



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**Evaluación de densidad de potencia por marea en el
Golfo de California**

que para obtener el grado de
**Maestro en
Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta
Joshua Cabello Lugo

Tutor: Dr. Efraín Mateos Farfán



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “Evaluación de densidad de potencia por marea en el Golfo de California”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Joshua Cabello Lugo

Jiutepec, Morelos a 6 de diciembre de 2019

Resumen

La presente tesis pretende contribuir a solucionar los problemas referentes al uso de combustibles fósiles. El uso intensivo de combustibles fósiles, ha dado como resultado una serie de problemas como insuficiencia de dichos combustibles y contaminación ambiental. Estos problemas han motivado a buscar alternativas para satisfacer la demanda de energía, considerando fuentes renovables. Dentro de estas fuentes renovables de energía, están las corrientes de marea. Estas, por sus características como que pueden predecirse anticipadamente y que el agua tiene un mayor factor de carga, comparada con el viento, han sido motivo de interés.

La presente tesis desarrolla una evaluación de densidad de potencia por marea (TPD, por sus siglas en inglés) en el Golfo de California (GC). La evaluación se realiza en toda la extensión del golfo a diferentes profundidades (5, 10, 20, 30, 40, 50, 75 y 100 *m*). El trabajo se basa en una modelación numérica del GC, implementado el Regional Ocean Modeling System (ROMS). El modelo utiliza un forzamiento constituido por 10 armónicos de marea, ubicado en la entrada del golfo. Es importante resaltar que el modelo utiliza 2 mallas anidadas de diferente resolución. Lo anterior se hace con la finalidad de poder analizar regiones estrechas de la parte central del golfo, las cuales son áreas de interés.

Los resultados demuestran que los factores que contribuyen a la presencia de máximos valores de TPD en el GC son: la resonancia de la marea, las constricciones causadas por las islas y las restricciones batimétricas. Existen 2 regiones

en las cuales se presentan los máximos valores promedio de TPD, los cuales son superiores a 60 W/m^2 . La primer región identificada es la Región de las Grandes Islas (RGI) y la segunda es la región del Alto Golfo de California (AGC). Dentro de estas 2 regiones, se identifican 6 zonas en las cuales se podrían obtener valores superiores a 1000 kWh/m^2 en un periodo anual.

*A Ariadna, por acompañarme a cada paso,
siempre.*

Agradecimientos

Mi sincero agradecimiento al Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua (IMTA) por brindarme un espacio para poder crecer en el ámbito profesional y por la beca otorgada durante este periodo.

Agradezco al Posgrado IMTA y a todo su personal, por siempre otorgarme las herramientas necesarias para culminar mis estudios de posgrado.

Agradezco al Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE-Océano) por la invitación a formar parte de su proyecto y por hacerme participe de sus actividades; las cuales contribuyeron en gran medida a mi formación académica.

Expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Efraín Mateos Farfán por guiarme a través de esta etapa. Agradezco por su tiempo, consejos, conocimiento, paciencia, confianza, apoyo y por las oportunidades brindadas.

Agradezco a mis sinodales el Dr. Julio Sergio Santana Sepúlveda, el Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa, el Dr. Ariosto Aguilar Chávez y el Dr. Rodolfo Silva Casarín; por su tiempo, consejos y conocimiento compartido.

Agradezco a mis compañeros de cubo, Jorge Armando Ibarra, Miguel Ángel Rodríguez, Ma. del Rosario Ayala y Lila Gabriela Ostos; por siempre brindarme su apoyo, por todos sus consejos y amistad.

Joshua Cabello Lugo

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Golfo de California	11
1.2. Marea	14
1.2.1. Resonancia de marea	16
1.2.2. Energía renovable proveniente de la marea	18
1.2.3. Densidad de potencia por marea	20
1.3. Objetivo general	21
1.3.1. Objetivos particulares	21
1.4. Hipótesis	22
2. Metodología	23
2.1. Regional Ocean Modeling System (ROMS)	24
2.2. Configuración del modelo numérico ROMS	24
3. Resultados	27
3.1. Validación de modelación numérica	27
3.2. Caracterización del Golfo de California	38

4. Discusiones y conclusiones	81
4.1. Discusiones	81
4.2. Conclusiones	84
Referencias	87

Índice de figuras

1.1. Región de estudio.	13
2.1. Diagrama de metodológico.	23
2.2. Mallas empleadas por el modelo numérico ROMS.	25
3.1. Validación de datos de salida del modelo numérico.	31
3.2. Datos de salida del modelo numérico (marea mensual).	39
3.3. Rapidez promedio mensual a 5 y 10 m de profundidad.	41
3.4. Rapidez promedio mensual a 20 y 30 m de profundidad.	42
3.5. Rapidez promedio mensual a 40 y 50 m de profundidad.	43
3.6. Rapidez promedio mensual a 75 y 100 m de profundidad.	44
3.7. TPD promedio mensual a 5,10,20 y 30 m de profundidad.	46
3.8. TPD promedio mensual a 40,50,75 y 100 m de profundidad.	47
3.9. TAT respecto a $60 W/m^2$ en 5,10,20 y 30 m de profundidad.	49
3.10. TAT respecto a $60 W/m^2$ en 40,50,75 y 100 m de profundidad.	50
3.11. Energía mensual a 5,10,20 y 30 m de profundidad.	52
3.12. Energía mensual a 40,50,75 y 100 m de profundidad.	53
3.13. Energía anual a 5,10,20 y 30 m de profundidad.	55

3.14. Energía anual a 40,50,75 y 100 m de profundidad.	56
3.15. Puntos de interés para muestreo de corriente de marea.	57
3.16. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 5 m de profundidad.	62
3.17. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 10 m de profundidad.	63
3.18. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 20 m de profundidad.	64
3.19. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 30 m de profundidad.	65
3.20. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 40 m de profundidad.	66
3.21. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 50 m de profundidad.	67
3.22. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 75 m de profundidad.	68
3.23. Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 100 m de profundidad.	69
3.24. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 5 metros de profundidad.	72
3.25. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 10 metros de profundidad.	73
3.26. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 20 metros de profundidad.	74
3.27. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 30 metros de profundidad.	75

3.28. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 40 metros de profundidad.	76
3.29. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 50 metros de profundidad.	77
3.30. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 75 metros de profundidad.	78
3.31. Curvas de densidad de flujo de los puntos de muestreo a 100 metros de profundidad.	79

Índice de tablas

3.1. Componentes armónicos semidiurnos de la marea en estaciones mareográficas del Golfo de California.	28
3.2. Componentes armónicos diurnos de la marea en estaciones mareográficas del Golfo de California.	29
3.3. Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en San Felipe, Baja California.	32
3.4. Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Santa Rosalía, Baja California Sur.	33
3.5. Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en La Paz, Baja California Sur.	33
3.6. Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Puerto Peñasco, Sonora.	34
3.7. Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Guaymas, Sonora.	35
3.8. Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Topolobampo, Sinaloa.	35
3.9. Análisis armónico de componentes de velocidad entre datos del modelo ROMS y medidos (M2).	37

3.10. Análisis armónico de componentes de velocidad entre datos del modelo ROMS y medidos (K1).	38
3.11. Puntos seleccionados para muestreo.	58

Capítulo 1

Introducción

La energía está estrechamente asociada con el bienestar humano y el desarrollo económico. Desde la revolución industrial, la industria energética ha sufrido un rápido crecimiento, que pasó por el uso de leña hasta la utilización de combustibles fósiles como fuerza principal para el desarrollo. Se denominan combustibles fósiles al carbón, el petróleo, el gas natural y otras fuentes de energías no renovables, formadas a partir de restos orgánicos de hace cientos de millones de años. En la producción de energía fósil, el petróleo juega el papel más importante, seguido del carbón y el gas natural. En la actualidad, el suministro mundial de energía está en constante crecimiento y dominado por los combustibles fósiles. El uso excesivo de combustibles fósiles dio lugar a una serie de problemas que amenazan la existencia humana y el desarrollo sostenible como: insuficiencia de dichos combustibles, contaminación ambiental y cambio climático (Liu, 2015).

El uso de combustibles fósiles dentro de la industria energética también ha provocado un crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Datos confirman que el consumo de combustibles fósiles es responsable de la mayoría de las emisiones antropogénicas globales de gases de efecto invernadero. Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han contribuido significativamente al aumento de sus concentraciones atmosféricas y se les relaciona

directamente con el aumento de la temperatura media global (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011). Una opción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y al mismo tiempo satisfacer la demanda mundial de energía de manera confiable, son las energías renovables (Squalli, 2017).

Las energías renovables, se pueden definir como sistemas de energía que hacen uso de flujos naturales de energía disponibles, en el medio ambiente (Lynn, 2013). Muchas de estas fuentes de energía renovable son impulsadas por el Sol, incluidos el viento, la energía hidroeléctrica, las olas oceánicas, la biomasa de la fotosíntesis y, por supuesto, la energía solar directa. Otros tipos de energía renovable son las mareas (principalmente impulsadas por la Luna y el Sol) y la energía geotérmica del interior caliente de la Tierra; entre otras (Ehrlich & Geller, 2017). Las fuentes renovables de energía son alternativas esenciales a los combustibles fósiles y a la energía nuclear, los cuales ocasionan preocupaciones de seguridad a largo plazo (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018). Además, la energía renovable que se deriva de los flujos naturales de energía, es inagotable y no tiene efectos perjudiciales a largo plazo sobre el medio ambiente (Freris & Infield, 2008). Su uso, además de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, diversifica el suministro de energía y reduce la dependencia de mercados de combustibles fósiles volátiles y poco confiables (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018). No se debe asumir que la energía renovable es una respuesta fácil, pues generalmente es difusa, intermitente y a menudo impredecible (Lynn, 2013).

En particular, los diferentes tipos de energías renovables provenientes del océano han atraído la atención debido a su gran potencial energético. Entre las diferentes modalidades de energía proveniente del océano destaca la energía de las corrientes de marea. El poder de las corrientes de marea se debe a la energía cinética provocada por las variaciones de la altura de las mismas. Cuando se compara con otras fuentes de energía renovable, el poder de las corrientes de marea presenta ventajas significativas como: las mareas pueden predecirse anticipadamente y tienen un factor de carga alto comparado con otros fluidos (Ramos

& Ringwood, 2016).

México es un país que posee una amplia extensión de litorales, aproximadamente de 11592.76 *km* de longitud. Además, se encuentra limitado por el Océano Pacífico, el Golfo de California, el Golfo de México y el Mar Caribe (De la Lanza Espino & Cáceres Martínez, 1994). De manera más específica, en el Golfo de California se presenta un fenómeno llamado resonancia hidráulica que provoca que la marea se amplifique desde Mazatlán hasta el extremo norte del golfo. Añadido a lo anterior, la entrada y salida de masas de agua provoca importantes corrientes en las zonas más estrechas del golfo (Hiriart Le Bert, 2009). Por estos motivos, México parece ser un sitio con amplias posibilidades de explotar el océano como fuente de energía renovable; y más específicamente, el Golfo de California una zona con características idóneas para explotar la energía procedente de las corrientes de marea.

Por todo lo expresado anteriormente, surgen las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los valores promedio de rapidez en el Golfo de California?, ¿Cuáles son los valores promedio de densidad de potencia por marea?, ¿Qué tan persistente es la densidad de potencia por marea?, ¿Cuánta energía se presenta mensualmente?, ¿Cuánta energía se presenta anualmente?, ¿Qué sitios presentan los máximos valores de energía disponible?, ¿Cuáles son las características de la corriente de marea en estos sitios específicos?

1.1. Golfo de California

El Golfo de California (GC) o también conocido como Mar de Cortés, es un mar marginal localizado al noroeste de la República Mexicana (Figura 1.1). El GC se localiza entre las latitudes 23°N-32°N y entre las longitudes 107°W-117°W. Se encuentra limitado al este por los estados de Sinaloa y Sonora, al oeste por Baja California y Baja California Sur, y al sur tiene comunicación directa con el Océano Pacífico. El GC posee una longitud de aproximadamente 1400 *km* y un ancho

promedio de 150 *km*, con una superficie total de aproximadamente 210 000 *km*² (si el límite sur se considera a la altura de 23°N de latitud). El golfo se considera una extensión del Océano Pacífico con forma más o menos rectangular, que se ubica en una región predominantemente árida, lo cual provoca que sea la única gran cuenca de evaporación del Océano Pacífico (Castro, Mascarenhas, Durazo & Collins, 2000; De la Lanza Espino, 1991; García Silva & Marinone, 2000; Roden, 1958).

El GC cuenta con más de 800 islas. La Región de las Grandes Islas (RGI) se ubica en la parte central del golfo y comprende la zona donde como su nombre lo indica, se encuentran las dos islas de mayor tamaño dentro del golfo, que son Isla Ángel de la Guarda (IAG) e Isla Tiburón (IT). Además, dentro de esta región se encuentran también Isla San Lorenzo (ISL) e Isla San Esteban (ISE), entre otras más. Estas islas forman canales en la RGI, en los cuales en estudios previos se han registrado corrientes de marea con velocidades superiores a 1.5 *m/s* (Mejia-Olivares, Haigh, Wells, Coles, Lewis & Neill, 2018). La isla de mayor tamaño dentro del golfo es IT con un área aproximada de 1223.53 *km*² y está apenas separada del estado de Sonora hacia el este. La segunda isla de mayor tamaño es IAG con un área de 936.04 *km*², con 67 *km* de largo y hasta 16 *km* de ancho; y se separa de la Península de Baja California a través del Canal de Ballenas (Case, Cody & Ezcurra, 2002). Ambas islas tienen elevaciones superiores a 1500 *m* (Roden, 1958).

El GC tiene una batimetría compleja que consiste en una serie de cuencas semilocales distribuidas a lo largo del golfo, las cuales se hacen más profundas al aproximarse hacia la entrada del golfo. La profundidad varía desde 200 *m* en promedio en la parte superior del golfo hasta 3600 *m* en la entrada del golfo (Makarov & Jiménez Illescas, 2003; Mejia-Olivares et al., 2018). De norte a sur las cuencas se identifican como: Wagner, Delfín, San Pedro Mártir, Guaymas, Carmen, Farallón y Pescadero (Jiménez, Marinone & Parés-Sierra, 2005). Perpendiculares a las cuencas se encuentran fallas sobre las cuales se producen deslizamientos horizontales debido al movimiento de la península en dirección al noroeste, lo

que provoca una separación gradual de la península con respecto al continente (Medina, 1995).

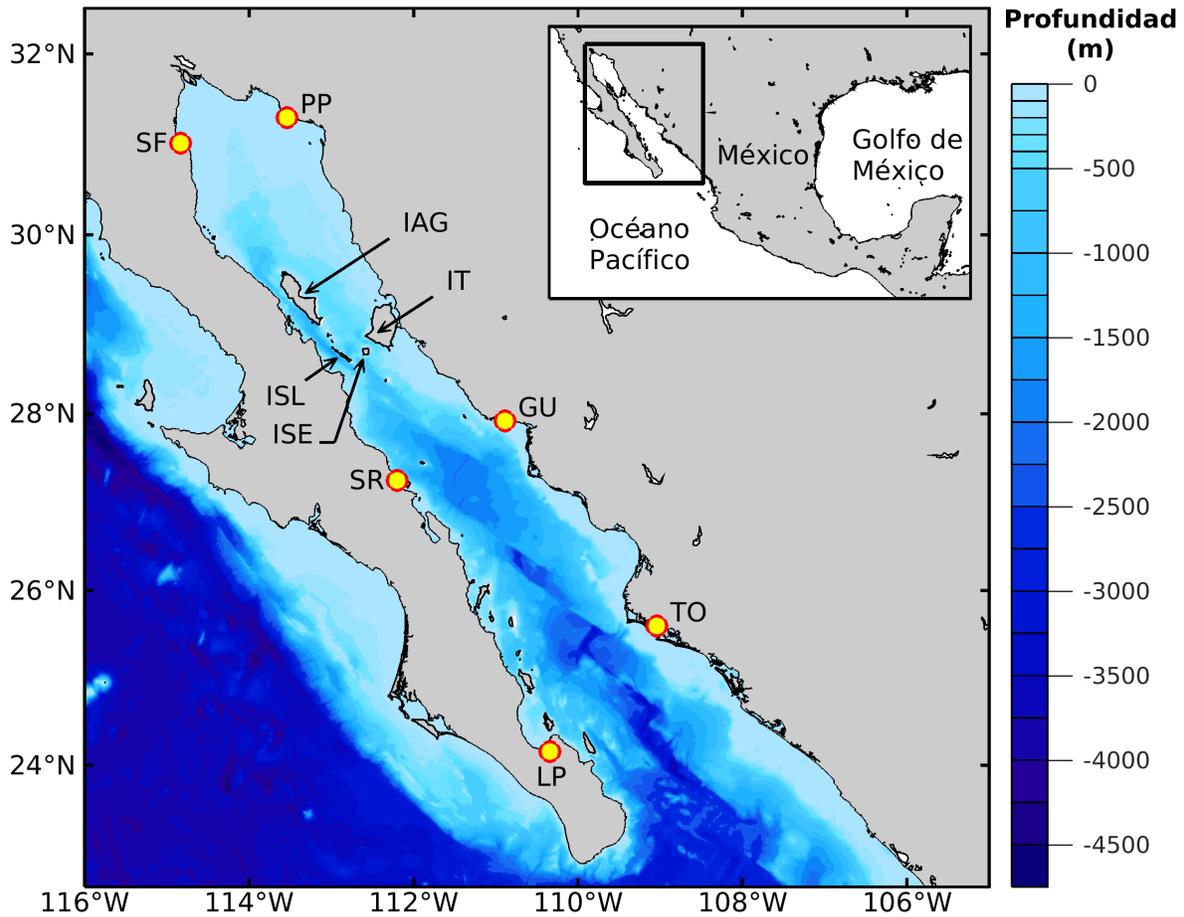


Figura 1.1: Región de estudio. El recuadro ubicado en la parte superior derecha muestra la localización del Golfo de California con respecto a México. La figura principal corresponde al golfo junto a la batimetría obtenida de GEBCO. Los puntos amarillos señalan las estaciones mareográficas utilizadas para validar la modelación numérica (San Felipe (SF), Santa Rosalía (SR), La Paz (LP), Puerto Peñasco (PP), Guaymas (GU) y Topolobampo (TO)). Además, se destaca Isla Ángel de la Guarda (IAG), Isla Tiburón (IT), Isla San Lorenzo (ISL) e Isla San Esteban (ISE).

1.2. Marea

Las mareas son ondas oceánicas que se asocian con el ascenso y descenso del nivel del mar durante un periodo de medio día o un día. La marea ascendente se conoce como flujo (o inundación), mientras que la marea descendente se denomina reflujo. Además del movimiento vertical, se presentan flujos horizontales de las masas de agua, conocidos como corrientes de marea. Es necesario mencionar que el flujo y reflujo de la marea en la costa es una manifestación del ascenso y descenso general del nivel del mar, que afecta a los océanos y a las aguas costeras poco profundas (Open University, 1999).

La marea es causada por las atracciones gravitacionales que ejercen la Luna y el Sol sobre las partículas de agua presentes en la hidrósfera. La fuerza que dirige la marea es controlada por los distintos movimientos del sistema Tierra-Luna-Sol. Cabe resaltar, que la atracción gravitacional que ejerce el Sol sobre la Tierra es de aproximadamente el 46 %, en comparación con la atracción lunar. Lo anterior es debido a que la distancia entre la Tierra y la Luna es menor que la distancia al Sol; a pesar de que la masa del Sol es mayor (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018).

El rango de marea se define como la diferencia de altura entre una marea alta y una marea baja que son consecutivas, y varía de un lugar a otro, así como en el tiempo. La combinación de la atracción gravitacional producida por el Sol y la Luna durante el mes sinódico (29.5306 días) provoca mareas vivas y mareas muertas. Las mareas vivas se definen como aquellas que ocurren dos veces en un mes sinódico y que presentan rangos de marea superiores al promedio; ocurren debido a la alineación aproximada del Sol, la Luna y la Tierra (Luna llena y Luna nueva). Las mareas muertas son aquellas que ocurren dos veces en un mes sinódico y que presentan rangos de marea menores al promedio; ocurren debido a que el Sol, la Luna y la Tierra forman ángulos rectos (cuarto creciente y cuarto menguante). Es necesario destacar que el mes sinódico está referenciado a las fases de la Luna (Hicks, 2006).

El periodo de la marea (intervalo de tiempo entre dos mareas altas consecutivas) es de aproximadamente 12 horas con 25 minutos, en el caso de las mareas semidiurnas. Por otra parte, las mareas diurnas tienen un periodo aproximado de 24 horas con 50 minutos. Los términos semidiurna y diurna aluden a la duración de una marea, aproximadamente medio día o un día, respectivamente (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018). Las mareas compuestas, donde se presenta una combinación de marea diurna y semidiurna, se conocen como mareas mixtas. La importancia relativa de los componentes diurnos y semidiurnos cambian a lo largo del mes. Las mareas diurnas son mayores cuando la declinación de la Luna es mayor, pero se reducen a cero cuando la Luna pasa a través del plano ecuatorial, donde tiene una declinación cero. Las mareas semidiurnas son mayores después de la Luna nueva y llena; pero, a diferencia de las mareas diurnas, no se reducen a rango cero, y solo se reducen parcialmente durante el período de las mareas muertas (Pugh & Woodworth, 2014).

En resumen, la marea es un fenómeno impulsado por fuerzas astronómicas, pero está controlada localmente por la batimetría y la geometría del sitio en cuestión (costa, estuario, golfo, mar) (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018).

La marea en el GC se produce principalmente por cooscilación con la marea del Océano Pacífico y representa un fenómeno de relevancia en el golfo. La distribución del número de forma en el GC, indica que el tipo de marea predominante en la región es mixta, con una tendencia hacia el tipo semidiurno en el extremo norte, a excepción de la zona central del golfo, donde el número de forma muestra una tendencia hacia una marea de carácter diurno, en especial cerca de Santa Rosalía. Por otro lado, los mapas cotidales de las componentes semidiurnas N2, M2, S2 y K2 presentan una región anfidrómica en la parte central del golfo, indicada por la presencia de un mínimo en la amplitud y un cambio rápido en la fase. Por consiguiente, los nodos de las componentes semidiurnas se localizan entre Santa Rosalía y Bahía Concepción. Finalmente, se debe mencionar que la amplitud de la marea semidiurna en el extremo norte del golfo comparada con el extremo sur muestra un factor de amplificación cercano a 5 para estos componentes (Morales

& Gutiérrez, 1989).

1.2.1. Resonancia de marea

Para que se presenten ondas en una cuenca o canal cerrado, es necesario forzarlas. Los forzamientos pueden tener distintos periodos y por consiguiente las ondas producidas tendrán un periodo similar al del forzamiento. El fenómeno de resonancia se da bajo la condición de que el periodo del forzamiento coincida con alguno de los periodos normales de oscilación de la cuenca, provocando que la amplitud de la onda se acreciente. Por lo tanto, se dice que la cuenca esta en resonancia con el forzamiento si alguno de los periodos normales de oscilación de la misma coincide con el periodo de la onda forzada (Marinone Moschetto & Lavín Peregrina, 1997). El período normal de oscilación del cuerpo agua es el tiempo que tarda una onda en viajar desde un límite y regresar después de ser reflejado en el segundo límite (Pugh & Woodworth, 2014).

En una cuenca cerrada (por ejemplo, un lago o una tina de baño), sólo pueden existir ciertas ondas estacionarias (también llamados seiches o modos normales de oscilación), cuyos periodos están determinados por la geometría del sistema. El periodo normal de oscilación del primer modo (o modo fundamental) esta dado por formula de Merian (Ecuación 1.1):

$$T_1 = \frac{\lambda}{C} = \frac{2L}{C} \quad (1.1)$$

La cual esta conforma por la longitud de onda (λ) y la rapidez de fase (C). La longitud de onda se puede calcular como 2 veces la longitud del canal (L) y la rapidez de fase se puede calcular de la siguiente manera (Ecuación 1.2):

$$C = \sqrt{gH} \quad (1.2)$$

Para calcular la rapidez de fase se utiliza la aceleración de la gravedad (g)

junto con la profundidad por debajo del nivel del mar sin perturbaciones (H). Los modos sucesivos se calculan de la siguiente manera (Ecuación 1.3) (Marinone Moschetto & Lavín Peregrina, 1997):

$$T_i = \frac{2L}{iC} \quad (1.3)$$

La interferencia entre las ondas forzadas (incidentes y reflejadas) produce un patrón de ondas donde se presentan nodos y antinodos de forma alterna; cada uno separado por $\lambda/4$ tomando como punto de partida la barrera reflectante. Los nodos son ubicaciones donde la amplitud es cero y las corrientes son máximas. Por el contrario, los antinodos son ubicaciones donde la amplitud es máxima y no hay corrientes. La ausencia de movimientos horizontales de agua en los antinodos significa que un límite impermeable sólido podría insertarse en este punto de la cuenca sin afectar las oscilaciones una vez que se hayan establecido. Para el modo fundamental de oscilación hay un sólo nodo, y el término seiche uninodal a menudo se aplica. El siguiente modo más alto tiene 2 nodos, y así sucesivamente (Pugh & Woodworth, 2014). Si los nodos y antinodos no se propagan, la onda es estacionaria (Marinone Moschetto & Lavín Peregrina, 1997).

Las ondas estacionarias también pueden ocurrir en una cuenca que está cerrada en un extremo pero impulsada por forzamientos en el otro extremo abierto. El caso más sencillo es una cuenca cuya longitud es un cuarto de longitud de onda del forzamiento, de modo que el extremo abierto está en el primer nodo. La corriente en la entrada produce grandes cambios de nivel en la cabeza de la cuenca. El periodo normal de oscilación para este tipo de oscilación forzada es (Ecuación 1.4) (Pugh & Woodworth, 2014):

$$T_1 = \frac{4L}{C} \quad (1.4)$$

Un aspecto importante a mencionar es que hay una transferencia continua de energía, que pasa desde una posición de energía potencial máxima (cuando la

elevación de la onda es máxima) a una posición de energía potencial cero (cuando la elevación de la onda es mínima) pero la energía cinética es máxima; esta es una secuencia que continúa hasta volver a su estado inicial de energía potencial máxima (Pugh & Woodworth, 2014). Por otro lado, se debe mencionar que en la naturaleza las oscilaciones resonantes forzadas no pueden crecer indefinidamente porque las pérdidas de energía debido a la fricción aumentan más rápidamente que las amplitudes de las oscilaciones mismas (Neill & Hashemi, 2018).

Los estudios desarrollados permiten considerar el GC como un sistema resonante a pesar de que su longitud excede el cuarto de longitud de onda de la componente de marea M2. Para resonar, la cuenca debe satisfacer el requisito de medir un cuarto de la longitud de onda si es poco profundo. Sin embargo, la condición se vuelve considerablemente más relajada para embalses con mayor profundidad, lo que justifica que ocurra una amplificación relevante de la marea en el golfo, cuya longitud sobrepasa un cuarto de longitud de onda. La batimetría de los océanos juega un papel fundamental en la aparición de resonancia en la cuenca y el requisito de un cuarto de longitud de onda es una condición necesaria pero no suficiente para que ocurra el fenómeno; es sólo una aproximación (Godin, 1993).

1.2.2. Energía renovable proveniente de la marea

El aumento del desarrollo de energía renovable en el mundo ha reavivado el interés en el potencial de los recursos marinos para contribuir a la generación de electricidad (National Research Council, 2013). Lo anterior se debe a que el océano es una de las mayores fuentes potenciales de conversión de energía que nos rodea, ya que cubre aproximadamente el 70 % de la superficie de la Tierra (Neill & Hashemi, 2018). La energía renovable oceánica es generada por el Sol, el viento y las mareas, y puede explotarse a través de diversas tecnologías (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018), las cuales incluyen una diversa gama de técnicas para la extracción de energía proveniente de fuentes como

olas, rangos de marea, corrientes de marea, corrientes oceánicas, conversión de energía térmica oceánica (OTEC, por sus siglas en inglés) y gradientes de salinidad (Mark A. Shields & Andrew I.L. Payne, 2014). El océano es un vasto recurso natural que podría satisfacer varias veces la demanda mundial de energía. Sin embargo, debido a la falta de tecnologías de energía renovable oceánica probadas y rentables, solo se ha desarrollado una pequeña fracción de este potencial (Neill & Hashemi, 2018).

La energía proveniente de las mareas, es actualmente una de las formas más favorecidas de energía renovable oceánica debido a que es predecible, por su origen en ciertas fuerzas generadoras astronómicas. Esto contrasta con otras fuentes de energía renovable más estocásticas, como la eólica y las olas y, en parte, la solar. Sin embargo, independientemente de su previsibilidad, la energía de las mareas comparte una característica clave con la mayoría de las fuentes de energía renovables: es intermitente, desde escalas de tiempo diurnas (una vez al día), semidiurnas (dos veces al día) y hasta quincenales (mareas vivas y muertas) (Neill & Hashemi, 2018).

Hay 2 tipos de tecnologías involucradas en la extracción de energía de las mareas. El primero se basa en la captura de energía de las mareas como energía potencial dentro de una cuenca. El segundo se basa en la extracción directa de la energía cinética de las corrientes de marea (M.A. Laughton, 2003). La captura de la energía potencial es similar a la energía hidroeléctrica clásica donde se construye una presa, también conocida como presa de marea, a través de un estuario. Alternativamente, la energía cinética se puede extraer de las corrientes de marea usando turbinas hidrocinéticas, análogas a la energía eólica (Zhaoqing Yang & Andrea Copping, 2017).

Las presas de marea tienen una serie de desventajas que pueden obstaculizar los posibles desarrollos: la cantidad de sitios potenciales es muy limitada, su impacto ambiental es potencialmente considerable y se requiere una gran inversión de capital antes de que se produzca el primer kWh . Estas desventajas se mitigan en el caso de las lagunas de marea, las cuales actualmente están siendo con-

sideradas para ciertas áreas en el mundo. En cualquier caso, hay muchos más sitios disponibles para aprovechar las corrientes de marea y su impacto ambiental es menor (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018).

Como se mencionó anteriormente, la energía de las corrientes de mareas es confiable porque depende de movimientos altamente predecibles de la Tierra, la Luna y el Sol; esto hace que la tecnología sea atractiva para los planificadores de energía, quienes pueden saber de antemano cuánta electricidad pueden obtener y en que momento se obtendrá (Lynn, 2013). Cabe mencionar que las corrientes de marea están sujetas a forzamientos atmosféricos que pueden modificarlas aunque las grandes perturbaciones suelen ser raras (Zhaoqing Yang & Andrea Copping, 2017). Sin embargo, se consideran una fuente de energía esencialmente predecible, sostenible y renovable (Charlier & Finkl, 2009).

1.2.3. Densidad de potencia por marea

Es importante diferenciar entre energía y potencia. La energía se puede definir como la capacidad de un sistema para realizar cierto trabajo. El trabajo es energía transferida hacia o desde un cuerpo, requiere una fuerza aplicada que se mueve una cierta distancia. Por otra parte, la potencia es la velocidad a la que la energía se transforma de una forma a otra, o la velocidad a la que la energía se transfiere de un lugar a otro (Neill & Hashemi, 2018). La energía tiene dimensiones de potencia por tiempo, lo que da como resultado unidades en Joules (J), donde $1 J = 1 Ws$. Por su parte, la potencia tiene dimensiones de energía entre tiempo, que equivale a Watts (W), donde $1 W = 1 J/s$ (Lynn, 2013).

La energía que posee un cuerpo como resultado de su movimiento se conoce como energía cinética, y se calcula con la Ecuación 1.5:

$$E_c = \frac{1}{2}MU^2 \quad (1.5)$$

Donde la masa (M) está dada en kg , la velocidad (U) está dada en m/s y el

resultado se da en J (Atkins & De Paula, 2007).

La densidad de potencia en un cuerpo de agua que fluye es igual a la energía cinética del fluido que pasa a través de un área unitaria del flujo normal en una unidad de tiempo (Hardisty, 2009). Por lo tanto, la densidad de potencia por marea (TPD, por sus siglas en inglés) se calcula con la Ecuación 1.6:

$$TPD = \frac{1}{2}\rho U^3 \quad (1.6)$$

Donde la densidad (ρ) está dada en kg/m^3 , la velocidad (U) está dada en m/s y el resultado se da en W/m^2 (Deborah Greaves & Gregorio Iglesias, 2018; Kilcher, Thresher & Tinnesand, 2016).

1.3. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de investigación es evaluar la densidad de potencia por marea dentro del Golfo de California con la finalidad de identificar y caracterizar los sitios con mayor potencial en la producción de energía eléctrica.

1.3.1. Objetivos particulares

Derivados del objetivo general, los objetivos particulares son los siguientes:

1. Validar datos de salida del modelo numérico.
2. Calcular rapidez.
3. Calcular densidad de potencia por marea (TPD).
4. Calcular tiempo por encima del umbral (TAT).
5. Calcular energía mensual y anual.
6. Identificar sitios potenciales en la producción de energía.
7. Caracterizar la corriente de marea en los sitios seleccionados.

1.4. Hipótesis

La hipótesis formulada para este trabajo de investigación plantea la existencia de 3 regiones en las cuales se concentrarían los máximos valores promedio de densidad de potencia por marea (TPD). La primer región se ubicaría próxima a Santa Rosalía y sería provocada por la existencia de una región anfidrómica en este sitio. La segunda región se localizaría entre los 28°N y 30°N de latitud, y se debería a las constricciones causadas por las islas presentes en el sitio. La tercer región planteada se encontraría en la parte norte del golfo y se originaría por las grandes amplitudes de marea provocadas por la resonancia existente en el golfo.

Capítulo 2

Metodología

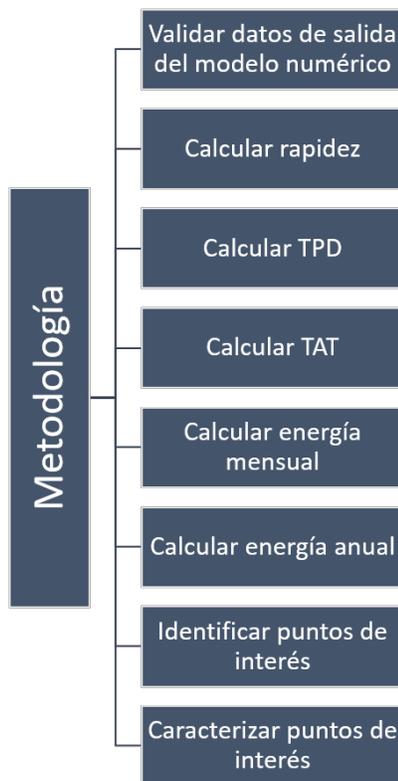


Figura 2.1: Diagrama metodológico.

2.1. Regional Ocean Modeling System (ROMS)

El desarrollo de la investigación se basó en una modelación numérica del GC que fue realizada mediante el Regional Ocean Modeling System (ROMS). El modelo ROMS fue desarrollado por la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA, por sus siglas en inglés), la Universidad de Rutgers y el Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD, por sus siglas en francés). El ROMS es un modelo tridimensional, de superficie libre, que usa coordenadas S en la vertical y coordenadas curvilíneas en la horizontal. El modelo ROMS resuelve las ecuaciones primitivas de momento con la aproximación hidrostática; además de las ecuaciones de temperatura y salinidad. El modelo usa una ecuación de estado que relaciona a la presión, la temperatura y la salinidad con la densidad (Mateos & Marinone, 2017; Shchepetkin & McWilliams, 2005).

2.2. Configuración del modelo numérico ROMS

La modelación numérica se realizó con las siguientes características: forzamiento constituido por 10 armónicos de marea, forzamiento ubicado en la entrada del golfo, condiciones iniciales analíticas, océano homogéneo (temperatura y salinidad constantes), batimetría suavizada, dos mallas anidadas (Figura 2.2) que trabajan en modo sincrónico a dos vías; la primer malla abarca por completo el golfo con una resolución de 2 km y la segunda malla cubre la RGI con una resolución de 660 m . No se consideraron esfuerzos de viento o calor. El resultado fue la obtención de datos horarios para un periodo de 1 año.

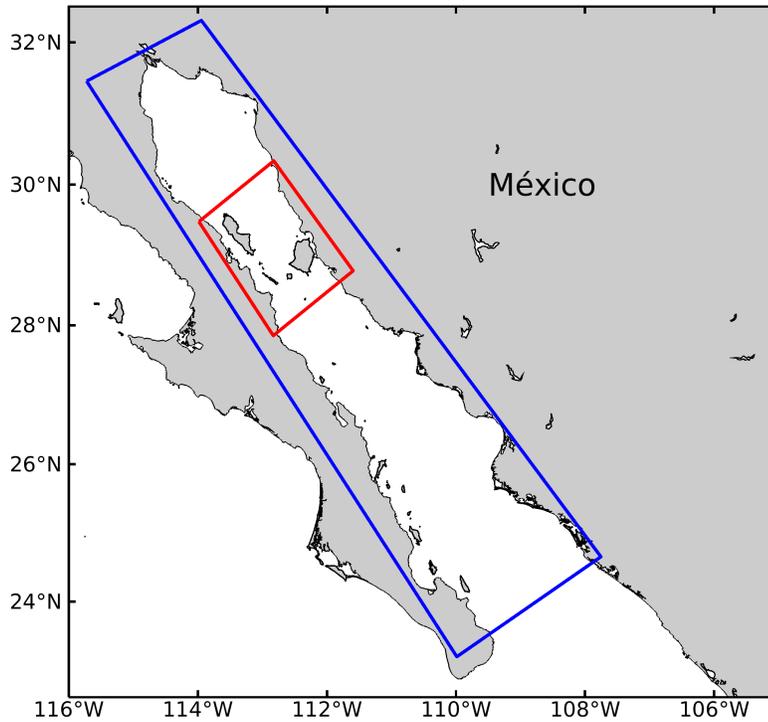


Figura 2.2: Mallas empleadas por el modelo numérico ROMS. Los polígonos corresponden a las zonas que cubren las mallas. El polígono de color azul corresponde a la malla gruesa (MG), la cual tiene una resolución de 2 km. El polígono de color rojo representa la malla fina (MF), que tiene una resolución de 660 m.

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de los datos de salida provenientes de la modelación numérica desarrollada en ROMS. El análisis se compone de dos partes: la validación de los datos de salida del modelo ROMS y la caracterización del Golfo de California. Los datos de salida, correspondientes a diversas variables, se presentan en forma horaria para un periodo de un año en todo el dominio del GC a diferentes profundidades. Los datos de interés se encuentran dentro de la malla gruesa (MG) y la malla fina (MF); descritas en el capítulo anterior.

3.1. Validación de modelación numérica

La validación de los datos de salida obtenidos a través del modelo ROMS se realizó mediante el cálculo del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), el índice de acuerdo (IOA, por sus siglas en inglés), el coeficiente de correlación (ρ) y el análisis armónico (con datos de elevación y componentes de velocidad). Para la validación de los datos de salida del modelo ROMS, primeramente se hizo la reconstrucción de la elevación de la marea por un periodo de 30

días (720 horas) en 6 estaciones mareográficas distribuidas a lo largo y ancho del GC, conocidas como: San Felipe (SF), Santa Rosalía (SR), La Paz (LP), Puerto Peñasco (PP), Guaymas (GU) y Topolobampo (TO). Para realizar la reconstrucción de la marea en cada estación se utilizó la Ecuación 3.1 (Marinone Moschetto & Lavín Peregrina, 1997):

$$\eta(t) = \sum A_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (3.1)$$

La ecuación sirve para calcular el nivel del mar en función del tiempo $\eta(t)$ como la sumatoria de la elevación provocada por cada uno de los armónicos de marea, y requiere datos de tiempo (t), amplitud de los armónicos (A_i), frecuencia de los armónicos (ω_i) y fases de los armónicos (ϕ_i). Los datos necesarios para la reconstrucción de la marea en las 6 estaciones mareográficas son los que se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2, mostradas a continuación (Carbajal & Backhaus, 1998):

Tabla 3.1: Componentes armónicos semidiurnos de la marea en estaciones mareográficas del Golfo de California.

Armónico	K2		S2		M2		N2	
	A	F	A	F	A	F	A	F
Periodo	11.9672		12.0000		12.4206		12.6583	
San Felipe	-	-	96.8	277.0	165.2	268.0	-	-
Santa Rosalía	-	-	5.3	140.0	6.8	191.0	-	-
La Paz	5.9	118.0	17.9	122.0	23.9	117.0	5.0	114.0
Puerto Peñasco	25.2	273.0	94.5	269.0	157.2	262.0	40.2	250.0
Guaymas	3.5	132.0	10.6	137.0	13.6	155.0	3.6	169.0
Topolobampo	6.8	143.0	21.2	144.0	30.0	141.0	6.5	144.0

Nota: La amplitud (A) está dada en centímetros, la fase (F), en grados, y los periodos, en horas.

Tabla 3.2: Componentes armónicos diurnos de la marea en estaciones mareográficas del Golfo de California.

Armónico	K1		P1		O1	
Periodo	23.9345		24.0659		25.8193	
	A	F	A	F	A	F
San Felipe	40.0	189.0	-	-	24.5	177.0
Santa Rosalía	30.1	183.0	-	-	20.1	171.0
La Paz	25.0	189.0	8.1	189.0	17.1	179.0
Puerto Peñasco	43.1	186.0	13.5	181.0	27.7	170.0
Guaymas	27.9	179.0	9.3	176.0	18.6	170.0
Topolobampo	25.6	193.0	8.7	196.0	17.4	180.0

Nota: La amplitud (A) está dada en centímetros, la fase (F), en grados, y los periodos, en horas.

Una vez reconstruida la marea durante 30 días (720 horas) en las 6 estaciones mareográficas, se procedió a extraer 6 series de datos de elevación a partir de las salidas del modelo numérico para un periodo de 365 días (8760 horas) en ubicaciones cercanas a las mismas 6 estaciones mareográficas. Después, en cada sitio se obtuvieron dos series de tiempo, la primera serie fue de 30 días de datos de elevación de marea reconstruida y la segunda serie fue de 365 días de datos de elevación provenientes del modelo numérico. En cada uno de los 6 sitios seleccionados se calcularon los coeficientes de correlación (ρ) entre ambas series de datos con la finalidad de validar los datos de salida y el spin-up del modelo.

Para encontrar los coeficientes de correlación se utilizó la Ecuación 3.2 (Thomson & Emery, 2014):

$$\rho = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.2)$$

Donde el coeficiente de correlación (ρ) se calcula con la covarianza (C_{xy}),

tiempo de desfase (τ) y desviaciones estándar (σ_x, σ_y).

En la Figura 3.1 se muestran las series temporales del periodo seleccionado. Los resultados arrojaron coeficientes de correlación en el rango de 0.80-0.98, lo que indica que el modelo reprodujo la marea con un aceptable grado de confiabilidad.

Una vez obtenidos los coeficientes de correlación en las 6 estaciones mareográficas, se continuó con el cálculo del error cuadrático medio (RMSE) y el índice de acuerdo (IOA), utilizando las 2 series temporales que lograron obtener los mayores coeficientes de correlación en el año analizado en cada una de las 6 estaciones mareográficas. Para calcular el RMSE se utilizó la Ecuación 3.3 (Ali & Abustan, 2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3.3)$$

El RMSE se calcula con el número de datos (N), los datos del modelo (P_i) y los datos medidos (O_i). Por otro, para calcular el IOA se utilizó la Ecuación 3.4 (Ali & Abustan, 2014):

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N [O_i' + P_i']^2} \quad (3.4)$$

Donde, $O_i' = |O_i - \bar{P}|$, $P_i' = |P_i - \bar{P}|$, datos medidos (O_i), datos del modelo (P_i) y promedio de valores del modelo (\bar{P}).

Los resultados obtenidos del cálculo del RMSE están en un rango de 7.83 a 66.93. En cuanto a los resultados obtenidos del cálculo del IOA, estos se encuentran en un rango que va de 0.89 a 0.98. Los resultados del RMSE, IOA y coeficiente de correlación (ρ) se muestran en la Figura 3.1.

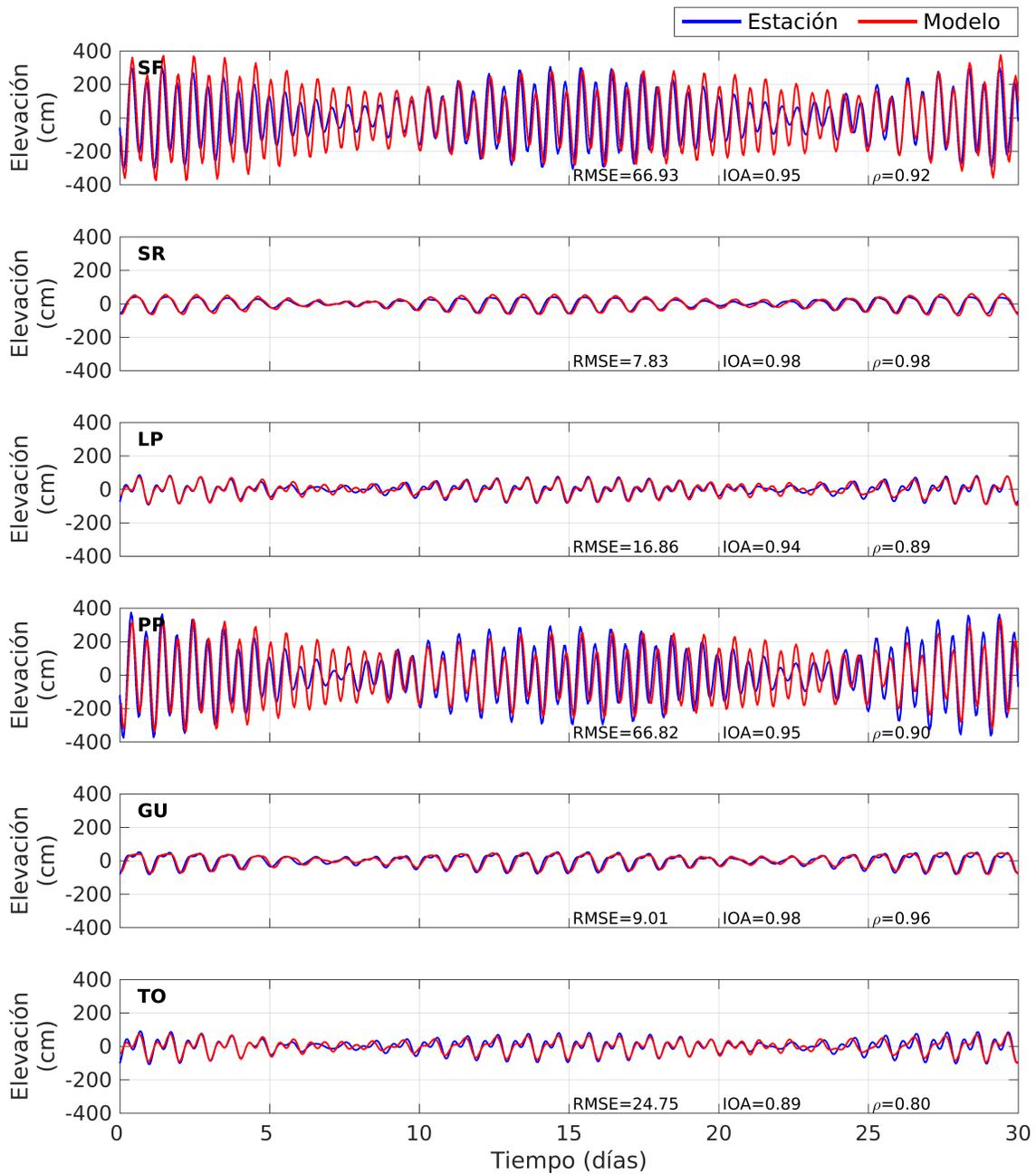


Figura 3.1: Validación de datos de salida del modelo numérico. Cálculo del error cuadrático medio (RMSE), índice de acuerdo (IOA) y coeficiente de correlación (ρ).

Para continuar con la validación de los datos de salida del modelo ROMS, se realizó un análisis armónico con los datos de elevación del nivel del mar provenientes del modelo numérico. Este análisis armónico se realizó en puntos cercanos a las 6 estaciones mareográficas mencionadas anteriormente, con datos correspondientes a un periodo de 1 año. Los resultados del análisis armónico arrojan información sobre amplitud y fase de cada uno de los componentes armónicos de marea de mayor influencia en cada estación mareográfica. Las amplitudes y fases obtenidas a partir de los datos del modelo a través del análisis armónico se compararon con los datos mostrados en las Tablas 3.1 y 3.2 que, como se vio anteriormente, fueron generados a partir de mediciones en cada estación mareográfica.

En San Felipe (Tabla 3.3) las diferencias de amplitud tienen un rango de -38.75 a -5.11 centímetros. En esta estación, las amplitudes del modelo son mayores a las amplitudes medidas; esto es, el modelo sobrestima las amplitudes en este sitio. En cuanto a las diferencias de las fases se encuentran en un rango entre 2.84 y 37.74 grados; en donde las fases del modelo son menores a las medidas, en todos los casos.

Tabla 3.3: Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en San Felipe, Baja California.

San Felipe, Baja California.						
Componente	Amplitud (cm)		Diferencia Amplitud	Fase (°)		Diferencia Fase
	Medición	Modelo		Medición	Modelo	
M2	165.20	203.95	-38.75	268.00	244.87	23.13
S2	96.80	111.35	-14.55	277.00	239.26	37.74
K1	40.00	48.07	-8.07	189.00	186.16	2.84
O1	24.50	29.61	-5.11	177.00	170.74	6.26

En Santa Rosalía (Tabla 3.4) las diferencias de amplitud tienen un rango de -2.66 a 1.62 centímetros. Las amplitudes del modelo para los armónicos semidiurnos son menores a las medidas y las amplitudes del modelo para los armónicos

diurnos son mayores a las medidas. En cuanto a las diferencias de las fases se encuentran en un rango entre -0.04 y 53.91 grados; esto es, 3 de las 4 fases del modelo son menores a las medidas.

Tabla 3.4: Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Santa Rosalía, Baja California Sur.

Santa Rosalía, Baja California Sur.						
Componente	Amplitud (cm)		Diferencia Amplitud	Fase (°)		Diferencia Fase
	Medición	Modelo		Medición	Modelo	
M2	6.80	5.18	1.62	191.00	191.04	-0.04
S2	5.30	4.39	0.91	140.00	86.09	53.91
K1	30.10	32.76	-2.66	183.00	180.42	2.58
O1	20.10	21.55	-1.45	171.00	165.26	5.74

En La Paz (Tabla 3.5) las diferencias de amplitud tienen un rango de -3.77 a -0.34 centímetros; las amplitudes del modelo son mayores a las medidas, lo que indica que el modelo sobrestima las amplitudes en este sitio. En cuanto a las diferencias de las fases se encuentran en un rango entre -140.14 y 128.22 grados; esto es, 5 de las 7 fases del modelo son menores a las medidas.

Tabla 3.5: Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en La Paz, Baja California Sur.

La Paz, Baja California Sur.						
Componente	Amplitud (cm)		Diferencia Amplitud	Fase (°)		Diferencia Fase
	Medición	Modelo		Medición	Modelo	
M2	23.90	26.27	-2.37	117.00	62.03	54.97
S2	17.90	19.49	-1.59	122.00	55.24	66.76
N2	5.00	5.34	-0.34	114.00	218.57	-104.57
K2	5.90	7.36	-1.46	118.00	258.14	-140.14
K1	25.00	28.77	-3.77	189.00	180.92	8.08
O1	17.10	19.38	-2.28	179.00	165.75	13.25
P1	8.10	8.52	-0.42	189.00	60.78	128.22

En Puerto Peñasco (Tabla 3.6) las diferencias de amplitud tienen un rango de -19.93 a 0.19 centímetros; esto es, 6 de las 7 amplitudes del modelo son mayores a las medidas, por lo que el modelo sobrestima las amplitudes en este sitio. En cuanto a las diferencias de las fases se encuentran en un rango entre 5.38 y 225.44 grados; las fases del modelo son menores a las medidas.

Tabla 3.6: Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Puerto Peñasco, Sonora.

Puerto Peñasco, Sonora.						
Componente	Amplitud (cm)		Diferencia Amplitud	Fase (°)		Diferencia Fase
	Medición	Modelo		Medición	Modelo	
M2	157.20	177.13	-19.93	262.00	231.83	30.17
S2	94.50	95.78	-1.28	269.00	224.84	44.16
N2	40.20	45.16	-4.96	250.00	24.56	225.44
K2	25.20	35.76	-10.56	273.00	67.31	205.69
K1	43.10	46.53	-3.43	186.00	179.82	6.18
O1	27.70	28.84	-1.14	170.00	164.62	5.38
P1	13.50	13.31	0.19	181.00	60.10	120.90

En Guaymas (Tabla 3.7) las diferencias de amplitud tienen un rango de -4.28 a 3.64 centímetros. Las amplitudes del modelo para los armónicos semidiurnos son menores a las medidas y las amplitudes del modelo para los armónicos diurnos son mayores a las medidas. En cuanto a las diferencias de las fases se encuentran en un rango entre -160.31 y 117.91 grados; esto es, 5 de las 7 fases del modelo son menores a las medidas.

Tabla 3.7: Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Guaymas, Sonora.

Guaymas, Sonora.						
Componente	Amplitud (cm)		Diferencia Amplitud	Fase (°)		Diferencia Fase
	Medición	Modelo		Medición	Modelo	
M2	13.60	9.96	3.64	155.00	133.23	21.77
S2	10.60	8.94	1.66	137.00	89.91	47.09
N2	3.60	2.91	0.69	169.00	315.74	-146.74
K2	3.50	3.46	0.04	132.00	292.31	-160.31
K1	27.90	32.18	-4.28	179.00	178.09	0.91
O1	18.60	21.23	-2.63	170.00	163.21	6.79
P1	9.30	9.48	-0.18	176.00	58.09	117.91

En Topolobampo (Tabla 3.8) las diferencias de amplitud tienen un rango de -3.00 a 2.48 centímetros; esto es, 4 de las 7 amplitudes del modelo son menores a las medidas. En cuanto a las diferencias de las fases se encuentran en un rango entre -120.58 y 138.73 grados; esto es, 5 de las 7 fases del modelo son menores a las medidas.

Tabla 3.8: Análisis armónico de elevación entre datos del mareógrafo y datos del modelo en Topolobampo, Sinaloa.

Topolobampo, Sinaloa.						
Componente	Amplitud (cm)		Diferencia Amplitud	Fase (°)		Diferencia Fase
	Medición	Modelo		Medición	Modelo	
M2	30.00	27.52	2.48	141.00	70.72	70.28
S2	21.20	19.99	1.21	144.00	60.78	83.22
N2	6.50	5.82	0.68	144.00	229.57	-85.57
K2	6.80	7.55	-0.75	143.00	263.58	-120.58
K1	25.60	28.60	-3.00	193.00	177.31	15.69
O1	17.40	19.29	-1.89	180.00	162.56	17.44
P1	8.70	8.47	0.23	196.00	57.27	138.73

Adicionalmente, el modelo se validó mediante análisis armónico utilizando datos de las componentes de la velocidad (u y v) a diferentes profundidades (100 y 200 m) en un punto específico. El análisis armónico de u y v se realizó por separado. Se utilizaron los datos que provienen de la malla fina (MF) y corresponden al periodo de 30 días seleccionado. De los análisis armónicos se obtuvieron constantes armónicas (amplitudes y fases) de las componentes de la velocidad (u y v) en un punto específico del GC, estos resultados se compararon con resultados publicados de análisis armónico aplicado a mediciones realizadas cerca de Isla San Lorenzo (Marinone Moschetto, 2000). Se debe señalar que el punto donde fueron realizadas las mediciones y el punto de donde se extrajeron los datos del modelo ROMS son cercanos, pero no son exactamente los mismos, ya que, en la investigación citada, no se reportan las coordenadas del sitio de medición. Por otra parte, dicha investigación, solamente reporta los componentes M2 y K1 del análisis armónico, por lo que la comparación se restringe a dichos componentes.

En la Tabla 3.9 se muestran las comparaciones correspondientes al armónico de marea M2 entre constantes armónicas provenientes del modelo numérico y de mediciones. Las constantes armónicas provienen del análisis armónico de u y v a 2 profundidades. Para la variable u las diferencias de amplitud tienen un rango de -8.01 a -5.00 cm/s ; esto es, las amplitudes del modelo son mayores. En cuanto a las diferencias de fase se encuentran en un rango entre -28.80 y -1.71 grados; esto es, las fases del modelo son mayores a las medidas. Para la variable v las diferencias de amplitud se estiman en un rango de 9.09 a 12.09 cm/s , con lo cual se aprecia que las amplitudes del modelo son menores. Con respecto a las diferencias de fase se encuentran en un rango entre -10.07 y 17.27 grados; esto es, 1 de las 2 fases del modelo es mayor a la medida.

Tabla 3.9: Análisis armónico de componentes de velocidad entre datos del modelo ROMS y medidos (M2).

M2						
u						
Profundidad	Amplitud (cm/s)			Fase (°)		
	Medición	Modelo	Diferencia	Medición	Modelo	Diferencia
100	22.80	30.81	-8.01	248.60	277.40	-28.80
200	25.90	30.90	-5.00	275.70	277.41	-1.71
v						
Profundidad	Amplitud (cm/s)			Fase (°)		
	Medición	Modelo	Diferencia	Medición	Modelo	Diferencia
100	35.90	26.81	9.09	111.40	94.13	17.27
200	38.90	26.81	12.09	84.30	94.37	-10.07

En la Tabla 3.10 se muestran las comparaciones correspondientes al armónico de marea K1 entre constantes armónicas provenientes del modelo numérico y de mediciones. Las constantes armónicas provienen del análisis armónico de u y v a 2 profundidades. Para la variable u las diferencias de amplitud tienen un rango de -3.51 a -0.53 cm/s ; esto es, las amplitudes del modelo son mayores. En cuanto a las diferencias de fase se encuentran en un rango entre 88.86 y 99.98 grados; esto es, las fases del modelo son menores a las medidas. Para la variable v las diferencias de amplitud se estiman en un rango de -1.45 a 3.16 cm/s , con lo cual se aprecia que 1 de las 2 amplitudes del modelo es mayor. Con respecto a las diferencias de fase se encuentran en un rango entre -264.09 y 88.23 grados, esto es, 1 de 2 fases del modelo es mayor a la medida.

Tabla 3.10: Análisis armónico de componentes de velocidad entre datos del modelo ROMS y medidos (K1).

K1						
u						
Profundidad	Amplitud (cm/s)			Fase (°)		
	Medición	Modelo	Diferencia	Medición	Modelo	Diferencia
100	2.80	6.31	-3.51	181.80	81.82	99.98
200	5.30	5.83	-0.53	170.40	81.54	88.86
v						
Profundidad	Amplitud (cm/s)			Fase (°)		
	Medición	Modelo	Diferencia	Medición	Modelo	Diferencia
100	8.30	5.14	3.16	3.30	267.39	-264.09
200	3.60	5.05	-1.45	352.00	263.77	88.23

Finalmente, de la discusión anterior, se pudo constatar mediante el cálculo de los diversos coeficientes mencionados y de los análisis referidos, que los datos generados mediante el modelo ROMS para este estudio reproducen de forma confiable el comportamiento del GC, por lo que se puede continuar con la caracterización del sitio.

3.2. Caracterización del Golfo de California

La caracterización del GC se realizó mediante diversos cálculos en toda su extensión y después en puntos específicos del mismo. La caracterización se basó en su mayoría en datos correspondientes a un periodo de 30 días, provenientes de la modelación numérica desarrollada en ROMS. El periodo completo modelado (365 días) se utilizó únicamente para calcular la energía anual acumulada. En la Figura 3.2 se muestra la elevación en las 6 estaciones mareográficas, lo que permite observar el comportamiento de la marea en el periodo mayormente

te utilizado para el análisis. Cabe señalar que se utilizó un periodo de 30 días debido a que la marea tiene un periodo menor, y por lo tanto es suficiente para cumplir con los fines de este estudio.

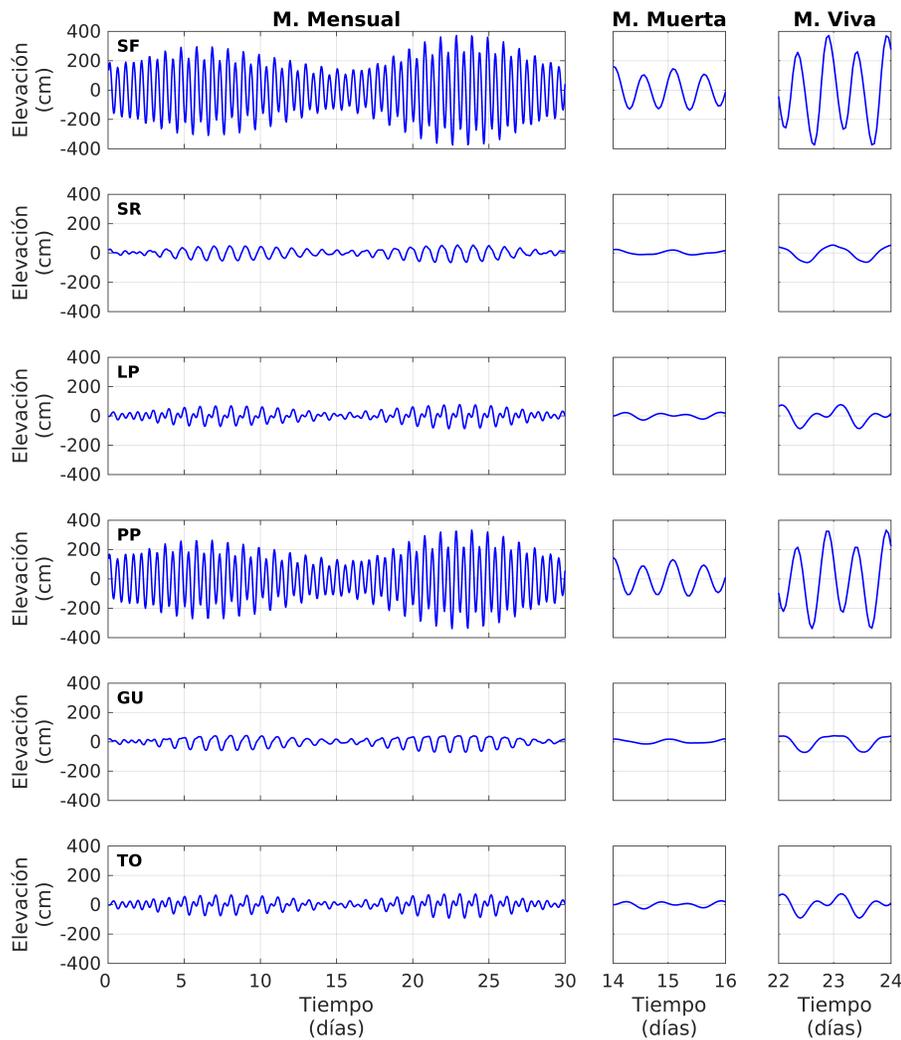


Figura 3.2: Datos de salida del modelo numérico (marea mensual). Los datos corresponden al periodo seleccionado para el análisis en las ubicaciones de las estaciones mareográficas.

El primer paso para caracterizar el GC fue el cálculo de la rapidez promedio mensual, a diferentes profundidades (5, 10, 20, 30, 40, 50, 75 y 100 *m*), utilizando las variables *u* y *v* provenientes de los datos de salida del modelo ROMS. Esto con el objetivo de proseguir con el cálculo de la densidad de potencia por marea (TPD) en la región de estudio. Las Figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 exhiben los valores obtenidos de rapidez promedio mensual a diferentes profundidades para el GC en su totalidad (A y C) y para un acercamiento a la zona de mayor interés (B Y D).

En la Figura 3.3 a 5 *m* de profundidad (A y B), se presentan valores de rapidez promedio mensual superiores a 0.50 *m/s*, en el Alto Golfo de California (AGC) y en la Región de las Grandes Islas (RGI). A partir, de los 28°N de latitud hacia el sur se presentan valores mínimos de rapidez. A 10 *m* de profundidad (C y D) en el AGC decrecen las zonas con valores de rapidez promedio mensual superiores a 0.50 *m/s*, pero se mantienen en la RGI. También se debe resaltar que a 10 *m* de profundidad comienzan a presentarse regiones en color blanco, lo cual indica ausencia de datos debido a la batimetría del lugar.

En la Figura 3.4 a 20 *m* de profundidad (A y B), se dejan de presentar valores de rapidez promedio mensual superiores a 0.50 *m/s*, en el AGC pero se mantienen en la RGI. A excepción, del Estrecho del Infiernillo donde decrece el área. A 30 *m* de profundidad (C y D), en el AGC la ausencia de datos de rapidez promedio mensual superiores a 0.50 *m/s* es prácticamente total, pero la RGI se mantiene igual; a excepción nuevamente del Estrecho del Infiernillo el cual presenta valores inferiores a 0.25 *m/s*.

Las Figuras 3.5 y 3.6 muestran la rapidez promedio mensual a 40, 50, 75 y 100 *m* de profundidad. Los datos de rapidez promedio mensual en el AGC son menores a 0.30 *m/s*, en la RGI permanecen sin cambios y el Estrecho del Infiernillo carece de datos.

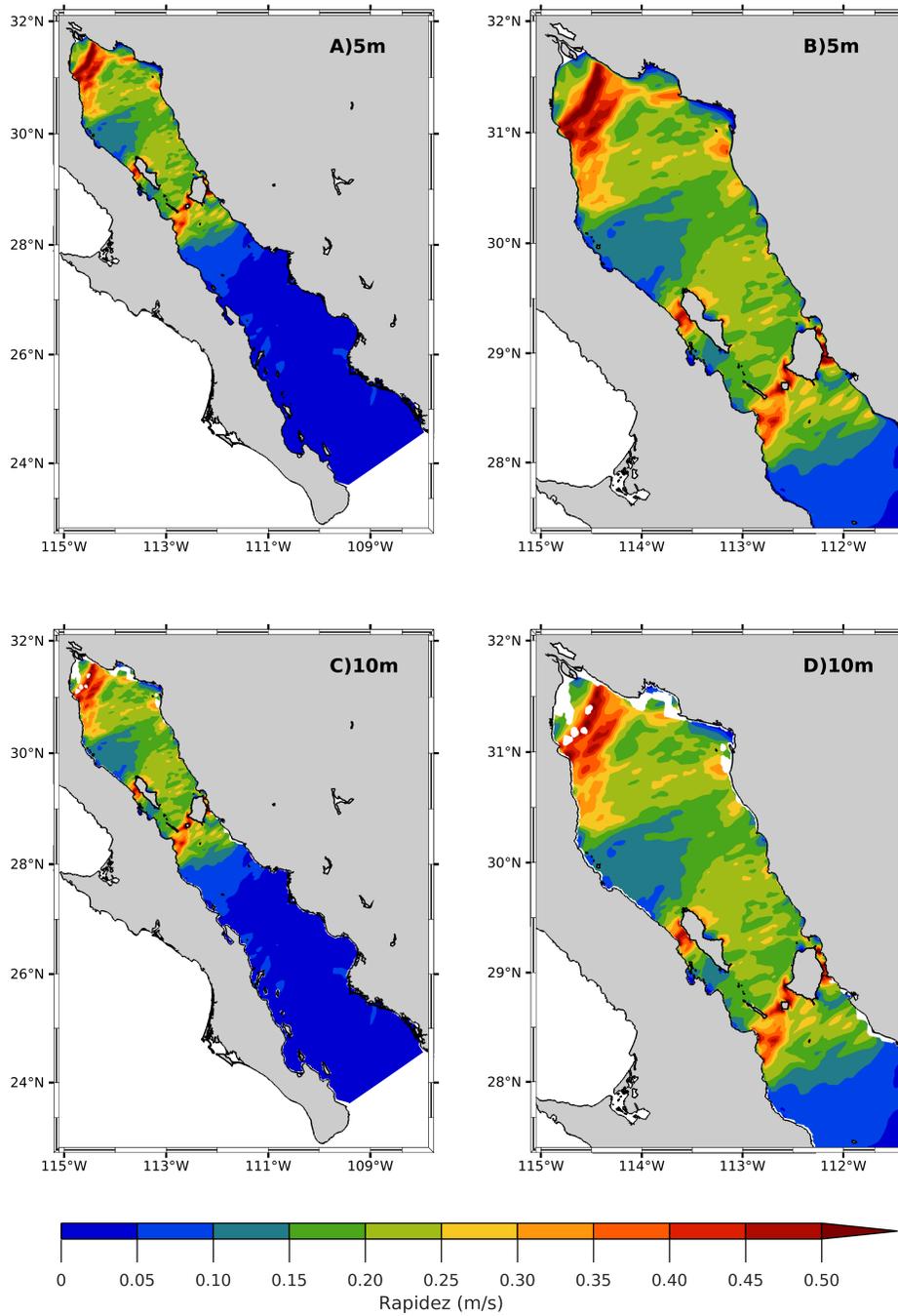


Figura 3.3: Rapidez promedio mensual a 5 y 10 m de profundidad.

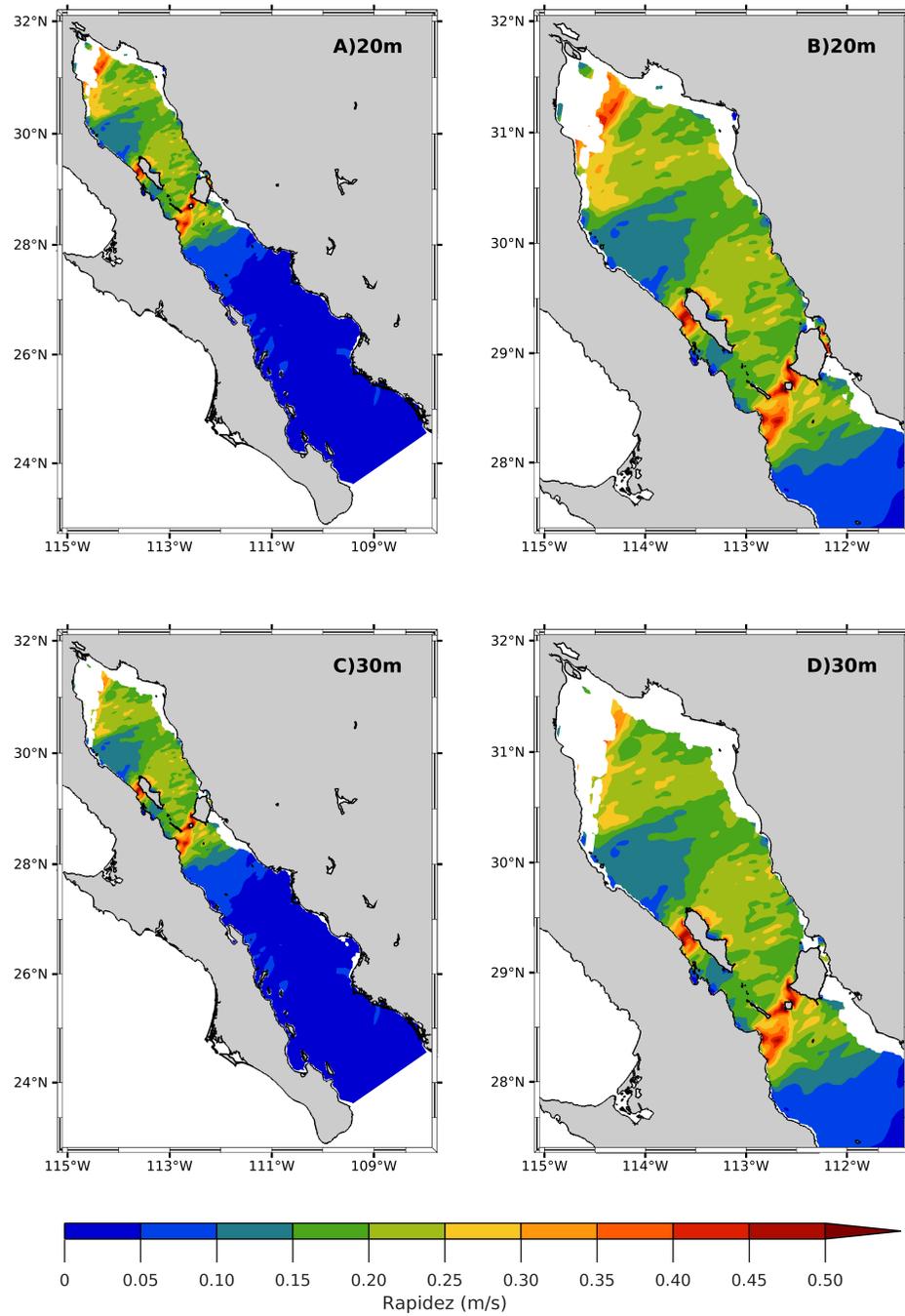


Figura 3.4: Rapidez promedio mensual a 20 y 30 m de profundidad.

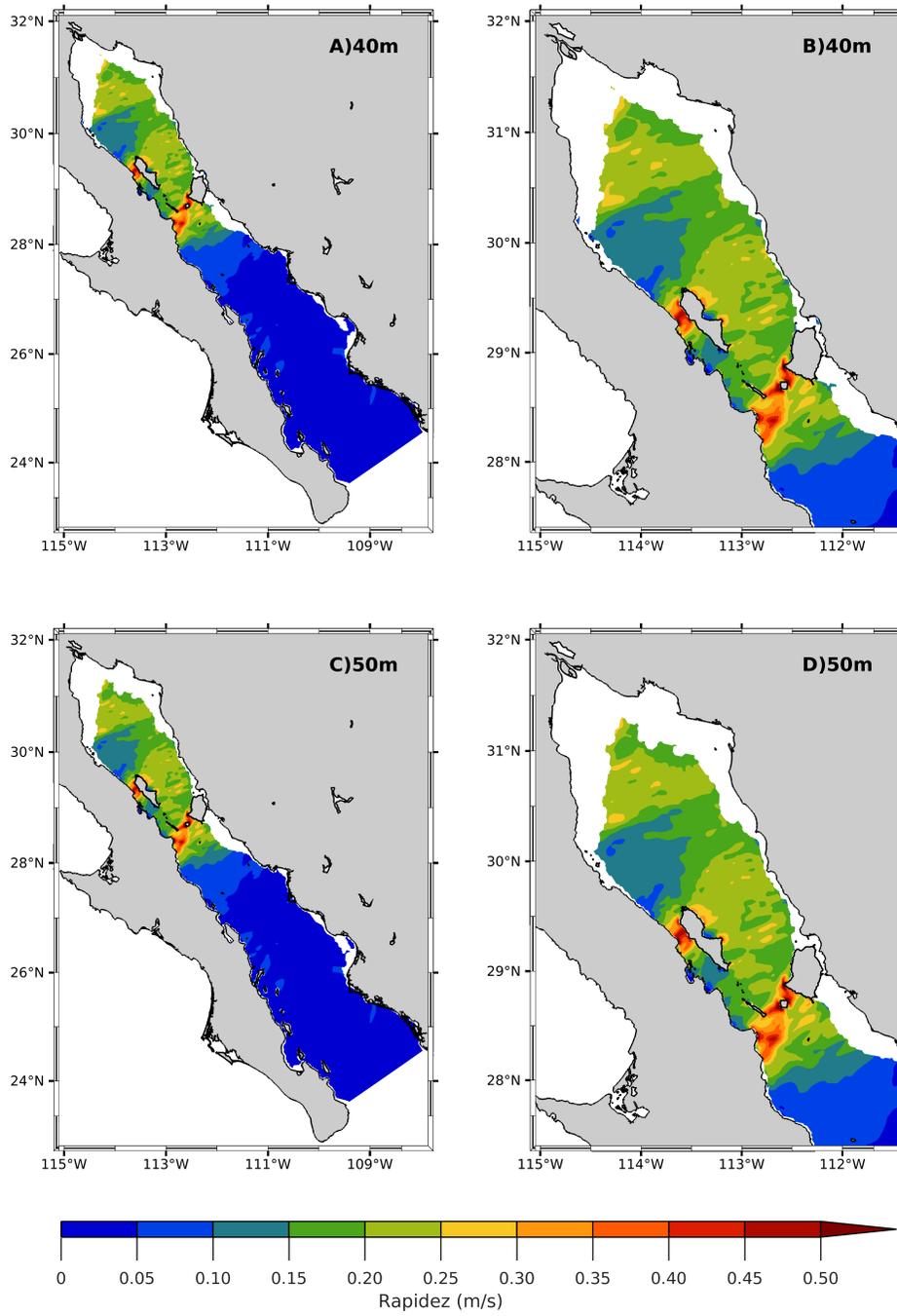


Figura 3.5: Rapidez promedio mensual a 40 y 50 m de profundidad.

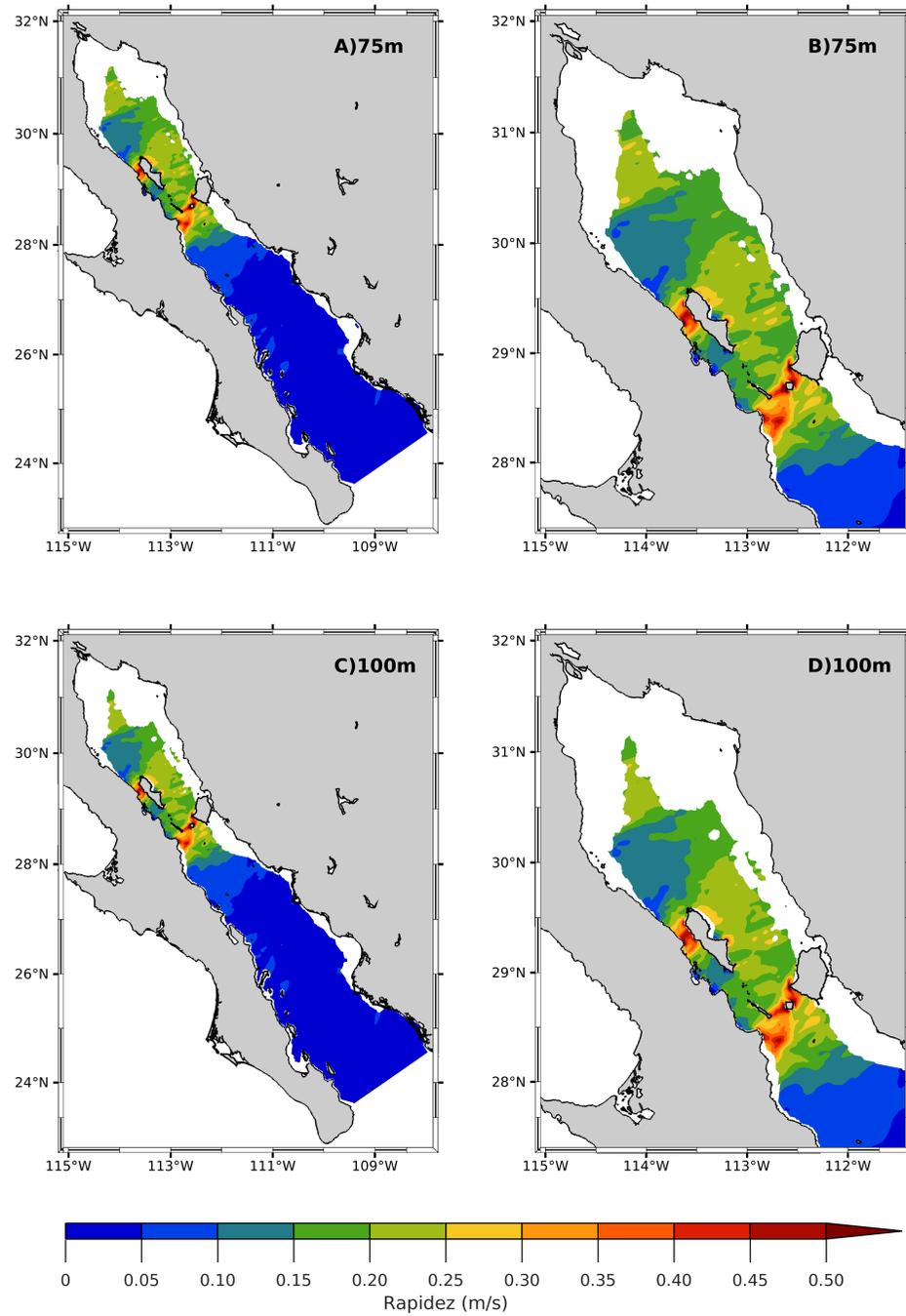


Figura 3.6: Rapidez promedio mensual a 75 y 100 m de profundidad.

Para continuar con la caracterización del GC se procede con el cálculo de la densidad de potencia por marea (TPD); ésta se calculó como el promedio mensual a varias profundidades utilizando los cálculos horarios de rapidez. Se debe mencionar también que las gráficas a partir de este punto muestran el golfo de forma parcial debido a que en las gráficas de rapidez promedio mensual no se encontraron valores superiores a 0.5 m/s al sur de los 28°N de latitud, por lo que se descartó esa región.

En la Figura 3.7 se muestra el TPD a 5, 10, 20 y 30 m de profundidad. En esta gráfica se identifica que las mismas regiones en las cuales se presentaron valores de rapidez promedio mensual superiores a 0.5 m/s son las que presentan valores de más de 60 W/m^2 , con la diferencia que las regiones se amplían. En el AGC los valores superiores a 60 W/m^2 se presentan hasta una profundidad de 20 m . En la RGI, se identifican 5 zonas en las cuales el TPD supera los 60 W/m^2 a varias profundidades. La zona 1, es entre Baja California e Isla Ángel de la Guarda, la zona 2, es al sur de Isla San Lorenzo, la zona 3, es entre Isla San Lorenzo e Isla San Esteban, la zona 4, es entre Isla San Esteban e Isla Tiburón y la zona 5, es entre Isla Tiburón y Sonora (Estrecho del Infiernillo). Las zonas 1, 2, 3, y 4 mantienen su TPD prácticamente sin cambios hasta los 30 m de profundidad. La zona 5 disminuye su extensión a partir de los 20 m de profundidad, de modo que al llegar a los 30 m de profundidad presenta en su mayoría valores menores a 12 W/m^2 .

En la Figura 3.8 se muestra el TPD a 40, 50, 75 y 100 m de profundidad. En la gráfica se observa que en el AGC a estas profundidades hay ausencia de datos debido a la batimetría o magnitudes de TPD cercanas a cero. En la RGI la zona 1, 2, 3, y 4 mantienen su extensión y magnitud sin importar la profundidad. La zona 5 carece de datos debido a la batimetría.

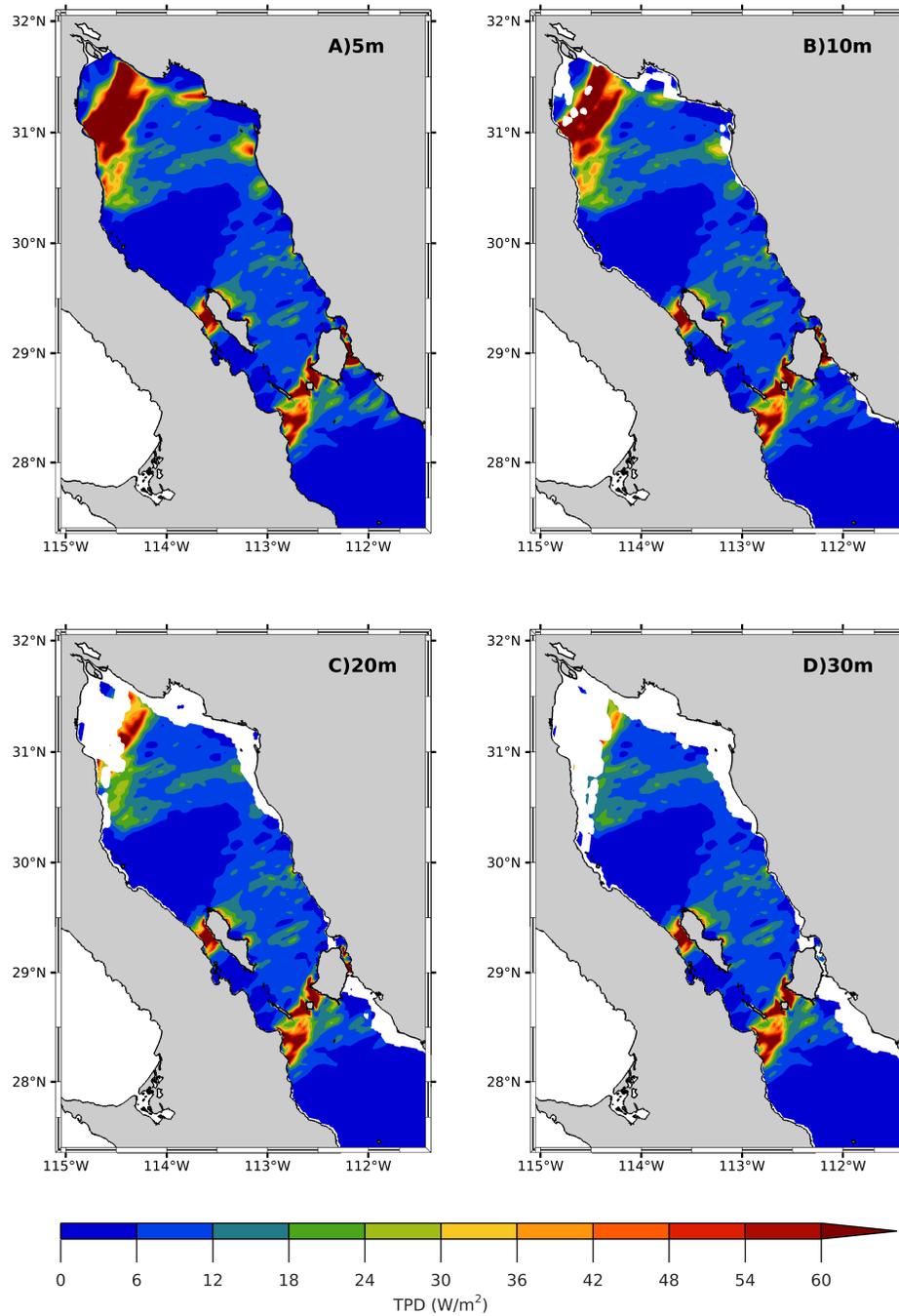


Figura 3.7: TPD promedio mensual a 5,10,20 y 30 m de profundidad.

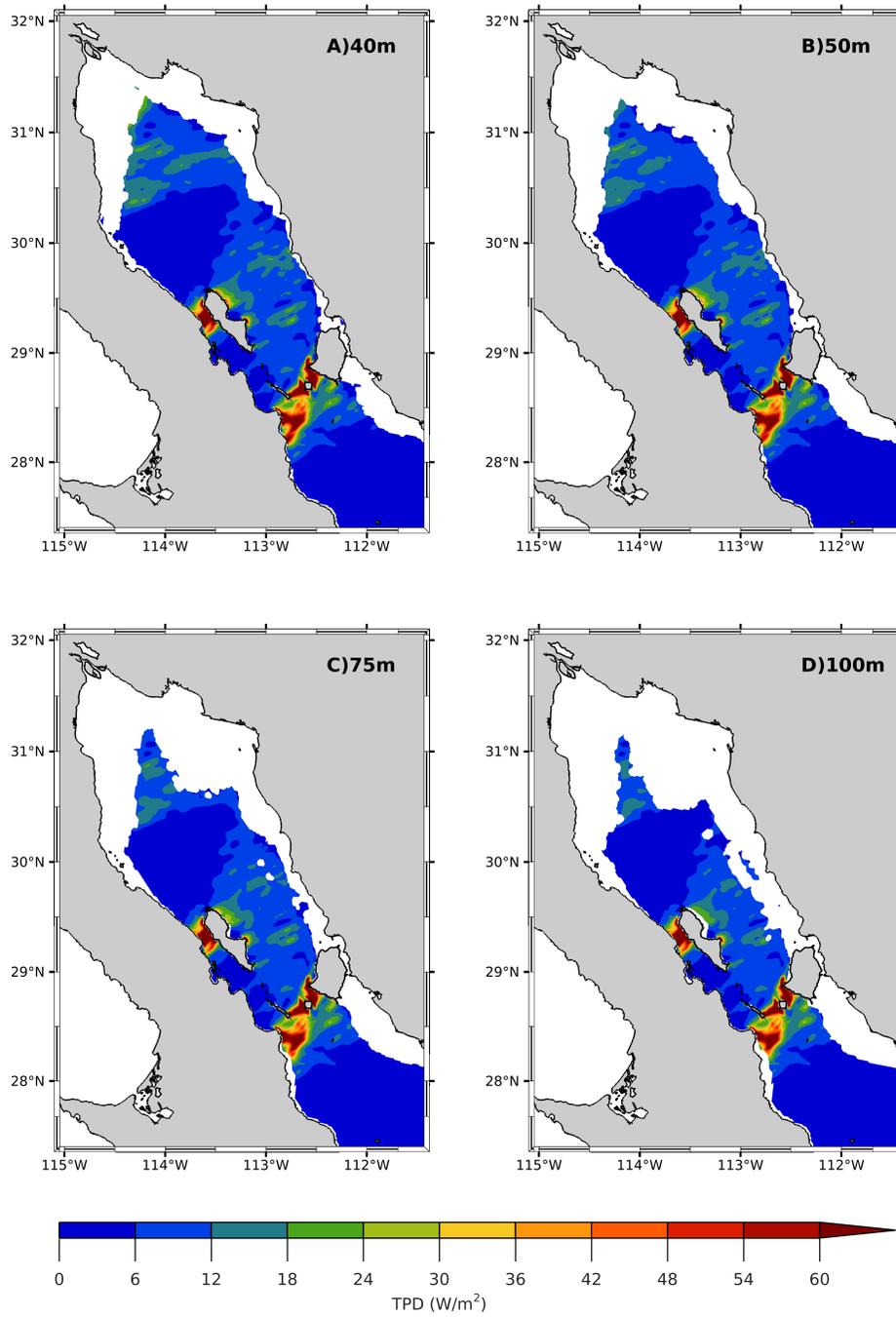


Figura 3.8: TPD promedio mensual a 40,50,75 y 100 m de profundidad.

Para seguir con la caracterización del GC se realizó el cálculo del tiempo por encima del umbral (TAT, por sus siglas en inglés). Con el TAT se calculó el porcentaje de tiempo de los 30 días que el TPD es igual o mayor a un umbral seleccionado ($60 W/m^2$). Para este cálculo se utilizaron los datos de TPD en forma horaria pertenecientes a los datos seleccionados para la caracterización del golfo.

En la Figura 3.9 se muestra el TAT a 5, 10, 20 y 30 *m* de profundidad. En la figura se identificó nuevamente el AGC y la RGI como las zonas donde se presentan los valores máximos de la variable en cuestión. A 5 *m* de profundidad (A) en el AGC se presenta una extensa área que supera el 70 % y alcanza el 90 % de TAT. En la RGI se identifican las 5 zonas que se mencionaron en el cálculo de TPD como las zonas con valores máximos; a esta profundidad se alcanzan valores de hasta 90 % de TAT. A una profundidad de 10 *m* (B) en el AGC el área decrece y se reducen los valores, hasta alcanzar 80 % de TAT en zonas muy específicas. En la RGI el área y los valores alcanzados son similares a la profundidad anterior, a excepción de la zona 5 donde el área y los valores decrecen. Para los 20 *m* de profundidad (C) en el AGC se reduce el área y se obtienen valores de hasta 50 % de TAT. En la RGI se sigue manteniendo el área y los valores similares a los anteriores, a excepción nuevamente de la zona 5 en la cual el área y los valores siguen decreciendo. Al llegar a los 30 *m* de profundidad (D) en el AGC los valores de TAT alcanzan el 30 %. En la RGI los valores de TAT decrecen hasta alcanzar valores de 70 % de TAT en la zona 1, 2, 3, y 4; en la zona 5 los valores son menores al 10 % de TAT.

En la Figura 3.10, se muestra el TAT a 40, 50, 75 y 100 *m* de profundidad. En la figura se observa que en el AGC los valores de TAT son menores al 10 % a todas estas profundidades. En la RGI, a 40 y 50 *m* de profundidad (A y B) las zonas 1 y 2 alcanzan valores de 60 % de TAT. En las zonas 3 y 4 se observan valores de hasta 90 % de TAT. A 75 *m* de profundidad (C) los valores de TAT se incrementan un 10 % en la zona 1, 2, 3, y 4. En cambio, a 100 *m* de profundidad (D) los valores de TAT disminuyen, en la zona 1 y 2 a 50 %, y en la zona 3 y 4 a 70 %. La zona 5 carece de datos en estas 4 profundidades.

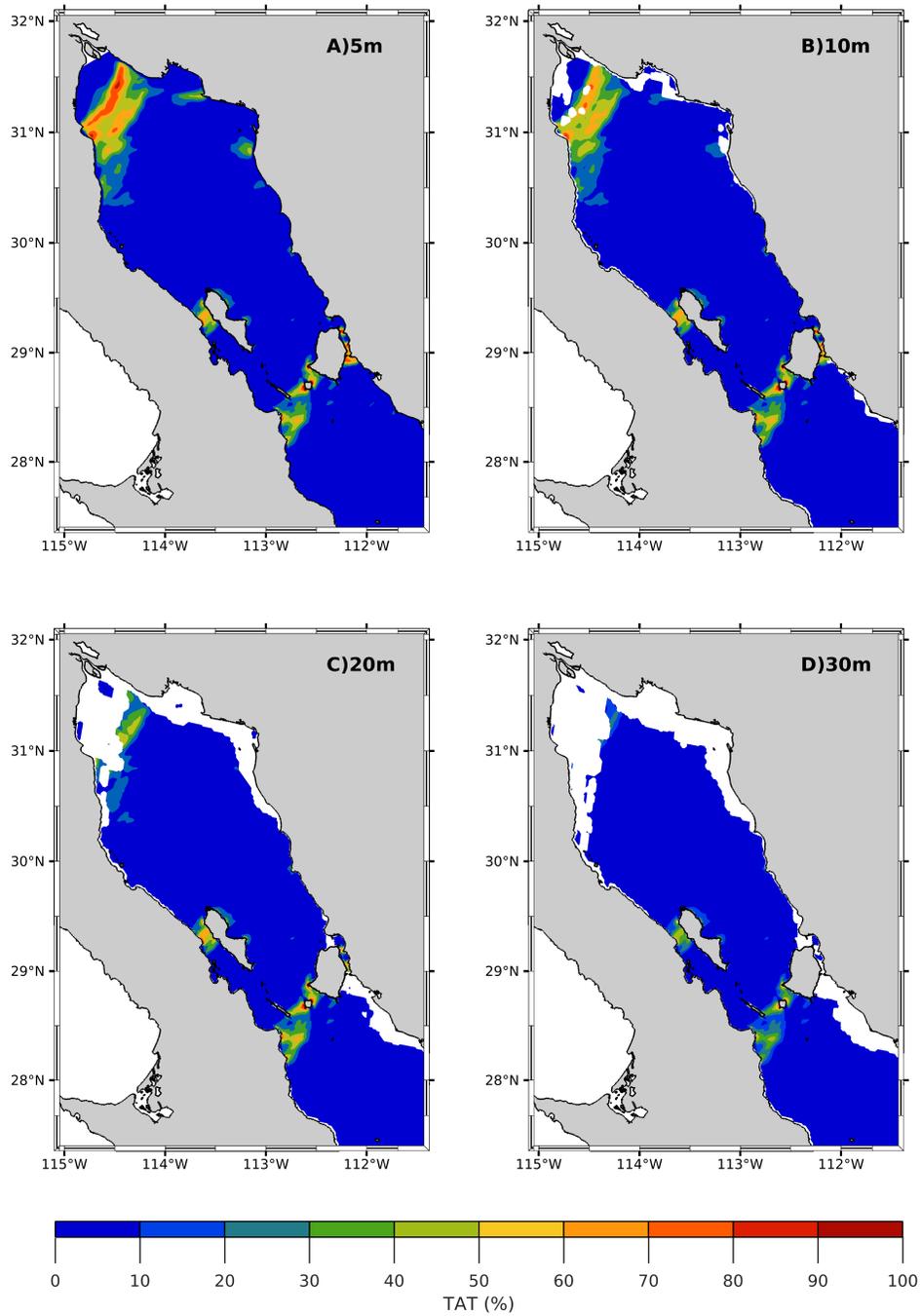


Figura 3.9: TAT respecto a $60 W/m^2$ en 5,10,20 y 30 m de profundidad.

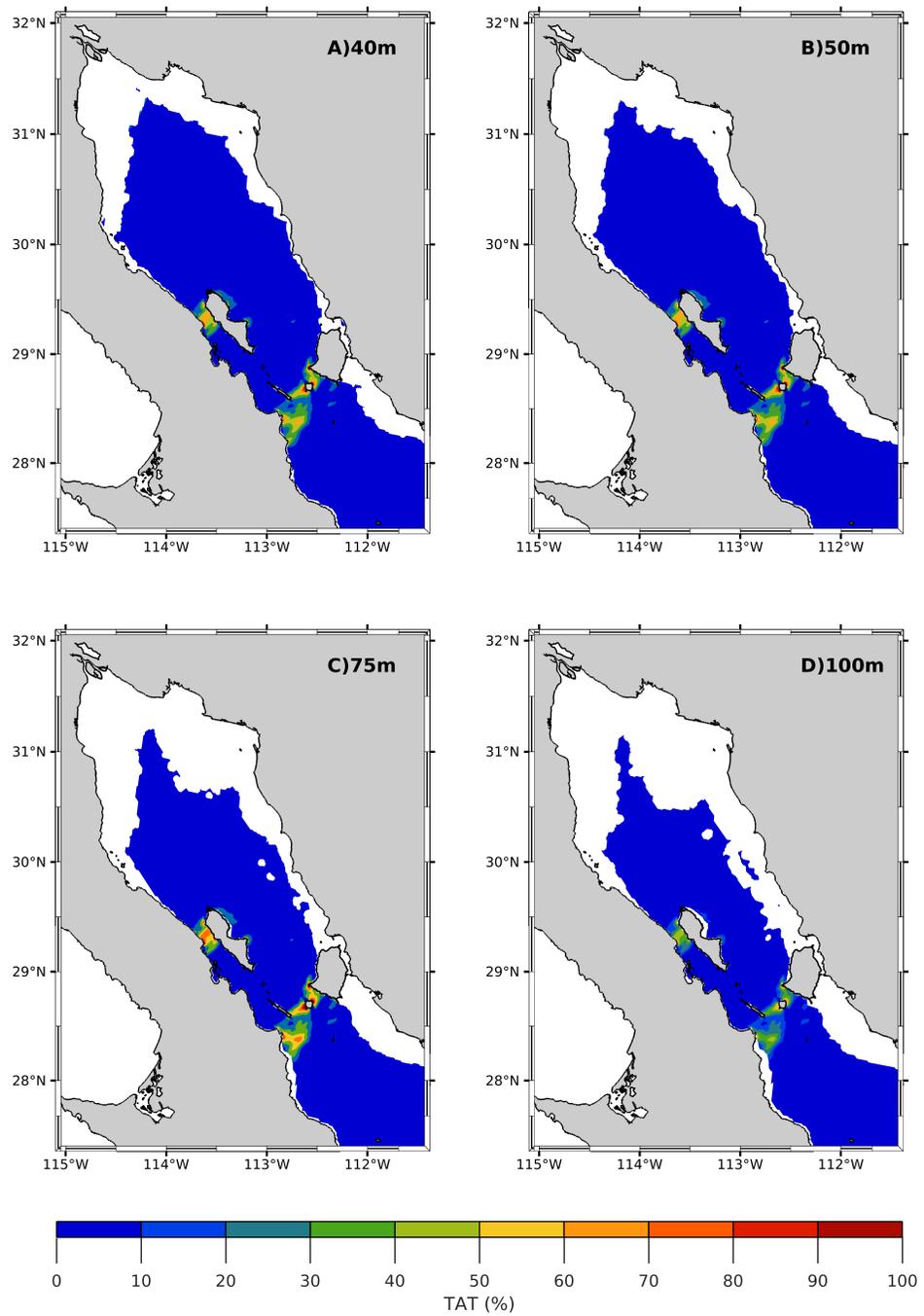


Figura 3.10: TAT respecto a $60 W/m^2$ en 40,50,75 y 100 m de profundidad.

Para proseguir con la caracterización del GC, se realizó el cálculo de la energía mensual acumulada a diferentes profundidades. Para realizar el cálculo, se utilizaron los datos de TPD calculados de forma horaria en el periodo de 30 días seleccionados para el estudio. Se debe resaltar que se utilizaron los datos de la MG y MF para realizar los cálculos y figuras.

En la Figura 3.11, se presenta la energía mensual acumulada a 5, 10, 20, 30 y 40 *m* de profundidad. A 5 *m* de profundidad (A), en el AGC se alcanzan valores superiores a 100 *kWh/m²* en una extensa región. En la RGI, se superan de igual manera los 100 *kWh/m²* en las 5 zonas identificadas anteriormente. A 10 *m* de profundidad (B), en el AGC se superan los 100 *kWh/m²* pero disminuye el área. En la RGI, se vuelven a superar los 100 *kWh/m²* en las 5 zonas. Para los 20 *m* de profundidad (C), en el AGC disminuye el área y la energía acumulada mensual a un máximo de 60 *kWh/m²*. En la RGI, las 5 zonas exceden los 100 *kWh/m²* pero disminuye el área de la zona 5. Finalmente, a 30 *m* de profundidad (D) en el AGC se alcanzan los 50 *kWh/m²* de manera muy localizada. En la RGI, la zona 1, 2, 3, y 4 superan los 100 *kWh/m²*, pero en la zona 5 únicamente se alcanzan los 10 *kWh/m²*.

En la Figura 3.12, se presenta la energía mensual acumulada a 40, 50, 75 y 100 *m* de profundidad. En el AGC, a estas 4 profundidades los datos aún presentes alcanzan valores máximos de 20 *kWh/m²*. En la RGI, las zonas 1, 2, 3, y 4 son las que cuentan con datos; en ellas se superan los 100 *kWh/m²* a las 4 profundidades.

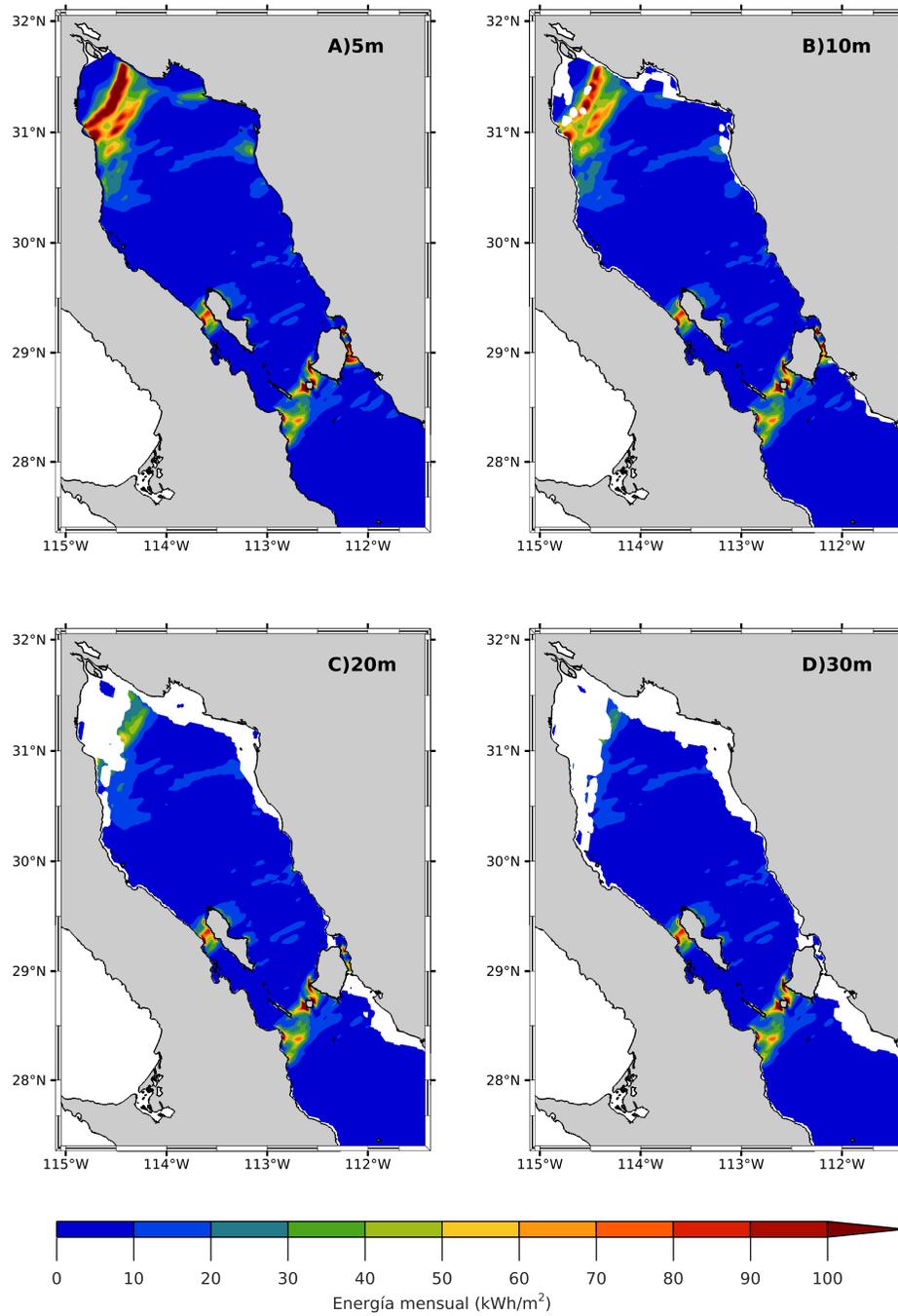


Figura 3.11: Energía mensual a 5,10,20 y 30 m de profundidad.

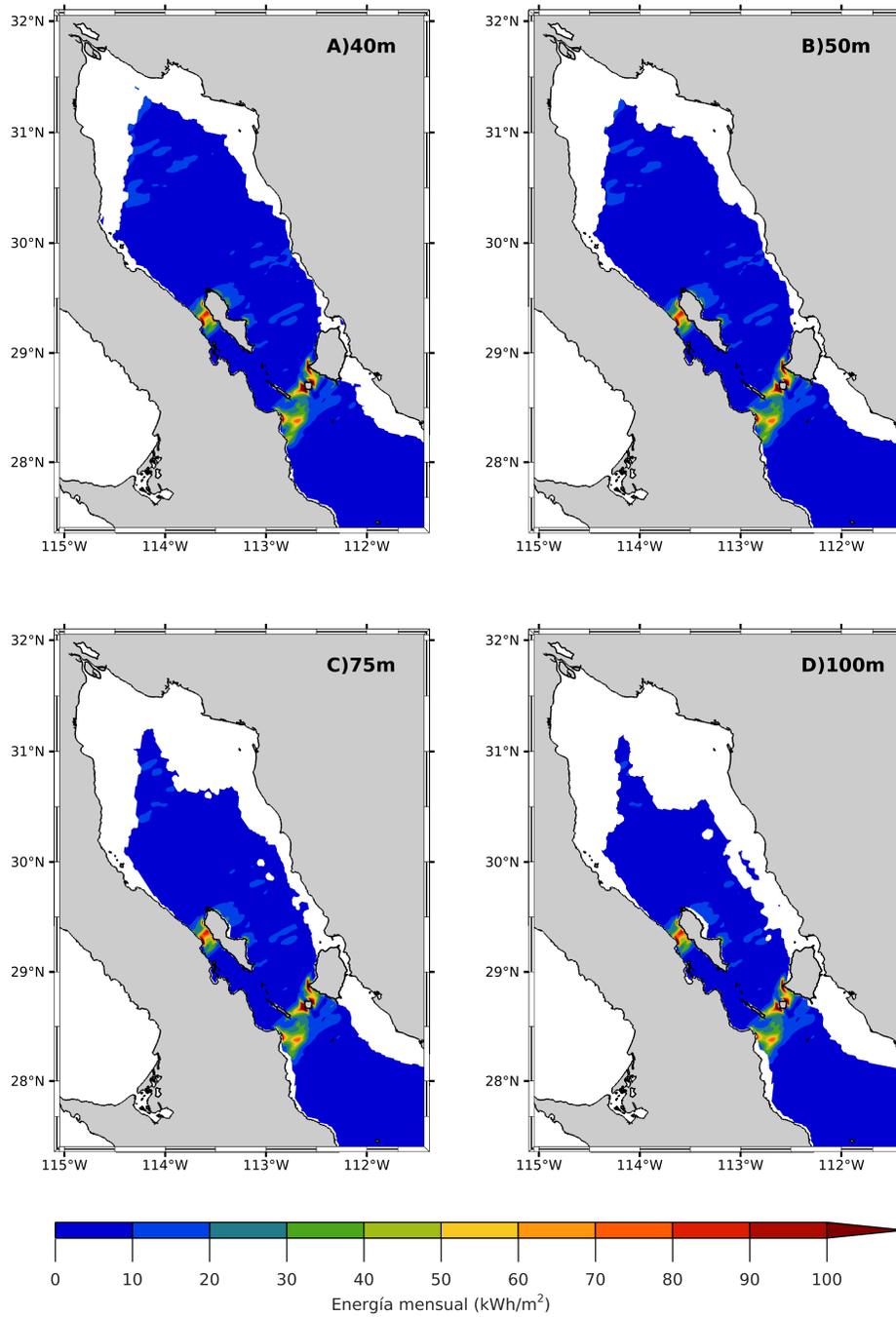


Figura 3.12: Energía mensual a 40,50,75 y 100 m de profundidad.

Como parte de la caracterización del GC, también se calculó la energía anual acumulada a diferentes profundidades. El cálculo se realizó con los datos de TPD horarios del año modelado en ROMS.

En la Figura 3.13, se presenta la energía anual acumulada a 5, 10, 20 y 30 *m* de profundidad. A 5 *m* de profundidad (A), en el AGC se presenta una extensa región que supera los 1000 *kWh/m²*. En la RGI, las zonas 1, 2, 3, 4 y 5 también superan los 1000 *kWh/m²*. Para los 10 *m* de profundidad (B), en el AGC la región con valores superiores a 1000 *kWh/m²* disminuye. En la RGI, las zonas 1, 2, 3 y 4 permanecen iguales pero la zona 5 disminuye su extensión. A 20 *m* de profundidad (C), en el AGC se alcanzan valores máximos de 900 *kWh/m²*. En la RGI, las 5 zonas superan los 1000 *kWh/m²* pero sigue la disminución en extensión del área 5. Al alcanzar los 30 *m* de profundidad (D) el AGC alcanza valores máximos de 500 *kWh/m²*. En la RGI, las zonas 1, 2, 3 y 4 superan los 1000 *kWh/m²*, la zona 5 se alcanza los 400 *kWh/m²* en puntos específicos.

En la Figura 3.14, se muestra la energía anual acumulada a 40, 50, 75 y 100 *m* de profundidad. En el AGC, se obtienen valores máximos de 200 *kWh/m²* a estas profundidades. En la RGI, se superan los 1000 *kWh/m²* en las zonas 1, 2, 3 y 4; estas zonas mantienen extensiones similares al variar la profundidad. La zona 5 carece de datos a estas profundidades.

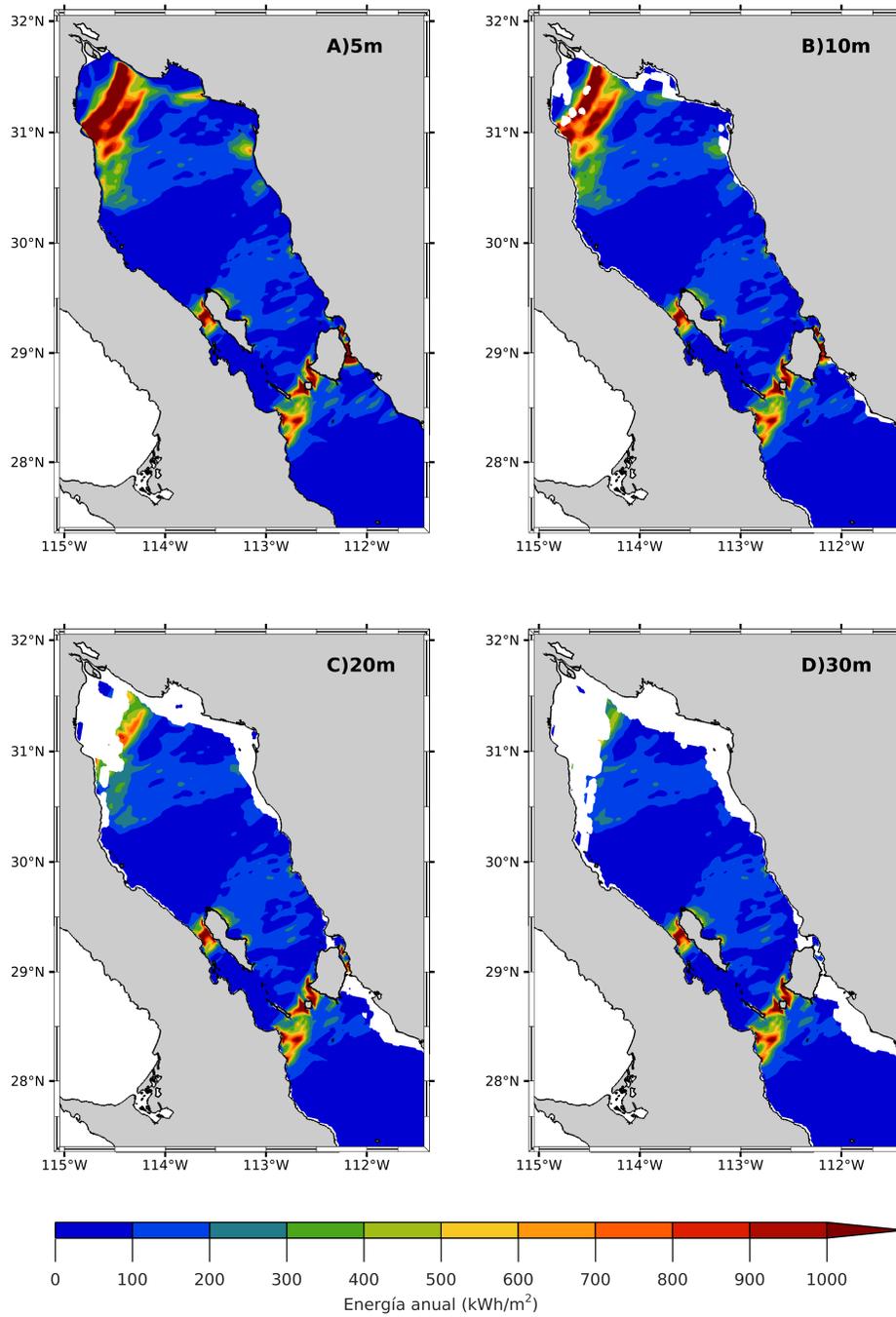


Figura 3.13: Energía anual a 5,10,20 y 30 m de profundidad.

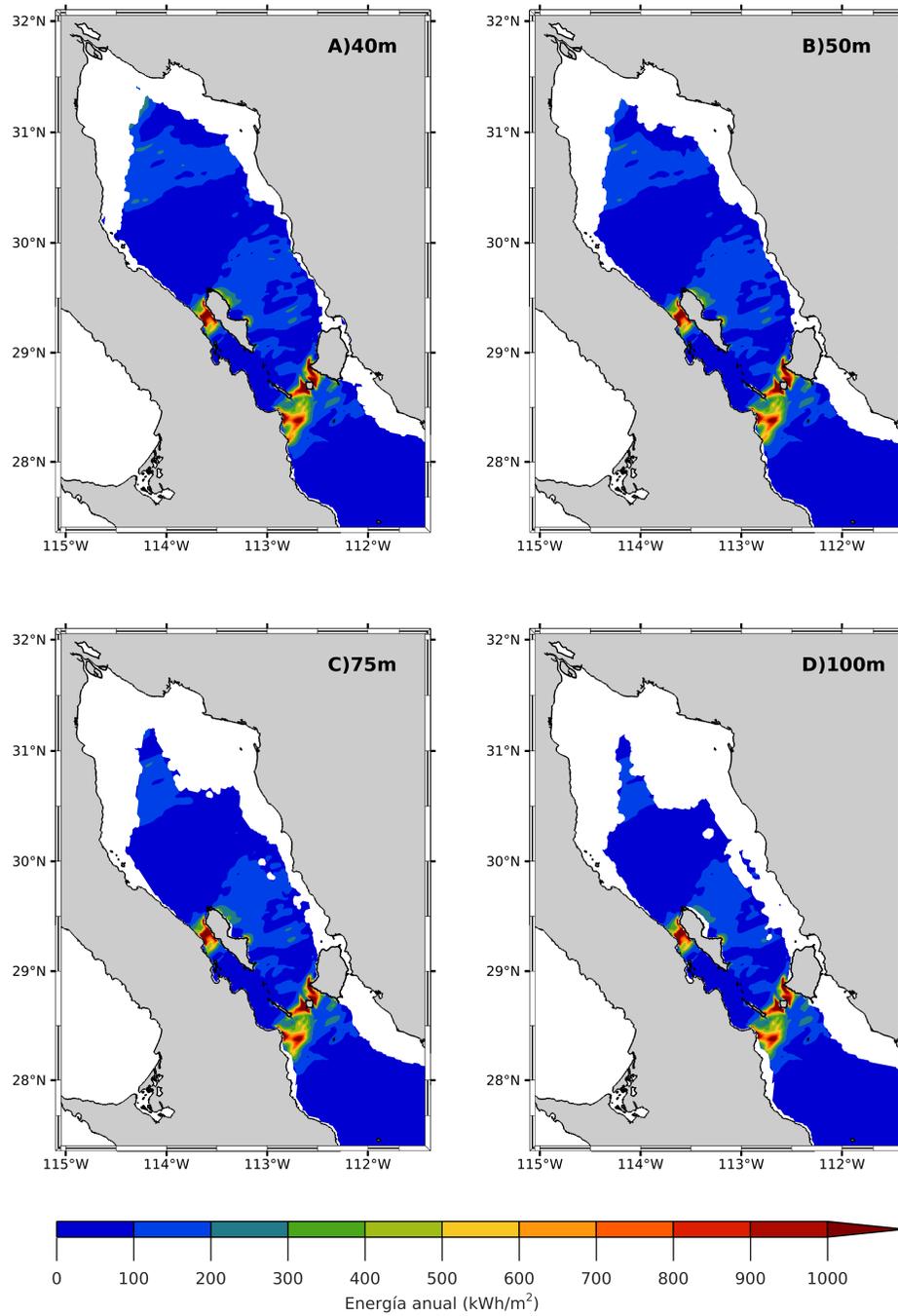


Figura 3.14: Energía anual a 40,50,75 y 100 m de profundidad.

Después de realizar el cálculo de rapidez promedio mensual, TPD, TAT, energía mensual acumulada y energía anual acumulada para el GC, se seleccionaron 6 puntos (Figura 3.15) para realizar un análisis puntual. Los puntos fueron seleccionados al observarse que en estos sitios se presentaron valores máximos de las distintas variables calculadas anteriormente. Las coordenadas de ubicación de los 6 puntos seleccionados para el muestreo se presentan en la Tabla 3.11.

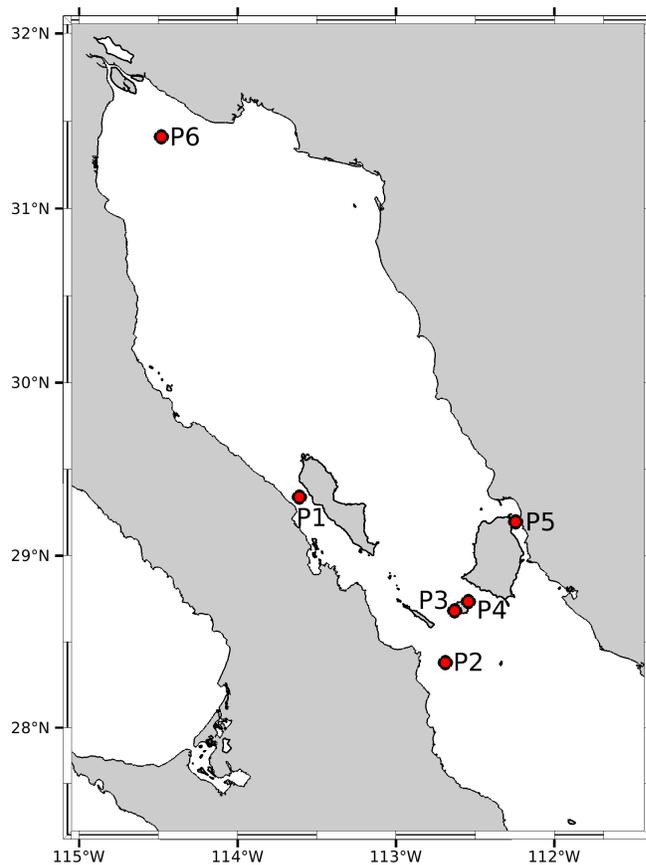


Figura 3.15: Puntos de interés para muestreo de corriente de marea.

Tabla 3.11: Puntos seleccionados para muestreo.

Ubicación de Puntos		
Punto	Longitud (°)	Latitud (°)
P 1	-113.610	29.340
P 2	-112.690	28.380
P 3	-112.630	28.680
P 4	-112.543	28.735
P 5	-112.245	29.195
P 6	-114.480	31.410

Luego de seleccionar los 6 puntos de muestreo en las zonas de interés, se procedió a caracterizar el flujo de la corriente de marea en estos puntos mediante el empleo de series temporales de datos provenientes del modelo ROMS para un periodo de 30 días. La caracterización del flujo, en los 6 puntos de interés se realizó al calcular rapidez, TPD, energía acumulada mensual y elipses de variabilidad, que caracterizan las principales direcciones del flujo a diferentes profundidades.

La Figura 3.16, muestra la caracterización del flujo en los 6 puntos a una profundidad de 5 m. La variable rapidez muestra que el P3 alcanza la mayor rapidez y llega a superar los 2 m/s en cierto momento. Le siguen el P6 con valores cercanos a 2 m/s, el P4 con valores superiores a 1.5 m/s y el P5 con valores arriba también de 1.5 m/s. En cuanto a la variable TPD, el P3 alcanza los 5 kW/m², el P6 supera los 4 kW/m², el P4 excede los 2 kW/m² y el P5 se aproxima a los 2 kW/m². Con respecto a la variable de energía acumulada, el P3 supera el 0.3 MWh/m², el P6 y P4 alcanzan el 0.2 MWh/m², el P5 excede el 0.15 MWh/m², y el P1 y P2 se aproximan al 0.1 MWh/m². Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 6 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor de los puntos P1, P2, P3, P4 y P6 se orientan en dirección NO-SE; en cuanto al P5 el eje mayor se orienta en dirección N-S.

La Figura 3.17, presenta la caracterización del flujo en los 6 puntos a una

profundidad de 10 *m*. En la variable rapidez, se observa que el P3 sobrepasa los 2 *m/s*; el P6, P4 y P5 exceden el 1.5 *m/s*. Con respecto a la variable TPD, el P3 alcanza los 5 *kW/m²*, el P6 y P4 superan los 2 *kW/m²*, y el P5 se aproxima a los 2 *kW/m²*. En cuanto a la variable de energía acumulada, el P3 llega al 0.3 *MWh/m²*, el P4 alcanza el 0.2 *MWh/m²*, el P5 se aproxima a 0.15 *MWh/m²*, el P6 supera el 0.1 *MWh/m²*, y P1 y P2 se acercan al 0.1 *MWh/m²*. Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 6 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor, de los puntos P1, P2, P3, P4 y P6 se orientan en dirección NO-SE; en cuanto al P5 el eje mayor se orienta en dirección N-S.

La Figura 3.18, muestra la caracterización del flujo en 5 puntos a una profundidad de 20 *m*. La falta de un punto, es debido a que el P6 ya no presenta información a causa de la batimetría del sitio. Con respecto a la variable rapidez, el P3 supera los 2 *m/s*, el P4 excede el 1.5 *m/s* y el P2 se aproxima a 1.25 *m/s*. La variable TPD, en el P3 se aproxima a los 5 *kW/m²*, el P4 supera los 2 *kW/m²* y el P2 llega a 1 *kW/m²*. En cuanto a la variable de energía acumulada, el P3 llega a 0.3 *MWh/m²*, el P4 se aproxima a 0.2 *MWh/m²* y, P1, P5 y P6 se acercan a 0.1 *MWh/m²*. Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 5 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor, de los puntos P1, P2, P3 y P4 se orientan en dirección NO-SE; en cuanto al P5 el eje mayor se orienta en dirección N-S.

La Figura 3.19, presenta la caracterización del flujo en 4 puntos a una profundidad de 30 *m*; nuevamente se descarta un punto (P5) debido a la batimetría del sitio. Para la variable rapidez, el P3 supera los 2 *m/s*, el P4 sobrepasa el 1.5 *m/s* y el P2 se aproxima a 1.25 *m/s*. La variable TPD, en el P3 se acerca a 5 *kW/m²*, el P4 excede los 2 *kW/m²* y el P2 alcanza 1 *kW/m²*. En cuanto a la variable de energía acumulada, el P3 llega a 0.3 *MWh/m²*, el P4 se aproxima a 0.2 *MWh/m²* y, el P1 y P2 se acercan a 0.1 *MWh/m²*. Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 4 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor, de los puntos P1, P2, P3 y P4 se orientan en dirección NO-SE.

La Figura 3.20, muestra la caracterización del flujo en 4 puntos a una profundi-

dad de 40 *m*. La variable rapidez, en el P3 sobrepasa los 2 *m/s*, el P4 excede los 1.5 *m/s* y el P2 se aproxima a 1.25 *m/s*. Para la variable TPD, el P3 se aproxima a 5 *kW/m²*, el P4 supera los 2 *kW/m²* y el P2 alcanza 1 *kW/m²*. En cuanto a la variable de energía acumulada, el P3 llega a 0.3 *MWh/m²*, el P4 se aproxima a 0.2 *MWh/m²* y, P1 y P2 se acercan a 0.1 *MWh/m²*. Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 4 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor, de los puntos P1, P2, P3 y P4 se orientan en dirección NO-SE.

La Figura 3.21, presenta la caracterización del flujo en 4 puntos a una profundidad de 50 *m*. Para la variable rapidez, el P3 supera los 2 *m/s*, el P4 excede el 1.5 *m/s* y el P2 se aproxima a 1.25 *m/s*. En cuanto a la variable TPD, el P3 se acerca a 5 *kW/m²*, el P4 pasa los 2 *kW/m²* y el P2 alcanza 1 *kW/m²*. La variable de energía acumulada, en el P3 se aproxima a 0.3 *MWh/m²*, el P4 se acerca a 0.2 *MWh/m²* y, el P1 y P2 son cercanos a 0.1 *MWh/m²*. Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 4 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor de los puntos P1, P2, P3 y P4 se orientan en dirección NO-SE.

La Figura 3.22, muestra la caracterización del flujo en 4 puntos a una profundidad de 75 *m*. La variable de rapidez, en el P3 sobrepasa los 2 *m/s*, el P4 supera el 1.5 *m/s* y el P2 se aproxima a 1.25 *m/s*. La variable TPD, en el P3 se acerca a 5 *kW/m²*, el P4 excede los 2 *kW/m²* y el P2 alcanza 1 *kW/m²*. Con respecto a la variable de energía acumulada, el P3 es cercano a 0.3 *MWh/m²*, el P4 se aproxima a 0.2 *MWh/m²* y, P1 y P2 se acercan a 0.1 *MWh/m²*. Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 4 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor, de los puntos P1, P2, P3 y P4 se orientan en dirección NO-SE.

La Figura 3.23, presenta la caracterización del flujo en 4 puntos a una profundidad de 100 *m*. Para la variable rapidez, el P3 supera los 2 *m/s*, el P4 sobrepasa el 1.5 *m/s* y el P2 ronda el 1.25 *m/s*. Con respecto a la variable TPD, el P3 se aproxima a 5 *kW/m²*, el P4 excede los 2 *kW/m²* y el P2 se acerca a *kW/m²*. En cuanto a la variable de energía acumulada, el P3 es cercano a 0.3 *MWh/m²*,

el P4 se aproxima a $0.2 \text{ MWh}/m^2$ y, el P1 y P2 son cercanos a $0.1 \text{ MWh}/m^2$. Las elipses de variabilidad de la corriente de marea, en los 4 puntos muestran una forma elíptica bien definida. El eje mayor, de los puntos P1, P2, P3 y P4 se orientan en dirección NO-SE.

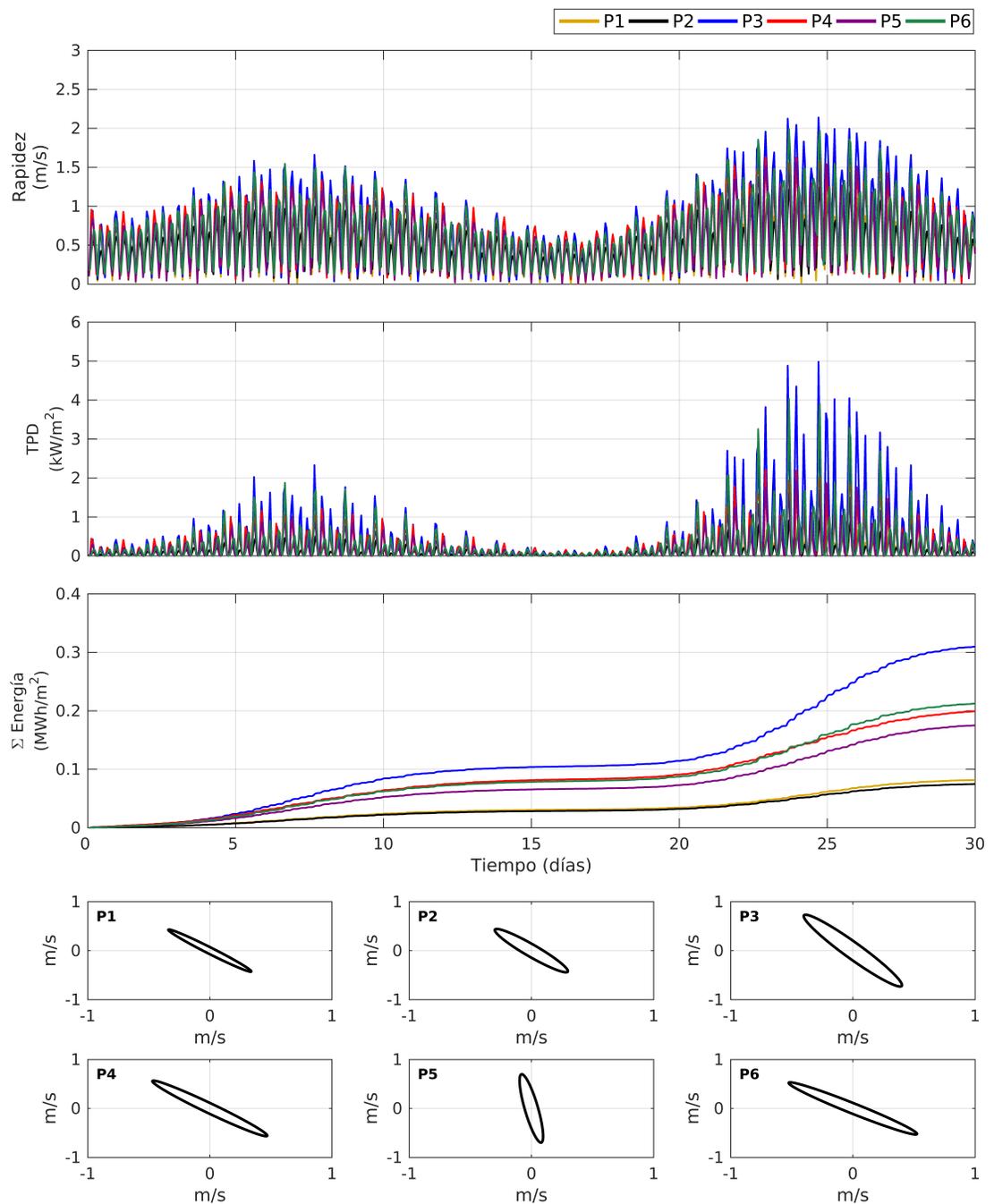


Figura 3.16: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 5 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

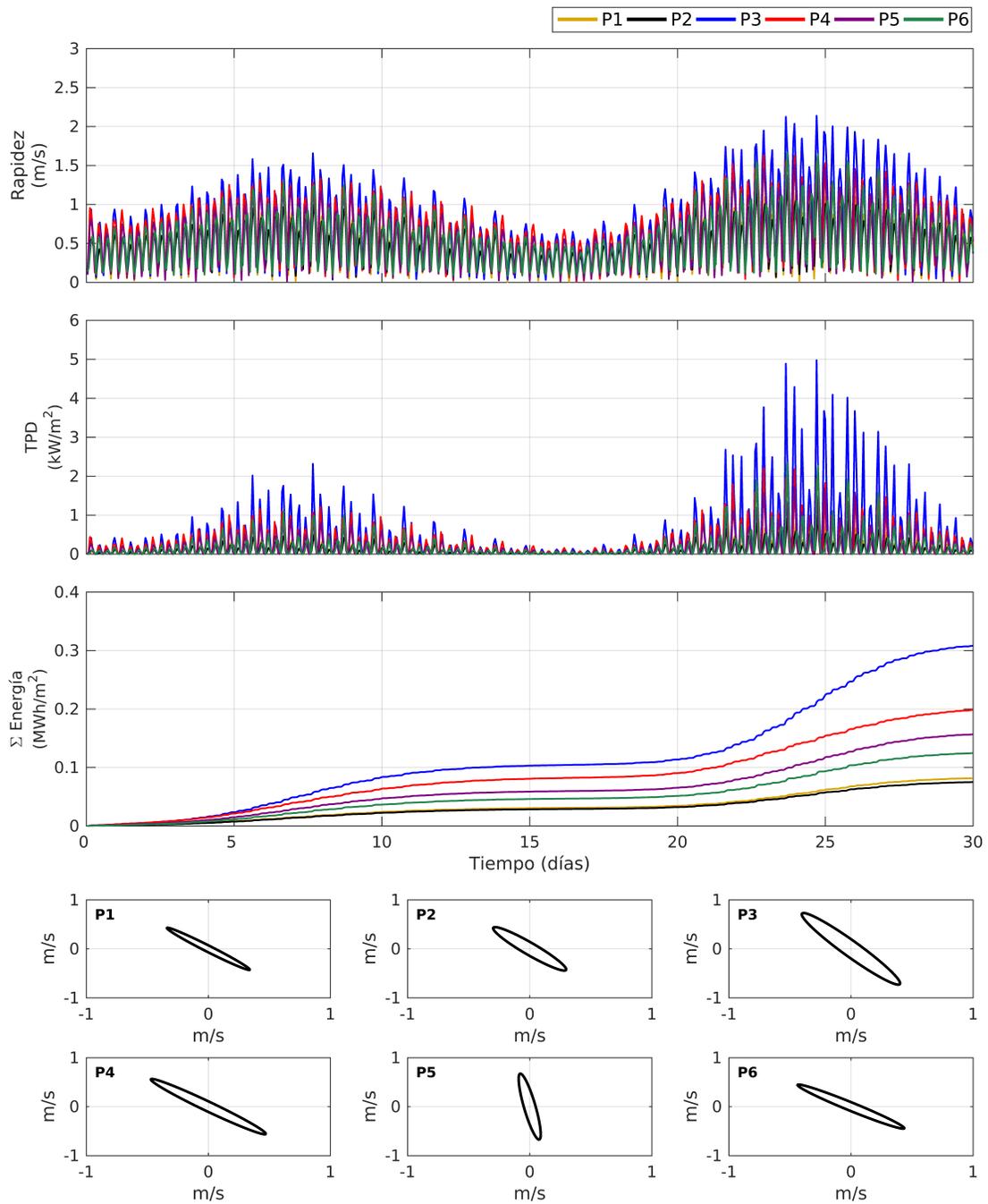


Figura 3.17: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 10 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

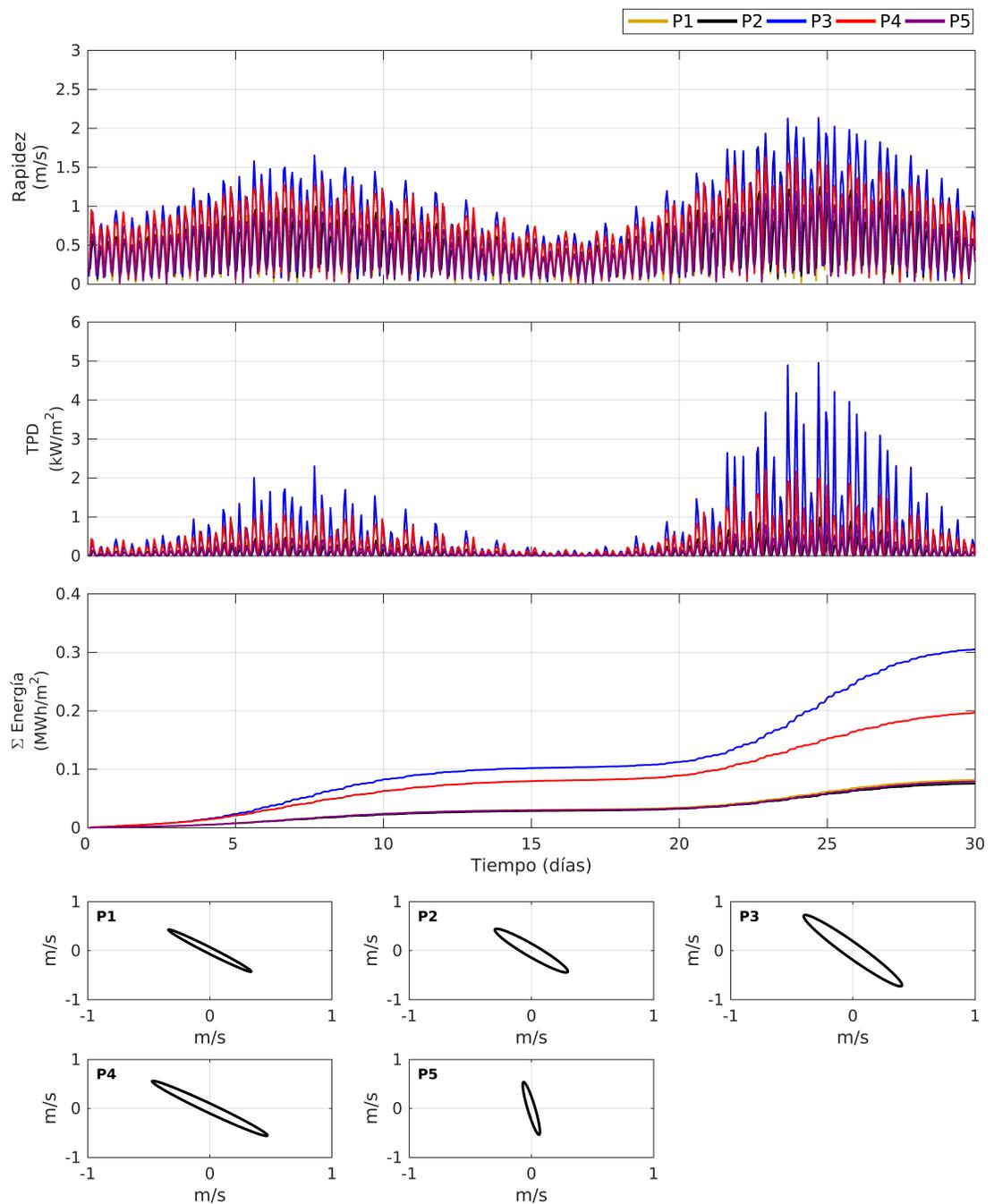


Figura 3.18: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 20 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

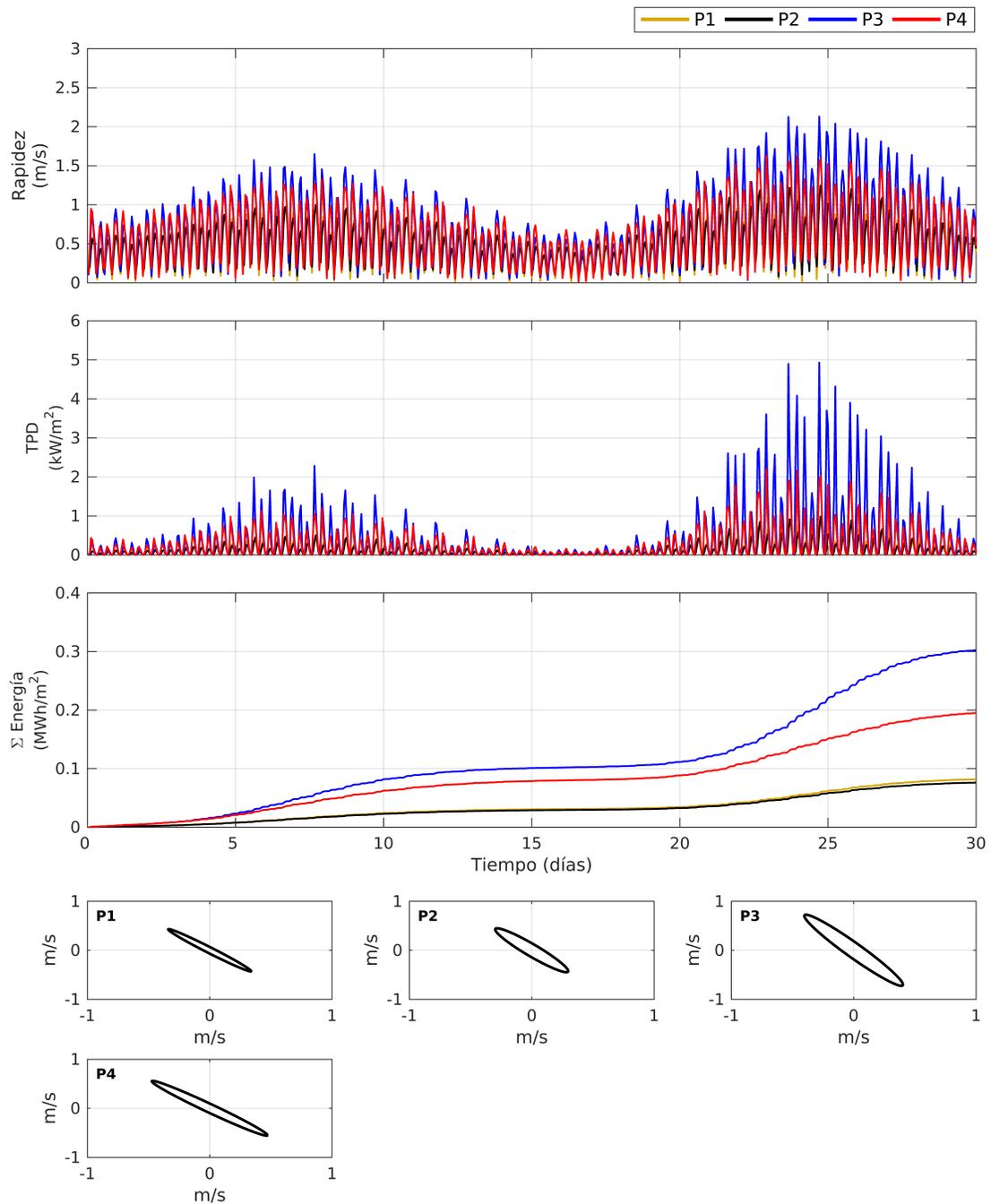


Figura 3.19: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 30 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

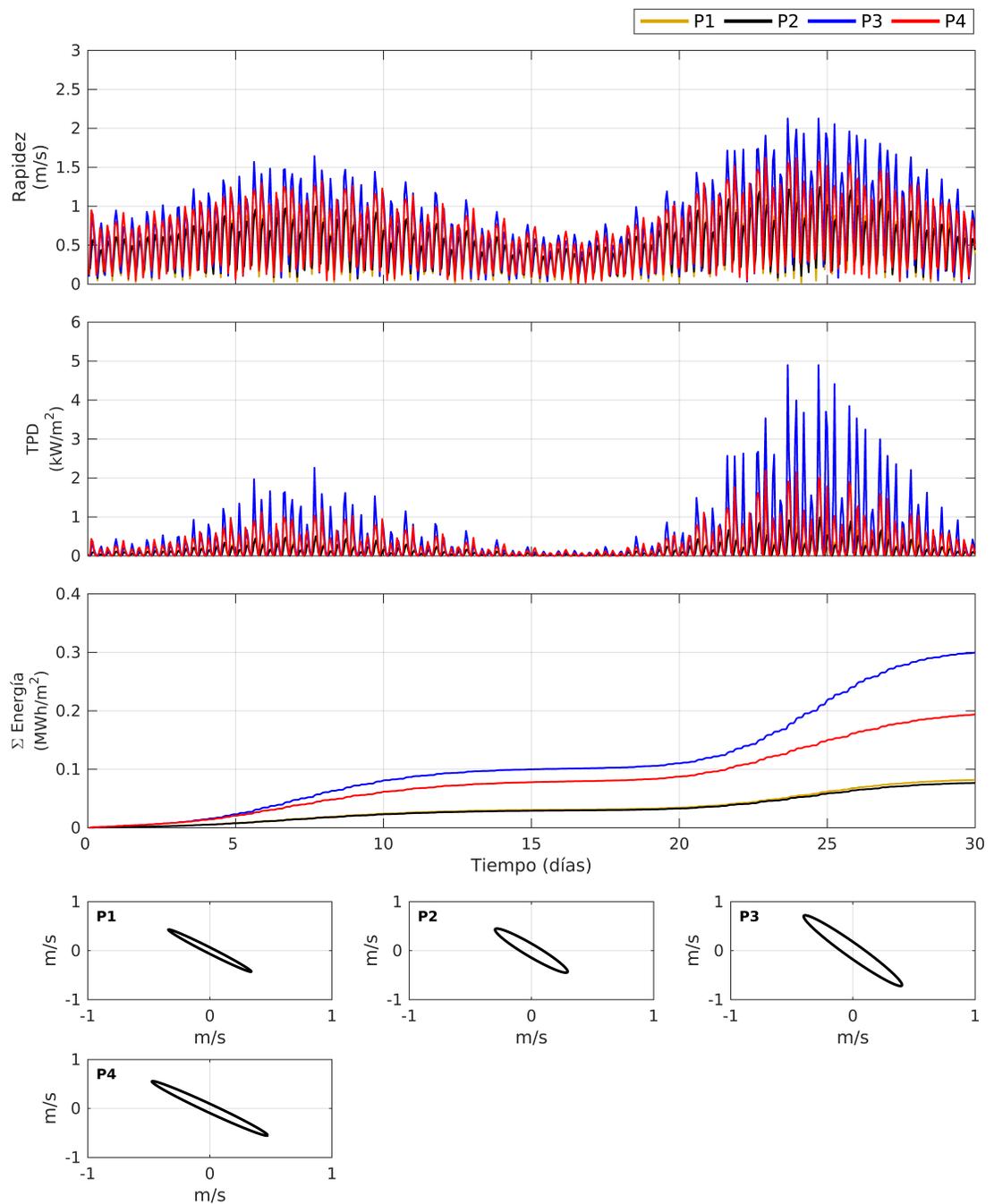


Figura 3.20: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 40 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

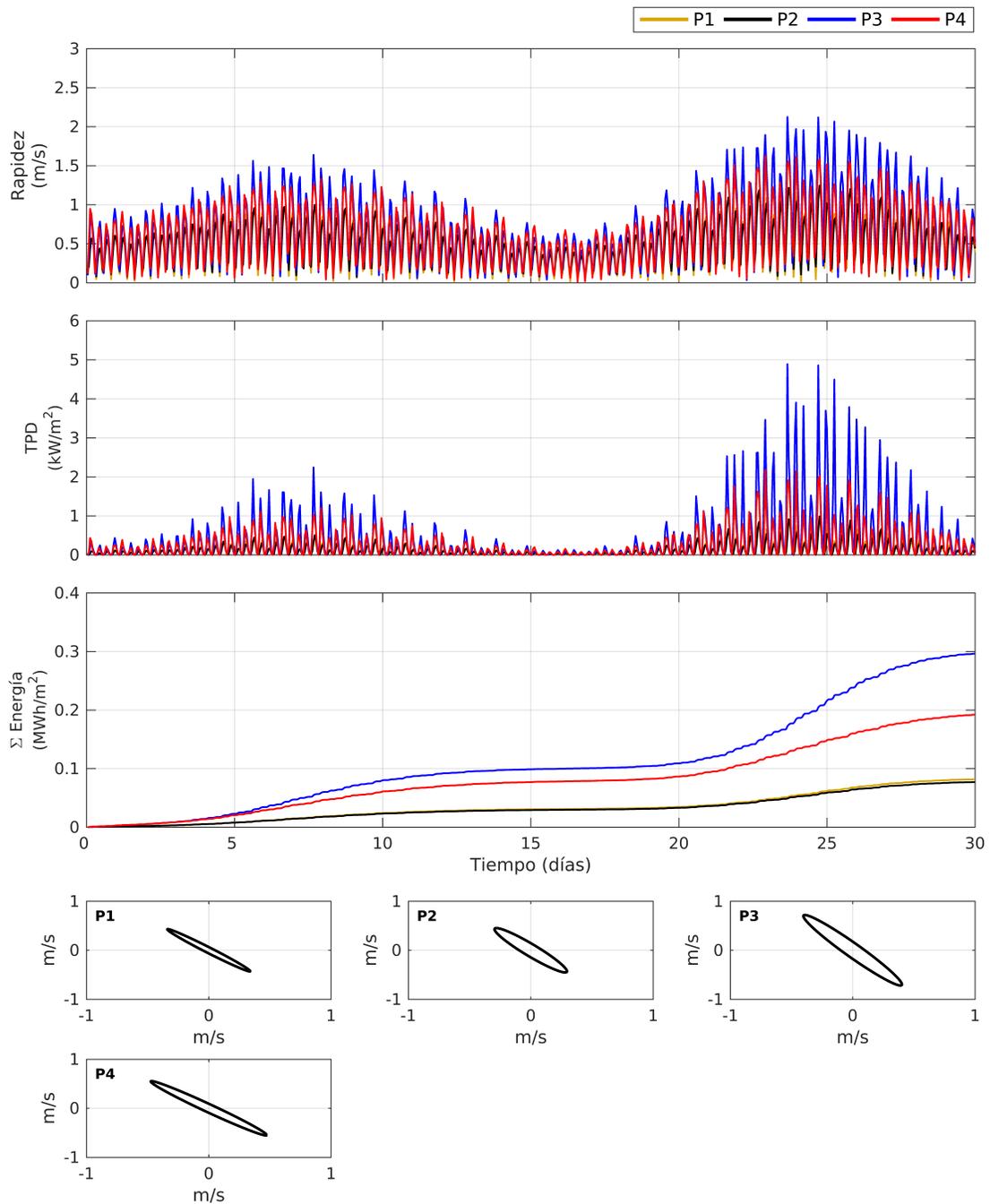


Figura 3.21: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 50 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

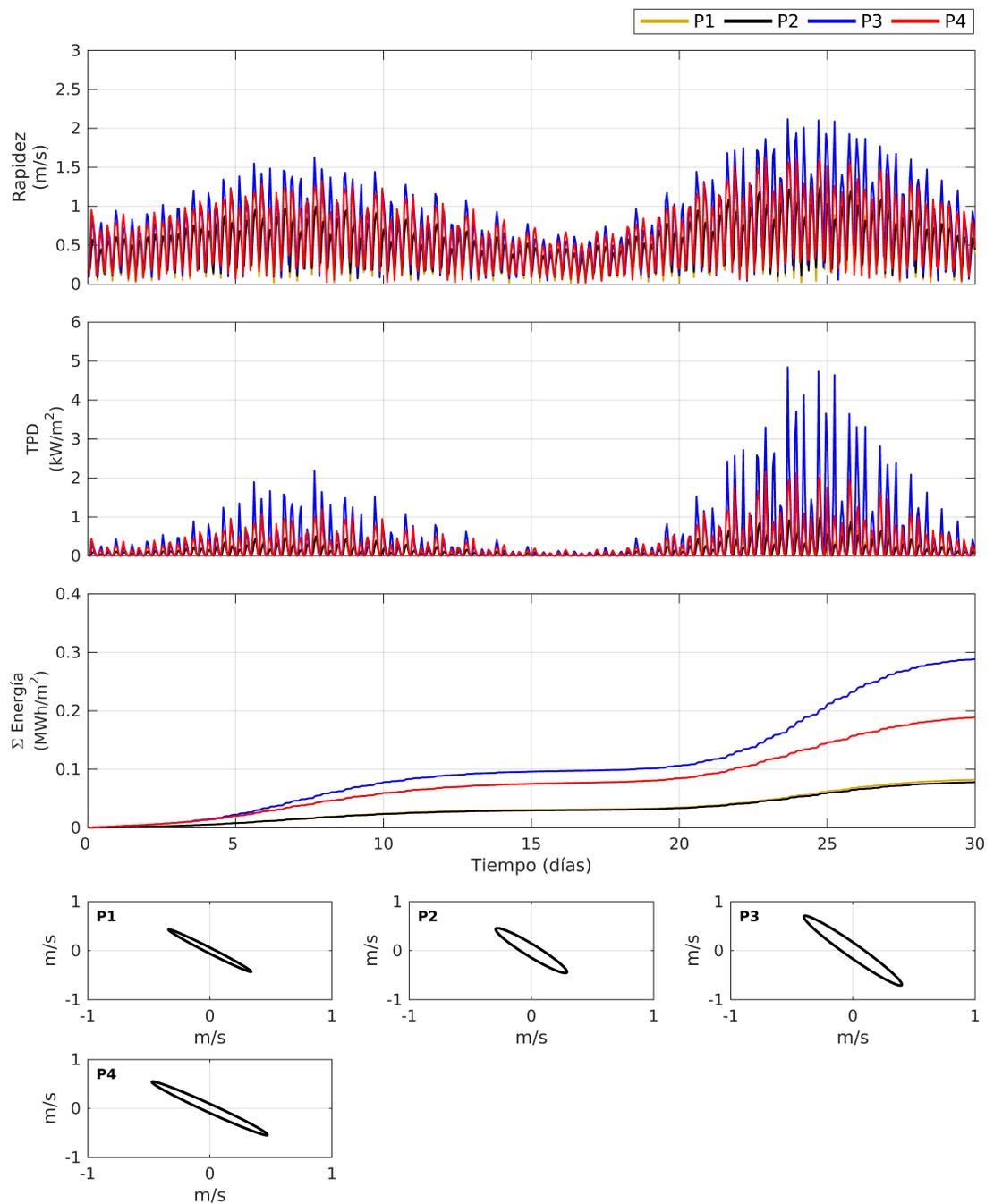


Figura 3.22: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 75 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

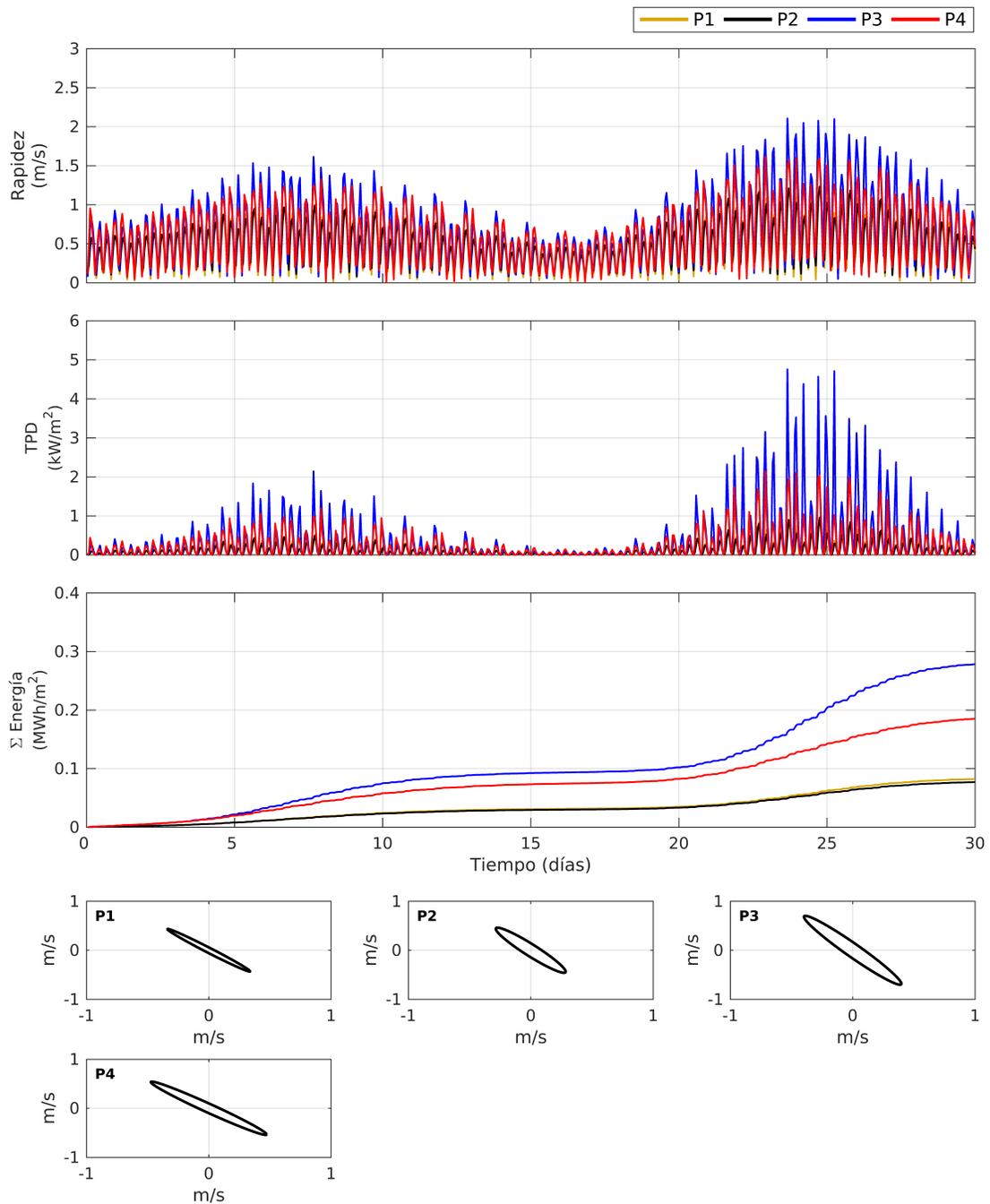


Figura 3.23: Caracterización mensual de los puntos de muestreo a 100 m de profundidad. Las series temporales corresponden a rapidez, TPD y energía. Las elipses representan la variabilidad de la corriente de marea.

Por último, se realizó el cálculo de curvas de densidad de flujo a diferentes profundidades en los 6 puntos de muestreo seleccionados. Para este cálculo, se utilizaron datos horarios de rapidez, del mes empleado para la caracterización del GC. Los datos de rapidez se ordenaron de mayor a menor y se calculó su densidad (porcentaje) con respecto al número de horas mensuales.

En la Figura 3.24, se muestran las curvas de densidad de flujo en 6 puntos de muestreo a 5 *m* de profundidad. Con una rapidez de 1 *m/s*, se alcanzó una densidad de flujo en el P3 de 26 %, en el P4 de 19 %, en el P5 de 17 % y en el P6 de 18 %. Para una rapidez de 0.5 *m/s*, se obtuvo una densidad de flujo en el P3 de 63 %, en el P4 de 62 %, en el P5 de 59 % y en el P6 de 62 %.

En la Figura 3.25, se muestran las curvas de densidad de flujo en 6 puntos de muestreo a 10 *m* de profundidad. Para una rapidez de 1 *m/s*, se consiguió una densidad de flujo en el P3 de 26 %, en el P4 de 19 % y en el P5 de 15 %. Con una rapidez de 0.5 *m/s*, se registró una densidad de flujo en el P3 de 62 %, en el P4 de 62 %, en el P5 de 56 % y en el P6 de 53 %.

En la Figura 3.26, se muestran las curvas de densidad de flujo en 5 puntos de muestreo a 20 *m* de profundidad. Con una rapidez de 1 *m/s*, se presentó una densidad de flujo en el P3 de 26 % y en el P4 de 19 %. Para una rapidez de 0.5 *m/s*, se produjo una densidad de flujo en el P3 y P4 de 62 %.

En la Figura 3.27, se muestran las curvas de densidad de flujo en 4 puntos de muestreo a 30 *m* de profundidad. Para una rapidez de 1 *m/s*, se obtuvo una densidad de flujo en el P3 de 46 % y en el P4 de 19 %. Con una rapidez de 0.5 *m/s*, se alcanzó una densidad de flujo en el P3 y P4 de 62 %.

En la Figura 3.28, se muestran las curvas de densidad de flujo en 4 puntos de muestreo a 40 *m* de profundidad. Con una rapidez de 1 *m/s*, se obtuvo una densidad de flujo en el P3 de 25 % y en el P4 de 19 %. Para una rapidez de 0.5 *m/s*, se alcanzó una densidad de flujo en el P3 y P4 de 62 %.

En la Figura 3.29, se muestran las curvas de densidad de flujo en 4 puntos de muestreo a 50 *m* de profundidad. Para una rapidez de 1 *m/s*, se registró una

densidad de flujo en el P3 de 25% y en el P4 de 19%. Con una rapidez de 0.5 m/s , se consiguió una densidad de flujo en el P3 y P4 de 63%.

En la Figura 3.30, se muestran las curvas de densidad de flujo en 4 puntos de muestreo a 75 m de profundidad. Con una rapidez de 1 m/s , se produjo una densidad de flujo en el P3 de 24% y en el P4 de 18%. Para una rapidez de 0.5 m/s , se presentó una densidad de flujo en el P3 y P4 de 62%.

En la Figura 3.31, se muestran las curvas de densidad de flujo en 4 puntos de muestreo a 100 m de profundidad. Para una rapidez de 1 m/s , se alcanzó una densidad de flujo en el P3 de 23% y en el P4 de 17%. Con una rapidez de 0.5 m/s , se obtuvo una densidad de flujo en el P3 y P4 de 62%.

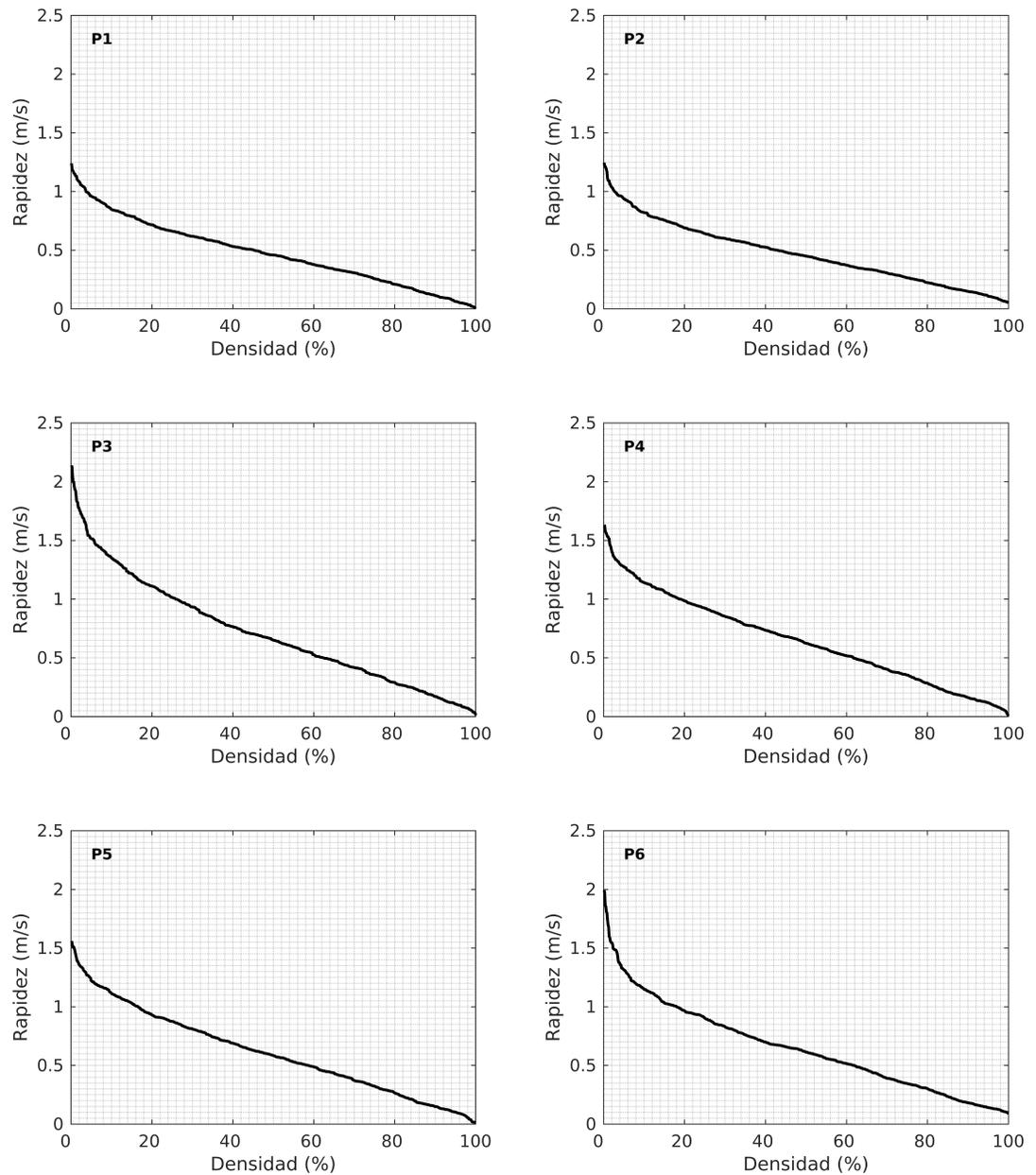


Figura 3.24: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 5 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

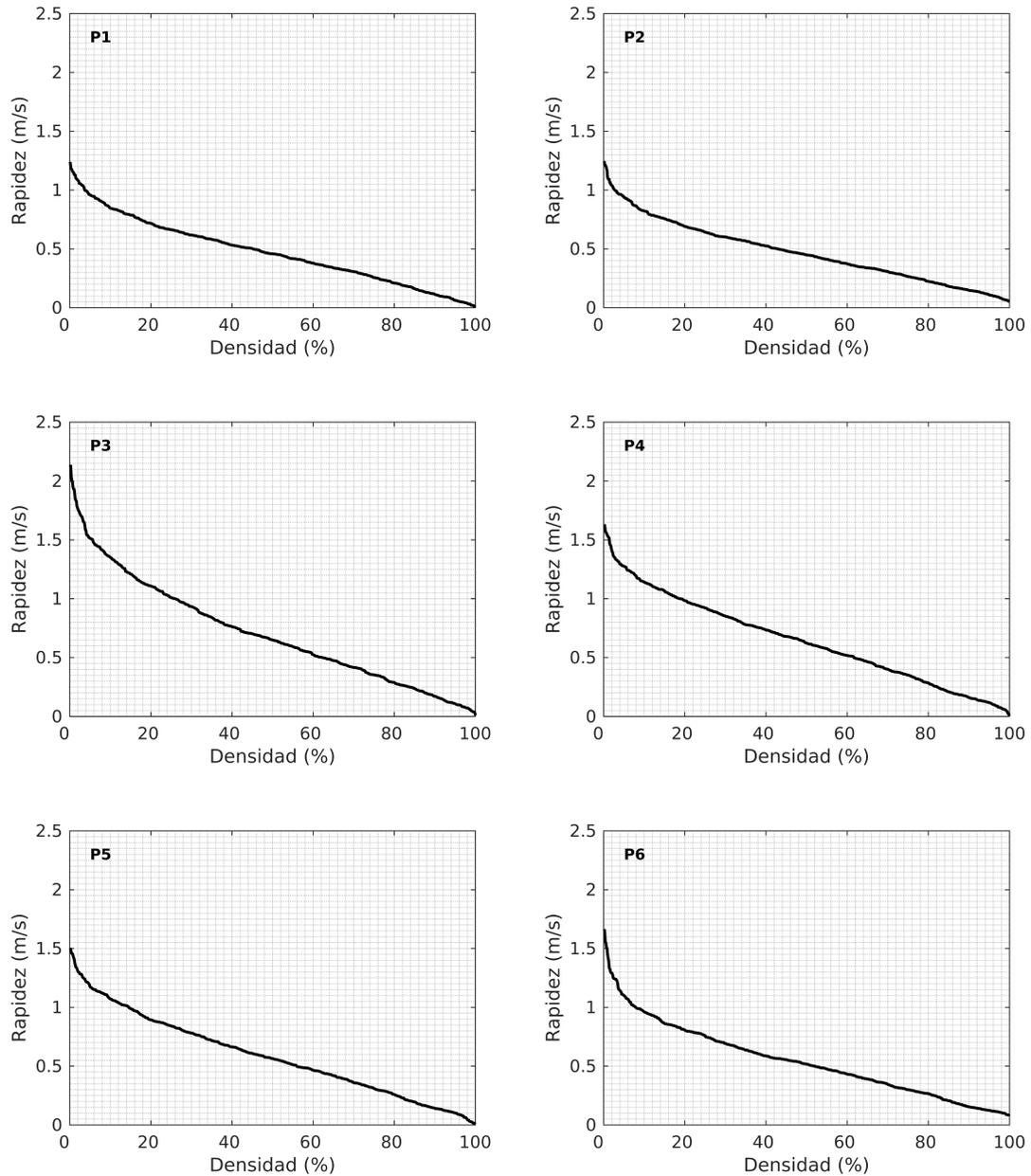


Figura 3.25: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 10 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

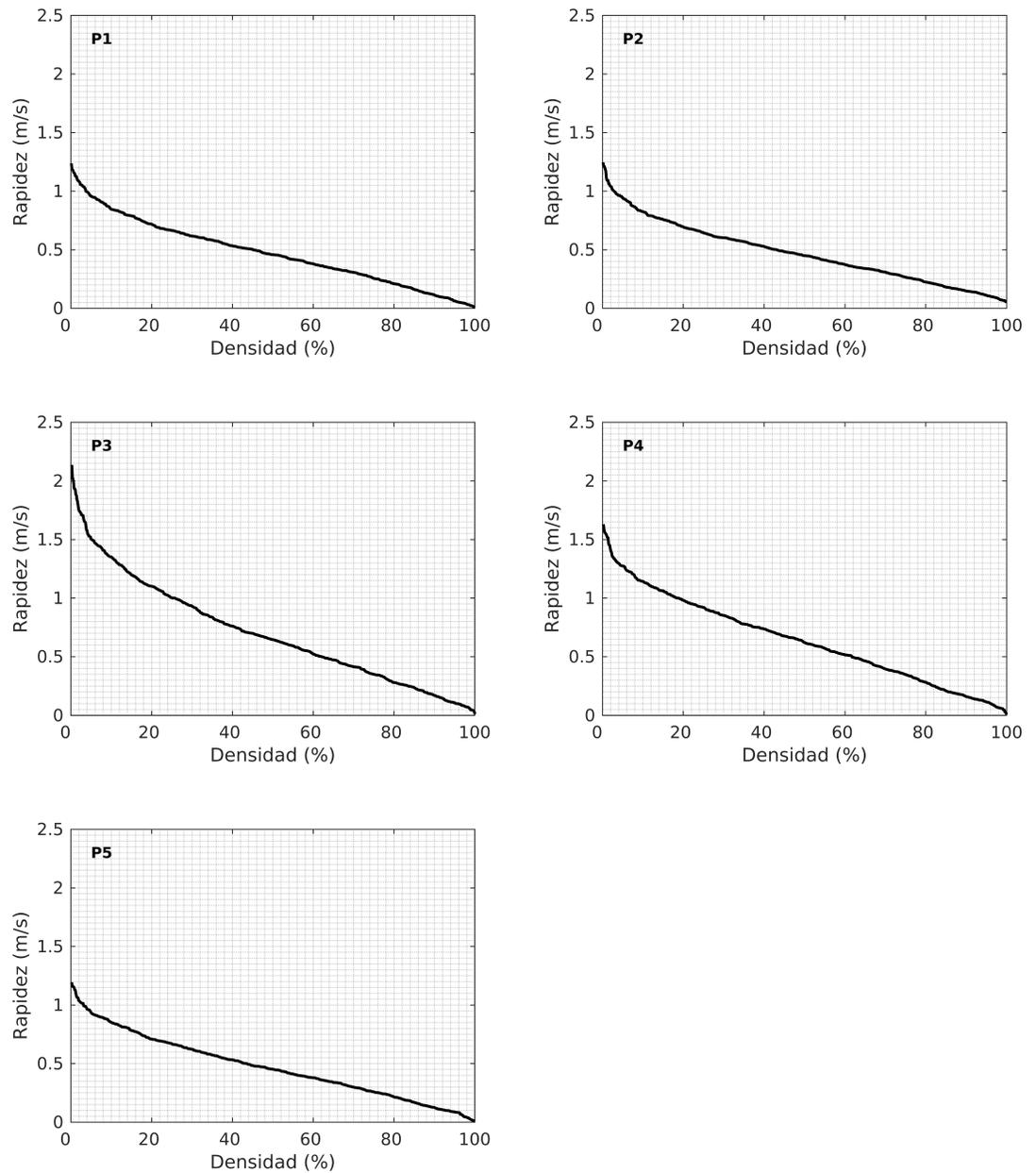


Figura 3.26: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 20 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

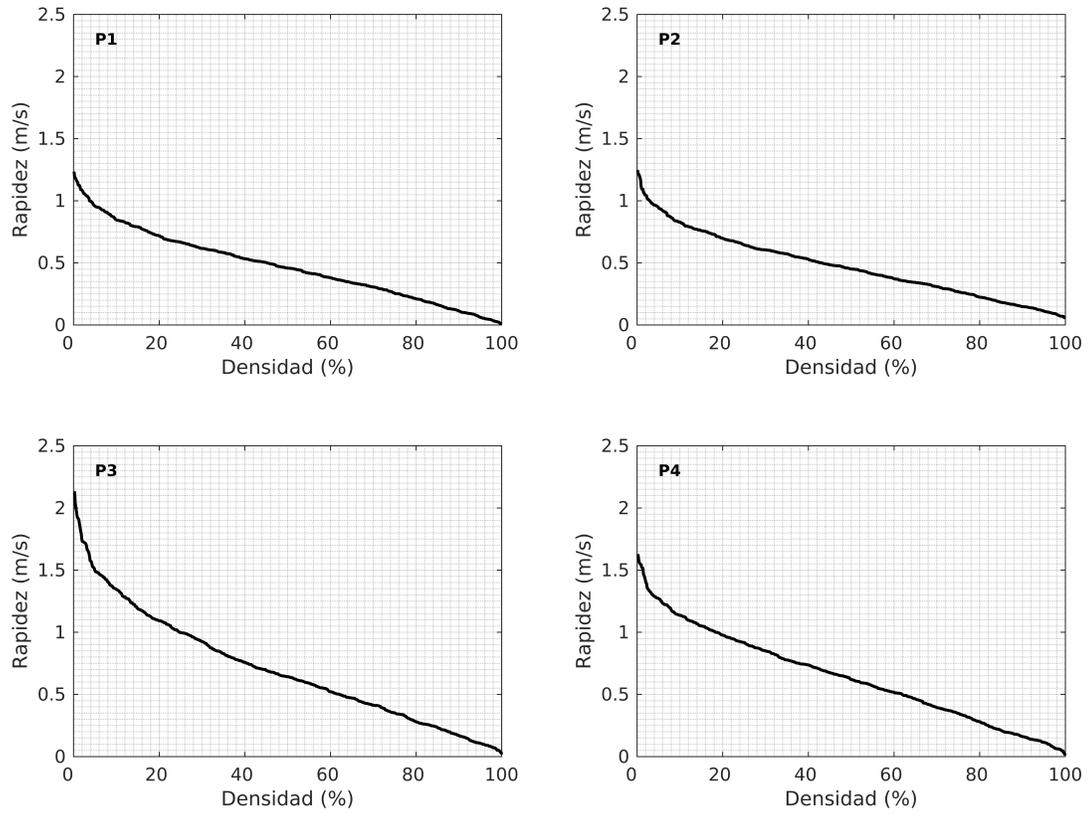


Figura 3.27: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 30 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

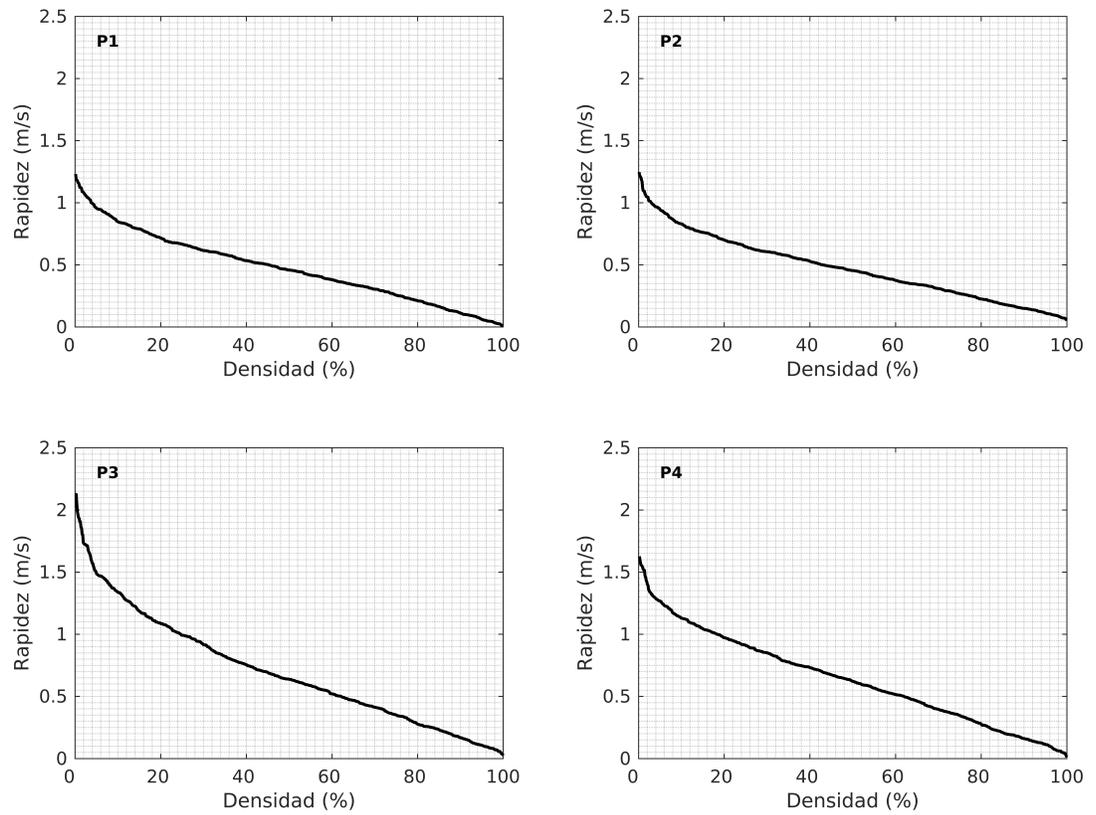


Figura 3.28: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 40 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

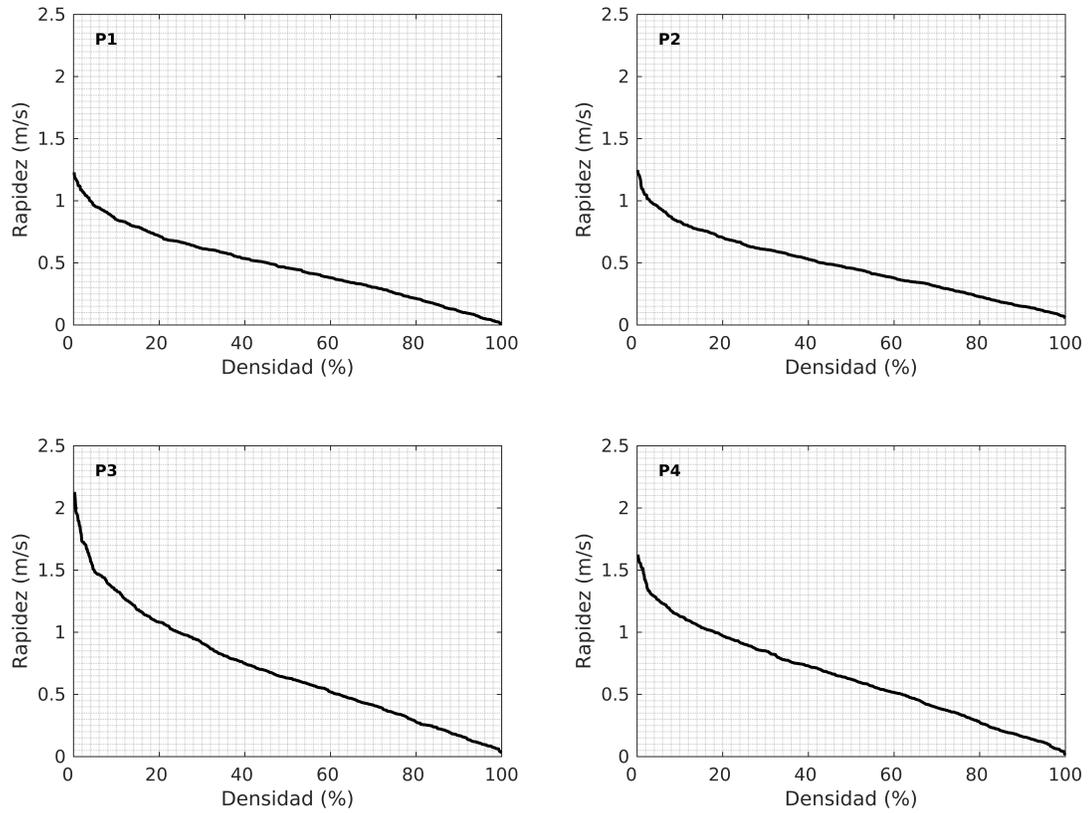


Figura 3.29: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 50 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

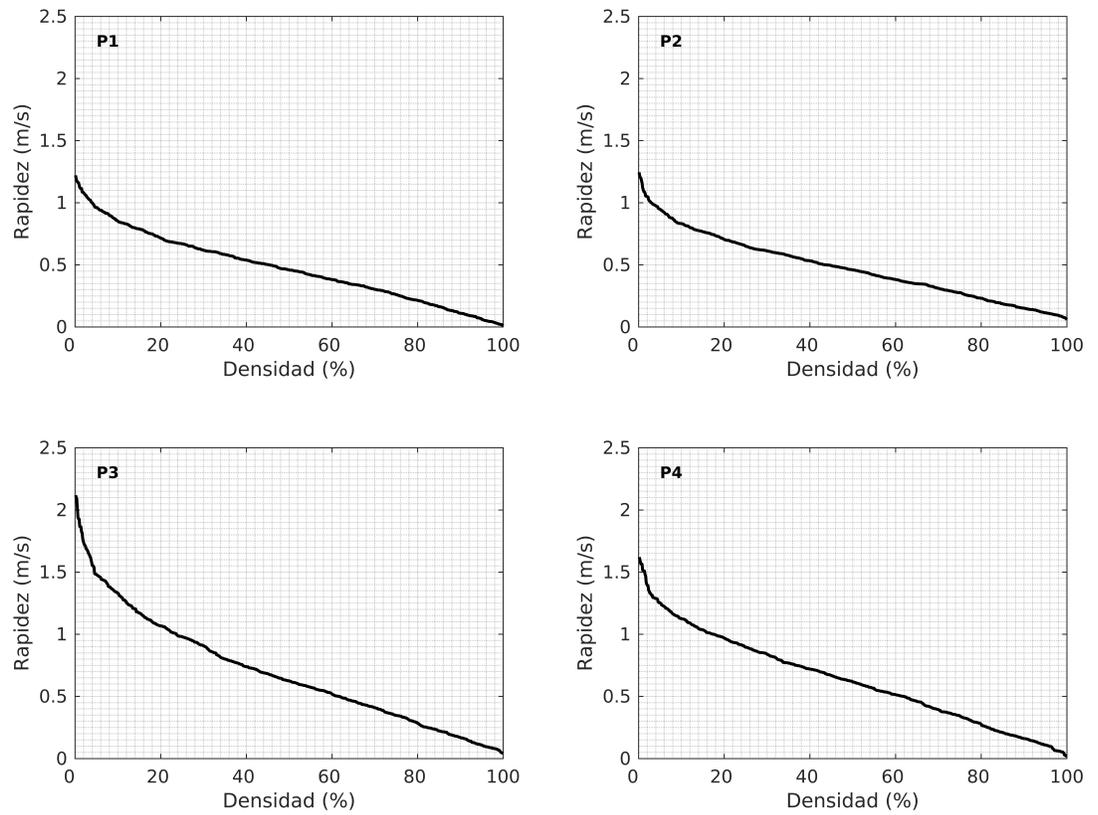


Figura 3.30: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 75 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

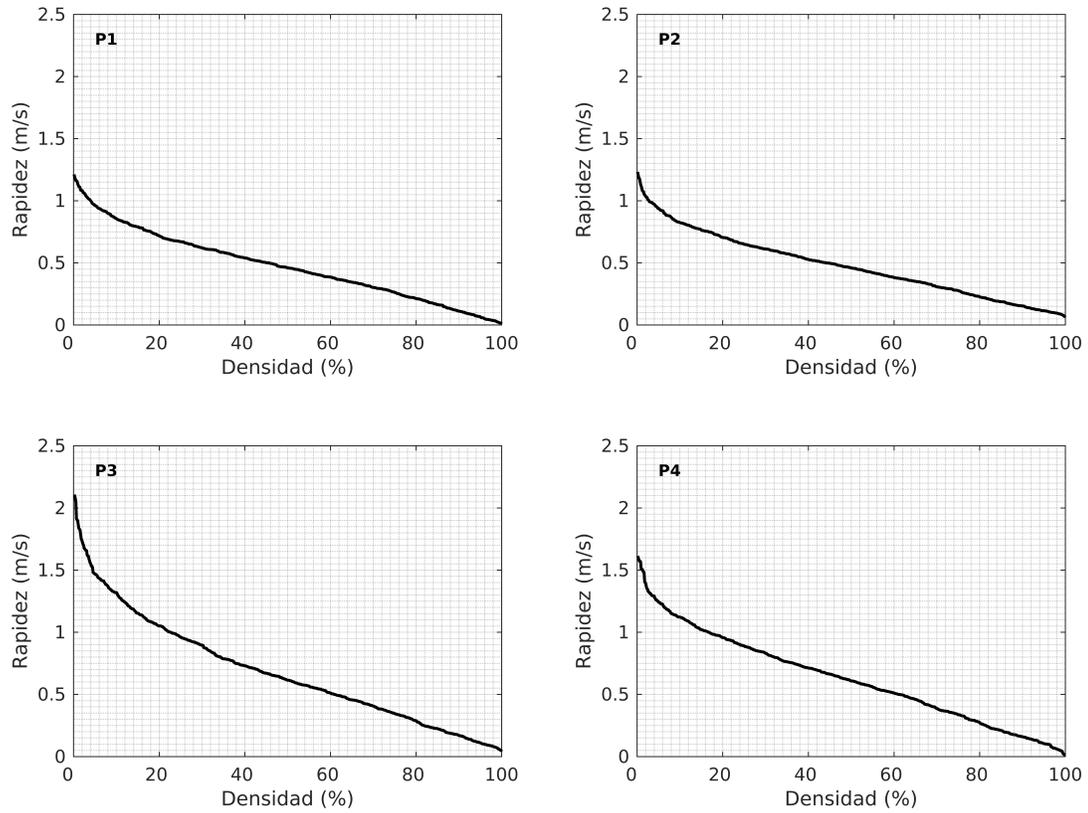


Figura 3.31: Curvas de densidad de flujo en los puntos de muestreo a 100 m de profundidad. Las curvas se calculan con datos horarios de rapidez mensual.

Capítulo 4

Discusiones y conclusiones

4.1. Discusiones

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de investigación demuestran la existencia de 2 regiones en las cuales se presentan los máximos valores promedio de TPD dentro del GC. Las 2 regiones identificadas son el AGC y la RGI. En ambas regiones se presentan los máximos valores promedio de rapidez de la corriente de marea en las 8 profundidades analizadas (5, 10, 20, 30, 40, 50, 75 y 100 *m*). En contraparte, la región anfídromica cercana a Santa Rosalía exhibe mínimos valores promedio de TPD a través de las diferentes profundidades analizadas.

La región anfídromica próxima a Santa Rosalía no muestra presencia de máximos valores promedio de TPD. Lo anterior es contrario a lo planteado al inicio del estudio. El planteamiento inicial se debe a que en este sitio se presenta un número de forma (Dietrich, 1963) de 3.3 que indica una marea de carácter diurno, lo cual demuestra que en este lugar las amplitudes de los 2 principales componentes armónicos semidiurnos (M2 y S2) son mínimas. La importancia de los componentes armónicos semidiurnos en el golfo radica en que estos tienen un factor de amplificación mayor (en un rango que va desde 3.77 a 5.11) que los componentes

armónicos diurnos (en un rango que va desde 1.81 a 2.02). Por consiguiente, al tener amplitudes mínimas de las componentes armónicas semidiurnas (N2, M2, S2 y K2) en la región próxima a Santa Rosalía junto con factores de amplificación importantes en la banda semidiurna dentro del golfo, se puede demostrar la presencia de sus respectivos nodos en esta región (Morales & Gutiérrez, 1989). Los nodos en teoría, estarían indicando sitios donde se producen importantes movimientos horizontales de las masas de agua (Pugh & Woodworth, 2014). Pero durante el estudio no se presentaron máximos valores promedio de TPD en la región y esto se atribuye a su proximidad con la cuenca de Guaymas, la cual tiene una profundidad aproximada de 2200 *m*.

La RGI muestra, la presencia de máximos valores promedio de TPD en 5 diferentes zonas. Dichos valores, se mantienen similares a través de las profundidades analizadas, a excepción de los lugares en donde deja de haber datos debido a la batimetría. Los máximos valores promedio de TPD, obtenidos durante este trabajo en la región antes mencionada, se atribuyen a distintos factores. El primer factor son las restricciones o estrechamientos causados por las islas presentes en el área, los cuales provocan un aumento en la rapidez del flujo (Mejia-Olivares et al., 2018). El segundo factor son las restricciones batimétricas, causadas por la disminución de la profundidad a medida que se acerca a la cabeza del golfo (Makarov & Jiménez Illescas, 2003). El tercer factor se refiere al número de forma en la región, el cual tiene un rango entre 0.5 y 1; lo cual indica una marea de carácter mixto que se amplifica debido a la resonancia (Morales & Gutiérrez, 1989). El cuarto factor se debe a que la región se encuentra entre los nodos de los componentes armónicos semidiurnos y el antinodo (cabeza del golfo) lo que ubicaría a la región en un sitio con movimiento horizontal de las masas de agua (Morales & Gutiérrez, 1989; Pugh & Woodworth, 2014).

La región del AGC, muestra la presencia de máximos valores promedio de TPD en una extensa área. Estos valores se mantienen similares hasta los 10 *m* de profundidad, aunque se ven reducidos debido a la batimetría somera del lugar. Los máximos valores promedio de TPD, obtenidos en la región se atribuyen a di-

versos factores. El primer factor es la marea amplificada a causa de la resonancia que se presenta en el golfo (Hiriart Le Bert, 2009), esto provoca rangos de marea cercanos a 8 *m*. El segundo factor es batimetría somera de la región (Makarov & Jiménez Illescas, 2003). En conjunto, estos factores estarían provocando un cambio de energía potencial a energía cinética en el sitio.

Los resultados demuestran que los factores que contribuyen a la presencia de máximos valores de TPD en el GC son: la resonancia de la marea, las constricciones causadas por las islas y las restricciones batimétricas.

En el artículo titulado "Tidal-stream energy resource characterization for the Gulf of California, México", se realizó una modelación numérica de la zona costera del Océano Pacífico y del Golfo de California. La modelación se efectuó mediante el conjunto de herramientas de modelado llamado TELEMAC. La configuración de TELEMAC fue la siguiente: 2 dimensiones, barotrópico, resolución de malla variable (60 *km* en el Pacífico, 5 *km* en la boca del GC, 1 *km* en la RGI y 3 *km* en el AGC), batimetría proveniente de GEBCO con resolución de 900 *m*, y adicionalmente, una batimetría de alta resolución (450 *m*) en el AGC. El modelo fue forzado en sus fronteras con marea de los 8 principales componentes armónicos diurnos y semidiurnos (M2, S2, N2, K1, O1, P1, Q1), 3 componentes no lineales (M4, MS4, MN4) y 2 componentes de periodo largo (Mf, Mm). Los resultados de la validación en el GC arrojan un coeficiente de correlación de 0.99 en San Felipe y 0.75 en La Paz; lo anterior fue calculado con datos de altura del modelo y observados. Por otra parte, en los resultados de rapidez máxima mensual dentro de la RGI, destacan 4 zonas; siendo la de mayor importancia la que se ubica entre ISL e ISE. En cuanto al promedio anual de TPD, obtienen el máximo valor nuevamente entre ISL e ISE (aproximadamente 500 W/m^2); las 3 zonas restantes rondan los 100 W/m^2 (Mejia-Olivares et al., 2018).

Al comparar los resultados del presente trabajo, con los del artículo mencionado en el párrafo anterior, debemos mencionar que este trabajo se basó en una modelación en 3 dimensiones, por lo cual fue posible obtener valores de las diferentes variables a distintas profundidades; cosa que no es posible en el estudio

antes referido. Además, debido a la mayor resolución utilizada en este trabajo (MG de 2 km y MF de 660 m), es posible identificar el Estrecho del Infiernillo como una zona con máximos valores promedio de TPD. En referencia a las validaciones realizadas, en este trabajo se obtienen coeficientes de correlación en San Felipe de 0.92 y en La Paz de 0.89, lo que indica que los datos utilizados aquí presentan una mayor consistencia, comparados con los del trabajo antes mencionado. Con respecto a las regiones de máximos valores promedio de TPD, este trabajo identifica al AGC y a la RGI; lo cual difiere del artículo, el cual únicamente identifica la RGI. Para las zonas identificadas dentro de la RGI, ambos trabajos coinciden, con la única diferencia de que aquí se identifica al Estrecho del Infiernillo como un sitio con máximos valores promedio de TPD. En cuanto al valor de promedio TPD, la zona ubicada entre ISL e ISE, se identifica en ambos trabajos, con valores de que rondan los 500 W/m^2 .

Para darse una idea del potencial aprovechable en la zona de estudio, una casa hogar promedio, necesita anualmente 5300 kWh (Lynn, 2013). Dentro de la RGI y el AGC, existen 6 zonas las cuales tiene una energía promedio anual 1000 kWh/m^2 , esto significaría que con 5.3 m^2 del flujo se podría abastecer un hogar.

4.2. Conclusiones

Las conclusiones y recomendaciones del trabajo desarrollado son las siguientes:

- La modelación realizada en ROMS logró reproducir el comportamiento de la marea en el GC (elevación de la superficie del mar y corrientes de marea).
- Existen 2 regiones en las cuales se presentan los máximos valores promedio de TPD dentro del golfo (RGI y AGC).
- Dentro de las 2 regiones identificadas, se localizan 6 zonas donde se obtienen valores de rapidez promedio superiores a 0.5 m/s y de TPD promedio

mensual superiores a $60 W/m^2$. En la RGI se localizan 5 zonas y en el AGC 1 zona.

- La corriente de marea es un recurso persistente a diferentes profundidades dentro del GC.
- En un periodo anual en el GC se obtiene valores superiores a $1000 kWh/m^2$ en las 6 zonas identificadas anteriormente y en las profundidades analizadas.
- Las corrientes de marea en los puntos maestreados están orientadas en su mayoría en dirección NO-SE y son bidireccionales.
- Los factores que contribuyen a la aparición de máximos valores promedio de TPD en el GC, son: la resonancia de la marea, las constricciones causadas por las islas y las restricciones batimétricas.
- Es necesario desarrollar dispositivos para el aprovechamiento de la corriente de marea como fuente de energía, capaces de iniciar su operación a partir de $0.5 m/s$.
- Es necesario desarrollar dispositivos que puedan ser instalados a diferentes profundidades, ya sea en un sitio somero o uno profundo.
- La región al sur de los $28^\circ N$ de latitud debe ser estudiada utilizando mallas de mayor resolución.
- Se debe tener presente que el TPD es un cálculo teórico de la potencia disponible en un sitio.
- Al calcular la energía que puede producir una turbina en el GC, se debe considerar su rango de operación.
- Para trabajos futuros se recomienda incluir en el modelo numérico flujos de calor, flujos de viento y forzamiento de bajas frecuencias.

- Se recomienda tomar en cuenta para trabajos futuros, la influencia de los dispositivos empleados en el aprovechamiento de la corriente de marea sobre la dinámica del GC.

Referencias

- Ali, M. H. & Abustan, I. (2014). A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*, 4, 1–9.
- Atkins, P. & De Paula, J. (2007). *Química - Física*. Médica Panamericana.
- Carbajal, N. & Backhaus, J. O. (1998). Simulation of tides, residual flow and energy budget in the Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 21(3), 429–446.
- Case, T. J., Cody, M. L., & Ezcurra, E. (Eds.). (2002). *A new island biogeography of the sea of Cortés*. Oxford University Press.
- Castro, R., Mascarenhas, A. S., Durazo, R., & Collins, C. A. (2000). Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(4), 561–583.
- Charlier, R. H. & Finkl, C. W. (2009). *Ocean energy : tide and tidal power*. Springer.
- De la Lanza Espino, G. (1991). *Oceanografía de mares mexicanos*. D.F., México: AGT editor, S.A.
- De la Lanza Espino, G. J. & Cáceres Martínez, C. (1994). *Lagunas Costeras y El Litoral Mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Deborah Greaves & Gregorio Iglesias (Eds.). (2018). *Wave and tidal energy*. Wiley.
- Dietrich, G. (1963). *General Oceanography*. John Wiley & Sons Inc.
- Ehrlich, R. & Geller, H. (2017). *Renewable energy: a first course*. CRC Press.
- Freris, L. & Infield, D. (2008). *Renewable energy in power systems*. Wiley.
- García Silva, G. & Marinone, S. G. (2000). Caracterización dinámica y energética de la marea en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 26(2), 323–353.
- Godin, G. (1993). On tidal resonance. *Continental Shelf Research*, 13(1), 89–107.
- Hardisty, J. (2009). *The analysis of tidal stream power*. Wiley.
- Hicks, S. D. (2006). *Understanding tides*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
- Hiriart Le Bert, G. (2009). Potencial energético del Alto Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), 143–146.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2011). *Special Report on Renewa-*

ble Energy Sources and Climate Change Mitigation Summary for Policymakers and Technical Summary.

- Jiménez, A., Marinone, S., & Parés-Sierra, A. (2005). Efecto de la variabilidad espacial y temporal del viento sobre la circulación en el Golfo de California. *Ciencias marinas*, 31(2), 357–368.
- Kilcher, L., Thresher, R., & Tinnesand, H. (2016). Marine hydrokinetic energy site identification and ranking methodology part II: tidal energy. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Liu, Z. (2015). *Global energy interconnection*. Academic Press.
- Lynn, P. A. (2013). *Electricity from wave and tide: an introduction to marine energy*. Wiley.
- Makarov, V. & Jiménez Illescas, Á. (2003). Corrientes básicas barotrópicas en el Golfo de California. *Ciencias marinas*, 29(2), 141–153.
- M.A.Laughton (Ed.). (2003). *Renewable Energy Sources: Watt Committee: report number 22*. Published on behalf of the Watt Committee on Energy by Elsevier Applied Science.
- Marinone Moschetto, S. G. L. (2000). Corrientes de marea en el Golfo de California: intercomparaciones entre modelos bidimensionales y tridimensionales con observaciones. *Ciencias Marinas*, 26(2), 275–301.
- Marinone Moschetto, S. G. L. & Lavín Peregrina, M. F. (1997). Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. In *Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Monografía No.3* chapter 6, (pp. 111–139). Unión Geofísica Mexicana.
- Mark A. Shields & Andrew I.L. Payne (Eds.). (2014). *Marine renewable energy technology and environmental interactions*. Springer.
- Mateos, E. & Marinone, S. G. (2017). Current variability by wave propagation in Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 43(3), 191–201.
- Medina, F. (1995). El vulcanismo y la formación del Golfo de California. In Cuauhtémoc León Diez (Ed.), *Baja California desde el principio: geología histórica* (pp.82). Universidad Autónoma de Baja California.

- Mejia-Olivares, C. J., Haigh, I. D., Wells, N. C., Coles, D. S., Lewis, M. J., & Neill, S. P. (2018). Tidal-stream energy resource characterization for the Gulf of California, México. *Energy*, *156*, 481–491.
- Morales, R. A. & Gutiérrez, G. (1989). Mareas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, *28*(1), 25–46.
- National Research Council (2013). *An Evaluation of the U.S. Department of Energy's Marine and Hydrokinetic Resource Assessments*. The National Academies Press.
- Neill, S. P. & Hashemi, M. R. (2018). *Fundamentals of ocean renewable energy: generating electricity from the sea* (1st Editio ed.). Elsevier.
- Open University (1999). *Waves, tides and shallow-water processes* (2 ed.). Butterworth-Heinemann in association with The Open University.
- Pugh, D. & Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.
- Ramos, V. & Ringwood, J. V. (2016). Implementation and evaluation of the International Electrotechnical Commission specification for tidal stream energy resource assessment: A case study. *Energy Conversion and Management*, *127*, 66–79.
- Roden, G. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, *12*(1), 21–45.
- Shchepetkin, A. F. & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, *9*(4), 347–404.
- Squalli, J. (2017). Renewable energy, coal as a baseload power source, and greenhouse gas emissions: Evidence from U.S. state-level data. *Energy*, *127*, 479–488.
- Thomson, R. E. & Emery, W. J. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography* (3rd Editio ed.). Elsevier Science.
- Zhaoqing Yang & Andrea Copping (Eds.). (2017). *Marine renewable energy: resource characterization and physical effects*. Springer.