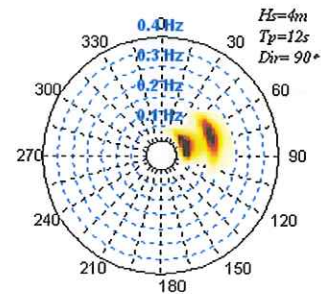




**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE  
BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



**Simulación numérica del oleaje en la Bahía de Todos Santos:  
Influencia de las condiciones de frontera.**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**O C E A N Ó L O G O**  
PRESENTA

**DENNISE ALEJANDRA CASTRO OSUNA**

*Ensenada, BC, 3 de Octubre de 2003*

## **Simulación numérica del oleaje en la Bahía de Todos Santos: Influencia de las condiciones de frontera.**

El oleaje es uno de los fenómenos más importantes en la oceanografía costera ya que es un factor que influye en la modificación de la línea de costa, en la navegación, acumulación de sedimento en playas así como la planeación para protección de playas y construcción de puertos. Por esto el estudio y conocimiento de su comportamiento se ha vuelto día con día más importante. Lo cual ha llevado al desarrollo de modelos numéricos para realizar simulaciones del oleaje así como predicciones del mismo para zonas donde se cuente con información de viento y mediciones reales. El modelo numérico SWAN se utiliza para realizar tanto simulaciones como predicciones del oleaje en regiones costeras a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría; reúne los procesos físicos sobre la generación del oleaje y su disipación de energía basado en la ecuación de balance de acción. La Bahía de Todos Santos se encuentra ubicada al noroeste de la península de Baja California, cuenta con varios kilómetros de playas y algunos rasgos geomorfológicos, los cuales son afectados por la incidencia del oleaje. Lo que no existe en esta área son mediciones de oleaje dentro y fuera de la bahía, por lo que se ajustó el modelo SWAN para simular campos de oleaje de la bahía y espectros en frecuencia y direccionales en distintos puntos para analizar la sensibilidad del modelo al suministrarle distintas condiciones de frontera. Los campos de oleaje procesados por el modelo SWAN para toda el área de estudio están influenciados por las condiciones de frontera que se le suministraron al modelo. La variación de la altura significativa a lo largo de la frontera oeste influye en la distribución de las alturas significativas dentro de la bahía, así como en la evolución de los espectros de cada uno de los puntos. La generación de un segundo pico en los espectros en frecuencia y direccionales se debe al proceso físico interacciones no lineales entre las olas (triadas), el cual transfiere energía de frecuencias bajas a altas. Es posible utilizar el modelo SWAN para predecir el oleaje dentro de la bahía al contar con condiciones de frontera reales.

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL OLEAJE EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS:  
INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA.**

T E S I S

Que presenta:

***Dennise Alejandra Castro Osuna***

Aprobada por:

---

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres  
Presidente del Jurado

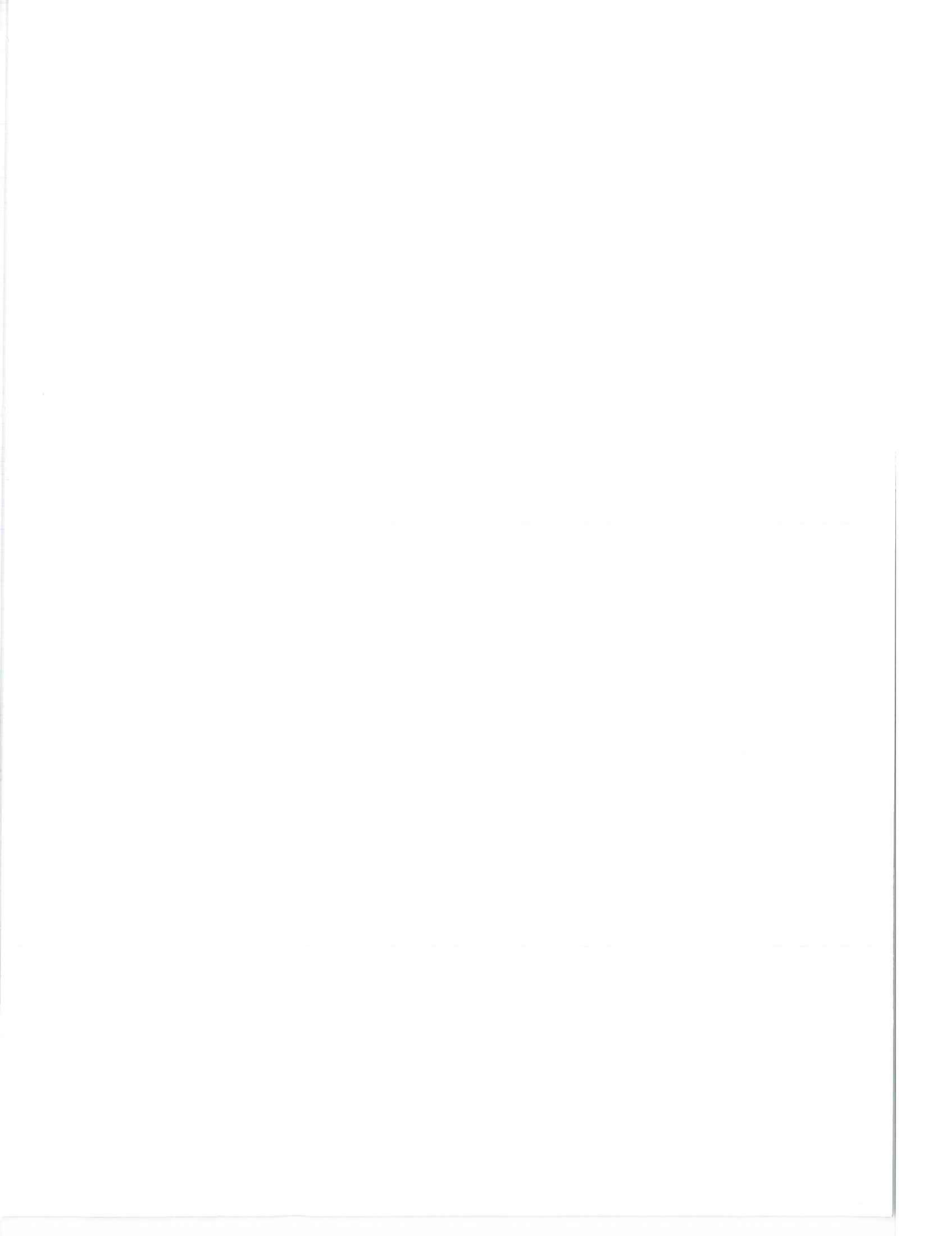


---

M en C. Pedro Rosales Grano  
Sinodal Propietario

---

Dr. René Pinet Plasencia  
Sinodal Propietario



## *Dedicatoria*

*A mi mamá!!! por esa gran fuerza para sacarnos adelante  
y por depositar en mí toda su confianza, paciencia y apoyo  
sin los cuales no hubiera logrado este gran sueño.*

## Agradecimientos...

Mi director de tesis, Dr. Francisco Ocampo, gracias por dirigir este trabajo, por enseñarnos a ser autosuficientes, por la beca, por las correcciones, por la paciencia y el apoyo en este período, durante el cual aprendí muchas cosas y me llevo algunas otras.

MC. Pedro Rosales por las revisiones y aportaciones a la tesis; y por estar siempre ahí para resolver las dudas de todos los estudiantes.

Dr. René Pinet por aceptar ser sinodal de este trabajo y por las correcciones realizadas. Por su actitud optimista la cual me contagiaba para seguir adelante y por sus comentarios el día que me entregó la tesis corregida, los cuales me han levantado el ánimo para continuar con mis estudios.

Al CICESE y el Departamento de Oceanografía Física por el espacio y el equipo de cómputo proporcionados durante el período en que realicé este proyecto.

Al proyecto *Fase I de Oceanografía por Satélite* (DAJJ002/750/00) por el apoyo brindado para el desarrollo del trabajo.

A mi mamá y mi hermano por estar siempre al pendiente de mí. Después de la tormenta llegó la calma, aunque se tardó un poquito!!! Pocos, pero una GRAN FAMILIA.

Querido y tremendo hermano gracias por estar al pendiente de la casa y de mi mamá, por apoyarnos en los viajes y por picharme el examen profesional.

A Pedro Osuna por estar justo el día en que llegué a CICESE y sentarnos junto con Paco en el laboratorio de oleaje para discutir el tema de tesis y proponer que simulara el oleaje de la bahía con el modelo SWAN. En que lío me metí, pensé después.

A Roberto Padilla por el interés en este trabajo y sobretodo por sus correcciones, las cuales mejoraron mucho la tesis, sin tener la obligación de hacerlas, GRACIAS.

A mis amigos:

Jorge por estar siempre disponible para los amigos y resolver las tareas primero que todos y después pasárnoslas, porque la verdad, sin ti, muchos de nosotros no hubiéramos terminado la carrera. Y por escuchar mis locuras.

Erick, espera espera espera, por tu amistad, compañerismo, paciencia, puntadas, chistes, y todo lo demás, recuerda ya no estamos en el hoyo, PURO CACHANILLA!!!

Lizz por tu amistad, apoyo y esas idas al Potatoes. Por aguantar mis berrinches, mis tonterías y esos momentos curadas y tristes que compartimos. Por las

desveladas cantando y tomándonos un sabroso vino.

Karel, por ser mi amiga desde que empezamos la carrera, por escucharme en esos días felices y algunos tristes. A Jaime por hacer feliz a mi amiga y por prestarme el libro de estadística. Gracias por invitarme a su casa y **Les deseo lo mejor!!!**

Claudia, Verónica, Ricardo por pasar momentos juntos. Dejaron muchas cosas en mí, siempre me acuerdo de ustedes.

A mis compañeros, generación Nautilus, con los cuales pasé ratos bien curadas: Bheba, Gina, Zaida, Aldo, Rubén, Iván, Diego, Poncho, Luis, Noe, Andrés, Momo, Juan Carlos, Lalo, Khork, Beto, Mónica, Claudia, Velo, Víctor, Addy...

Al quinteto diabólico: Diana, Celia, Pili y Edith, aunque un poco lejos pero siempre en contacto. Una amistad de añooooos. Las extraño. Diego por ponerle sabor a este grupo.

Una carrera larga, pero que los maestros se encargaron de hacerla interesante para no desistir, gracias a: Pinal, Cupul, Trujillo, Raúl Aguilar, Walls, Adán, Pou, Roberto Millán, Alma Delia, Asdrúbal, Yolanda, Emilio Palacios gracias por la batimetría, Lupita García, Ana María.... También a Arturo, Mily, Lupita .

A Mario y Carlos por su aportación de hojas para las tesis impresas, por su

amistad y hacerme más amena mi estancia en CICESE.

Martín y Gaby por ser mis amigos y a esa cosita que está precioso, **Felicidades!!!**

Selene, muchas gracias por estar en el lugar correcto, a la hora correcta y en el momento correcto, no se que hubiera hecho sin ti, amiga te quiero un chorro, y ojalá estuvieras este día conmigo, aunque si lo estás.

A mi tercer hogar, Fam. Herrera muchas gracias por aceptarme en su casa y familia y no correrme hasta que acabé la carrera!!!

Mónica, que bueno que entré al jazz, por que me dejó una gran amiga, eres súper curada y gracias por tu apoyo en esos días curadas y no tan curadas.

Gracias a August, Ryan, Iván, Joel Gaona, Lorena, Billy, Dila, Omar (gym), Tania, Estefanía, Myriam, Cristina, Hommie, Edna, Luis,, y a todos aquellos que conocí durante mi estancia en Ensenada. No se sientan si alguien faltó,, please.

Por siempre.....**CIMARRÓN!!!**

# ÍNDICE GENERAL

<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>PREDICCIÓN DEL OLEAJE.....</b>	<b>4</b>
	II.1 Introducción.....	4
	II.2 Modelo SWAN.....	6
	II.2.1 Introducción.....	6
	II.2.2 Funcionamiento del modelo.....	6
	II.2.3 Ecuación de balance de acción.....	7
	II.2.4 Suministro de energía por el viento.....	8
	II.2.5 Interacciones no lineales entre olas.....	9
	II.2.6 Disipación de energía por el rompimiento en aguas profundas.....	11
	II.2.7 Disipación de energía por el rompimiento inducido por la profundidad.....	12
	II.2.8 Disipación de energía por fricción con el fondo.....	12
	II.2.9 Esquema numérico de la propagación.....	13
<b>III</b>	<b>ANTECEDENTES SOBRE EL MODELO SWAN.....</b>	<b>15</b>
	III.1 Antecedentes sobre el oleaje de la Bahía de Todos Santos.....	19
<b>IV</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
<b>V</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>21</b>
<b>VI</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
<b>VII</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
	<b>VII.1 Predicciones del campo de oleaje.....</b>	<b>30</b>
	VII.1.1 Simulación 1.....	30
	VII.1.2 Simulación 2.....	32
	VII.1.3 Simulación 3.....	34
	VII.1.4 Simulación 4.....	36
	VII.1.5 Simulación 5.....	38
	VII.1.6 Simulación 6.....	40
	VII.1.7 Simulación 7.....	42

VII.1.8 Simulación 8.....	44
VII.1.9 Simulación 9.....	46
VII.1.10 Simulación 10.....	48
VII.1.11 Simulación 11.....	50
VII.1.12 Simulación 12.....	52
VII.1.13 Simulación 13.....	54
<b>VII.2 Espectros en frecuencia y direccionales.....</b>	<b>56</b>
VII.2.1 Punto PSM.....	56
VII.2.2 Punto PM.....	65
VII.2.3 Punto Ra.....	74
VII.2.4 Punto Rb.....	83
VII.2.5 Punto BE.....	92
VII.2.6 Punto PB.....	101
<b>VIII DISCUSIONES.....</b>	<b>110</b>
VIII.1 Predicciones del campo de oleaje.....	110
VIII.2 Espectros en frecuencia y direccionales.....	113
<b>IX CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
<b>X ANEXO.....</b>	<b>119</b>
<b>XI BIBLIOGRAFÍA CITADA.....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Espectro cualitativo de la energía contenida en las diversas ondas que se presentan en el océano. Tomada de Kinsman (1984). ..... 2
- Figura 2. Localización del área de estudio: Bahía de Todos Santos (BTS) dentro del recuadro azul. 21
- Figura 3. Batimetría de la Bahía de Todos Santos con contornos batimétricos en metros. Puntos específicos donde se analizó la variación de condiciones de frontera. Fronteras Norte (N), Oeste (O) y Sur (S) donde se suministraron las condiciones de frontera. .... 23
- Figura 4. Ejemplo del archivo de entrada (INPUT) utilizado en el modelo SWAN donde se incluyen todos los comandos para la simulación 1. .... 26
- Figura 5. Ejemplo del archivo de entrada (INPUT) utilizado en el modelo SWAN donde se incluyen todos los comandos para la simulación 9. .... 27
- Figura 6. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 1 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=12s$  y dirección de propagación del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos y escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal en la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ . .... 31
- Figura 7. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 2 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ . .... 33
- Figura 8. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 3 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ . 35
- Figura 9. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 4 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ . .... 37
- Figura 10. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 5 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ . 39
- Figura 11. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 6 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ . .... 41
- Figura 12. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 7 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ . 43

- Figura 13. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 8 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ . ..... 45
- Figura 14. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 9 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ . ..... 47
- Figura 15. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 10 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ . ..... 49
- Figura 16. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 11 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ . ..... 51
- Figura 17. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 12 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ . ..... 53
- Figura 18. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 13 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje que varía de  $315^\circ$  a  $327^\circ$  hacia el sureste (SE-E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ . ..... 55
- Figura 19. Espectros en frecuencia del punto SM, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8 como resultado de las simulaciones. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 57
- Figura 20. Espectros en frecuencia del punto SM, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 58
- Figura 21. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ . ..... 61
- Figura 22. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican

- las condiciones de frontera de cada simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ ..... 62
- Figura 23. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de cada simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ ..... 63
- Figura 24. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto SM correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . 64
- Figura 25. Espectros en frecuencia del punto PM, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8 como resultado de las simulaciones. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz..... 66
- Figura 26. Espectros en frecuencia del punto PM, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 67
- Figura 27. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PM correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ ..... 69
- Figura 28. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ ..... 70
- Figura 29. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ ..... 72
- Figura 30. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto SM correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en  $m^2/Hz$ ... 73
- Figura 31. Espectros en frecuencia del punto Ra, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz..... 75
- Figura 32. Espectros en frecuencia del punto Ra, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 76
- Figura 33. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Ra correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ ..... 78

- Figura 34. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Ra correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ . ..... 79
- Figura 35. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Ra correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ . ..... 81
- Figura 36. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto Ra correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en  $m^2/Hz$ . .. 82
- Figura 37. Espectros en frecuencia del punto Rb, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 84
- Figura 38. Espectros en frecuencia del punto Rb, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 85
- Figura 39. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Rb correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ . ..... 87
- Figura 40. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Rb correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ . ..... 88
- Figura 41. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Rb correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ . ..... 90
- Figura 42. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto Rb correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en  $m^2/Hz$ . .. 91
- Figura 43. Espectros en frecuencia del punto BE, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 93
- Figura 44. Espectros en frecuencia del punto BE, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. .... 94
- Figura 45. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto BE correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican

	las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en $m^2/Hz$ .....	96
Figura 46.	Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto BE correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en $m^2/Hz$ .....	97
Figura 47.	Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto BE correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 10, c) 11 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en $m^2/Hz$ . ....	99
Figura 48.	Espectro direccional en coordenadas polares para el punto BE correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en $m^2/Hz$ .	100
Figura 49.	Espectros en frecuencia del punto PB, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.....	102
Figura 50.	Espectros en frecuencia del punto PB, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz. ...	103
Figura 51.	Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PB correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en $m^2/Hz$ .....	105
Figura 52.	Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PB correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en $m^2/Hz$ .....	106
Figura 53.	Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PB correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en $m^2/Hz$ . ....	108
Figura 54.	Espectro direccional en coordenadas polares para el punto PB correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en $m^2/Hz$ .	109
Figura 55.	Espectros en frecuencias en la frontera oeste resultantes de las distintas simulaciones. El número de la simulación se indica en la esquina superior derecha. Densidad de energía en $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.....	114
Figura 56.	Espectros direccionales en coordenadas polares de la frontera oeste resultantes de las distintas simulaciones. En la esquina superior izquierda se indica el número de las simulaciones. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en $m^2/Hz$ . ....	115

## LISTA DE TABLAS

Tabla I. Puntos seleccionados alrededor de la bahía y su localización (X, Y) en la malla computacional. San Miguel (SM), Punta Morro (PM), Rompeolas a y b (Ra y Rb, respectivamente), Barra del Estero (BE), Punta Banda (PB). Profundidad de cada punto en metros (m).....	24
Tabla II. Valores de la altura significativa ( $H_s$ ), período y dirección asociada al pico espectral, ( $T_p$ ) y ( $\theta$ ) respectivamente, para cada uno de las simulaciones. ....	28
Tabla III. Resultados de la simulación 1 para cada uno de los puntos, $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	30
Tabla IV. Resultados de la simulación 2 para cada uno de los puntos $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	32
Tabla V. Resultados de la simulación 3 para cada uno de los puntos, $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	34
Tabla VI. Resultados de la simulación 4 para cada uno de los puntos $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	36
Tabla VII. Resultados de la simulación 5 para cada uno de los puntos $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje.....	38
Tabla VIII. Resultados de la simulación 6 para cada uno de los puntos, $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje.....	40
Tabla IX. Resultados de la simulación 7 para cada uno de los puntos $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	42
Tabla X. Resultados de la simulación 8 para cada uno de los puntos $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	44
Tabla XI. Resultados de la simulación 9 para cada uno de los puntos $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	46
Tabla XII. Resultados de la simulación 10 para cada uno de los puntos $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje.....	48
Tabla XIII. Resultados de la simulación 11 para cada uno de los puntos, $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	50
Tabla XIV. Resultados de la simulación 12 para cada uno de los puntos, $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje. ....	52
Tabla XV. Resultados de la simulación 13 para cada uno de los puntos, $H_s$ , $T_p$ y dirección con la que arribó el oleaje.....	54

## **Simulación numérica del oleaje en la Bahía de Todos Santos: Influencia de las condiciones de frontera.**

El oleaje es uno de los fenómenos más importantes en la oceanografía costera ya que es un factor que influye en la modificación de la línea de costa, en la navegación, acumulación de sedimento en playas así como la planeación para protección de playas y construcción de puertos. Por esto el estudio y conocimiento de su comportamiento se ha vuelto día con día más importante. Lo cual ha llevado al desarrollo de modelos numéricos para realizar simulaciones del oleaje así como predicciones del mismo para zonas donde se cuente con información de viento y mediciones reales. El modelo numérico SWAN se utiliza para realizar tanto simulaciones como predicciones del oleaje en regiones costeras a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría; reúne los procesos físicos sobre la generación del oleaje y su disipación de energía basado en la ecuación de balance de acción. La Bahía de Todos Santos se encuentra ubicada al noroeste de la península de Baja California, cuenta con varios kilómetros de playas y algunos rasgos geomorfológicos, los cuales son afectados por la incidencia del oleaje. Lo que no existe en esta área son mediciones de oleaje dentro y fuera de la bahía, por lo que se ajustó el modelo SWAN para simular campos de oleaje de la bahía y espectros en frecuencia y direccionales en distintos puntos para analizar la sensibilidad del modelo al suministrarle distintas condiciones de frontera. Los campos de oleaje procesados por el modelo SWAN para toda el área de estudio están influenciados por las condiciones de frontera que se le suministraron al modelo. La variación de la altura significativa a lo largo de la frontera oeste influye en la distribución de las alturas significativas dentro de la bahía, así como en la evolución de los espectros de cada uno de los puntos. La generación de un segundo pico en los espectros en frecuencia y direccionales se debe al proceso físico interacciones no lineales entre las olas (triadas), el cual transfiere energía de frecuencias bajas a altas. Es posible utilizar el modelo SWAN para predecir el oleaje dentro de la bahía al contar con condiciones de frontera reales.

# Simulación numérica del oleaje en la Bahía de Todos Santos: Influencia de las condiciones de frontera.

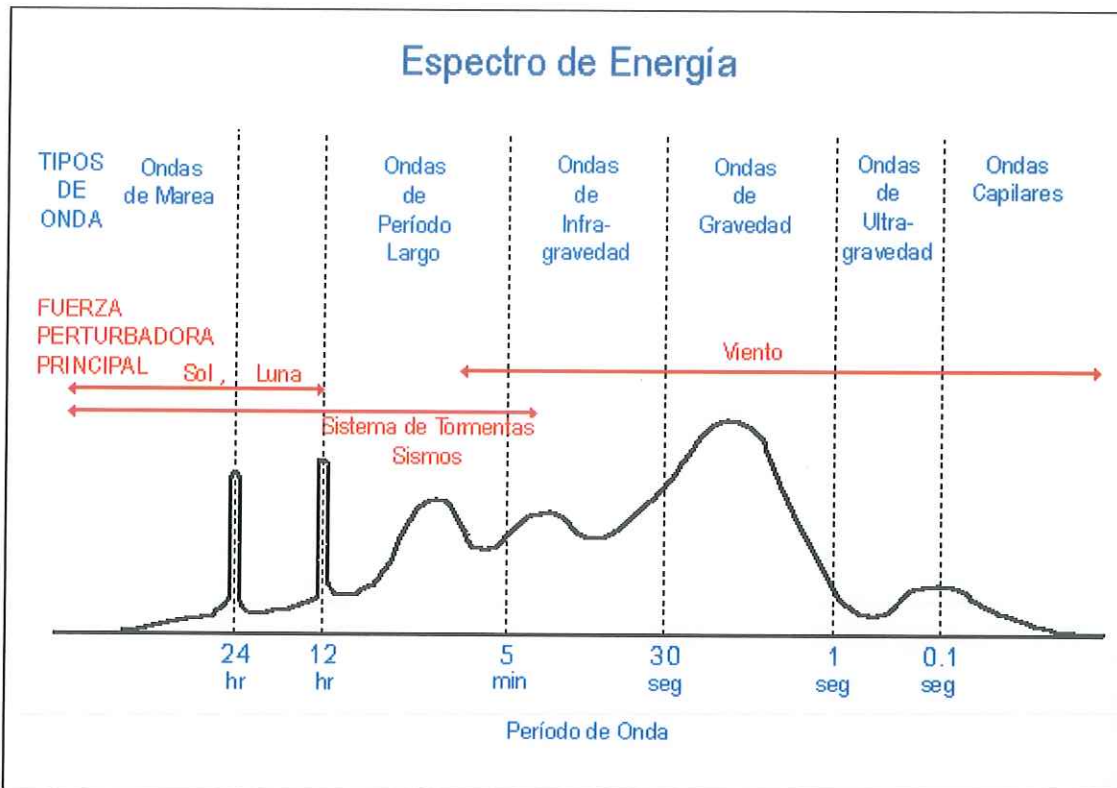
## I INTRODUCCIÓN

En los océanos ocurren varios procesos o fenómenos que interactúan con la superficie terrestre. Una de las ciencias que se encarga de estudiar dichas interacciones es la oceanología, ya que se encarga de estudiar los fenómenos, procesos y cambios que se presentan en los océanos así como su interacción con la atmósfera y la Tierra. Debido a que en los océanos, mares y estuarios ocurren fenómenos físicos, químicos, geológicos y biológicos, la oceanología se ha dividido en estas cuatro áreas.

En la oceanografía física se estudia el medio marino desde un punto de vista físico. En este medio ocurren varios procesos físicos entre los cuales podemos mencionar la dinámica de los océanos, el cambio global, las mareas, el oleaje y ondas internas.

El oleaje, es un fenómeno que está presente en el mar y lo podemos mirar día con día al detenernos en una playa y observar como rompen las olas a la orilla del mar, al pasar un barco de una ola a otra, o simplemente observar a los surfistas como se deslizan en las olas. Pero, desde el punto de vista físico, ¿Qué es el *oleaje*?

Los tipos de ondas que existen en el océano difieren entre sí por su período o frecuencia (Fig. 1). La región espectral comprendida entre 1 y 30 segundos de período es la más energética y corresponde a las ondas producidas por el viento, conocidas como oleaje (Kinsman, 1984).



**Figura 1. Espectro cualitativo de la energía contenida en las diversas ondas que se presentan en el océano. Tomada de Kinsman (1984).**

El oleaje es un fenómeno ocasionado por la acción del viento sobre la superficie del mar, una vez generado su permanencia y propagación se deben a la gravedad que actúa como una fuerza restauradora. Las características del oleaje varían debido de tres factores: la velocidad del viento, la distancia que el viento sopla sobre el mar (fetch) y su persistencia (Bascom, W. 1964). Los principales parámetros que describen la naturaleza de una ola son su longitud de onda, su altura, su período y su dirección de propagación (Kinsman, 1984).

La teoría del oleaje se basa en el concepto de ondas simples: aquellas que forman un patrón estrictamente periódico con una sola longitud de onda, un sólo período y una sola dirección de propagación. Pero en la realidad el oleaje se presenta de forma irregular y puede

ser descrito como un oleaje compuesto, donde se presenta un espectro completo de longitudes de onda o períodos y diferentes direcciones de propagación.

Debido a que es un fenómeno en el que sus características y aproximación a la costa cambian constantemente, es de vital importancia estudiar su comportamiento así como realizar su predicción, ya que es un factor importante que influye en la oceanografía, pesca, navegación, protección de playas, modificación de la línea de costa y en la recreación del ser humano.

La Bahía de Todos Santos cuenta con varios kilómetros de playas y otros rasgos geomorfológicos como puntas, la boca del estero y la rada portuaria que son afectados por la incidencia del oleaje, el cual es generado por tormentas y vientos fuertes durante todo el año en regiones del Océano Pacífico, lo que ocasiona cambios en las características del oleaje y se manifiesta de distintas formas en distintos puntos de la bahía.

Para describir y analizar dichas características se utilizó un modelo numérico de tercer generación (SWAN, Simulating WAVes Nearshore, Ris, *et al* (1999)), el cual fue diseñado explícitamente para aplicaciones en aguas someras, donde es necesario usar una alta resolución, lo que da como resultado una mejor descripción del estado del mar en regiones costeras. Son escasos los estudios que se han realizado sobre la simulación de oleaje en la Bahía de Todos Santos donde se use algún modelo numérico.

## II PREDICCIÓN DEL OLAJE

### II.1 Introducción.

La predicción del oleaje en un inicio se realizaba manualmente, lo cual requería de una gran agudez en los procesos responsables del crecimiento, la propagación y el decaimiento del oleaje (Komen, 2000). El interés sobre la predicción del oleaje creció durante la Segunda Guerra Mundial, debido a que se necesitaba el conocimiento del estado del mar para llevar a cabo operaciones marítimas. Las primeras predicciones se basaron en un trabajo que proporcionaba una descripción paramétrica del estado del mar con el uso de relaciones empíricas de oleaje local y de zonas lejanas (Komen *et al.*, 1994).

Posteriormente se introdujo el concepto " espectro del oleaje ", lo cual representó un avance importante, ya que nos brinda una visión más amplia de las distintas características del oleaje, pero este concepto no estaba acompañado por una ecuación dinámica que describiera en sí la evolución de dicho espectro, entre los años 1956 y 1957 esta ecuación fue desarrollada por diferentes investigadores, quienes introdujeron el concepto de la ecuación de transporte espectral (Komen *et al.*, 1994).

El desarrollo completo de la ecuación de transporte espectral se basó en la publicación de nuevas teorías, a partir de éstas se obtuvo una expresión general (función fuente) de la ecuación donde se incluyen los diferentes términos que causan variación en los parámetros del oleaje. Estos términos son la interferencia que tiene el viento para proporcionar o restar energía al oleaje, las interacciones no lineales que ocurren entre olas y la disipación de energía por la fricción del oleaje con el fondo (Komen *et al.*, 1994).

En la actualidad la predicción del oleaje se realiza mediante el uso de modelos numéricos que simulan el desarrollo y la propagación del oleaje sobre la superficie del mar. Los modelos que se han desarrollado para este fin se clasifican como modelos de primera, segunda y tercera generación.

Los modelos de primera generación se desarrollaron en los sesentas, en estos modelos se hacía una descripción sobre el crecimiento de manera lineal. Además los procesos físicos, ya antes mencionados, no eran descritos.

En la segunda mitad de los setentas se introdujeron los modelos de segunda generación para representar el balance de energía espectral y describir las interacciones no lineales de una forma simplificada y parametrizada (Hasselmann, 1991).

Los modelos de tercera generación desarrollaron un modelo espectral completo con una representación explícita del término de interacciones no lineales y de los procesos físicos relevantes para la evolución del oleaje. Estos modelos de tercera generación nos brindan una descripción completa de manera bidimensional del estado del mar (Komen *et al.*, 1994).

Las propiedades direccionales del oleaje están descritas por el espectro bidimensional de las olas, el cual representa la distribución de la densidad de energía con respecto a la dirección y la frecuencia o número de onda.

## **II.2 Modelo SWAN**

### **II.2.1 Introducción.**

El modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) fue desarrollado por Booij *et al.* (1999) en la Universidad Técnica de Delft, para estimar las condiciones del oleaje en regiones con escalas hasta 100 kilómetros, en zonas costeras con estuarios, canales de mareas, planicies de marea, islas de barrera, canales, lagos, estuarios, etc. con vientos locales y corrientes ambientales (Booij *et al.*, 1999).

Es un modelo de tercera generación que describe la evolución de la energía del oleaje por medio de la ecuación de balance de acción a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría. Además reúne los procesos físicos, sobre la generación del oleaje, la disipación de energía y las interacciones no lineales entre olas, en un código numérico que es eficiente para escalas pequeñas y con aplicaciones de alta resolución. Es un modelo con un esquema de propagación implícito basado en diferencias finitas (Booij *et al.*, 1999).

### **II.2.2 Funcionamiento del modelo.**

En los procesos de propagación del oleaje se incluyen: propagación en el espacio geográfico y espectral, refracción y asomeramiento debido a las variaciones de la profundidad y la presencia de corrientes, obstrucción del oleaje por corrientes opuestas y la transmisión a través de un obstáculo.

Los procesos de generación y disipación que se incluyen son los asociados al suministro de energía por parte del viento, la disipación por el rompimiento en aguas profundas, los inducidos por la fricción con el fondo y por el rompimiento inducido por el fondo, así como los relacionados con la redistribución de la energía por interacciones no lineales.

La difracción y la reflexión no son modeladas, por lo tanto el cálculo cerca de obstáculos o radas portuarias no es muy exacto.

El modelo se puede utilizar en modo estacionario o no estacionario. En el modo estacionario se parte del reposo y se elimina el variable tiempo de la ecuación de balance de acción y el cálculo se realiza de forma iterativa para el oleaje con un tiempo de residencia corto en el área de cálculo. En el modo no estacionario se utiliza la ecuación de balance de acción con todos sus términos, incluido el temporal.

### II.2.3 Ecuación de balance de acción.

Este modelo se basa en la ecuación de balance de acción para describir la evolución del espectro de oleaje en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

donde el primer término del lado izquierdo representa la razón de cambio local de la densidad de acción ( $N$ ) en el tiempo, el segundo y el tercero representan la propagación de la acción en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $C_x$  y  $C_y$  en el espacio  $x$  y  $y$  respectivamente), el cuarto término representa el cambio de la frecuencia relativa debido a variaciones en las profundidades y en las corrientes ( $C_\sigma$  es la velocidad de propagación en el espacio  $\sigma$ ), el quinto término representa la refracción inducida por corrientes y cambios en la profundidad ( $C_\theta$  es la velocidad de propagación en el espacio  $\theta$ ). Las expresiones para la velocidad de propagación son tomadas de la teoría lineal. Del lado derecho de la ecuación se

encuentra el término fuente de energía,  $S [=S(\sigma, \theta)]$ , que representa los efectos de generación, disipación y las interacciones no lineales.

El término  $S$  puede ser representado como una sumatoria de procesos físicos independientes

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

donde  $S_{in}$  es la representación de los efectos de la generación y el crecimiento de las olas por el efecto del viento,  $S_{nl}$  representa la transferencia de energía debido a interacciones no lineales entre las componentes del espectro y  $S_{ds}$  responde al decaimiento de energía del oleaje debido a varios procesos, por ejemplo, la fricción con el fondo, al rompimiento en aguas profundas y al rompimiento inducido por la profundidad.

#### **II.2.4 Suministro de energía por el viento.**

La transferencia de energía del viento al oleaje está descrita en el modelo SWAN por dos mecanismos, el primero es el desarrollado por Phillips (1957), en el cual se parte de un mar en calma y la generación de oleaje se da a través de fluctuaciones de presión provocadas por un viento turbulento. El segundo fue descrito por Miles (1957), en éste se parte de un oleaje ya existente y se considera que las olas crecen de manera exponencial conforme transcurre el tiempo debido a la interacción entre las fluctuaciones de presión inducidas por la cizalladura vertical del viento en la interfase océano-atmósfera.

El término de crecimiento lineal es efectivo al principio de la generación del oleaje, después la función de crecimiento exponencial de Miles (1957) sobrepasa a la de Phillips en importancia.

El término fuente correspondiente para este mecanismo es comúnmente descrito como la sumatoria del crecimiento lineal y exponencial:

$$S_m(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta)$$

en donde  $A$  representa el crecimiento lineal (resonancia de Phillips) y  $B$  el crecimiento exponencial (retroalimentación de Miles), los cuales dependen de la frecuencia y dirección del oleaje así como de la velocidad y dirección del viento.

### **II.2.5 Interacciones no lineales entre olas.**

En aguas profundas las interacciones entre olas dominan la evolución del espectro en bajas frecuencias. Transfieren energía de frecuencias más altas que la frecuencia del pico hacia bajas frecuencias (ésto mueve el pico hacia las frecuencias bajas) y hacia altas frecuencias (Young, 1999).

En aguas someras, las interacciones no lineales (tríadas) transfieren energía de las bajas frecuencias hacia las altas frecuencias lo cual puede cambiar drásticamente el espectro y afectar los procesos de generación y disipación del oleaje (Beji y Battjes, 1993).

El primer intento en describir las tríadas como un término fuente fue hecho por Abreu *et al.* (1992). Donde obtuvieron una expresión que está restringida a olas no dispersivas en aguas someras, lo cual no es congruente en la mayoría de las aplicaciones del oleaje. En 1995, Eldeberky y Battjes realizaron un desarrollo más sobre las interacciones no lineales donde transformaron la parte de la amplitud del modelo de Boussinesq de Madsen y Sørensen (1993) en una formulación de densidad de energía y parametrizaron la bi-fase de las olas en base a las observaciones de laboratorio.

Después se obtuvo una aproximación discreta de tríadas (DTA) para olas donde sólo se consideraron las interacciones dominantes entre olas. Estas aproximaciones se comprobaron con observaciones de olas aleatorias de longitudes largas que rompían sobre una barra de arena sumergida (Beji y Battjes, 1993), las cuales parecieron describir de manera satisfactoria las características esenciales de la transferencia de energía del pico primario del espectro hacia armónicos superiores.

Las tríadas pueden presentarse entre olas con frecuencias y números de onda que satisfagan la siguiente relación:

$$f_1 \pm f_2 = f_3$$

$$k_1 \pm k_2 = k_3$$

donde  $f_i$  es la frecuencia escalar y  $k_i$  es el vector número de onda de la  $i$ ésima componente de ola. Las componentes 1 y 2 cumplen con la relación de dispersión lineal. Las componentes que satisfacen las ecuaciones anteriores pueden interactuar de manera no lineal e intercambiar energía y momentum.

Las pruebas iniciales hechas por Elderberky y Battjes (1995) indican que el término fuente,  $S_{nl}$ , es capaz de modelar el desarrollo del segundo armónico dentro del espectro para aguas someras. Es por eso que este término se incluyó en el modelo SWAN.

## II..2.6 Disipación de energía por el rompimiento en aguas profundas.

La transferencia de energía del viento a las olas da como resultado un aumento en la amplitud de la ola. Este proceso continúa hasta que la ola llega a ser inestable y rompe. Esta forma de rompimiento es generalmente llamada *white-capping*, está controlada por la pendiente de la ola, en contraste con el rompimiento por la profundidad limitada, la cual podría ocurrir en la playa (Young, 1999). Este rompimiento se manifiesta como la espuma blanca que se forma en la cresta de las olas.

Este término fuente,  $S_{ds}$ , representa un fuerte proceso no lineal, el cual no puede ser tratado por las técnicas de perturbación estándares que son típicamente aplicadas a interacciones con poca energía ( e.g.  $S_{nl}$ ).

El  $S_{ds}$  es controlado primeramente por la pendiente de la ola. La formulación de este término está basada en el modelo de Hasselmann (1974) y adaptada por el grupo que creó el modelo SWAN, WAMDI (1988):

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

donde  $\Gamma$  es un coeficiente dependiente de la pendiente,  $k$  es el número de onda,  $\tilde{\sigma}$  y  $\tilde{k}$  son la frecuencia promedio y el número de onda promedio, respectivamente.  $E(\sigma, \theta)$  es el espectro de densidad de energía.

Komen *et al.* (1984) estimaron el valor de  $\Gamma$  mediante una aproximación del balance de energía del oleaje en condiciones completamente desarrolladas. Lo cual implica que este valor dependa de la formulación utilizada para el término fuente, suministro de energía por el viento.

## II.2.7 Disipación de energía por el rompimiento inducido por la profundidad.

La disipación de energía inducida por la profundidad se lleva a cabo cuando las olas se propagan hacia profundidades menores, lo que conduce a un aumento en la altura de la ola. Si la relación de la altura de la ola entre la profundidad es muy grande, la ola empieza a romper y su energía se disipa de manera rápida (Vega, 1999).

En el modelo SWAN se calcula este término fuente con la siguiente expresión:

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

donde  $E_{tot}$  es la energía total del oleaje,  $D_{tot}$  (negativa) es la razón de disipación de la energía total debido rompimiento del oleaje de acuerdo a Battjes y Janssen (1978) y  $E(\sigma, \theta)$  es el espectro de densidad de energía.

## II.2.8 Disipación de energía por fricción con el fondo.

Cuando el oleaje interactúa con el fondo disipa su energía por de varias formas, éstas pueden ser por la fricción con el fondo, por movimientos del fondo, por percolación y por dispersión en irregularidades del fondo, para suelos arenosos en plataformas continentales este mecanismo es dominante y se representa generalmente como:

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

donde  $C_{bottom}$  es un coeficiente de fricción con el fondo y depende del valor cuadrático medio de la velocidad orbital del fluido en el fondo.

## II.2.9 Esquema numérico de la propagación.

El método numérico que se utiliza para resolver la ecuación de balance de acción del modelo SWAN, es un esquema de diferencias finitas que se aplica en las cinco dimensiones (tiempo, espacio geográfico y espectral). Este esquema describe la propagación del oleaje sin los términos fuentes de generación, disipación e interacciones entre las olas (Booij *et al*, 1999). En el modelo el oleaje se propaga a través del espacio geográfico (rectilíneo con velocidades  $C_x$  y  $C_y$ ) y a través del espacio espectral (con velocidades  $C_\sigma$  y  $C_\theta$ ).

El esquema numérico de la propagación que se utiliza en el modelo corresponde a una secuencia de cuatro intervalos de  $90^\circ$ . La información en el punto de la malla  $(x_i, y_j)$  es determinado por la información de dos puntos hacia arriba  $(x_{i-1}, y_j)$  y  $(x_i, y_{j-1})$ . Con estos dos puntos los procesos computacionales son estables para oleaje con direcciones en el intervalo direccional de  $90^\circ$  entre las líneas  $x = x_i$  y  $y = y_j$ . Las olas de estas direcciones son propagadas con este esquema sobre toda la región geográfica. Mediante la rotación de  $90^\circ$  del esquema, se propaga la energía espectral en el siguiente cuadrante direccional. Esto se repite dos veces más para cubrir los cuatro cuadrantes. De esta manera se logra que la energía en todas las direcciones se propague por todo el espacio geográfico.

Esto podría ser suficiente para propagar el oleaje si no existiera la refracción de las olas. Pero con la presencia de la refracción, la acción de las olas puede moverse de un cuadrante a otro. Esto es tomado en cuenta en el modelo mediante la repetición de los procesos computacionales con resultados convergentes. Cuando se utiliza el modelo en modo estacionario al presentarse un cambio menor al 1% en la altura significativa y en el período promedio de la ola en todos los puntos de la malla concluye la iteración. La refracción se representa con un

esquema implícito central para cada cuadrante direccional. En el espacio espectral se utiliza el mismo esquema pero con una aproximación centrada de segundo orden.

Existen dos tipos de fronteras en el espacio geográfico, la línea de costa y las fronteras de mar abierto, las dos son completamente absorbentes para la energía del oleaje que abandona el área de cálculo. Las condiciones de frontera que se imponen pueden representar una energía incidente a lo largo de las fronteras abiertas y laterales.

### III ANTECEDENTES SOBRE EL MODELO SWAN.

Los modelos utilizados para predecir el oleaje en aguas profundas pueden ser aplicados en aguas someras, pero las operaciones computacionales requieren demasiado esfuerzo, capacidad y tiempo, ya que una malla costera regularmente cuenta con 20 000 puntos en cambio una malla oceánica contiene aproximadamente 2 000 puntos. Lo cual hace que estos modelos sean poco prácticos en aplicaciones dentro de la zona costera. Debido a estas razones se inició el desarrollo de modelos espectrales para la zona costera.

Holthuijsen *et al* (1993) desarrollaron el modelo SWAN a partir de modelos de oleaje para aguas someras ya existentes, los cuales se basaron en modelos para aguas profundas. Pretendían que fuera un modelo para aguas someras que cubriera un intervalo completo de frecuencias y direcciones además de que sus operaciones computacionales fueran más rápidas con el paso de los años y poderlo utilizar en computadoras personales.

Se basaron en la ecuación de balance de la acción para desarrollar el modelo. El esquema numérico que utilizaron para la propagación del oleaje es similar al esquema de secuencias de cuatro intervalos de  $90^\circ$  (descrito en la sección II.2.9 Esquema numérico de la propagación). Agregaron al modelo los procesos físicos fricción con el fondo y rompimiento en la zona de surf como términos fuentes. A partir del desarrollo del modelo realizaron simulaciones para demostrar un buen desempeño del esquema de propagación. Los resultados en dos casos mostraron ser buenos, uno de ellos incluía la dirección invertida de las olas debido a la refracción. También encontraron que la comparación de los resultados del modelo con las observaciones mostró un buen modelamiento de los procesos físicos incluidos y que el siguiente

paso a desarrollar era agregar las interacciones no lineales para obtener una evolución completa del espectro del oleaje

A partir del desarrollo hecho por Holthuijsen *et al* (1993), Booij *et al* (1999) realizaron la descripción completa del modelo así como simulaciones para validarlo. En la descripción hacen una breve introducción del modelo, donde mencionan que es un modelo que describe el oleaje con el espectro bidimensional de densidad de acción ya que con la presencia de corrientes esta densidad se conserva. También describen el esquema de propagación y cada uno de los procesos físicos o términos fuentes que se incluyen en el modelo para una mejor simulación del oleaje durante su propagación en aguas someras. Las pruebas de propagación del oleaje donde se incluyen el asomeramiento y la refracción con o sin corrientes mostraron concordancia con las soluciones analíticas. La prueba realizada para las interacciones no lineales resultó ser similar con las observaciones de laboratorio de *Beji y Battjes* (1993). Un resultado similar se dio en la prueba del proceso físico rompimiento inducido por la profundidad con las observaciones de laboratorio de *Battjes y Janssen* (1978). Por último mencionan que es necesario hacer experimentos con condiciones reales.

Ris *et al* (1999) realizaron comprobaciones del modelo SWAN en tres regiones costeras con batimetrías complejas y diferentes características, encontraron que los resultados procesados por el modelo concuerdan o son similares con los datos medidos. La forma del espectro no es muy bien reproducida, en particular el crecimiento en altas frecuencias es sobreestimado. También encontraron que al no incluir la fricción con el fondo y el rompimiento inducido por la profundidad las olas podrían ser más altas y sin las triadas podrían ser mas largas. Al comparar los resultados del modelo con las observaciones mostraron un error promedio en la altura significativa y período

promedio del 10%. Mencionan que un mejoramiento en el modelo requiere de un mayor trabajo en la parte teórica y así lograr simular adecuadamente casos más complejos.

Vega Puente (1999) realizó experimentos numéricos con el modelo SWAN donde investigó el papel que juegan los mecanismos físicos incluidos en el modelo así como la evolución de la forma de la distribución direccional del espectro para regiones cercanas a la costa y utilizó la batimetría correspondiente al lago George, Australia. Encontró que las interacciones no lineales en cuartetas, el rompimiento en aguas profundas y la intensidad del viento son los procesos físicos que brindan una mayor contribución a la distribución direccional.

Wornom y Welsh (2000) realizaron una comparación entre los modelos WAM y SWAN para predecir el oleaje cercano a las costas en Virginia y Carolina del Norte, Estados Unidos. Además realizaron comparaciones entre la interfase WAM/SWAN que se incluye como una opción en el modelo SWAN y permite a las simulaciones un anidamiento fino de las condiciones de frontera al ser suministradas de simulaciones del modelo WAM con un anidamiento grueso. En estas comparaciones se encontró que las predicciones del oleaje cercano a la costa procesadas por el modelo SWAN cuentan con mayor precisión que el modelo WAM. Además de que las interacciones no lineales mejoran ligeramente las predicciones del modelo SWAN. Y por último encontraron que los modelos SWAN y WAM predicen de manera satisfactoria el período del pico espectral.

Monbaliu y Defeverre (2000) usaron el modelo SWAN para calcular la climatología del oleaje en una región costera en Bélgica que presenta una batimetría complicada. Utilizaron espectros de oleaje observados y calculados fuera de la costa como condición de frontera para obtener la

propagación del oleaje hacia la costa y así calcular el espectro en aguas someras. Encontraron que las simulaciones realizadas por el modelo concuerdan con los datos medidos.

Lombardi y Peirache (2001) utilizaron imágenes de radar de apertura sintética y mediciones in situ del campo de oleaje tomadas por un sensor de presión y una boya en la región de Rosarito, BC., México para validar el modelo numérico SWAN. Encontraron que las correlaciones para altura significativa, dirección y periodo obtenidas a partir de las comparaciones de los resultados del modelo al correrlo en modo de segunda generación con las mediciones del sensor fueron bajas. Y al correrlo en modo de tercera generación mejoraron un poco las correlaciones.

Coli A. *et al* (2002) realizaron un análisis entre los modelos numéricos TRANSFER (versión corta del modelo BACKTRACK-REFSPEC) y SWAN sobre la propagación de oleaje extremo lejano a la costa hacia una región costera cercana a la boca del río Douro al norte de Portugal. Utilizaron modelos ya existentes para transferir de aguas someras a profundas las mediciones reales de oleaje tomadas por una boya en una región al sur de la boca del río y usarlas como condiciones de frontera para los modelos TRANSFER y SWAN. Se compararon los resultados de estos últimos dos modelos y encontraron que los períodos y direcciones del oleaje son similares, pero en lo que concierne a la predicción de altura significativa se mostraron algunas diferencias debido a que en el modelo SWAN se incluyen los términos de disipación de energía del oleaje, en especial el fenómeno conocido como rompimiento en aguas profundas.

Dykes *et al* (2002) evaluaron el modelo SWAN en la parte norte del Golfo de México mediante comparaciones entre mediciones reales de parámetros del oleaje con los procesados por el modelo SWAN. Lo cual dio como resultado un acuerdo razonable entre los resultados del modelo y las observaciones.

### III.1 Antecedentes sobre oleaje de la Bahía de Todos Santos.

La Bahía de Todos Santos ha sido ampliamente estudiada en varios aspectos pero en lo que respecta al estudio sobre análisis del oleaje es muy reducido, Munk y Snodgrass (1957) analizaron el oleaje generado por tormentas lejanas e interpretaron los aspectos estudiados a partir de datos obtenidos en Isla Guadalupe. Plaisted y Nava Button (1978) en su reporte explicaron técnicas para obtener una resolución fina del espectro del oleaje con datos obtenidos en las islas Guadalupe y Todos Santos.

Ocampo Torres (1982) realizó un estudio en las costas de Baja California en términos de espectros y biespectros mediante sensores de presión ubicados en el fondo durante algunos días de julio de 1977. Torres Navarrete (1986) hizo una comparación y análisis de registros de oleaje obtenidos en una localidad al sur de la Bahía de Todos Santos. Lambert Arista (1993) estudió la variabilidad del oleaje y su efecto en la estimación de parámetros estadísticos para la bahía y dos estaciones en California.

Perelló Reina (2002) estimó el campo de oleaje en la Bahía de Todos Santos mediante el uso de un modelo de predicción de oleaje en aguas someras. Se instalaron 3 aparatos de medición de oleaje dentro de la bahía y para esos mismos puntos se obtuvieron parámetros del oleaje con el modelo SWAN como altura significativa, período y dirección asociados al pico espectral con los cuales se hicieron correlaciones y pruebas de hipótesis para validar el modelo. Encontró que los valores de los parámetros del oleaje  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $T_z$  y  $\theta_p$  son similares que los medidos por los aparatos.

## IV OBJETIVOS

- ⚡ Aplicar el modelo numérico SWAN para la predicción del oleaje en la Bahía de Todos Santos.
- ⚡ Analizar los cambios en los parámetros del oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta$ ,  $E(\omega, \theta)$ ) en puntos específicos dentro de la bahía (Punta San Miguel, Punta Morro, Rompeolas del puerto de Ensenada, barra del Estero de Punta Banda y Punta Banda) al variar las condiciones de frontera.

## V DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Todos Santos (BTS) se encuentra ubicada en el noroeste de México en la costa oeste de la Península de Baja California entre los 31°40' y 31°56' de latitud norte y entre los 116°36' y 116°50' de longitud oeste (Fig. 2). Se le considera una bahía abierta con área de 180 km<sup>2</sup> aproximadamente y tiene como límites: al norte Punta San Miguel, al sur Península de Punta Banda, al este la ciudad de Ensenada, al oeste se encuentran las Islas de Todos Santos que limitan la conexión de la bahía con el Océano Pacífico.

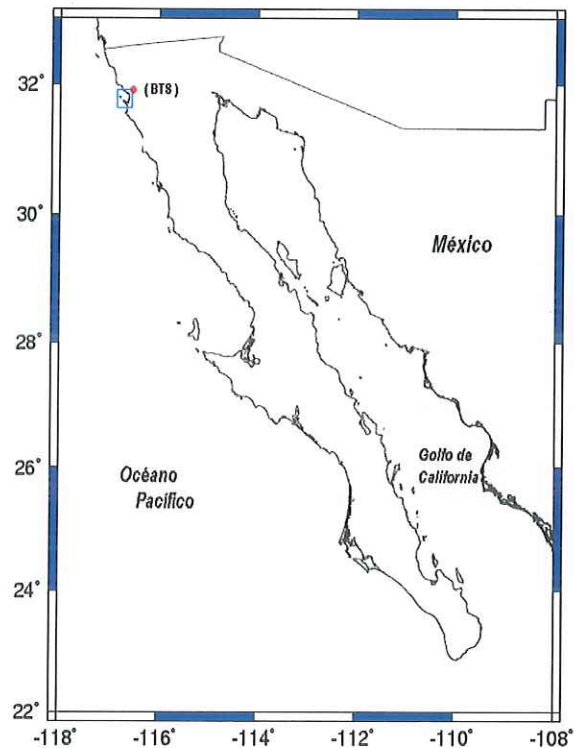


Figura 2. Localización del área de estudio: Bahía de Todos Santos (BTS) en el noroeste de Baja California, dentro del recuadro azul.

La bahía presenta profundidades que van hasta 50m en la mayor parte del área total. Las profundidades máximas, alrededor de los 400m, se presentan en el cañón submarino que existe entre la Península de Punta Banda y las Islas de Todos Santos (Fig. 3). Las isóbatas asociadas a profundidades menores a 30m tienden a ser paralelas a la línea de costa, especialmente en la zona de playas arenosas, al norte de la barra del estero, y las isóbatas que representan las profundidades superiores a los 30m son irregulares y toman una forma de abanico en la zona del cañón.

En la línea de costa de la bahía existen algunos rasgos geomorfológicos: en el norte se encuentran Punta San Miguel (SM), Puerto de El Sauzal, Punta Morro (PM) y el Puerto de Ensenada (Ra y Rb), con playas de bolsillo entre ellos. El este de la bahía está compuesto por playas arenosas con una longitud aproximada de 14Km que van desde el puerto de Ensenada hasta Punta Banda. Estas playas se interrumpen por una boca que determina la entrada al Estero de Punta Banda, el cual cuenta con una barra de arena (BE) de aproximadamente 11 kilómetros. La península de Punta Banda (PB), al sur, se caracteriza por ser una costa muy irregular con cantiles verticales y playas pequeñas con muy poca arena.

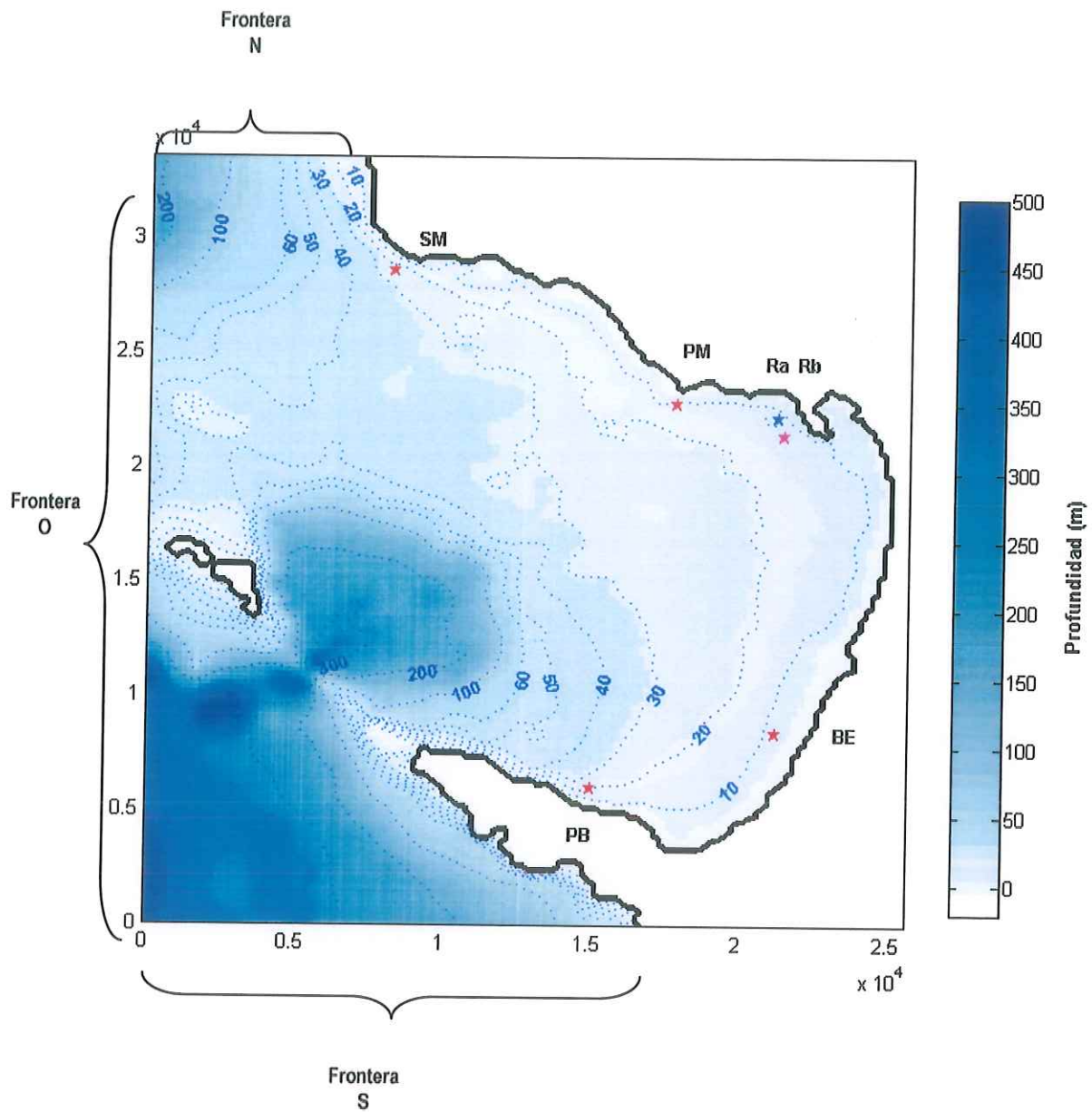


Figura 3. Batimetría de la Bahía de Todos Santos con contornos batimétricos en metros. Puntos específicos donde se analizó la variación de condiciones de frontera. Fronteras Norte (N), Oeste (O) y Sur (S) donde se suministraron las condiciones de frontera.

## VI METODOLOGÍA

Se aplicó el modelo SWAN Ciclo III versión 40.11 en modo estacionario y bidimensional en coordenadas cartesianas con el cual se simuló el campo de oleaje de la bahía y se obtuvieron los espectros en frecuencia (1D) y direccionales (2D) en puntos específicos dentro del área de estudio para analizar los cambios al variar las condiciones de frontera. Estas simulaciones se llevaron a cabo en una computadora con un procesador Pentium 4 de 80 GB de disco duro y 640 MB de memoria RAM.

Al modelo se le suministró la batimetría de la bahía (Fig. 3) que representa un área aproximada de 860 km<sup>2</sup> con dimensiones de 160 x 210 celdas en direcciones X y Y respectivamente y una resolución de 160 m x 160 m. A partir de esta malla el modelo generó una malla computacional de 128 x 168 celdas en X y Y respectivamente con un  $\Delta x = \Delta y = 200\text{m}$ , sobre la cual se obtuvieron los resultados.

Se escogieron seis puntos alrededor de la bahía (Tabla I) donde se analizaron los cambios en los parámetros del oleaje del oleaje así como en los espectros en frecuencia y direccionales al variar las condiciones de frontera. Los dos puntos entre del rompeolas se escogieron para analizar la capacidad que tiene el modelo para predecir los distintos parámetros del oleaje entre dos puntos cercanos, Ra y Rb, los cuales se encuentran separados por 800m.

**Tabla I. Puntos seleccionados alrededor de la bahía y su localización (X, Y) en la malla computacional. San Miguel (SM), Punta Morro (PM), Rompeolas a y b (Ra y Rb, respectivamente), Barra del Estero (BE), Punta Banda (PB). Profundidad de cada punto en metros (m).**

Punto	X(m)	Y(m)	Profundidad(m)
SM	8200	28600	25.00
PM	17800	22800	11.85
Ra	21200	22200	12.85
Rb	21400	21400	13.12
BE	21200	8400	8.42
PB	15000	6000	20.77

Al modelo se le suministraron como condiciones de frontera los siguientes parámetros del oleaje:

- Altura significativa ( $H_s$ ), en m.
- Período del pico espectral ( $T_p$ ), en s.
- Dirección del pico espectral ( $\theta$ ), en  $^\circ$ .
- Coeficiente de dispersión direccional ( $dd$ ) de  $20^\circ$  y constante para todos los casos.

Se realizaron 13 simulaciones (Tabla II) las cuales se dividieron de la siguiente manera: de la 1 a la 8 las condiciones de frontera se mantuvieron constantes para los tres lados (N, O, S) de la malla y de la 9 al 13 el lado oeste se dividió en siete segmentos cada uno con 5000 m de longitud, la  $H_s$  se incrementó de 2 a 4 m de sur a norte, para las fronteras norte y sur se tomó el valor máximo y mínimo, respectivamente, de cada extremo del lado oeste. En las figuras 4 y 5 se muestra un ejemplo de los archivos que se le suministran al modelo para que lleve a cabo las simulaciones, corresponden a la simulación 1 y 9, respectivamente.

Los procesos físicos que se incluyeron en todas las simulaciones fueron la fricción con el fondo, rompimiento inducido por la profundidad e interacciones no lineales.

```

$*****COMANDOS DE PARTIDA*****
$
PROJ 'refraccion' '001t'
    '6 estaciones y triadas'
MODE STAT TWOD
COORD CART
SET 0
$
$*****COMANDOS GENERALES*****
$
POOL
$
$*****COMANDOS PARA DESCRIBIR EL MODELO*****
$*****comandos para la malla computacional*****
$
CGRID REG 0.0.0.25600.33600.128 168 CIRCLE 36 &
0.0416 0.41 25
$
$*****comandos para los campos de entrada*****
$
INPGRID BOTTOM REG 0.0.0.159 209 160.160.
READINP BOTTOM 1.'btss3.dat' 3 0 FORMAT '(160F6.1)'
$
$*****comandos para las condiciones de frontera*****
$
BOUNPAR2 SIDE N CONSTANT PAR 2.00 12.00 0 20
BOUNPAR2 SIDE W CONSTANT PAR 2.00 12.00 0 20
BOUNPAR2 SIDE S CONSTANT PAR 2.00 12.00 0 20
$
$
$*****comandos para los procesos fisicos*****
$
TRIAD
BREAKING
FRICTION
OFF WCAP
OFF QUAD
$
$*****salidas solicitadas *****
$
POINTS 'STAT1' FILE 'estaciones.txt'
TABLE 'STAT1' HEAD 'ca001t.txt' XP YP DEP HS RTP DIR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'depl1t.out' LAY 4 DEP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'hs1t.out' LAY 4 HS
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'dir1t.out' LAY 4 DIR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'pdir1t.out' LAY 4 PDIR
SPEC 'STAT1' SPEC1D 'sp11t.out'
SPEC 'STAT1' SPEC2D 'sp21t.out'
COMPUTE
STOP

```

Figura 4. Ejemplo del archivo de entrada (INPUT) utilizado en el modelo SWAN donde se incluyen todos los comandos para la simulación 1.

```

$*****COMANDOS DE PARTIDA*****
$
PROJ 'refraccion' '009e'
      'variacion del espectro en la frontera'
MODE STAT TWOD
COORD CART
SET 0
$
$*****COMANDOS GENERALES*****
$
POOL
$
$*****COMANDOS PARA DESCRIBIR EL MODELO*****
$*****comandos para la malla computacional*****
$
CGRID REG 0. 0. 0. 25600. 33600. 128 168 CIRCLE 36 &
0.0416 0.41 25
$
$*****comandos para los campo de entrada*****
$
INPGRID BOTTOM REG 0. 0. 0. 159 209 160. 160.
READINP BOTTOM 1. 'btss3.dat' 3 0 FORMAT '(f160f6.1)'
$
$*****comandos para las condiciones de frontera*****
$
$ FRONTERA NORTE
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 33600 7200 33600 CONSTANT PAR 4.00 12.00 0 20
$
$ FRONTERA OESTE
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 0 0 5000 CONSTANT PAR 2.00 12.00 0 20
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 5000 0 10000 CONSTANT PAR 2.33 12.00 0 20
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 10000 0 15000 CONSTANT PAR 2.66 12.00 0 20
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 15000 0 20000 CONSTANT PAR 2.99 12.00 0 20
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 20000 0 25000 CONSTANT PAR 3.32 12.00 0 20
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 25000 0 30000 CONSTANT PAR 3.65 12.00 0 20
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 30000 0 33600 CONSTANT PAR 4.00 12.00 0 20
$
$ FRONTERA SUR
BOUNPAR2 SEGMENT XY 0 0 16800 0 CONSTANT PAR 2.00 12.00 0 20
$
$*****comandos para los procesos fisicos*****
$
TRIAD
BREAKING
FRICTION
OFF WCAP
OFF QUAD
$
$***** salidas solicitadas *****
$
POINTS 'STAT1' FILE 'estaciones.txt'
TABLE 'STAT1' HEAD 'ca009e.txt' XP YP DEP HS RTP DIR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'dep9e.out' LAY 4 DEP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'hs9e.out' LAY 4 HS
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'dir9e.out' LAY 4 DIR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'pdir9e.out' LAY 4 PDIR
SPEC 'STAT1' SPEC ID 'sp19e.out'
SPEC 'STAT1' SPEC 2D 'sp29e.out'
COMPUTE
STOP

```

Figura 5. Ejemplo del archivo de entrada (INPUT) utilizado en el modelo SWAN donde se incluyen todos los comandos para la simulación 9.

Tabla II. Valores de la altura significativa ( $H_s$ ), período y dirección asociada al pico espectral, ( $T_p$ ) y ( $\theta$ ) respectivamente, para cada uno de las simulaciones.

Simulación	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( $^\circ$ )
1	2	12	0
2	2	12	315
3	4	12	0
4	4	12	315
5	2	8	0
6	2	8	315
7	4	8	0
8	4	8	315
9	2-4	12	0
10	2-4	12	315
11	2-4	8	0
12	2-4	8	315
13	2	12	315-327

Los simulaciones anteriores se corrieron por separado en el modelo SWAN por medio de trece archivos de entrada, los cuales contienen toda la información sobre: los comandos de inicio, los comandos generales, comandos para describir el modelo (5 secciones), la malla computacional, la malla de la batimetría, las condiciones de frontera ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta$ ,  $dd$ ), el modo y opciones de la corrida, los procesos físicos utilizados y los resultados solicitados.

## VII RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron con el modelo SWAN para la Bahía de Todos Santos fueron: predicciones del campo de oleaje para toda la bahía, parámetros del oleaje y espectros en frecuencia y direccionales para cada una de las estaciones.

Las predicciones del campo de oleaje que se obtuvieron para la bahía se muestran en figuras que representan el área de estudio con una dimensión de 25600 m en el eje X (Este) y 33600 m en el eje Y (Norte), en una malla de 129 x 169 puntos con un espaciamiento de  $\Delta x = \Delta y = 200$  m entre nodos. Se incluye la batimetría de la bahía en m, altura significativa ( $H_s$ ) en m y vectores de la propagación del oleaje ( $\rightarrow$ ) sobre toda el área de estudio. En la esquina superior derecha se describen las condiciones de frontera correspondientes a la simulación realizada.

Los puntos seleccionados donde se obtuvieron parámetros del oleaje, espectros en frecuencia y direccionales (SM, PM, Ra, Rb, BE y PB) están representados con una estrella (★).

Los espectros en frecuencia para cada punto están agrupados en dos figuras, en la primera se incluyen los obtenidos de las simulaciones 1 a la 8 y en la segunda los de la 9 a la 13. El espectro de color azul corresponde al oleaje con una dirección hacia el este y el de color rojo hacia el sureste. La frecuencia está en el eje X y la densidad de energía en el eje Y.

Los espectros direccionales se presentan en coordenadas polares y la frecuencia aumenta en forma radial desde la mínima de 0.1Hz hasta 0.4Hz. La dirección se mide desde el semieje positivo de las X en sentido contrario a las manecillas del reloj. La escala de colores corresponde a la densidad de energía del espectro en  $m^2/Hz$ .

## VII.1 Predicciones del campo de oleaje.

### VII.1.1 Simulación 1.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el este ( $0^\circ$ ) para las tres fronteras N, O, S (Fig. 6).

El campo de oleaje que se produjo a partir de las condiciones de frontera anteriores muestra que la altura disminuyó hasta 1.5m al norte y sur de la bahía. Conforme el oleaje se propagaba la altura disminuía, en la parte norte y centro de la bahía hasta 1m de altura y al sur hasta 0.5m, cerca del punto BE. Las alturas menores ( $<0.5\text{m}$ ) se presentaron dentro del puerto de Ensenada y al sur de la barra del Estero de Punta Banda. El oleaje conservó una dirección hacia el este y conforme se acercó a la línea de costa cambió su dirección. La energía disminuyó conforme disminuía la altura del oleaje.

Al este de las islas el oleaje presentó alturas muy pequeñas ( $<1\text{m}$ ). Debido a que el modelo no toma en cuenta los procesos de difracción, por lo tanto los resultados cerca de las islas no son exactos, así como tampoco dentro de la rada portuaria.

En la Tabla III se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla III. Resultados de la simulación 1 para cada uno de los puntos,  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( $^\circ$ )
SM	1.74	11.55	5.40
PM	1.52	11.55	25.03
Ra	1.50	11.55	21.82
Rb	1.19	11.55	13.29
BE	1.10	11.55	343.11
PB	0.42	11.55	314.82

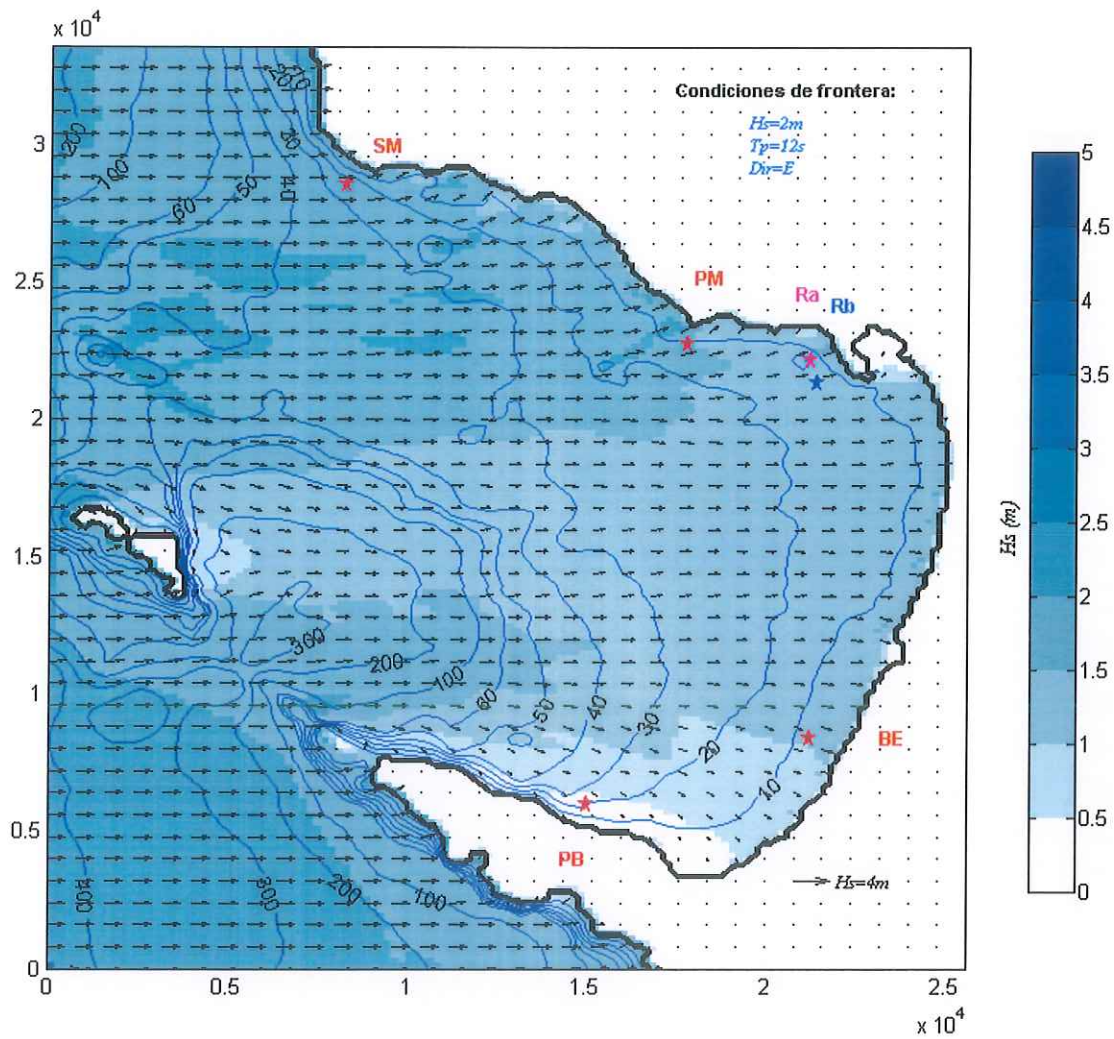


Figura 6. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 1 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=12s$  y dirección de propagación del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos y escala de  $H_s$  (tonos en azul) en metros. El vector horizontal en la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ .

## VII.1.2 Simulación 2.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $315^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 7).

La mayoría del oleaje entró por la entrada norte de la bahía, entre Punta San Miguel e Islas Todos Santos, con una altura significativa menor a los 2m. Este campo de oleaje se propagó con una altura de 1.5m sin presentar algún cambio en la altura, energía y dirección desde su entrada a la bahía hasta la isóbata de los 20m, a partir de esta isóbata hacia la línea de costa el oleaje disminuyó gradualmente. El oleaje que en la parte norte de la bahía disminuyó su altura hasta los 0.5m y el de la parte sur a  $\approx 1\text{m}$ ; en cuanto a la dirección, el oleaje se propagó hacia el noreste cerca de San Miguel y Punta Morro, hacia el este cerca del puerto de Ensenada y en el resto de la bahía hacia el sureste.

En la Tabla IV se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección en grados con la que arribó el oleaje.

**Tabla IV. Resultados de la simulación 2 para cada uno de los puntos  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección (°)
SM	1.31	11.55	336.90
PM	0.71	11.55	20.84
Ra	0.83	11.55	20.74
Rb	0.74	11.55	10.08
BE	1.03	11.55	327.41
PB	1.17	11.55	307.91

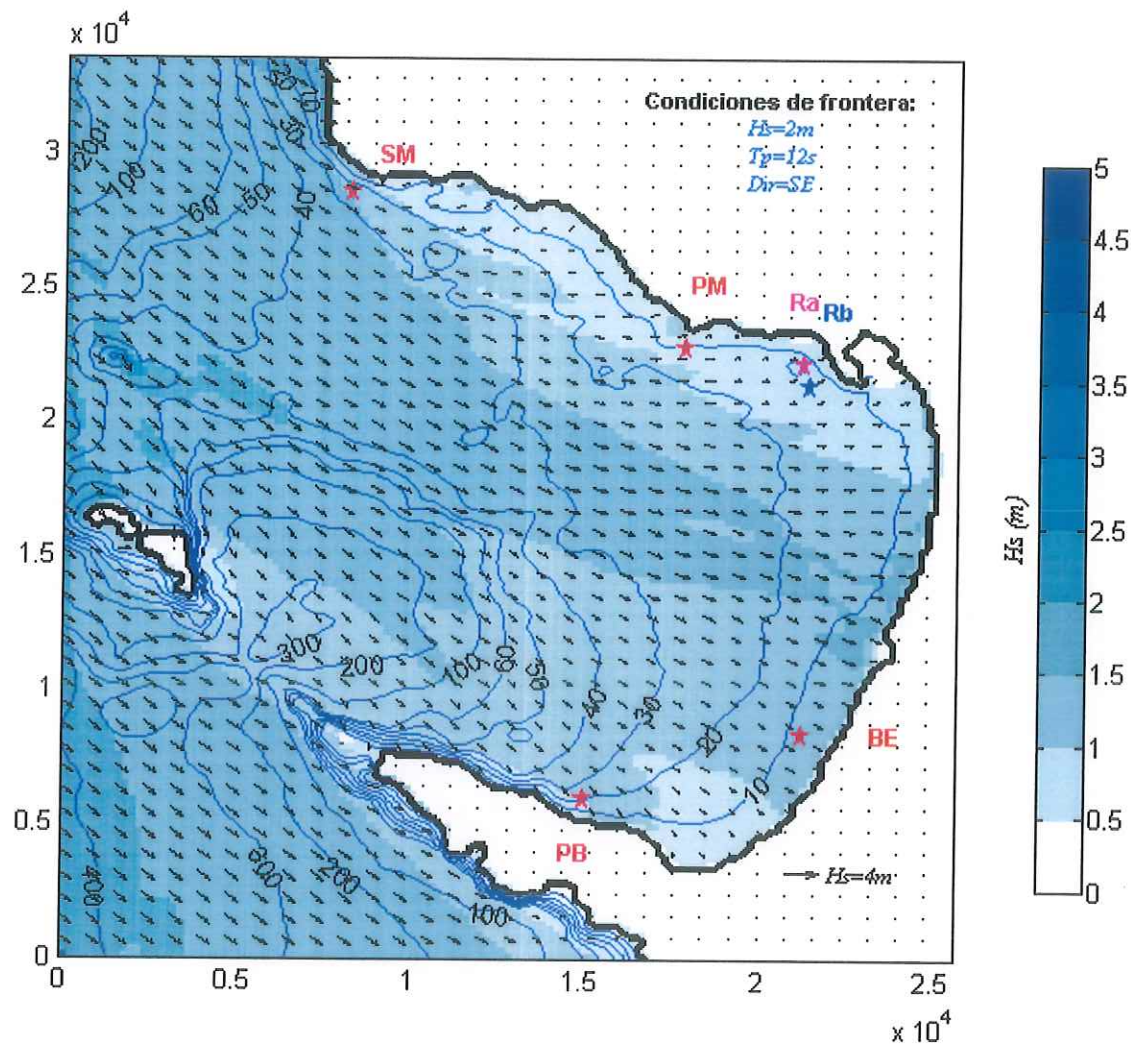


Figura 7. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 2 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ .

### VII.1.3 Simulación 3.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $0^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 8).

En esta figura el campo de oleaje que entró por punta San Miguel y las islas presentó una altura significativa de  $\approx 3.5\text{m}$  y disminuyó conforme se acercó a la línea de costa. El oleaje al sur de las islas se propagó con una altura de  $4\text{m}$  y disminuyó su altura al entrar a la bahía.

En la parte este de la bahía se presentaron diversas alturas significantes: al suroeste de la barra del estero olas con alturas menores a  $1\text{m}$ , enfrente de la barra del estero el oleaje es de  $2\text{m}$  de altura, en la zona de playas las olas presentaron una altura de  $2.5\text{m}$ . En la entrada el puerto el oleaje tuvo una altura de  $2.5\text{m}$ .

La dirección predominante de las olas en este campo de oleaje fue hacia el este y su energía no presentó variaciones en la mayoría del área de estudio.

En la Tabla V se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla V. Resultados de la simulación 3 para cada uno de los puntos,  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( $^\circ$ )
SM	3.47	11.55	4.95
PM	3.02	11.55	23.83
Ra	2.84	11.55	20.47
Rb	2.37	11.55	13.09
BE	2.23	11.55	343.43
PB	0.86	11.55	314.77

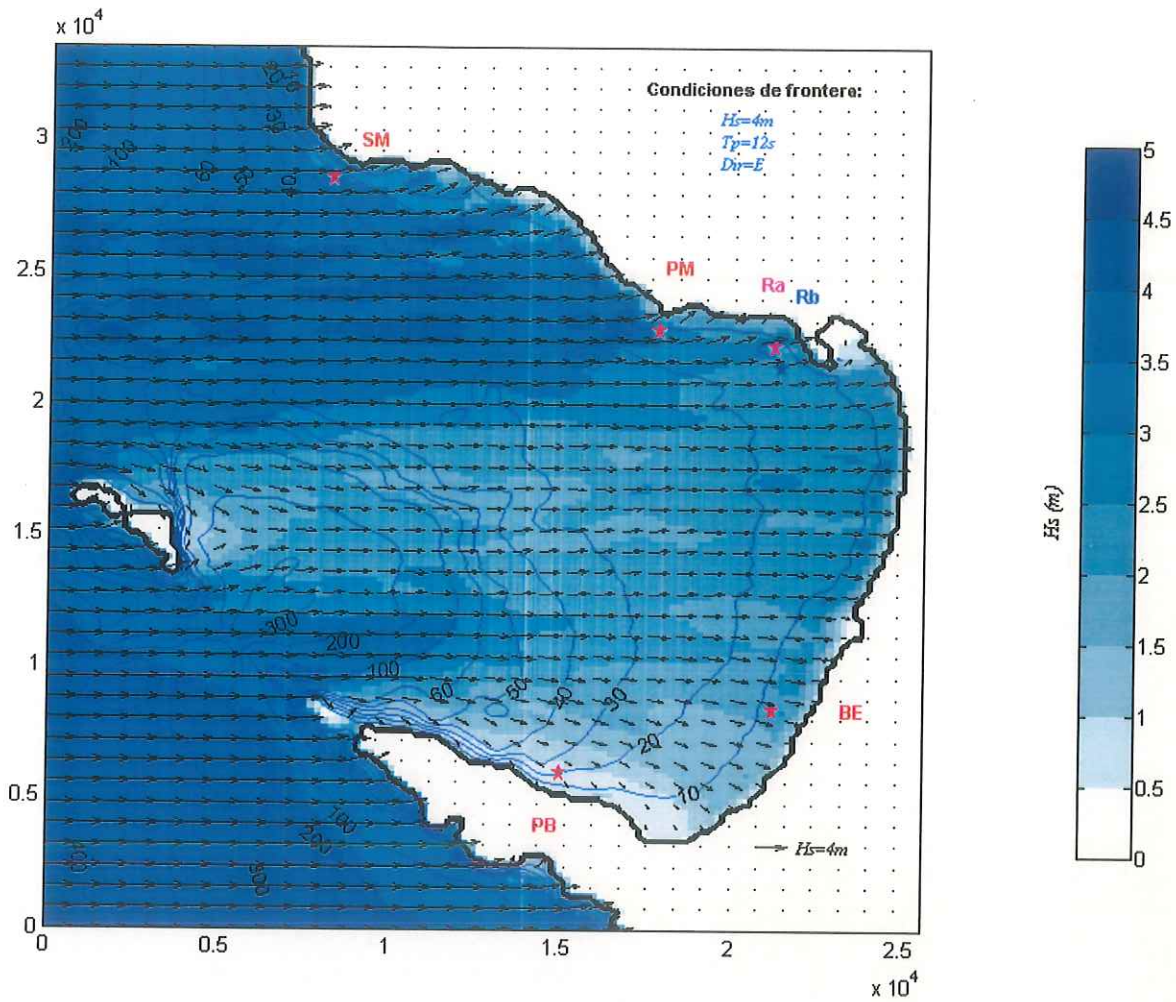


Figura 8. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 3 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ .

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $315^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 9).

Las alturas significantes que se presentaron dentro de la bahía, al igual que en campo de oleaje de la figura 7, se derivaron del oleaje que entró solamente por la entrada norte con una altura significativa de 4m y conforme se propagó hacia el sureste de la bahía su altura disminuyó. Los valores de la altura significativa en toda la bahía fueron variados, en la parte norte de la bahía se presentaron olas de 3.5m hasta 1m de altura y se dirigieron hacia el noreste cerca de San Miguel y Punta Morro y hacia el este cerca del puerto de Ensenada. El oleaje en la parte sur presentó valores que oscilan entre los 3m hasta 1.5m al acercarse a la costa y permaneció con una dirección hacia el sureste.

En la Tabla VI se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla VI. Resultados de la simulación 4 para cada uno de los puntos  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección (°)
SM	2.63	11.55	336.81
PM	1.43	11.55	20.05
Ra	1.70	12.66	20.47
Rb	1.48	11.55	9.54
BE	2.03	11.55	327.45
PB	2.37	11.55	307.87

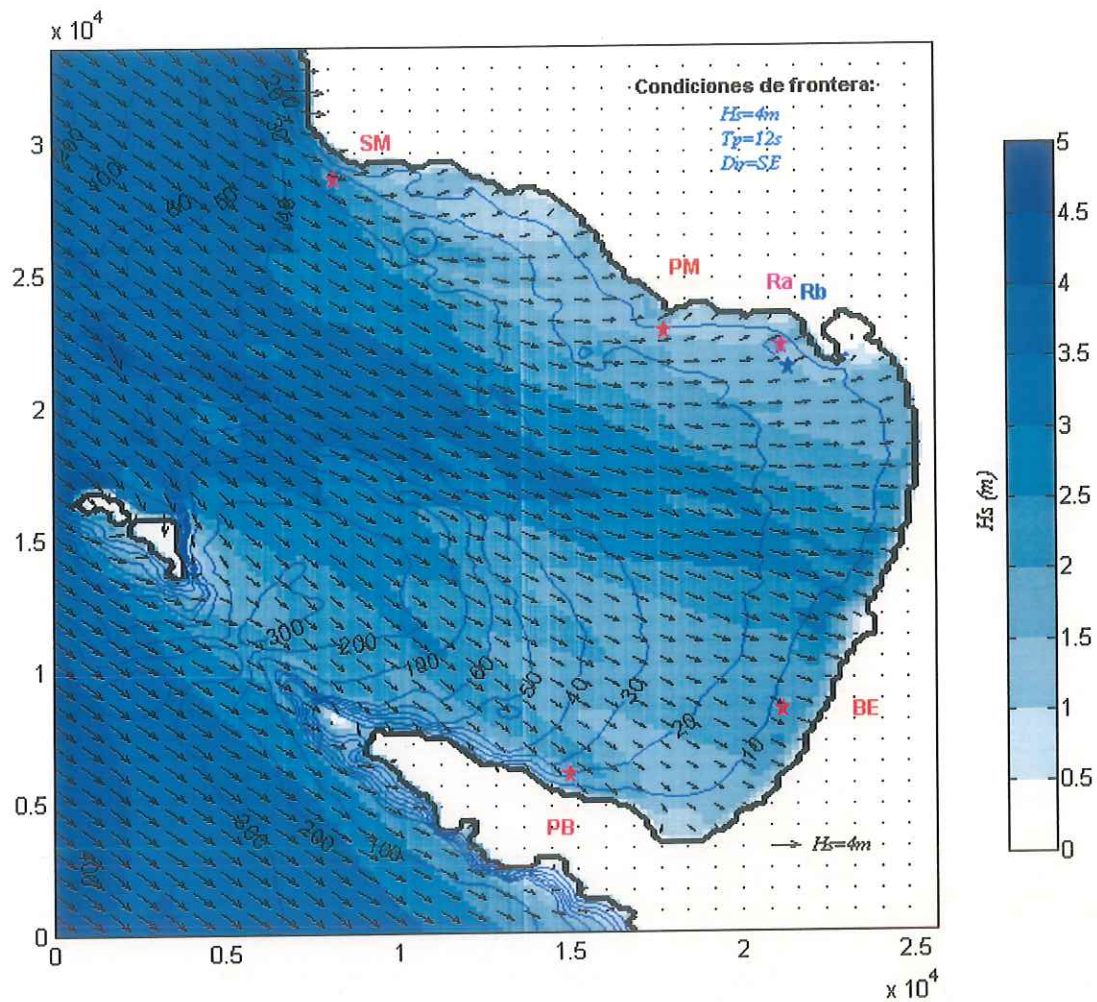


Figura 9. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 4 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ .

### VII.1.5 Simulación 5.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $0^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 10).

Por la parte norte de la bahía entró el oleaje con una altura de 1.5m y se propagó con este valor hasta el punto PM, cerca de los puntos Ra y Rb disminuyó a 1m, y siempre mantuvo una dirección de propagación hacia el este. El oleaje que entró por la parte sur de la bahía presentó una altura de 2m, se propagó con dirección este, la altura disminuyó a 1m cerca del punto BE y menor a 0.5m cerca del punto PB.

En la Tabla VII se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla VII. Resultados de la simulación 5 para cada uno de los puntos  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( $^\circ$ )
SM	1.89	8.01	2.97
PM	1.46	8.01	16.33
Ra	1.39	8.01	15.61
Rb	1.24	8.01	7.49
BE	1.27	8.01	345.08
PB	0.31	8.01	325.82

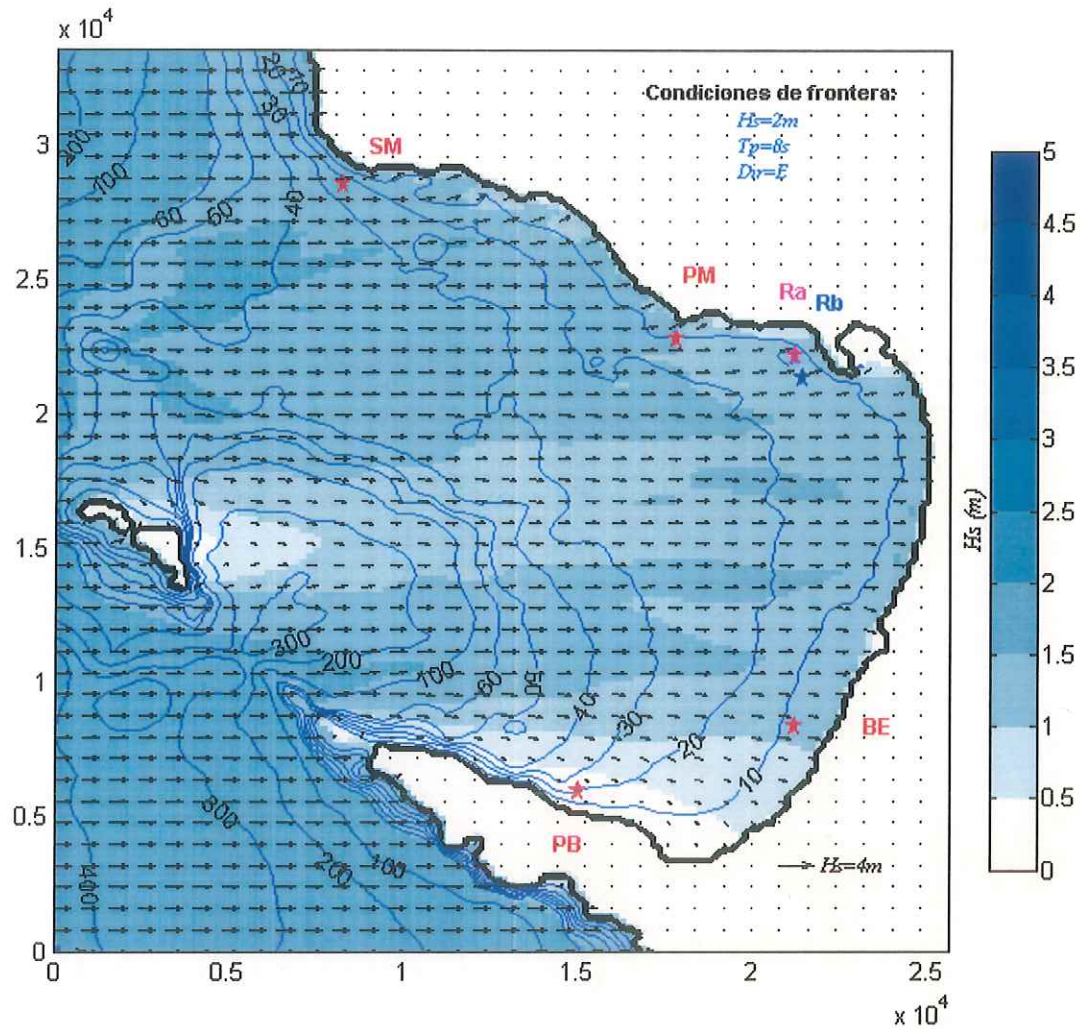


Figura 10. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 5 con condiciones de frontera  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4\text{m}$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200\text{m}$ .

### VII.1.6 Simulación 6.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $315^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 11).

El oleaje que entró a la bahía lo hizo por la parte norte, entre las islas y Punta San Miguel, con una dirección sureste y una altura mayor a  $1.5\text{m}$ , la cual disminuyó al llegar a la isóbata de los  $20\text{m}$ . De este campo de oleaje, se derivó oleaje menor cerca de los puntos Ra y Rb con alturas entre  $0.5\text{m}$  y  $1\text{m}$  y tomó una dirección perpendicular a la costa.

Por la parte sur no entró oleaje a la bahía y se propagó hacia el sureste de la península de Punta Banda con una altura de  $1.5\text{m}$  aproximadamente.

En la Tabla VIII se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla VIII. Resultados de la simulación 6 para cada uno de los puntos,  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección (°)
SM	1.47	8.01	326.09
PM	0.63	8.01	2.12
Ra	0.51	8.01	12.85
Rb	0.55	8.01	359.65
BE	1.36	8.01	322.39
PB	1.46	8.01	309.20

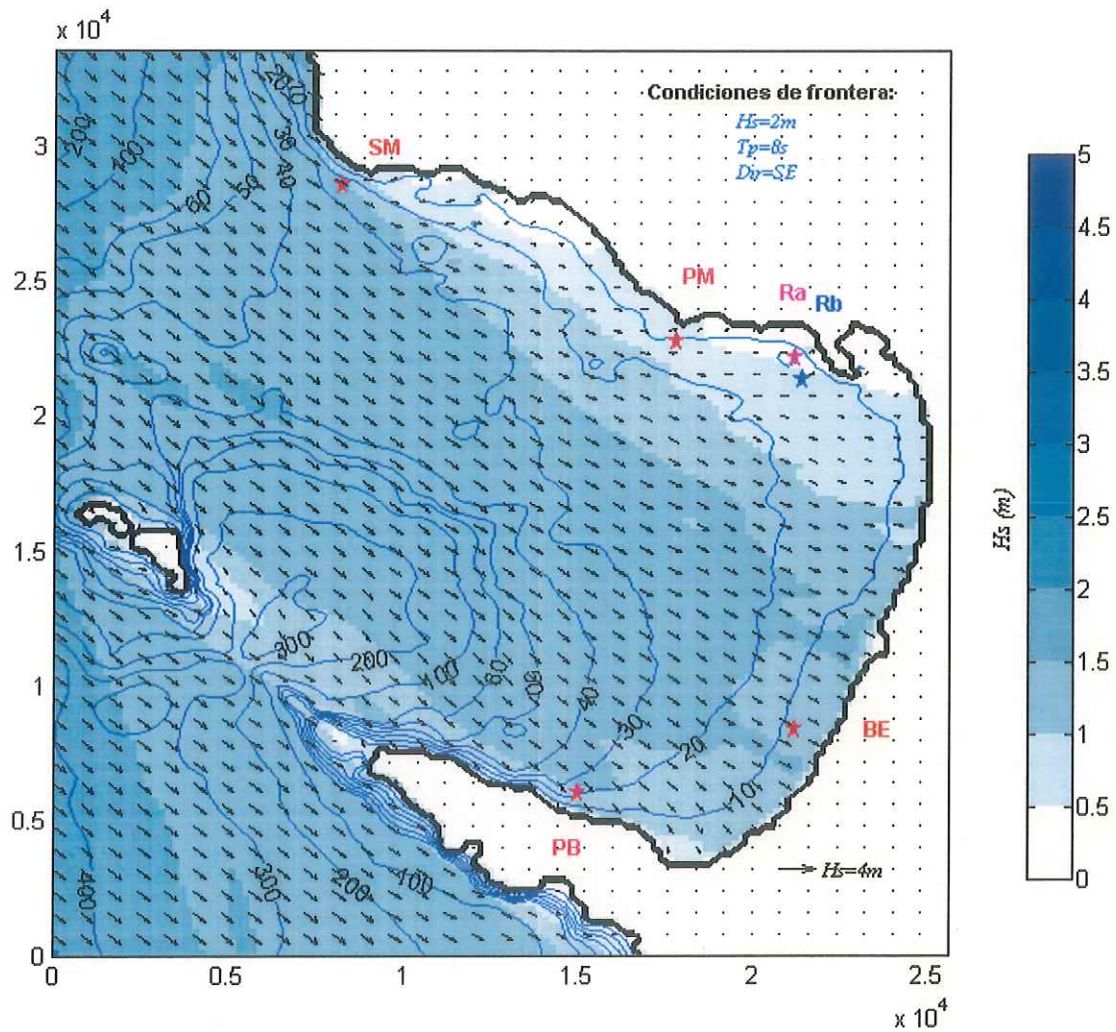


Figura 11. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 6 con condiciones de frontera  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4\text{m}$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x = \Delta y = 200\text{m}$ .

### VII.1.7 Simulación 7.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $0^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 12).

Las alturas significantes para toda el área de estudio resultantes de esta simulación son variadas, en la parte norte existen olas con alturas que van desde 4m hasta 2m con dirección este. Por la parte sur entró oleaje con alturas de 4m y se propagó hacia el este y disminuyó su altura hasta 0.5m cerca del punto PM. Se presentaron alturas significantes de 3m al sur del puerto de Ensenada.

En la Tabla IX se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla IX. Resultados de la simulación 7 para cada uno de los puntos  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( ° )
SM	3.77	8.01	2.75
PM	2.81	8.01	15.89
Ra	2.67	8.01	14.69
Rb	2.46	8.01	7.75
BE	2.52	8.01	345.68
PB	0.62	8.01	325.83

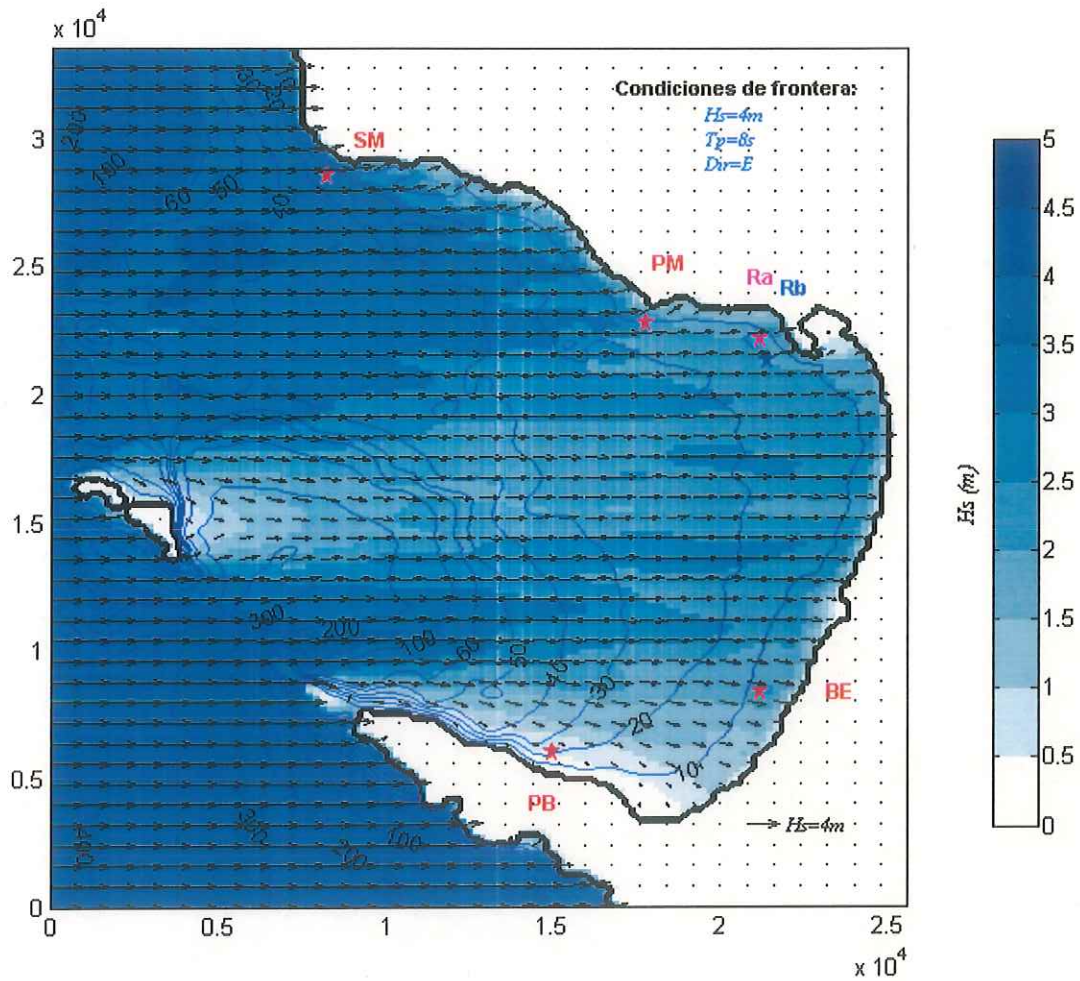


Figura 12. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 7 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ .

### VII.1.8 Simulación 8.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $315^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 13).

Al igual que en la simulación 6, el oleaje entró sólo por la parte norte de la bahía con una altura mayor a 3.5m y disminuyó a 3m, 2.5m y hasta 2m cerca de la barra del estero. La dirección no cambió, siempre se propagó hacia el sureste. De este campo de oleaje se propagaron olas hacia el norte de la bahía con alturas desde los 2m hasta 0.5m cerca de la línea de costa.

El oleaje de la parte sur de la malla no entró a la bahía y presentó una altura de 4m que disminuyó a 3m y se propagó siempre hacia el sureste.

En la Tabla X se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

Tabla X. Resultados de la simulación 8 para cada uno de los puntos  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( ° )
SM	2.95	8.01	326.10
PM	1.26	8.01	2.02
Ra	1.02	8.01	12.71
Rb	1.11	8.01	359.65
BE	2.67	8.01	322.20
PB	2.94	8.01	309.16

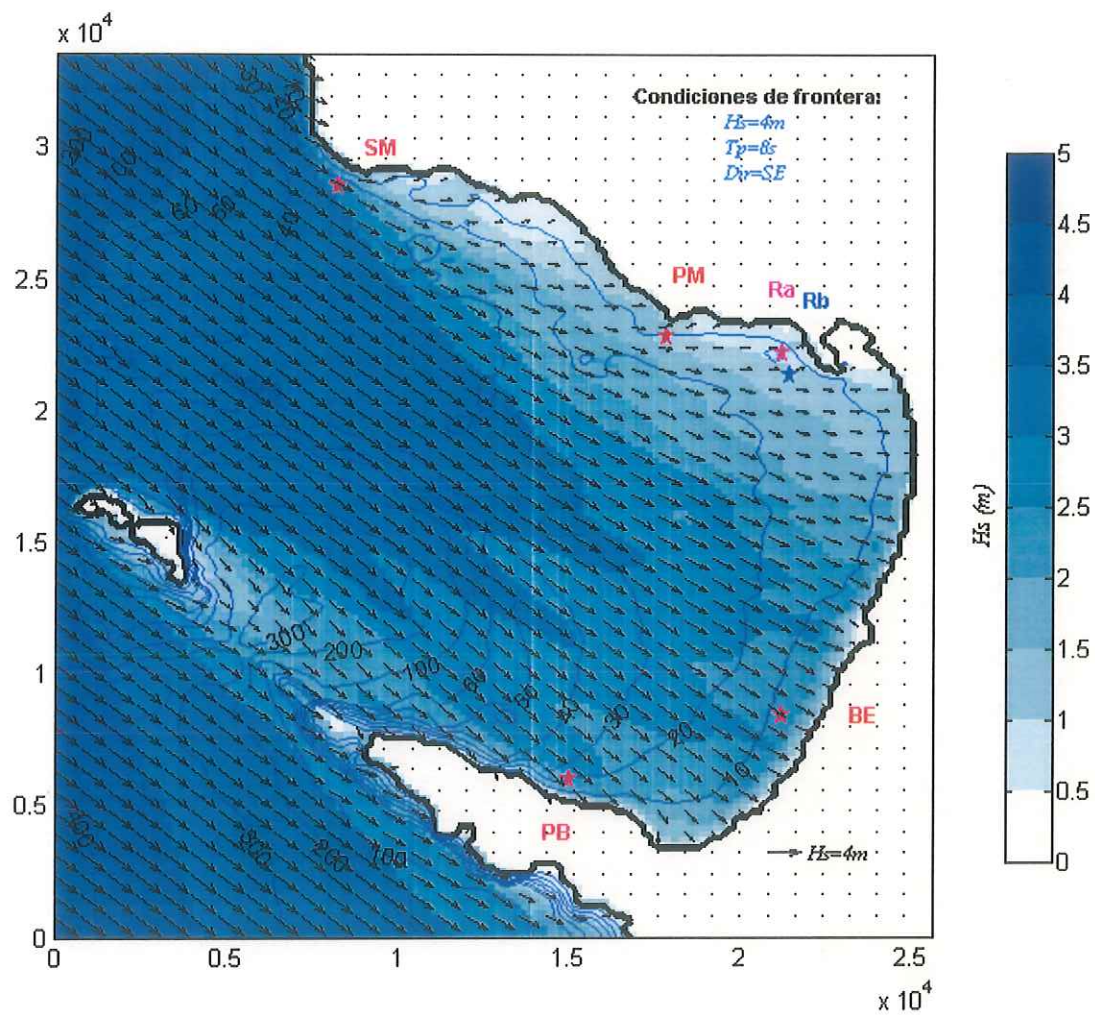


Figura 13. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 8 con condiciones de frontera  $H_s=4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala grafica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ .

### VII.1.9 Simulación 9.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2-4m$  disminuyendo la altura de 4m hasta 2m de norte a sur en la frontera Oeste de la malla y un valor de 4m para la frontera Norte y un valor de 2m para la frontera Sur,  $T_p=12s$  y una dirección del oleaje hacia el este ( $0^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 14).

Se desarrollaron tres campos de oleaje a partir de esta simulación, en la parte norte el oleaje de mayor altura ( $\approx 4m$ ) de toda la bahía, cerca de las islas oleaje con una altura de  $\approx 3m$  y en la parte sur un oleaje con altura de  $\approx 2m$ . El oleaje de la parte norte tuvo 3.5m de altura aunque fue muy diverso, se presentaron pequeños campos de oleaje con alturas de 3m y 2m. La dirección de este oleaje permaneció hacia el este y conforme se acercó a la línea de costa tomó una dirección perpendicular a ella. En la parte sur de la bahía el oleaje se propagó con una altura de 2m con dirección este y disminuyó su altura conforme se acercó a la línea de costa.

En la Tabla XI se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla XI. Resultados de la simulación 9 para cada uno de los puntos  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( $^\circ$ )
SM	3.19	11.55	3.95
PM	2.49	11.55	22.88
Ra	2.46	11.55	19.99
Rb	1.92	11.55	11.10
BE	1.47	11.55	342.00
PB	0.61	11.55	313.90

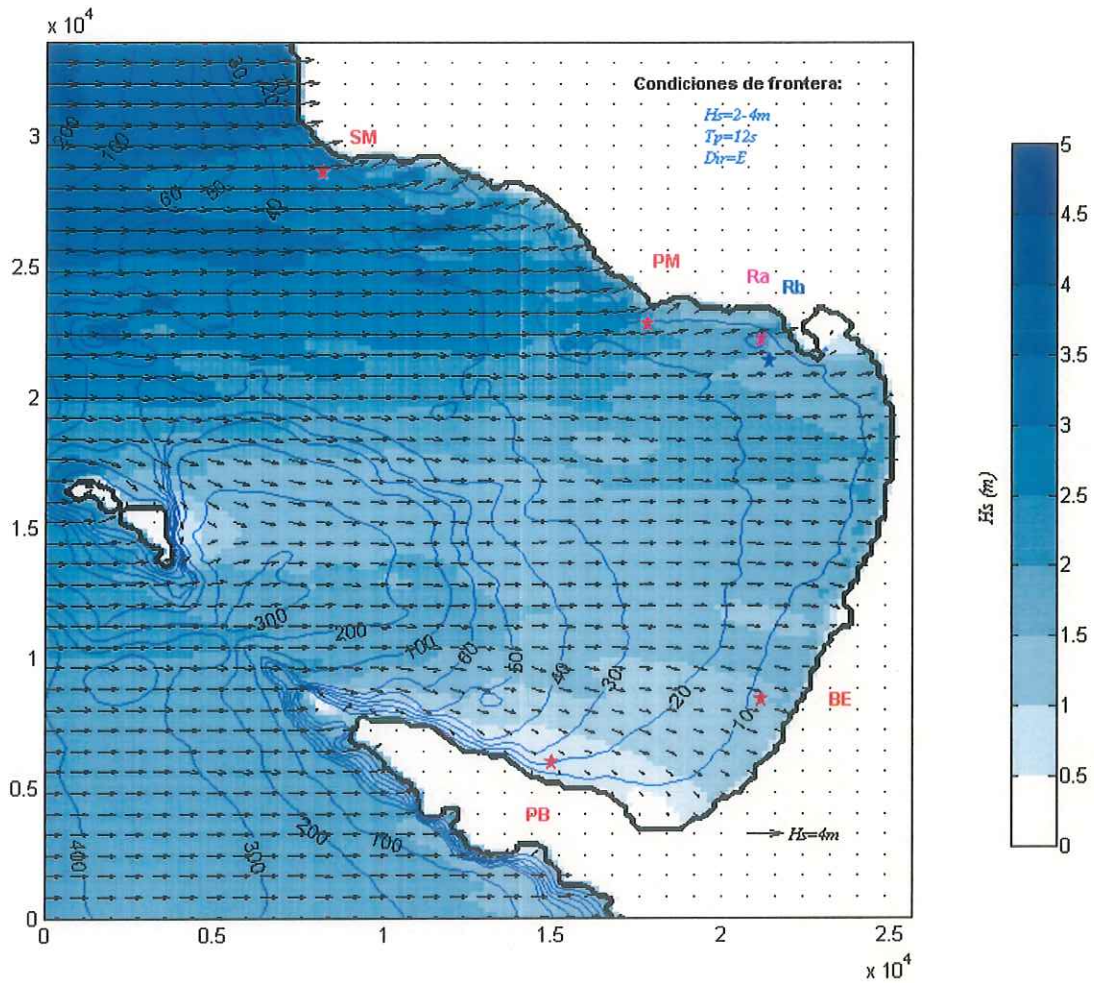


Figura 14. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 9 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ .

### VII.1.10 Simulación 10.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2-4\text{m}$  disminuyendo la altura de 4m hasta 2m de norte a sur en la frontera Oeste de la malla y un valor de 4m para la frontera Norte y un valor de 2m para la frontera Sur,  $T_p=12\text{s}$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $315^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 15).

El oleaje sólo entró por la parte norte de la bahía (entre Punta San Miguel y las islas), se formó un campo de oleaje con una altura de 3m y disminuyó conforme disminuía la profundidad. A partir de este campo se derivaron olas hacia el norte y sur de la bahía con diferentes valores de alturas, pero siempre con una disminución gradual de la altura al acercarse a la línea de costa. El oleaje en la parte norte se propagó hacia el este y en la parte sur permaneció hacia el sureste.

En la Tabla XII se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla XII. Resultados de la simulación 10 para cada uno de los puntos  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección (°)
SM	2.62	11.55	336.67
PM	1.33	11.55	18.06
Ra	1.56	11.55	19.44
Rb	1.38	11.55	8.26
BE	1.84	11.55	326.06
PB	2.05	11.55	306.97

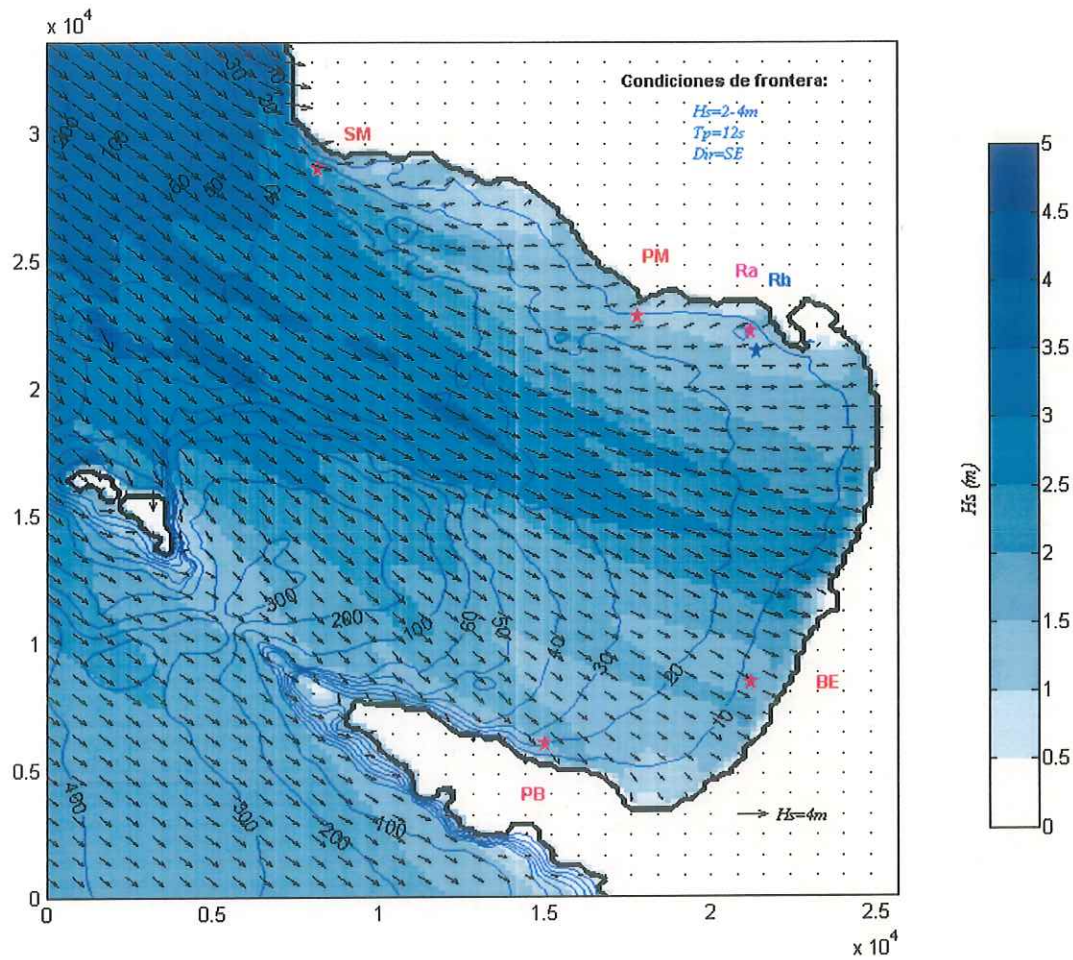


Figura 15. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 10 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ .

### VII.1.11 Simulación 11.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2-4m$  disminuyendo la altura de 4m hasta 2m de norte a sur en la frontera Oeste de la malla y un valor de 4m para la frontera Norte y un valor de 2m para la frontera Sur,  $T_p=8s$  y una dirección del oleaje hacia el este ( $0^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 16).

Al igual que en la simulación 9 se desarrollaron tres campos de oleaje, en la parte norte el oleaje con la altura mayor ( $\approx 3.5m$ ), cerca de las islas oleaje con una altura  $\approx 2.5m$  y en la parte sur un oleaje con altura de 2m. En la parte norte se presentó el oleaje más alto con alturas de 3.5m, cerca del punto SM, y cerca de los puntos PM, Ra y Rb una altura menor a los 2.5m. En esta zona el oleaje se mantuvo con una propagación hacia el este de la bahía. En la parte sur se obtuvieron las alturas más bajas, el oleaje primero se propagó con una altura de 2.5m al sur de las islas, al entrar a la bahía y propagarse hacia la línea de costa disminuyó gradualmente de los 2.5m a 1.5m cerca del punto BE y cerca del punto PB hasta los 0.5m.

En la Tabla XIII se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

Tabla XIII. Resultados de la simulación 11 para cada uno de los puntos,  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección ( $^\circ$ )
SM	3.48	8.01	1.83
PM	2.38	8.01	15.03
Ra	2.26	8.01	14.40
Rb	1.98	8.01	5.76
BE	1.72	8.01	344.20
PB	0.43	8.01	324.54

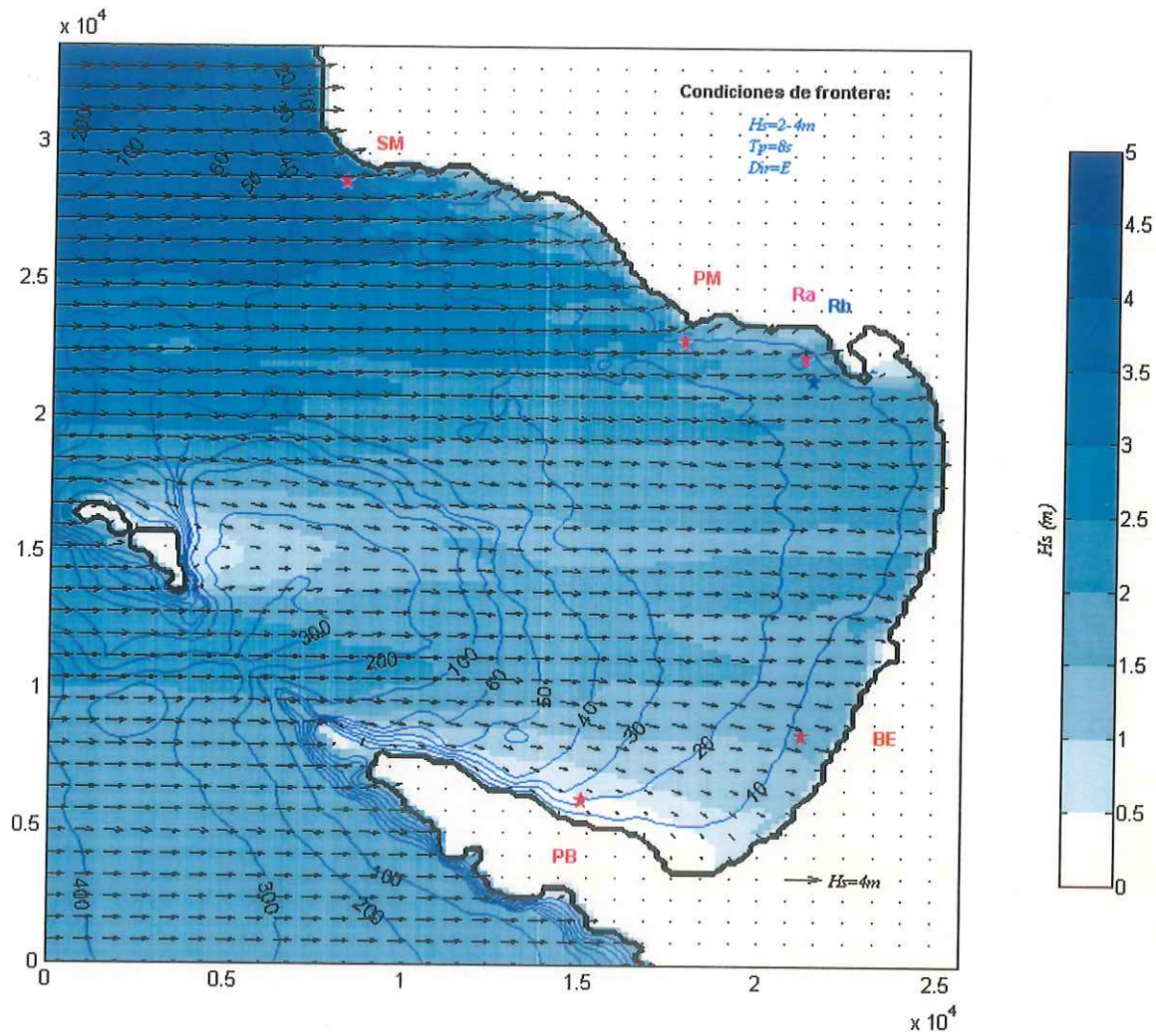


Figura 16. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 11 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el este (E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de 129 x 169 puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ .

### VII.1.12 Simulación 12.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2-4m$  disminuyendo la altura de 4m hasta 2m de norte a sur en la frontera Oeste de la malla y un valor de 4m para la frontera Norte y un valor de 2m para la frontera Sur,  $T_p=8s$  y una dirección del oleaje hacia el sureste ( $315^\circ$ ) para los tres lados de la malla (Fig. 17).

En esta simulación los resultados son similares a los de la simulación 10, el oleaje entró sólo por la parte norte de la bahía y se formó un campo de oleaje con una altura de 3m y disminuyó conforme disminuía la profundidad, pero con alturas un poco mayores así como una variación mayor de los valores de altura que los proporcionados por la simulación 10.

En la Tabla XIV se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

**Tabla XIV. Resultados de la simulación 12 para cada uno de los puntos,  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.**

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección (°)
SM	2.95	8.01	326.06
PM	1.24	8.01	1.31
Ra	0.97	8.01	11.96
Rb	1.06	8.01	358.97
BE	2.45	8.01	320.92
PB	2.55	8.01	307.75

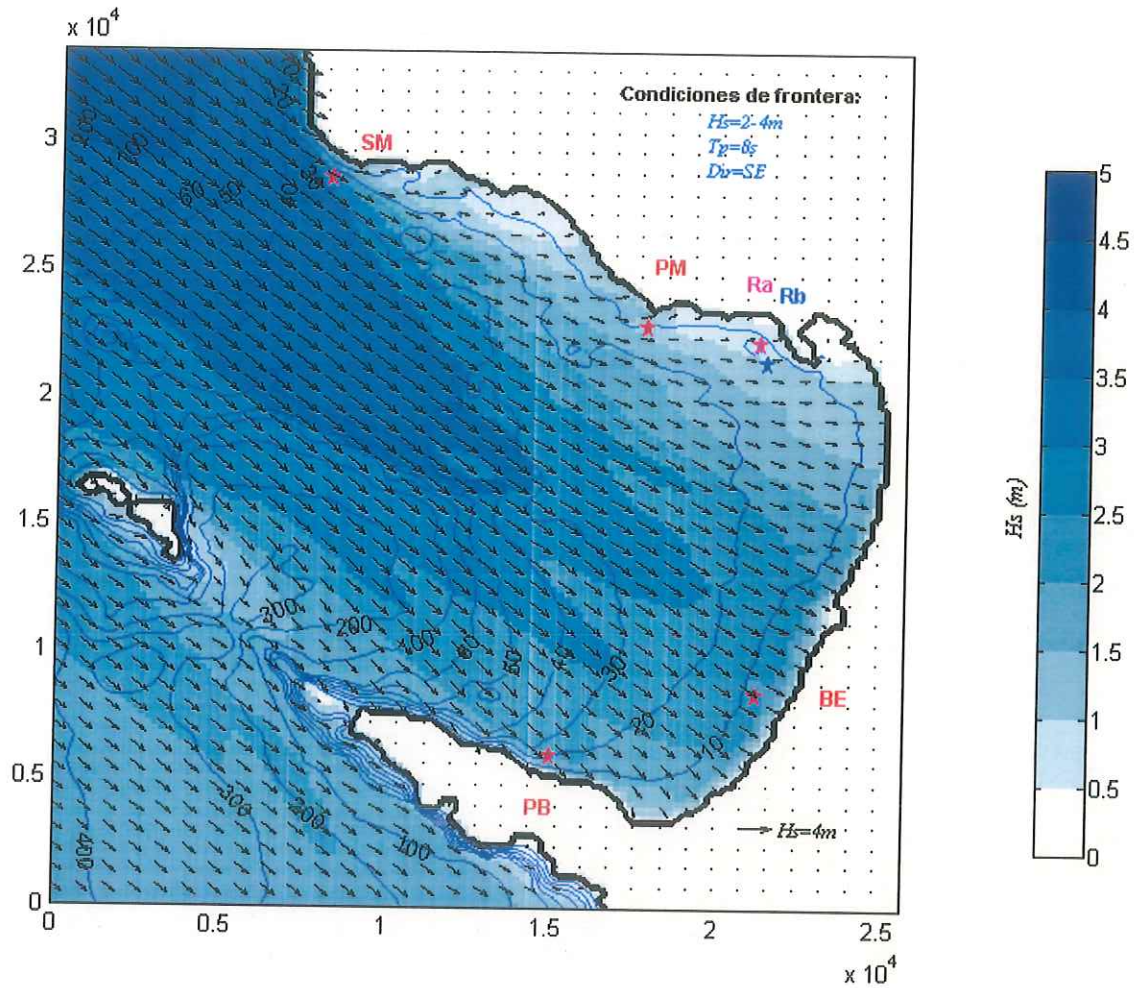


Figura 17. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 12 con condiciones de frontera  $H_s=2-4m$ ,  $T_p=8s$  y dirección del oleaje hacia el sureste (SE). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y= 200m$ .

### VII.1.13 Simulación 13.

Las condiciones de frontera que se utilizaron en esta simulación fueron:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  en las tres fronteras (N, O, S) y una dirección del oleaje hacia el sureste variando de  $315^\circ$  hasta  $327^\circ$  de norte a sur en la frontera Oeste de la malla y una dirección de  $315^\circ$  en la frontera Norte y una dirección de  $327^\circ$  en la frontera Sur (Fig. 18).

Como en todas las simulaciones con una dirección de propagación sureste como condición de frontera el oleaje entró sólo por la parte norte con una altura de 2m y con la misma dirección, este campo de oleaje mantuvo su altura, pero al alcanzar la isóbata de los 20m comenzó a disminuir. En la línea de costa norte se presentaron alturas menores a 1.5m con una dirección de propagación hacia el noreste cerca de los puntos SM y PM, y hacia el este cerca del puerto de Ensenada. El oleaje en la parte sur presentó una altura de  $\approx 1\text{m}$  con muy poca energía y se propagó hacia el sureste.

En la Tabla XV se presentan los resultados de la simulación para cada uno de los puntos donde se incluye la  $H_s$  en m, el  $T_p$  en s y la dirección con la que arribó el oleaje.

Tabla XV. Resultados de la simulación 13 para cada uno de los puntos,  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección con la que arribó el oleaje.

Punto	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Dirección (°)
SM	1.32	11.55	337.15
PM	0.76	11.55	22.16
Ra	0.90	11.55	21.28
Rb	0.80	11.55	10.72
BE	1.07	11.55	328.47
PB	1.19	11.55	308.92

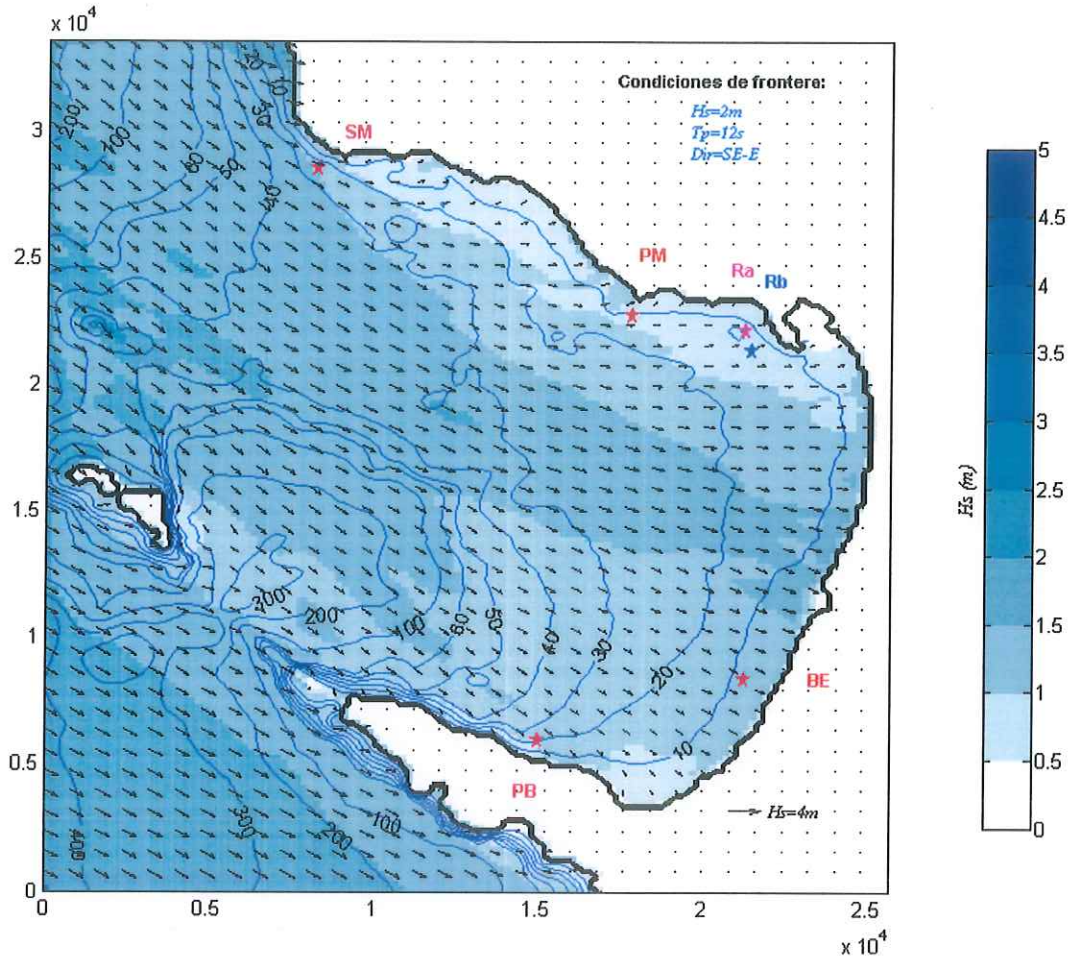


Figura 18. Esquema del campo de oleaje para la bahía de Todos Santos como resultado de la simulación 13 con condiciones de frontera  $H_s=2m$ ,  $T_p=12s$  y dirección del oleaje que varía de  $315^\circ$  a  $327^\circ$  hacia el sureste (SE-E). Contornos batimétricos en m. Escala de  $H_s$  en metros. El vector horizontal de la esquina inferior derecha representa la escala gráfica para  $H_s=4m$ . Malla de  $129 \times 169$  puntos,  $\Delta x=\Delta y=200m$ .

## VII.2 Espectros en frecuencia y direccionales.

Los espectros en frecuencia representan la distribución de la energía entre las diferentes frecuencias y el área bajo la curva es la energía total.

Los espectros direccionales nos brindan la descripción más completa de las olas ya que incluye la dirección de propagación del pico espectral y la densidad de energía en una frecuencia o período específico.

En los espectros en frecuencia y direccionales de cada uno de los puntos, el pico espectral se ubicó para los resultados de las simulaciones con un período de 12s como condición de frontera en la frecuencia de 0.08Hz y para los de un período de 8s en la frecuencia 0.12Hz.

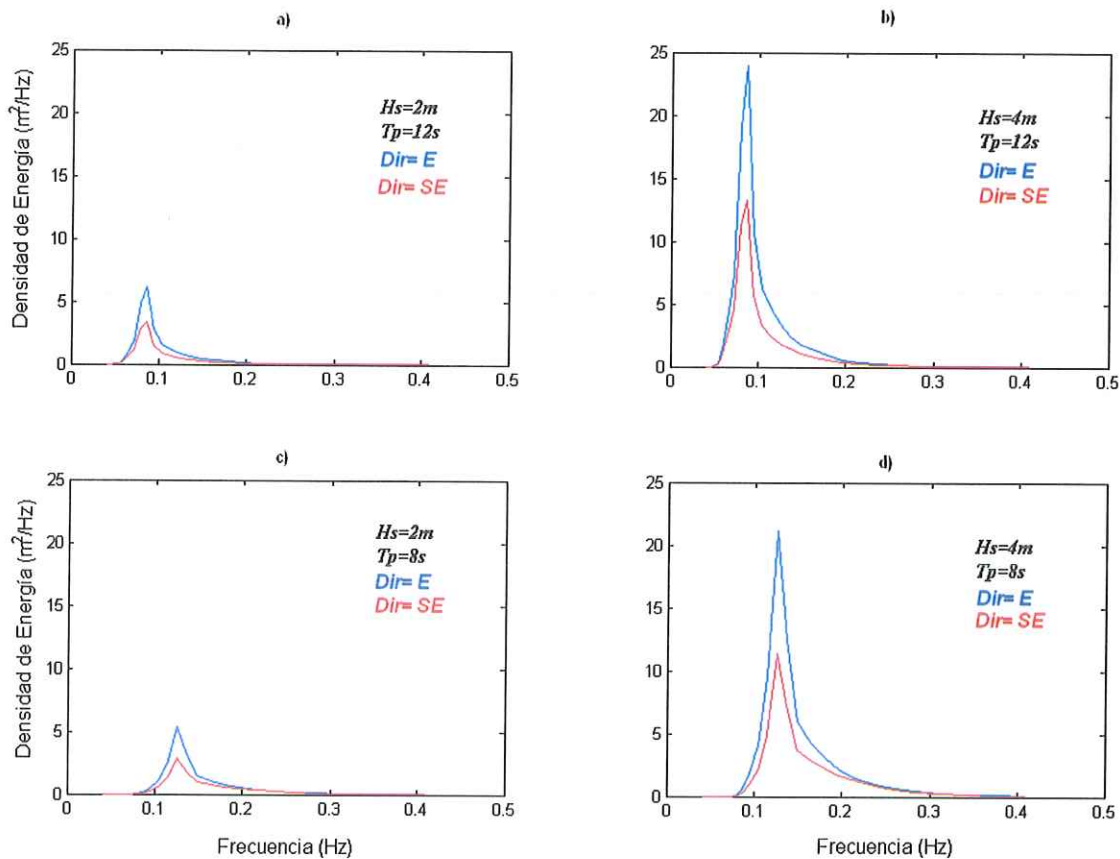
### VII.2.1 Punto SM.

El punto SM se encuentra ubicado cerca de Punta San Miguel al norte de la bahía en las coordenadas (8200,28600) de la malla y tiene una profundidad de 25 metros.

En la Figura 19 se presentan los espectros en frecuencia del punto SM como resultado de las simulaciones 1 a la 8. En las gráficas a) y b) se representan los espectros de las simulaciones 1, 2 y 3, 4 respectivamente. Donde se puede observar que la mayor densidad de energía de este oleaje se dio en la frecuencia 0.08Hz. Y en las gráficas c) y d) los espectros de las simulaciones 5, 6 y 7, 8 respectivamente, donde la mayor densidad de energía se presentó en la frecuencia 0.12Hz.

Los espectros en frecuencia que resultaron de las simulaciones 9, 10, 11, 12 y 13 se muestran en la Figura 20. En los espectros de la gráfica a) correspondientes a las simulaciones 9 y 10 se observó que la mayor densidad de energía se concentró en la frecuencia 0.08Hz. En los

espectros de la gráfica b) correspondientes a las simulaciones 11 y 12 la densidad de energía se agrupó en la frecuencia 0.12Hz. En la gráfica c) podemos observar el espectro como resultado de la simulación 13, el cual cuenta con muy poca energía ( $< 5\text{m}^2/\text{Hz}$ ), la cual se concentró en la frecuencia 0.08Hz.



**Figura 19. Espectros en frecuencia del punto SM, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8 como resultado de las simulaciones. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en m<sup>2</sup>/Hz. Frecuencia en Hz.**

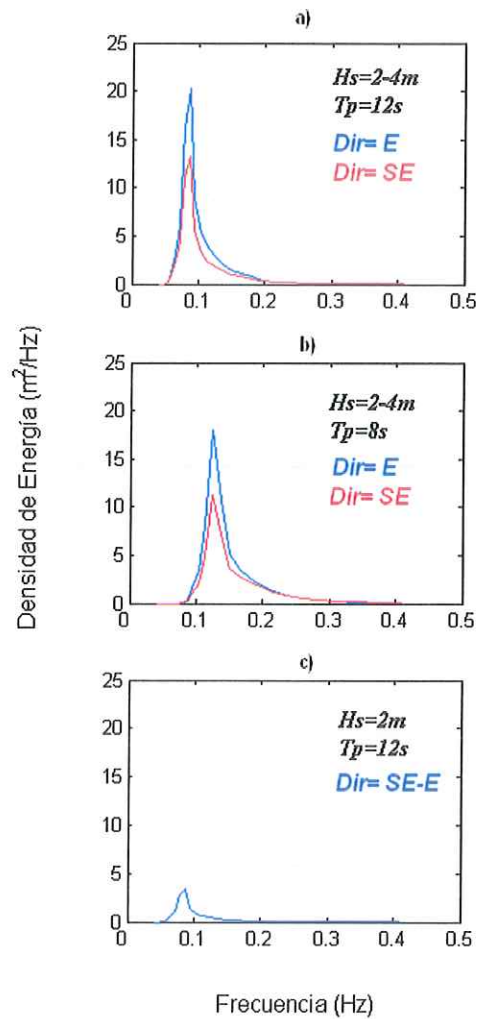


Figura 20. Espectros en frecuencia del punto SM, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.

En la Figura 21 se muestran los espectros direccionales para el punto SM correspondientes a las simulaciones 1, 3, 5 y 7.

Los espectros de las gráficas a) y b) corresponden a las simulaciones 1 y 3 con condiciones de frontera de  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  y  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$ , respectivamente, y una dirección del oleaje hacia el este (E). Se observó que los espectros se expandieron hacia frecuencias por encima del pico espectral hasta la frecuencia de 0.2Hz y en un sector de 60°. Los espectros mostraron una dirección hacia el este.

En la gráfica c) y d) se muestran los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 5 y 7 con condiciones de frontera:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$ , respectivamente, y una dirección (E). En estos espectros la energía se expandió hasta la frecuencia 0.3 Hz y siguió una dirección hacia el este.

En la Figura 22 se muestran los espectros direccionales como resultado de las simulaciones 2, 4, 6 y 8.

Las gráficas a) y b) representan los espectros direccionales de las simulaciones 2 y 4 con condiciones de frontera de  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$  y  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=12\text{s}$ , respectivamente, y una dirección del oleaje hacia el sureste (SE) en ambos casos. Estos espectros alcanzaron una frecuencia de 0.3Hz y una dirección hacia el sureste.

Los espectros direccionales que resultaron de las simulaciones 6 y 8, condiciones de frontera:  $H_s=2\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$  y  $H_s=4\text{m}$ ,  $T_p=8\text{s}$ , respectivamente, y con dirección SE del oleaje se muestran en las gráficas c) y d) de la Figura 22. Estos espectros alcanzaron una frecuencia 0.35Hz y se expandieron en un rango de 45° con dirección sureste.

En la Figura 23 se muestran los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 9, 10, 11 y 12.

Las gráficas a) y b) corresponden a las simulaciones 9 y 11, respectivamente. En la gráfica a) se observa que el espectro alcanzó una frecuencia de 0.2 HZ y un esparcimiento de 30° aproximadamente. En la gráfica b) el espectro alcanzó una frecuencia de 0.3Hz y se expandió en un rango de 60°. Ambos espectros con una dirección hacia el este.

Los espectros en las gráficas c) y d) son el resultado de las simulaciones 10 y 12, respectivamente. El espectro c) se extendió hasta la frecuencia 0.25Hz en un rango de 30° y el espectro d) hasta la frecuencia 0.35Hz en un rango de 45°, ambos con una dirección sureste.

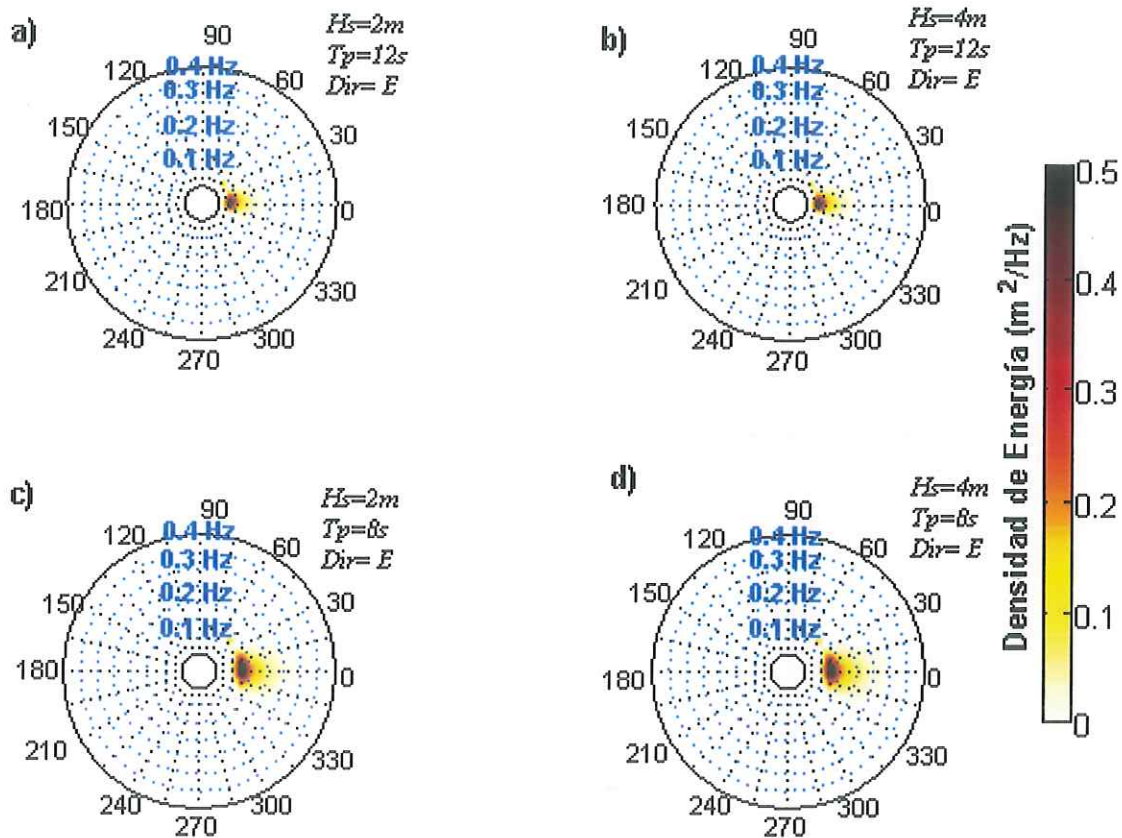


Figura 21. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en m<sup>2</sup>/Hz.

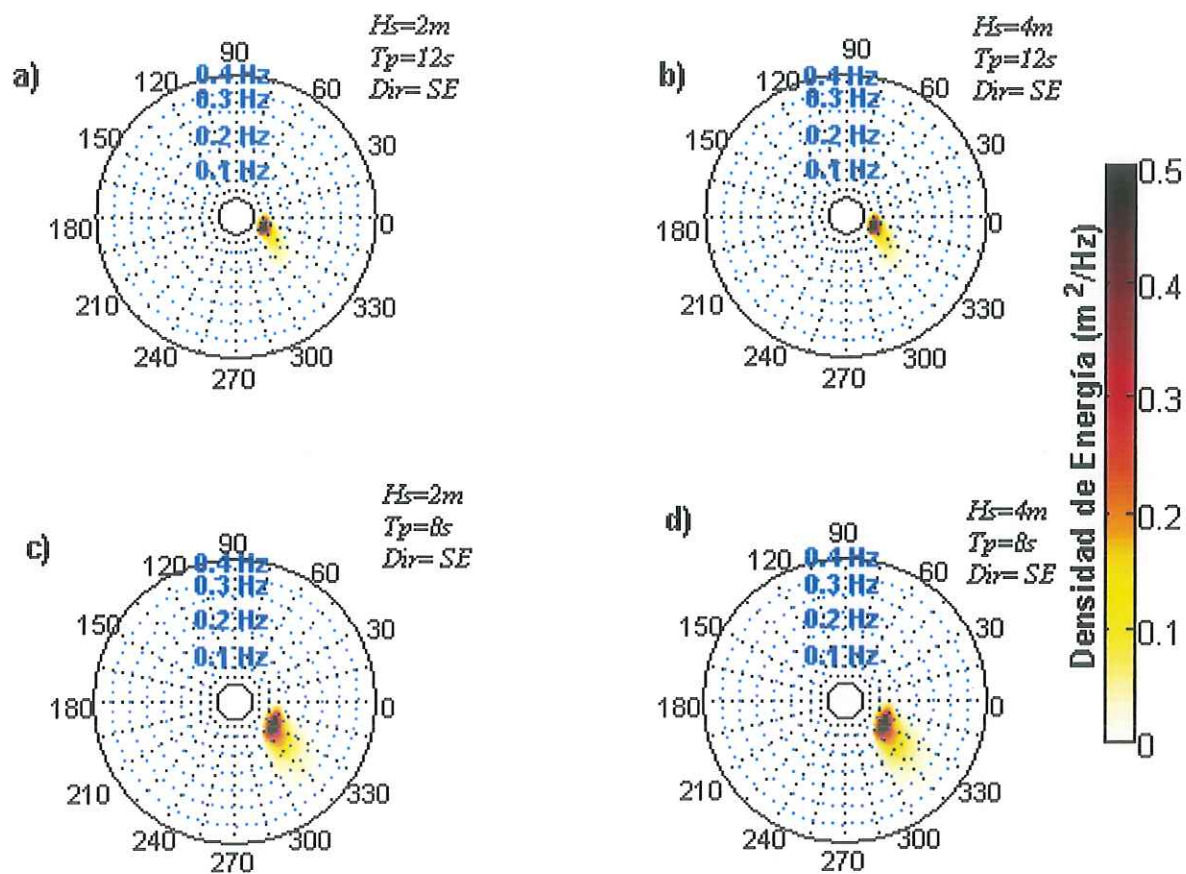


Figura 22. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de cada simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de Densidad de Energía en m<sup>2</sup>/Hz.

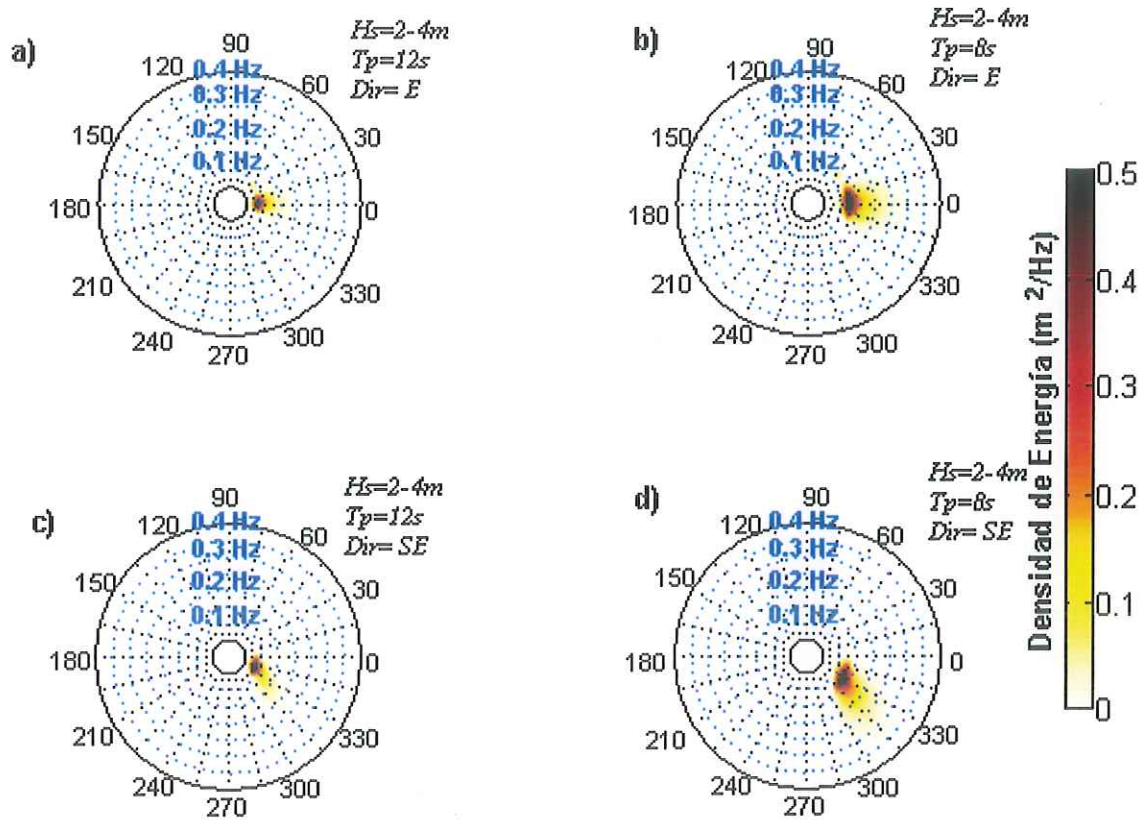


Figura 23. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de cada simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ .

El espectro direccional resultante de la simulación 13 (Figura 24) alcanzó una frecuencia de 0.25Hz y se esparció en un intervalo de 45° con una dirección del pico espectral de 337.15°.

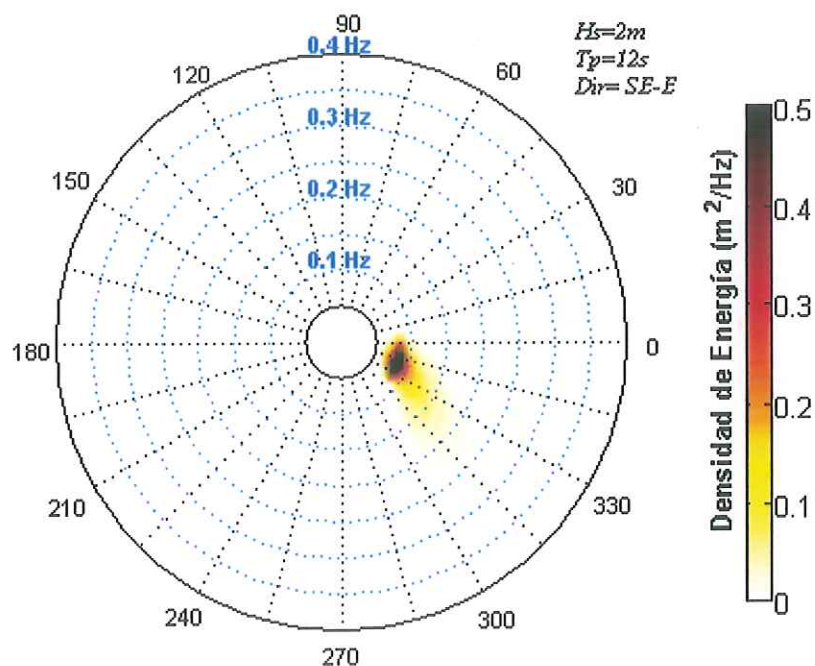


Figura 24. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto SM correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ .

## VII.2.2 Punto PM.

El punto PM se encuentra ubicado cerca de Punta Morro al norte de la bahía en las coordenadas (17800,22800) de la malla y tiene una profundidad de 11.85 metros.

En la Figura 25 se muestran los espectros en frecuencia del punto PM como resultado de las simulaciones 1 a la 8. En las gráficas a) y b) se presentan los espectros de las simulaciones 1, 2 y 3, 4 respectivamente, se puede observar que la mayor densidad de energía de este oleaje se presentó en las frecuencias menores a 0.1 Hz. En las gráficas a) y b) se observó que los espectros azules cuentan con dos picos, uno pico con mayor energía cerca de la frecuencia de 0.1 Hz y el segundo cerca de la frecuencia de 0.2 Hz. Las gráficas c) y d) corresponden a los espectros de las simulaciones 5, 6 y 7, 8 respectivamente, donde la mayor densidad de energía se presentó en las frecuencias mayores a 0.1 Hz.

Los espectros en frecuencia que resultaron de las simulaciones 9, 10, 11, 12 y 13 se muestran en la Figura 26. Los espectros de la gráfica a) son el resultado de las simulaciones 9 y 10 y se observa que la mayor densidad de energía se concentró en una frecuencia menor a 0.1 Hz. El espectro azul presenta dos picos, uno con mayor energía en una frecuencia menor a 0.1 Hz y uno de menor energía cerca de la frecuencia de 0.2 Hz. Los espectros de la gráfica b) son el resultado de las simulaciones 11 y 12, la densidad de energía se agrupó entre las frecuencias 0.1 y 0.2 Hz. El espectro dado por la simulación 13 se muestra en la gráfica c) y podemos observar que la energía en él es poca ( $< 2\text{m}^2/\text{Hz}$ ), la cual se concentró en una frecuencia menor a los 0.1Hz.

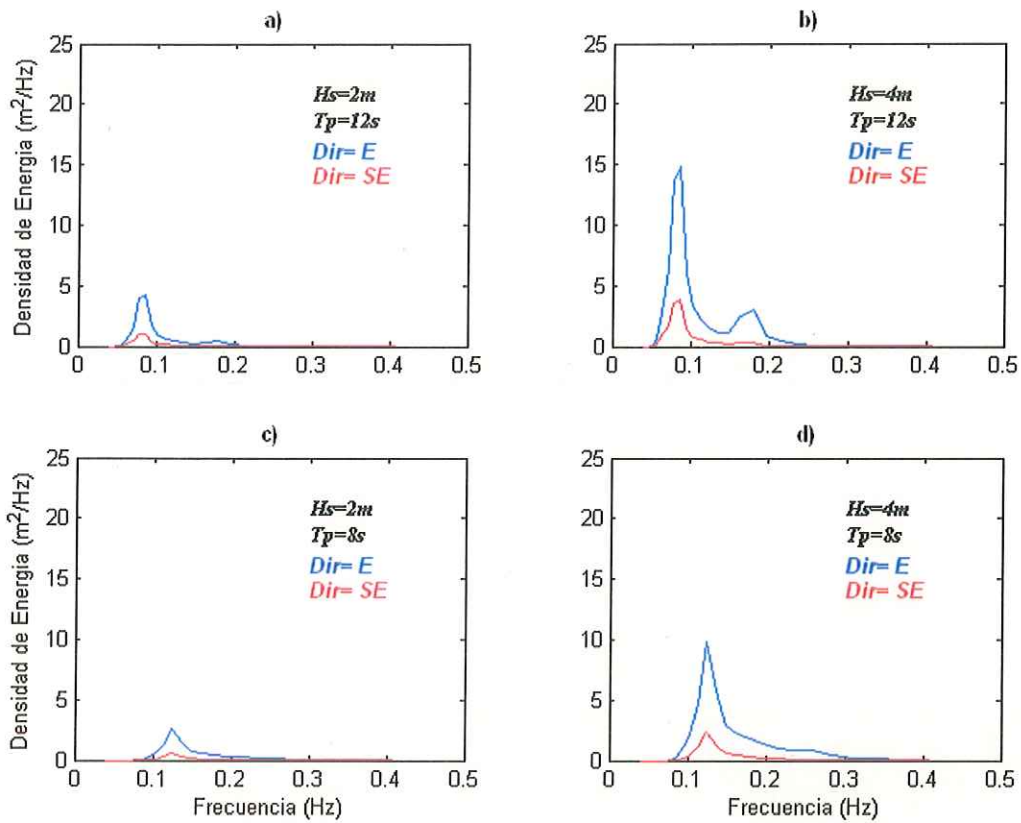


Figura 25. Espectros en frecuencia del punto PM, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8 como resultado de las simulaciones. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.

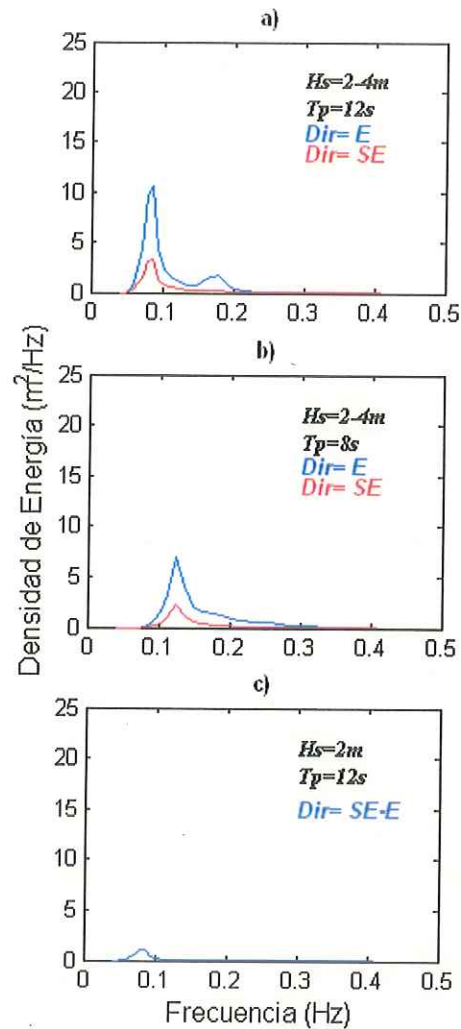


Figura 26. Espectros en frecuencia del punto PM, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en m<sup>2</sup>/Hz. Frecuencia en Hz.

En la Figura 27 se muestran los espectros direccionales para el punto PM como resultado de las simulaciones 1, 3, 5 y 7.

Las gráficas a y b muestran los espectros de las simulaciones 1 y 3, se observa que éstos se expandieron hacia frecuencias por encima del pico espectral hasta la frecuencia de 0.25 Hz y en un sector de 45° y mostraron una dirección hacia el este. El pico espectral de la gráfica a) tiene una dirección de 25.03° y el de la b) de 23.83°, en éste último se puede observar un segundo lóbulo cerca de la frecuencia de 0.2 Hz con una densidad de energía de  $\approx 0.3 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

En la gráfica c) y d) se muestran los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 5 y 7. En estos espectros la energía se expandió hasta la frecuencia 0.3 Hz en un rango de 45° y siguió una dirección hacia el este. La dirección del pico espectral de cada una de las gráficas fue 16.33° y 15.89°, respectivamente.

En la Figura 28 se muestran los espectros direccionales como resultado de las simulaciones 2, 4, 6 y 8.

Las gráficas a) y b) representan los espectros direccionales de las simulaciones 2 y 4. En estos espectros la densidad de energía se extendió hasta la frecuencia de 0.2 Hz con una dirección hacia el este. En el espectro a) el pico espectral presentó una dirección de 20.84° y en el b) 20.05°.

Los espectros direccionales que resultaron de las simulaciones 6 y 8 se muestran en las gráficas c) y d) de la Figura 22. Estos espectros pasaron la frecuencia de 0.35 Hz y se expandieron en un rango de 30° con dirección sureste. La dirección del pico espectral para estos dos espectros, c) y d), fue 2.12° y 2.02°, respectivamente.

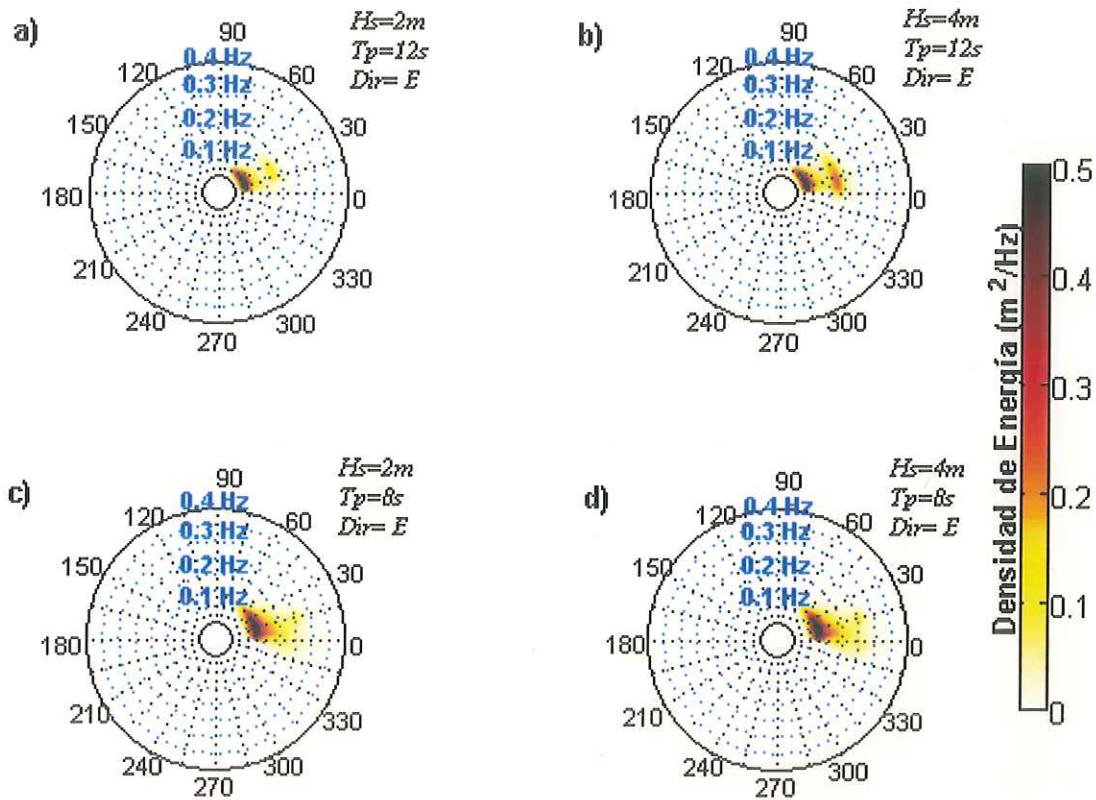


Figura 27. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PM correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

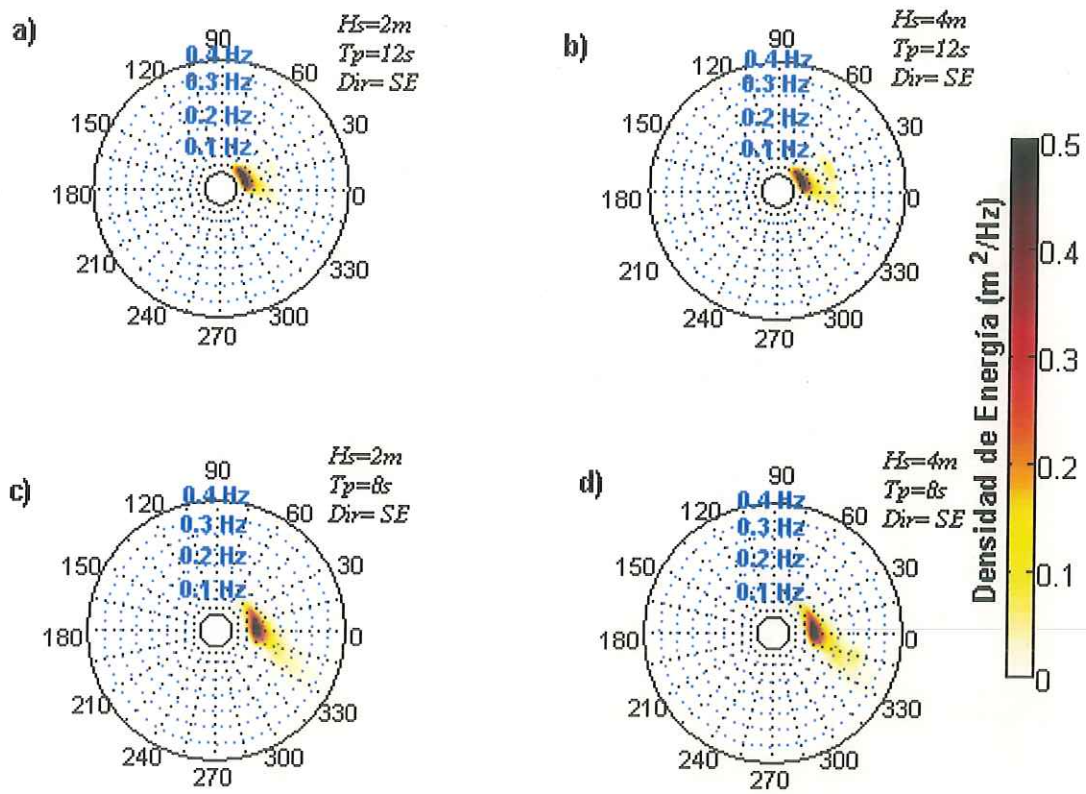


Figura 28. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en m<sup>2</sup>/Hz.

En la Figura 29 se presentan los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 9, 10, 11, 12 y 13.

Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 11, respectivamente. El espectro a) alcanzó una frecuencia de 0.25Hz y un esparcimiento de la densidad de energía de 60° aproximadamente, la dirección del pico espectral fue de 22.88°. En este espectro se puede observar un pequeño lóbulo entre las frecuencia de 0.15 Hz y 0.2Hz con una densidad de energía  $\approx 0.2 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

En la gráfica b) el espectro pasó la frecuencia de 0.3Hz y se expandió en un rango de 60°. La dirección del pico espectral fue de 15.03°. Ambos espectros mantuvieron una dirección hacia el este.

Los espectros en las gráficas c) y d) son el resultado de las simulaciones 10 y 12, respectivamente. El espectro c) se extendió hasta la frecuencia 0.25Hz en un rango de 60° con una dirección de 18.06° del pico espectral. El espectro d) sobrepasó la frecuencia de 0.35Hz y se expandió en un rango de 45° hacia el sureste, con una dirección del pico espectral de 1.31°.

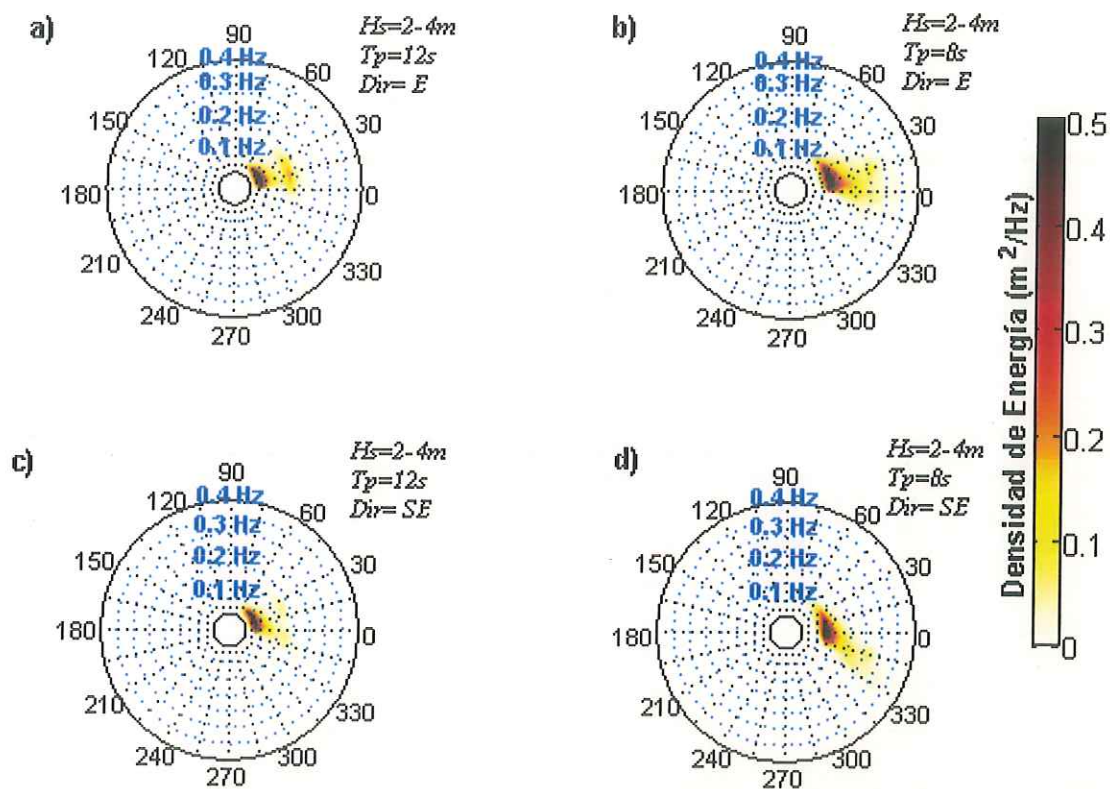


Figura 29. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto SM correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

En la Figura 30 se muestra el espectro direccional resultante de la simulación 13, el cual alcanzó a extenderse hasta la frecuencia de 0.2 Hz y se dispersó en un rango de 60° hacia el este. La dirección del pico espectral fue de 22.16°.

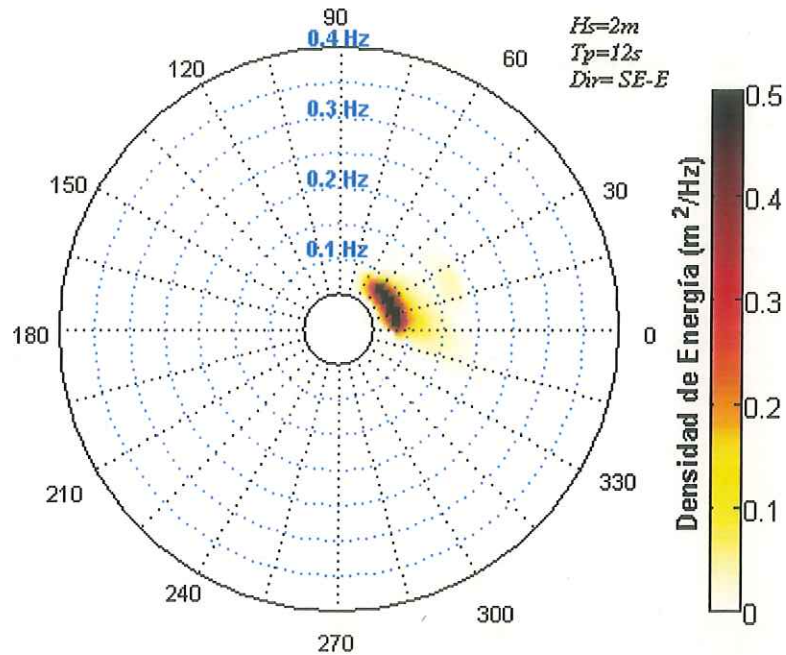


Figura 30. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto SM correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en  $m^2/Hz$ .

### VII.2.3 Punto Ra.

El punto Ra se encuentra ubicado enfrente del rompeolas del puerto de Ensenada en las coordenadas (21200, 22200) de la malla y tiene una profundidad de 12.85 metros.

Los espectros en frecuencia del punto Ra se muestran en la Figura 31. En los gráficos a) y b) se presentan los espectros resultantes de las simulaciones 1, 2 y 3, 4 respectivamente.

En los espectros a) y b) la mayor densidad de energía de este oleaje se presentó en las frecuencias menores a 0.1 Hz. Estos espectros presentaron dos picos, excepto el rojo del gráfico a), el de mayor energía cerca de la frecuencia 0.1 Hz y el segundo con menor energía cerca de la frecuencia de 0.2 Hz.

Los espectros c) y d) son el resultado de las simulaciones 5, 6 y 7, 9 respectivamente, la mayor densidad de energía se agrupó en frecuencias un poco mayor a 0.1Hz. Estos espectros son de forma unimodal (un sólo pico) a excepción del espectro resultante de la simulación 7, el cual presentó dos picos (bimodal) uno con mayor densidad de energía después de los 0.1 Hz y el segundo entre los 0.2 y 0.3 Hz con menor densidad de energía.

En la Figura 32 se muestran los espectros realizados por las simulaciones 9, 10, 11, y 12. Los espectros de la gráfica a) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 10, respectivamente. Estos espectros presentaron dos picos, el primero cerca de la frecuencia de 0.1 Hz y con la mayor densidad de energía, el segundo poco antes de la frecuencia de los 0.2Hz y con una densidad de energía menor. Los espectros de la gráfica b) son el resultado de las simulaciones 11 y 12, la densidad de energía se agrupó entre las frecuencias 0.1 y 0.2 Hz. En el espectro azul se desarrolló un segundo pico entre las frecuencias 0.2 Hz y 0.3 Hz. El espectro dado por la simulación 13 se muestra en la gráfica c) y presentó con muy poca energía (<

3m<sup>2</sup>/Hz), la cual se concentró en una frecuencia menor a los 0.1Hz. Cerca de la frecuencia de 0.2Hz se distingue un pequeño pico con una densidad de energía menor a los 0.5 m<sup>2</sup>/Hz.

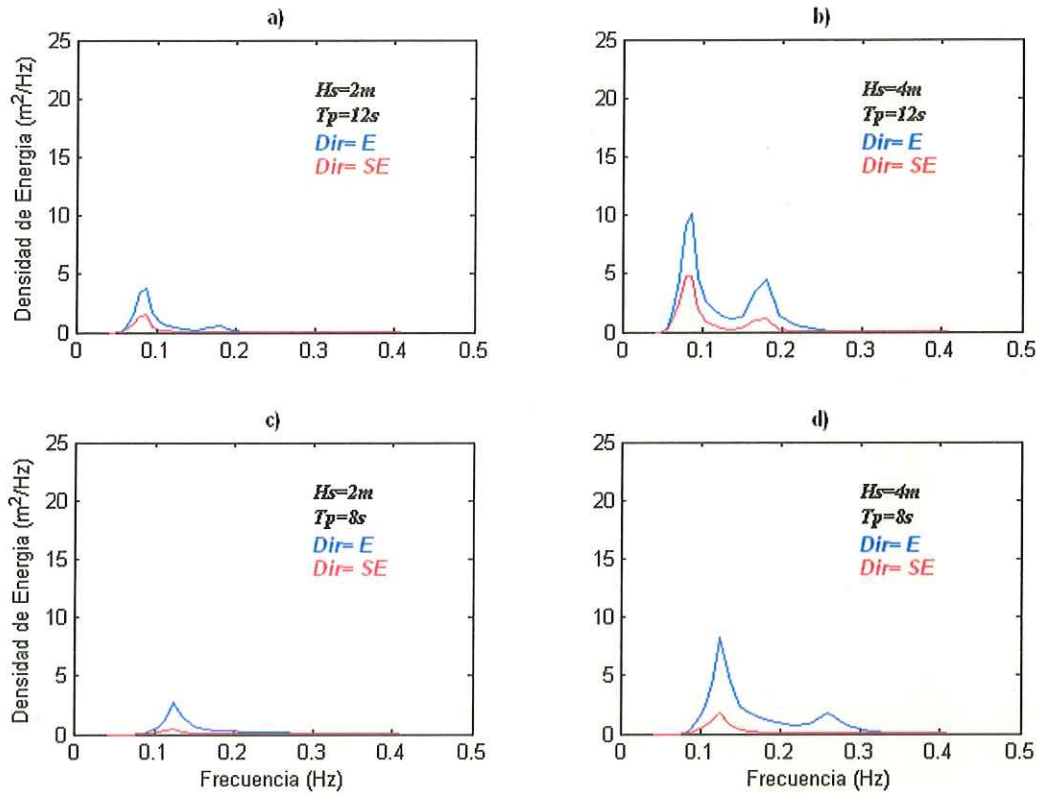


Figura 31. Espectros en frecuencia del punto Ra, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en m<sup>2</sup>/Hz. Frecuencia en Hz.

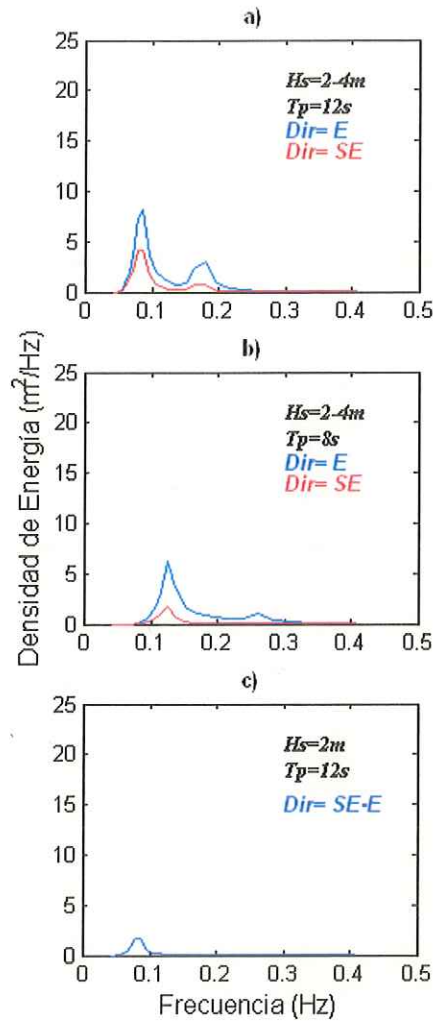


Figura 32. Espectros en frecuencia del punto Ra, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.

En la Figura 33 se muestran los espectros direccionales para el punto Ra como resultado de las simulaciones 1, 3, 5 y 7.

Las graficas a y b muestran los espectros de las simulaciones 1 y 3, se observa que éstos se expandieron hacia frecuencias por el encima del pico espectral hasta la frecuencia de 0.25Hz y en un sector de 60° y mostraron una dirección hacia el este. El pico espectral de la grafica a) presentó una dirección de 21.82° y el de la b) de 20.47°, en estos dos espectros se observó un segundo lóbulo cerca de la frecuencia de 0.2 Hz con una densidad de energía de  $\approx 0.2 \text{ m}^2/\text{Hz}$  para el a) y  $>0.4 \text{ m}^2/\text{Hz}$  para el b).

En la gráfica c) y d) se muestran los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 5 y 7. En estos espectros la energía se expandió por encima de la frecuencia de 0.35Hz en un rango de 60° y siguió una dirección hacia el este. La dirección del pico espectral de cada una de las gráficas fue 15.61° y 14.69°, respectivamente. En el espectro d) se originó un segundo lóbulo con una densidad de energía de  $\approx 0.25 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

En la Figura 34 se muestran los espectros direccionales como resultado de las simulaciones 2, 4, 6 y 8.

Los espectros direccionales a) y b) representan los resultados de las simulaciones 2 y 4. En ellos la densidad de energía se extendió hasta la frecuencia de 0.2Hz con una dirección hacia el este. En el espectro a) la densidad de energía se dispersó en un rango de 60° y el pico espectral tuvo una dirección de 20.74°. En el b) la densidad de energía también abarcó un rango de 60° y la dirección del pico espectral fue de 20.47°. Este último presentó un segundo lóbulo cerca de la frecuencia de los 0.2 Hz con una densidad de energía de  $0.3 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

Los espectros c) y d) representan los resultados de las simulaciones 6 y 8. Estos espectros se extendieron hasta la frecuencia de 0.25Hz y se expandieron en un rango de 75° aproximadamente, con dirección hacia el este. La dirección del pico espectral para estos dos espectros, c) y d), fue 12.85° y 12.71°, respectivamente.

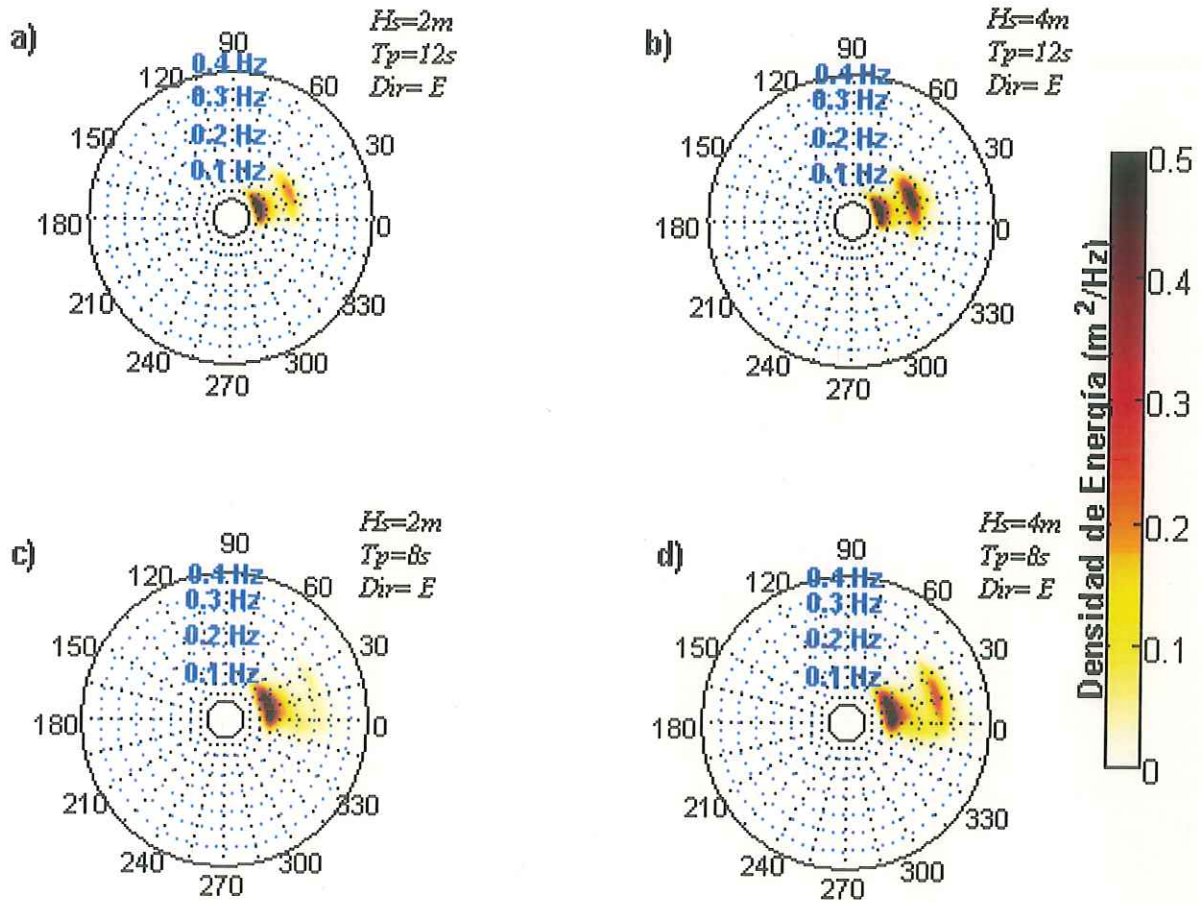


Figura 33. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Ra correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en m<sup>2</sup>/Hz.

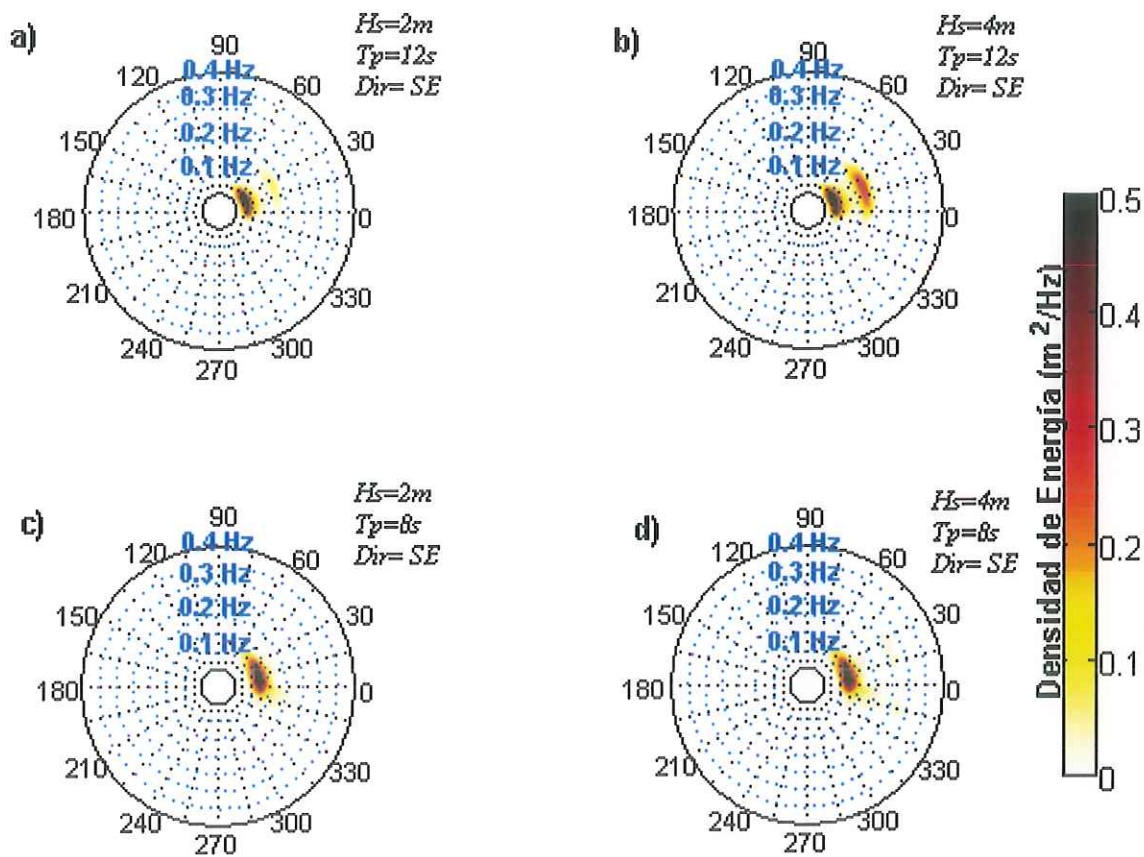


Figura 34. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Ra correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

En la Figura 35 se presentan los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 9, 10, 11 y 12.

Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 11, respectivamente. El espectro a) alcanzó una frecuencia de 0.25Hz y un esparcimiento de la densidad de energía de  $60^\circ$  aproximadamente, la dirección del pico espectral fue de  $19.99^\circ$ . En este espectro se puede observar un pequeño lóbulo entre las frecuencia de 0.15 Hz y 0.2Hz con una densidad de energía  $\approx 0.45 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

En la gráfica b) el espectro pasa la frecuencia de 0.35 Hz y se expandió en un rango de  $60^\circ$ . La dirección del pico espectral fue de  $14.40^\circ$ . Se presentó un pequeño lóbulo en la frecuencia de 0.2Hz con una densidad de energía ( $0.2 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ). Ambos espectros (a y b) se orientaron hacia el este.

Los espectros en las gráficas c) y d) son el resultado de las simulaciones 10 y 12, respectivamente. El espectro c) se extendió hasta la frecuencia 0.2Hz en un rango de  $60^\circ$  con una dirección de  $19.44^\circ$  del pico espectral. Se generó un segundo lóbulo entre las frecuencias 0.15 y 0.2 Hz con una densidad de energía de  $0.25 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

El espectro d) alcanzó una frecuencia de 0.35Hz y se expandió en un rango de  $90^\circ$  hacia el este, con una dirección del pico espectral de  $11.96^\circ$ .

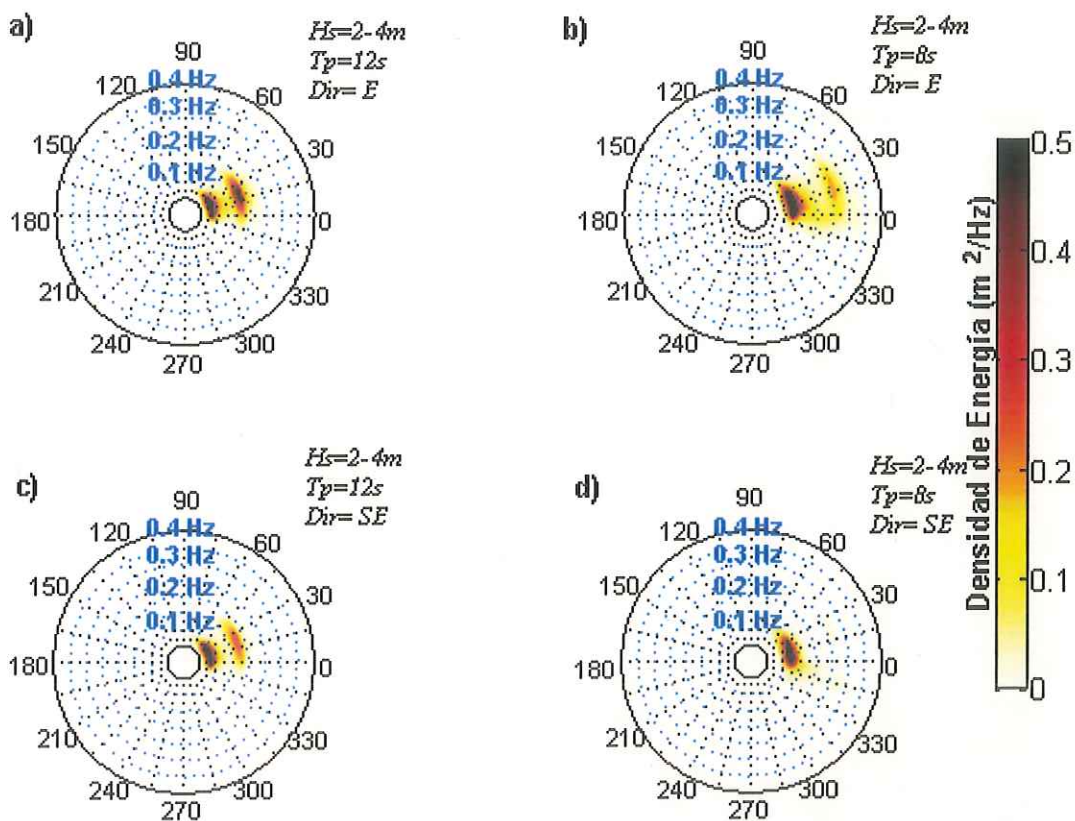


Figura 35. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Ra correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

En la Figura 36 se muestra el espectro direccional resultante de la simulación 13, el cual alcanzó a extenderse hasta la frecuencia de 0.2 Hz y se dispersó en un rango de 45° hacia el noreste. La dirección del pico espectral fue de 21.28°.

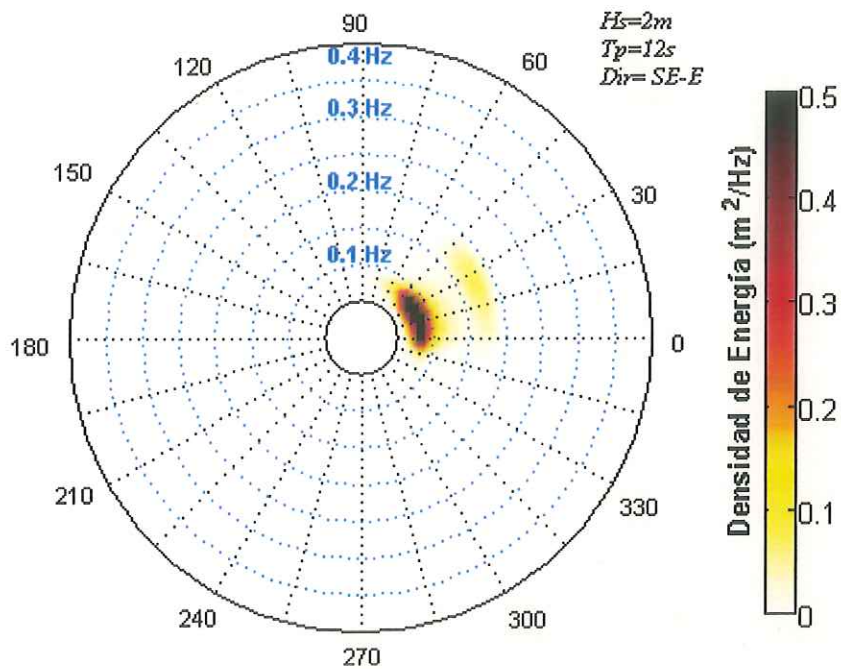


Figura 36. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto Ra correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en m<sup>2</sup>/Hz.

## VII.2.4 Punto Rb.

El punto Rb se encuentra ubicado enfrente del rompeolas del puerto de Ensenada en las coordenadas (21400, 21400) de la malla y tiene una profundidad de 13.12 metros.

En la Figura 37 se presentan los espectros en frecuencia del punto Rb como resultado de la simulación 1 a la 8. En las gráficas a) y b) se presentan los espectros de las simulaciones 1, 2 y 3, 4, respectivamente. La mayor densidad de energía en estos cuatro espectros se ubicó en una frecuencia menor a 0.1Hz. Los espectros de la gráfica b) presentaron dos picos espectrales cerca de la frecuencia de 0.2 Hz con una densidad de energía menor a los 2 m<sup>2</sup>/Hz. En los espectros c) y d) el pico de mayor densidad de energía se ubicó después de la frecuencia de 0.1 Hz

En la Figura 38 se muestran los espectros realizados por las simulaciones 9, 10, 11, y 12. Los espectros de la gráfica a) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 10, respectivamente. En estos espectros la mayor densidad de energía se agrupó poco antes de la frecuencia de 0.1Hz. Los espectros de la gráfica b) son el resultado de las simulaciones 11 y 12, la mayor densidad de energía se presentó entre las frecuencias 0.1Hz y 0.2Hz. El espectro dado por la simulación 13 se muestra en la gráfica c) y cuenta con un pico espectral que se ubicó antes de la frecuencia de 0.1 Hz y una densidad de energía menor a 2 m<sup>2</sup>/Hz,

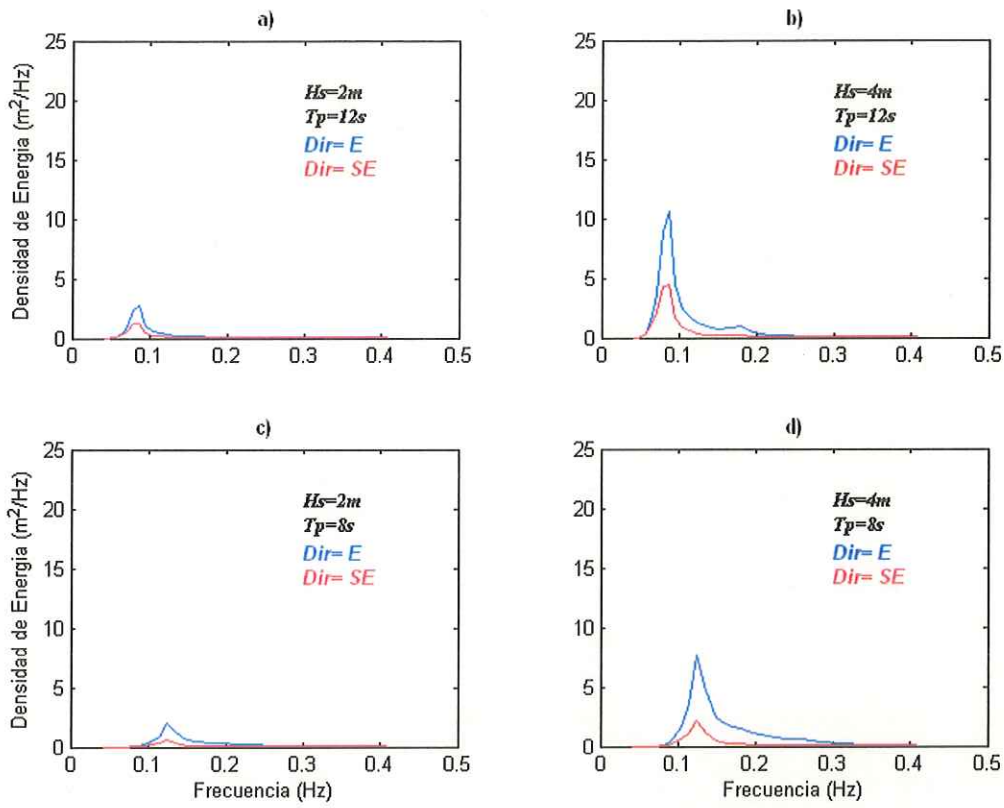


Figura 37. Espectros en frecuencia del punto Rb, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.

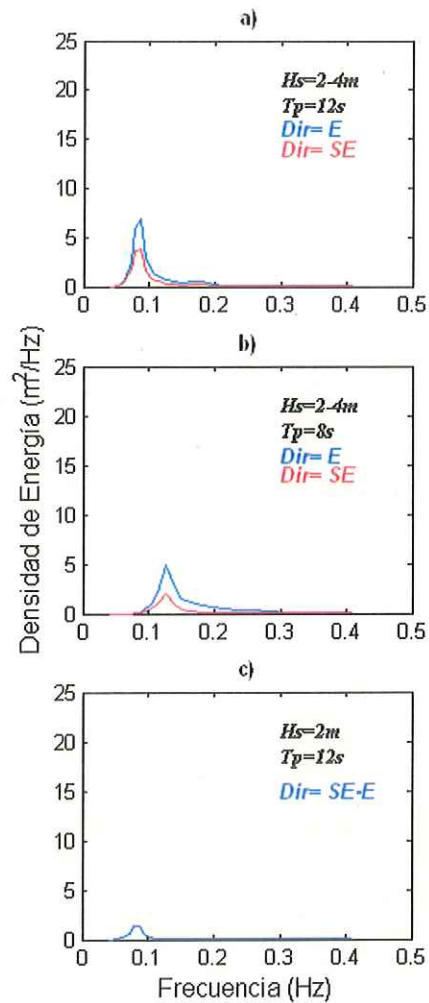


Figura 38. Espectros en frecuencia del punto Rb, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.

Los espectros direccionales para el punto Rb como resultado de las simulaciones 1, 3, 5 y 7 se muestran en la Figura 39. Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 1 y 3, en los cuales se observa que cada uno se extendió hasta la frecuencia de los 0.25Hz y con un rango de dispersión de 60° hacia el este. El pico espectral de la gráfica a) presentó una dirección de 13.29° y el de la b) de 13.09°.

En las gráficas c) y d) se muestran los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 5 y 7. En estos espectros la energía se expandió por encima de la frecuencia de 0.35Hz en un rango de 60° y siguieron una dirección hacia el este. La dirección del pico espectral de cada una de las gráficas fue 7.49° y 7.75°, respectivamente.

Los espectros direccionales como resultado de las simulaciones 2, 4, 6 y 8 se presentan en la Figura 40.

Los espectros direccionales a) y b) representan los resultados de las simulaciones 2 y 4. En ellos la densidad de energía se extendió hasta la frecuencia de 0.2Hz y una dirección hacia el este. En el espectro a) la densidad de energía se dispersó en un rango de 45° y el pico espectral tuvo una dirección de 10.08°. En el b) la densidad de energía también abarcó un rango de 60° y la dirección del pico espectral fue de 9.54°.

Los espectros c) y d) representan los resultados de las simulaciones 6 y 8. Estos espectros se extendieron hasta la frecuencia de 0.3Hz y se expandieron en un rango de 30° aproximadamente, con dirección hacia el sureste. La dirección del pico espectral para estos dos espectros, c) y d), fue 359.65° y 359.65°, respectivamente.

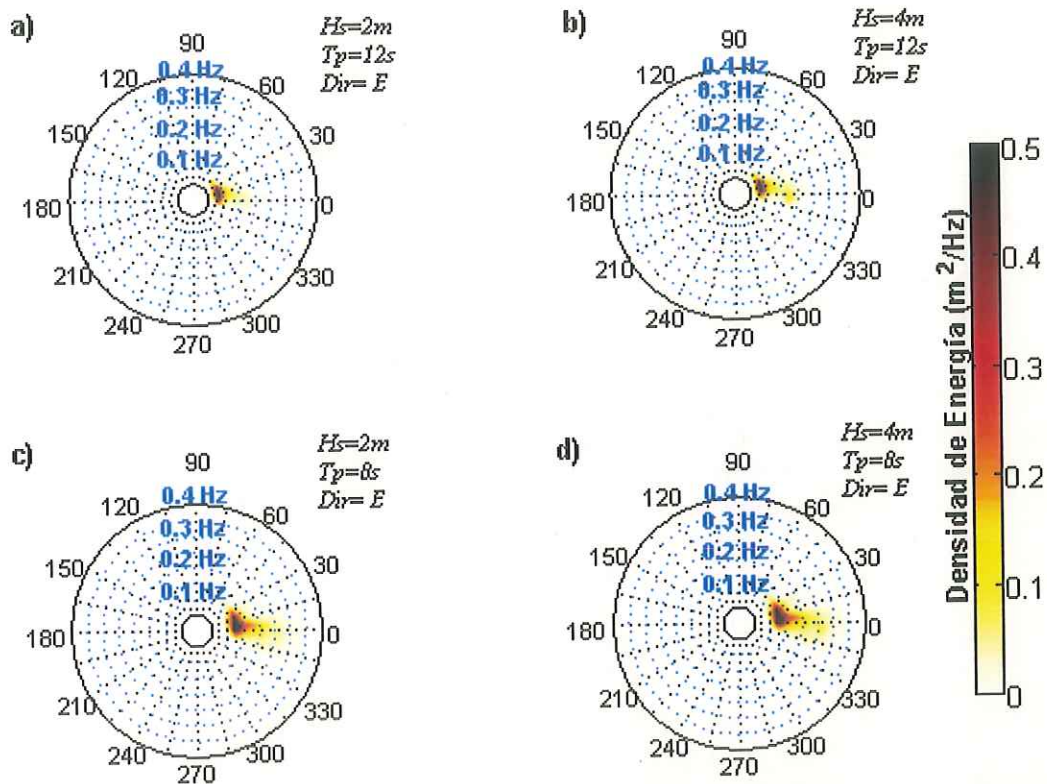


Figura 39. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Rb correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

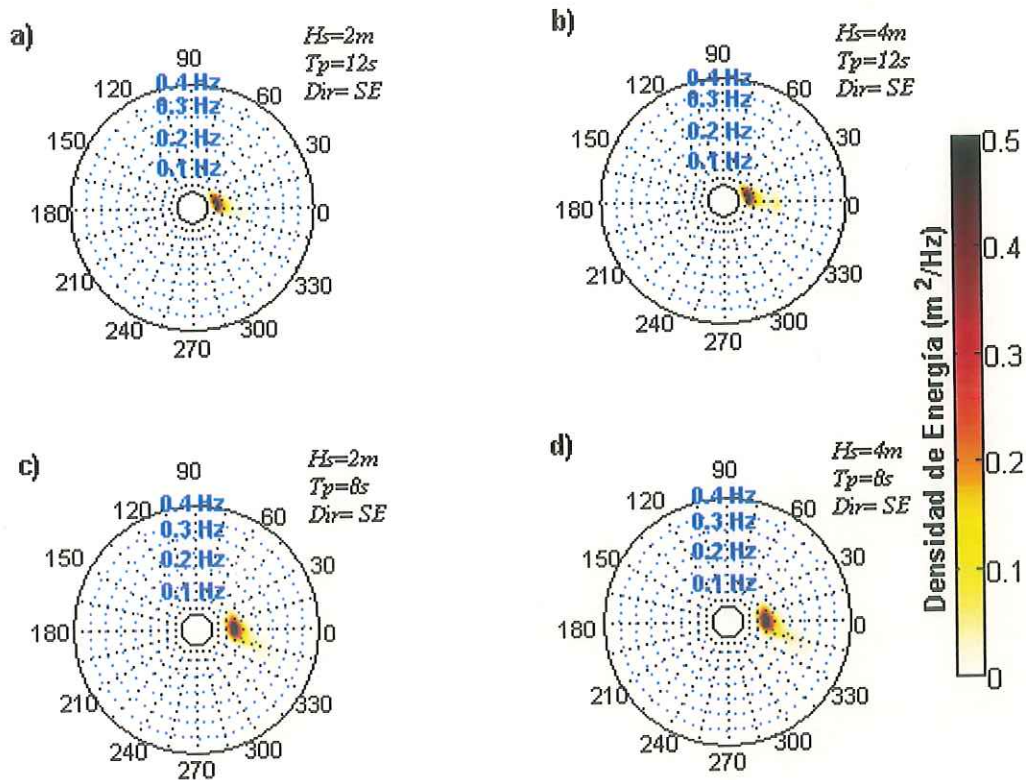


Figura 40. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Rb correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

En la Figura 41 se presentan los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 9, 10, 11 y 12.

Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 11, respectivamente. En el espectro a) se observa que alcanzó una frecuencia un poco mayor a los 0.2Hz y un esparcimiento de la densidad de energía de  $45^\circ$  aproximadamente, la dirección del pico espectral fue de  $11.10^\circ$ . En la gráfica b) el espectro llegó hasta la frecuencia de 0.35Hz y se expandió en un rango de  $45^\circ$ . La dirección del pico espectral fue de  $5.76^\circ$ . Ambos espectros a) y b) se orientaron hacia el este.

Los espectros en las gráficas c) y d) son el resultado de las simulaciones 10 y 12, respectivamente. El espectro c) se extendió hasta la frecuencia 0.2 Hz en un rango de  $30^\circ$  con una dirección de  $8.26^\circ$  del pico espectral hacia el este. El espectro d) se extendió hasta la frecuencia de 0.3 Hz y se expandió en un rango de  $30^\circ$  hacia el sureste, con una dirección del pico espectral de  $358.97^\circ$ .

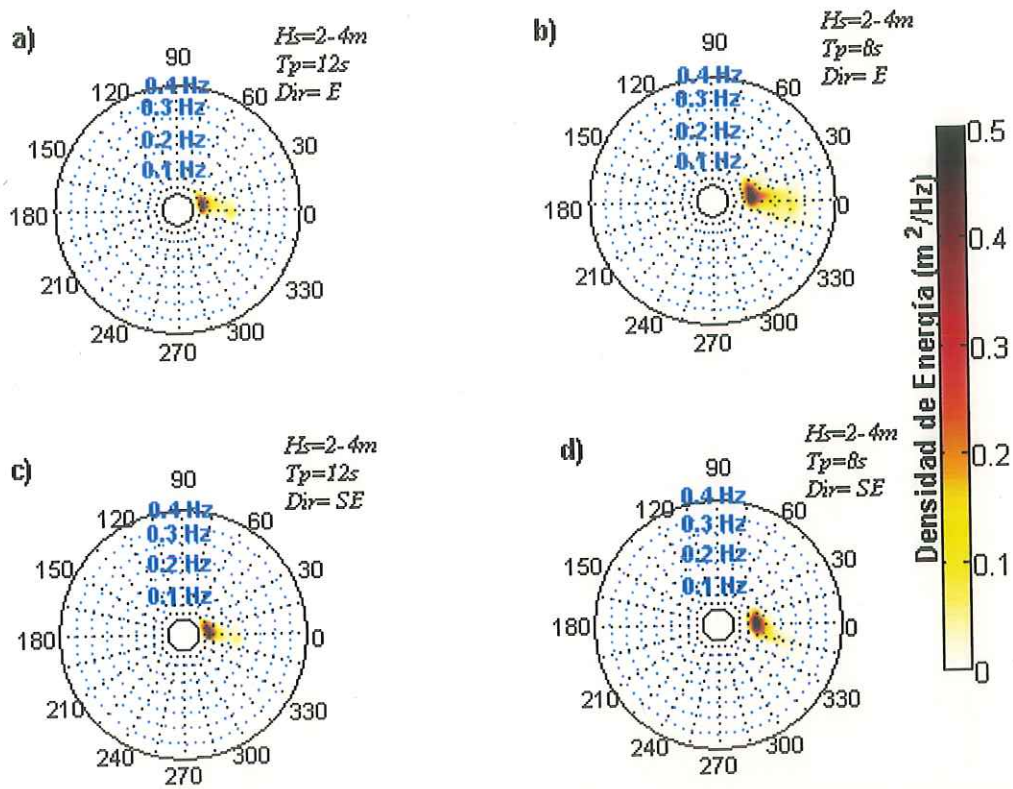


Figura 41. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto Rb correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

En la Figura 42 se muestra el espectro direccional como resultado de la simulación 13, éste se extendió hasta un poco antes de la frecuencia de 0.2 Hz y se dispersó en un rango de 60° hacia el este. La dirección del pico espectral fue de 10.72°.

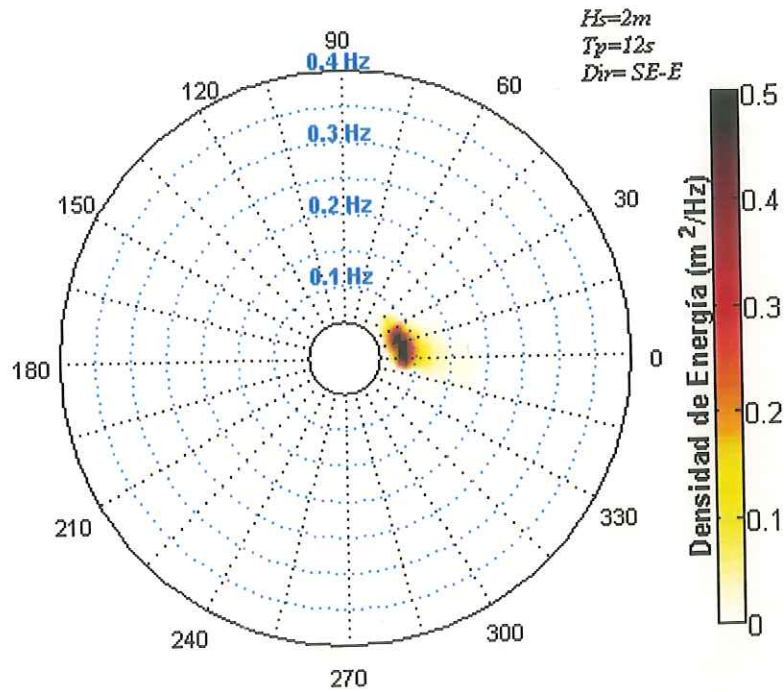


Figura 42. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto Rb correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en m<sup>2</sup>/Hz.

## VII.2.5 Punto BE.

El punto BE se encuentra ubicado enfrente de la barra del Estero de Punta Banda al este de la bahía en las coordenadas (21200,8400) de la malla y tiene una profundidad de 8.42 metros.

En la Figura 43 se presentan los espectros en frecuencia del punto BE como resultado de la simulación 1 a la 8. En las gráficas a) y b) se presentan los espectros de las simulaciones 1, 2 y 3, 4, respectivamente. En los espectros de la gráfica a) la mayor densidad de energía ( $<3 \text{ m}^5/\text{Hz}$ ) se ubicó en una frecuencia menor a los 0.1Hz. En los de la gráfica b) la mayor densidad de energía ( $\approx 9 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ) también se ubicó en una frecuencia menor a 0.1Hz. Los espectros de la gráfica b) presentaron dos picos espectrales cerca de la frecuencia de 0.2Hz con una densidad de energía menor a los  $2 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

En los espectro c) y d) el pico de mayor densidad de energía se ubicó entre las frecuencia de 0.1Hz y 0.15Hz. El espectro c) presentó una densidad de energía de aproximadamente  $3 \text{ m}^2/\text{Hz}$ . Y el espectro d) presentó dos picos, el primero con mayor densidad de energía,  $\approx 11 \text{ m}^2/\text{Hz}$ , y el segundo con  $\approx 1 \text{ m}^2/\text{Hz}$  cerca de la frecuencia de 0.26Hz.

En la Figura 44 se muestran los espectros realizados por las simulaciones 9, 10, 11, y 12. Los espectros de la gráfica a) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 10, respectivamente. La mayor densidad de energía se agrupó poco antes de la frecuencia de 0.1Hz. Estos espectros presentaron dos picos, el primero con una densidad de energía menor a los  $6 \text{ m}^2/\text{Hz}$  y el segundo menor a  $1 \text{ m}^2/\text{Hz}$  cerca de 0.2Hz. Los espectros de la gráfica b) son el resultado de las simulaciones 11 y 12, con una densidad de energía menor a los  $9 \text{ m}^2/\text{Hz}$  entre las frecuencias 0.1 y 0.2 Hz. El espectro dado por la simulación 13 se muestra en la gráfica c) y

cuenta con un pico espectral que se ubicó antes de la frecuencia de 0.1 Hz y una densidad de energía menor a  $3 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

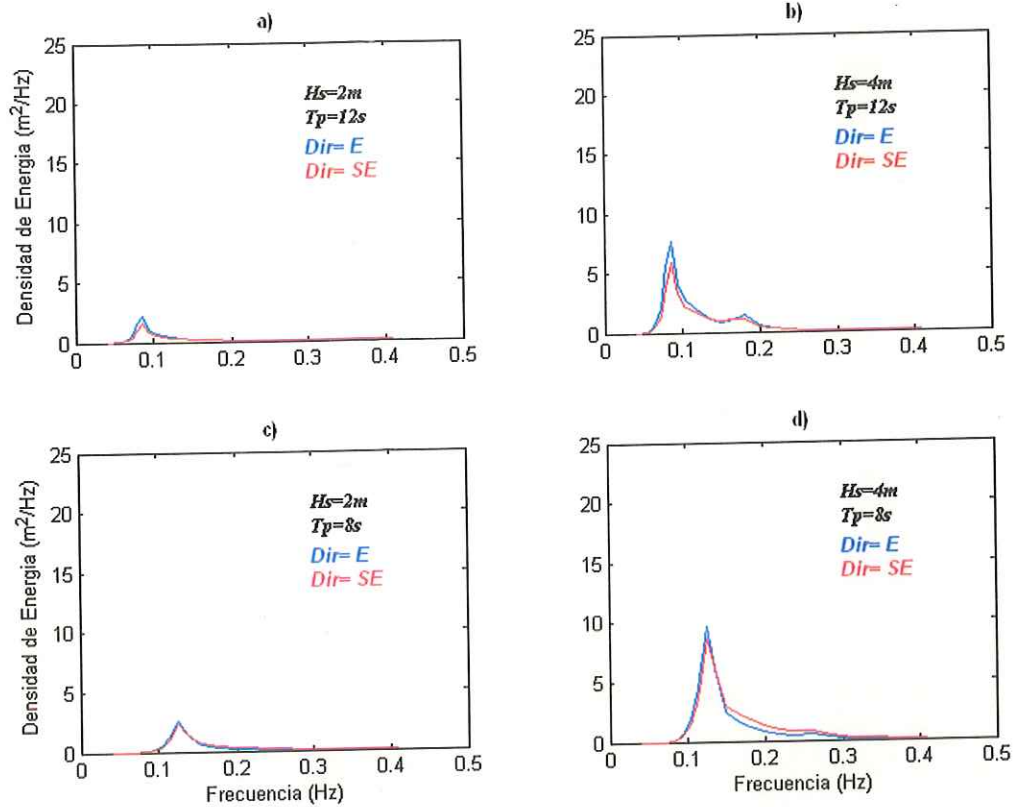


Figura 43. Espectros en frecuencia del punto BE, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en  $\text{m}^2/\text{Hz}$ . Frecuencia en Hz.

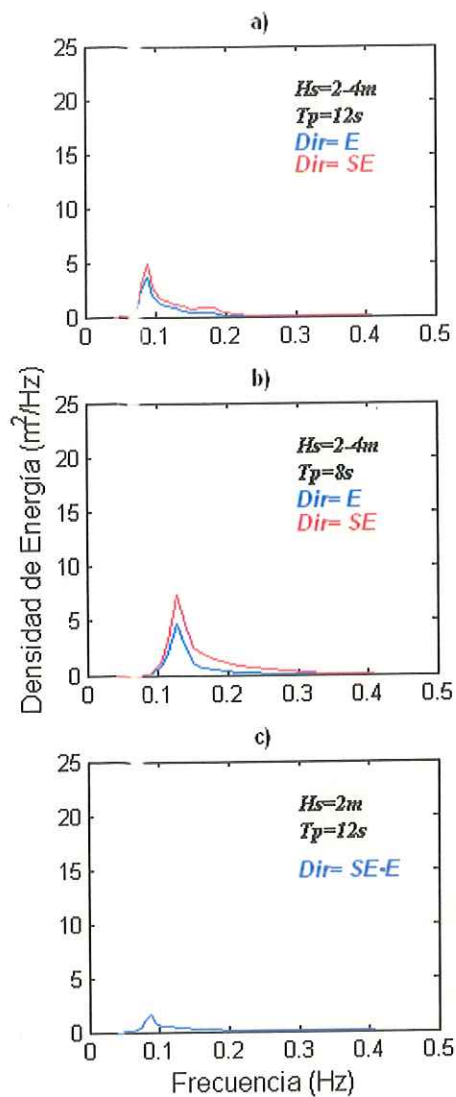


Figura 44. Espectros en frecuencia del punto BE, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.

Los espectros direccionales del punto BE como resultado de las simulaciones 1, 3, 5 y 7 se muestran en la Figura 45. Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 1 y 3, en los cuales se observa que cada uno se extendió hasta la frecuencia de los 0.25Hz y un rango de dispersión de 45° hacia el sureste. El pico espectral de la gráfica a) tuvo una dirección de 343.11° y el de la b) de 343.43°. El espectro b) presentó un segundo lóbulo entre las frecuencias de 0.15Hz y 0.2Hz con una densidad de energía de 0.25 m<sup>2</sup>/Hz, aproximadamente.

En las gráficas c) y d) se muestran los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 5 y 7. En estos espectros la energía se expandió hasta la frecuencia de 0.35Hz en un rango de 45° y siguieron una dirección hacia el este. La dirección del pico espectral de cada una de las gráficas fue 345.08° y 345.68°, respectivamente.

Los espectros direccionales como resultado de las simulaciones 2, 4, 6 y 8 se presentan en la Figura 46.

Los espectros direccionales a) y b) representan los resultados de las simulaciones 2 y 4. En ellos la densidad de energía se extendió hasta la frecuencia de 0.25 Hz y una dirección hacia el sureste. En el espectro a) la densidad de energía se dispersó en un rango de 45° y el pico espectral presentó una dirección de 327.41°. En el b) la densidad de energía también abarcó un rango de 60° y la dirección del pico espectral fue de 327.45°.

Los espectros c) y d) representan los resultados de las simulaciones 6 y 8. Estos espectros se extendieron un poco más de la frecuencia de 0.3 Hz y se expandieron en un rango de 45° aproximadamente, con dirección hacia el sureste. La dirección del pico espectral para estos dos espectros, c) y d), fue 322.39° y 322.20°, respectivamente.

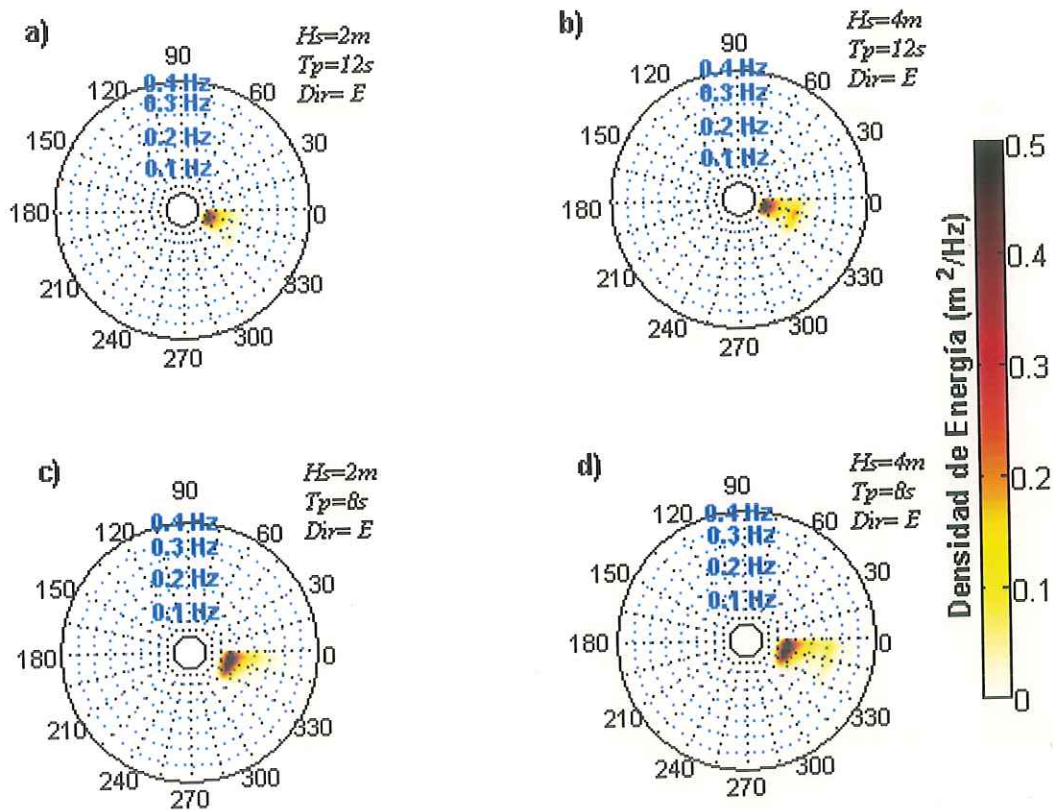


Figura 45. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto BE correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

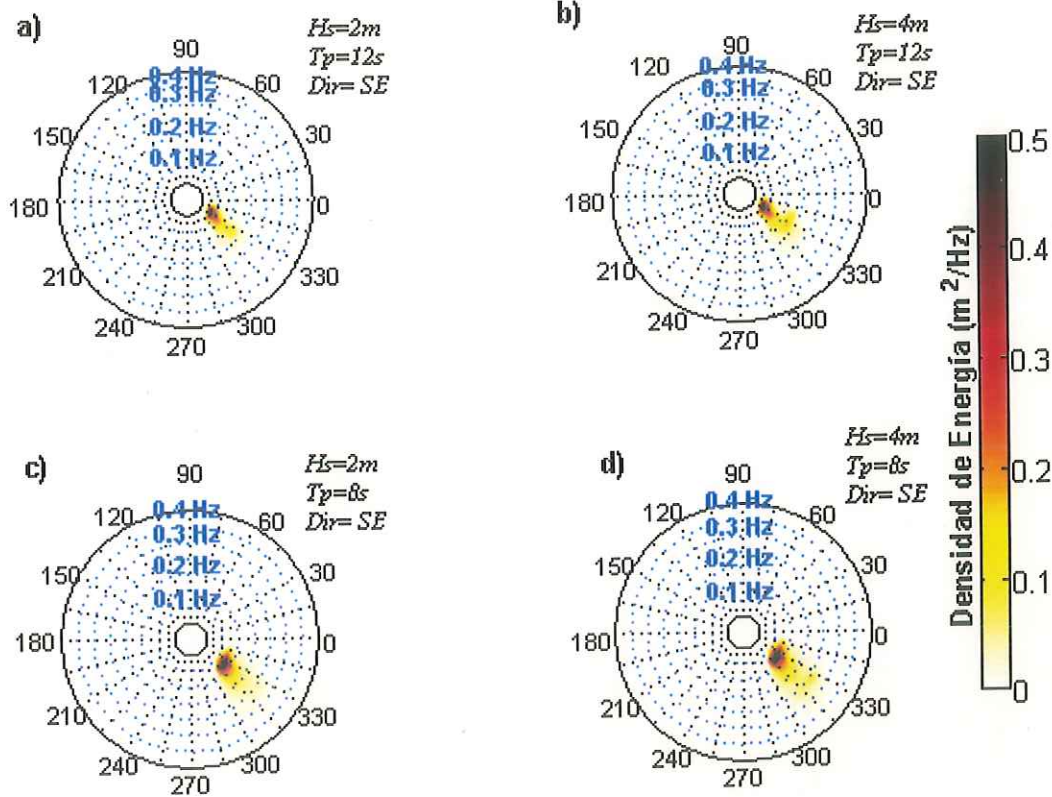


Figura 46. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto BE correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en m<sup>2</sup>/Hz.

En la Figura 47 se presentan los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 9, 10, 11 y 12.

Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 11, respectivamente. En el espectro a) se observa que alcanzó una la frecuencia de los 0.25Hz y un esparcimiento de la densidad de energía de  $45^\circ$  aproximadamente, la dirección del pico espectral fue de  $342^\circ$ . En la gráfica b) el espectro llegó hasta la frecuencia de 0.35Hz y se expandió en un rango de  $\approx 45^\circ$ . La dirección del pico espectral fue de  $344.20^\circ$ . Ambos espectros a) y b) se orientaron hacia el este.

Los espectros en las gráficas c) y d) son el resultado de las simulaciones 10 y 12, respectivamente. El espectro c) se extendió un poco más de la frecuencia 0.25Hz en un rango de  $45^\circ$  con una dirección de  $326.06^\circ$  del pico espectral hacia el sureste. En este espectro se presentó un segundo lóbulo entre las frecuencias de 0.15Hz y 0.2Hz con una densidad de energía menor a  $0.2 \text{ m}^2/\text{Hz}$ . El espectro d) se extendió hasta la frecuencia de 0.35Hz y se expandió en un rango aproximado de  $45^\circ$  hacia el sureste, con una dirección del pico espectral de  $320.92^\circ$ .

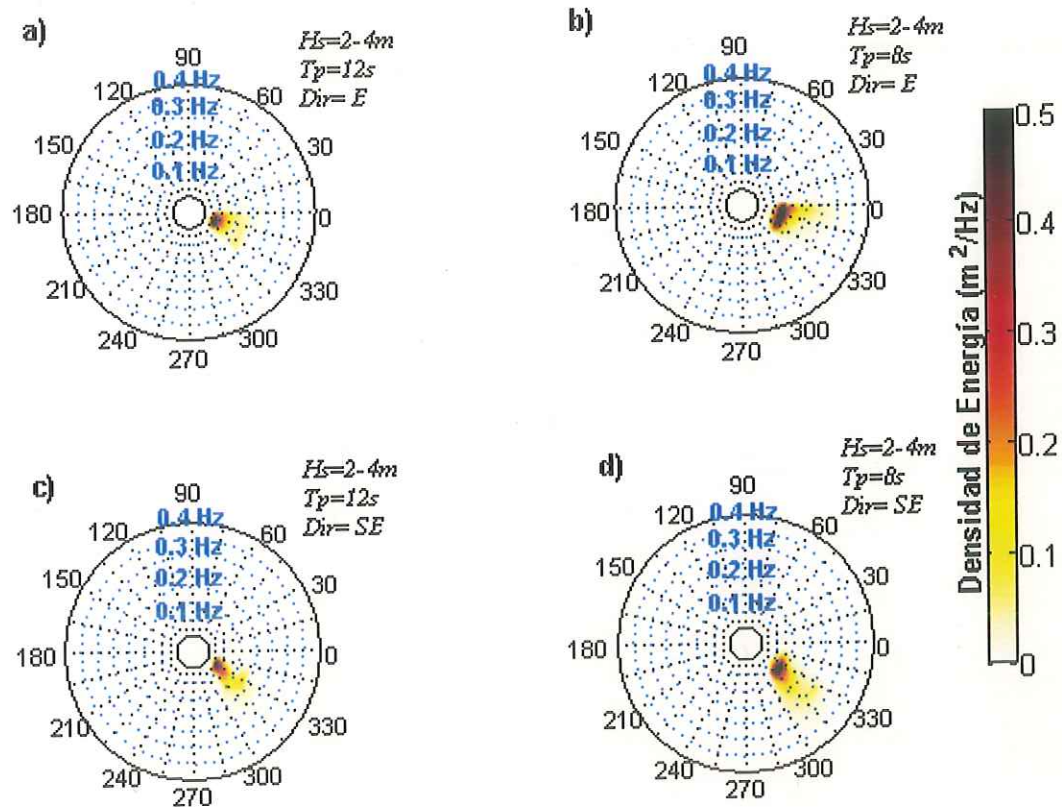
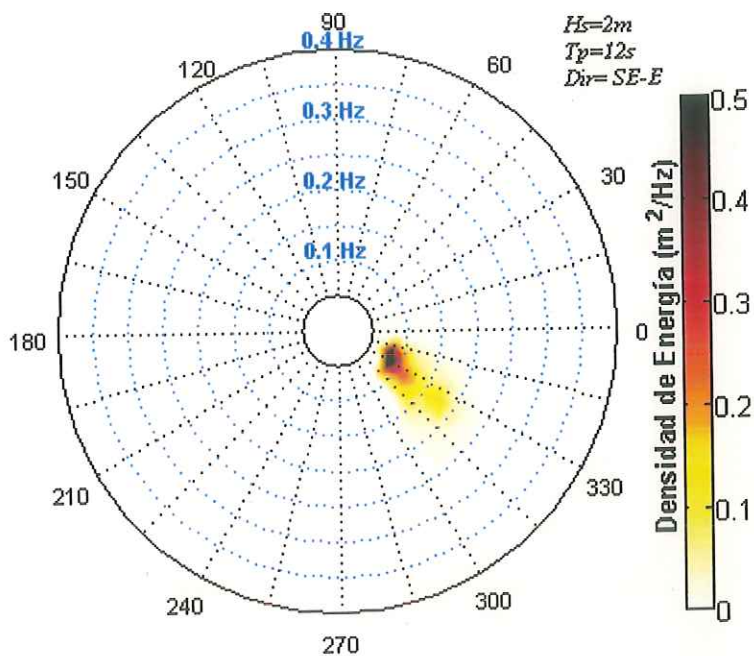


Figura 47. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto BE correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 10, c) 11 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en m<sup>2</sup>/Hz.

En la Figura 48 se muestra el espectro direccional como resultado de la simulación 13, éste se extendió hasta un poco antes de la frecuencia de 0.25 Hz y la densidad de energía se dispersó en un rango de 45° hacia el sureste. La dirección del pico espectral fue de 328.47°. Se observa un segundo lóbulo entre las frecuencias 0.15 Hz y 0.2 con una densidad de energía mucho menor a la del pico espectral ( $\approx 0.15 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ) que sigue la misma dirección.



**Figura 48. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto BE correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en  $\text{m}^2/\text{Hz}$ .**

## VII.2.6 Punto PB.

El punto PB se encuentra ubicado cerca de la península de Punta Banda al sur de la bahía en las coordenadas (15000,6000) de la malla y tiene una profundidad de 20.77 metros.

En la Figura 49 se presentan los espectros en frecuencia del punto PB como resultado de la simulación 1 a la 8. En las gráficas a) y b) se presentan los espectros de las simulaciones 1, 2 y 3, 4, respectivamente. En los espectros de la gráfica a) la mayor densidad de energía ( $<3 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ) se ubicó en una frecuencia menor a los 0.1Hz. En los de la gráfica b) la mayor densidad de energía también se ubicó en una frecuencia menor a 0.1Hz.

En los espectro c) y d) el pico de mayor densidad de energía se ubicó entre las frecuencia de 0.1Hz y 0.15Hz. Los espectros en la gráfica c) presentaron una densidad de energía menor a los  $3 \text{ m}^2/\text{Hz}$ . Los espectros de color azul de las gráficas c) y d) la densidad de energía fue poca, menor a los  $0.6 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

En la Figura 50 se muestran los espectros realizados por las simulaciones 9, 10, 11, y 12. Los espectros de la gráfica a) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 10, respectivamente. La mayor densidad de energía se agrupó poco antes de la frecuencia de 0.1 Hz. Los espectros de la gráfica b) son el resultado de las simulaciones 11 y 12, con una densidad de energía menor a los  $10 \text{ m}^2/\text{Hz}$  entre las frecuencias 0.1 y 0.2 Hz. Los espectros azules de ambas gráficas contaron con poca energía, menor a  $1 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

El espectro dado por la simulación 13 se muestra en la gráfica c) y cuenta con un pico espectral que se ubicó antes de la frecuencia de 0.1 Hz y una densidad de energía menor a  $3 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

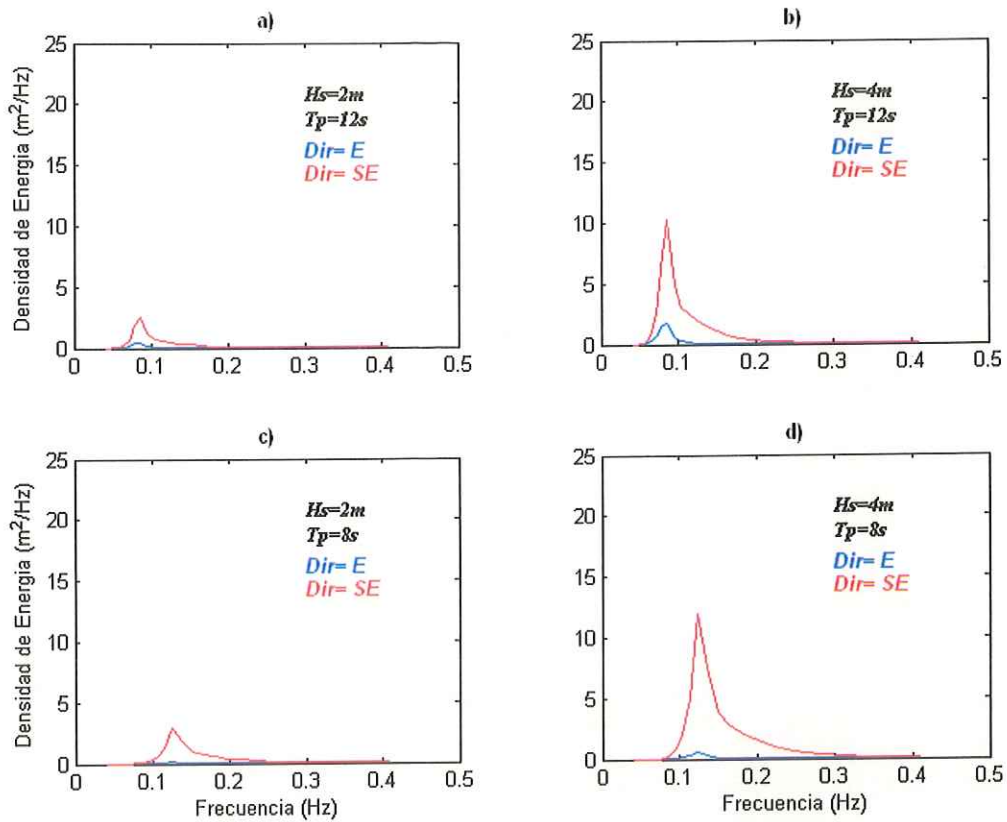


Figura 49. Espectros en frecuencia del punto PB, a) simulaciones 1 y 2, b) simulaciones 3 y 4, c) simulaciones 5 y 6, d) simulaciones 7 y 8. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de energía en m<sup>2</sup>/Hz. Frecuencia en Hz.

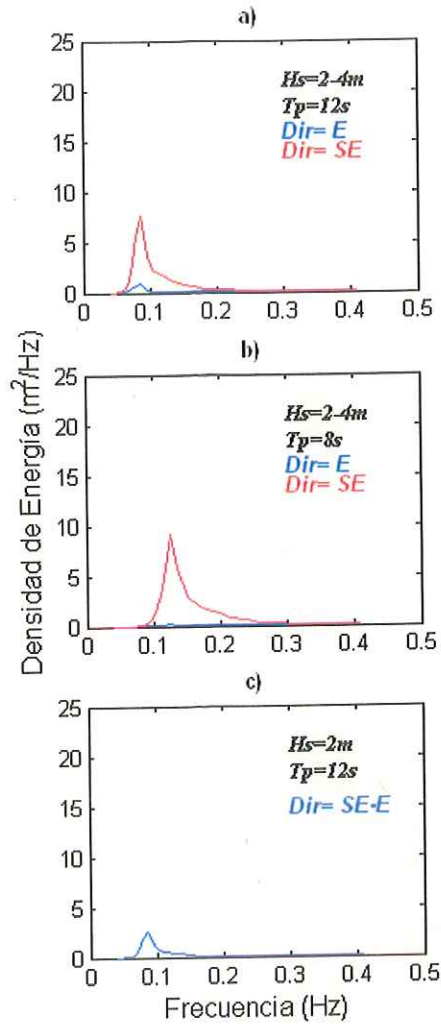


Figura 50. Espectros en frecuencia del punto PB, a) simulaciones 9 y 10, b) simulaciones 11 y 12, c) simulación 13 como resultado de cada simulación. Las condiciones de frontera se describen en la esquina superior derecha. El espectro de color azul corresponde a una dirección del oleaje hacia el este y el rojo hacia el sureste. Densidad de Energía en m<sup>2</sup>/Hz. Frecuencia en Hz.

Los espectros direccionales del punto PB como resultado de las simulaciones 1, 3, 5 y 7 se muestran en la Figura 51. Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 1 y 3, en los cuales se observa que cada uno se extendió un poco antes de la frecuencia de los 0.25Hz y con un rango de dispersión de  $45^\circ$  hacia el este. El pico espectral de la gráfica a) tuvo una dirección de  $314.82^\circ$  y el de la b) de  $314.77^\circ$ .

En las gráficas c) y d) se muestran los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 5 y 7. En estos espectros la energía pasó la frecuencia de 0.4Hz y se expandió en un rango de  $30^\circ$  y siguió una dirección hacia el sureste. La dirección del pico espectral en ambas gráficas fue de  $325.82^\circ$ .

Los espectros direccionales como resultado de las simulaciones 2, 4, 6 y 8 se presentan en la Figura 52.

Los espectros direccionales a) y b) representan los resultados de las simulaciones 2 y 4. En ellos la densidad de energía se extendió hasta la frecuencia de 0.25Hz con una dirección hacia el sureste. En el espectro a) la densidad de energía se dispersó en un rango de  $30^\circ$  y el pico espectral tuvo una dirección de  $307.91^\circ$ . En el b) la densidad de energía también abarcó un rango de  $30^\circ$  y la dirección del pico espectral fue de  $307.87^\circ$ .

Los espectros c) y d) representan los resultados de las simulaciones 6 y 8. Estos espectros se extendieron un poco más de la frecuencia de 0.3Hz y se expandieron en un rango de  $60^\circ$  aproximadamente, con dirección hacia el sureste. La dirección del pico espectral para estos dos espectros, c) y d), fue  $309.20^\circ$  y  $309.16^\circ$ , respectivamente.

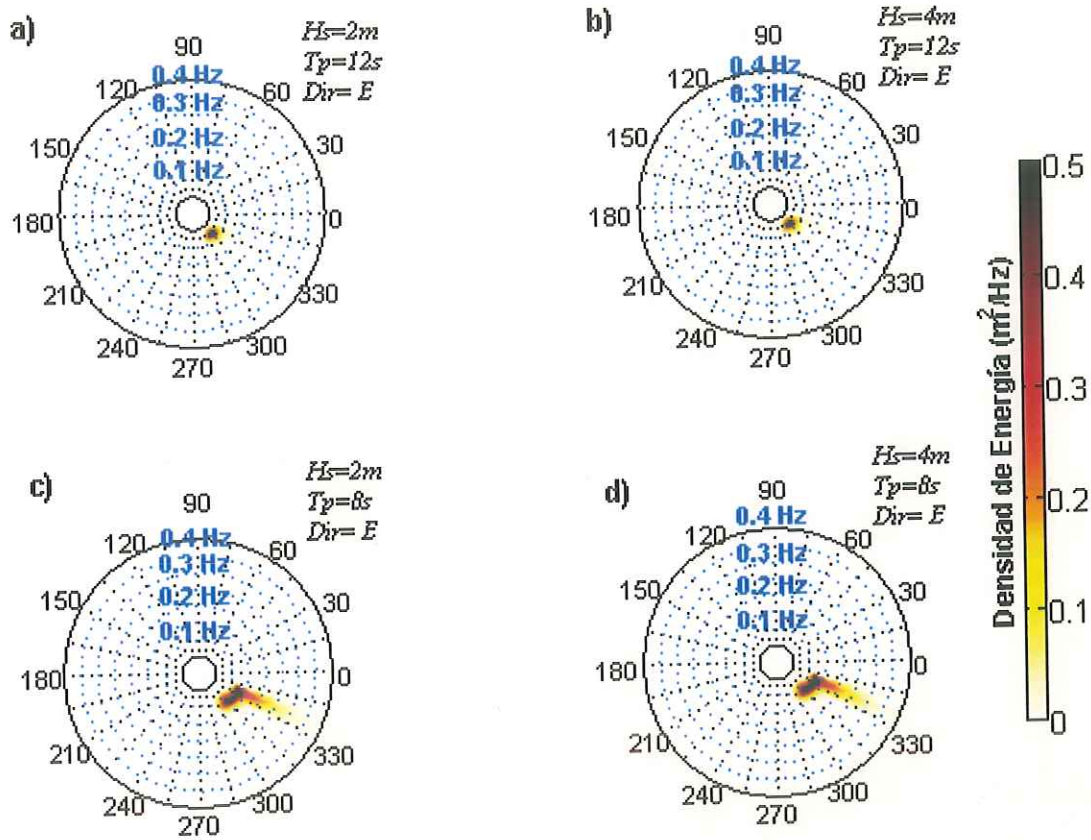


Figura 51. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PB correspondientes a las simulaciones a) 1, b) 3, c) 5 y d) 7. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en m<sup>2</sup>/Hz.

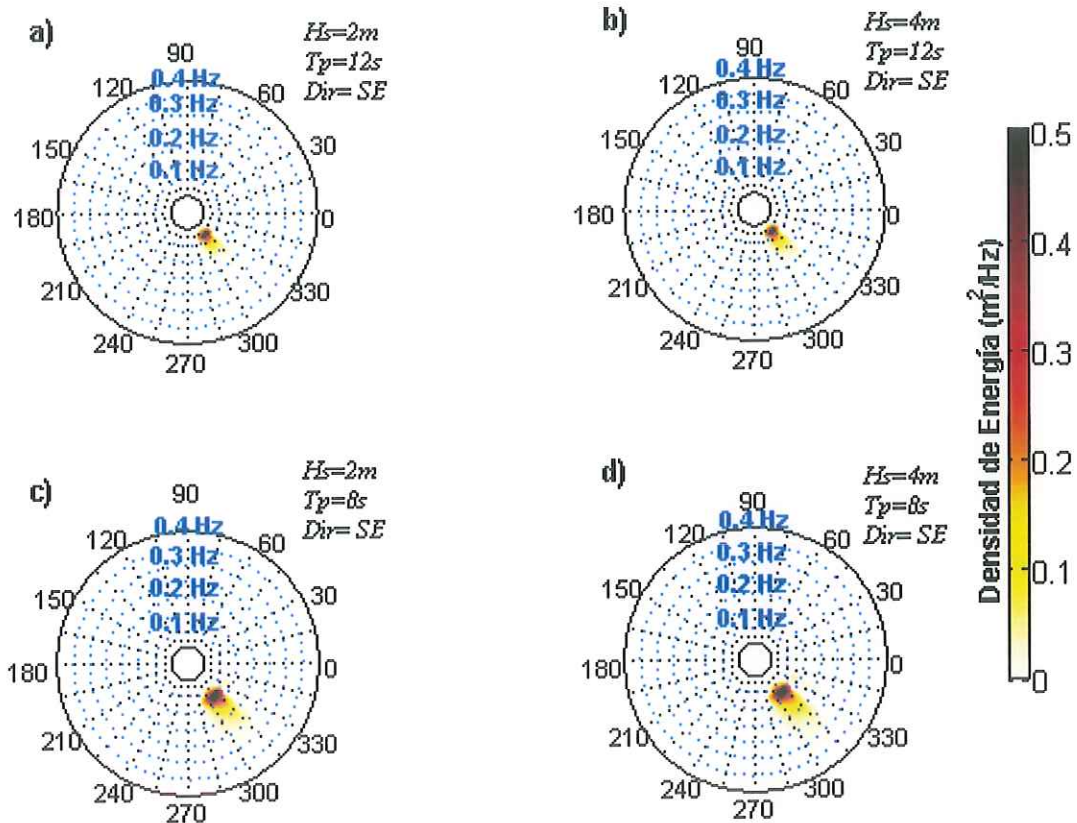


Figura 52. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PB correspondientes a las simulaciones a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en m<sup>2</sup>/Hz.

En la Figura 53 se presentan los espectros direccionales que se obtuvieron de las simulaciones 9, 10, 11 y 12.

Los espectros a) y b) corresponden a los resultados de las simulaciones 9 y 11, respectivamente. En el espectro a) se observa que alcanzó una la frecuencia de los 0.15 Hz y un esparcimiento de la densidad de energía de  $30^\circ$  aproximadamente, la dirección del pico espectral fue de  $313.90^\circ$ . En la gráfica b) el espectro pasó la frecuencia de 0.4Hz y se expandió en un rango de  $\approx 30^\circ$ . La dirección del pico espectral fue de  $324.54^\circ$ . Ambos espectros a) y b) se orientaron hacia el sureste.

Los espectros en las gráficas c) y d) son el resultado de las simulaciones 10 y 12, respectivamente. El espectro c) se extendió un poco más de la frecuencia 0.25Hz en un rango de  $30^\circ$  con una dirección de  $306.97^\circ$  del pico espectral hacia el sureste. El espectro d) se extendió un poco más de la frecuencia de 0.3 Hz y se expandió en un rango aproximado de  $30^\circ$  hacia el sureste, con una dirección del pico espectral de  $307.75^\circ$ .

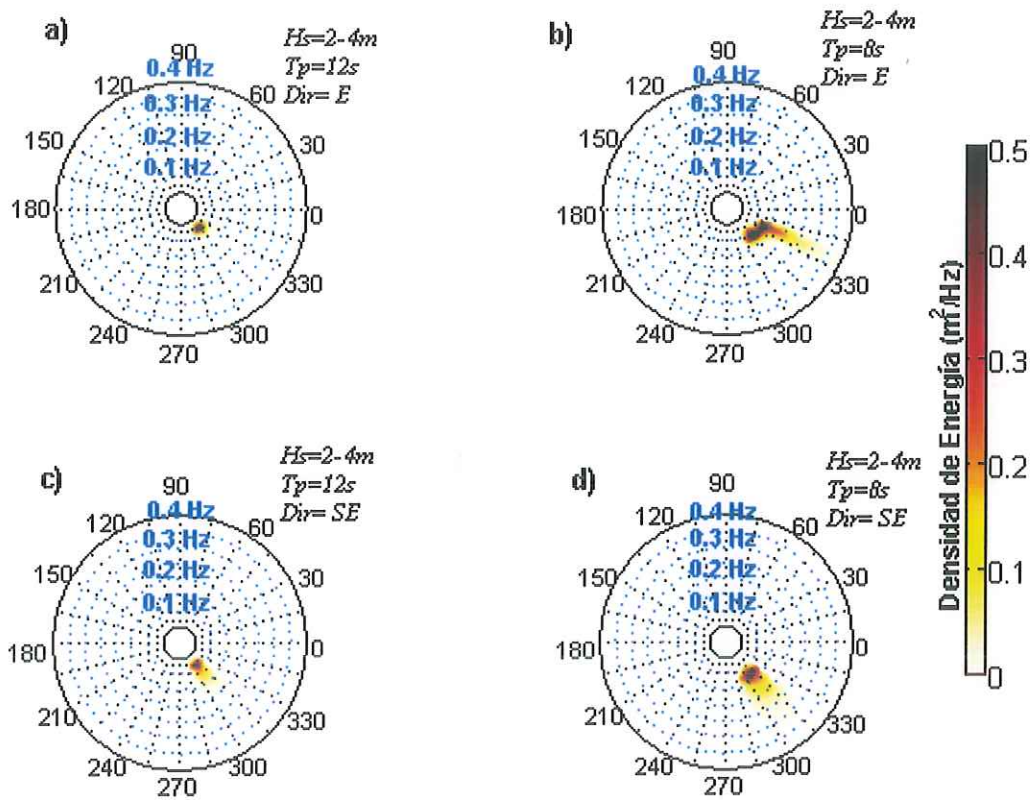


Figura 53. Espectros direccionales en coordenadas polares para el punto PB correspondientes a las simulaciones a) 9, b) 11, c) 10 y d) 12. En la esquina superior derecha de cada espectro se indican las condiciones de frontera de la simulación. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. La escala de densidad de energía se presenta en  $m^2/Hz$ .

En la Figura 54 se muestra el espectro direccional como resultado de la simulación 13, éste se extendió un poco antes de la frecuencia de 0.25 Hz y se dispersó en un rango de 45° hacia el sureste. La dirección del pico espectral fue de 308.92°.

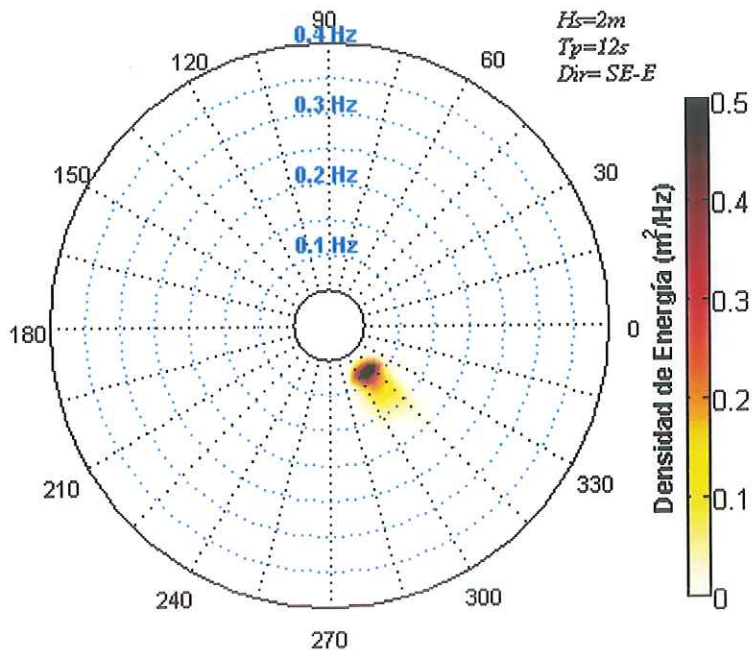


Figura 54. Espectro direccional en coordenadas polares para el punto PB correspondiente a la simulación 13. En la esquina superior derecha se indican las condiciones de frontera. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en  $m^2/Hz$ .

## VIII DISCUSIONES.

### VIII.1 Predicciones del campo de oleaje.

Las distintas condiciones de frontera que se utilizaron, para predecir los campos de oleaje de la bahía, mostraron tres aspectos similares para las 13 simulaciones. El primero es la disminución gradual de la altura significativa conforme se propagó hacia la línea de costa. Esto concuerda con lo que encontraron Ris *et al* (1999), al hacer experimentos con el modelo SWAN en modo estacionario y con los términos fuentes: interacciones no lineales (triadas), rompimiento inducido por la profundidad y fricción con el fondo activados, la altura significativa tiene el mismo comportamiento y decrece conforme viaja de aguas profundas a someras.

El segundo, los patrones de la dirección de propagación representan la refracción del oleaje de manera congruente, es decir, las olas viajan en el mismo sentido que se le aplicó como condición de frontera y al acercarse a la línea de costa se refractan. La refracción es el cambio en la dirección de propagación del oleaje en aguas someras asociado a la profundidad, lo cual hace que las crestas tiendan a ser paralelas con los contornos batimétricos con forme sienten fondo (Komar, 1998). Además, Hothuijsen *et al* (1993) realizaron un ejercicio donde hicieron una comparación entre la refracción producida por el modelo SWAN y la producida por un programa convencional que representa la refracción en forma de rayos y encontraron que la concordancia entre los resultados de estos dos modelos es buena.

En cuanto a los campos de oleaje como resultado de las simulaciones de la 1 a la 8 se observó que al tener un mismo período e igual dirección de propagación, pero una altura significativa diferente, en estos casos el doble comparada una con la otra (2m y4m), lo cual

también se puede observar en las tablas de cada una de las simulaciones, los valores de la altura significativa son el doble para cada uno de los puntos cuando la condición de frontera es de 4m. Se notó una distribución similar, es decir, donde hay valores altos en una, en la otra también. En las que tienen como condición de frontera la altura mayor (4m), la variación de alturas significantes fue mayor. Lo mismo para el patrón de refracción, éste es similar en las 8 simulaciones, lo único que varió fue la energía, mayor en donde la altura es mayor. Esto concuerda con la teoría lineal, la cual dice que la energía por unidad de área contenida en una ola depende de la altura de la misma:  $E = 1/8 \rho g H^2$  (Dean and Dalrymple, 1991).

En cambio en los campos de oleaje resultantes donde lo que cambia como condición de frontera es el período, en unos casos 8s y en otros 12s, pero con una misma altura significativa y una misma dirección de propagación, el patrón de distribución de alturas significantes fue diferente en toda el área de estudio. En los patrones que tienen un período de 8 segundos se extendieron olas con mayor altura hacia la línea de costa y en las de un período de 12s las alturas fueron menor dentro de la bahía. El patrón de refracción fue similar en estos casos, pero se presentó mayor energía en las olas con un período de 8s.

En los campos de oleaje que se produjeron a partir de las simulaciones 9, 10, 11 y 12, en las cuales se varió la altura significativa de 2m a 4m a lo largo de la frontera oeste, tanto para las simulaciones con período de 12s como para las de 8s, la distribución de la altura significativa presentó mayor diversidad que en las de frontera constante. El oleaje dentro de la bahía se vio influenciado por la variación de mayor a menor la altura significativa a lo largo de la frontera oeste ya que se presentaron alturas más altas en el norte de la bahía que en el sur, esto para los campos de oleaje con una dirección de propagación hacia el este como condición de frontera. La

refracción en estos resultados es similar a los que se realizaron con una condición de frontera constante.

Para los campos de oleaje con dirección de propagación hacia el sureste, en el de período de 12s (simulación 10) el oleaje dentro de la bahía es de menor altura que en el de 8s (simulación 12). Por lo tanto la energía del oleaje es mayor en el campo de oleaje resultante de la simulación 12. La refracción en ambos casos es similar, las olas con un período de 12s cambian un poco su dirección hacia el este conforme se acercan a la línea de costa.

En el campo de oleaje como resultado de la simulación 13 se observó que al variar la dirección de incidencia del oleaje a lo largo de la frontera este y comparar este resultado con el de la simulación 2, el patrón de la dispersión de la altura significativa es similar, aunque se presentaron diferencias en el oleaje al norte y sur de las islas, en donde son más las olas que presentan alturas de 2m del campo de oleaje de la simulación 13 a las de la simulación 2, esto es antes de que el oleaje entre a la bahía. En cuanto al oleaje dentro de la bahía las diferencias son pequeñas, los campos de oleajes de diferentes alturas generados en la simulación 13 se expanden un poco más.

Los valores de alturas significantes de los puntos Ra y Rb parecen ser diferentes entre sí, para saber esto con mayor exactitud se utilizó la prueba estadística " t-student " para muestras normales, que prueba la similitud o diferencia entre las muestras. A un 99% de confianza se probó que los valores de altura significativa entre los dos puntos son iguales, lo cual también nos indica que los espectros en frecuencia y direccionales entre cada punto también son iguales. A esta prueba se le hizo un poder estadístico para saber que tan efectiva es en este caso, lo cual

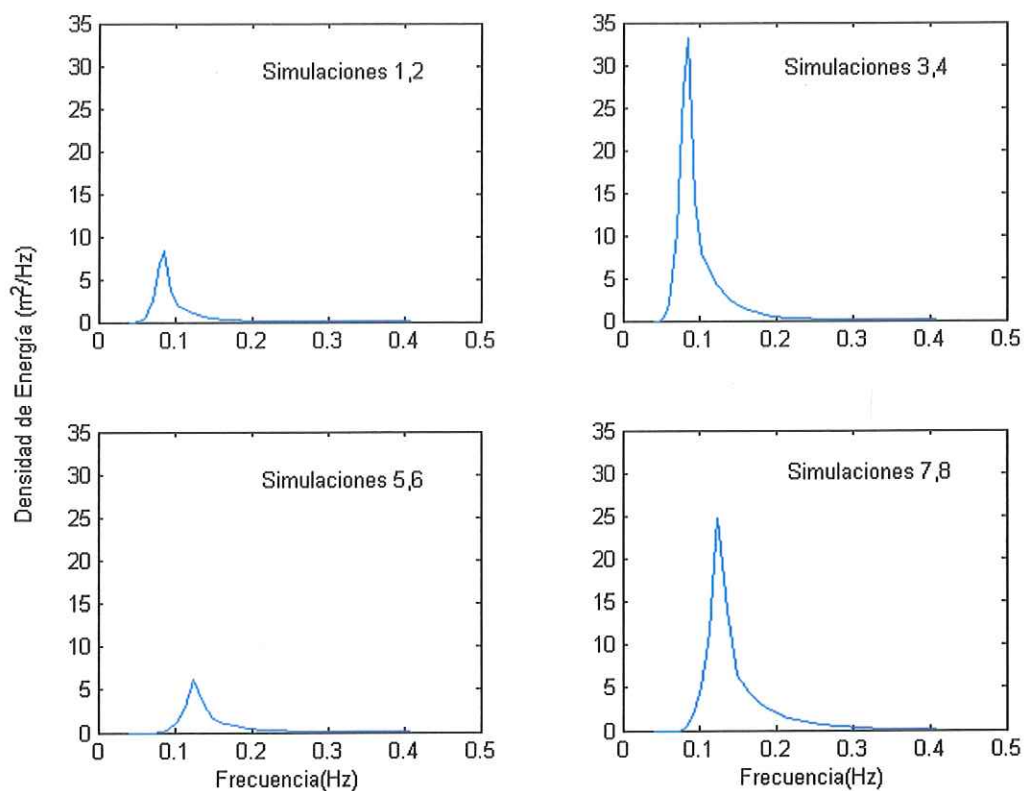
dio como resultado un valor bajo, 0.04, lo cual significa que esta prueba no es estadísticamente significativa.

## VIII.2 Espectros en frecuencia y direccionales.

Los espectros en frecuencia en la frontera oeste de cada una de las simulaciones se presentan en la Figura 55 y en la Figura 56 los espectros direccionales. A partir de estos espectros se observó primeramente, que los espectros en frecuencia y direccionales que resultaron de cada una de las simulaciones para los diferentes puntos alrededor de la bahía, presentaron el pico espectral en la misma frecuencia o período, es decir, que el período no cambió conforme se propagó el oleaje desde la frontera hasta cada uno de estos puntos. Young (1999) menciona que el período de una ola, es el tiempo que le toma a dos olas sucesivas pasar por un punto fijo, aunque exista variación en la profundidad.

Se observó que en los espectros en frecuencia y direccionales de cada uno de los puntos, la densidad de energía disminuyó, comparados con los espectros en la frontera. Esto nos indica que el oleaje conforme viajó hacia aguas someras fue perdiendo energía, lo cual es cierto, ya que conforme se propaga el oleaje hacia aguas someras decrece su altura, por interacciones con el fondo, por lo tanto su energía es menor.

En los espectros en frecuencia y direccionales de los puntos PSM y PB sólo se generaron espectros unimodales (un sólo pico), esto se puede deber quizá a que la profundidad en estos puntos no es muy somera ( $>20\text{m}$ ). Esto concuerda con los resultados de los experimentos que realizaron Ris *et al* (1999), en donde encontraron que en estaciones donde la profundidad no es somera ( $\approx 20\text{m}$ ), las interacciones no lineales podrían no ser efectivas.



**Figura 55. Espectros en frecuencias en la frontera oeste resultantes de las distintas simulaciones. El número de la simulación se indica en la esquina superior derecha. Densidad de energía en  $m^2/Hz$ . Frecuencia en Hz.**

En cambio en los demás puntos, los cuales cuentan con profundidades menores a 14m, se generaron espectros bimodales (dos picos), lo cual también se puede observar en los espectros direccionales como un segundo lóbulo en altas frecuencias. Esto también se observó en el trabajo realizado por Ris *et al* (1999), donde encontraron que en aguas someras las interacciones no lineales son muy importantes ya que hacen posible la transferencia de energía de bajas a altas frecuencias, un proceso que origina un pico secundario en frecuencias mayores.

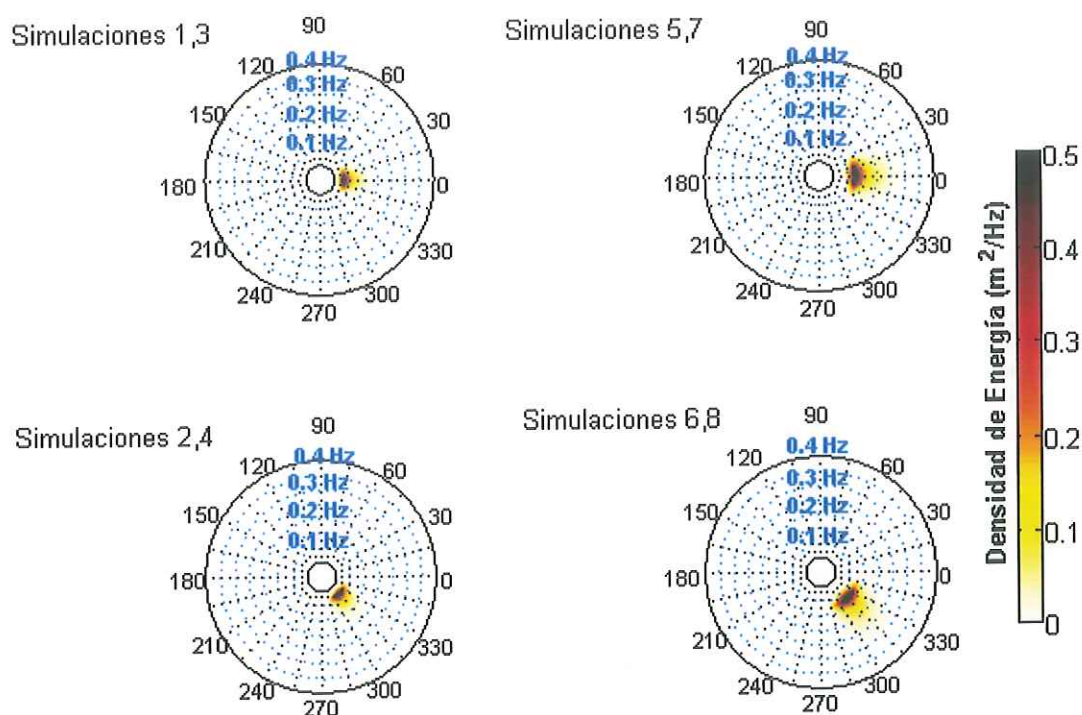


Figura 56. Espectros direccionales en coordenadas polares de la frontera oeste resultantes de las distintas simulaciones. En la esquina superior izquierda se indica el número de las simulaciones. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia en Hz. Escala de densidad de energía en  $m^2/Hz$ .

En la mayoría de los espectros en frecuencia de cada uno de los puntos se observó que en los procesados por las simulaciones con una dirección de propagación hacia el este como condición de frontera presentaron una mayor densidad de energía en comparación con los de dirección de propagación sureste. Y en los espectros direccionales se observa una distribución de la densidad de energía en un rango mayor de direcciones. Esto debido a que el oleaje sufre menos modificaciones en sus características cuando se propaga hacia el este ya que la distancia es menor al entrar a la bahía y propagarse dentro de ella.

Sin embargo en la estación PB los espectros en frecuencia resultantes de una propagación sureste presentaron mayor densidad de energía que los correspondientes a una dirección este, además se pudo observar en los espectros direccionales que esta densidad de energía se esparció en más direcciones. Lo cual nos indica que cuando el oleaje proviene del noroeste y entra por la parte norte de la bahía y se desplaza hacia el sureste, las zonas con oleaje de mayor energía serán las que se encuentran al sur de la bahía, cerca de la Península de Punta Banda.

Los espectros en frecuencia resultantes de condiciones de frontera variables a lo largo de la frontera oeste mostraron que están influenciados por esta variación, ya que presentan valores de densidad de energía entre los espectros procesados por las simulaciones con condiciones de frontera constante a lo largo de la frontera oeste, tanto en valores de altura significativa como en los de período y dirección. La distribución de esta densidad de energía en los espectros direccionales fue muy diferente a los de condiciones de frontera constante.

Los espectros en frecuencia y direccionales procesados por la simulación 13 para cada uno de los puntos mostraron menor densidad de energía, aunque su distribución tanto en frecuencia como en dirección fue similar a la de los espectros resultantes de la simulación 1.

En los espectros direccionales procesados por las trece simulaciones para cada uno de los puntos se observó que la distribución de la densidad de energía tiene un mismo patrón de dispersión en las simulaciones con diferente altura significativa, pero igual período y dirección de propagación como condiciones de frontera. Esto es, que la densidad de energía alcanza los mismos valores de frecuencia y un esparcimiento de la dirección similar. Aunque los valores de la densidad de energía son mayores en aquellas simulaciones con una  $H_s=4\text{m}$  como condición de

frontera. Pero son menores comparados con los valores de los espectros direccionales de la frontera.

Entre los espectros con una altura significativa diferente, igual período y dirección de propagación, el pico espectral de cada uno de los espectros tuvo una variación de  $\approx 1^\circ$  entre los espectros de las simulaciones con dirección de propagación hacia el este y la misma variación para los de dirección sureste.

## IX CONCLUSIONES.

- ✓ La variación de las condiciones de frontera influye en la simulación de los campos de oleaje realizados por el modelo SWAN.
- ✓ La variación de la altura significativa a lo largo de la frontera oeste influye en la distribución de las alturas significantes dentro de la bahía, así como en la evolución de los espectros en frecuencia y direccionales.
- ✓ La generación de un segundo pico en los espectros se debe a las interacciones no lineales (triadas), ya que transfieren energía de frecuencias bajas a altas.
- ✓ La resolución espacial utilizada se considera adecuada, debido a la sensibilidad del modelo para reproducir variaciones en los espectros del oleaje en los puntos Ra y Rb.
- ✓ El modelo SWAN versión 40.11 se aplicó para la simulación del oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos así como para calcular los espectros en los distintos puntos, y es posible utilizarlo para predecir el oleaje dentro de la bahía al contar con condiciones de frontera reales.

## X ANEXO

### X.1 Descripción de los comandos utilizados en los archivos de entrada (INPUT).

#### X.1.1 COMANDOS DE PARTIDA.

En esta sección se incluyen los comandos con los que partió el modelo:

- 1) **PROJect**: título del problema que fue computarizado:
  - (1) **'refraccion'**: nombre del proyecto.
  - (2) **'001t'**: identificación de la corrida.
  - (3) **'6 estaciones y triadas'**: cadena que apareció en la salida de la corrida para ayudar al usuario a identificar lo realizado.
- 2) **MODE**: modos en que se corrió el programa:
  - (1) **STAT**: estacionario
  - (2) **TWOD**: bidimensional
- 3) **COORDinate**: tipo de coordenadas que se utilizaron, CARTesianas (en m). Y nos indican hacia donde va el oleaje.
- 4) **SET: 0**, valor utilizado para el aumento en el nivel del agua, es constante en espacio y tiempo.

#### X.1.2 COMANDOS GENERALES.

- 5) **POOL**: este comando opcional se utilizó para obtener la información del banco computacional y numérico del modelo.

#### X.1.3 COMANDOS PARA DESCRIBIR EL MODELO.

Esta sección está compuesta por 5 apartados: comandos para la malla computacional, para los campos de entrada, para las condiciones de frontera, para los procesos físicos y las salidas solicitadas.

### X.1.3.1 Comandos para la malla computacional.

6) **CGRID**: con este comando se definió el lugar geográfico, tamaño, resolución y orientación de la malla computacional

- (1) **REGular**: indica que la malla computacional se tomó de forma uniforme y rectangular.
- (2) **[0]**: lugar geográfico del origen de la malla computacional en el sistema de coordenadas (X), en m.
- (3) **[0]**: lugar geográfico del origen de la malla computacional en el sistema de coordenadas (Y), en m.
- (4) **[0]**: dirección del eje x positivo de la malla computacional.
- (5) **[25600]**: longitud de la malla computacional en la dirección X, en m.
- (6) **[33600]**: longitud de la malla computacional en la dirección Y, en m.
- (7) **[128]**: número de cuadritos en la dirección X.
- (8) **[168]**: número de cuadritos en la dirección Y
- (9) **CIRCLE**: indica que las direcciones espectrales cubren el círculo completo.
- (10) **[36]**: número de subdivisiones de 360 grados de un círculo para obtener las direcciones.
- (11) **[0.0416]**: frecuencia discreta más baja usada, en Hz.
- (12) **[0.4125]**: frecuencia discreta más alta usada, en Hz.

### X.1.3.2 Comandos para los campos de entrada.

7) **INPGRID**: se utilizó este comando para definir el lugar geográfico, tamaño y orientación de la malla de entrada y las dimensiones de la malla del fondo.

- (1) **BOTTOM**: define los niveles del fondo en m.
- (2) **REGular**: significa que la malla de entrada es regular y rectangular.
- (3) **[0]**: lugar geográfico (coordenada X) del origen de la malla de entrada en m.
- (4) **[0]**: lugar geográfico (coordenada Y) del origen de la malla de entrada en m.
- (5) **[0]**: dirección del eje X positivo de la malla de entrada.

- (6) **[159]**: número de cuadritos en la dirección X de la malla de entrada.
  - (7) **[209]**: número de cuadritos en la dirección Y de la malla de entrada.
  - (8) **[160]**: tamaño del cuadrito en la dirección X de la malla de entrada, en m.
  - (9) **[160]**: tamaño del cuadrito en la dirección Y de la malla de entrada, en m.
- 8) **READINP**: con este comando se controla la lectura de los valores de las variables indicadas de un archivo.
- (1) **BOTTOM**: se utilizó para indicar que la batimetría se encuentra en un archivo.
  - (2) **1**: factor utilizado para multiplicar los valores del fondo y obtenerlos en m.
  - (3) **btss3.dat**: nombre del archivo que contiene la batimetría.
  - (4) **3**: es la forma en que el modelo lee la batimetría, en este caso, de izquierda a derecha y empieza de abajo por la esquina izquierda.
  - (5) **0**: número de líneas de encabezado en el archivo.
  - (6) **FORMAT (160F6.1)**: indica el formato de los valores utilizados en la batimetría, el cual es 160 valores de 6 campos con 1 decimal.

### X.1.3.3 Comandos para las condiciones de frontera.

Esta sección está dividida en dos incisos, 9 y 10, en el inciso 9 se da el ejemplo del caso 1, que es similar a los casos del 2 al 8, el cual es para las condiciones de frontera constantes a lo largo de todo el lado de cada una de las fronteras N, W y S; el inciso 10, se refiere al caso 9, similar a los casos del 10 al 13, en donde las condiciones de frontera varían a lo largo del lado W y para el lado N y S se toman los valores máximo y mínimo del lado W, respectivamente.

- 9) **BOUNPAR2**: se utilizó para definir el espectro en las fronteras N, W, S.
- (1) **SIDE N, W, S**: este comando sirve para indicar que los parámetros del oleaje se aplican en toda la longitud de cada una de las fronteras de la malla computacional.
  - (2) **CONSTANT**: indica que el valor de los parámetros del oleaje es constante a lo largo de las fronteras de la malla computacional.
  - (3) **PAR**: define el espectro del oleaje por promedios de los siguientes parámetros del oleaje.

- (4) **2.00**: valor de la altura significativa en la frontera, en m.
  - (5) **12.00**: valor del periodo del pico espectral en la frontera, en s.
  - (6) **0**: dirección del pico espectral, en grados.
  - (7) **20**: coeficiente de dispersión direccional, en grados.
- 10) **SEGMENT**: con este comando se indicó que las fronteras se van a dividir en segmentos. Sólo se puede utilizar si el comando **SIDE** no es empleado.
- (1) **XY**: los segmentos se dividieron en una serie de puntos en términos de coordenadas X y Y.
  - (2) **(0,33600)**: coordenada XY del punto de inicio del segmento correspondiente a la frontera N.
  - (3) **(7200,33600)**: coordenada XY del punto final del segmento correspondiente a la frontera N.

#### **X.1.3.4 Comandos para incluir los proceso físicos.**

- 11) **TRIAD**: con este comando se activaron las interacciones no lineales o triadas.
- 12) **BREAKING**: con este comando se activa el rompimiento inducido por la profundidad.
- 13) **FRICTION**: se activa la fricción con el fondo.
- 14) **OFF WCAP y OFF QUAD**: se utilizaron para desactivar el whitecapping y las cuadrupletas, respectivamente.

#### **X.1.4 SALIDAS SOLICITADAS.**

- 15) **POINTS**: se indica que los puntos seleccionados alrededor de la bahía se llaman **STAT1** y las coordenadas de estos puntos se encuentran en un archivo (**FILE**) llamado **estaciones.txt**.
- 16) **TABLE**: crea una tabla para los puntos anteriores (**STAT1**) con el encabezado **ca001t.txt** donde se reportan los resultados particulares para cada uno de los puntos con sus coordenadas (**XP,YP**): la profundidad en metros en ese punto (**DEP**), la altura significativa (**HS**) en metros, el período del pico espectral (**RTP**) en segundos y dirección media del oleaje en grados.

- 17) **BLOCK:** con este comando se obtienen los resultados de los parámetros del oleaje para toda el área de estudio y son depositados en un archivo con cierto nombre. Los parámetros del oleaje solicitados son: altura significativa (**hs1t.out**), dirección media del oleaje (**dir1t.out**) y dirección del pico espectral (**pdir1t.out**).
- 18) **SPEC:** se obtienen los espectros unidimensionales (**SPEC1D**) y bidimensionales (**SPEC2D**) para cada punto y son guardados en los archivos **sp11t.out** y **sp21t.out** respectivamente.
- 19) **COMPUTE:** con este comando se da inicio a la corrida del programa.
- 20) **STOP:** señala el fin de la corrida.

## XI BIBLIOGRAFÍA CITADA.

- 📖 Abreu, M., A. Larraza, y E. Thornton. 1992. Nonlinear transformation of directional wave spectra in shallow water. *J. Geophys. Res.* 97, 15579-15589.
- 📖 Bascom, W. 1964. *Waves and beaches: the dynamics of the ocean surface*. Primera Edición. Anchor Books Doubleday and Company, Inc. 267pp.
- 📖 Battjes, J.A., J.P.F.M. Janssen. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, in *Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, 567-587 pp. Am. Soc. Of Civ. Eng., New York.
- 📖 Beji, S., J.A. Battjes. 1993. Experimental investigation of wave propagation over a bar. *Coastal Eng.*, 19, 151-162.
- 📖 Booij, N., R.C. Ris, y L. H. Holthuijsen. A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.* Vol 104 NO. C4. Pages 7649-7666. April 15, 1999.
- 📖 Coli, A., J. Santos, C. Fortes, R. Capitão y M. Mendes de Carvalho. Extreme wave regime propagation to Douro's mouth: analysis by numerical models BACKTRACK-REFSPEC and SWAN. *Litoral 2002*. 22-26 September. Porto, Portugal. 10pp.
- 📖 Coria, M.P. 1991. Distribución de la probabilidad de la altura significativa del oleaje y cálculo de períodos de retorno para el puerto de Ensenada, B.C. Tesis de licenciatura. UABC. FCM.
- 📖 Dean, R.G., Dalrymple, R.A. 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific. 353pp.

- 📖 Dykes, D.J., Y. Larry Hsu y W. Erick Rogers. 2002. Swan evaluation in the Northern Gulf of México. En: 7th International Workshop on Wave Hind casting and Forecasting. Canada. 160-169 p.
- 📖 Eldeberky, Y., J.A. Battjes. 1995. Parameterization of triad interactions in wave energy model, paper presented at Coastal Dynamics Conference '95. Am.Soc. of Civ. Eng., Gdansk, Poland.
- 📖 González, V.A. 1992. Reevaluación de los estudios utilizados para el diseño del puerto de Ensenada, B.C. Tesis de licenciatura. UABC. FCM.
- 📖 Hasselmann, K. 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, Bound,-layer Meteor., 6, 1-2, 107-127.
- 📖 Hasselmann, K. 1991. Epilogue: waves, dreams, and visions. En: Robert C. Beel (Ed). Directional Ocean Wave Spectra. The Johns Hopkins Univ. 205-208 p.
- 📖 Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C. Haagsma, I.G., Kieftenburg, A.T.M.M., Kriezi, E.E. 1993. A spectral wave model for the coastal zones. In: Proc. Of 2nd Int. Symposium on Ocean Waves Measurements and Analysis. New Orleans. 630-641 p.
- 📖 Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C. Haagsma, I.G., Kieftenburg, A.T.M.M., Kriezi, E.E., 2001. SWAN Cycle III version 40.11 user manual. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, P.O. Box 5048, 2600 GA Delft, The Netherlands.
- 📖 Kinsman, B. 1984. Wind Waves, their generation and propagation on the ocean surface. Prentice-Hall. N.J. 676 pp.
- 📖 Komar, P.D. 1998. Beaches processes and sedimentation. 2da. Edición. Prentice Hall. NJ. EUA. 534pp.

- 📖 Komen *et al.* 1994. Dynamics and modeling of ocean waves. Primera Edición. Cambridge University. Press. 532 pp.
- 📖 Komen G.J. 2000. Forecasting wind-driven ocean waves. Based on lectures presented at the Mast Advanced Study Course on Ocean Forecasting, Torregrande, Sardenia, 30 June-12 July 1997.
- 📖 Lambert, A. A. 1993. Variabilidad del oleaje y su efecto en la estimación de parámetros estadísticos. Tesis de maestría en ciencias. CICESE. 85pp.
- 📖 Madsen, O. S., O. R. Sørensen. 1993. Bound waves and triad interactions in shallow water. *Ocean. Eng.*, 20, 359-388.
- 📖 Miles, J.W. 1957. On the generation of surface waves by shear flows. *J. Fluid Mech.* 3: 185-204.
- 📖 Meillón Menchaca, O. 1995. Estudio del comportamiento espacial del oleaje en la Bahía de Todos Santos, BC. mediante imágenes de superficies marinas. Tesis de licenciatura. UABC. FCM.
- 📖 Monbaliu, J. W. Defevere. 2000. The use of spectral wave models in a region with complicated bathymetry. *Coastal Waves Meeting*. Barcelona, España.
- 📖 Munk, W. H. y F.E. Snodgrass. 1957. Measurements of southern swell at Guadalupe Island. *Deep Sea Res.* 4:272-286.
- 📖 Ocampo Torres, F. 1982. Estudio del oleaje en las costas de Baja California en términos de espectros y biespectros. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE. 124pp.
- 📖 Padilla Hernández, R. 1993. Predicción de oleaje mediante el modelo numérico de densidad espectro-angular DSA. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE. 87pp.

- 📖 Peirache, A., P. Lombardi. 2001. Validation of the numerical model of waves prediction SWAN, using SAR images and in situ data, in the region of Rosarito, México, B.C. Reporte científico. CICESE. 94pp.
- 📖 Perelló Reina, D. 2002. Estimación del campo de oleaje en la Bahía de Todos Santos mediante el uso de un modelo de predicción de oleaje en aguas someras. Tesis de Licenciatura. UABC. FCM. 74pp.
- 📖 Phillips, O. M. 1957. On the generation of waves by turbulent wind. J. Fluid Mech. 2: 417-445.
- 📖 Plaisted, R. O. y C. Nava Button. The fine structure of ocean swells. IV Conferencia de CIBCASIO. Noviembre 1978. Ensenada BC.
- 📖 Ris, R.C., L.H. Holthuijsen y N. Booij. A third-generation wave model for coastal regions, 2. Verification. J. Geophys. Res. Vol 104 NO. C4. Pages 7667-7681. April 15, 1999.
- 📖 Torres Navarrete, C. 1986. Comparación y análisis de registros de oleaje obtenidos en una localidad al sur de la Bahía de Todos Santos, BC. Tesis de licenciatura. UABC. FCM. 73pp.
- 📖 Ulloa, T. M. 1989. Refracción lineal del oleaje en el puerto de Ensenada. Tesis de Licenciatura. UABC. FCM. 66pp.
- 📖 Vega Puente, R. 1999. Análisis numérico del ancho del espectro direccional del oleaje en regiones cercanas a la costa. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE. 54pp.
- 📖 Young, I.R. 1999. Wind generated ocean waves. Primera Edición. Elsevier Science. 288 pp.



