UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

ESTUDIO DE RESONANCIA EN EL PUERTO DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

ANDRES ORLANDO CUEN ULLOA

Ensenada, Baja California, México Enero del 2016

RESUMEN

En este trabajo se estudia la respuesta del puerto de Ensenada, Baja California, México, a ondas incidentes. El principal objetivo es investigar el fenómeno de resonancia mediante el uso de dos modelos numéricos y observaciones de nivel del mar. El primer modelo es bidimensional y está basado en una teoría desarrollada por Lee & Raichlen, (1971), donde se plantea la solución de la ecuación de Helmholtz, considerando un fondo plano y sin fricción. Con este modelo se obtuvo la respuesta del puerto a ondas incidentes y se detectaron algunos modos normales de oscilación. El segundo esel modelo numérico en tres dimensiones en coordenadas curvilíneas GCOM (General Curvilinear Ocean Model, Torres *et al*., 2003), y se usó con la finalidad de obtener una simulación de condiciones más realistas, con usando una malla que se ajusta al fondo marino y a la geometría de la zona de estudio. Con este modelo se realizaron simulaciones con los periodos resonantes obtenidos del modelo bidimensional utilizando fondo constante y fondo variable (obtenida de datos reales de batimetría), así como también se utilizó la configuración actual y una configuración con una prolongación en el rompeolas principal. Los resultados mostraron un acuerdo, ya que las zonas de mayor amplificación son similares a lo encontrado con el modelo bidimensional, donde las zonas más vulnerables fueron en la entrada del puerto, la Marina de Yates (CruiseportVillage), Base Naval y Andador Turístico.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

ESTUDIO DE RESONANCIA EN EL PUERTO DE ENSENADA BAJA CALIFORNIA

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

ANDRES ORLANDO CUEN ULLOA

Aprobada por:

Dr. Carlos Rodolfo Torres Navarrete

Director de tesis

Dr. Adán Mejía Trejo

Sinodal

Dr. Héctor García Nava

Sinodal

Dr. Rafael Hernández Walls

Sinodal

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor, comprensión y estar conmigo en todo momento.

A mis hermanos, por el cariño y el apoyo que me han brindado y la confianza que han tenido en mí.

A María Elena por tu paciencia y sobre todo por el apoyo incondicional.

Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes, los amo.

AGRADECIMIENTOS

INDICE

I. Introducción…… 1

I.1. Motivación. ……..…….. 5

I.2. Antecedentes……..…….. 5

I.3 Objetivos……..……... 14

II. Descripción del área de estudio…….. 14

II.1 Oceanografía…….…. 15

II.1.1 Marea……..……..…15

II.1.2. Oleaje en la Bahía Todos Santos……..…..… 16

II.1.3. Oleaje en el interior del Puerto de Ensenada……. 17

II.2. Observaciones…….. 18

II.2.1 Altura de la ola en el exterior de la rada…….…… 18

II.2.2. Nivel del mar…… 19

II.3. Batimetrías…….…….. 21

II.3.1. Batimetría en la Bahía de Todos Santos……..… 21

II.3.2. Batimetría en el puerto de Ensenada….…… 21

III. Método……..……..……. 24

III.1. Modelo de Lee & Raichlen…….…….... 24

III.1.1. Teoría (Desarrollo de la ecuación de Helmholtz……..…….....24

III.1.2. Discretización de la rada portuaria…….…… 28

III.2. General Curvilinear Ocean Model (GCOM)……..…..….. 30

III.2.1. Descripción del modelo y ecuaciones…….…….. 31

III.2.2. Malla adaptativa…….…….. 34

lll.2.3. Calibración del modelo: Movimiento del fluido en una geometría cerrada cuadrada……..…….…….. 37

lll.3.Evento de tormenta……..……...….37

IV. Presentación y discusión de resultados……. 41

IV.1. Modelo de Lee & Raichlen…….…….....…... 41

V.1.1. Configuración actual con fondo constante……...…….…… 42

V.1.1. Configuración con prolongación con fondo constante.…….……...… 41

V.2. GCOM……..…….…….. 55

V.2.1.1. Configuración actual con fondo constante ……..…….41

V.2.1.1. Configuración con prolongación con fondo constante …….. 41

V.2.1.1. Configuración actual con fondo variable……..……... 43

V.2.1.1. Configuración con prolongación con fondo variable …….. 43

VI. Conclusiones…….…. 55

VII. Referencias…… 56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Puerto de Ensenada obtenida de Google Earth……..……..……..… 12

Figura 2. Dirección de incidencia del oleaje observada en la Bahía de Todos Santos…….….. 14

Figura 3. Ubicación de instrumentos de medición, en donde el punto rojo corresponde a un ADCP tipo Awac que mide el oleaje y el punto amarillo corresponde a un sensor de presión del cual fueron extraídos los datos del nivel mar……. 15

Figura 4.-Serie de tiempo en el evento de tormenta del 1-3 de marzo del 2014donde la el color azul indica el nivel del mar menos la predicción y la línea en color negro el oleaje. ……..……..……. 16

Figura 5.- Panel A representa el registro de nivel del mar en un evento de tormenta del 1-3 de marzo del 2014 en el PE. La línea azul indica datos tomados desde un punto dentro del PE y línea roja indica la predicción de la marea. El Panel B muestra el espectro de frecuencias en el episodio más intenso del evento de tormenta correspondiente al periodo 1-3 de marzo del 2014……,…….……...,, 17

Figura 6.- Batimetría en la Bahía de Todos Santos (Torres *et al.,* 2006)…..… 19

Figura 7. Batimetría del Puerto de Ensenada, Baja California (Torres, 2012).. 20

Figura 8. Configuraciones utilizadas para los modos normales de oscilación en el PE, panel A (configuración actual) y panel B (prolongación)……..…… 26

Figura 9. Discretización de la línea de costa del PE. Los números dentro del recuadro indican las diferentes zonas analizadas en el interior de la rada portuaria……. 27

Figura 10. Configuración de la malla curvilínea en el puerto de Ensenada……..……... 32

Figura 11. Superficie libre en 3D utilizando MANOLO en los tiempos t = 0, t = 2, t = 4, t = 6, t = 8, t = 10, t = 12, t = 14, (Simulaciones realizadas por Díaz (2006))……..….. 35.

Figura 12. Validación del modelo GCOM probado en una geometría cuadrada cerrada de superficie libre 3D en los tiempos t= 0, t= 2, t= 4, t= 6, t= 8, t= 10, t= 12, t= 14. Comparación con (Díaz, 2006) utilizando el modelo (MANOLO)……..…..… 36

Figura 13. Velocidades asociadas a los cambios de presión en la validación del modelo GCOM…….……. 37

Figura 14. Curva de máxima respuesta a diferentes longitudes de onda incidentes en distintos zonas dentro del PE, el panel 1 representa longitudes de onda de 300 a 8000 metros en las zonas (4,11,20,24,39,55), el panel 2 muestra longitudes de onda de 300 a 1000 metros en las zonas (71, 140, 62, 4, 39 y 88)…….…… 38

Figura 15. Comparación de modelos en respuesta a diferentes ondas incidentes (64,120 y 405 *s*) en el PE utilizando la geometría actual. Los paneles (A,B y C) representan los resultados del modelo de Lee &Raichlen, y los paneles (D,E y F) representan los resultados obtenidos con GCOM……..…… 40

Figura 16. Comparación de modelos en respuesta a diferentes ondas incidentes (64,120 y 405 *s*) en el PE utilizando una geometría con una modificación en el rompeolas principal de 780 m. Los paneles (A,B y C) representan los resultados del modelo de Lee & Raichlen, y los paneles (D,E y F) muestran los resultados obtenidos con GCOM……..……..… 41

Figura 17. Efecto del fondo marino a diferentes ondas incidentes (64,120 y 405 *s*) en el PE. Los paneles (A,B y C) representan el PE con geometría actual, y los paneles (D,E y F) la geometría con una prolongación en el rompeolas principal de 780 m…….…… 43

Figura 18. Velocidades asociadas a los modos normales de oscilación (64,120 y 405 *s*) en el PE. Los paneles (A,B y C) representan las corrientes asociadas enel PE con geometría actual, y los paneles (D,E y F) las corrientes asociadas a los modos con geometría con una prolongación en el rompeolas principal de 780 metros……...…… 44

I. INTRODUCCIÓN

Los puertos son obras costeras que sirven para la recepción, abrigo y atención de embarcaciones; compuesto por el recinto portuario y en su caso por la zona de

desarrollo, así como por accesos y áreas de uso común para la navegación interna y afectas a su funcionamiento; con servicios, terminales e instalaciones, públicos y particulares para la transferencia de bienes y transbordo de personas entre los modos de transporte que enlaza. Por su navegación los puertos y terminales marítimas se clasifican como: de altura, de cabotaje; por sus instalaciones y servicios como: comerciales, industriales, pesqueros, turísticos, militares; por su uso: públicos y particulares. El puerto de Ensenada (PE), es considerado como uno de los 16 principales puertos de altura de México. Dentro del PE se realizan diversas actividades tales como la exportación e importación así como el manejo de carga de contenedores, gráneles agrícolas y minerales, actividades de pesca comercial y deportiva, cruceros, marinas y astilleros.

Los puertos deben diseñarse para asegurar un ambiente en el amarre de barcos protegido de la agitación generada por oleaje, permitir el tránsito interno de embarcaciones y la realización segura para las actividades de carga y descarga de contenedores. Dentro del espectro de ondas que incide a los puertos, existe un tipo de onda que se caracteriza por tener periodos mayores a 30 *s*, y son de suma importancia, ya que las longitudes de onda de este tipo de ondas se asemejan a las dimensiones del mismo puerto, pudiendo ocasionar periodos resonantes, a este tipo de ondas se le conoce como “ondas largas” (Cortínez *et al.,* 2014).

Estas ondas largas puedem causar serios problemas como hundimiento de barcos, interrumpir el manejo de cargas y dificultar la eficiencia operacional (Díaz,

2006). Además, las corrientes inducidas por estas oscilaciones pueden causar peligros de navegación (Lee, 1969).

Otras oscilaciones resonantes conocidas como “Seiches” también pueden causar daños significativos dentro del puerto tanto a los buques como a las estructuras adyacentes. Los Tsunamis constituyen otro importante problema, ya que puede ocurrir una catástrofe cuando las frecuencias de este evento coincidan con las frecuencias de resonancia de la bahía o puerto (Rabinovich, 2009).

Todas las bahías, puertos ó cualquier cuerpo de agua tienen sus propios modos normales de oscilación los cuales están en función principalmente de su geometría, (Rodríguez, 1996).

Uno de los métodos mas empleados para el diseño y planificación de un puerto o modificación de un puerto existente es determinar la respuesta de la rada portuaria a un sistema de una onda incidente de baja frecuencia *(*Lee, *et al.,* 1998).

I.1. Motivación

Debido a un problema recurrente de oscilaciones que dificulta las operaciones en el interior del PE, el recinto portuario suspende las actividades a embarcaciones menores durante eventos de tormenta. Se pretende estudiar el comportamiento del PE a diferentes longitudes de onda incidentes mediante modelos numéricos con la finalidad de obtener los modos normales de oscilación para el puerto utilizando su configuración actual y otra con una prolongación en el rompeolas

principal de 780 *m* utilizando un fondo plano, así como con batimetría real del puerto. Es importante que en el momento que se desee realizar una modificación en un puerto, se cuente con la información necesaria y el conocimiento de su comportamiento en el interior.

I.2. Antecedentes

Lee y Raichlen (1971), en su modelo encuentran la solución teórica para el estudio de oscilaciones inducidas en una cuenca de forma arbitraria y de profundidad constante, planteando una ecuación integral que posteriormente utiliza un método aproximado que convierte esta ecuación en un sistema matricial. Este modelo no considera la viscosidad y se desarrolló para analizar la respuesta a ondas periódicas incidentes en geometrías arbitrarias. La teoría considera dos regiones, una conocida como región de mar abierto y la otra como región interior del puerto. Por último se obtiene la respuesta y la distribución de la amplitud en la rada portuaria.

Lee *et al.,* (1998), se enfocaron en estudiar el fenómeno de resonancia mediante la aplicación de un modelo numérico aplicado a un puerto en Long Beach, Los Ángeles, CA.EU. El modelo que utiliza las ecuaciones de onda de la pendiente suave, y las condiciones iniciales son ingresados al modelo utilizando fronteras parcialmente y completamente reflectivas así como fronteras permeables. En este modelo se tomó en cuenta la pérdida de energía a través de la entrada del puerto debido a dispersión y disipación por fricción en el fondo. Los resultados del modelo

se comparan con un modelo físico en el puerto de Long Beach-Los Ángeles, CA, EU.

Hernández y Barradas (2003), implementaron un modelo de esparcimiento de ondas electromagnéticas por superficies rugosas para estudiar los modos resonantes y es aplicado al sistema de las Bahías de Manzanillo y Santiago, Colima, México. El modelo se validó con mediciones en laboratorio, lo cual mostró que el modelo trabaja adecuadamente. El modelo muestra que ondas con cierta longitud generarán resonancia en las bahías. Además, se observó que algunas longitudes de onda se amplificaban hasta casi 4 veces el tamaño de la onda incidente. El modelo aplicado considera la dirección de la onda incidente tomada en cuenta para el estudio del comportamiento de los modos normales de oscilación.

Estudios previos han analizado los diferentes mecanismos forzadores de resonancia portuaria, dando como resultado que las ondas largas ligadas a los grupos de ondas cortas que se propagan hacia dentro de las instalaciones portuarias, son las que regularmente inducen los episodios del fenómeno de resonancia (Díaz, 2006).

Díaz (2007) realizó un estudio de análisis de la hidrodinámica asociada a los procesos de resonancia en dominios semi-cerrados basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq Nwogu (1993), Liu y Woo (2004). El trabajo se centro en caracterizar los agentes forzadores, las características no lineales del

forzamiento y de la respuesta de los puertos, transitoriedad del fenómeno y el acoplamiento geométrico. Se hace uso de una metodología que integra la aproximación teórica para caracterizar las oscilaciones de baja frecuencia de datos tomados in situ. Se utilizó un modelo físico para diferentes características oscilatorias resonantes no lineales y acoplamiento geométrico, y se valida con el modelo numérico con series temporales de laboratorio y situaciones resonantes de series reales de onda larga y onda larga vinculada a grupos de olas, en el cual se encontró una correlación en los resultados.

El trabajo realizado por Gao *et al.,* (2014), tuvo como principal propósito obtener la respuesta de diferentes modos resonantes y estudiar a fondo la distribución de la energía de la ola en una geometría rectangular con diferentes pendientes del fondo cuando las oscilaciones son inducidas por una onda solitaria normal. Se proponen una serie de experimentos numéricos llevados a cabo usando el modelo FUNWAVE 2.0., que resuelve las ecuaciones de Boussinesq. Los resultados mostraron que cuando la altura de la ola es pequeña, la energía resonante de la onda dentro del puerto estará dominada por modos normales bajos, mientras que altos modos resonantes solo poseen una pequeña porción de la energía resonante. Cuando la altura de la ola incrementa, la distribución de la energía se hace uniforme y la proporción de la energía en los modos altos se incrementa.

Bellotti *et al.,* (2014), realizaron un estudio en el puerto de Roma (Ostia, Italia), cuyo objetivo principal fue estudiar la respuesta del puerto a las ondas largas en condiciones de resonancia. Realizaron simulaciones numéricas forzando con

ondas de periodos muy largos. El modelo está basado en las ecuaciones elípticas de Helmholtz y las ecuaciones de pendiente suave. Reprodujeron las simulaciones del puerto diseñado y se analizó el efecto de resonancia en la entrada, donde los resultados indicaron los efectos en la modificación del diseño del puerto para reducir la resonancia.

El puerto de Ensenada se compone de 4 estructuras que abrigan la parte interior de la rada. De 1951-55 se construyó el rompeolas principal del puerto cuya longitud es de aproximadamente 1650 metros, aunque esta estructura funcionaba solo como protección para las embarcaciones en el interior contra embate del oleaje que llegaba directamente. Posteriormente se construyeron estructuras adicionales que compondrían lo que hoy es el Puerto de Ensenada. Debido a que el rompeolas principal solo protegía al puerto del oleaje directo, se construye una segunda modificación con la finalidad de atenuar la difracción del oleaje que ocurría al interactuar con el rompeolas principal. Dicha construcción ocurre en 1955, cabe mencionar que al igual que la primera estructura en el puerto, inició con una longitud y después se prolongó. El espigón inicia sus operaciones inicialmente con 150 metros con la finalidad de apoyar a maniobras de una empresa cementera. Finalmente, a partir de 1978 empiezan los trabajos para llevar a cabo la prolongación que culminaría en el año 1980. Debido a que una parte considerable del oleaje que incidía hacia el interior del puerto, aún abrigada una gran parte del PE por estructuras como rompeolas y espigones, dificultaba las operaciones de la empresa cementera, en el año 1993 se proyecta y se construye una escollera caracterizada por su orientación hacia el interior de la rada portuaria

con la finalidad de satisfacer necesidades de la empresa antes mencionada y sin considerar las implicaciones de dicha construcción en el interior de la rada portuaria.

Finalmente en el año 2006 se realiza la construcción de una escollera que parte del extremo oeste del espigón con orientación hacia el exterior del puerto y paralela al canal de navegación cuya longitud actual es de 320 metros. A partir de la construcción de esta ultima estructura (comunicación personal, usuarios del puerto de Ensenada, Baja California, 2008 en (Ortiz, 2009)), mencionan que el problema de agitación dentro de la rada portuaria se intensifica ya que el espigón estaría reflejando el oleaje hacia el interior tanto en oleaje de invierno proveniente del noroeste y el de verano proveniente del suroeste.

Con la finalidad de analizar la respuesta de la Bahía de Todos Santos a diferentes oscilaciones incidentes, (Rodríguez, 1996) utilizó un modelo numérico para cuencas de forma arbitraria desarrollado por Lee (1971). En este modelo la solución de la ecuación de Helmholtz se plantea como una ecuación integral la cual se resuelve aproximándola por una ecuación matricial que es resuelta numéricamente para las regiones interior y exterior de la Bahía. Se compararon las soluciones para cuencas de geometría sencilla y cerrada. Se obtuvieron los modos normales de oscilación para periodos de T= 10 y 19.3 min correspondientes a longitudes de onda de 13.5 y 25.6 *km* respectivamente.

Ortiz (2009), realizó un estudio de agitación en el puerto de Ensenada, Baja California, México, y propuso medidas de atenuación que se analizaron a través de simulaciones de oleaje mediante un modelo numérico de propagación de olas para oleaje proveniente tanto del Noroeste como del Suroeste. Se propuso realizar una prolongación del rompeolas principal con una escollera impermeable cuya longitud era de 400 metros, ó, la prolongación del rompeolas principal con una escollera permeable de 400 metros de longitud con 70% de impedancia en la altura del oleaje transmitida. En resumen los resultados mostraron que es necesario atenuar la agitación por oleaje en todo el puerto antes de realizar una nueva construcción ya sea marinas o modificaciones en alguna escollera para satisfacer necesidades específicas. Cabe destacar que para cualquier modificación a la geometría del interior del puerto se debe considerar antes, ya que alguna alteración o modificación en su geometría puede traer consecuencias en la agitación por oleaje dentro del puerto.

Para determinar la extensión óptima de la escollera del puerto de Ensenada, Baja California, México que brindara las mejores condiciones y que permitan llevar a cabo las actividades seguras en la rada portuaria, Torres *et al* (2012) realizaron un estudio utilizando un modelo numérico en coordenadas curvilíneas para la simulación de la evolución del oleaje, así como para corrientes asociadas a las áreas de operación y área de maniobras en el puerto de Ensenada. Se hicieron simulaciones numéricas tanto para condiciones actuales así como para diferentes longitudes de la prolongación del rompeolas (430, 590 y 890 metros). Los resultados mostraron mitigación del oleaje incidente, como resultado una

atenuación de la ola en el interior de la rada. De los casos simulados, se concluyó que el rompeolas con la longitud de 890 metros, brindará las condiciones óptimas buscadas en el diseño de la estructura, es decir, olas pequeñas e intensidades de corriente bajas.

I.3. Objetivo

Investigar numéricamente la respuesta del puerto de Ensenada a ondas de periodo largo, así como analizar el efecto del fondo marino y de la ampliación del rompeolas principal en respuesta a los modos normales de oscilación. En particular, se pretende:

- Detectar zonas de mayor amplificación.
- Analizar el efecto en la modificación de la rada portuaria.
- Analizar el efecto de los modos resonantes al utilizar un fondo variable.

II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Puerto de Ensenada se encuentra localizado al norte de la Bahía de Todos Santos, B.C. México (BTS), sus coordenadas geográficas se encuentran entre los paralelos 31°50’30’’ y 31°51’30’’ de Latitud Norte y los meridianos 116°37’ y 116°38’ de Longitud Oeste. Las coordenadas UTM en el X son 536,270.857 y

534,687.615, en el eje Y 3’522,762.817 y 3’524,604.659. El puerto de Ensenada tiene una superficie total de 3’368,858.35 m^2 (D.O.F. 29 de noviembre del 2002, tomado de Manifiesto de Impacto Ambiental, Puerto de Ensenada, 2014). Cuenta con una longitud de atraque de 6,014.25 metros y una superficie de agua cercana a los 600,000 m^2 compuesta de zonas internas de navegación (**figura 1**).

Figura 1. Localización del Puerto de Ensenada obtenida de Google Earth (2015).

II.1. Batimetría

II.1.1. Batimetría en la Bahía de Todos Santos

La Bahía de Todos Santos se caracteriza por la presencia de aguas poco profundas, aproximadamente un 80% del área con profundidades menores a 50

metros. La entrada noroeste se caracteriza por un cañón submarino de 12 kilómetros de anchura con profundidades próximas a 50 metros. A un kilómetro de la isla sur (en dirección de Punta Banda) la profundidad alcanza los 150 metros y a dos kilómetros se alcanzan 400 metros. En Punta Banda la isobata de 50 metros se encuentra aproximadamente a 3 kilómetro de costa, a partir de la cual conforme nos alejamos de costa, la pendiente varía bruscamente hacia el borde del cañón haciéndose muy pronunciada (Ulloa-Torres, 1989). (**Figura 2**)

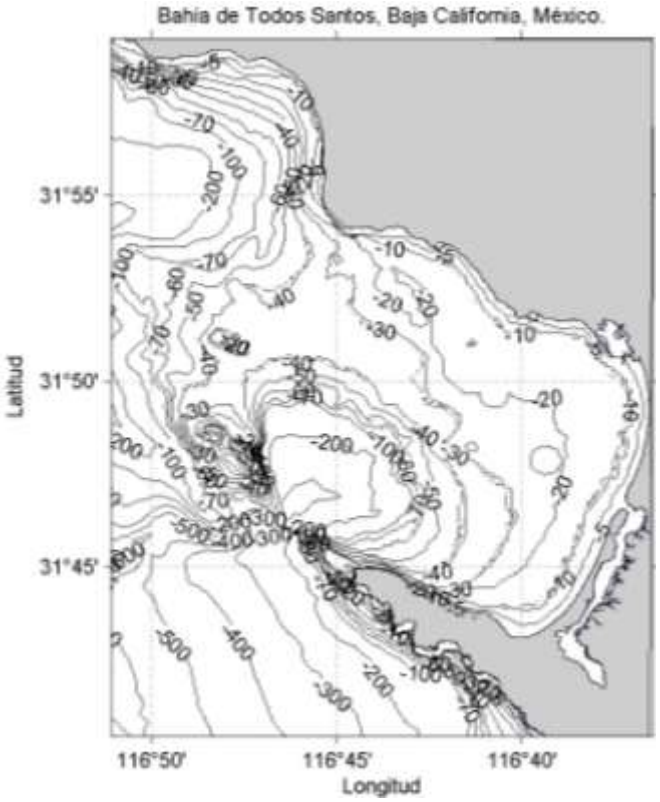


Figura 2.- Batimetría de la Bahía de Todos Santos.

II.1.2. Batimetría del puerto de Ensenada

La batimetría en la parte interna del puerto muestra zonas con profundidad muy variable, profundidades menores a los 5 metros correspondientes a los astilleros, Andador Turístico y la zona frente a los muelles de la Base Naval. Una segunda

zona con profundidades de 5 a 10 metros distribuida alrededor de los muelles de la terminal de cruceros. Una tercera zona caracterizada por profundidades de 10 hasta 18 metros distribuida en el canal de acceso, rada y dársena portuaria y la una parte de los muelles de pesca y terminal de contenedores (**figura 3**).

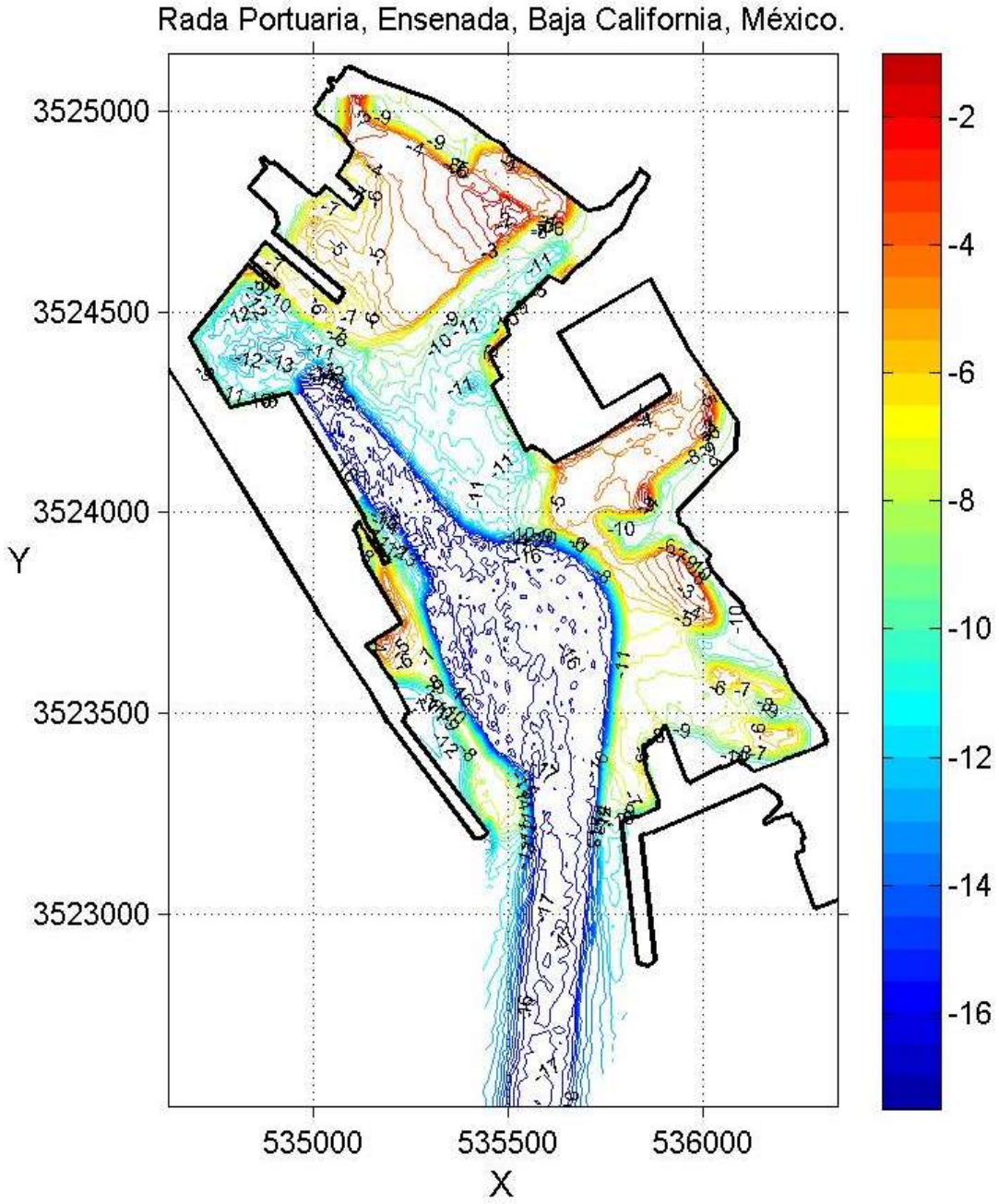


Figura 3. Batimetría del Puerto de Ensenada, Baja California (tomada de Torres, 2012).

II.2. Observaciones

II.2.1 Marea

En el puerto de Ensenada la marea es tipo mixta semidiurna, es decir se registran dos pleamares y dos bajamares al día. La pleamar media superior es de aproximadamente 1.61 *m* (referido al NBMI). En el Puerto de Ensenada, la pleamar máxima registrada es de 2.32 *m* y el nivel medio del mar de 0.81 *m*. La SEMAR cuenta con un mareógrafo instalado en el recinto portuario de Ensenada dentro de las instalaciones de la Segunda Región Naval.

II.2.2. Oleaje en Aguas profundas

Para caracterizar el oleaje en aguas profundas, Torres en el 2010, utilizó registros de datos de oleaje de una boya del programa de monitoreo "The Coastal Data Information Program" (CDIP), Scripps, Institution of Oceanography, de California, USA, cuyo número de estación utilizada es la #191 en Point Loma South, Ca., con coordenadas 32° 31.81 N 117° 25.87 W, (NAD83). La información que presenta son; altura significante (H_s) como el promedio del tercio de las alturas más altas, periodo pico (T_p) y dirección (θ_0) de oleaje en aguas profundas, que comprenden de Diciembre de 2007 a Junio de 2010 (**Figura 4**). La distribución conjunta de H_s y T_p correspondiente al mismo periodo se muestra en la **figura 5**.

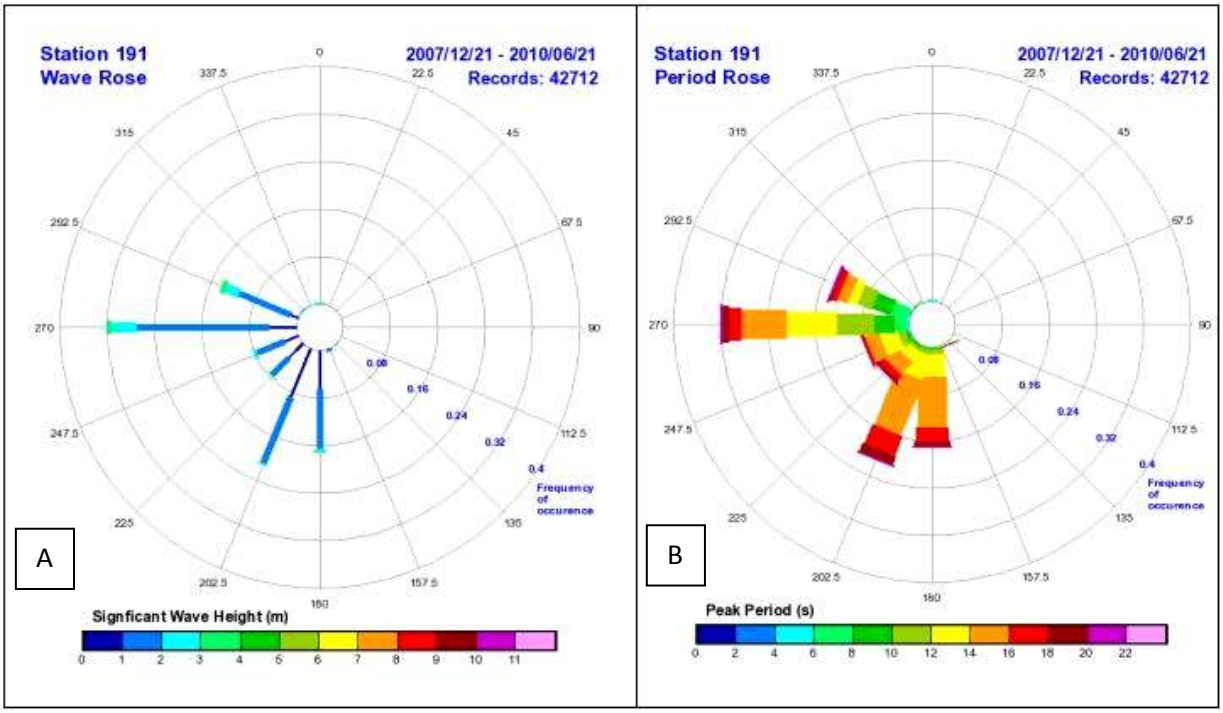


Figura 4. Rosa de altura significante (A) y Rosa de periodo pico para el oleaje de la estación 191 (Point Loma), de 21 de diciembre del 2007 al 21 de junio del 2010 (Torres, 2010).

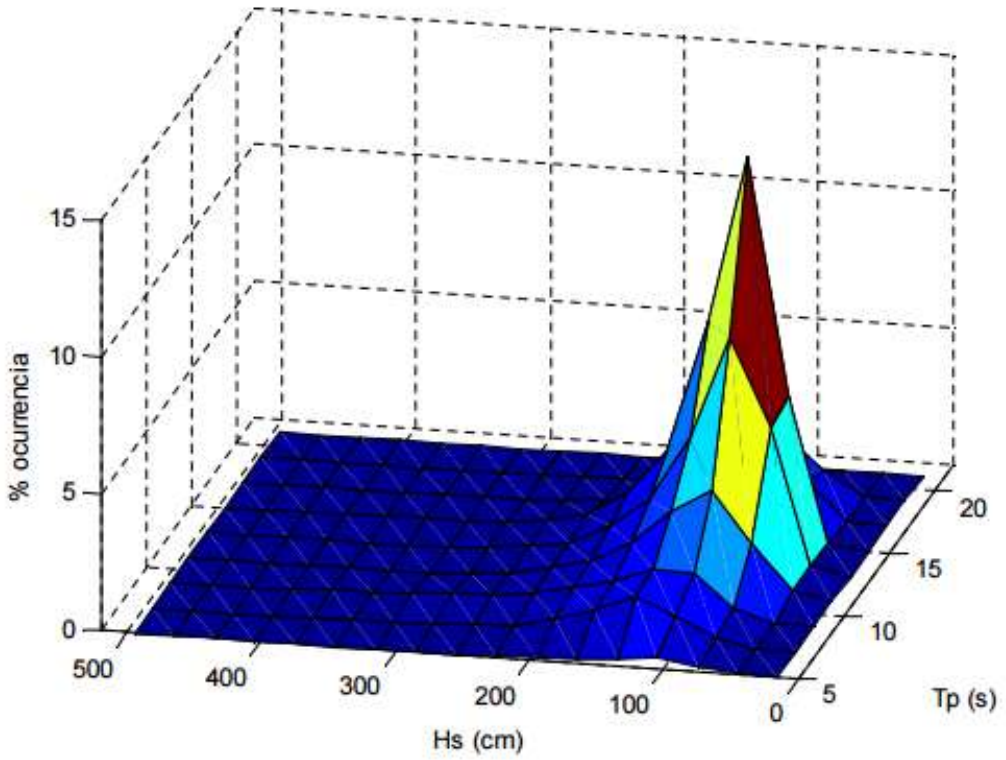


Figura 5. Distribución conjunta de la altura significante (H_s) y el periodo pico (T_p) para los datos de la estación 191 (Point Loma), del 21 de diciembre del 2007 al 21 de junio del 2010.

II.2.3. Oleaje en la Bahía Todos Santos

La BTS se encuentra sujeta a diferentes condiciones de oleaje, las cuales varían de acuerdo con la estación del año y con los vientos reinantes. Mediciones de olas realizadas durante 2004-2005 en la Barra del Estero (Martínez et al. 2008), indican que la climatología del oleaje en la zona se caracteriza por olas de altura significante 1 *m*, periodos entre 5 y 15 *s* (12 *s* en promedio) y dirección predominante Oeste. (**Figura 7**).

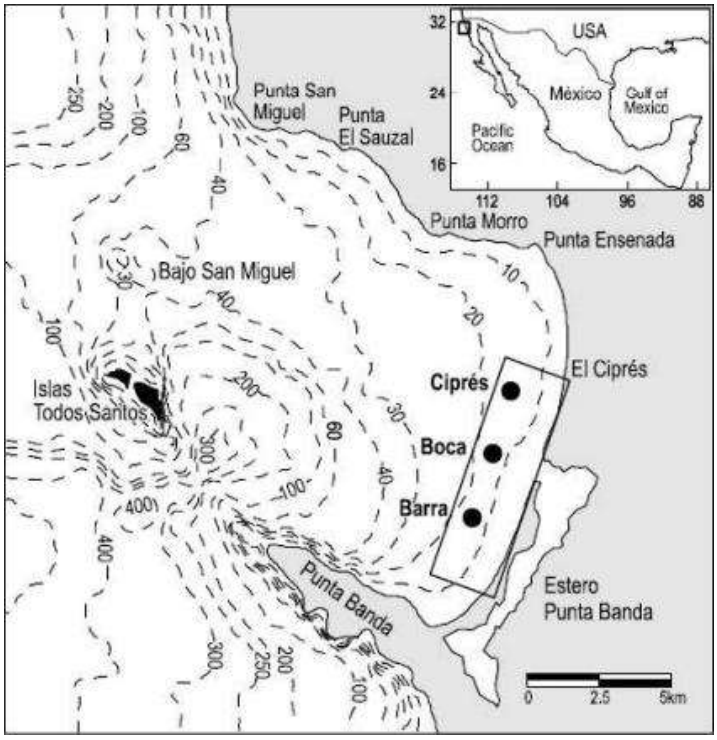


Figura 6. Ubicación de los instrumentos de medición (Martínez et al 2008).

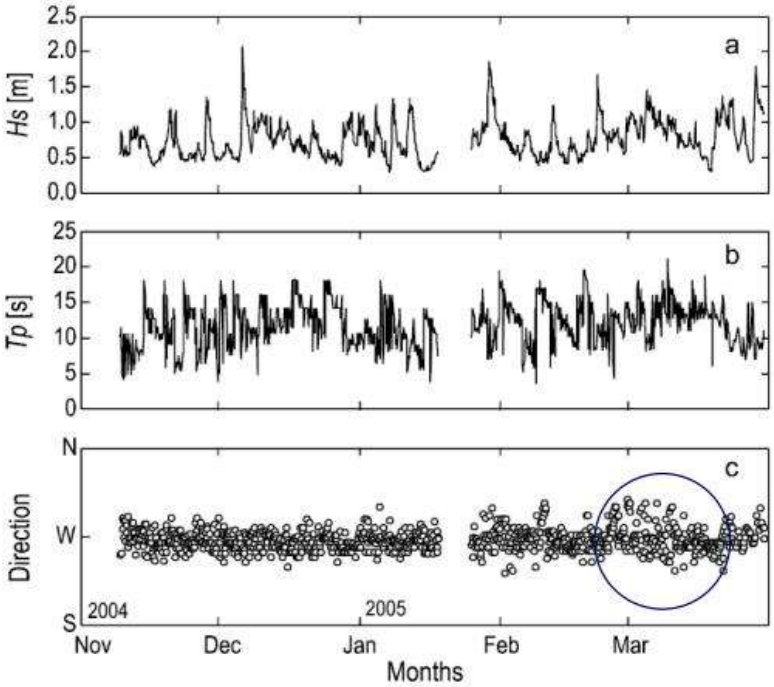


Figura 7. Serie de tiempo de altura, periodo y dirección significantes durante Noviembre de 2004 a Marzo de 2005 (Martínez et al 2008).

II.2.4. Oleaje en el interior del Puerto

Para caracterizar el oleaje en la zona interna del puerto, el IMT (Instituto Mexicano del Transporte) realizó cuatro campañas de medición de oleaje durante el 25 de septiembre del 2008 al 11 de junio del 2010. Se instaló un ológrafo escalar con sistema Doppler, el cual se ubicó cercano a la zona de contenedores del puerto (punto blanco), en las coordenadas geográficas 31°50’57’’ de latitud Norte y 116°37’38’’ de longitud Oeste, (IMT, 2010 en Manifiesto de Impacto Ambiental, Ensenada, 2014). (**Figura 8**). Las alturas de la ola y las velocidades máximas registradas durante las campañas son presentadas en la **tabla 1**.

Tabla I. Mediciones de altura de la ola y velocidades máximas en cuatro campañas realizadas durante el 25 de septiembre del 2008 al 11 de junio del 2010 (Manifiesto de impacto Ambiental, Ensenada, 2014).

Campañas de medición	Velocidades máximas (*m/s*)	Altura de la ola (*m*)
25-Septiembre 2008 al 13-Enero 2009	0.27	0.33
21-Enero 2009 al 29-Abril 2009	0.287	0.20
28-Agosto 2009 al 07-Diciembre 2009	-	0.50
02-Marzo 2010 al 11-Junio 2010	-	0.47

II.3. Observaciones durante un evento de tormenta

Para entender la respuesta del PE durante un evento de tormenta, se utilizaron dos registros, uno de nivel de mar (punto amarillo) proporcionado por SEMAR y otro de oleaje (punto rojo) proporcionado por el IIO, los instrumentos utilizados en dichas mediciones se muestran en la **figura 8**.

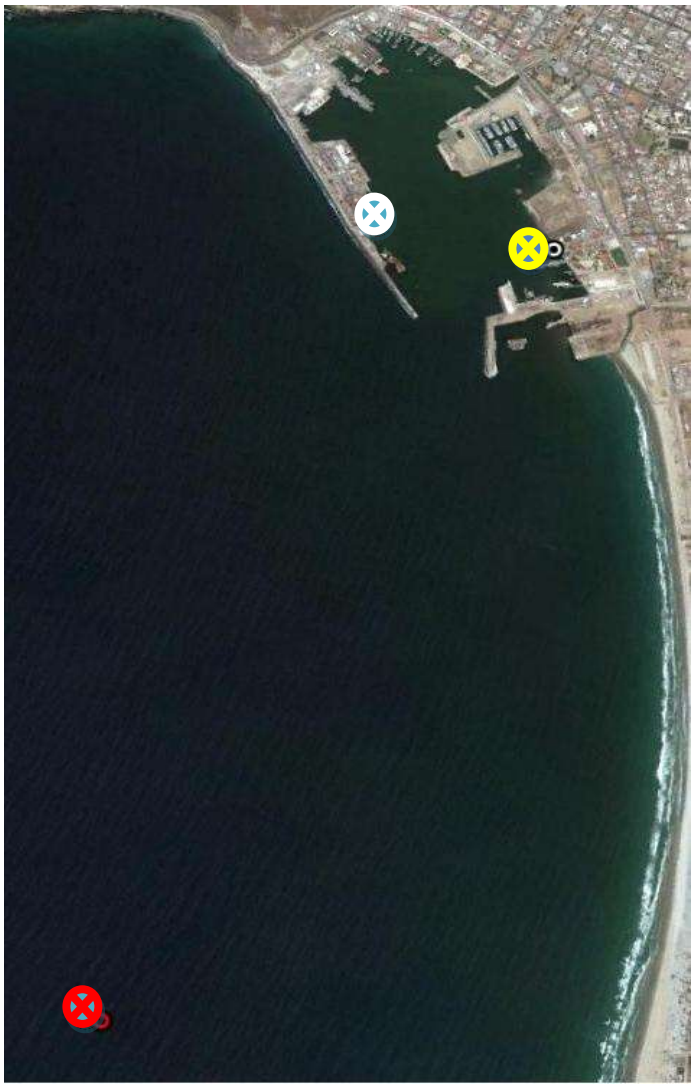


Figura 8. Ubicación de instrumentos de medición, en donde el punto rojo corresponde a un ADCP tipo Awac que mide el oleaje y el punto amarillo corresponde a un sensor de presión del cual fueron extraídos los datos del nivel mar.

La serie de tiempo de nivel del mar comprendida del 1-3 de marzo de 2014 junto con el espectro correspondiente se muestra en la **figura 9**.

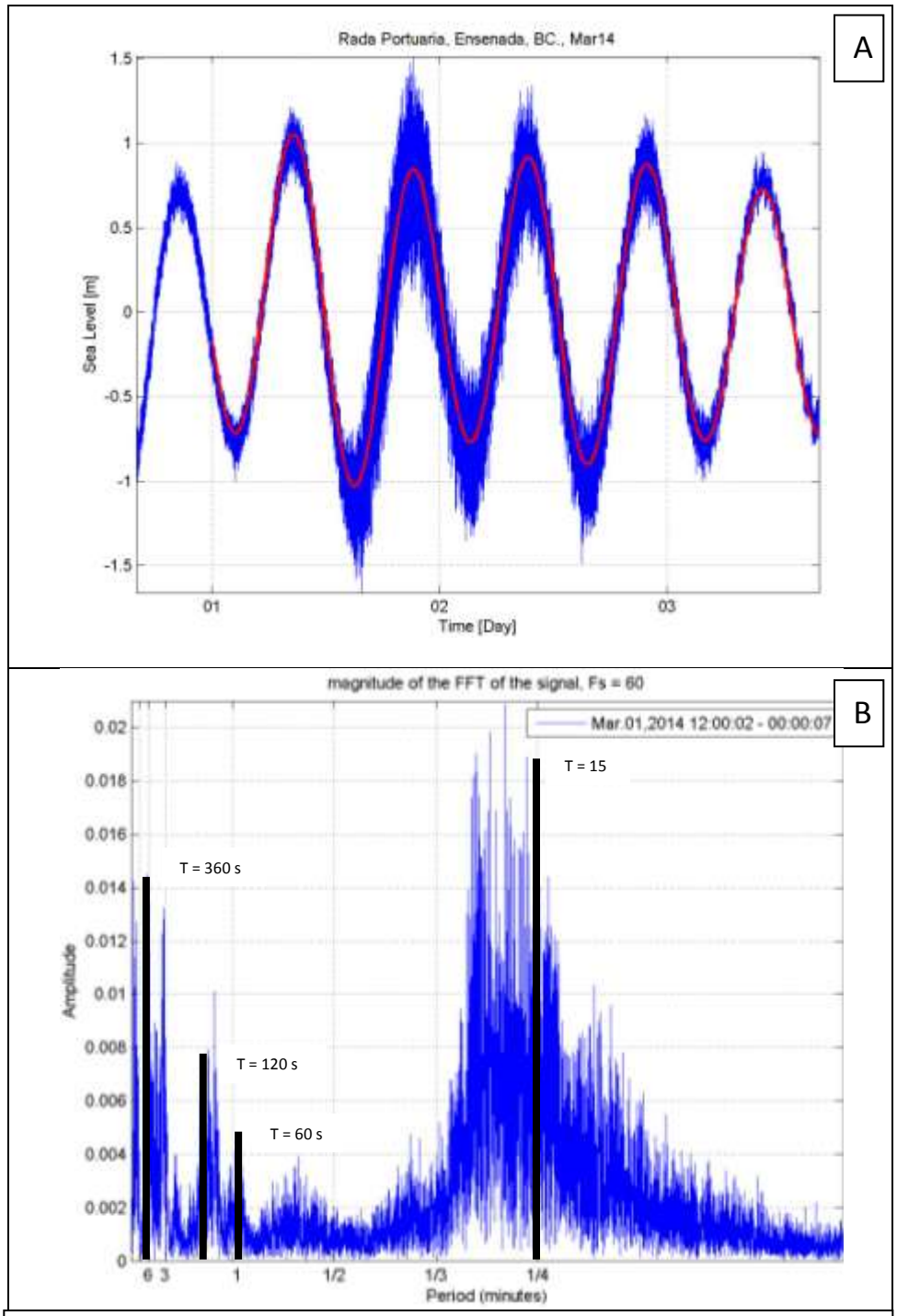


Figura 9.- Panel A representa el registro de nivel del mar en un evento de tormenta del 1-3 de marzo del 2014 en el PE. La línea azul indica datos tomados desde un punto dentro del PE y línea roja indica la predicción de la marea. El Panel B muestra el espectro de frecuencias en el episodio más intenso del evento

La serie … relación entre el … ta cuyo periodo comprendido es del 1-3 de marzo del 2014.

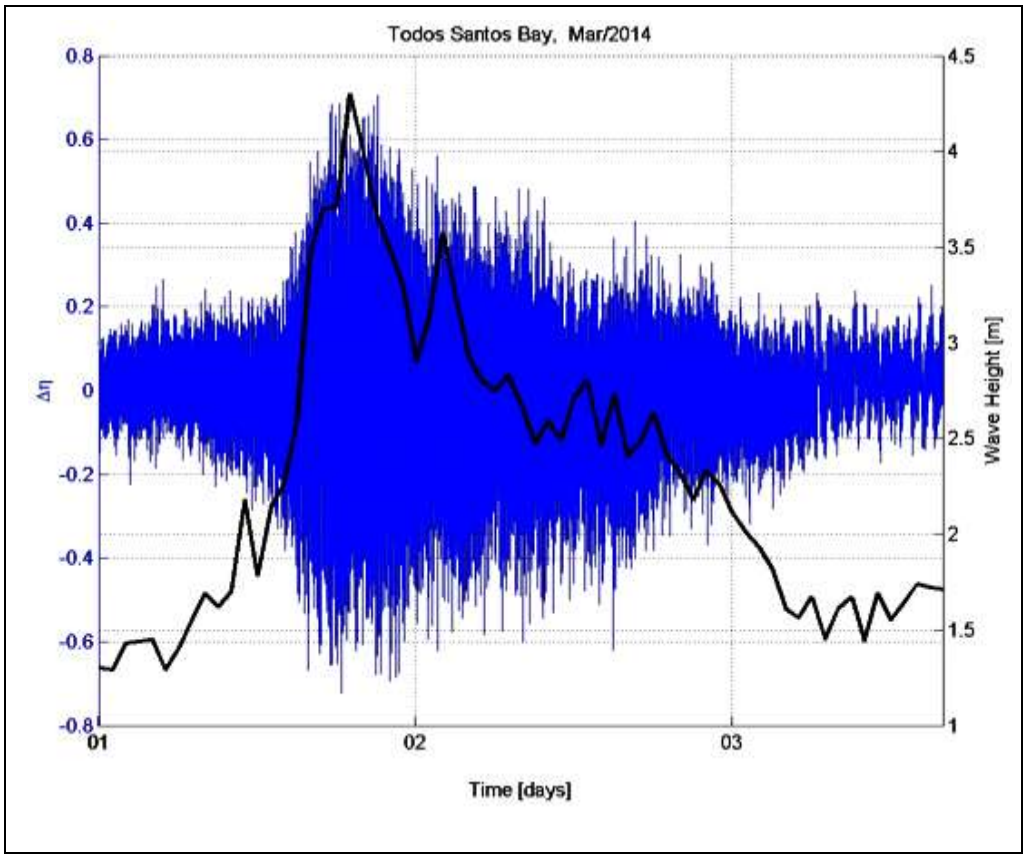


Figura 10.-Serie de tiempo en el evento de tormenta del 1-3 de marzo del 2014donde la el color azul indica el nivel del mar menos la predicción y la línea en color negro el oleaje.

III. METODO

III.1. Modelo de Lee & Raichlen

Para obtener los modos normales de oscilación, se utilizó la solución teórica para oscilaciones inducidas en cuencas de forma arbitraria para una geometría con

profundidad constante. Dicha solución, es formulada mediante una ecuación integral convirtiéndola en una ecuación matricial que es resuelta numéricamente mediante un modelo computacional descrito por Lee y Raichlen en (1971).

III.1.1. Teoría (Desarrollo de la ecuación de Helmholtz)

Para resolver dicho problema se asume un flujo irrotacional, de tal manera que se pueda obtener un potencial de velocidad ϕ, tal como la velocidad de las partículas del fluido pueda expresarse como el gradiente del potencial de velocidad $\nabla\phi$, es decir, $\bar{u} = \nabla\phi$, donde ū es el vector velocidad con componentes *u, v y w* en las direcciones x, y, z respectivamente y ∇ es el gradiente definido como: $\partial/\partial x\ \boldsymbol{i} + \partial/\partial y\ \boldsymbol{j} + \partial/\partial x + \partial/\partial z\ \boldsymbol{k}$,en el cual $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}$ y $\boldsymbol{k}$ son los vectores unitarios respectivamente en las direcciones *x, y* y *z*.

De la ecuación de continuidad para un flujo incompresible $\nabla \cdot \bar{u} = 0$, y la definición de la potencial de velocidad de la ecuación de Laplace, se obtiene:

$$\nabla \cdot \bar{u} = \nabla^2 \phi = 0,$$

Sin embargo, el problema se enfoca en encontrar el potencial de velocidad, el cual satisface la ecuación de Laplace y las condiciones de frontera propuestas en el modelo es decir la línea de costa y el fondo; en otras palabras esto quiere decir que el fluido no penetre las fronteras sólidas. Por lo tanto las velocidades en el fondo y en la línea de costa son iguales a cero.

$$\partial \phi / \partial n = 0,$$

La forma de la solución del potencial de velocidad es de tipo:

$$\phi (x, y, z, t) = 1/-i\,\omega \;\; f(x, y)\, Z(z) e^{-iwt}, (1)$$

donde ω es la frecuencia angular que se define como $2\pi/T$ donde T es el periodo de la ola, i es $\sqrt{-1}$ y $f(x,y)$ es la función de la onda la cual describe la variación de ϕ en las direcciones x y y.

Sustituyendo de la ecuación (1) en la ecuación de Laplace:

$$1/f\,(\partial^2 f/\partial x^2 + \partial^2 f/\partial y^2) = 1/z\;\partial^2 Z/\partial z^2, \qquad (2)$$

el término de la parte izquierda de la ecuación (2) es totalmente independiente de z, por lo tanto, la parte derecha de la ecuación (2) no depende de x y y. Cada término de la ecuación puede ponerse igual a la constante $(-k^2)$ asegurando que $Z(z)$ varíe exponencialmente. Como resultado se obtienen las siguientes ecuaciones:

i), $\partial Z/\partial z^2 = k^2 Z,$ es decir, $d^2Z/dz^2 - k^2 Z = 0$

ii) $\partial^2 f/\partial x^2 + \partial^2 f/\partial y^2 + k^2 f = 0,$ (Ec. Helmholtz)

La condición de frontera en el fondo y la condición dinámica linealizada de superficie libre son respectivamente:

$$\partial\phi/\partial z\ (x,y,-h,t) = 0, \qquad (3.A)$$

$$\eta(x, y, t) = A_i\ f(x,y)\ e^{-iwt} = -1/g\ (\partial\phi/\partial t)_{z=o}\ , \qquad (3.B)$$

donde h se asume como constante, η es la amplitud de la ola (posición de la superficie libre) en (x,y) en el tiempo t, A_i es la amplitud de la onda incidente y g es la aceleración de la gravedad.

De la ecuación (3) la constante A_0 es:

$$A_0 = -\ A_i\, g/\ cosh(kh),$$

la relación de dispersión se obtiene de la siguiente manera:

$$\omega^2 = gk\ tanh\ (kh),$$

donde la relacion de dispersión relaciona la frecuencia f, con k, que es el número de onda que se define como $2\pi/\lambda$ y h es la profundidad del agua.

III.1.2. Configuración y discretización de la rada portuaria de Ensenada

Las configuraciones utilizadas para obtener los modos normales de oscilación mediante el modelo de (Lee & Raichlen, 1971), son mostradas en la **figura 11,** donde el panel A muestra la configuración del PE con su geometría actual y el panel B muestra la configuración del PE con una prolongación en el rompeolas principal de 780 *m.* El polígono de la rada portuaria se dividió en un determinado

número de segmentos (126 puntos) para este modelo, incluyendo los puntos de la entrada del puerto de los cuales 4 corresponden a la entrada (np) y 122 segmentos cubren la poligonal del puerto (**Figura 12**).

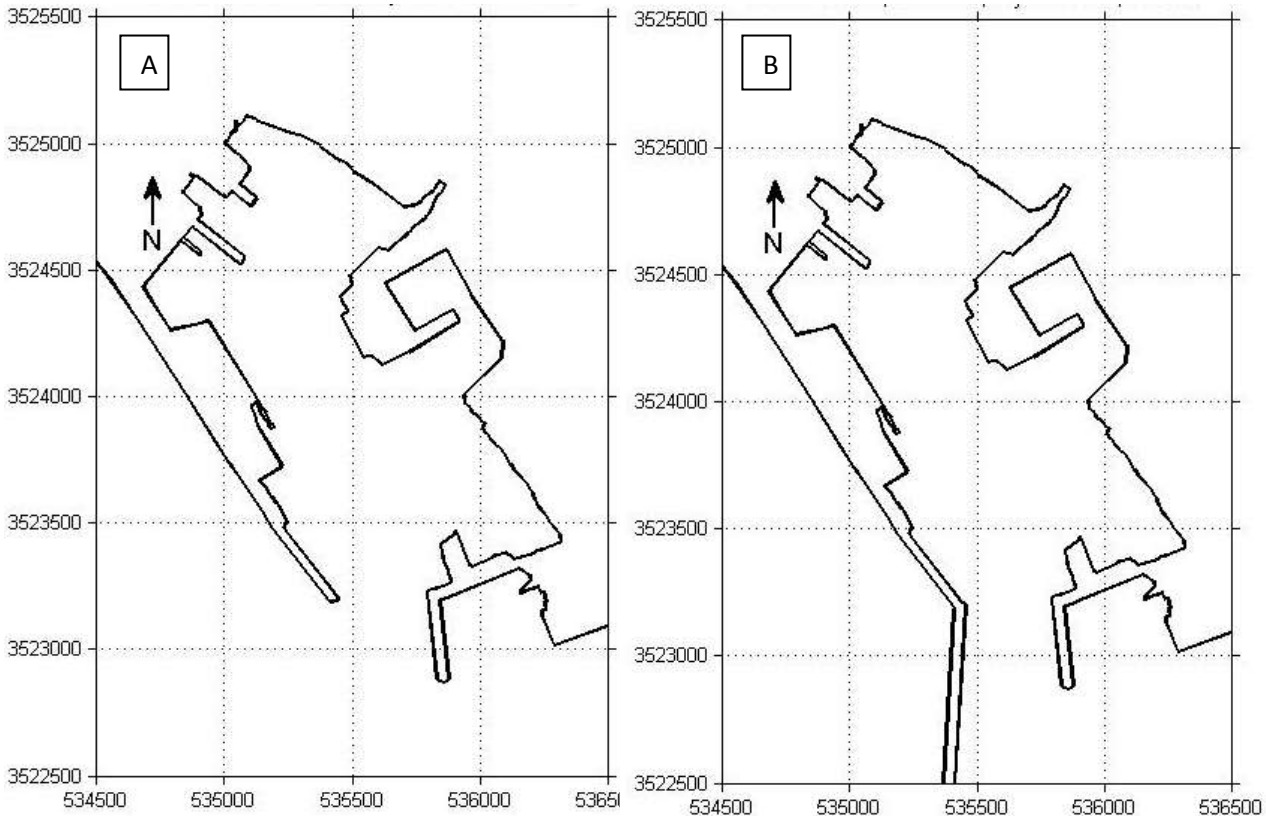


Figura 11. Configuraciones utilizadas para los modos normales de oscilación en el PE, panel A (configuración actual) y panel B (prolongación).

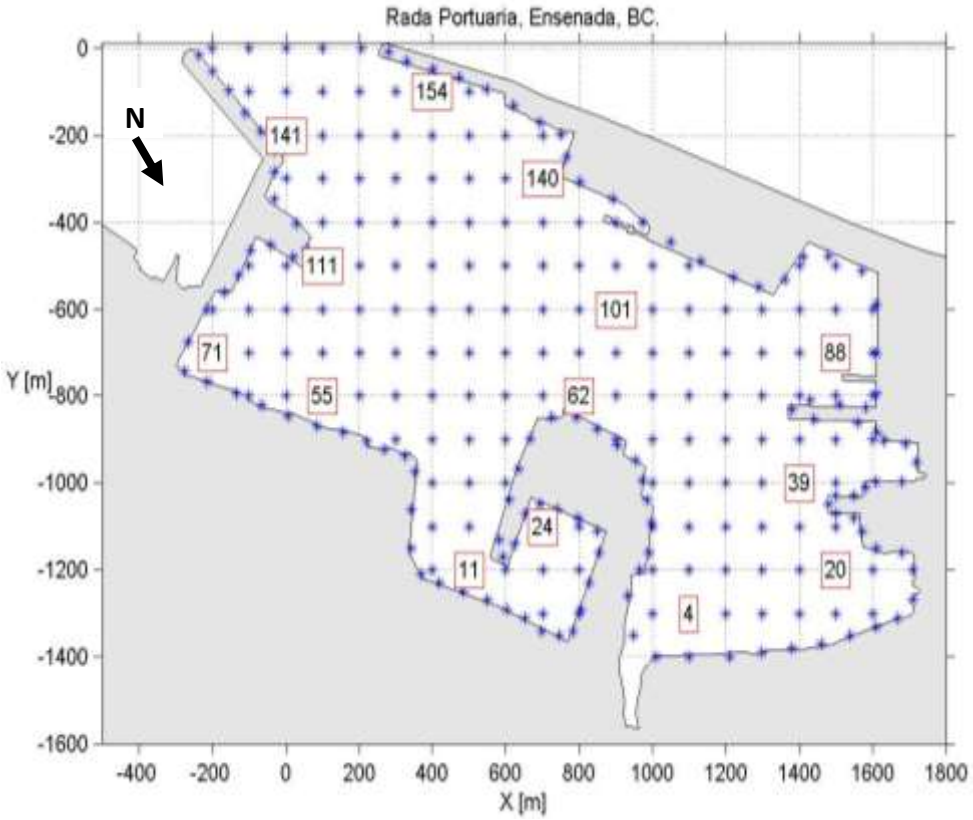


Figura 12. Discretización de la línea de costa del PE. Los números dentro del recuadro indican los diferentes puntos analizados en el interior de la rada portuaria.

III.2. General Curvilinear Ocean Model (GCOM)

III.2.1. Descripción del modelo

GCOM es un modelo numérico en coordenadas curvilineas el cual es capaz de utilizar mallas adaptadas a la topografía submarina. Sea (x, y, z) el sistema coordenado cartesiano en un plano vertical donde x es en la dirección del flujo, y perpendicular a x en un plano horizontal, y z apuntando hacia arriba. El movimiento del fluido se rige por las ecuaciones de Navier Stokes, dentro de la aproximación de Boussinesq (Pedloski, 1979);

$$D\boldsymbol{u}/Dt = -\nabla p/\rho_0 - \rho \boldsymbol{g}/\rho_0 + \nu \nabla^2 \boldsymbol{u}, \qquad (4)$$

$$D\rho/Dt = 0, \qquad (5)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0, \qquad (6)$$

donde $\boldsymbol{u} = (u, v, w)$ es el vector velocidad, p es la presión, ρ y ρ_o son la densidad y una densidad de referencia respectivamente, $\boldsymbol{g}$ es la aceleración debida a la gravedad y ν la viscosidad cinemática. La condición de incompresibilidad, está dada por la ecuación (6). Las ecuaciones adimensionales correspondientes al sistema (4-6) estan dadas en variables perturbadas para ρ y p, como (Torres *et al.,* 2000; 2002);

$$D\boldsymbol{u}/Dt = -\nabla p - \rho \boldsymbol{j}/F^2 + (2/Re)\ \nabla^2 \boldsymbol{u} \qquad (7)$$

$$D\rho/Dt = 0, \qquad (8)$$

$$\nabla^2 p = -(1/F^2)\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{j}) - \nabla \cdot [(\boldsymbol{u} \cdot \nabla) u] + (2/Re)\nabla^2 D - \partial D/Dt, \qquad (9)$$

donde la ecuación (9) sustituye a la condición de incompresibilidad dada por (6), $D= (\nabla \cdot u)$ representa la divergencia de la velocidad y $\boldsymbol{j}$ es el vector unitario en la coordenada vertical. Los números adimensionales son el numero de Reynolds, $Re = (2Ua/\nu)$ y el numero de Froude, $F = (U/Na)$. U es la velocidad uniforme, $N^2 = (-g/\rho 0)\ \partial\rho/\partial y$ es la frecuencia de Brünt-Väisälä y a es la longitud característica del objeto.

Transformación a Coordenadas Curvilineas para calcular eficientemente la solución, utilizamos las coordenadas curvilíneas $x = x(\xi, \eta, \zeta), y=y(\xi, \eta, \zeta)$, y $z = z(\xi, \eta, \zeta)$. De esta manera, las derivadas espaciales se transforman de acuerdo a

$$\partial/\partial x = \{(y_\eta z_\zeta - z_\eta y_\zeta)\partial/\partial\xi + (y_\zeta z_\xi - z_\zeta y_\xi)\partial/\partial\eta + (y_\xi z_\eta - z_\xi y_\eta)\partial/\partial\zeta\}\ J^{-1} \quad (10)$$

$$\partial/\partial y = \{(z_\eta x_\zeta - x_\eta z_\zeta)\partial/\partial\xi + (z_\zeta x_\xi - x_\zeta z_\xi)\partial/\partial\eta + (z_\xi x_\eta - x_\xi z_\eta)\partial/\partial\zeta\}\ J^{-1} \quad (11)$$

$$\partial/\partial z = \{(x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta)\partial/\partial\xi + (x_\zeta y_\xi - y_\zeta x_\xi)\partial/\partial\eta + (y_\zeta x_\eta - x_\zeta y_\eta)\partial/\partial\zeta\}\ J^{-1}. \quad (12)$$

El Jacobiano de la transformación, J, esta dado por

$$J = x_\xi(y_\eta z_\zeta - y_\zeta z_\eta) - x_\eta(y_\zeta z_\xi - y_\xi z_\zeta) + x_\zeta(y_\xi z_\eta - y_\eta z_\xi).$$

Mediante el uso de las relaciones anteriores, el operador Laplaciano

$$\nabla_2 = (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2), \quad (13)$$

queda como;

$$\nabla_2 = L\text{-}J^{-1}\{Lx[(\alpha_1(\partial/\partial\zeta)+\alpha_2(\partial/\partial\eta)+\alpha_3(\partial/\partial\xi)] -Ly[(\alpha_1(\partial/\partial\zeta)+\alpha_2(\partial/\partial\eta)+\alpha_3(\partial/\partial\xi)]$$

$$-Lz[\alpha_1(\partial/\partial\zeta)+\alpha_2(\partial/\partial\eta)+\alpha_3(\partial/\partial\xi)]\}, \quad (14)$$

donde el operador L esta dado por

$$L = J\text{-}^{2}\{\alpha_3(\partial^2/\partial\xi^2)+\alpha_2(\partial^2/\partial\eta^2)+\alpha_1(\partial^2/\partial\zeta^2)$$

$$+2[\beta_3(\partial^2/\partial\xi\partial\eta)+\beta_2(\partial^2/\partial\xi\partial\zeta)+\beta_1(\partial^2/\partial\eta\partial\zeta)]\} \quad (15)$$

y los coeficientes α_i , β_i $(i = 1,3)$ estan definidos como

$$\alpha_1=(y_\xi z_\eta-y_\eta z_\xi)^2+(x_\eta z_\xi-x_\xi z_\eta)^2+(x_\xi y_\eta-x_\eta y_\xi)^2,$$

$$\alpha_2=(y_\zeta z_\xi-y_\xi z_\zeta)^2+(x_\xi z_\zeta-x_\zeta z_\xi)^2+(x_\zeta y_\xi-x_\xi y_\zeta)^2,$$

$$\alpha_3=(y_\eta z_\zeta-y_\zeta z_\eta)^2+(x_\zeta z_\eta-x_\eta z_\zeta)^2+(x_\eta y_\zeta-x_\zeta y_\eta)^2,$$

$$\beta_1 = (y_\xi z_\eta-y_\eta z_\xi)(y_\zeta z_\xi-y_\xi z_\zeta)+(x_\eta z_\xi-x_\xi z_\eta)(x_\xi z_\zeta-x_\zeta z_\xi)+(x_\xi y_\eta-x_\eta y_\xi)(x_\zeta y_\xi-x_\xi y_\zeta),$$

$$\beta_2 = (y_\xi z_\eta-y_\eta z_\xi)(y_\eta z_\zeta-y_\zeta z_\eta)+(x_\eta z_\xi-x_\xi z_\eta)(x_\zeta z_\eta-x_\eta z_\zeta)+(x_\xi y_\eta-x_\eta y_\xi)(x_\zeta y_\xi-x_\xi y_\zeta),$$

$$\beta_3 = (y_\zeta z_\xi-y_\xi z_\zeta)(y_\eta z_\zeta-y_\zeta z_\eta)+(x_\xi z_\zeta-x_\zeta z_\xi)(x_\zeta z_\eta-x_\eta z_\zeta)+ (x_\zeta y_\xi-x_\xi y_\zeta)\ (x_\eta y_\zeta-x_\zeta y_\eta), \quad (16)$$

Las ecuaciones en diferencias finitas se obtienen de discretizar las ecuaciones transformadas. Todas las derivadas espaciales son reemplazadas por diferencias centradas de segundo orden, mientras que los términos de convección son aproximados por un esquema de tercer orden que puede describirse como (Kawamura *et al.,* 1986);

$$f(\partial u/\partial \xi)_{i,j,k} = (f_{i,j,k})\,(-u_{i+2,j,k}+8(u_{i+1,j,k}-u_{i-1,j,k})+u_{i-2,j,k})\,/12\Delta\xi + |f_{i,j,k}|(u_{i+2,j,k}-$$

$$4u_{i+1,j,k}+6u_{i,j,k}-4u_{i-1,j,k}+u_{i-2,j,k})/4\Delta\xi,$$

donde f es una función arbitraria e (i, j, k) denota el punto de la malla en el espacio transformado (ξ, η, ζ).

$$(\Delta\xi)^3|f|\partial^4 u/\partial\xi^4 .$$

III.2.2. Malla adaptativa

Las mallas se generaron mediante un software especializado llamado CoastGrid. Las entradas a CoastGrid el cual utiliza las coordenadas de las geometrías mencionadas a partir de las cuales el software genera las mallas de cálculo. El tamaño de luz de malla es de aproximadamente 2 metros. Una vez obtenidas las mallas de cálculo, los datos fueron interpolados para finalmente obtener una malla de profundidades con la configuración deseada. Las mallas de profundidades junto con la información de los diferentes forzamientos fueron los datos requeridos para realizar las simulaciones numéricas. La malla adaptada al puerto de Ensenada se presenta (**figura 13**) en donde la barra de color indica la profundidad en metros.

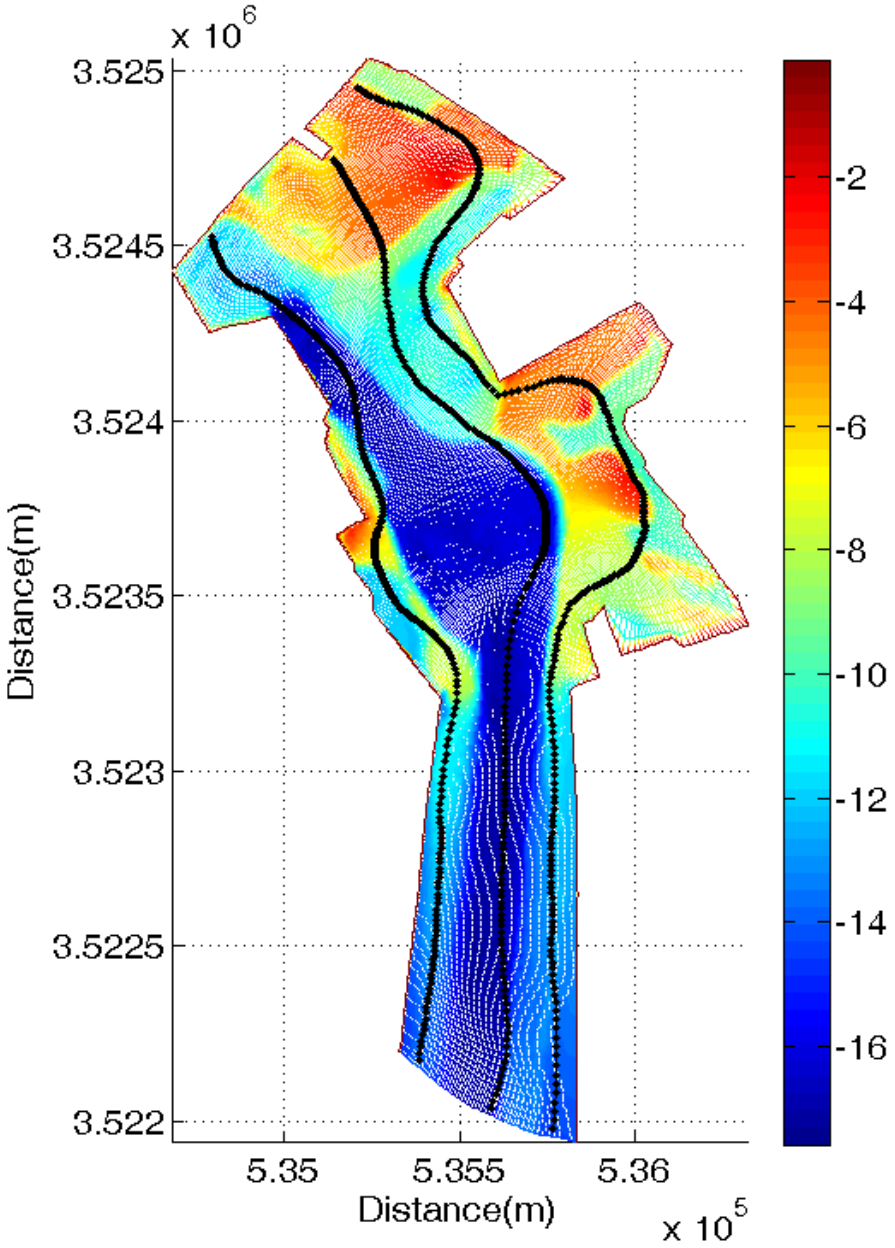


Figura 13. Configuración de la malla curvilínea y batimetría en el puerto de Ensenada.

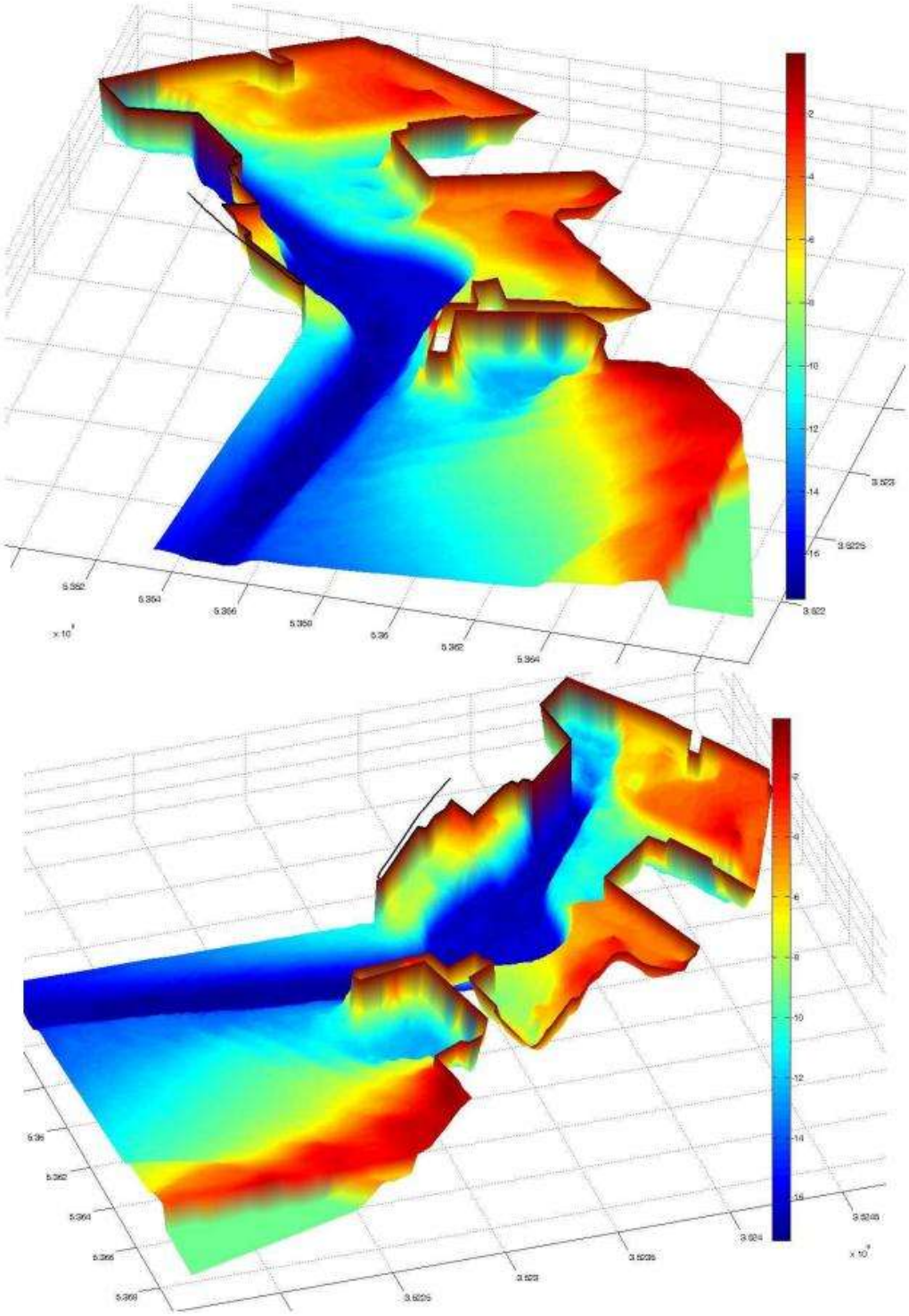


Figura 14. Diferentes vistas 3D del puerto de Ensenada.

Con el modelo de Lee & Raichlen (2D), se utilizó un fondo constante *h*=12 *m* variando la longitud de onda desde 300 hasta 8000 *m* cada 100. De las curvas de máxima amplificación presentadas en la sección de resultados (**figura 17**), se detectaron los modos normales de oscilación para las configuraciones del PE mostradas en la **figura 11**.

En cada simulación, la amplitud y la dirección de incidencia fueron uniformes, mientras que la longitud de onda se varió en 700, 1300 y 4400 *m,* los cuales corresponden a periodos de 64, 120 y 405 *s* respectivamente.

Con el modelo GCOM (3D), primero se hizo una validación con un caso sencillo, probado en una geometría cuadrada cerrada. Una vez hecha la prueba, el modelo se forzó con los periodos de los modos normales de oscilación obtenidos con el modelo de Lee & Raichlen (700, 1300 y 4400 *m*) que corresponden a periodos de (64, 120 y 405 *s*) respectivamente los cuales son presentados en la **tabla II**. Así mismo, se utilizaron ambas configuraciones (actual y prolongación) utilizando un fondo constante para comparar con el modelo (2D), y finalmente se adaptó la batimetría del PE con el cual se obtuvieron las Elevaciones y velocidades asociadas a los modos normales. El Δt adimensional utilizado fue de 0.08.

Por último, para un caso real, se utilizó GCOM con una combinación de forzamientos utilizando 4 componentes (15, 60, 120 y 360 *s*) las cuales fueron extraídas del análisis espectral, (**figura 10**).

Tabla II. La amplitud, periodos y longitudes de onda correspondientes a los forzamientos externos utilizados en GCOM.

Amplitud: 1	
Periodo (*s*)	Longitud de onda (*m*)
64	700
120	1300
405	4400

El orden en el que se mostrarán los resultados es el siguiente:

Como primer resultado se muestra la validación del modelo GCOM en una geometría sencilla, luego se presentan los factores de amplificación en curvas que representan diferentes zonas en el interior del PE en un amplio rango de longitudes de onda, posteriormente se plantean las comparaciones entre los modelos GCOM y Lee & Raichlen utilizando profundidad constante con ambas geometrías (actual y prolongación) y se analiza el efecto de la prolongación del rompeolas principal del PE, después se muestra el efecto del fondo marino en los modos normales de oscilación utilizando las dos configuraciones y las velocidades asociadas a los modos normales de oscilación utilizando fondo variable. Por último

se muestra un caso real (tormenta), utilizando una combinación de forzamientos con 4 componentes (15, 60, 120 y 360 *s*), las cuales fueron extraídas del análisis espectral.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. Validación del Modelo GCOM

Este ejercicio de validación numérica es usado con frecuencia como validación de modelos bidimensionales de propagación transitoria (Kirby *et al.,* 1998). Generalmente se utiliza para evaluar posibles errores numéricos antes de correr el modelo ya que para este tipo de ejercicios ya existen soluciones conocidas.

El dominio computacional considerado es un cuadrado de 6 x 6 m de área, una profundidad constante de *h*= 0.5 *m* y paredes 100 % reflejantes (**figura 15**).

Como condición inicial de superficie libre, se considera un cono Gaussiano en el instante t=0 s, que se libera al inicio de la simulación como único forzamiento para todo el tiempo cuya ecuación es la siguiente:

$$\eta_0 = 0.045\, e^{-2[x2 + x2]}$$

Debido a la gravedad, la superficie se propaga desde el centro hacia el contorno rectangular para posteriormente reflejarse y moverse hacia el punto central, repitiéndose este ciclo indefinidamente.

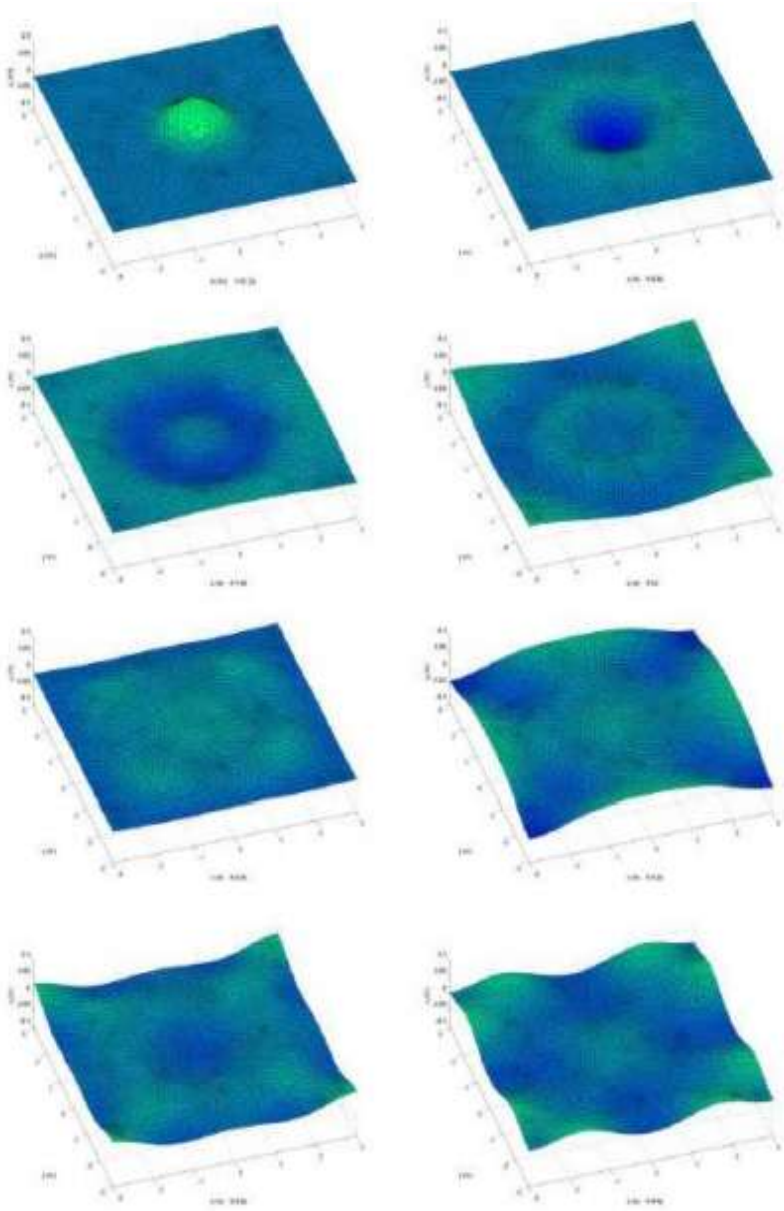


Figura 14. Superficie libre en 3D utilizando MANOLO en los tiempos t= 0, t= 2, t= 4, t= 6, t= 8, t= 10, t= 12, t= 14, (Simulaciones realizadas por Díaz (2006)).

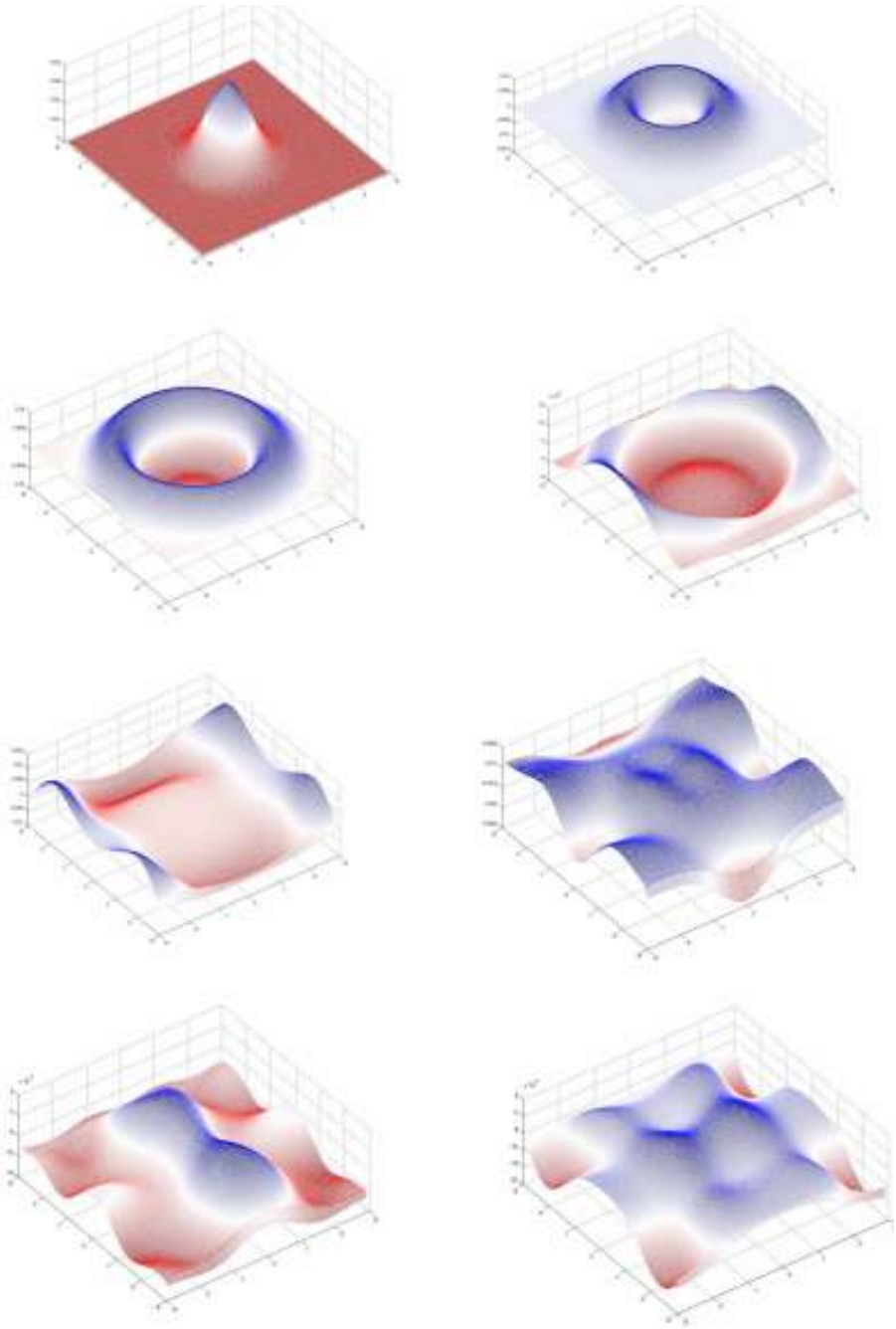


Figura 15. Validación del modelo GCOM probado en una geometría cuadrada cerrada de superficie libre 3D en los tiempos t= 0, t= 2, t= 4, t= 6, t= 8, t= 10, t= 12, t= 14. Comparación con (Díaz, 2006) utilizando el modelo (MANOLO)

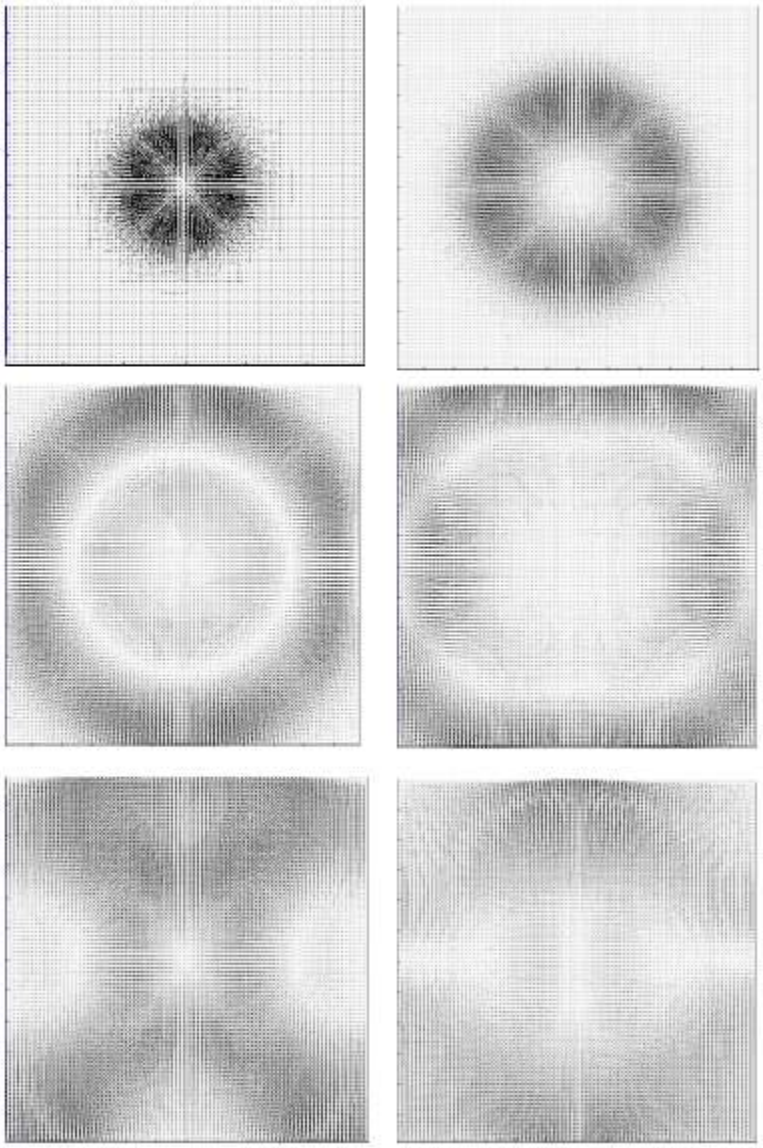
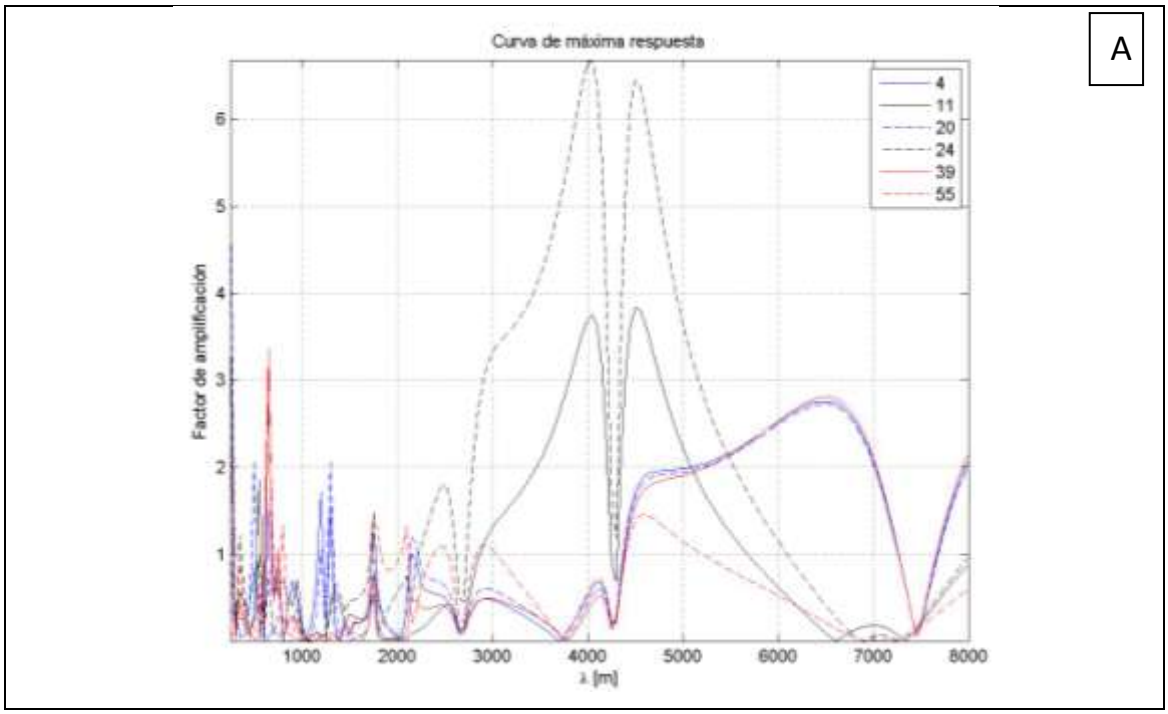


Figura 16. Velocidades asociadas a los cambios de elevación en la validación del modelo GCOM.

IV.2. Modelo de Lee & Raichlen (1971)

IV.2.1. Curvas de máxima respuesta

La **figura 17** (panel A) representa las curvas de máxima amplificación en diferentes puntos en el interior de la rada portuaria en el cual se detectaron los modos normales de oscilación. El máximo modo normal, corresponde a una longitud de onda de 4000 *m*, sin embargo, esta longitud de onda solo amplifica en dos puntos que corresponden a la misma zona (Marina de Yates ó Cruiseportvillage), mientras que el segundo modo más grande corresponde a una longitud de onda de 4400 *m* cuyo periodo es de 405 *s* la cual representa un riesgo más grande que el causado por el máximo modo normal para el PE debido a que esta longitud de onda resuena en distintas zonas como (Marina de Yates ó Cruiseportvillage, Andador Turístico, astilleros, y Base Naval) siendo estas las zonas más vulnerables por el tipo de embarcaciones y tránsito presente en esa zona.



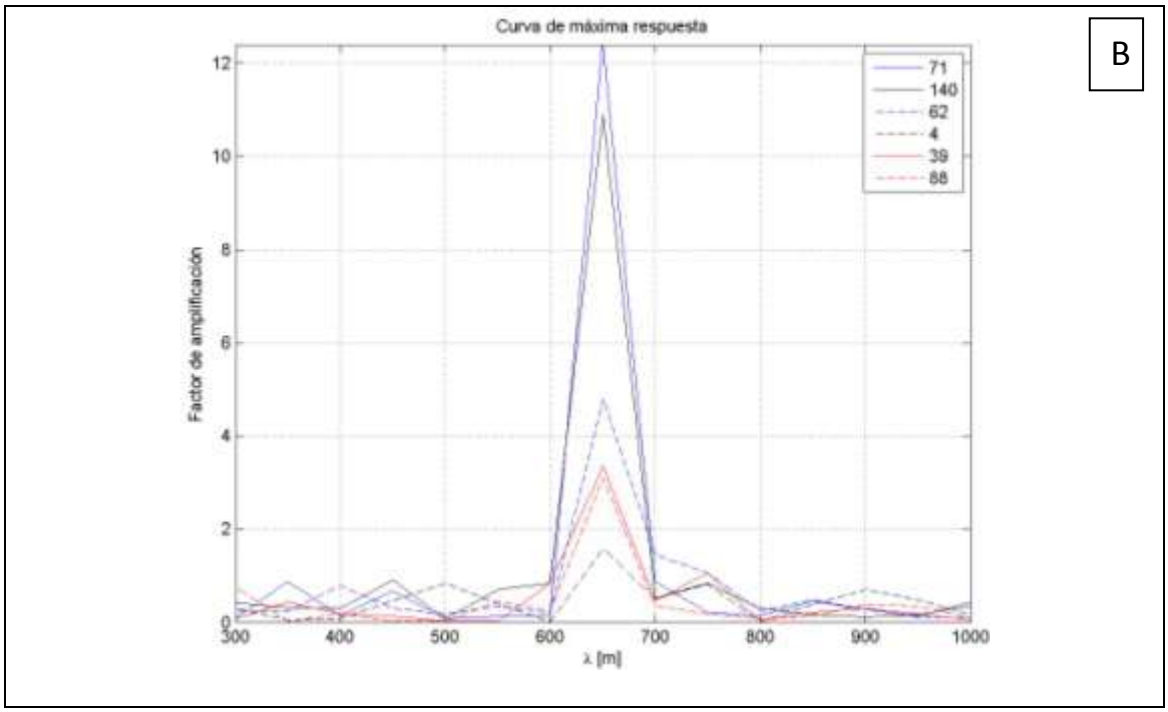


Figura 17. Curva de máxima respuesta a diferentes longitudes de onda incidentes en distintos zonas dentro del PE, el panel 1 representa longitudes de onda de 300 a 8000 metros en las zonas (4,11,20,24,39,55), el panel 2 muestra longitudes de onda de 300 a 1000 metros en las zonas (71, 140, 62, 4, 39 y 88).

IV.3. Factores de amplificación (Lee) y Elevaciones (GCOM)

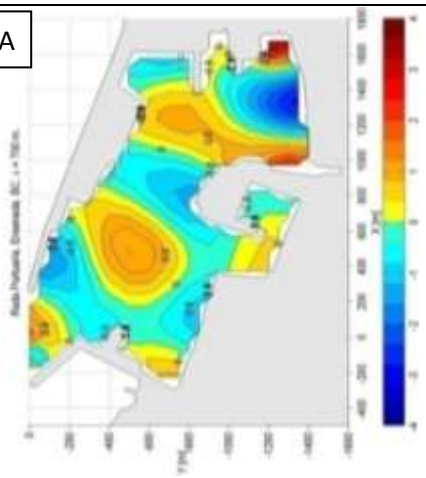
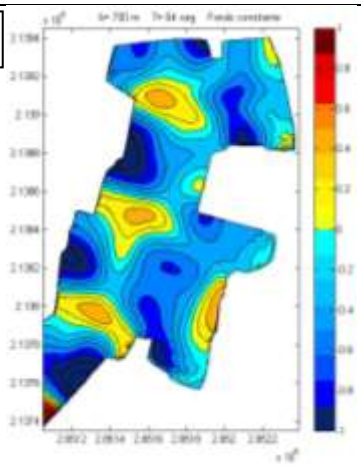
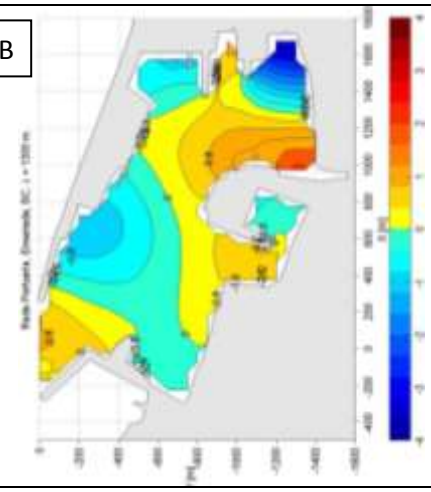
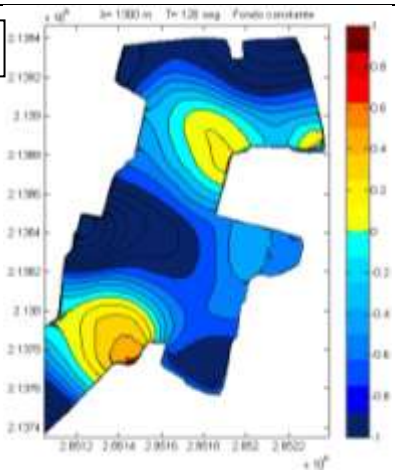
Así mismo, en la (**figura 18** A), se observa un incremento en la amplitud y probablemente sea debido que la longitud del Andador Turístico es de aproximadamente 700 metros provocando que una onda con una longitud de 700 metros correspondiente a un periodo de 64 *s* al entrar en contacto con esta zona, generará oscilaciones no deseadas en la parte norte del puerto.

Al igual que lo observado en la (**figura 18** A), se puede apreciar que las mayor amplificaciones se encuentran en la zona de Andador Turístico al incidir con una onda con un periodo de 120 *s* cuya longitud de onda es de 1300 metros, donde los antinodos de este modo normal de oscilación se encuentran en los costados de

esta zona, uno cercano a la Zona de Cruceros con un factor de amplificación de aproximadamente 2, mientras que el otro antinodo se encuentra en los muelles y astilleros cuyo factor de amplificación asociado es de aproximadamente -3, es decir, tres veces el tamaño de la amplitud incidente (**figura 18** B).

Un escenario diferente al de los modos (T = 64, 120) mostrado en la **figura 18** (A, B) respectivamente se muestra en la (**figura 18** C), en el que un periodo de 405 segundos cuya longitud de onda es de 4400 metros al incidir con estas características hacia el interior del PE, generará amplificaciones de hasta 4 veces la amplitud incidente en la zona de Marina de Yates (Cruiseportvillage). Este modo normal de oscilación a diferencia de los primeros dos (64,120 *s*) cuyas longitudes de onda son de 700 y 1300 metros no penetra completamente la rada portuaria, ya que la distancia más larga dentro del PE es de aproximadamente 2 *km*. La amplificación ocurrida en esa zona puede ser atribuida a lo angosto de la entrada de la Marina de Yates comparado con la longitud de onda del modo normal de 405 *s* (4400 *m*), ese fenómeno es de esperarse debido a que es una limitación de este modelo y se le conoce como “paradoja de la cuenca”.

CONFIGURACION ACTUAL (FONDO CONSTANTE)

	Modelo de Lee	GCOM
T = 64s	A 	D 
T = 120s	B 	E 

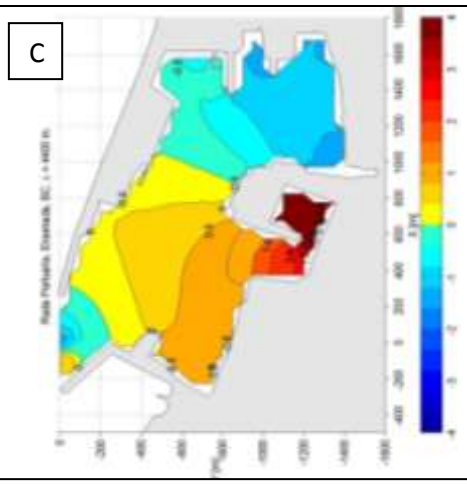
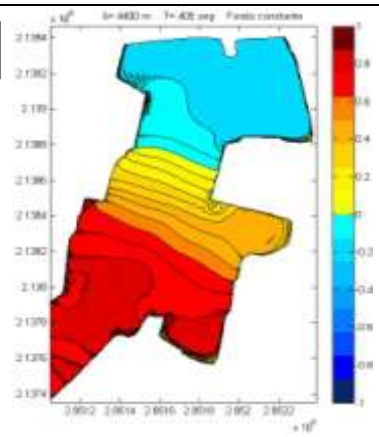
T = 405s		

Figura 18. Comparación de modelos en respuesta a diferentes ondas incidentes (64,120 y 405 s) en el PE utilizando la geometría actual. Los paneles (A,B y C) representan los resultados del modelo de Lee &Raichlen, y los paneles (D,E y F) representan los resultados obtenidos con GCOM.

es de 780 metros, brinda mejores condiciones que la configuración actual ya que sin la prolongación se tienen modos resonantes importantes a T= 64 y 120 *s* respectivamente, correspondientes longitudes de onda de 700 y 1300 respectivamente, que con la prolongación del rompeolas principal estos modos resonantes se ven reducidos notablemente en el factor de amplificación, **figura 19** (A y B).

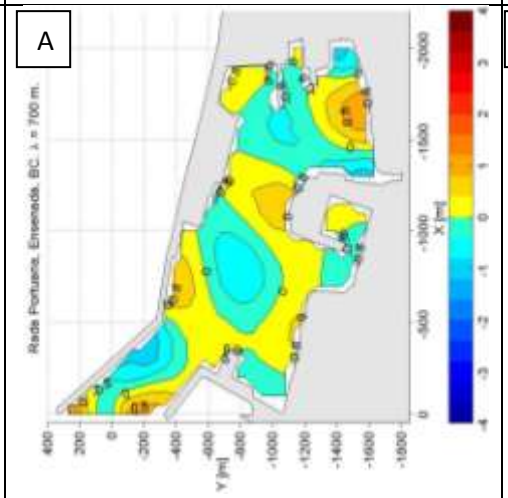
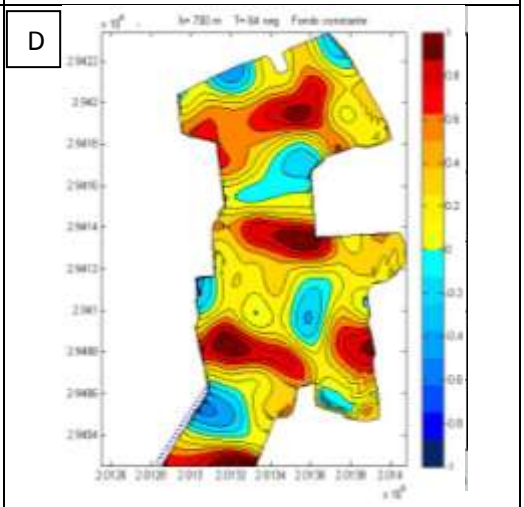
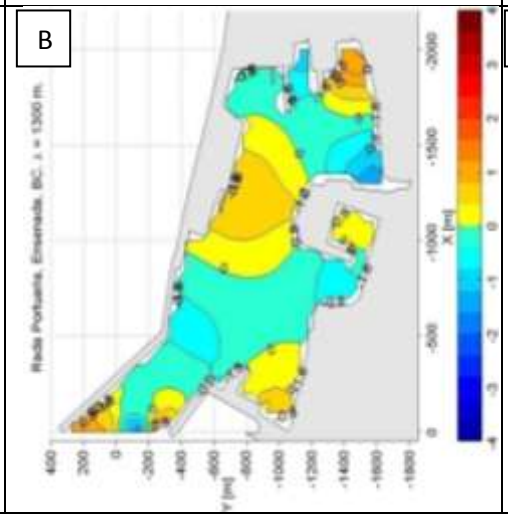
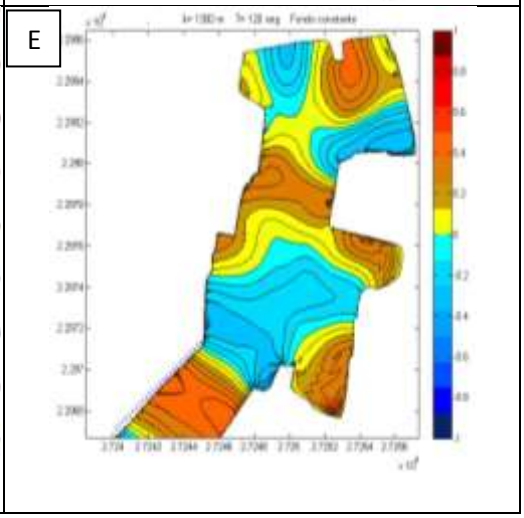
En cuanto al modo (405 *s*) correspondiente a una longitud de onda de 4400 metros cuya configuración del PE se plantea una prolongación en el rompeolas principal de 780 metros orientado hacia el exterior del puerto paralelo al canal de navegación en la entrada, los resultados muestran una distribución del factor de amplificación similar a lo obtenido con la configuración actual, sin embargo, se puede observar que en la zona más afectada por este nodo (Marina de Yates o Cruiseport village), el factor de amplificación se ve disminuido al presentar un valor

máximo en esa zona de aproximadamente -3, mientras que con la configuración actual se alcanza un factor de amplificación de 4 (**Figura 19** C).

Se puede observar el comportamiento que factor de amplificación se ve modificado positivamente en los periodos 64 y 120 *s* correspondientes a longitudes de onda de 700 a 1300 metros, es decir, se ve reducida la amplitud en la rada con la introducción del rompeolas, evitando problemas de maniobrabilidad en el interior y operación de embarcaciones dentro de la rada en el caso de que una onda con esas dimensiones lograra penetrar al recinto portuario, similar a lo encontrado por Lee J. J., *et al* (1998), donde utilizan un modelo numérico para obtener los modos normales de oscilación de un puerto, planteando una configuración actual y otra con una construcción de un rompeolas en la entrada, observando una similitud en la disminución del factor de amplificación con la introducción del rompeolas aproximadamente para los mismos periodos. (**Figura 19**, A, B y C)

Los resultados obtenidos con GCOM utilizando los mismos periodos resonantes utilizados con el modelo Lee & Raichlen, muestran un acuerdo en cada uno de los periodos con los que se forzó (64, 120 y 405 *s*) correspondientes a longitudes de onda (700,1300 y 4400) respectivamente, se puede observar que los nodos y los antinodos asociados coinciden en las mismas zonas de mayor amplificación **figuras 18** (D, E y F) **y 19** (D, E y F).

CONFIGURACION CON EXTENSION (FONDO CONSTANTE)

	Modelo de Lee	GCOM
T = 64s	A 	D 
T = 120s	B 	E 

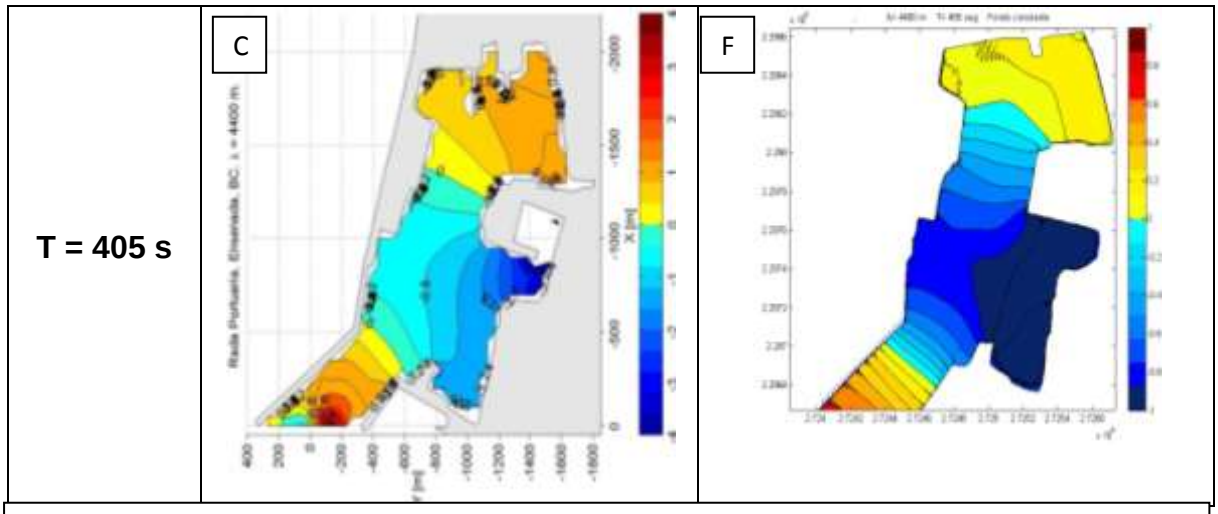


Figura 19. Comparación de modelos en respuesta a diferentes ondas incidentes (64,120 y 405 s) en el PE utilizando una geometría con una modificación en el rompeolas principal de 780 m. Los paneles (A,B y C) representan los resultados del modelo de Lee & Raichlen, y los paneles (D,E y F) muestran los resultados obtenidos con GCOM.

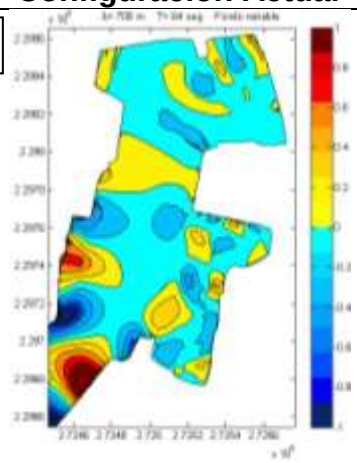
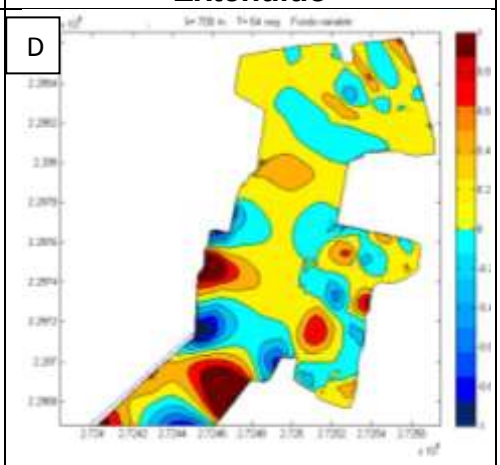
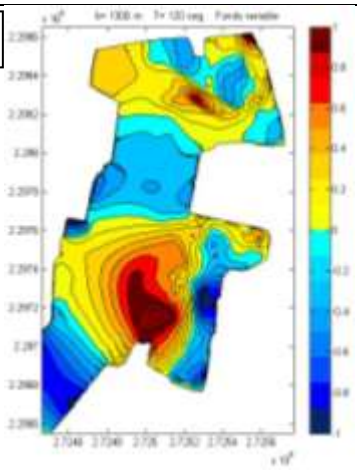
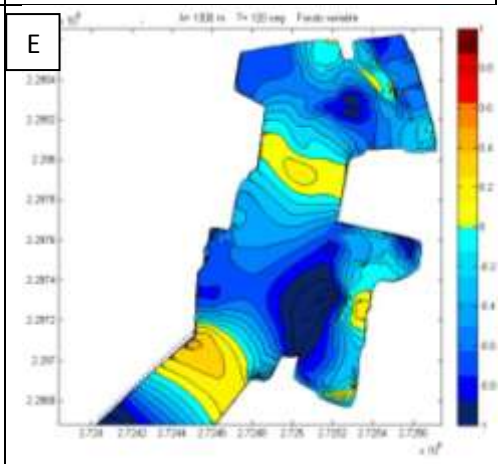
la batimetría del puerto a la configuración actual con la finalidad de analizar el efecto del fondo en los modos resonantes. Se obtiene la respuesta de la rada portuaria utilizando los mismos periodos utilizados con el modelo de Lee & Raichlen.

Al igual que en el modelo de Lee & Raichlen, con el modelo GCOM utilizando una profundidad constante y forzando con una onda de periodo de 64 segundos, se observan oscilaciones importantes en la parte norte de la rada portuaria, sin embargo, las amplificaciones se desplazan hacia la parte noroeste de la rada (muelles pesqueros) donde se observa un 70% de amplitud de la onda incidente aproximadamente en ese punto, mientras que en el modelo de Lee & Raichlen las oscilaciones ocurren en la parte noreste donde se encuentra el Andador Turístico, esto podría atribuirse a la línea de costa, ya que con el modelo GCOM no se

tomaron en cuenta algunas estructuras como los muelles pesqueros y astilleros, resultando en una diferencia en la posición de los nodos y antinodos (**figura 20** A).

Cabe destacar que la batimetría tiene un efecto importante. Para el periodo de T=405 *s* cuya longitud de onda corresponde a 4400 metros. En cuanto al nodo ubicado en la entrada de la rada se mantiene para ambos escenarios, mientras que con profundidad constante cercano al morro del rompeolas principal se alcanza una elevación de aproximadamente 0.5 , y con profundidad variable se alcanza el doble de lo observado en el caso de profundidad constante. Así mismo en el resto de las diferentes zonas del puerto se observa una disminución en la amplitud con excepción de la zona de contenedores, la cual registra amplitudes de aproximadamente 0.60 (**figura 20** C).

Un caso distinto se presenta en la **figura 20** (B), en la cual se observa un efecto negativo producido por la batimetría, en la que los nodos parecieran no haberse desplazado significativamente, sin embargo, algo importante ocurre con los antinodos, debido a que la elevación incrementa aproximadamente el doble en el antinodo ubicado frente a un espolón orientado hacia el interior del puerto. En cuanto a la respuesta del puerto con profundidad constante, ambos modelos son muy similares, mostrando puntos de amplificación y puntos nodales aproximadamente en las mismas zonas.

	Configuracion Actual	Extendido
T = 64s	A 	D 
T = 120s	B 	E 

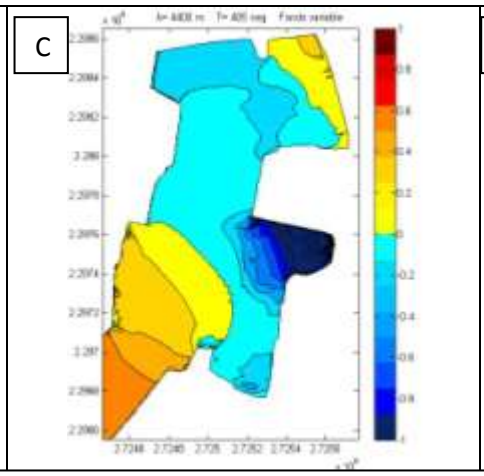
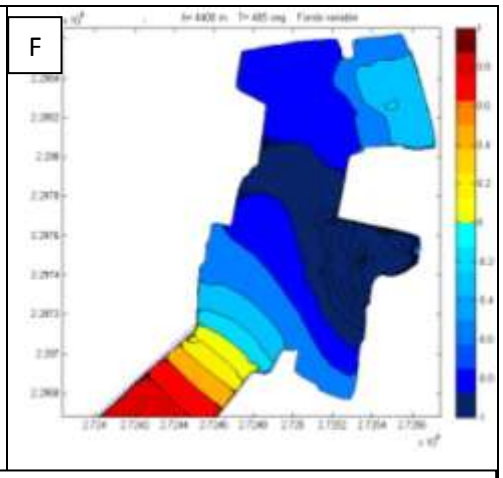
T = 405s		

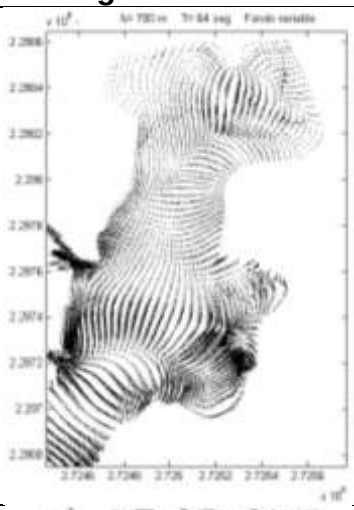
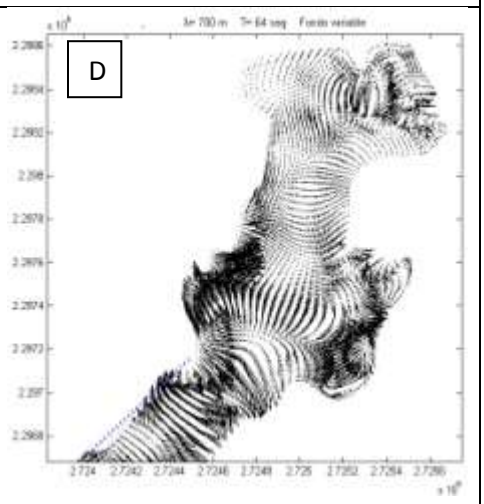
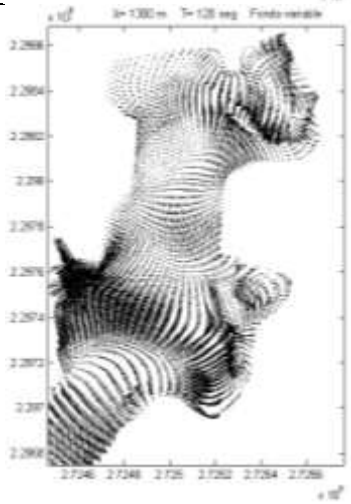
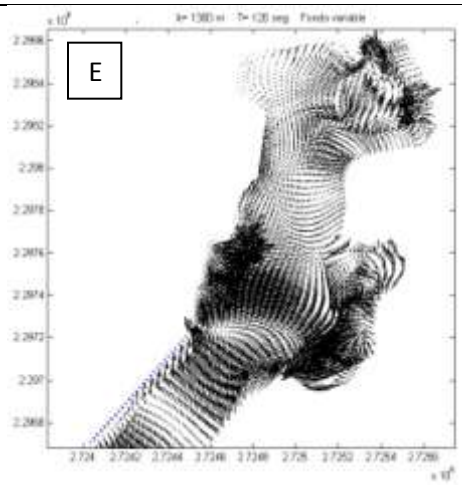
Figura 20. Efecto del fondo marino a diferentes ondas incidentes (64,120 y 405 s) en el PE. Los paneles (A,B y C) representan el PE con geometría actual, y los paneles (D,E y F) la geometría con una prolongación en el rompeolas principal de 780 m.

Así mismo, para el modo normal de oscilación presentado al incidir una onda cuya periodo es de 64 *s* y corresponde a una longitud de onda de 700 metros y cuyas Elevaciones máximas alcanzadas fueron de 1, es decir, el 100% de la amplitud de la onda incidente, se encontró la velocidad máxima de las corrientes asociadas a las cooscilaciones del modo normal de oscilación las cuales se presentan en zonas como la entrada del puerto y Segunda Región Naval donde la magnitud de la velocidad encontrada fue de 0.36 *m/s*, (**figura 21** A).

En la **figura 21** (B), se muestran las velocidades asociadas al modo normal de oscilación para un periodo T= 120 *s* y longitud de onda λ = 1300 *m*, donde se observa algo muy similar que en lo encontrado con un el modo normal de oscilación de T= 64 *s*, ya que tanto las velocidades asociadas a los modos normales son muy similares, así como la velocidad máxima asociada fue de 0.35 *m/s*. Sin embargo, cabe destacar que este periodo generará una zona de de

remolinos en la parte norte del puerto (Andador Turístico), esto podría traer problemas a embarcaciones atracadas, así como a los muelles cercanos esta zona.

Se observó que al incrementar la longitud de onda y por lo tanto un periodo más largo, aumenta la elevación de la superficie libre, similar lo obtenido con el modelo de (Lee & Raichlen, 1971), ya que las mayores amplificaciones en ambos modelos corresponden a la mismas zonas. En cuanto a las corrientes asociadas a las cooscilaciones del modo normal de oscilación T = 405 *s* (fueron casi el doble que las de los modos T=64,120, con una velocidad máxima 0.59 m/s, que al igual que las anteriores, este modo normal se encuentra cercano a la Marina de Yates (CruiseportVillage) y a la Zona de Cruceros, pudiendo provocar dificultades en el trafico de embarcaciones, (**figura 21** C).

	Configuracion Actual	Extendido
T = 64s	A 	D 
T = 120s	B 	E 

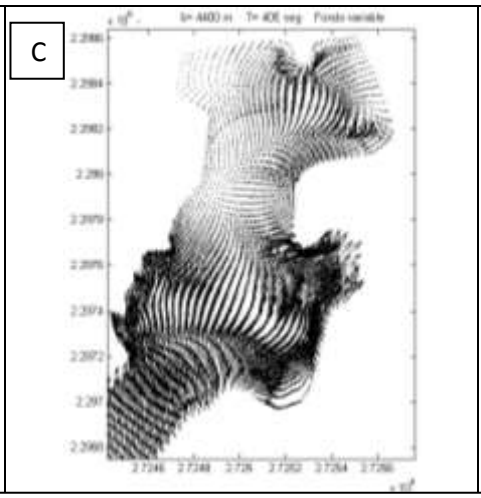
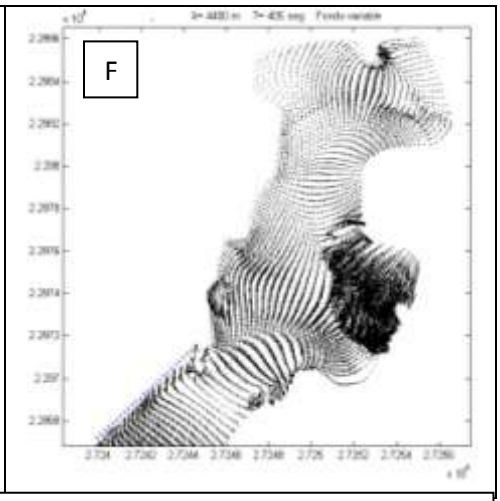
T = 405s		

Figura 21. Velocidades asociadas a los modos normales de oscilación (64,120 y 405 s) en el PE. Los paneles (A,B y C) representan las corrientes asociadas enel PE con geometría actual, y los paneles (D,E y F) las corrientes asociadas a los modos con geometría con una prolongación en el rompeolas principal de 780 m.

L r
T s

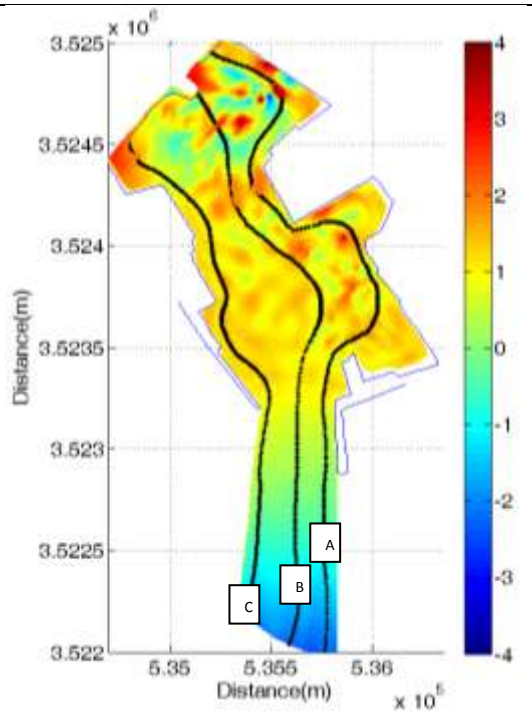
autores utilizan diferentes ángulos de incidencia mientras que en este trabajo el ángulo de incidencia es normal. Además, ambos autores utilizan periodos de onda corta (oleaje) mientras que en este trabajo se utilizaron ondas largas, es decir, los modos normales de oscilación del puerto de Ensenada. Sin embargo, si coincide en un efecto de amplificación en la entrada del puerto causado probablemente por reflexión de la onda por el espigón de Amaya Curiel y un espolón en la entrada ubicado hacia el interior del PE.

Una de las limitaciones del modelo basado en la teoría de Lee & Raichlen (1971), es trabajar con una profundidad constante y el no considerar la viscosidad. Sin embargo es una buena aproximación para obtener la respuesta del puerto a diferentes ondas incidentes.

Una de las ventajas de utilizar el modelo GCOM es el considerar la interacción entre diferentes variables, es decir, es un modelo no lineal que se asemeja más a la realidad. Así mismo, este es capaz de utilizar mallas adaptadas a la topografía submarina.

IV.6. Evento de tormenta

La **figura 22** representa la respuesta del PE a un evento de tormenta utilizando 4 componentes (15, 60, 120 y 360 *s*), en la cual se puede observar dos escenarios, el escenario uno (panel A) muestra la respuesta del PE en el valle del frente de ondas el que se observa una distribución uniforme de elevaciones y donde las máximas elevaciones ocurren en la zona norte, mientras que en el panel (B) cuando se tiene la cresta, las Elevaciones se concentran en una zona del PE (Andador Turístico) a excepción de la Base naval, esas oscilaciones se podrían atribuir al efecto de la batimetría y a las longitudes de ondas de onda de sus componentes similares a las de las dimensiones de esa zona (Andador Turístico).


I
x 10^6
3.525
3.5245
3.524
3.5235
3.523
3.5225
3.522
Distance(m)
5.35
5.355
5.36
Distance(m)
x 10^5
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
A
B
C

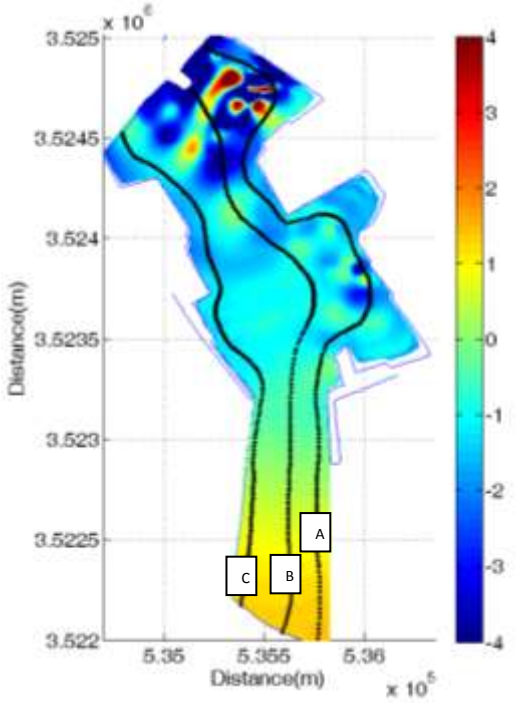


Figura 22. Elevaciones de la superficie de una (tormenta). El panel A muestra las elevaciones en el valle del frente de ondas y el B representa las elevaciones en la cresta del frente de ondas.

zona norte del PE (Andador turístico). Ese incremento en la velocidad está asociado a la máxima elevación generada en esa zona, la velocidad máxima asociada fue de aproximadamente 1.14 *m/s*. El panel (II) muestra las velocidades asociadas al valle del frente de ondas y se puede observar que las velocidades son menores a las encontradas cuando se tiene la cresta. La velocidad máxima asociada a la máxima elevación fue de 0.78 *m/s.*

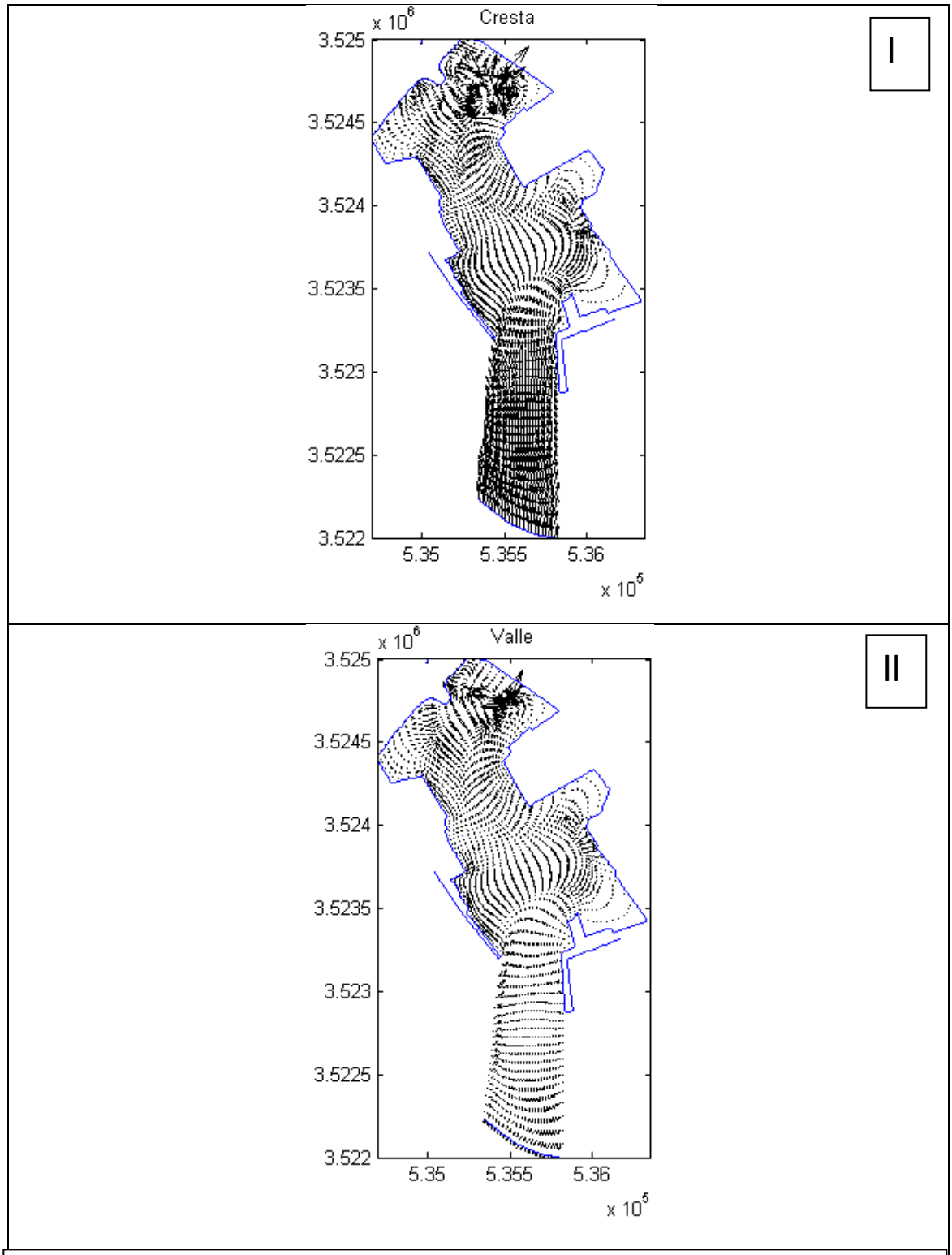


Figura 23. Velocidades asociadas a la tormenta. El panel I muestra las velocidades asociadas a los cambios de nivel del mar en la cresta del frente de ondas y el II representa las velocidades en el valle de la cresta.

B

Las curvas de máxima respuesta son mostradas en la **figura 24,** las cuales representan la elevación en cada línea (A, B y C) que recorren la rada portuaria abarcando las diferentes zonas en el interior. En el momento del valle de la onda, la máxima elevación registrada se ubica en la zona norte del puerto cercano a la zona de Andador Turístico con una elevación de aproximadamente 3 m, al igual que en la anterior, cuando se tiene la cresta de la onda, la máxima elevación se registra en la zona de Andador Turístico, sin embargo esta presenta una elevación de casi aproximadamente 9 m. Cabe destacar que esa zona (Andador turístico) es muy vulnerable ya que la mayoría de las oscilaciones no deseadas ocurren en esa zona, sin embargo, es de esperarse debido a que las componentes utilizadas en el forzamiento son muy similares a las de los modos normales de oscilación del puerto.

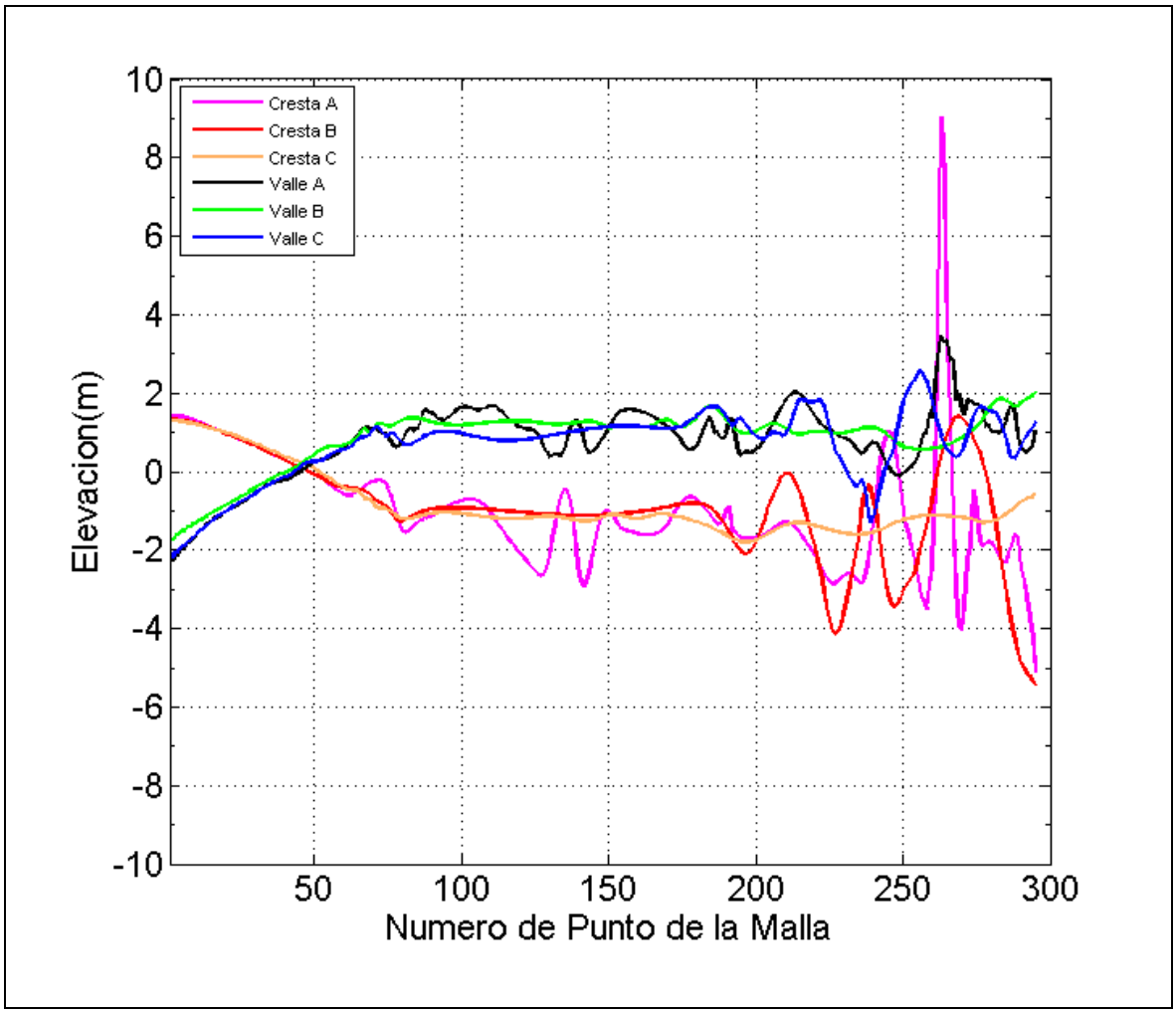


Figura 24. Curva de máxima respuesta utilizando las 4 componentes (15, 60, 120 y 360 *s*) en la cresta y valle del frente de ondas, donde A representa una línea que recorre la zona Este del puerto (Base Naval, Marina de Yates, Zona de Cruceros y Andador Turístico), B representa la línea que atraviesa el puerto de Sur a Norte y C la línea que representa la zona Oeste del puerto (Zona de contenedores).

V. Conclusiones

V.1. Modelo de Lee & Raichlen

Se encontró que las zonas como el muelle turístico, la Marina de Yates (CruiseportVillage) y la entrada del puerto, fueron las localidades que presentaron mayores amplificaciones.

La configuración con la prolongación en el rompeolas principal brinda mejores condiciones que la configuración actual en los modos normales de oscilación.

Se encontraron los modos normales de oscilación del puerto de Ensenada, B.C. a los 500, 650, 700, 1300 y 4400 metros de longitud de onda cuyos periodos son 46, 60, 120 y 405 *s*, respectivamente.

Con el modelo de Lee & Raichlen, no se pudieron estudiar longitudes de onda menores a 400 metros debido a que Lee & Raichlen (1971), recomiendan no utilizar longitudes de onda menores a 9 Δs.

V. Conclusiones

V.2. GCOM

Se encontraron las velocidades máximas de las corrientes asociadas a los modos normales de oscilación las cuales fueron 0.36, 0.35 y 0.59 m/s que corresponden a los periodos resonantes 64, 120 y 405 s.

Ambos modelos coinciden en zonas de mayor amplificación y puntos nodales.

Los resultados obtenidos con el modelo GCOM son más cercanos a la realidad, ya que utiliza una batimetría reciente de la zona y considera la interacción entre las diferentes variables del modelo, además, se pudieron analizar longitudes de onda menores a 300 *m.*

El fondo marino juega un papel importante en los modos normales de oscilación.

Referencias

Bellotti, G. 2006.Transient response of harbours to long waves under resonance conditions. Dipartimento di Scienze dell' Ingegneria Civile (DSIC), Università di Roma Tre, via Vito Volterra 62, 00146, Rome, Italy.

Cortínez, V.H., Stoklas, C.I. y Domínguez, P.N., 2014. Diseño óptimo de estructuras portuarias para atenuar efectos resonantes por ondas largas.

Díaz, D. G. 2006. Análisis de resonancia portuaria: Generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.

FlowScience Inc. 2008. Flow-3D User Manual, Version 9.3.1. http://www.flow3d.com.Consulta: Abril 2014.

Geomar Consultores, S.C. Ampliación del rompeolas del Puerto de Ensenada, Baja California. Manifiesto de Impacto Ambiental Modalidad Particular. Noviembre del 2014.

Hernández-Walls. R y Barradas, A., 2003 Estudio de los modos resonantes y su comportamiento direccional para las bahías de Manzanillo-Santiago, Col., México.

Hirt, C. y Nichols, B. 1981.Volume of Fluid (VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics., 39, 201-225.

Lee J.J., Lai C.P. and LiY.1998. Application of computer modeling for harbor resonance studies of Long Beach & Los Angeles harbor basins. Coastal Engineering.

Lee, J.J. y Raichlen, F. 1971.Wave induced oscillations in harbor with connected basins. Report No. KH-R-26.

Lee, J.J. 1969. Wave induced oscillations in harborsof arbitrary shape. Report No. KH-R-20.

Miles, J. and Munk, W. 1961. Harbor Paradox, Jour. Waterways and Harbors Div., Proc. ASCE, Vol 87, No WW3.

Ortiz-Figueroa M., 2009 “Agitación por oleaje en el puerto de Ensenada Baja California: México medidas de atenuación”. Ensenada Baja California, CP 22860, México.

Rabinovich A.B., 2009. Seiches and Harbor Oscillations. Handbook of Coastal and Ocean Engineering (edited by Y.C. Kim), World Scientific Publ., Singapoure.Chapter 9.

Rodríguez-Pérez, C. (1996). Análisis numérico de oscilaciones inducidas en la Bahía de Todos Santos. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México.

Torres-Freyermuth, A. (2012). “Transformación de onda infragravitatoria en medios marinos no-homogéneos”, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México, D.F., 01/12.

Torres-Navarrete C.R., 2010. “Corrientes y agitación por oleaje en el puerto de Ensenada y terminal marítima Amaya Curiel”. Reporte técnico. Ensenada, B.C. 5 de agosto 2010

Torres-Navarrete C.R., Martínez-Díaz de León A., Delgado O.E., 2012. “Olas y corrientes en el puerto de Ensenada, Baja California, México”. A.P. 453, C.P. 22800, Ensenada, B.C. México.

Ulloa-Torres, M.J. (1989). Refracción lineal del oleaje en el puerto de Ensenada. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California., Ensenada, Baja California, México.

Fuentes

http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioEnsenada.pdf