

Dado que la estructura sumergida es parte esencial del sistema, se incluyó en las medidas de masa y superficie. La superficie característica se estimó en 4,800 m² y la masa característica en 5,200 toneladas considerando un arreglo de 10 boyas.

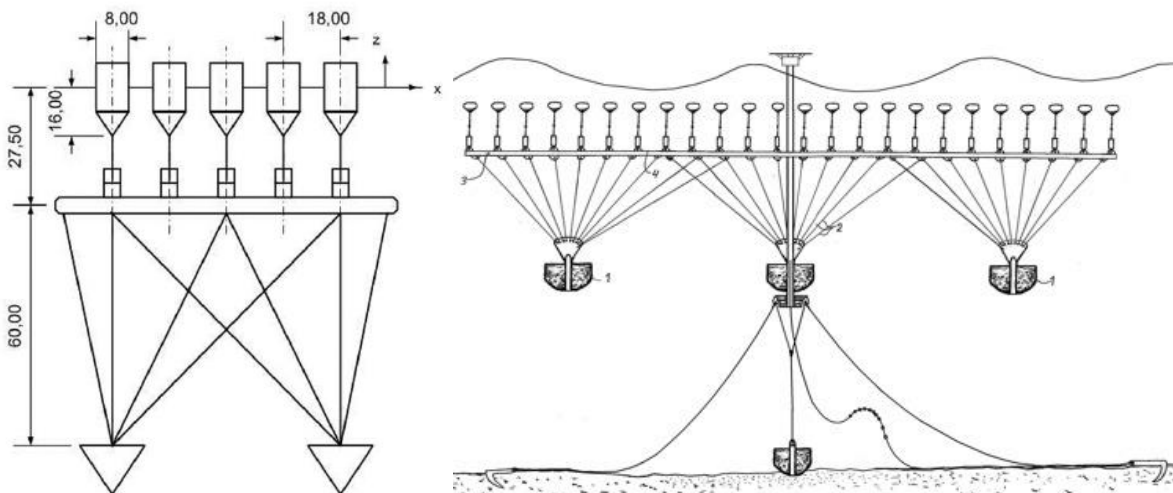


Figura 45. CEO compuesto por boyas flotantes y Pontoon WEC (tomada de Babarit et al., (2012) y Pontoon.no).

De acuerdo a la clasificación de la Figura 37, este dispositivo corresponde a los cuerpos oscilantes flotantes verticales, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

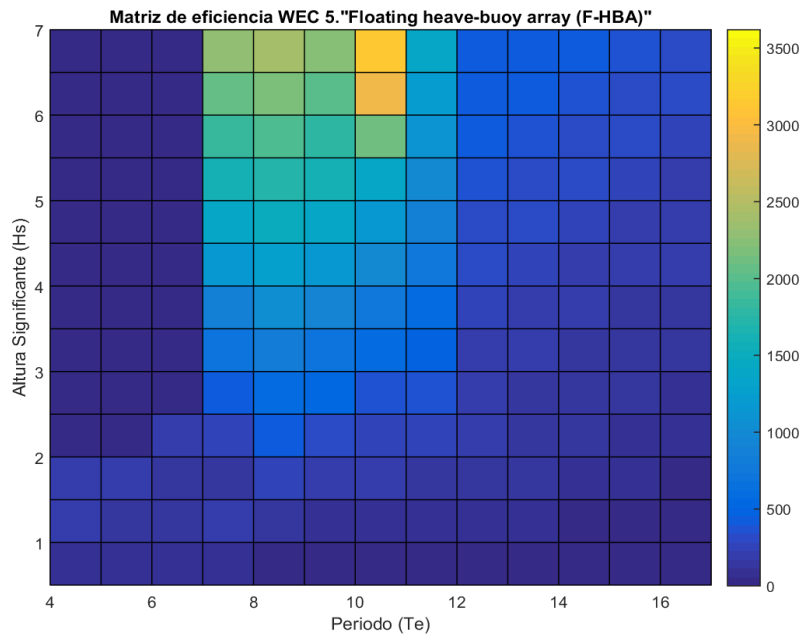


Figura 46. Matriz de potencia del dispositivo matriz de boyas flotantes (Babarit, et al., 2012).

VI.III.6 Aleta oscilante fija en la parte inferior (Bottom-fixed oscillating flap).

Este dispositivo está inspirado en el CEO Oyster, desarrollado en Escocia por la empresa Aquamarine Power. Este dispositivo consta de una aleta de cabeceo simple, que oscila en un eje fijo con una base en el fondo del mar, por lo que es adecuado para aguas poco profundas e intermedias.

El sistema de conversión de energía es maquinaria hidroeléctrica, donde una bomba colocada en el eje rotatorio bombea aceite hidráulico presurizado a una estación costera. Allí, la energía hidráulica se utiliza para impulsar un generador eléctrico.

La masa característica se estimó en 3,800 toneladas y en la estimación de la superficie característica se consideró la base, cuya función es dar resistencia las fuerzas horizontales, por lo que el área que abarca este dispositivo es de 2,020 m².

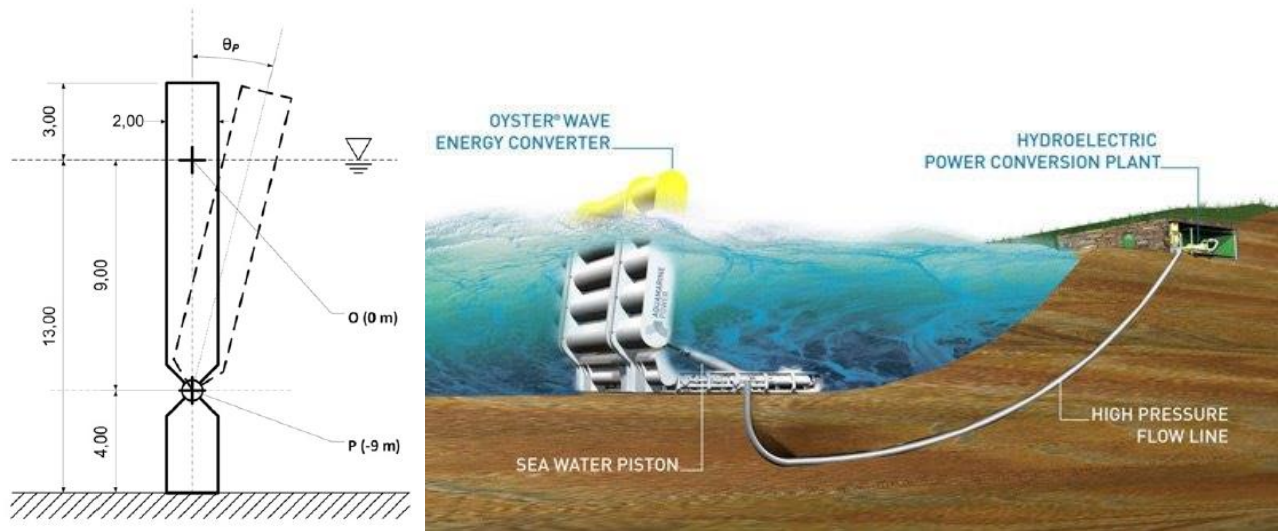


Figura 47. CEO Aleta oscilante fija en la parte inferior y Oyster, tomada de Babarit et al., (2012) y www.hydro-international.com

De acuerdo a la clasificación de la Figura 37, este dispositivo corresponde a los cuerpos oscilantes flotantes sumergidos de rotación, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

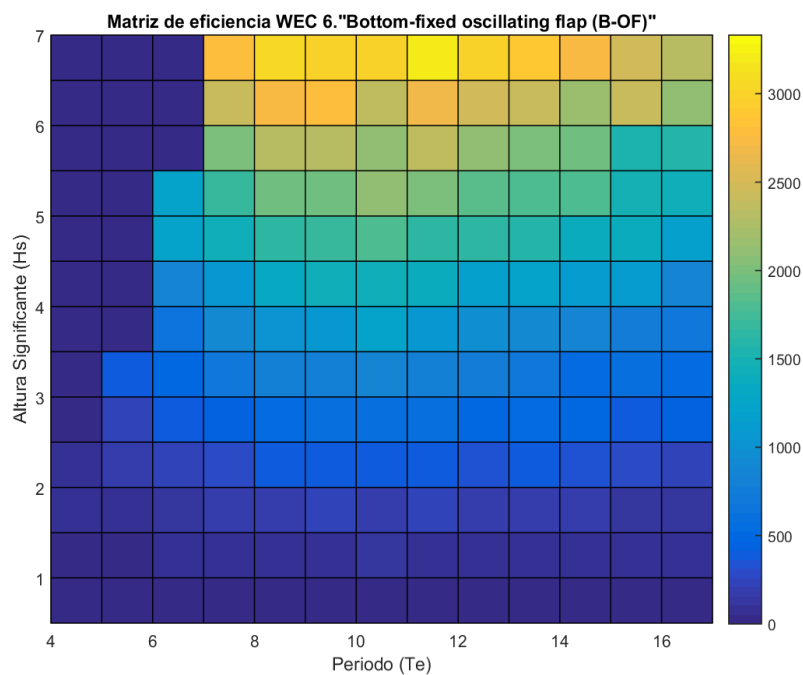


Figura 48. Matriz de potencia del dispositivo Aleta oscilante (Babarit et al., 2012).

VI.III.7 Aleta oscilante flotante de tres cuerpos (Floating three-body oscillating flap device).

Este dispositivo está inspirado en el CEO Langlee, desarrollado en Noruega. El dispositivo consta de cuatro solapas con bisagras que están todas conectadas al mismo marco. A través de los sistemas de extracción (o conversión) de energía, el movimiento relativo entre cada aleta y el bastidor principal se convierte en energía útil.

En la Figura 49 se muestra un esquema del sistema analizado en el trabajo de Babarit et al., (2012). La masa característica de las aletas y la estructura de soporte se estima en 1,600 toneladas y la superficie característica en 2,200 m².

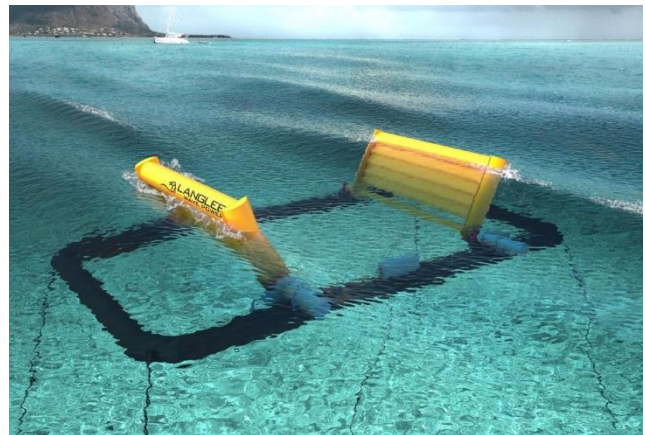
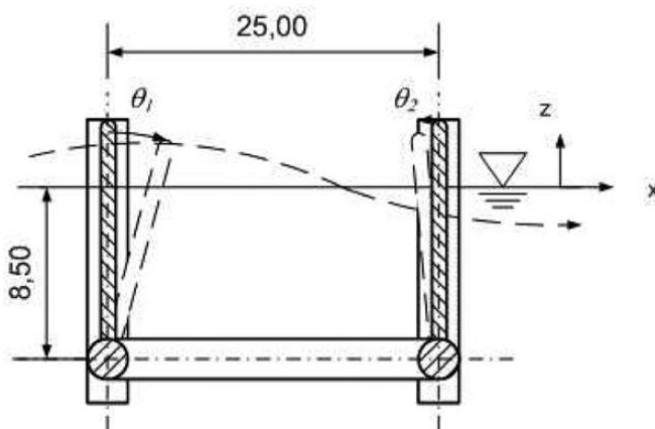


Figura 49. CEO Aleta oscilante flotante de tres cuerpos y dispositivo Langlee. Tomada de Babarit et al., (2012) y www.europapress.es

De acuerdo a la clasificación de la Figura 37, este dispositivo corresponde a los cuerpos oscilantes flotantes sumergidos de rotación, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

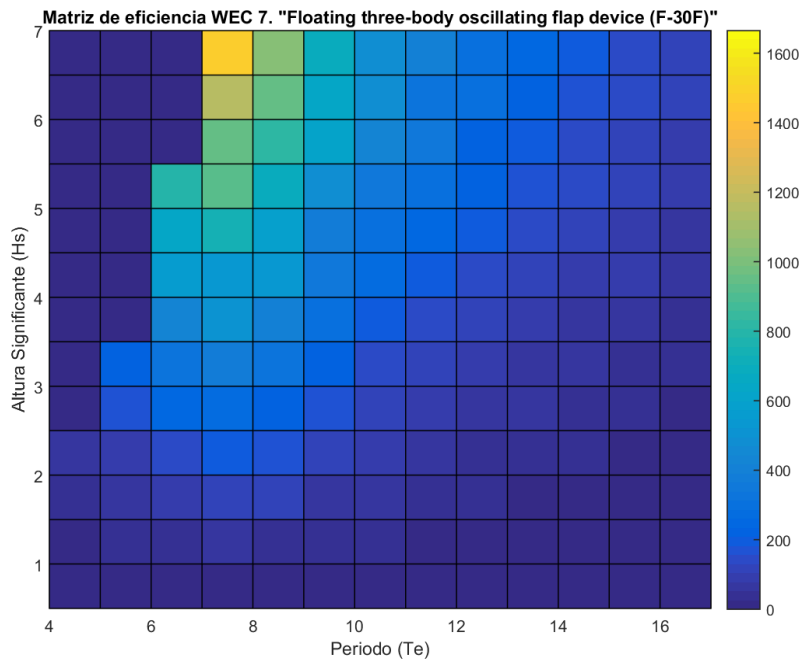


Figura 50. Matriz de potencia del dispositivo Aleta oscilante de tres cuerpos.

VI.III.8 Columna de agua oscilante flotante (Floating oscillating water column).

Este dispositivo está inspirado en el Ocean Energy Buoy, desarrollado por Ocean Energy Ltd. en Irlanda. La Figura 51 muestra una imagen del modelo a escala de 1/4 de la boya Ocean Energy que se está probando en el mar en la bahía de Galway en Irlanda.

El dispositivo de columna de agua oscilante flotante es un tipo particular de dispositivo conocido como boya de conducto inclinado hacia atrás. Tiene una sola cámara de aire y se puede mover libremente en seis grados de libertad. La columna de agua tiene una abertura sumergida alineada corriente abajo de la dirección de propagación de la onda incidente.

La conversión de energía se realiza mediante una turbina de aire conectada a un generador eléctrico. El movimiento de la columna de agua con respecto al cuerpo del CEO crea una presión oscilante en la cámara y un flujo de aire a través de la turbina.

En la Figura 51 se muestra un esquema del sistema. La masa característica es de aproximadamente 1,800 toneladas y su área de superficie externa característica de aproximadamente 6,500 m².

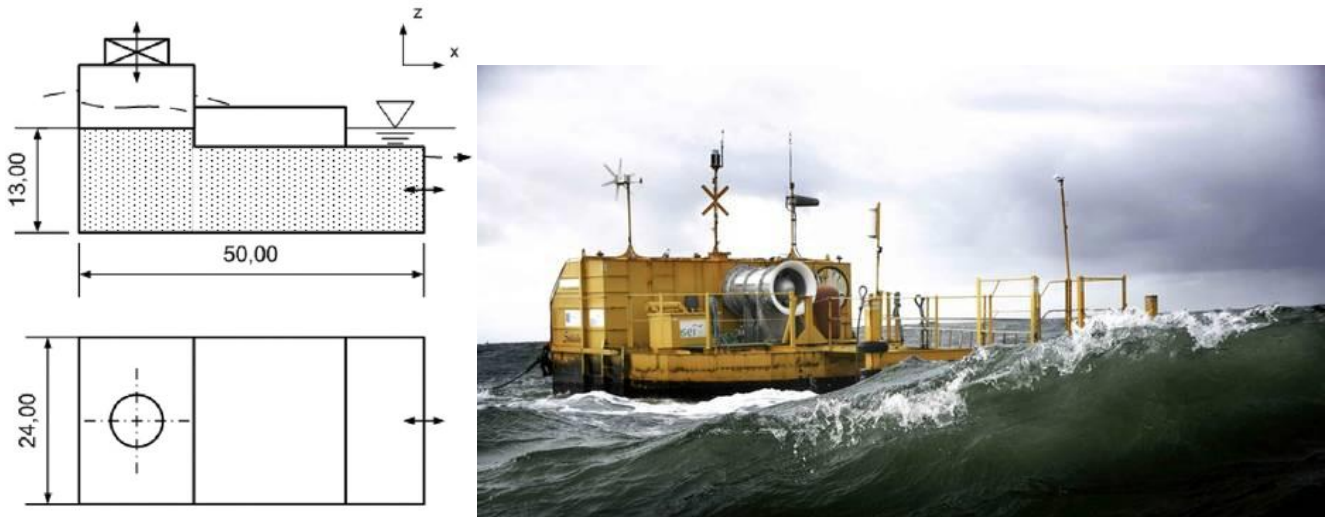


Figura 51. CEO Columna oscilante de agua flotante y dispositivo Ocean Energy Buoy (Tomada de Babarit et al., (2012) y oceanenergy.ie).

De acuerdo a la clasificación de la Figura 37, este dispositivo corresponde a los dispositivos de columna oscilantes flotantes, a continuación se muestra su matriz de eficiencia.

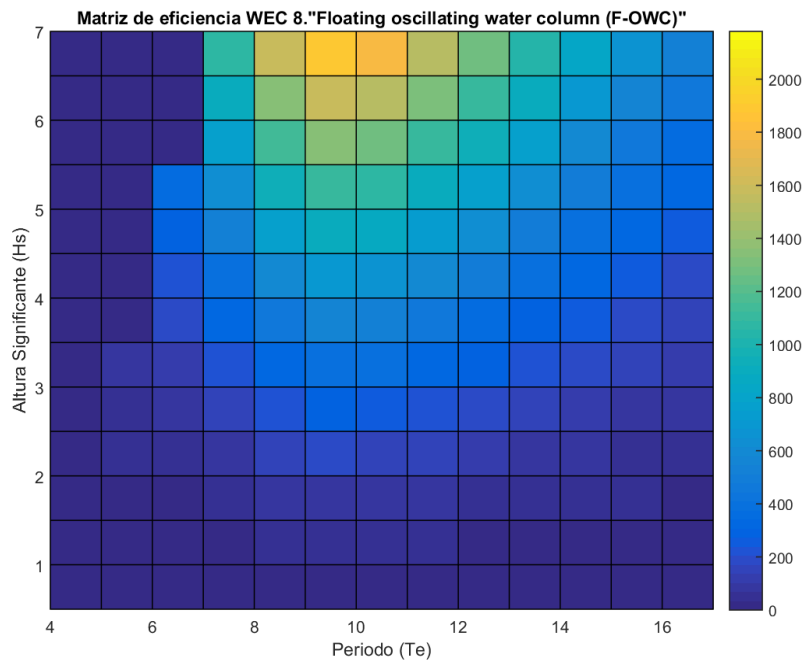


Figura 52. Matriz de potencia del dispositivo Columna oscilante de agua flotante.

VI.IV Potencia extraíble en con diferentes convertidores de energía del oleaje en los sitios seleccionados.

A partir de las matrices de disponibilidad de cada sitio y utilizando las matrices de eficiencia se calculó la potencia extraíble con cada dispositivo descrito en la sección anterior y que se enlistan como referencia en la Tabla VII.

Tabla VII. Convertidores de energía del oleaje considerados en la multiplicación matricial.

No.	Nombre	Área	Masa	Ancho
1	Boya con anclaje al fondo (Seabased)	42 m ²	31 ton	3 m
2	Boya sumergida con anclaje al fondo (Ceto)	220 m ²	200 ton	7 m
3	Convertidor flotante de 2 cuerpos (Wavebob)	2,100 m ²	5,700 ton	20 m
4	Arreglo de boyas con anclaje al fondo (Wavestar)	4,350 m ²	1,600 ton	100 m
5	Matriz de boyas flotantes (Pontoon)	4,800 m ²	5,200 ton	80 m
6	Aleta oscilante fija en la parte inferior (Oyster)	2,020 m ²	200 ton	26 m
7	Aleta oscilante de tres cuerpos (Langlee)	2,200 m ²	1,600 ton	9.5 m
8	Columna de agua oscilante flotante (Ocean Energy Buoy)	6,500 m ²	1,800 ton	24 m

La Tabla VIII muestra la potencia promedio extraíble con cada dispositivo analizado en los 6 sitios seleccionados.

Tabla VIII. Potencia promedio extraíble (kW) para cada sitio con los convertidores de energía analizados.

	Convertidores de Energía del Oleaje							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Punta Morro	0.73	3.59	33.99	50.58	63.64	93.70	19.22	28.51
Espigón Pto. de Ensenada	0.66	3.54	30.80	45.15	63.54	81.03	20.01	26.21
Bajo de San Miguel	1.27	7.14	59.76	93.97	118.58	161.14	37.68	55.16
Isla Todos Santos	1.11	6.00	49.66	77.63	102.53	134.62	32.11	44.50
Punta Banda	1.60	8.43	81.98	129.14	137.74	228.87	41.69	77.00
Punta Santo Tomás	1.85	9.31	97.07	162.68	143.33	284.85	43.78	91.45

Como se observa en la Tabla VIII, los valores de potencia extraíble obtenidos con el convertidor de energía Seabased (1) y los dos primeros sitios evaluados con el Ceto (2) son inferiores a 4 kW, un valor de energía que en un primer análisis no resulta atractivo para ser aprovechado. Sin embargo, esto se debe en parte a que estos dispositivos son los más pequeños debido a que sólo cuentan un ancho de captura de 3 y 7 metros (Tabla VII), respectivamente.

La manera en la que se obtiene la energía disponible por metro con relación al desempeño de un convertidor determinado, es dividiendo la potencia extraíble (kW) (Tabla VIII) entre el ancho de captura de cada dispositivo (metros) (Tabla VII), cuyo resultado son Kilowatts/metro.

La Tabla IX nos muestra la potencia disponible en cada uno de los sitios con relación a cada uno de ocho convertidores que hemos analizado.

Tabla IX. Potencia del oleaje disponible por sitio (kW/m).

	Convertidores de Energía del Oleaje							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Punta Morro	0.24	0.51	1.70	0.51	0.80	3.60	2.02	1.19
Espigón Pto. de Ensenada	0.22	0.51	1.54	0.45	0.79	3.12	2.11	1.09
Bajo de San Miguel	0.42	1.02	2.99	0.94	1.48	6.20	3.97	2.30
Isla Todos Santos	0.37	0.86	2.48	0.78	1.28	5.18	3.38	1.85
Punta Banda	0.53	1.20	4.10	1.29	1.72	8.80	4.39	3.21
Punta Santo Tomás	0.62	1.33	4.85	1.63	1.79	10.96	4.61	3.81

Los valores que nos brinda la Tabla IX significan que, por ejemplo, un convertidor tipo Oyster aprovecharía 10.96 kW de potencia por cada metro de ancho de captura. Esta información nos resulta de utilidad para determinar el convertidor de energía más eficiente, para un sitio determinado.

En la sección VI.II.1, Tabla VI determinamos que los sitios con mayor potencia del oleaje extraíble lo ocupan, en primer lugar Punta Santo Tomás con valores promedio de 15.93 kW/m, seguido de Punta Banda con un valor promedio de 10.57 kW/m y en tercer lugar el Bajo de San Miguel con 10.30 kW/m y por último la Isla de Todos Santos con 8.12 kW/m.

Al relacionar los valores de la Tabla VI con los resultados de la Tabla IX podemos determinar, que el convertidor tipo Oyster trabajaría con una eficiencia del 68.8% en el sitio de Punta Santo Tomás, mientras que se obtiene una eficiencia de 83.25% para Punta Banda; de 60.2% en el Bajo de San Miguel y 63.8% en la Isla de Todos Santos.

Los cálculos arrojan como resultado que la instalación del convertidor tipo Oyster en Punta Banda, sería la opción más eficiente, seguido en orden magnitud de Punta Santo Tomás, la Isla de Todos Santos y el Bajo de San Miguel. Aunque con eficiencias mucho menores, el convertidor más conveniente en segundo lugar sería el tipo Langlee seguido del Wavebob.

Al realizar una comparación entre la Tabla VIII (Potencia extraíble) y Tabla IX (Potencia disponible), podemos apreciar que existe un cambio entre los valores más sobresalientes de potencia extraíble, los cuales corresponden a los convertidores 6, 5 y 4 en orden de magnitud, y los valores más sobresalientes de potencia disponible, los cuales corresponden a los convertidores 6, 7 y 3. Lo anterior es resultado de que los convertidores 5 y 4 compensan su

baja eficiencia con su ancho de captura, el cual es casi 10 veces mayor que el dispositivo 7 y cinco veces mayor que el dispositivo 3.

La Tabla VIII nos muestra que la mayor potencia extraíble corresponde a Punta Santo Tomás, con un valor de 284.5 kW y se obtiene con el convertidor Oyster (Figura 47). El siguiente valor sobresaliente de potencia extraíble para dicho sitio se obtiene con el convertidor tipo Wavestar (Figura 43), con un valor promedio de 162.7 kW, seguido por el convertidor tipo Pontoon (Figura 45) con un valor máximo acumulado de 143.33 kW.

Sin embargo, con base en el cálculo de la eficiencia que tendría el convertidor Oyster por metro y en relación a los valores promedio obtenidos para cada sitio en la sección VI.II.1 (Punta Santo Tomás 15.93 kW/m, Punta Banda 10.57 kW/m, San Miguel 10.30 kW/m, etc), podemos determinar que los convertidores Wavestar y Pontoon quedarían cerca del 50% por debajo del valor promedio proyectado.

Como se mencionó anteriormente, el Bajo de San Miguel ocupó el tercer lugar de acuerdo a los valores de potencia del oleaje disponibles para su aprovechamiento. Al revisar los valores de potencia extraíble por convertidor, podemos observar que el comportamiento en este sitio es el mismo con respecto a los sitios de Punta Banda y Punta Santo Tomás, en los que con el convertidor Oyster se obtiene el máximo de potencia de 161.14 kW, en segundo lugar el convertidor Pontoon con 118.6 kW y en tercer lugar el convertidor Wavestar con 94 kW.

Los valores de potencia extraíble obtenidos en la Isla de Todos Santos nos brindan información valiosa con respecto a los tipos de convertidores que se deben considerar para la obtención de energía en cualquiera de sus formas proveniente del oleaje en dicho sitio, la cual podría ser aprovechada de diferentes modos de acuerdo al sistema de conversión (Power take off) que se utilice (eléctrico, mecánico, hidráulico, etc.).

El diseño y ejecución de un proyecto de aprovechamiento de energía del oleaje en la Isla de Todos Santos y en las islas en general cobra relevancia debido a que son áreas de oportunidad, toda vez que en estos sitios la obtención de energía está actualmente limitada a pequeños sistemas generación mediante motores de gasolina y diesel principalmente y en algunos casos sistemas eólicos o solares con acumulación de energía en baterías.

Punta Morro es el sitio que ocupó el quinto lugar con respecto a valores de potencia extraíble, y como se aprecia en la Tabla VIII la magnitud de dichos valores sigue el mismo patrón que en los sitios anteriores, con el convertidor Oyster se obtuvo el valor máximo de 93.70 kW, lo que representa una eficiencia del 68.5%, seguido de 63.54 kW con el CEO Pontoon (15.22% de eficiencia) y 50.58 kW (9.7% de eficiencia) con el convertidor Wavestar.



Figura 53. Zona costera de la Universidad Autónoma de Baja California en Punta Morro.

Este sitio cobra singular relevancia debido a que está ubicado frente a la Universidad Autónoma de Baja California-Campus Sauzal, donde se encuentran el Instituto de Investigaciones Oceanológicas y la Facultad de Ciencias Marinas. Dichas instituciones han realizado investigación en energía del oleaje y en conjunto podrían desarrollar algún programa de investigación con un enfoque práctico, en el que desarrollen prototipos y se estudie su desempeño en dicha zona costera.

Lo anterior, podría ser la base para el desarrollo de inversión en esta área, ya sea con fines académicos o con fines comerciales, dada la demanda del sector productivo de fuentes alternativas de energía en zonas costeras.

En el sitio frente al Espigón de Puerto de Ensenada se obtuvo una potencia extraíble de 81 kW con el convertidor Oyster (61.37% de eficiencia), el cual se consideró con un ancho de 26 metros. Dicho nodo cobra relevancia al considerar que el espigón tiene una longitud aproximada de 1,900 metros, por lo que se podrían emplazar hasta 73 dispositivos de este tipo y de este modo tener un aprovechamiento de alrededor de 5,621 kW. Sin embargo, hay que considerar que acarrearía un costo muy alto de inversión.

El segundo valor de potencia extraíble para el sitio frente al Espigón fue de 63.5 kW/m y se obtuvo con el convertidor compuesto por una matriz de 10 boyas que en su conjunto abarcan un total de 80 metros de longitud. Al extrapolar el valor de energía extraíble obtenido mediante dicho convertidor a lo largo de espigón mediante la posibilidad de emplazamiento de 23.75 convertidores de este tipo, se obtendría un aproximado de 1,508 kW/m.

El ejercicio anterior se podría aplicar de igual manera a los otros sitios analizados, aumentando el número de dispositivos hasta obtener un punto óptimo entre el costo por convertidor y la cantidad de energía obtenida. Este enfoque es un poco simplista pero da una buena idea de la potencia extraíble con una granja de dispositivos. Un análisis más profundo del funcionamiento y extracción de energía debería incluir una simulación del oleaje en la zona incluyendo los dispositivos ya que de esta forma se incluirían el efecto de los dispositivos en el oleaje y las posibles interacciones entre estos.



Figura 54. Espigón del Puerto de Ensenada. (Fotografía de Hutchison, 2021).

VI.V Factibilidad de la instalación de uno o más convertidores de energía de las olas en los sitios analizados.

El emplazamiento de uno o varios dispositivos convertidores del oleaje implica una serie de pasos, estos son: la evaluación del recurso disponible en un área determinada, la selección de sitios con valores de potencia altos y con características propicias para la extracción de energía, análisis de desempeño de los dispositivos que se estén evaluando y la valoración económica del proyecto.

En general, los esquemas más pequeños son técnicamente más simples y menos riesgosos financieramente, por lo tanto, los costos de capital y seguro se reducen, con una reducción proporcional en los costos de energía producida (Open University, 2020).

En el apartado anterior se describió el desempeño que tendrían ocho dispositivos en los seis sitios seleccionados dentro de la Bahía de Santos y alrededores. Sobresalen cuatro sitios y

principalmente tres dispositivos, con base en la energía extraíble que arrojó el análisis numérico.

En términos prácticos y de acuerdo a la metodología propuesta por *Carbon Trust* en su estudio *UK Wave Resource Study (2012)* (Figura 55) y los objetivos del presente trabajo, el siguiente paso consiste en desarrollar una estimación de costos para la implementación de uno o varios dispositivos, y de este modo, determinar , la viabilidad de implementar uno o varios dispositivos en los sitios con vales sobresalientes.



Figura 55. Descripción general de la evaluación del recurso de la energía de las olas (Carbon Trust, 2012).

En términos generales, la bibliografía especializada concuerda en que la energía anual absorbida mediante un emplazamiento (uno o varios dispositivos) para aprovechamiento de energía del oleaje representa los ingresos económicos de un proyecto de esta índole. Esta puede ser estimada una vez que se conozcan las dimensiones, el principio de operación, el funcionamiento de la maquinaria y el recurso del oleaje local (Babarit et al., 2012).

Con el objetivo de obtener una primera aproximación en términos económicos, en el apartado VI.V.2 (Consideraciones económicas) se llevó a cabo una relación del recurso energético extraíble, obtenido mediante los tres convertidores de energía del oleaje en los cuatro sitios seleccionados con el costo evitado de pago, bajo dos diferentes tarifas eléctricas, Es decir, la cantidad de dinero que se dejaría de pagar por la interconexión de uno o varios dispositivos para conversión de energía del oleaje al Sistema Eléctrico Nacional.

VI.V.1 Consideraciones técnicas.

Actualmente, la mayoría de los dispositivos convertidores de energía del oleaje que se han desarrollado y puesto a prueba han tenido como objetivo su integración a la red eléctrica más cercana con el fin de abastecer cantidades locales e incluso regionales de energía eléctrica, y de este modo sustituir en mayor o menor medida el consumo de combustibles fósiles.

Hay algunas áreas en el mundo donde la costa está formada por un acantilado que cae en aguas bastante profundas, es decir, una costa con pendiente pronunciada. Estos sitios son los más adecuados para convertidores de energía de olas montados en tierra, en la zona costera, debido a que las olas incidentes tienen una alta densidad de potencia (Open University, 2020), tal es el caso de los sitios Punta Banda y Punta Santo Tomás.

Aunado a lo anterior, los dispositivos costeros tienen la ventaja de que su instalación y mantenimiento son más sencillos y no requieren amarres en aguas profundas ni largos cables eléctricos submarinos. El clima menos energético de las olas en la costa se puede compensar en parte por la concentración de energía de las olas debido a la refracción (Open University, 2020) como ocurre de manera natural en los sitios Punta Santo Tomás y Punta Banda (Figura 18).

De acuerdo a la información expuesta en el apartado anterior, los valores de la zona costera en orden de la magnitud de los valores obtenidos fue Punta Banda, Punta Santo Tomás, Punta Morro y el Espigón del Puerto de Ensenada. Se sabe, con base en datos batimétricos (Figura 2) que al menos Punta Banda cuenta con las características batimétricas requeridas, es decir, una pendiente pronunciada.

Otra cualidad con la cual cuentan dos de los tres sitios que arrojaron mayores valores de potencia del oleaje, es el acceso a redes eléctricas del Servicio Eléctrico Nacional. Tanto Punta Banda como Punta Morro son zonas costeras con acceso a la red eléctrica, lo que en su momento permitiría la interconexión de algún dispositivo a la red eléctrica.

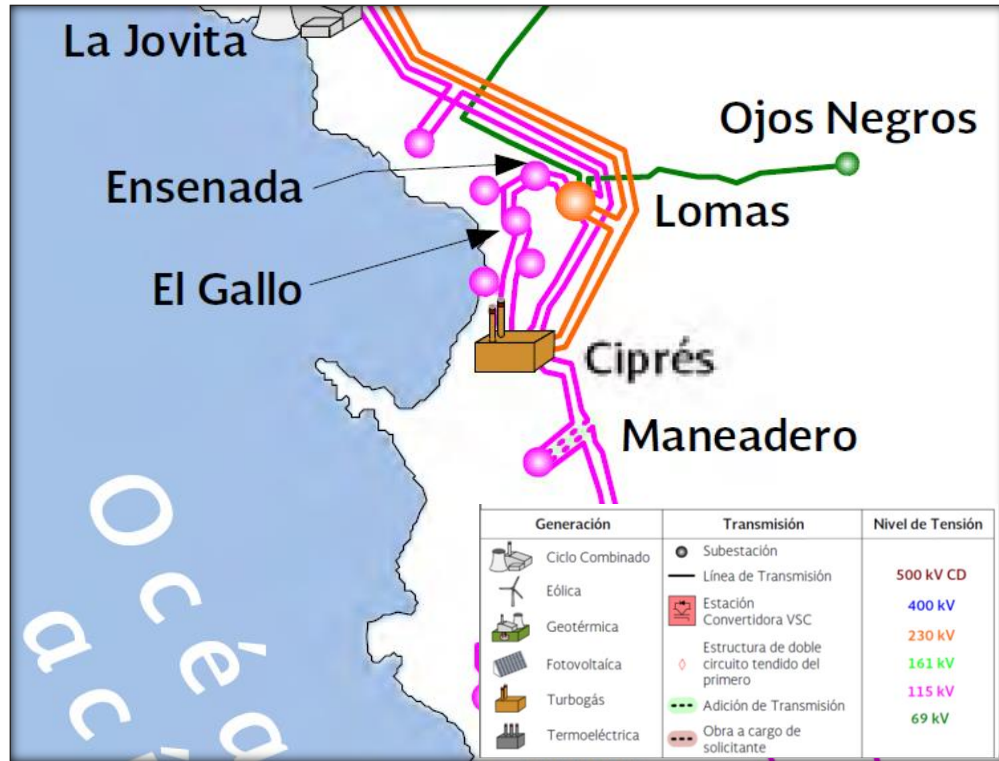


Figura 56. Servicio Eléctrico Nacional en la zona costera del área de estudio.

Se ha mencionado en apartados anteriores que existen diversas posibilidades tecnológicas para el aprovechamiento de la potencia del oleaje, las cuales están determinadas principalmente por el tipo de sistema de conversión de potencia, es decir, hidráulico, neumático o eléctrico. La mayoría de los trabajos de investigación hoy en día están enfocados a los sistemas de conversión de potencia lineales eléctricos, es decir, sistemas en los que la transformación de energía cinética del oleaje pasa a un generador eléctrico.

Sin embargo, existen múltiples sistemas de conversión, los cuales resuelven múltiples necesidades energéticas como lo es el bombeo (hidráulico o neumático) para la acuicultura, la desalación de agua de mar entre otros. Con base en lo anterior, durante la selección y desarrollo de un dispositivo se debe evaluar también la conveniencia de uno u otro sistema de conversión de energía.

Los convertidores de energía de las olas deberían estar entre las tecnologías energéticas más benignas para el medio ambiente por las siguientes cualidades:

- Tienen poco potencial de contaminación química. A lo sumo, pueden contener algo de aceite lubricante o hidráulico, que se sellará cuidadosamente del medio ambiente.
- Tienen poco impacto visual, excepto donde están montadas en tierra.
- Es probable que la generación de ruido sea baja, generalmente más baja que el ruido de las olas
- Deben presentar un pequeño (aunque no insignificante) peligro para los navíos.
- No deberían presentar dificultades para la migración de peces.
- Los esquemas flotantes son incapaces de extraer más de una pequeña fracción de la energía de las tormentas, por lo que no influirán significativamente en el entorno costero. Un esquema como un nuevo rompeolas que incorpora un dispositivo de energía de las olas proporcionará protección costera, pero puede dar lugar a cambios en la costa. Y las estructuras de hormigón deberán eliminarse al final de su vida útil.
- Se estima que los esquemas de energía de las olas cercanas a la costa liberarán (por ejemplo, de la construcción y el transporte de materiales) unos 11 g de CO₂, 0,03 g de SO₂ y 0,05 g de NO_x por cada kWh de electricidad generada (Thorpe, 1992). Esto los hace muy atractivos en comparación con las plantas convencionales de carbón, gas y nuclear del Reino Unido. Por lo tanto, la energía de las olas podría hacer una contribución significativa para cumplir los objetivos de cambio climático y lluvia ácida.

En el siguiente apartado, se plantean consideraciones económicas que tendría el emplazamiento de uno o varios dispositivos si la intención fuera llevar a cabo la interconexión al Servicio Eléctrico Nacional.

VI.V.2 Consideraciones económicas.

El costo promedio por kW/h generable sobre el tiempo de vida útil del dispositivo resulta un dato trascendente, ya que de este modo obtenemos el tiempo de retorno de la inversión y por ende, la conveniencia económica de un proyecto de esta índole. Sin embargo, la estimación de costos de este tipo de proyectos ha demostrado ser una tarea mucho más compleja ya que los costos de diseño, operación, mantenimiento y eventualmente desmantelamiento de proyectos que se han llevado a cabo, no se encuentran disponibles de manera pública, por lo que acceder a ellos no es un aspecto trivial.

En un inicio, se puede asegurar que el costo por kW de una planta de aprovechamiento de energía de las olas será al menos el doble que el de una estación convencional que funciona con combustibles fósiles; y es probable que el factor de capacidad (ó factor de planta) sea más

bajo que el de una estación convencional debido a la variabilidad del clima de las olas. Por lo tanto, los costos de energía de las olas solo pueden ser competitivos si los costos de operación son significativamente inferiores a los de una estación convencional (Open University, 2020).

El factor de planta (también llamado factor de capacidad) de una central eléctrica es el cociente entre la energía real generada por la central eléctrica durante un período (generalmente anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, conforme a los valores nominales de las placas de identificación de los equipos. Es un indicador de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo (U.S. N.R.C., 2021).

Al evaluar el desempeño que tendrá un convertidor de energía del oleaje, los costos de insumos energéticos, como el combustible en el caso de otras plantas de generación de energía, son cero, dejando los costos de operación y mantenimiento como el factor determinante. Por lo tanto, los esquemas de operación de este tipo de proyectos deberán ser confiables en su conversión de energía y lo suficientemente robustos como para sobrevivir al clima de las olas durante muchos años, por lo que deberán diseñarse para una larga vida útil y con un pequeño número de piezas móviles (para minimizar las fallas). Las columnas de agua oscilantes y los esquemas TAPCHAN son buenos ejemplos de lo que se requiere (Open University, 2020).

El Comité de Cambio Climático del Reino Unido (CCC, 2011) ha calculado el costo de la electricidad a partir de un posible futuro (2030) de convertidores de energía de olas de 50 MW en la costa, con un costo de capital de \$60,918 pesos por kW y una esperanza de vida de 40 años. Usando una tasa de descuento del 10% y expresado en pesos al 2010:

Para un factor de baja capacidad (15%) el costo de la electricidad sería \$811.9 pesos por kW/h y para un factor de alta capacidad (22%) el costo de la electricidad sería de \$551.00 pesos por kW/h.

En 2020, el costo de capital generalmente es de alrededor de \$83,000.00–\$110,760.00 por kW instalado, aunque el costo de esquemas particulares puede variar de esto notablemente (Open University, 2020).

La tecnología de energía de las olas se está moviendo hacia el mundo comercial. Varios desarrolladores ya están implementando prototipos y, en algunos casos, ejecutando esquemas que generan electricidad o desalinizan agua de mar a precios favorables, e.g. el proyecto Enel Green Power en Chile (Garanovic, 2021). Junto con los incentivos para evitar las emisiones de dióxido de carbono, las perspectivas económicas para la explotación comercial de la energía de las olas parecen buenas a largo plazo (Open University, 2020).

La publicación de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética en noviembre de 2008, tuvo por objeto regular el aprovechamiento

de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica. Y entre sus principales beneficios establecer la viabilidad jurídica para que en México, cualquier persona física o moral pueda instalar su propia fuente de energía renovable y permanecer conectado a la Comisión Federal de Electricidad, lo que ha significado desde entonces una capacidad instalada de generación mediante fuentes renovables de energía del 30%.

Derivado de lo anterior, surgieron diferentes modalidades en las que a grandes rasgos, cualquier persona física o moral que generara energía eléctrica pudiera comercializar su energía y potencia en cualquiera de los siguientes esquemas:

- a) Consumirla en sus propias instalaciones (autoconsumo).
- b) Consumirla en sus propias instalaciones, distintas al punto en que está generando la energía eléctrica.
- c) Venderla a Comisión Federal de Electricidad o a terceros mediante contratos específicos.
- d) Subastarla en el mercado eléctrico mayorista.

A continuación desarrollaremos una proyección de ahorro en el pago de energía eléctrica en dos escenarios distintos, el primero con respecto a la modalidad a) Consumir la energía generada mediante un emplazamiento de energía de las olas y posteriormente mediante la modalidad d) Subastarla en el mercado eléctrico mayorista. Cabe destacar que este ahorro no toma en cuenta los gastos que generaría la instalación y mantenimiento de los dispositivos para la extracción de la energía del oleaje.

Un contrato de interconexión bajo el esquema de autoconsumo significa que el usuario, sin importar su carga total contratada ni su consumo de energía (kW/h) puede instalar su propia fuente de energía renovable, uno o varios convertidores de energía del oleaje en este caso y de este modo sustituir el consumo que realizaba a Comisión Federal de Electricidad para abastecer su demanda de energía eléctrica.

La Figura 57 muestra el consumo energético mensual de una industria portuaria, ubicada en la ciudad y puerto de Ensenada, Baja California. En dicha figura, uno puede apreciar en la primera columna el periodo mensual al que corresponde el recibo, en la segunda columna, la demanda máxima de potencia que registro en el mes, en la tercera columna el consumo de energía, en kW/h. En la cuarta columna el factor de potencia, es decir, un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía.

En la quinta columna se lee el factor de carga, es decir, el porcentaje máximo que utilizó su transformador y en la sexta y última columna el precio medio que se pagó por kW/h considerando las variables anteriores, más no impuestos.

Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	F.P. %	F.C. %	Precio medio \$
JUN 15	72	19,504	99.76	38	1.9784
JUL 15	68	22,024	99.26	44	1.8289
AGO 15	78	24,976	98.86	43	1.8378
SEP 15	87	25,696	98.71	41	2.0065
OCT 15	90	17,944	99.16	35	2.1094
OCT 15	9	4,536	99.63	39	0.7834
NOV 15	7	15,608	99.96	38	0.7319
DIC 15	7	15,936	99.99	42	0.6593
ENE 16	7	16,088	100.00	43	0.6804
FEB 16	8	16,968	99.88	43	0.7430
MAR 16	8	16,392	99.95	44	0.7072
ABR 16	10	17,832	99.66	35	0.0000
MAY 16	59	17,984	99.66	41	1.8125
JUN 16	72	21,024	99.02	39	1.9058

Figura 57. Consumo energético de una industria portuaria en 2015-2016.

Con base en la información que nos brinda la Figura 57, podemos determinar que la industria portuaria que estamos analizando tiene un consumo anual de 233,008 kW/año a un precio medio promedio de \$1.317 pesos por kW/h, lo que significó un importe anual de \$306,871.536 pesos más impuestos.

Ahora bien, retomando la información contenida en la Tabla VIII, que contiene los valores promedio de potencia extraíble para cada sitio con cada convertidor analizado, podemos realizar una proyección del ahorro económico que se podría tener con base en el emplazamiento de un convertidor de energía del oleaje.

Tabla X. Potencia promedio extraíble (kW) para cada sitio con los convertidores de energía analizados.

	Convertidores de Energía del Oleaje							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Punta Morro	0.73	3.59	33.99	50.58	63.64	93.70	19.22	28.51
Espigón Pto. de Ensenada	0.66	3.54	30.80	45.15	63.54	81.03	20.01	26.21
Bajo de San Miguel	1.27	7.14	59.76	93.97	118.58	161.14	37.68	55.16
Isla Todos Santos	1.11	6.00	49.66	77.63	102.53	134.62	32.11	44.50
Punta Banda	1.60	8.43	81.98	129.14	137.74	228.87	41.69	77.00
Punta Santo Tomás	1.85	9.31	97.07	162.68	143.33	284.85	43.78	91.45

Consideremos para la proyección de ahorro anual el valor de 228.87 kW extraíbles en el sitio Punta Banda, con base en los cálculos de eficiencia, que mostraron que el convertidor Oyster tendría un desempeño del 83.25% (la mayor de toda la matriz) en dicho sitio. Ahora bien, para

la obtención de la Producción Anual Extraíble (PAE=kWh/año) se deben multiplicar los 228.87 kW por el número de horas que conforman un año, es decir 8,760.

$$\text{P.A.E.} = 228.87 \text{ kW} \times 8,760 \text{ hrs} = 2,004,901.2 \text{ kWh/año.}$$

Al considerar que el dispositivo genera la cantidad de 2,004,901.2 kWh/año, y dicha energía es convertida en energía eléctrica y abastecida a un usuario de Comisión Federal de Electricidad en la modalidad de autoconsumo, es decir, que la energía será despachada en las propias instalaciones del usuario (denominado generador), con el objetivo de desplazar o sustituir su consumo a C.F.E. mediante su propia fuente de energía eléctrica. El usuario paga \$1.317 pesos por cada kWh que consume, antes de impuestos

Con base en lo anterior, el costo evitado será de 2,640,454.88 pesos anuales (2,004,901.2kWh/año x \$1.37 pesos). Aunque estamos proyectando un supuesto, el resultado muestra que el costo evitado anual es 8.6 veces mayor que la facturación anual que tenía el usuario, es decir, el convertidor de energía del oleaje es 8.6 veces mayor a lo que en realidad el usuario necesita.

Con base en la información disponible, una manera de calcular con mayor exactitud el ancho de captura requerido para cubrir la demanda energética anual del usuario sería la siguiente Utilizando nuevamente la información de la tabla Tabla IX, en la que nos muestra que el convertidor tipo Oyster en el sitio de Punta Banda tendría una generación de 8.80 kW/m. Dicho valor, al aplicarle la fórmula de Potencia Anual Extraíble (PAE) obtenemos lo siguiente:

$$\text{P.A.E.} = 8.80 \text{ kW/m} \times 8,760 \text{ hrs} = 77,080 \text{ kWh/m/año.}$$

Al dividir el total de kWh requerido por el usuario, es decir 233,008 kWh/año, sobre el valor obtenido de 77,080 kWh/m tenemos como resultado 3.02 metros, es decir que con dispositivo de 3 m podríamos suplir la demenada total del usuario.

Si consideramos un dispositivo que funcione de forma similar al Oyster pero con un ancho de captura de 3.5 metros, este dispositivo generaría de manera anual:

$$8.80 \text{ kW} \times 3.5 \text{ metros} = 30.8 \text{ kW/m}$$

$$\text{P. A.E.} = 30.8 \text{ kW/m} \times 8,760 \text{ hrs} = 269,808 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Consumo anual} \div \text{generación estimada} = 269,808 \text{ kWh/año} \div 233,008 \text{ kWh/año} = 1.15$$

Es decir, un convertidor tipo Oyster con un ancho de captura de 3.5 metros, emplazado en Punta Banda, generaría anualmente 269,808 kWh/año, lo que abastecería 1.15 veces la demanda actual por parte de la industria portuaria y le generaría un ahorro anual de

\$369,636.96 pesos. Nuevamente hay que aclarar que este ahorro supuesto no considera los gastos de instalación y mantenimiento del dispositivo.

Con el objetivo de contrastar el tiempo de retorno que tendría una inversión en el mismo proyecto bajo el esquema denominado "venta de excedentes en el mercado eléctrico mayorista", podemos suponer que la industria portuaria en esta ocasión es un inversionista que ha construido un convertidor de energía del oleaje, con un ancho de captura de tres metros y medio y que está emplazado en la costa de Punta Banda.

Sabemos que tendría una generación anual de 269, 808 kWh/año.

$$8.80 \text{ kW} \times 3.5 \text{ metros} = 30.8 \text{ kW/m}$$

$$P. \text{ A.E.} = 30.8 \text{ kW/m} \times 8,760 \text{ hrs} = 269,808 \text{ kWh/año}$$

Al vender dicha energía en el nodo correspondiente tenemos que, a la fecha de la elaboración del presente estudio, el *Precio Marginal Local (PML)* en el nodo de Baja California es de \$503.00 pesos por megawatt entregado, es decir, \$0.503 centavos por kilowatt hora entregado. (CENACE,2021.)

Por lo tanto, el proyecto generaría una ganancia de:

$$269,808 \text{ kWh/año} \times \$0.503 = \$135,713.42 \text{ pesos anuales.}$$

Si comparamos la ganancia económica que tendría el mismo proyecto bajo el esquema de autoconsumo, que es de \$369,636.96 pesos anuales, tenemos una diferencia de \$233,923.54 pesos, es decir, casi 2/3 de diferencia entre un margen de utilidad y el otro, lo que resulta definitivo en la evaluación en este tipo de esquemas de generación.

En resumen, con este ejercicio se resalta la conveniencia de dimensionar este tipo de proyectos bajo un esquema de autoconsumo, en el que se tiene como primer referencia económica el costo anual en energía de un usuario en particular, y puede resultar un punto de partida importante en el cálculo y dimensionamiento de una inversión de esta índole.

VII Conclusiones.

Los valores promedio de los parámetros integrales reportados en este estudio son coincidentes con los reportados previamente para el área de estudio por Martínez Diaz de León et al. (1989). Además, los valores de potencia del oleaje obtenidos para la Bahía de Todos Santos son consistentes con estudios previos realizados a escala regional e incluso global, los cuales reportan valores para la región entre 10 y 20 kW/m (e.g. Cornett, 2008).

La buena concordancia entre los datos simulados y las observaciones disponibles en el área corroboran la utilidad del uso de modelos numéricos del oleaje con fines predictivos y retrospectivos. Ambos fines tienen aplicación en estudios de dinámica costera, protección costera, diseño de obras marítimas entre otras, y en este caso, como parte de la evaluación del potencial energético del oleaje en un área determinada.

La potencia promedio en el área varía espacialmente, es mayor fuera de la bahía y menor dentro debido a la configuración de la costa y el efecto de sombra de la Isla Todos Santos. En general, cerca de la costa, en el área se observan valores entre 5 y 12 kW/m. La potencia del oleaje presenta una marcada estacionalidad con potencias mayores en invierno y menores en el verano. En el área existen sitios como el Bajo de San Miguel y Punta Santo Tomas donde se concentra la energía del oleaje debido a la características batimétricas de estos sitios.

De acuerdo a la proyección de valores de potencia extraíble en cada uno de los sitios más sobresalientes, podemos establecer que dentro de estos, algunos cuentan con características óptimas para el aprovechamiento de energía del oleaje (Figura 55).

Punta Santo Tomás y Punta Banda son sitios donde se presenta una saliente rocosa y talud continental con pendientes pronunciadas, además de que, por su ubicación geográfica, están más expuestos al arribo del oleaje. La refracción del oleaje que tiene lugar en el Bajo de San Miguel modifica la dirección de propagación del oleaje hacia el interior de la Bahía, focalizando la energía en un área en la parte sur del bajo.

La Bahía de Todos Santos cuenta con condiciones adecuadas para el aprovechamiento de la potencia del oleaje, especialmente Punta Santo Tomás, con valores promedio de 15.93 kW/m seguido de Punta Banda con un valor promedio de 10.57 kW/m y en tercer lugar se ubica el Bajo de San Miguel, con 10.30 kW/m. El cuarto lugar lo ocupa la punta Norte de la Isla de Todos Santos con un valor promedio de 8.12 kW/m, y en quinta posición está Punta Morro, con un valor promedio de 5.25 kW/m y por último se encuentra el nodo frente al Espigón del Puerto de Ensenada con un valor promedio de 5.0 kW/m.

Los convertidores de energía del oleaje mediante los cuales se obtuvieron los mayores valores de energía extraíble en orden de magnitud son: Aleta oscilante fija en la parte inferior (Oyster) (Figura 47), Matriz de boyas flotantes (Pontoon) (Figura 45) y Arreglo de boyas con anclaje al fondo (Wavestar) (Figura 43).

El dispositivo Oyster tiene la mayor eficiencia para la extracción de la energía del oleaje en todos los sitios analizados, la máxima eficiencia del dispositivo se da en Punta Banda con una eficiencia (teórica) de 83.25 %.

La generación de electricidad no es la única opción para la energía entregada. La desalación, la protección costera, el bombeo de agua, la maricultura, la recuperación de minerales del agua de mar y la generación de hidrógeno son algunos de los beneficios que se están investigando.

Debido a la escala en la que se encuentra el aprovechamiento de la energía del oleaje actualmente en México, un factor determinante en la evaluación económica de cualquier proyecto de esta índole será el precio al cual se considere será vendido (o evitado su pago) cada kWh generado mediante dicho dispositivo o emplazamiento. Mediante un sencillo ejercicio se comprobó que el esquema de autoconsumo es más conveniente en comparación con la comercialización en el mercado eléctrico mayorista.

Bibliografía.

- Acuña, H. y P. Monárdez. 2007. Evaluación del Potencial de la Energía del Oleaje en Chile. Memorias del XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol. 22, Nº1. pp. 10-30.
- Appendini-Albrechtsen, C.M. 1998. Plan de manejo de la erosión costera para Playas de Rosarito, Baja California, México. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C., México.
- Arbó Joaquín, Francesc Lluís; Canela Mata, Antoni Proyecto OWC: Diseño y optimización de una planta de energía undimotriz. (Universitat Politècnica de Catalunya, 2011-07-07) Proyecto/Trabajo final de carrera.
- Babarit, A., Hals, J., Muliawan, M.J., Kurniawan, A., Moan, T. and Krokstad, J., (2012), Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters, *Renewable Energy*, 41, issue C, p. 44-63.
- Barstow S, Gunnar M, Mollison D, Cruz J. 2008. The wave energy resource. In: Cruz J, editor. *Ocean wave energy*. Berlin: Springer;. p. 93–132.
- Boyle, G. (Ed.), 2004. *Energía renovable: potencia para un futuro sostenible*, 2ª edición. Oxford University Press y The Open University. Oxford.
- Carbon Trust. 2011. *Accelerating Marine Energy*. United Kingdom. 64 pp. Página web:
- Centre for Renewable Energy Sources (CRES). 2006. *Ocean Energy Conversion in Europe; Recent advancements and prospects*. 36 pp.
- Cornett AM. 2008. A Global Wave Energy Resource Assessment. The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver, Canada: International Society of Offshore and Polar Engineers; p. 9.
- European Leader in Renewable Energy Network (ELREN). 2007. *Renewable Energy Training Manual - Chapter 2 - Introduction to Renewable Energy Terminology*. 34 pp.
- Falcao, Antonio F. de O. 2010. Wave energy utilization: a review of the technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 14 (3). 889-918 pp.
- Garanovic, Amir. 2021. OPT deploys PB3 PowerBuoy for Enel Green Power in Chile. *Offshore Energy Magazine*. Online: <https://www.offshore-energy.biz/opt-deploys-pb3-powerbuoy-for-enel-green-power-in-chile/>
- Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993, A spectral wave model for the coastal zone, *Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641.
- Huckerby, J., Henry Jeffrey, Jonathan Sedgwick, Brighid Jay and Laura Finlay. 2012. *An International Vision for Ocean Energy*. Ocean Energy Systems (OES). Version II: October 2012. 20 pp.

International Electrotechnical Commission (IEC). 2015. Marine energy. Wave, tidal and other water current converters. Part 101. Wave energy resource assessment and characterization. Geneva, Switzerland 58 pp.

Mork, G., Barstow, S., Pontes, M.T. and Kabuth, A., 2010. Assessing the global wave energy potential. In: Proceedings of OMAE2010 (ASME), 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Shanghai, China, 6 – 10 June 2010.

Martínez Díaz De León, A., Nava Button, C., & Ocampo Torres, F. J. (1989). Estadística del oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C. de septiembre de 1986 a agosto de 1987. Ciencias Marinas, 15(3), 1-20. (ID: 2423)

Ponce, J.M. 2018. La demanda global de energía continua en aumento: IEA. Global Energy México. Año 9 Número 118 Abril 2018. pp 42-43. Enlace:

SEMAR, s/f. Datos generales del Puerto de Ensenada, B.C. Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología, Secretaría de Marina, Armada de México. 322 pp.

Randi A. Arinaga, Kwok Fai Cheung. (2012). Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. Renewable Energy. Volume 39, Issue 1. Pages 49-64,

Factor de capacidad. <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/capacity-factor-net.html>

The Open University. (2020). Can renewable energy sources power the world?. Chapter 7. Wave energy. On line course.

Thorpe, T W, (1992). "A Review of Wave Energy", Vols. 1 and 2, ETSU Report Number R-72, December 1992.

Ulloa, T.M.J. 1989. Refracción lineal del oleaje en el puerto de Ensenada, B.C. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C., México.

Centro Nacional de Control de Energía. Precios del Marginales del Mercado Eléctrico Mayorista. Revisado el 29 de julio de 2021. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/precios-de-energia-del-mercado-de-corto-plazo>

Anexo I. Tablas de valores numéricos.

Playa Hermosa.

Tabla XI. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) registrados mediante sensor en Playa Hermosa de octubre de 2013 a septiembre de 2017.

	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Varianza
Enero		0.97	0.91	1.13	1.24	1.06	0.02
Febrero		0.82	0.79	0.75	0.89	0.82	0.00
Marzo		0.72	0.69	0.73	0.84	0.74	0.00
Abril		0.59	0.57	0.64	0.58	0.60	0.00
Mayo		0.57	0.64	0.62	0.60	0.61	0.00
Junio		0.72	0.55	0.67	0.63	0.64	0.00
Julio		0.86	0.86	0.86	0.78	0.84	0.00
Agosto		0.88	0.87	1.31	0.67	0.93	0.05
Septiembre				1.32	0.90	0.80	1.01
Octubre	1.02	0.92	1.61	1.25		1.20	0.07
Noviembre	0.94	1.10	1.38	1.31		1.18	0.03
Diciembre	1.21	0.82	1.46	0.95		1.11	0.06
Promedio	1.05	0.81	0.97	0.93	0.78		
Varianza	0.01	0.02	0.13	0.06	0.04		

Tabla XII. Valores promedio mensuales de Altura significativa (Hs) del modelo de Playa Hermosa.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Varianza
Enero	1.08	0.92	1.64	1.09	1.14	1.09	1.02	0.92	1.61	1.25	1.18	0.06
Febrero	1.25	1.03	1.43	0.99	1.36	1.16	0.94	1.10	1.38	1.31	1.19	0.03
Marzo	1.12	0.88	1.26	1.24	1.07	0.90	1.21	0.82	1.46	0.95	1.09	0.04
Abril	0.94	0.91	1.14	1.08	1.16	0.96	0.97	0.91	1.13	1.24	1.04	0.01
Mayo	0.88	0.78	0.96	0.99	0.94	0.89	0.82	0.79	0.75	0.89	0.87	0.01
Junio	0.79	0.63	0.83	0.79	0.93	0.77	0.72	0.69	0.73	0.84	0.77	0.01
Julio	0.65	0.62	0.59	0.70	0.68	0.59	0.59	0.57	0.64	0.58	0.62	0.00
Agosto	0.65	0.61	0.63	0.72	0.60	0.65	0.57	0.64	0.62	0.60	0.63	0.00
Septiembre	0.67	0.76	0.74	0.75	0.67	0.77	0.72	0.55	0.67	0.63	0.69	0.00
Octubre	0.77	0.93	0.77	0.74	0.79	0.65	0.86	0.86	0.86	0.78	0.80	0.01
Noviembre	0.94	0.99	0.87	0.86	0.83	0.73	0.88	0.87	1.31	0.67	0.90	0.03
Diciembre	0.96	1.25	0.93	0.86	1.11	0.87		1.32	0.90	0.80	1.00	0.03
Promedio	0.89	0.86	0.98	0.90	0.94	0.84	0.85	0.84	1.01	0.88		
Varianza	0.03	0.03	0.10	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.12	0.06		

Punta Morro.

Tabla XIII. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) registrados mediante sensor en Punta Morro de diciembre de 2016 a octubre de 2019.

	2016	2017	2018	2019	Promedio	Varianza
Enero		1.03	0.79	0.59	0.80	0.03
Febrero		0.71	0.63	0.51	0.62	0.01
Marzo		0.56	0.57	0.55	0.56	0.00
Abril		0.59	0.62	0.58	0.60	0.00
Mayo		0.68	0.61	0.67	0.65	0.00
Junio		0.78	0.62	0.80	0.73	0.01
Julio		0.87	1.12	1.44	1.14	0.06
Agosto		1.02	1.34	1.18	1.18	0.02
Septiembre		0.83	1.09	1.40	1.11	0.06
Octubre		0.84	0.92	0.79	0.85	0.00
Noviembre		0.94	1.09		1.01	0.01
Diciembre	0.99	0.82	0.71		0.84	0.01
Promedio	0.99	0.81	0.84	0.85		
Varianza	0.00	0.02	0.06	0.11		

Tabla XIV. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) del modelo de Playa Hermosa para el nodo más cercano al sensor de Punta Morro.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Varianza
Enero	1.05	0.88	1.68	1.04	1.07	1.03	0.96	0.88	1.55	1.23	1.14	0.07
Febrero	1.19	1.03	1.44	0.97	1.32	1.09	0.89	1.10	1.31	1.32	1.17	0.03
Marzo	1.07	0.83	1.18	1.18	1.00	0.87	1.16	0.79	1.40	0.92	1.04	0.03
Abril	0.92	0.88	1.08	1.03	1.11	0.95	0.92	0.87	1.09	1.20	1.00	0.01
Mayo	0.88	0.77	0.94	0.95	0.91	0.89	0.80	0.79	0.75	0.88	0.86	0.00
Junio	0.79	0.63	0.82	0.77	0.90	0.76	0.71	0.69	0.74	0.83	0.76	0.01
Julio	0.66	0.60	0.59	0.68	0.65	0.61	0.59	0.59	0.66	0.59	0.62	0.00
Agosto	0.64	0.59	0.62	0.68	0.57	0.65	0.61	0.66	0.64	0.61	0.63	0.00
Septiembre	0.67	0.71	0.72	0.70	0.63	0.75	0.71	0.57	0.67	0.62	0.68	0.00
Octubre	0.73	0.88	0.73	0.69	0.74	0.63	0.83	0.86	0.81	0.75	0.76	0.01
Noviembre	0.89	0.91	0.81	0.81	0.78	0.71	0.83	0.83	1.23		0.87	0.02
Diciembre	0.93	1.22	0.93	0.79	1.06	0.84		1.23	0.85		0.98	0.03
Promedio	0.87	0.83	0.96	0.86	0.89	0.81	0.82	0.82	0.97	0.89		
Varianza	0.03	0.03	0.10	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.10	0.07		

Isla Todos Santos.

Tabla XV. Valores mensuales promedio de Altura significativa (Hs) registrados mediante sensor en la Isla de Todos Santos de septiembre de 2010 a mayo de 2019.

	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	Promedi	Varianz
enero		1.49	1.43	1.33			1.06	1.02	1.11	1.43	1.27	0.03
febrero			1.45	1.15		1.27	1.09	1.31	1.34		1.27	0.01
marzo		1.17	1.14	0.88	0.75	1.01	1.03	1.01			1.00	0.02
abril		1.14	0.92		0.83	1.03	1.05	0.91	0.89		0.97	0.01
mayo		1.24	0.99			1.09	1.07	0.88	0.98		1.04	0.01
junio			0.96			1.29	1.31	1.17	1.22		1.19	0.02
julio					1.44	1.33	1.97	0.79	1.05		1.32	0.16
agosto				1.07	1.81	1.92	1.31	1.17	1.75		1.50	0.11
sept	1.45	1.46		1.34	1.24	1.01	1.61	1.75	1.75		1.45	0.06
octubre	1.47	1.89		1.20	1.42		1.72	1.31	1.64		1.52	0.05
noviembr	1.94	1.47			0.93	2.06		1.17	1.73		1.55	0.16
diciembre	1.57		0.89	1.23		1.69		1.34	1.58		1.38	0.07
Promedio	1.61	1.41	1.11	1.17	1.20	1.37	1.32	1.15	1.37	1.43		
Varianza	0.04	0.06	0.05	0.02	0.13	0.14	0.10	0.06	0.10	0.00		

Tabla XVI. Valores promedio mensuales de Altura significativa (Hs) del modelo de Playa Hermosa.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Varianza
Enero	1.18	2.22	1.37	1.41	1.41	1.30	1.22	2.10	1.67	1.49	1.54	0.12
Febrero	1.38	1.85	1.31	1.72	1.48	1.22	1.51	1.78	1.81	1.14	1.52	0.06
Marzo	1.13	1.56	1.60	1.39	1.24	1.59	1.16	1.91	1.28		1.43	0.06
Abril	1.21	1.49	1.41	1.52	1.36	1.31	1.25	1.52	1.67	1.36	1.41	0.02
Mayo	1.05	1.29	1.31	1.25	1.28	1.18	1.19	1.11	1.28	1.23	1.22	0.01
Junio	0.94	1.15	1.12	1.21	1.16	1.03	1.03	1.20	1.20	1.14	1.12	0.01
Julio	0.92	0.96	1.01	0.97	0.99	0.93	0.98	1.07	0.98	0.95	0.98	0.00
Agosto	0.91	0.98	1.04	0.90	0.97	1.04	0.99	0.98	0.93	0.92	0.97	0.00
Septiembre	1.01	1.05	1.08	1.00	1.10	1.09	0.97	1.10	0.91	1.07	1.04	0.00
Octubre	1.21	1.09	1.01	1.05	0.95	1.24	1.27	1.20	1.13	1.18	1.13	0.01
Noviembre	1.22	1.11	1.15	1.08	1.02	1.16	1.19	1.67	0.95	1.16	1.17	0.03
Diciembre	1.58	1.26	1.11	1.38	1.15		1.67	1.19	1.08	1.66	1.34	0.05
Promedio	1.15	1.34	1.21	1.24	1.18	1.19	1.20	1.40	1.24	1.21		
Varianza	0.04	0.14	0.03	0.06	0.03	0.03	0.04	0.13	0.09	0.04		

Tabla XVII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje en la Bahía de Todos Santos y alrededores obtenidos mediante el modelo numérico de enero de 2008 a diciembre de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Desv. Std.
Enero	12.52	8.03	34.94	10.99	12.78	11.89	10.37	9.06	28.90	20.56	16.01	9.15
Febrero	16.07	11.61	21.41	9.06	17.12	13.15	7.28	12.12	20.43	18.48	14.67	4.78
Marzo	11.42	6.37	14.84	14.57	11.47	7.68	15.56	6.28	21.54	8.45	11.82	4.88
Abril	7.23	7.34	13.00	9.24	13.43	9.35	7.68	7.06	11.85	13.58	9.98	2.72
Mayo	7.47	5.32	7.64	7.71	6.68	6.85	5.87	6.39	5.16	7.73	6.68	0.98
Junio	5.97	4.02	5.80	5.38	5.97	5.74	3.74	4.08	6.71	5.42	5.28	1.00
Julio	4.52	3.38	4.72	4.17	3.39	4.33	3.60	4.32	5.01	4.60	4.20	0.57
Agosto	3.80	3.33	4.42	4.00	3.50	3.20	5.34	3.73	3.80	3.47	3.86	0.63
Septiembre	4.95	4.49	4.86	5.51	4.31	4.78	4.90	4.30	5.54	2.95	4.66	0.74
Octubre	6.20	8.00	6.12	4.43	4.70	4.10	8.29	7.52	7.14	6.26	6.27	1.49
Noviembre	8.28	9.94	6.96	7.20	6.12	5.24	7.29	7.68	16.34	4.17	7.92	3.36
Diciembre	8.52	15.18	8.74	7.03	11.20	6.81		17.26	7.37	6.61	9.86	3.90
Promedio	8.08	7.25	11.12	7.44	8.39	6.93	7.27	7.48	11.65	8.52		
Desv.Std	3.63	3.61	9.07	3.15	4.59	3.12	3.42	3.91	8.22	5.88		

Tabla XVIII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de Punta Morro de enero de 2008 a diciembre de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Desv.Std.
Enero	14.91	9.08	38.86	11.29	12.99	12.36	10.68	9.35	28.17	20.10	16.78	9.70
Febrero	18.56	13.23	22.66	10.12	17.70	13.73	7.99	12.94	19.90	19.42	15.63	4.72
Marzo	13.99	7.66	16.07	15.92	12.60	9.17	16.67	7.91	21.50	9.01	13.05	4.59
Abril	9.01	9.01	14.69	10.85	14.96	11.22	9.19	8.37	12.78	14.74	11.48	2.63
Mayo	9.46	6.54	9.63	9.47	8.36	8.76	7.54	8.79	6.84	9.26	8.46	1.13
Junio	7.90	5.50	7.35	7.37	7.24	7.94	5.01	5.52	9.63	6.91	7.04	1.39
Julio	6.40	4.82	7.06	5.82	4.66	6.43	5.07	6.13	7.10	6.55	6.00	0.89
Agosto	5.19	4.65	6.58	5.52	5.26	4.50	7.85	5.21	5.31	4.88	5.50	1.00
Septiembre	7.33	5.50	6.33	7.47	6.04	6.09	6.65	6.07	7.85	3.74	6.31	1.17
Octubre	8.05	9.41	7.67	5.60	5.75	5.29	9.91	9.41	8.39	7.85	7.73	1.68
Noviembre	9.99	10.89	7.72	8.31	6.89	6.13	7.93	8.45	16.43	4.88	8.76	3.20
Diciembre	10.22	17.08	9.96	7.86	11.93	7.42		17.34	7.90	7.01	10.75	3.99
Promedio	10.08	8.61	12.88	8.80	9.53	8.25	8.59	8.79	12.65	9.53		
Desv. Std.	3.88	3.74	9.55	2.99	4.32	2.91	3.21	3.44	7.24	5.55		

Tabla XIX. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo frente al Espigón del Puerto de Ensenada de enero de 2008 a diciembre de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Desv.Std
Enero	7.86	5.60	26.90	7.30	8.51	7.46	6.89	6.20	20.27	14.48	11.15	
Febrero	10.57	7.99	16.24	6.15	12.01	8.22	4.59	9.14	13.55	13.61	10.21	3.66
Marzo	7.22	3.71	9.21	9.14	7.44	4.59	10.39	3.81	14.57	5.44	7.55	3.41
Abril	4.34	4.08	7.99	5.51	8.54	5.69	4.54	4.27	7.47	8.87	6.13	1.90
Mayo	4.77	3.25	4.58	4.51	3.97	4.02	3.24	3.12	2.92	4.65	3.90	0.72
Junio	3.27	1.86	3.47	2.71	3.61	2.98	1.95	2.02	2.74	3.10	2.77	0.64
Julio	2.06	1.29	1.58	1.88	1.51	1.61	1.57	1.81	2.09	1.63	1.70	0.25
Agosto	1.89	1.30	1.45	1.68	1.20	1.43	1.77	1.72	1.66	1.39	1.55	0.23
Septiembre	1.95	2.46	2.28	2.51	1.64	2.59	2.19	1.74	2.36	1.49	2.12	0.39
Octubre	3.35	4.93	3.22	2.23	2.51	2.20	4.65	4.32	3.84	3.19	3.44	0.98
Noviembre	5.05	5.86	3.78	4.28	3.77	3.30	4.51	4.43	10.05	2.35	4.74	2.10
Diciembre	5.19	10.45	5.66	3.96	7.14	4.32		10.16	4.25	3.90	6.12	2.59
Promedio	4.79	4.40	7.20	4.32	5.15	4.03	4.21	4.40	7.15	5.34		
Desv.Std.	2.66	2.78	7.47	2.34	3.48	2.18	2.63	2.82	6.12	4.57		

Tabla XX. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo del Bajo de San Miguel de enero de 2008 a diciembre de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Desv. Std.
Enero	16.29	11.77	56.25	16.51	19.19	16.14	14.96	13.37	44.47	30.59	23.95	15.08
Febrero	22.82	15.96	34.09	12.56	25.36	17.69	9.23	18.00	29.73	26.84	21.23	7.88
Marzo	14.08	7.45	20.32	19.50	15.29	8.95	21.62	7.19	30.86	10.75	15.60	7.56
Abril	8.02	7.97	16.81	10.80	17.71	10.94	8.83	8.09	14.96	17.25	12.14	4.11
Mayo	8.73	6.07	8.23	8.39	7.29	6.99	5.79	5.49	5.06	8.40	7.04	1.37
Junio	5.68	3.36	6.23	4.86	6.53	5.16	3.42	3.43	4.63	5.35	4.87	1.16
Julio	3.54	2.34	3.12	3.31	2.81	2.87	2.86	3.10	3.61	3.15	3.07	0.37
Agosto	3.33	2.61	2.75	3.19	2.30	2.52	3.40	3.00	2.83	2.50	2.84	0.38
Septiembre	3.46	5.05	4.48	4.88	3.47	4.69	3.99	3.04	4.22	2.71	4.00	0.80
Octubre	6.36	9.96	6.50	4.41	5.07	4.14	9.44	7.89	7.80	6.16	6.77	1.99
Noviembre	10.16	12.88	8.24	8.83	7.72	6.44	9.25	8.93	21.95	4.60	9.90	4.76
Diciembre	10.52	22.44	10.99	8.84	15.11	9.03		22.29	8.64	8.32	12.91	5.75
Promedio	9.42	8.99	14.83	8.84	10.65	7.96	8.44	8.65	14.90	10.55		
Desv.Std.	5.90	6.01	15.83	5.26	7.58	4.90	5.72	6.26	13.74	9.46		

Tabla XXI. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de la Isla de Todos Santos de enero de 2008 a diciembre de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Desv. Std.
Enero	14.62	9.20	41.05	12.60	14.69	13.97	12.11	10.65	34.41	24.53	18.78	10.91
Febrero	18.87	13.28	24.91	10.31	19.68	15.39	8.43	14.38	24.30	21.91	17.15	5.69
Marzo	13.24	7.20	16.85	16.65	13.12	8.92	18.32	7.36	25.50	9.89	13.71	5.77
Abril	8.49	8.47	14.70	10.49	15.25	11.23	8.81	8.14	13.85	15.69	11.51	3.08
Mayo	8.84	6.13	8.81	8.75	7.72	8.12	7.06	7.95	6.07	9.21	7.87	1.13
Junio	7.21	5.03	6.67	6.50	6.73	6.93	4.49	4.98	8.59	6.41	6.35	1.22
Julio	5.70	4.17	6.13	5.04	4.17	5.63	4.60	5.59	6.41	6.17	5.36	0.82
Agosto	4.62	4.12	5.84	4.92	4.77	3.94	7.13	4.70	4.76	4.54	4.93	0.92
Septiembre	6.31	5.10	5.83	6.68	5.51	5.63	6.04	5.57	7.02	3.53	5.72	0.96
Octubre	7.27	9.25	6.98	5.03	5.41	4.81	9.77	8.97	8.27	7.40	7.32	1.78
Noviembre	9.59	11.33	7.87	8.18	6.91	6.09	8.38	8.97	18.96	4.80	9.11	3.91
Diciembre	9.89	17.50	9.96	7.96	12.79	7.91		20.24	8.47	7.59	11.37	4.59
Promedio	9.55	8.40	12.97	8.59	9.73	8.21	8.65	8.96	13.88	10.14		
Desv.Std.	4.14	4.06	10.56	3.50	5.12	3.61	3.90	4.48	9.66	6.91		

Tabla XXII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de Punta Banda de enero de 2008 a diciembre de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Desv. Std.
Enero	15.69	10.90	38.79	14.23	16.79	15.32	13.43	11.99	35.12	23.14	19.54	9.80
Febrero	19.35	15.37	28.06	12.21	22.91	16.49	9.75	16.70	25.01	23.35	18.92	5.86
Marzo	15.22	8.58	18.75	19.07	14.54	9.78	19.26	8.44	27.41	11.32	15.24	6.03
Abril	9.72	9.60	16.69	12.28	17.38	12.03	10.35	9.50	15.81	18.38	13.17	3.53
Mayo	10.04	7.29	10.57	10.60	9.14	9.03	7.65	7.62	6.63	10.17	8.87	1.48
Junio	7.63	4.82	7.96	6.80	8.16	7.26	4.77	4.96	7.45	7.24	6.70	1.33
Julio	5.29	3.80	4.99	5.01	4.16	4.60	4.11	4.73	5.71	4.82	4.72	0.58
Agosto	4.76	3.87	4.68	4.78	3.69	3.79	5.35	4.31	4.35	3.81	4.34	0.55
Septiembre	5.49	5.89	5.66	6.49	4.82	6.21	5.65	4.64	6.33	3.63	5.48	0.89
Octubre	7.83	10.94	7.70	5.53	6.08	5.12	10.26	9.46	8.91	7.53	7.94	1.97
Noviembre	10.99	12.39	8.51	9.39	8.11	6.91	9.50	9.70	20.59	5.25	10.13	4.18
Diciembre	10.91	19.76	11.43	8.91	14.82	8.86		20.88	9.24	8.28	12.57	4.83
Promedio	10.24	9.43	13.65	9.61	10.88	8.78	9.10	9.41	14.38	10.58		
Desv.Std.	4.56	4.83	10.46	4.32	6.22	4.07	4.44	5.10	10.26	7.16		

Tabla XXIII. Valores mensuales promedio de Potencia del Oleaje (kW/m) en el nodo de Punta Santo Tomás de enero de 2008 a diciembre de 2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio	Desv.Std.
Enero	24.80	18.39	49.21	27.10	28.11	25.51	23.18	20.33	48.39	30.77	29.58	10.75
Febrero	31.21	23.47	39.77	20.50	35.74	27.15	15.05	23.02	36.81	30.33	28.30	7.89
Marzo	22.17	14.16	31.69	29.93	22.95	15.93	28.72	12.83	38.77	16.39	23.35	8.69
Abril	12.92	14.23	26.81	19.13	25.87	16.07	16.04	14.24	23.38	26.95	19.56	5.65
Mayo	13.25	10.25	14.37	15.26	12.49	11.73	10.02	10.99	9.52	13.59	12.15	1.96
Junio	9.83	6.23	11.06	9.90	11.24	10.03	6.34	6.38	9.76	9.39	9.01	1.95
Julio	6.81	5.21	6.92	6.95	5.33	5.89	5.52	6.01	7.17	6.20	6.20	0.73
Agosto	6.67	5.25	6.38	6.31	5.17	4.83	6.39	5.63	5.53	4.94	5.71	0.68
Septiembre	7.48	10.14	9.27	10.72	7.33	8.26	7.88	5.83	8.72	5.00	8.06	1.78
Octubre	12.50	15.84	13.99	9.57	9.60	8.41	17.08	13.95	15.57	12.86	12.94	2.94
Noviembre	17.22	21.99	16.17	16.57	13.61	10.62	15.96	14.38	33.77	8.60	16.89	6.97
Diciembre	17.39	31.45	17.16	17.91	23.87	15.20		31.84	15.43	15.52	20.64	6.76
Promedio	15.19	14.72	20.23	15.82	16.77	13.30	13.83	13.78	21.07	15.04		
Desv. Std.	7.71	8.08	13.71	7.59	10.11	7.11	7.49	8.03	14.72	9.47		

Anexo II. Mapas de potencia mensual en la Bahía de Todos Santos y alrededores.

