



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales  
y Puertos.*

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# MODELO NUMÉRICO PARA EL ESTUDIO DE AGITACIÓN EN EL PUERTO DE SAN ANDRÉS Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.

Trabajo realizado por:

*Andrea Gema Serrano Campo*

Dirigido:

*Gabriel Díaz Hernández*

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería  
de Caminos, Canales y Puertos**

Santander, Junio de 2018

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**



*A mis padres y mi hermano David*

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "ANDREA" con un trazo decorativo final.

Fdo: Andrea Gema Serrano Campo

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	8
1.1.	ANTECEDENTES.....	8
1.2.	OBJETIVOS.....	8
1.3.	TRABAJOS REALIZADOS.....	9
1.4.	INFORMACIÓN UTILIZADA .....	10
1.5.	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO .....	10
2.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	11
2.1.	LOCALIZACIÓN Y MORFOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	11
2.2.	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA OBRA PORTUARIA OBJETO DE ESTUDIO	13
3.	ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO .....	14
3.1.	OLEAJE FRENTE A LA COSTA DE SAN ANDRÉS .....	14
3.1.1	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLEAJE .....	19
3.2.	OLEAJE EN EL INTERIOR DEL PUERTO .....	26
4.	DESCRIPCIÓN OPERATIVA DEL PUERTO DEPORTIVO PROPUESTO: ESTADO ACTUAL ..	27
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE TRANSFERENCIA DEL OLEAJE AL INTERIOR DEL PUERTO.....	27
4.2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO .....	30
4.2.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MSP.....	30
4.2.2	DISEÑO DE LAS MALLAS NUMÉRICAS.....	34
4.2.3	DESCRIPCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE REFLEXIÓN.....	36
4.2.4	APLICACIÓN DEL PROGRAMA MSP: ESTADO ACTUAL.....	38
4.2.5	ANÁLISIS DE OPERATIVIDAD. GEOMETRÍA ACTUAL: ALTERNATIVA 0.....	44
5.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA AGITACIÓN .....	56
5.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS.....	57
5.1.1	ALTERNATIVA 1.....	57
5.1.2	ALTERNATIVA 2.....	63
5.1.3	ALTERNATIVA 3.....	69
5.2.	REQUERIMIENTOS DE OPERATIVIDAD.....	74
5.2.1	OPERATIVIDAD MÍNIMA.....	75
5.2.2	NÚMERO MEDIO DE PARADAS.....	75
5.3.	ANÁLISIS DE OPERATIVIDAD DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS .....	79
5.3.1	DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO OPERATIVO PARA LA ALTERNATIVA ELEGIDA .....	82



6. ESTRATEGIAS DE MEJORA A LA ALTERNATIVA ELEGIDA .....	83
7. CONCLUSIONES GENERALES.....	84
8. ANEXO: CÓDIGOS DE MATLAB .....	86
9. BIBLIOGRAFÍA .....	100
RESUMEN.....	101
ABSTRACT .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Localización de la zona de estudio .....	11
Ilustración 2 Localización de San Andrés en la isla de Tenerife .....	11
Ilustración 3 Obras de protección del frente litoral de San Andrés, playa de las Teresitas (polígono verde) .....	11
Ilustración 4 Batimetría de detalle de la zona de estudio antes de la construcción de las obras de protección.....	12
Ilustración 5. Vista en planta del Puerto deportivo de San Andrés. Plano aportado por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife. ....	13
Ilustración 6. Localización de los datos de oleaje. Contorno verde: nuevas obras del frente litoral de San Andrés. Contorno magenta: futuro puerto deportivo de San Andrés. ....	15
Ilustración 7. Validación del DOW 1.1 con la boya de Tenerife de la red Costera del OPPE (año 2001).....	17
Ilustración 8. Validación del DOW 1.1 con la boya de Tenerife de la red Costera del OPPE (año 2006).....	18
Ilustración 9. Validación del DOW 1.1 con la boya de Tenerife de la red Costera del OPPE. ....	18
Ilustración 10. Rosa de Hs y Tp frente a San Andrés. ....	20
Ilustración 11. Serie histórica de Hs y Tp (izquierda); función de distribución acumulada de Hs y Tp (derecha). Hs arriba, Tp abajo.....	21
Ilustración 12. Distribución conjunta Hs-Tp en el punto dow analizado .....	22
Ilustración 13. Régimen medio direccional y escalar de Hs y Tp frente a San Andrés.....	23
Ilustración 14. Régimen extremal direccional y escalar de Hs frente a San Andrés. ....	25
Ilustración 15. Estados de mar representativos (300) en el punto DOW 1.1 analizado en el apartado 3.1.....	28
Ilustración 16. Cubo con los estados de mar representativos (300) en el punto DOW 1.1. ....	29
Ilustración 17. Coeficientes de reflexión modificados e interpolados.....	37
Ilustración 18. Coeficientes de reflexión en el contradique vertical sur.....	37
Ilustración 19. Coeficientes de reflexión en el dique exento vertical en forma de arco ..	38
Ilustración 20. Ventana ejecutable del programa MSP.....	39
Ilustración 21. Definición del contorno portuario.....	39
Ilustración 22. Coeficientes de reflexión .....	40
Ilustración 23. Pantalla MS-DOS ejecutando malla MEF.....	40
Ilustración 24. Ejecución de los 300 estados de mar seleccionados.....	41
Ilustración 25. Ejemplo de mapa de altura de ola.....	42
Ilustración 26. Ventana para exportar resultados a puntos de control .....	43
Ilustración 27. Script de MATLAB para obtener serie reconstruida en el interior del puerto .....	43
Ilustración 28. Alternativa 0. Configuración inicial del puerto (color gris) y obras de protección frente a la costa de San Andrés (color naranja).....	44
Ilustración 29. Estado actual, batimetría.....	45
Ilustración 30. Contorno dominio numérico, estado actual .....	46
Ilustración 31. Contorno coeficientes de reflexión mallado, estado actual .....	47



Ilustración 32. Malla Elementos Finitos, estado actual.....	48
Ilustración 33. Puntos de control. Planta del puerto .....	49
Ilustración 34. Coeficientes de reflexión, alternativa 1.....	57
Ilustración 35. Batimetría, alternativa 1.....	58
Ilustración 36. Contorno dominio numérico, alternativa 1.....	59
Ilustración 37. Contorno coeficientes de reflexión mallado, alternativa 1.....	60
Ilustración 38. Malla Elementos Finitos, alternativa 1 .....	61
Ilustración 39. Propagación del oleaje, ejemplo de un caso de 300 ejecutados .....	62
Ilustración 40. Coeficientes de reflexión, alternativa 2.....	63
Ilustración 41. Batimetría, alternativa 2.....	64
Ilustración 42. Contorno dominio numérico, alternativa 2.....	65
Ilustración 43. Contorno coeficientes de reflexión mallado, alternativa 2.....	66
Ilustración 44. Malla Elementos Finitos, alternativa 2 .....	67
Ilustración 45. Propagación del oleaje, ejemplo de un caso de 300 ejecutados .....	68
Ilustración 46. Coeficientes de reflexión alternativa 3.....	69
Ilustración 47. Batimetría, alternativa 3.....	70
Ilustración 48. Contorno dominio numérico, alternativa 3.....	71
Ilustración 49. Contorno coeficientes de reflexión mallado, alternativa 3.....	72
Ilustración 50. Malla Elementos Finitos, alternativa 3 .....	73
Ilustración 51. Propagación del oleaje, ejemplo de un caso de 300 ejecutados .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de estadísticos básicos de Hs en el punto DOW analizado.....	20
Tabla 2. Puntos de control. Estado actual .....	49
Tabla 3. Tiempos medios de cierre (tabla 8.2 de la ROM 3.1-99).....	50
Tabla 4. Condiciones límites de operación de buques en muelles y pantalanes (tabla 8.1 de la R.O.M. 3.1-99).....	51
Tabla 5. Criterios de agitación máxima y operatividad establecidos por la ROM 3.1-99.	52
Tabla 6. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros .....	52
Tabla 7. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros.....	53
Tabla 8. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM: 0.4 metros .....	53
Tabla 9. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros.....	54
Tabla 10. Comparación de porcentajes que superan las alturas de ola limite .....	54
Tabla 11. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros .....	76
Tabla 12. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros.....	76
Tabla 13. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros .....	77
Tabla 14. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros.....	77
Tabla 15. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros .....	78
Tabla 16. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros.....	78
Tabla 17. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.4 metros .....	79
Tabla 18. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros.....	79
Tabla 19. Operatividades para la alternativa 1 .....	80
Tabla 20. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.4 metros .....	80
Tabla 21. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros.....	80
Tabla 22. Operatividades para la alternativa 2 .....	81
Tabla 23. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.4 metros .....	81
Tabla 24. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros.....	81
Tabla 25. Operatividades para la alternativa 3 .....	82
Tabla 26. Operatividades de las tres alternativas .....	82

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

La alumna Andrea Gema Serrano Campo elabora el presente Trabajo Final de Máster (TFM) para la titulación de Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.

El TFM se encarga de analizar la operatividad portuaria por agitación en el nuevo Puerto Deportivo de San Andrés (Tenerife), con base en los conocimientos adquiridos a lo largo de la titulación del Máster y en especial con base en las temáticas de clima marítimo, dinámica portuaria, agitación e interpretación del programa ROM (Recomendaciones de Obras Marítimas).

## 1.2. OBJETIVOS

En la costa de San Andrés, situada en la isla de Tenerife, el diseño de las nuevas obras portuarias fue realizado previo al diseño y construcción de las nuevas obras de protección del frente marítimo de la costa. Estas obras de protección fueron construidas en el año 2016.

El estudio original de operatividad, debido a la agitación de oleaje y dentro del nuevo puerto, fue realizado sin tener en cuenta las nuevas obras de protección costera frente al paseo costero de San Andrés. Por lo tanto, se espera que las condiciones de agitación cambien al considerar la presencia de un frente marino modificado.

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Máster, consiste en determinar, mediante un modelo numérico, la agitación en el interior del nuevo puerto de San Andrés para la situación inmediata tras su posible construcción (puerto y obras costeras) y para distintas condiciones geométricas del sistema puerto-costa.

Para determinar la agitación del estado actual del puerto y analizar cada una de las alternativas planteadas se hace uso principalmente de la herramienta MSP, que permite, a través de distintos script de MATLAB, trasladar el oleaje desde el exterior del puerto hacia cualquier área en su interior, cuya finalidad es alcanzar la operatividad exigida por la ROM en el interior del puerto.

Se parte de un sistema geométrico que consiste en la configuración original del nuevo puerto y considerando las nuevas obras de protección del frente marítimo de San Andrés (alternativa 0). Esta alternativa estudiada es considerada como de “referencia” o “control” y se emplea para comparar distintos escenarios alternativos, debido a que corresponde a la condición geométrica del sistema puerto-costa que existiría inmediatamente tras la futura construcción del puerto.

El objetivo final es alcanzar las condiciones originales de agitación en el puerto deportivo consideradas en su diseño original.



El análisis se realizará mediante el uso del modelo numérico de propagación y agitación de oleaje, el modelo MSP.

### 1.3. TRABAJOS REALIZADOS

Los trabajos específicos que se han realizado para dar cumplimiento a los objetivos del estudio son los siguientes:

1. **Análisis del Clima Marítimo frente al futuro puerto:** Reanálisis histórico del oleaje frente a la zona de estudio a través de las bases de datos del IHCantabria. Para el oleaje se dispone de una serie de datos horarios DOW (Downscaling Ocean Waves), de 66 años de duración.
2. **Propagación y agitación numérica de oleaje espectral**
  - a. **Definición de la librería de oleajes monocromáticos**, de forma que represente la gran mayoría del espectro direccional y del espectro de frecuencias existente.
  - b. **Autoselección automática de N=300 oleajes representativos** frente a la zona portuaria, empleando el algoritmo Max-Diss, para su posterior reconstrucción mediante la suma de oleajes monocromáticos. Este algoritmo permite la selección de la casuística completa del oleaje frente al puerto, incluyendo eventos medios y extremos de especial importancia. Se reduce el tiempo computacional y se pueden identificar las familias (clústers) de estados de mar que condicionan la operatividad portuaria.
  - c. **Propagación del catálogo de N oleajes (monocromáticos)** mediante la herramienta numérica MSP, para poder evaluar la respuesta del puerto ante cada tipo de estado de mar
3. **Reconstrucción de la serie horaria de oleaje de 66 años en las M=7 zonas** de control situadas en el interior del puerto, siguiendo un algoritmo de interpolación lineal y con base en el catálogo de N estados de mar (monocromáticos) simulados.
4. **Análisis de la operatividad portuaria** con base en los límites establecidos por la ROM 3.1-99, en cada una de las M zonas de control.
5. **Análisis comparativo de la operatividad** entre la alternativa 0 y las diferentes alternativas planteadas.

#### 1.4. INFORMACIÓN UTILIZADA

Para la realización del presente estudio se ha contado con la siguiente información:

- Batimetría de detalle de la zona de estudio, proporcionada por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
- Archivo CAD de la configuración de la geometría portuaria, proporcionado en formato AutoCAD® DWG por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
- Serie de reanálisis de datos horarios de oleaje DOW 1.1 (Downscaling Ocean Waves), de más de 66 años de duración, frente al puerto de estudio. Serie perteneciente a IHCantabria.

#### 1.5. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente estudio se organiza del siguiente modo:

- **Capítulo 1.** Se realiza una introducción al estudio, con los antecedentes y objetivos del mismo, así como una relación de los trabajos realizados y la información utilizada.
- **Capítulo 2.** Se presenta la localización, descripción y morfología general de la zona de estudio, en el que se describe de forma global los elementos más relevantes de la zona costera de San Andrés.
- **Capítulo 3.** Se presenta el resumen y representación gráfica de las bases de datos que conforman el clima marítimo empleado para la caracterización del oleaje.
- **Capítulos 4 y 5.** Se realiza el estudio numérico de agitación en el puerto deportivo de San Andrés, tanto para la alternativa 0 (estado actual) como para las distintas alternativas planteadas. Se estudian y se comparan las tres alternativas con el estado actual del puerto, definiendo los parámetros adecuados en el interior:
  - Agitación
  - Altura de ola monocromática
  - Operatividad en el interior del puerto y de la bocana
- **Capítulo 6.** Se presentan las conclusiones del presente estudio.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el presente apartado se realiza una breve descripción de la localización y la morfología del tramo de costa correspondiente a la zona de San Andrés, en Tenerife, considerando las características morfológicas de la zona.

El objetivo del mismo es resaltar aquellos elementos que condicionarán la propagación y agitación costera en la zona de estudio.

### 2.1. LOCALIZACIÓN Y MORFOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está ubicada en la costa Noreste de la isla de Tenerife, enmarcada por el Puerto de Santa Cruz de Tenerife al sur y la Playa de Las Teresitas al norte. La isla forma parte del archipiélago canario, situado frente a la costa noroccidental del continente africano.



Ilustración 1 Localización de la zona de estudio



Ilustración 2 Localización de San Andrés en la isla de Tenerife



Ilustración 3 Obras de protección del frente litoral de San Andrés, playa de las Teresitas (polígono verde)

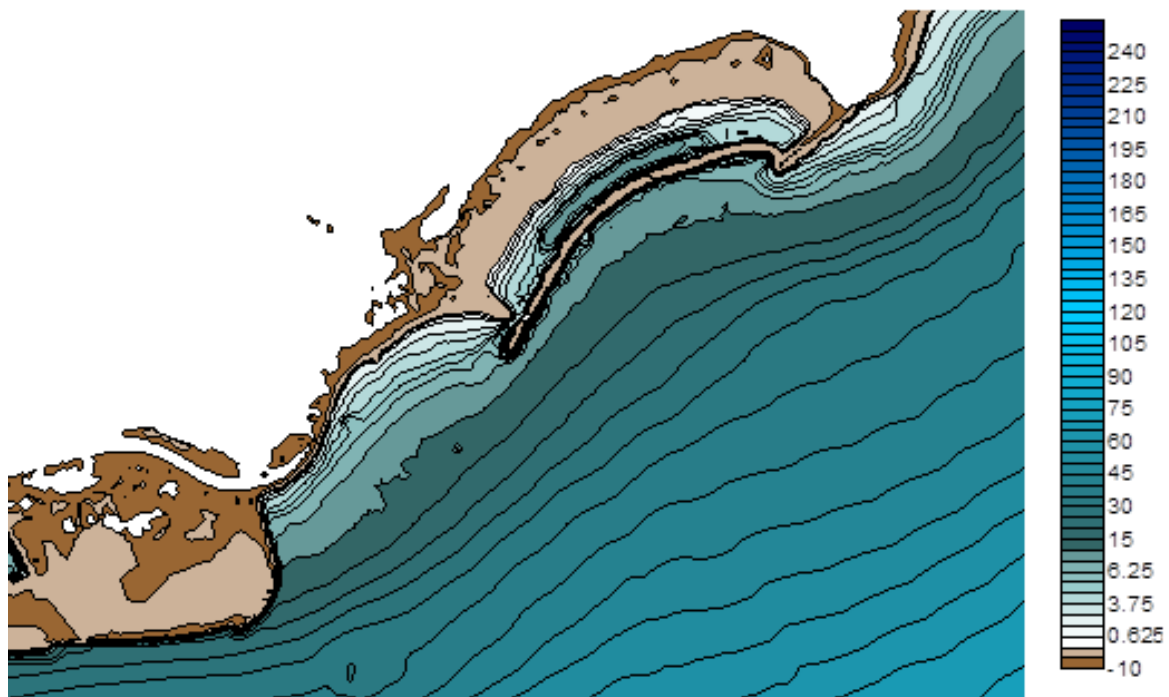
La zona costera de San Andrés se localiza en el barrio de idéntico nombre, extendiéndose aproximadamente 820 m medidos linealmente desde el arranque del dique/muelle del Puerto de Santa Cruz de Tenerife, al sur, hasta el espigón que contiene la playa de Las Teresitas al norte.

Dicho tramo de costa, presenta un dique o escollera de materiales sueltos, próximo a la costa en todo su perímetro, únicamente viéndose interrumpido por el muelle histórico, localizado en el tercio sur del paseo marítimo de San Andrés, y por el barranco o desembocadura de aguas pluviales adyacente al espigón al norte de la costa de estudio (espigón sur de la playa de Las Teresitas).

Recientemente se han finalizado las obras de protección del frente litoral, consistentes en un dique exento paralelo al paseo marítimo, junto con un espigón perpendicular al mismo (ver *Ilustración 3*, polígono verde).

La batimetría en la zona de estudio presenta las curvas de nivel sensiblemente paralelas a la costa (ver *Ilustración 4*), con una pendiente prácticamente constante y sin la presencia de elementos batimétricos de especial interés.

Para el análisis de la batimetría, se han utilizado las bases de datos del IH Cantabria.

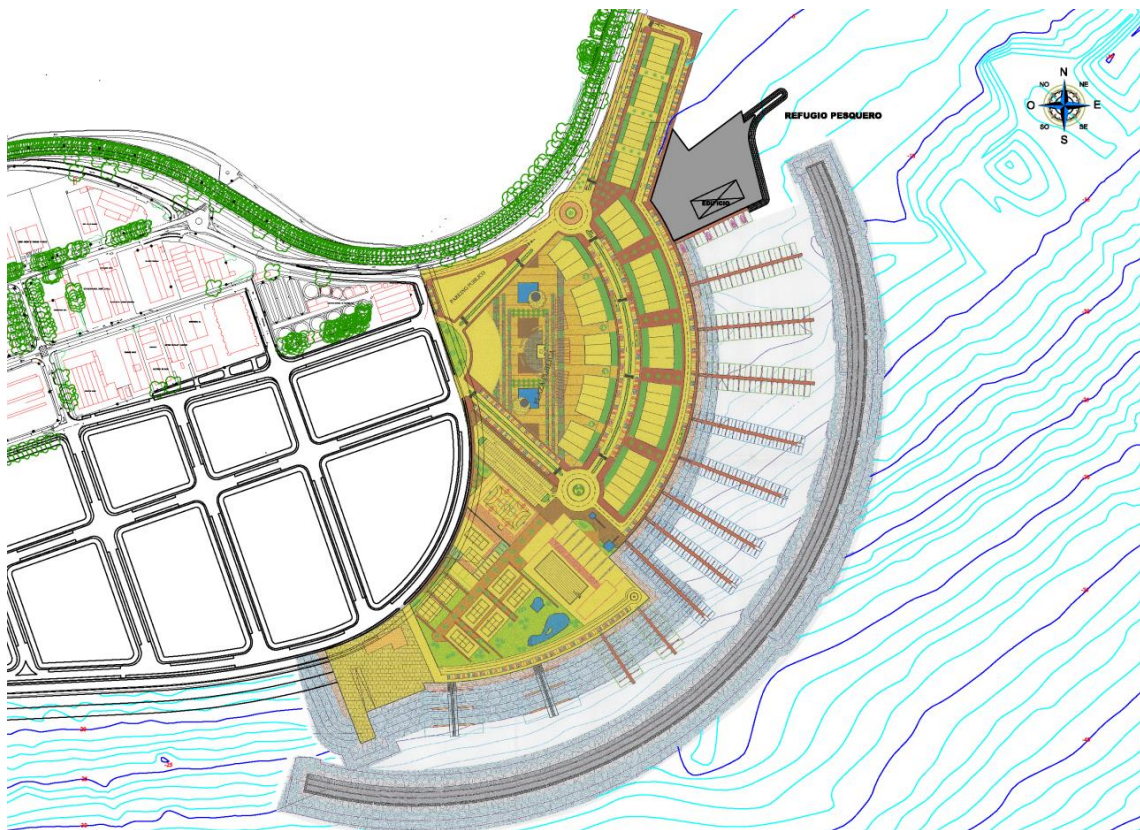


*Ilustración 4 Batimetría de detalle de la zona de estudio antes de la construcción de las obras de protección*



## 2.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA OBRA PORTUARIA OBJETO DE ESTUDIO

El futuro puerto deportivo y pesquero de San Andrés está localizado adyacente a la Dársena de Pesca del Puerto de Santa Cruz de Tenerife en su límite suroccidental, y dejando al pueblo de San Andrés en su límite nororiental, tal como se puede observar en la siguiente figura:



*Ilustración 5. Vista en planta del Puerto deportivo de San Andrés. Plano aportado por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.*

La superficie total del nuevo puerto será de unas 23 ha, con una parte terrestre de 12 ha. El proyecto contempla los siguientes elementos principales:

- Dique exento vertical: dique en forma de arco de 1018 m de longitud, formado por cajones de hormigón apoyados sobre banquetas de todo-uno de cantera.
- Contradique vertical sur: situado al abrigo del dique exento, en la bocana Sur de la dársena deportiva. Constituido por un cajón de hormigón apoyado sobre banqueta de todo-uno de cantera.
- El cierre por el lado de la dársena se realizará con un talud de escollera coronado por una viga de borde.

### 3. ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO

En este capítulo se analiza la dinámica marina que en mayor medida gobierna la dinámica litoral de la zona de estudio. Esto es, el oleaje frente al futuro puerto deportivo de San Andrés.

Se analizan las características del oleaje en las inmediaciones del puerto, que corresponden a la localización mostrada en la *Ilustración 6*. Dicha localización se emplea como punto de forzamiento o alimentación del modelo numérico de agitación portuaria (ver *capítulo 4*).

#### 3.1. OLEAJE FRENTE A LA COSTA DE SAN ANDRÉS

Los datos de oleaje, generados y facilitados por el IHCantabria, de los que se han dispuesto para realizar este estudio provienen de dos fuentes diferentes:

1. Datos instrumentales, procedentes de instrumentos fondeados en puntos fijos (boyas) y áreas (datos satelitales).
2. Datos de reanálisis meteorológico, provenientes de la base de datos GOW y DOW pertenecientes al Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

#### **Datos de reanálisis del IHCantabria (GOW y DOW)**

El desarrollo de los modelos previsión de oleaje de última generación y la existencia de información meteorológica digitalizada hace posible en la actualidad la creación de datos de oleaje a partir de la aplicación de los modelos de previsión a las condiciones meteorológicas de tiempo pasado.

En la actualidad, en toda España se dispone de datos de reanálisis elaborados por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, que por su resolución espacial y temporal, así como por la alta calidad de las series obtenidas, se consideran las bases de datos Downscaled Ocean Wave (DOW), como bases de datos óptimas para este tipo de estudios.

Para la obtención del oleaje en San Andrés se han empleado los datos de oleaje (altura de ola significativa, periodo de pico y dirección media) de la base de datos generada numéricamente por el IHCantabria denominada DOW 1.1, en el punto de coordenadas: latitud 28.4968°N y longitud -16.1865°E (ver *Ilustración 6*). Dicho punto está situado a unos 1000 m de distancia hasta la costa. Los datos se han obtenido con periodicidad horaria desde 1948 hasta 2014.



Ilustración 6. Localización de los datos de oleaje. Contorno verde: nuevas obras del frente litoral de San Andrés. Contorno magenta: futuro puerto deportivo de San Andrés.

La metodología general seguida para obtener la base de datos DOW 1.1 se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1.- Bases de datos de reanálisis.
- 2.- Calibración con información instrumental de satélites.
- 3.- Clasificación.
- 4.- Propagación.
- 5.- Reconstrucción de series temporales de oleaje.
- 6.- Validación con información instrumental de boyas.

Para validar y calibrar la base de datos DOW se utilizan distintas bases de datos de información instrumental:

- Satélites:
  - ERS-2 (1995-2003)
  - Envisat (2002-2008)
  - GFO (2000-2008)
  - Jason-1 (2002-2008)
  - Jason-2 (2008)
  - T/P (1992-2005)

- Boyas (OPPE):

#### Boya de Santa Cruz de Tenerife (1992-2008)

La metodología se detalla a continuación:

**1.- Bases de datos de reanálisis:** IHCantabria ha generado numéricamente una base de datos horaria de oleaje de 66 años de duración (1948-2014) que cubre homogéneamente las costas de todo el territorio Español, con una resolución espacial de  $1/16^{\circ} \times 1/16^{\circ}$ .

Dicho reanálisis, denominado GOW 1.1 se ha ejecutado con el modelo WaveWach III (Tolman, 2002) utilizando como forzamiento los vientos del SeaWind-NCEP/NCAR (Menéndez et al., 2011). El reanálisis de vientos SeaWind-NCEP/NCAR es un downscaling dinámico horario de  $\sim 30$  Km de resolución de viento y presión que IHCantabria ha ejecutado con el modelo WRF-ARW 3.1.1 (Skamarock et al., 2008) con los forzamientos de NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996).

El modelo WaveWach III resuelve la ecuación de balance de densidad espectral. La hipótesis fundamental asumida por este modelo en la resolución numérica es que las propiedades del medio (corrientes, batimetría) así como las del campo de oleaje varían en el espacio y tiempo en escalas que son mucho mayores que una longitud de onda. Por lo tanto una limitación del modelo es que no es capaz de simular los efectos de propagación del oleaje en profundidades reducidas.

**2.- Calibración con información instrumental de satélites:** Se ha calibrado la base de datos GOW 1.1 con información instrumental (todos los datos de las 6 misiones de satélites que van desde 1992 hasta 2008). Para ello se ha utilizado una técnica de calibración no lineal basada en la agregación direccional de cuantiles (Mínguez et al., 2011).

La base de datos DOW 1.1, supone un aumento de la resolución espacial y simulación de los procesos de transformación del oleaje en su propagación hasta costa de los datos de la base GOW 1.1, calibrados en profundidades indefinidas. Para lo cual, se ha aplicado una metodología híbrida (Camus et al. 2011b) que combina modelos numéricos de propagación (*downscaling* dinámico) y métodos matemáticos de clasificación y reconstrucción (*downscaling* estadístico).

**3.- Clasificación:** Para transferir la información del GOW 1.1 desde profundidades indefinidas hasta la costa de forma eficiente se ha clasificado el clima marítimo de cada zona a partir de los campos espacio-temporales de oleaje y viento de cada zona (Camus et al. 2011a), seleccionándose 300 estados de mar en profundidades indefinidas representativos del total de los 66 años. La técnica de clasificación empleada ha sido el algoritmo de máxima disimilitud (MDA, Kennard y Stone, 1969).

**4.- Propagación:** Mediante sucesivas mallas anidadas se propagan los 300 estados de mar seleccionados del GOW 1.1 ya calibrados, llegando hasta resoluciones espaciales de entre 350 y 70 m. El modelo de propagación utilizado es el SWAN, que está basado en la



ecuación de acción de onda que promedia la fase (Booij, 1999), lo que permite simular los procesos de refracción, asomeramiento, disipación con el fondo, rotura, interacciones no lineales, generación de oleaje por viento, etc.

Para propagar se han utilizado dos bases de datos de batimetría; por un lado la batimetría global GEBCO (British Oceanographic Data Centre) y por otro lado las cartas náuticas disponibles en el programa BACO (IH Cantabria).

**5.- Reconstrucción de series temporales de oleaje:** Una vez propagados los casos seleccionados se reconstruyen las series temporales horarias de 66 años de los distintos parámetros de estado de mar mediante técnicas de interpolación basadas en funciones de base radial (RBF, Franke, 1982), dicha base de datos se denomina DOW 1.1 (*Downscaled Ocean Waves*).

**6.- Validación con información instrumental de boyas:** A partir de las series de oleaje reconstruidas en las posiciones de las boyas se valida el DOW 1.1 y con ello toda la metodología y las bases de datos generadas.

A continuación se presentan figuras de validación con la boya de Tenerife de la red Costera del Organismo Público Puertos del Estado para diferentes años (*Ilustración 7 a 9*).

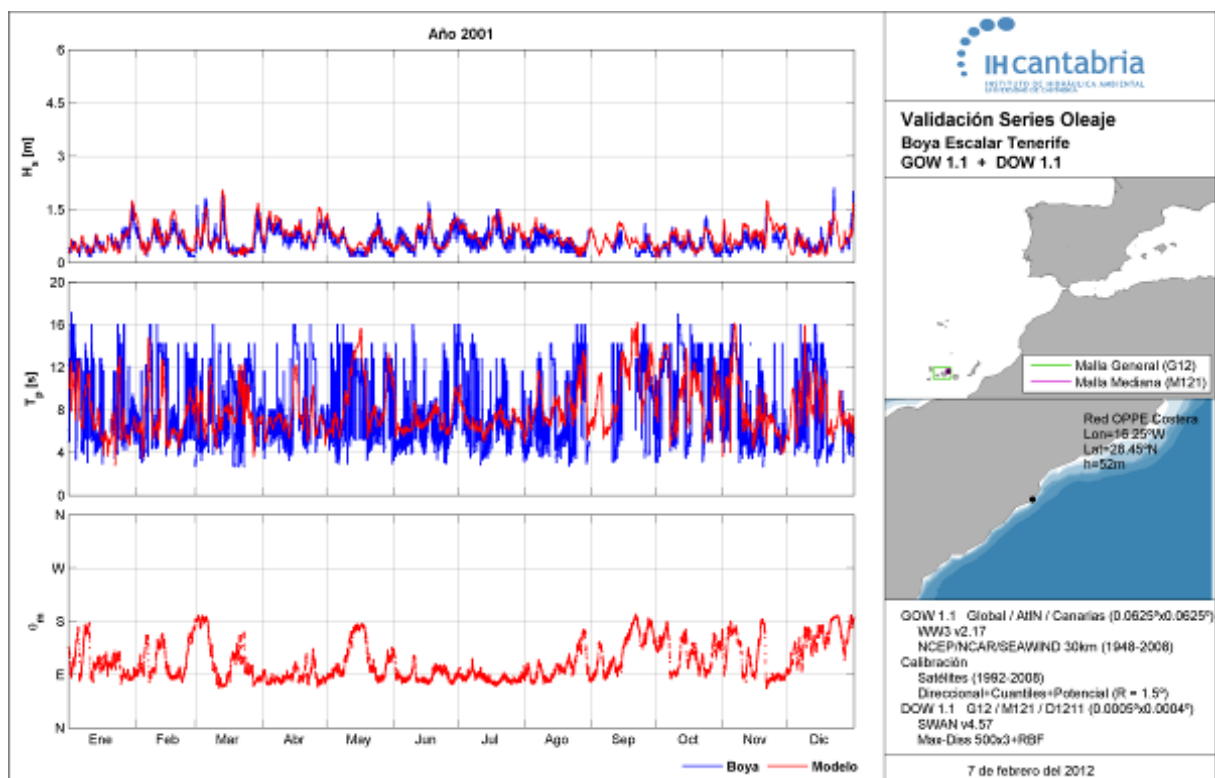


Ilustración 7. Validación del DOW 1.1 con la boya de Tenerife de la red Costera del OPPE (año 2001).

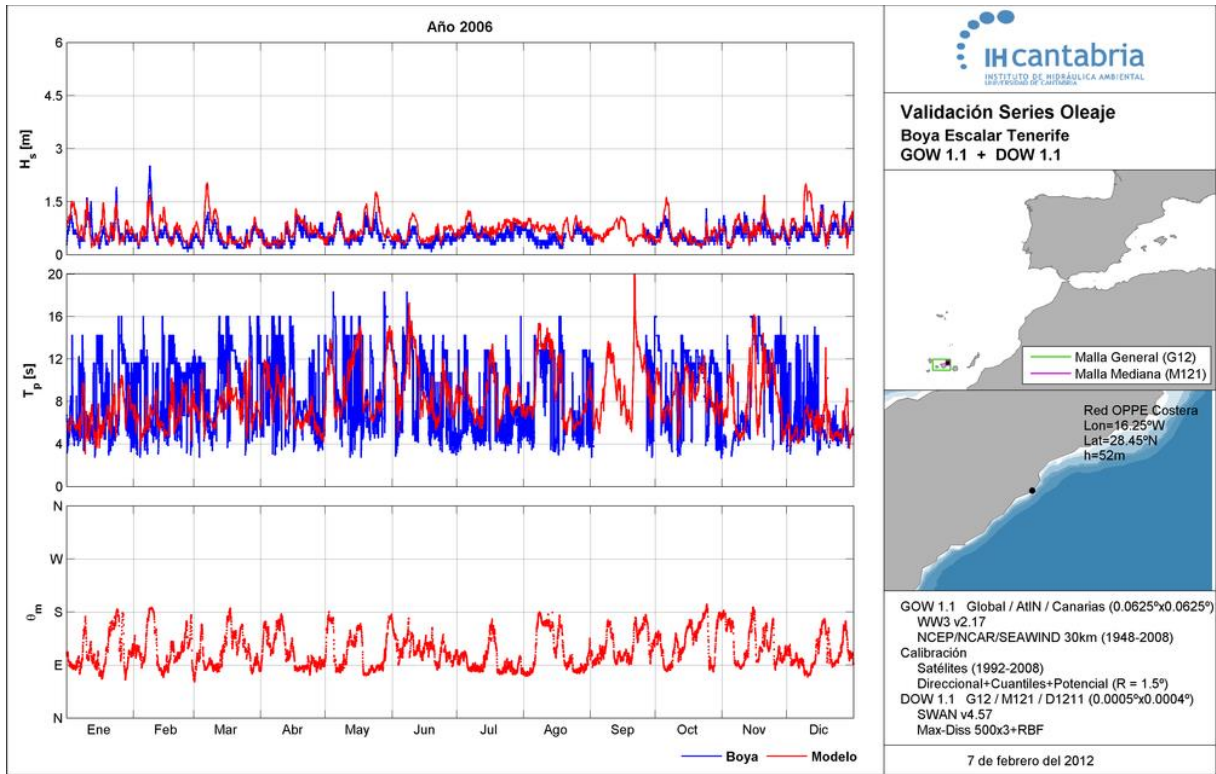


Ilustración 8. Validación del DOW 1.1 con la boya de Tenerife de la red Costera del OPPE (año 2006).

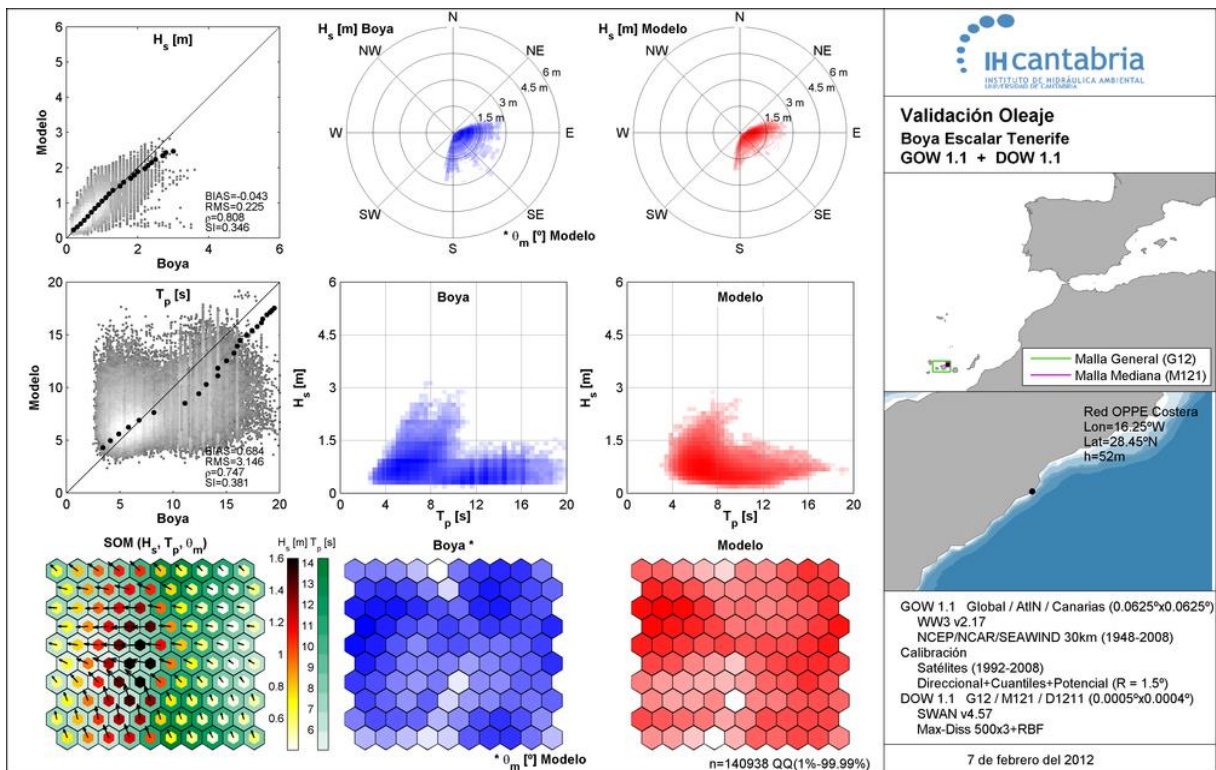


Ilustración 9. Validación del DOW 1.1 con la boya de Tenerife de la red Costera del OPPE.

En la *Ilustración 9* se puede apreciar la ficha de clasificación y validación de las bases de datos GOW 1.1 y DOW 1.1, la cual se divide en las representaciones:



- a) mapa de dispersión de puntos y mapa de cuantiles de altura de ola significativa y periodo de pico, para los datos numéricos (reanálisis) vs. los datos instrumentales (satélite y boya) (figuras en gris).
- b) rosas de oleaje y distribuciones conjuntas Hs vs. Tp para los datos numéricos (reanálisis en rojo) y para los datos instrumentales (satélite y boya en azul).
- c) representación de los estados de mar seleccionados mediante la técnica SOM (*Self Organizing Maps*) considerada para realizar las propagaciones de los n-estados de mar representativos de la zona de estudio (mapa de colores).
- d) representación SOM de la ocurrencia de los estados de mar representativos para los datos numéricos (reanálisis en rojo) y para los datos instrumentales (satélite y boya en azul).

### 3.1.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE OLAJE

Para la obtención y estudio del clima marítimo la autora ha empleado un Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (AMEVA), es un software que está formado por un conjunto de funciones desarrollada en MATLAB (ver *capítulo 8, script 1*) que integra las diversas metodologías de análisis estadístico implementadas por los investigadores del IHCantabria, con el objeto de estudiar y caracterizar variables medioambientales.

En este apartado se describen la metodología y los resultados obtenidos por la autora, del análisis de largo plazo del oleaje frente a la zona objeto de estudio. Además se realiza una breve descripción de las características más importantes de dichos resultados.

En la *Ilustración 10* se observa las predominancias direccionales del oleaje obtenidas de la base de datos de reanálisis de oleaje en el punto seleccionado para el estudio. Se puede notar cómo, debido a la configuración de la zona de estudio, los oleajes se encuentran altamente acotados entre las direcciones E y S. Los oleajes reinante y dominante provienen del tercer cuadrante (destacando las direcciones del E y del ESE).

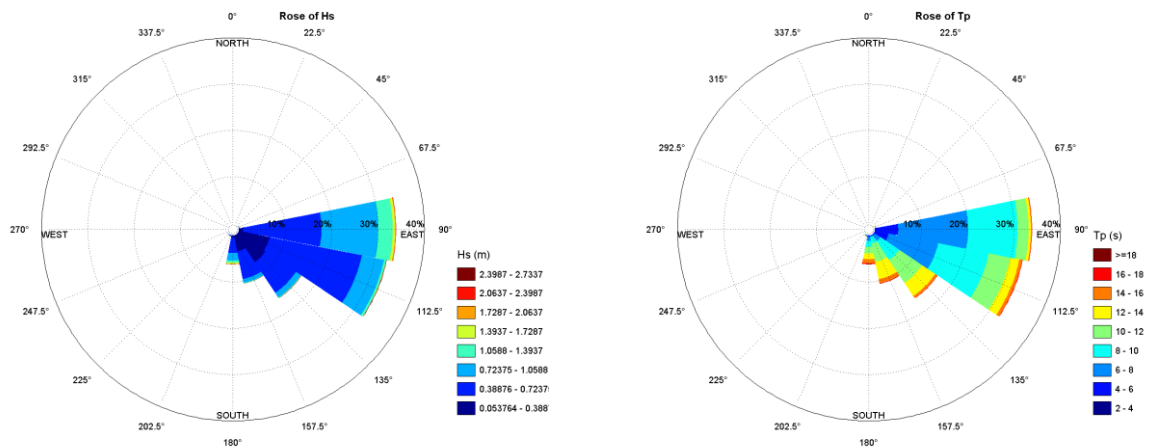


Ilustración 10. Rosa de Hs y Tp frente a San Andrés.

Desde el punto de vista energético, tal como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los sectores que contienen mayor energía, basándonos en el parámetro Hs12 (altura de ola significativa que es superada 12 horas al año), son el SSW y S, con Hs12 entorno a los 2.5 m.

**TABLA ESTADÍSTICOS BASICOS**

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob. direccion	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>90%</sub>	Hs <sub>99%</sub>	Hs <sub>12</sub>
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0010	0.6652	1.0527	1.3540	1.4558
E	0.3381	0.7082	1.0779	1.4823	1.7440
ESE	0.3247	0.5087	0.8033	1.1204	1.4706
SE	0.1647	0.4113	0.6941	1.0311	1.3652
SSE	0.1061	0.4486	0.7151	1.0965	1.4251
S	0.0625	0.6536	1.1565	1.9235	2.3626
SSW	0.0029	0.8852	1.4477	2.1790	2.5035
SW	0.0000	0.5392	0.5845	0.6504	0.6504
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 1 Tabla de estadísticos básicos de Hs en el punto DOW analizado.

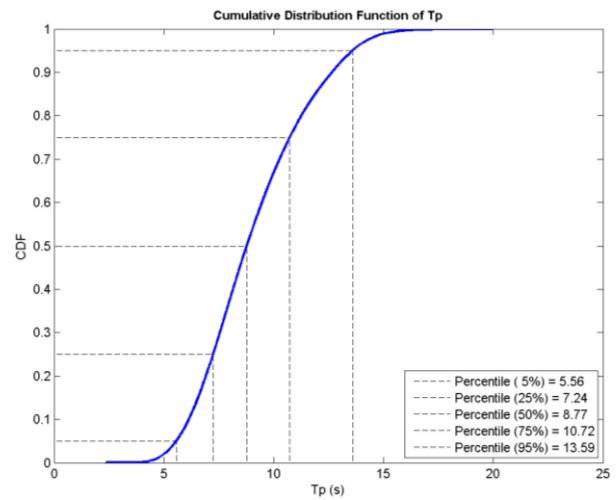
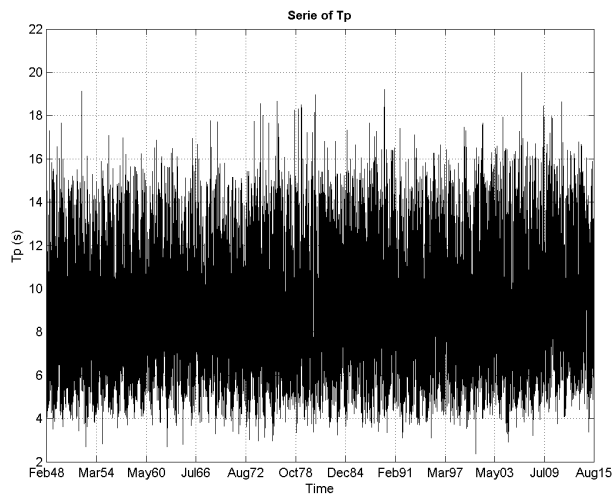
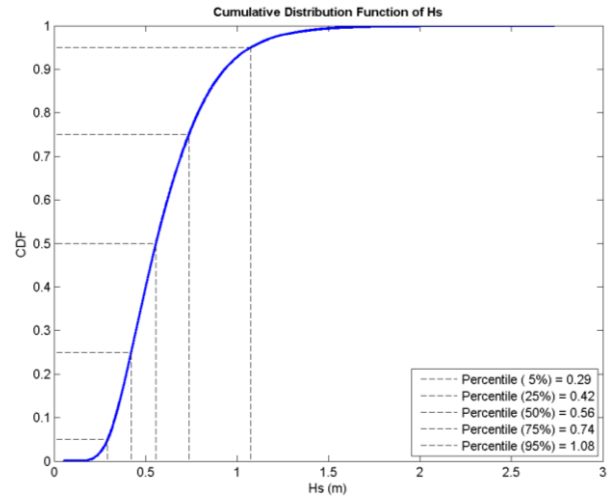
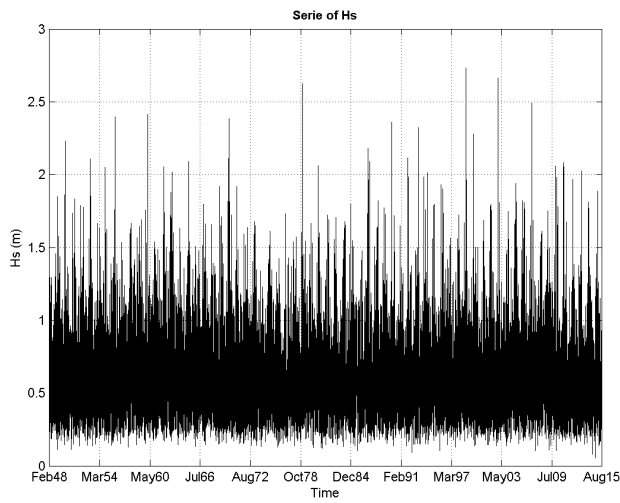


Ilustración 11. Serie histórica de Hs y Tp (izquierda); función de distribución acumulada de Hs y Tp (derecha). Hs arriba, Tp abajo.

### Distribución conjunta Hs-Tp

Con el fin de entender la relación entre la altura de ola significativa Hs y el período de pico Tp se ha calculado la distribución conjunta Hs-Tp que se muestra en la *Ilustración 12*. En ella se observa que los oleajes más probables se concentran entre alturas de ola significantes de 0.3 a 0.7 m y periodos de pico entre 6 y 12 s.

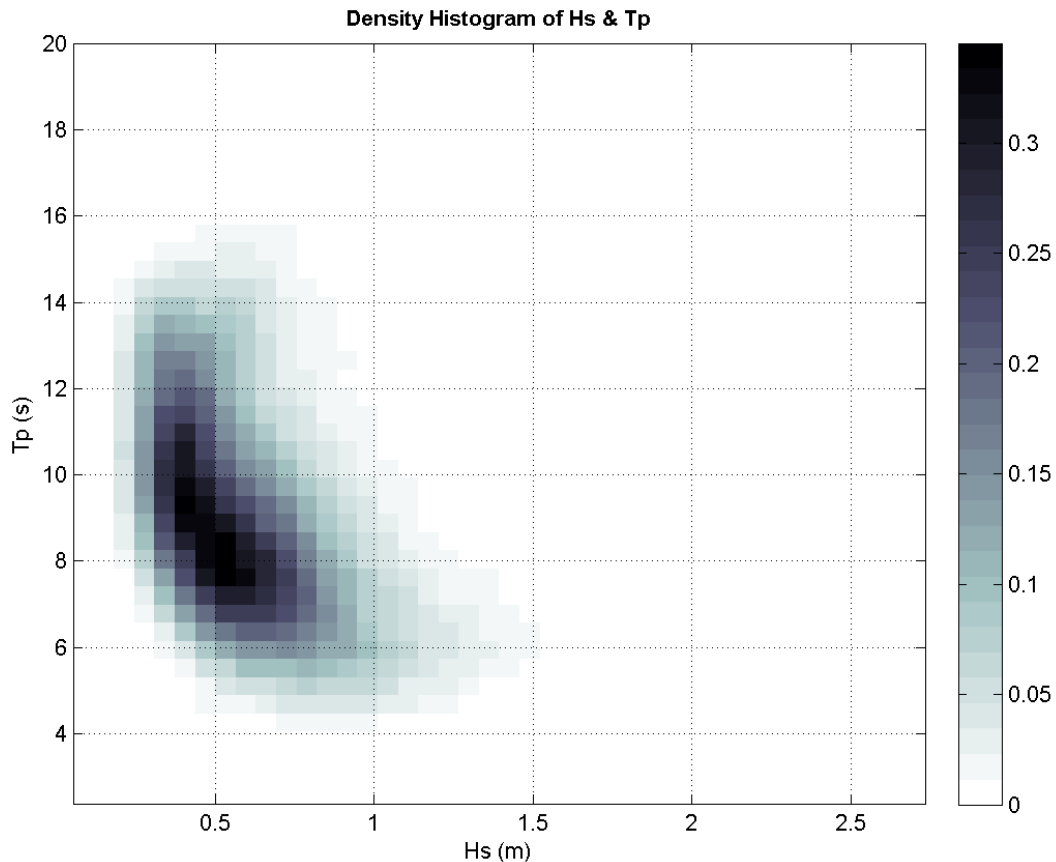


Ilustración 12. Distribución conjunta Hs-Tp en el punto dow analizado

### Régimen medio

En este apartado se representa el régimen escalar y direccional medio de la altura de ola significativa y periodo de pico.

La representación de estos regímenes medios del oleaje se realiza mediante la función de distribución GEV, la cual se ha comprobado en otros estudios que es la función que mejor representa todo el intervalo de probabilidades (se han obtenido mejores resultados para el ajuste de los regímenes medios direccionales de Hs con la función de distribución GEV que con otras clásicas como la Lognormal, Gumbel de máximos o Weibull de mínimos).

El ajuste a la función de distribución GEV se realiza mediante el método del papel probabilístico utilizando los cuantiles equi-espaciados en  $-\log[-\log(\text{Pr})]$ , utilizando únicamente los que verifican  $\text{Pr} < 1-5/n$ . La función de distribución GEV depende de tres parámetros,  $\mu$  (parámetro de localización, que representa los valores medios),  $\psi$  (parámetro de escala, que controla la dispersión de los datos) y  $\xi$  (parámetro de forma, que condiciona el comportamiento de los datos más extremos).



$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 + \xi \frac{x - \mu}{\psi} \right)^{-1/\xi} \right]$$

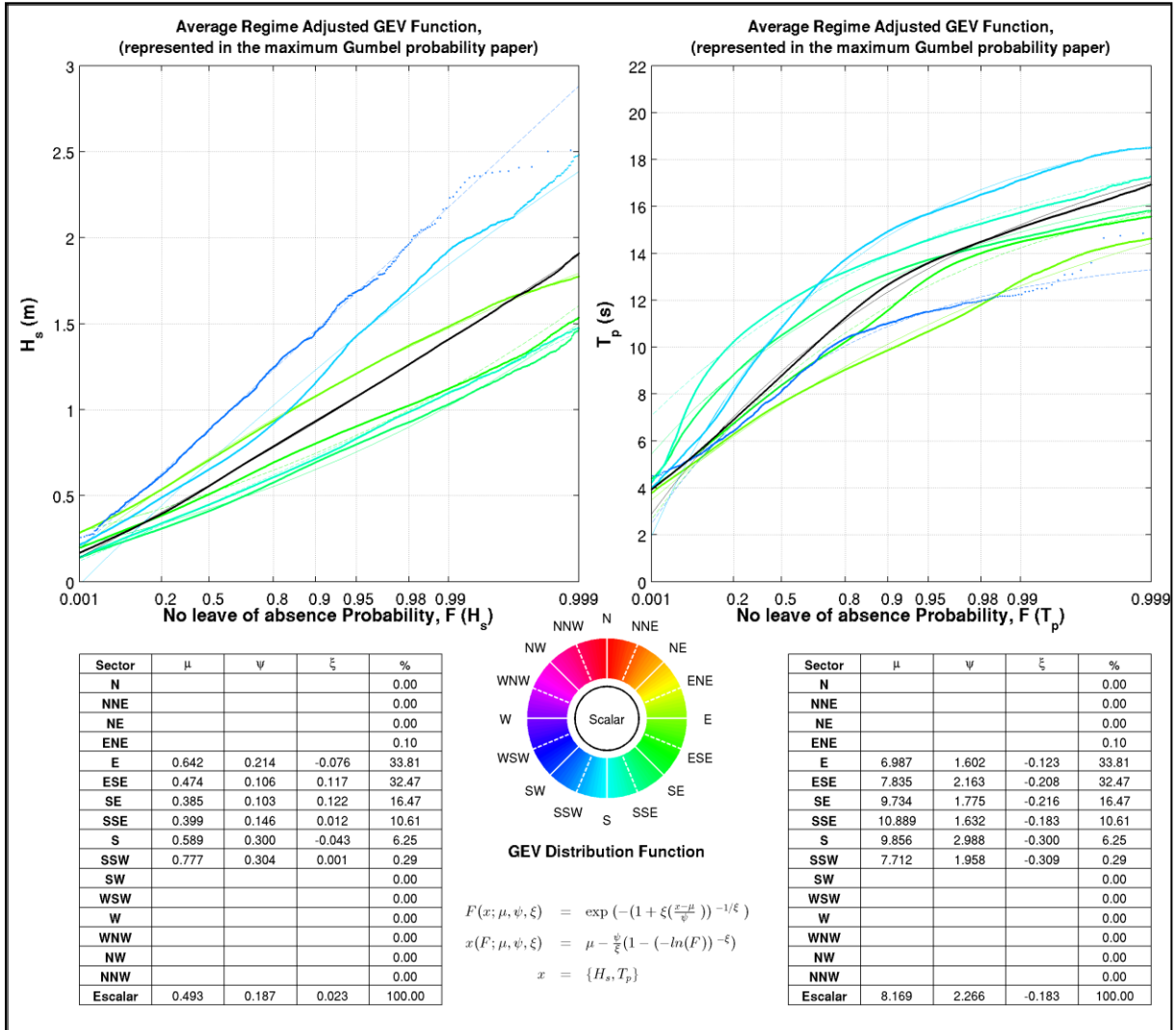


Ilustración 13. Régimen medio direccional y escalar de Hs y Tp frente a San Andrés.

### Régimen extremal

Para la obtención del régimen extremal, los valores extremos de la serie de altura de ola significativa se ajustan a una de estas tres distribuciones, Gumbel, Fréchet y Weibull, según el teorema de las tres colas (Fisher y Tippett, 1928). Estos tres tipos pueden ser combinados en una única expresión denominada distribución de valores extremos generalizados (GEV) con la expresión mostrada previamente:

$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 - \frac{\xi(x - \mu)}{\psi} \right)^{1/\xi} \right]$$

Dónde:  $\mu$  es el parámetro de localización;  $\psi$  es el parámetro de escala;  $\xi$  es el parámetro de forma.

Cuando  $0.05 < \xi < 0.05$  resulta la distribución de Gumbel.

Cuando  $\xi > 0.05$  resulta la distribución de Fréchet.

Cuando  $\xi < -0.05$  resulta la distribución de Weibull.

En la *Ilustración 14* se representa el régimen extremal direccional y escalar de la altura de ola significativa, indicándose en la tabla los valores del ajuste. Para seleccionar los valores máximos del ajuste se ha realizado la técnica POT (Peaks Over Treshold), valores sobre un umbral, y luego se ha utilizado un modelo Pareto-Poisson definido en términos de la función GEV descritos anteriormente.



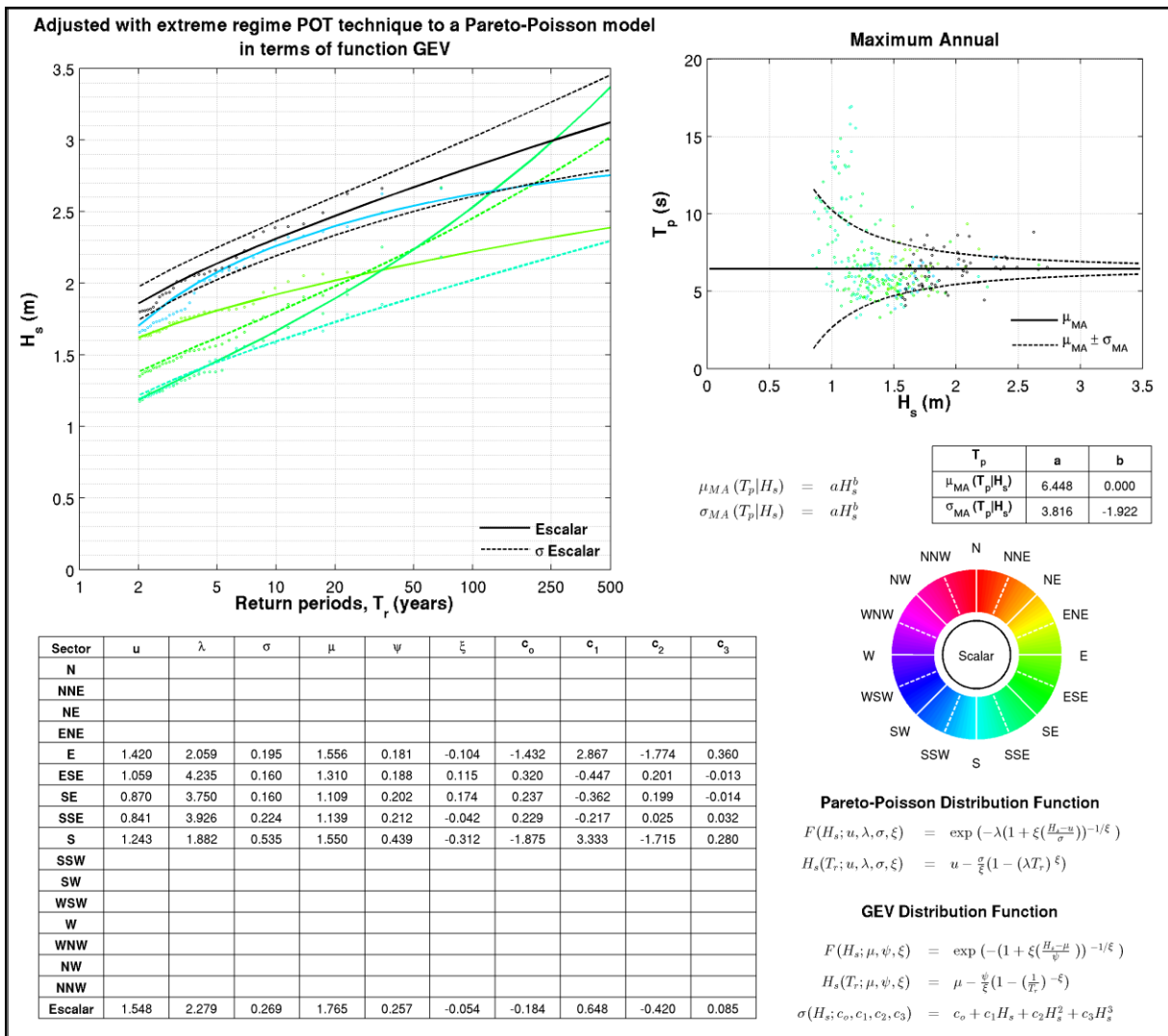


Ilustración 14. Régimen extremal direccional y escalar de  $H_s$  frente a San Andrés.

## Nivel del mar

Se define nivel del mar a la posición media de la superficie libre del mar una vez filtradas las oscilaciones de onda corta y larga asociadas al oleaje de viento y maremotos. Una vez filtradas dichas oscilaciones, las oscilaciones resultantes son causadas por movimientos de largo periodo asociados a la meteorología y a los movimientos astronómicos.

La oscilación del nivel medio de mar, asociada a la evolución de los sistemas meteorológicos, tiene carácter aleatorio y se denomina Marea Meteorológica. La oscilación del nivel asociada a los movimientos astronómicos tiene carácter determinista y se le denomina Marea Astronómica. La combinación de las estadísticas de ambas mareas es lo que se denomina régimen del nivel del mar.

En el presente estudio, no se ha tenido en cuenta las variaciones del nivel del mar, ya que se ha considerado que tiene la misma influencia en las distintas alternativas y por tanto



tiene un impacto insignificante. Al no considerar este efecto disminuye muy notablemente el número de simulaciones que sería necesario realizar.

### 3.2. OLEAJE EN EL INTERIOR DEL PUERTO

Para poder realizar un estudio en profundidad de la agitación producida por el oleaje en el interior del puerto es necesario conocer algunas características del mismo en esas zonas. Para ello se ha desarrollado una metodología de propagación adecuada para este tipo de casos y que, como se verá en el siguiente capítulo, permitirá analizar los datos en diferentes puntos del interior del puerto, objeto de estudio.

## 4. DESCRIPCIÓN OPERATIVA DEL PUERTO DEPORTIVO PROPUESTO: ESTADO ACTUAL

En este capítulo se presenta el estudio inicial de agitación llevado a cabo por la autora en el presente proyecto, en el cual se detalla la metodología de transferencia del oleaje al interior del puerto objeto de estudio, se realiza la descripción del modelo numérico utilizado en las propagaciones, se define la geometría actual, alternativa 0, y los dominios numéricos empleados y se presentan los resultados de agitación.

### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE TRANSFERENCIA DEL OLAJE AL INTERIOR DEL PUERTO

Conforme el oleaje se aproxima y propaga hacia la costa, éste sufre una transformación energética debida principalmente a la influencia de los contornos batimétricos, es decir que en general, el oleaje experimenta los efectos propios de la refracción, difracción, asomeramiento y disipación de energía debida a la fricción con el fondo. Cuando el oleaje se encuentra con estructuras de protección costera y/o instalaciones portuarias, aparecen procesos de reflexión de oleaje, interacción oleaje-estructura y en ocasiones, disipación de oleaje por efecto de la rotura.

Por lo tanto, dentro del trabajo para cuantificar la agitación del oleaje en el interior del puerto, es necesario evaluar los procesos de transformación previamente mencionados. Para ello se ha seguido una metodología de trabajo capaz de transferir las dinámicas a la zona de estudio.

Además, para poder evaluar la estadística completa del oleaje en distintas zonas dentro del puerto, se establece una metodología de reconstrucción monocromática de la serie de reanálisis DOW 1.1 analizada en el *apartado 0*, en distintas zonas de control dentro del puerto deportivo de San Andrés. Los pasos seguidos por la autora se describen, de forma general, a continuación:

#### 1. Definición de librería de oleajes monocromáticos

Una vez analizada la climatología del oleaje y sus dinámicas en el punto DOW 1.1 (ver *apartado 0*), se define una librería de oleajes monocromáticos unitarios, que forman parte del catálogo de estados de mar a ser tenidos en cuenta como forzamiento del modelo numérico.

#### 2. Selección de oleajes representativos de la serie de reanálisis DOW 1.1 (Max-Diss)

Para poder seleccionar adecuadamente los N estados de mar (monocromáticos) con los cuales el modelo numérico será ejecutado, se procede a seleccionar un número finito de oleajes, que a su vez servirán para obtener la estadística completa de oleaje en cualquier

punto en el interior del puerto. Para ello se sigue una técnica de auto-clasificación de estados de mar representativos, denominada **técnica Max-Diss** o técnica de Máxima Disimilitud, Camus et al. (2011).

En el presente TFM se determina auto-seleccionando N=300 estados de mar del punto DOW analizado en el *apartado 0*. Este análisis se realizó con los datos de altura de ola significativa, periodo de pico y dirección media de en dicho punto.

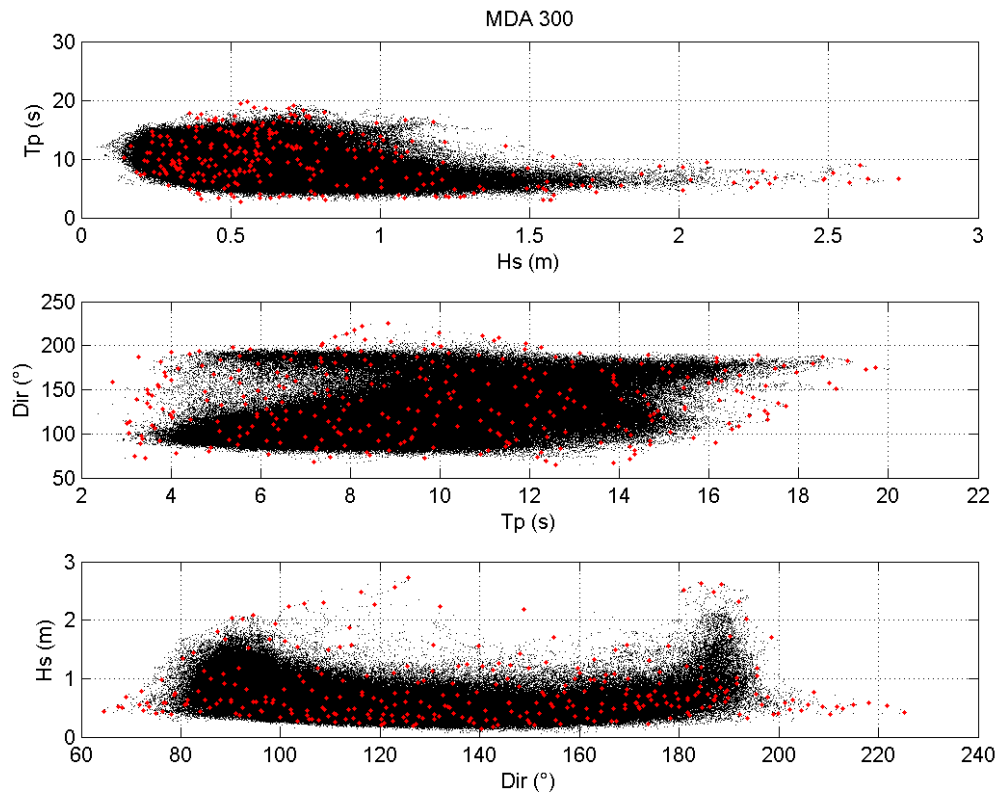


Ilustración 15. Estados de mar representativos (300) en el punto DOW 1.1 analizado en el apartado 3.1

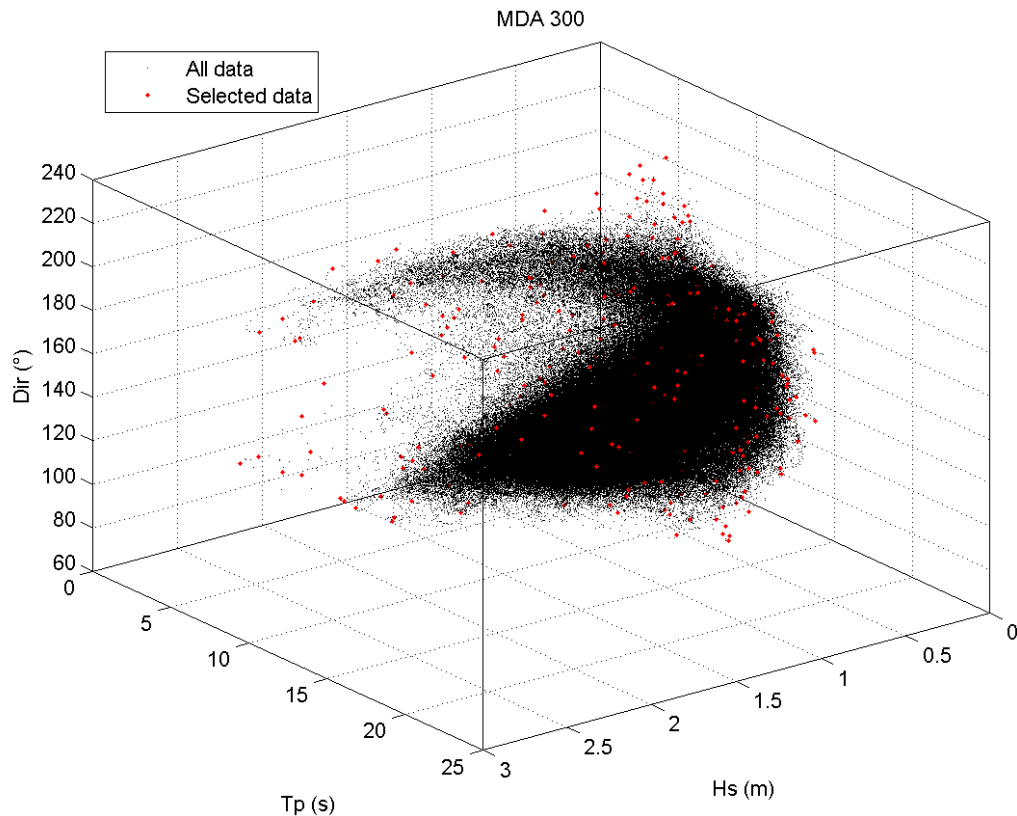


Ilustración 16. Cubo con los estados de mar representativos (300) en el punto DOW 1.1.

### 3. Propagación del catálogo de oleajes monocromáticos

En la actualidad, los modelos numéricos que se basan en las ecuaciones elípticas de la pendiente suave (*elliptic mild slope equations*), son los más empleados para este tipo de estudios, y ofrecen una manera práctica y eficaz para evaluar adecuadamente la agitación portuaria, considerando contornos batimétricos reales y batimetrías complejas, para oleaje irregular.

Este tipo de modelos son capaces de resolver en un dominio numérico bidimensional los procesos lineales de refracción, difracción, asomeramiento, y reflexión (total y parcial), y los procesos de disipación de energía del flujo por fricción y rotura del oleaje.

En el presente Trabajo Final de Máster, la autora ha empleado el modelo MSP (GIOC, 2001), que resuelve las ecuaciones de la pendiente suave antes mencionadas, bajo un esquema numérico de elementos finitos.

Es importante mencionar que las propagaciones realizadas se han considerado de carácter monocromático debido al limitado tiempo disponible para ejecutar el modelo (las simulaciones espectrales suelen requerir un tiempo computacional elevado y que se considera fuera del alcance académico del presente TFM). No obstante, los resultados



monocromáticos son adecuados e ilustran perfectamente el comportamiento operativo del puerto en cualquiera de sus geometrías consideradas.

#### 4. Reconstrucción de la serie de 66 años de datos de oleaje horarios

La reconstrucción de la serie de olas DOW 1.1 en el interior del puerto se realiza siguiendo la técnica de interpolación lineal y tridimensional (con base en Hs, Tp y Dir) a partir de los resultados obtenidos en los N=300 mapas de agitación monocromática seleccionados con la herramienta Max-Diss, se interpola los valores de toda la serie.

Esta técnica de reconstrucción permite contar con la información realista de todos y cada uno de los oleajes horarios (66 años de datos) en cualquier punto o zona en el interior de dominio de cálculo.

#### 5. Interpolación lineal para el nivel del mar real (Obtención de la serie de oleaje de 66 años de duración en el interior del puerto, para cada zona de control establecida)

Dado que se tienen los resultados de las series de oleaje en el interior del puerto, el resultado final se calcula como la interpolación lineal entre los resultados correspondientes a los niveles de marea entre los que se sitúa el nivel de marea real en el que fue medido o calculado el espectro de oleaje objeto de reconstrucción.

### 4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO

#### 4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MSP

Asumiendo que el movimiento del agua es irrotacional, es posible estudiar el fenómeno de la propagación del oleaje por medio de una función potencial. Además, si la batimetría de la zona de análisis puede ser considerada como de pendiente suave, el problema puede ser descrito por medio de una ecuación bidimensional integrada en profundidad entre el fondo y la superficie libre, conocida como ecuación de refracción-difracción o *mild-slope equation*. Dependiendo de otras aproximaciones adicionales, se puede obtener modelos más simplificados, como el modelo parabólico de refracción-difracción.

El sistema completo de refracción-difracción (*mild-slope equation*) fue introducido inicialmente por Berkhoff, (1972), y desarrollado por Behrendt, (1985). Dicho sistema puede ser expresado por:

$$\nabla(\Gamma C C_g \nabla\Phi) + \frac{w^2 C}{C_g} \Phi = 0$$



Donde:

- $\nabla$  = operador gradiente [ $\nabla = (\delta x, \delta y)$ ]
- $\Gamma$  = factor de fricción
- $C$  = celeridad ( $C = w/k$ )
- $C_g$  = celeridad de grupo ( $C_g = \delta w / \delta k$ )
- $\Phi$  = potencial de velocidad ( $v = \nabla \Phi$ )
- $k$  = número de onda ( $w^2 = gk \tanh kh$ )
- $g$  = gravedad
- $h$  = profundidad
- $a$  = amplitud de onda

Esta ecuación es de tipo elíptico, necesitándose para su resolución condiciones de contorno a lo largo de todo el dominio de integración; éstas pueden ser:

- a) Reflexión total o parcial en contornos fijos.
- b) Onda incidente conocida o condición de radiación en contornos abiertos.

La resolución del sistema anterior puede realizarse por medio de métodos en elementos finitos.

Debido a las grandes necesidades computacionales que este sistema requiere (tanto de memoria como de tiempo de computación), se ha desarrollado simplificaciones al mismo, como la llamada "aproximación parabólica".

En este caso, la propagación se produce considerando una dirección de propagación dominante, limitando la validez del proceso de refracción-difracción a ángulos de  $\pm 60^\circ$  con respecto a la dirección principal de propagación. De este modo, el sistema puede expresarse como:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = ik - \frac{1}{2kC C_g} \frac{\partial}{\partial x} (kC C_g) \Phi + \frac{i}{2kC C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{C C_g \partial \Phi}{\partial y} \right)$$

Donde:

- $i$  = *unidad imaginaria ( $i^2 = -1$ )*
- $x$  = *dirección predominante de propagación.*



Interpretando la dirección  $x$  como "tiempo", el sistema puede ser analizado como un problema de valor inicial con las siguientes condiciones de contorno:

- a) En  $x = 0$ , se ha de establecer la función potencial en función de la coordenada
- b) En la dirección  $y$  el modelo debe tener dos contornos con condiciones apropiadas (reflexión o absorción).

Debe hacerse notar que en este modelo no existe la posibilidad de que las ondas viajen en el sentido negativo de la dirección  $x$  y. Por tanto, la reflexión debida a estructuras no puede ser analizada. La resolución del sistema anterior puede realizarse por medio de métodos de diferencias finitas o elementos finitos.

Berkhoff et al., (1982), comparó los resultados de ensayos en modelo físico en laboratorio con resultados de modelos matemáticos, tanto por resolución de la "*mild-slope equation*" por elementos finitos como por resolución de la aproximación parabólica por diferencias finitas. La conclusión de dicho análisis comparativo fue que con los modelos de elementos finitos se obtiene mejores resultados, pero con un mayor coste de computación.

En el presente trabajo, el estudio de propagación de oleaje en el interior del puerto se realiza por medio de la resolución de la versión elíptica de la "*mild-slope equation*", no sólo por los mejores resultados obtenidos por el análisis de Berkhoff, sino por la imposibilidad de los métodos parabólicos para estudiar las reflexiones interiores.

#### 4.2.1.1. Métodos de resolución

La ecuación de la pendiente suave se resuelve mediante un método híbrido de elementos finitos desarrollado originalmente por Behrendt, (1985), capaz de resolver la ecuación de Helmholtz con fondo variable.

En este análisis, el dominio de estudio se divide en dos regiones:

- Región cercana: A.
- Región lejana: R.

Para la región A se utiliza un método convencional de elementos finitos, mientras que para la región R se utiliza una solución analítica con coeficientes desconocidos.

Se establece un principio variacional con un funcional adecuado, de modo que las condiciones de compatibilidad se satisfagan a lo largo de la región A.

El principio variacional para el problema de contorno requiere que el funcional sea estacionario respecto a cualquier variación de primer orden de los potenciales  $\Phi$  y  $\Phi_R$  en la región cercana y lejana, respectivamente. Dicho funcional resulta:





$$\begin{aligned} \pi(\Phi, \Phi_R) = & \int_A \frac{1}{2} \left[ \Gamma C C_{subg} (\nabla \Phi)^2 - \frac{w^2 C_g}{C} \Phi \right] dA - \\ & - \int_{\partial B} \frac{1}{2} \alpha \Gamma C C_g \Phi^2 dL + \int_{\partial A} \Gamma C C_g \cdot \left[ \frac{1}{2} (\Phi_R - \Phi) - (\Phi - \Phi_0) \right] \frac{\partial \Phi_R}{\partial n_A} dL - \\ & - \int_{\partial A} \frac{1}{2} \Gamma C C_g (\Phi_R - \Phi_0) \left( \frac{\partial \Phi_0}{\partial n_A} \right) dL \end{aligned}$$

Dónde:  $\Phi_0(x_j)$  es el potencial de la onda incidente,  $n_1$  es un vector normal exterior a la región A,  $\Gamma$  es el coeficiente de fricción por fondo y  $\alpha$  el coeficiente de absorción de los contornos sólidos (estructuras).

La onda incidente, de amplitud  $a_0$ , llega al modelo desde el infinito, donde la profundidad es constante con un ángulo  $\theta_0$  con el eje x. El potencial incidente de esta onda puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \Phi_0 = & - \frac{ig a_0}{w} \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] = \\ = & - \frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^N \varepsilon_n i^n J_n(kr) (\cos n\theta_0 \cos n\theta + \text{senn}\theta_0) \end{aligned}$$

Dónde:  $\varepsilon_0 = 1$  y  $\varepsilon_n = 2$  para  $n > 0$ . Nótese que el potencial incidente se ha descompuesto en términos de funciones de Bessel de primera especie,  $J_n()$ .

En el caso de océano semiinfinito,  $\Phi_0$  es la suma del potencial incidente y del reflejado:

$$\begin{aligned} \Phi_0 = & - \frac{ig a_0}{w} \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] + kr \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] = \\ = & - \frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^N \varepsilon_n i^n J_n(kr) \cos n\theta_0 \cos n\theta + (1 - kr) \text{senn}\theta_0 \text{senn}\theta \end{aligned}$$

La región A se subdivide en elementos triangulares. En la región R se asume fondo constante de modo que pueda adoptarse una solución analítica. Como la fricción por fondo en la región lejana es, generalmente, de escasa relevancia es el análisis del fenómeno en la región A, se desprecia su efecto. De esta manera, no sólo se evita el cálculo de las funciones de Hankel con argumentos complejos, sino que la expresión de la onda incidente se simplifica, quedando:

$$\Phi_S = \Phi_R - \Phi_0 = -\frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(kr)}{H_n(kr_a)} (u_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta)$$

Donde los coeficientes  $u_n$  y  $\beta_n$  son constantes desconocidas a resolver;  $H_n(k)$  es la función de Hankel de primera especie y  $r_a$  el radio de la región A. Para un caso de región lejana semi-infinita y costa recta, asumiendo reflexión perfecta a lo largo de dicha costa se puede expresar:

$$\Phi_S = \Phi_R - \Phi_0 = -\frac{ig a_0}{w} \sum_{n=0}^{\infty} u_n \cos n\theta \frac{H_n(kr)}{H_n(kr_a)}$$

Usando esta expresión para la región exterior y un método convencional de elementos finitos para la región interior, se puede obtener un conjunto de ecuaciones lineales que resuelven el sistema de propagación de una onda.

Este modelo contempla, por tanto, no sólo la propagación completa de la onda (refracción-difracción), sino además puede introducir el efecto de fricción por fondo y absorción parcial de estructuras en las regiones de estudio. En lo referente al coeficiente de fricción por fondo, al carecer de datos medidos ha parecido aconsejable adoptar  $\Gamma = 1$ , esto es, fricción nula.

Este coeficiente no modifica apreciablemente los resultados de propagación de oleaje de viento, si bien magnifica las amplitudes en el estudio de oscilaciones de largo período cuando éste coincide con un período resonante.

#### 4.2.2 DISEÑO DE LAS MALLAS NUMÉRICAS

En este apartado se describen los pasos que son necesarios seguir para un diseño adecuado del dominio numérico que represente la geometría de cada configuración a analizar.

El dominio numérico debe obedecer a los condicionantes propios del modelo que se utiliza, a las dimensiones espaciales del ámbito de estudio y al oleaje que se propagará dentro de éste.

Para la definición del contorno portuario MSP se utiliza el archivo topográfico. Se considera como contorno físico, en tanto en cuanto la calidad del archivo CAD aportado (*Ilustración 4*) lo permite, la curva de nivel con cota +0.0. En el caso de paredes verticales, estas se definen con la máxima precisión posible, al tratarse de los contornos más determinantes en lo que a reflexiones se refiere.



Además del contorno portuario y costero definido para cada alternativa, el contorno MSP se completa con la línea o polígono de generación de oleaje, tradicionalmente conocido como “corona de generación” que, como su propio nombre indica, será por donde el programa MSP introduzca el oleaje monocromático generado. Para la correcta definición de esta parte se tienen en cuenta de manera general las siguientes consideraciones:

- Posición del punto DOW que servirá como forzamiento o input de espectros para la reconstrucción del oleaje.
- Rango direccional del oleaje en la zona objeto de estudio, de tal manera que el contorno dé cabida a todas ellas.

Además de crear este contorno abierto para el tratamiento especial del forzamiento u oleaje de entrada como input del modelo, adicionalmente se deben seleccionar los coeficientes de reflexión que deberán variar de una zona a otra de los contornos en función de la tipología que representan.

Dentro del diseño de los dominios computacionales, se debe tener en cuenta los criterios de eficiencia numérica y de optimización de recursos, para de esta forma poder contar con un catálogo extenso de casos de agitación portuaria.

A la hora de aplicar los modelos numéricos, un condicionante importante es el tiempo computacional. Es necesario llegar a un equilibrio entre la resolución necesaria exigida al modelo para obtener resultados satisfactorios y las limitaciones computacionales.

El modelo MSP es una ecuación 2-D resuelta en horizontal (considerando un promedio de los procesos en la vertical) y debe ser resuelta con unas apropiadas condiciones de contorno. El dominio de interés debe ser discretizado y resuelto simultáneamente y el tamaño de los elementos debe garantizar alcanzar un mínimo de 10 nodos para la mínima longitud de onda a ser simulada. Esto hace que el coste computacional del modelo sea elevado.

El modelo MSP trabaja con una malla adaptativa en elementos finitos (MEF) triangulares no regulares y no estructurados. La malla permite optimizar los recursos que el modelo MSP requiere (memoria CPU), ya que los nodos y elementos de la malla en elementos finitos, se adaptan a los contornos geométricos del puerto y a las cotas batimétricas correspondientes, concentrando de esta forma un mayor número de elementos para las zonas más someras del dominio (periodos de ola más pequeños) y relajando la malla para las zonas más profundas. Es importante asegurarse de que la malla generada permita evaluar de forma adecuada el mínimo periodo de onda.

En este caso, debido a los requerimientos computacionales y al clima marítimo en la zona, se ha decidido establecer una solución límite de resolución para la agitación del oleaje con períodos iguales y superiores a los 3 segundos, por lo que no se tiene en cuenta la energía espectral para frecuencias superiores (periodos menores). No obstante, tal como se

extrae del análisis de la Figura 3.6, la frecuencia de presentación de periodos menores a 3 segundos es muy baja (inferior al 0.05% del tiempo).

Para cada alternativa de estudio se han creado dos versiones de la misma malla o dominio, conservando los mismos contornos costeros y portuarios, pero considerando distintos periodos representativos para su diseño. De esta forma se optimizan recursos computacionales y se asegura una adecuada reproducción de la propagación del oleaje en sus correspondientes frecuencias.

#### 4.2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE REFLEXIÓN

Una vez definido el contorno del puerto, se procede a asignar un coeficiente de reflexión, por defecto el programa MSP asigna 0.5 para todos los contornos.

Este debe ser modificado ya que dichos coeficientes deberán obedecer a la física de la reflexión y en función de la tipología del contorno. En términos generales, se recomiendan los siguientes coeficientes:

- 0=agua
- 0.05-0.2=playa
- 0.3-0.5=dique en talud de materiales sueltos
- 0.6-0.7=acantilado
- 0.9-a 1.0=dique vertical

El proyecto contempla los siguientes elementos principales:

- Dique exento vertical: dique en forma de arco de 1018 m de longitud, formado por cajones de hormigón apoyados sobre banquetas de todo-uno de cantera.
- Contradique vertical sur: situado al abrigo del dique exento, en la bocana Sur de la dársena deportiva. Constituido por un cajón de hormigón apoyado sobre banqueta de todo-uno de cantera.
- El cierre por el lado de la dársena se realizará con un talud de escollera coronado por una viga de borde.

Así se ha asignado 0.9 al dique exento vertical y 0.3 al contradique vertical sur.

Dichos coeficientes se pueden observar en las siguientes ilustraciones:

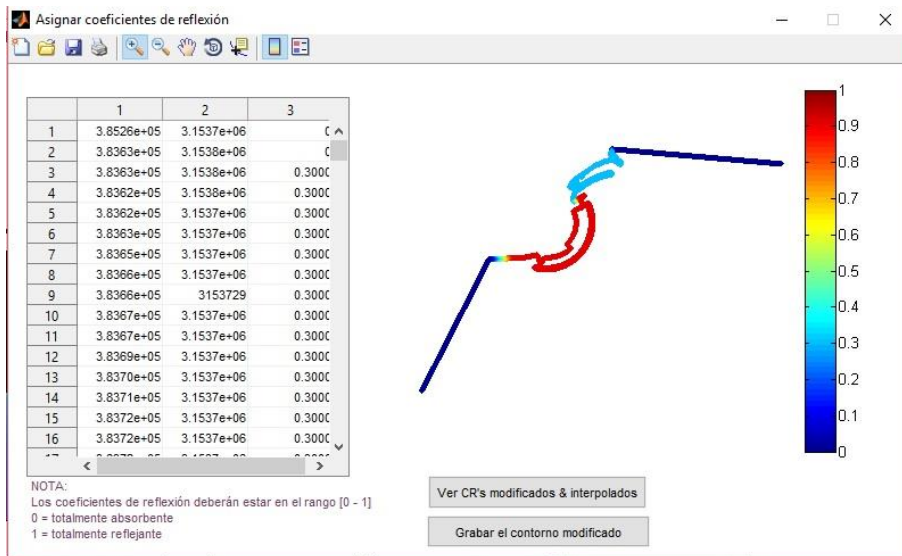


Ilustración 17. Coeficientes de reflexión modificados e interpolados

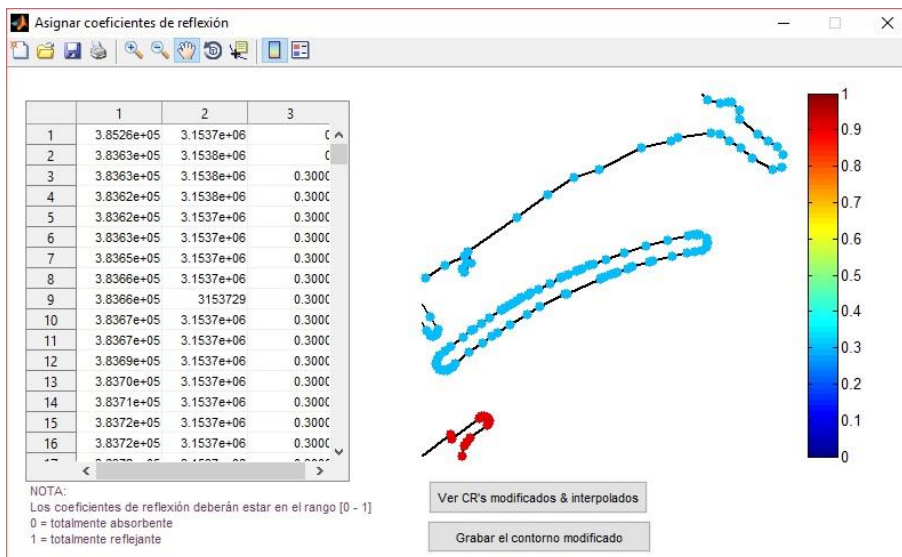


Ilustración 18. Coeficientes de reflexión en el contradique vertical sur

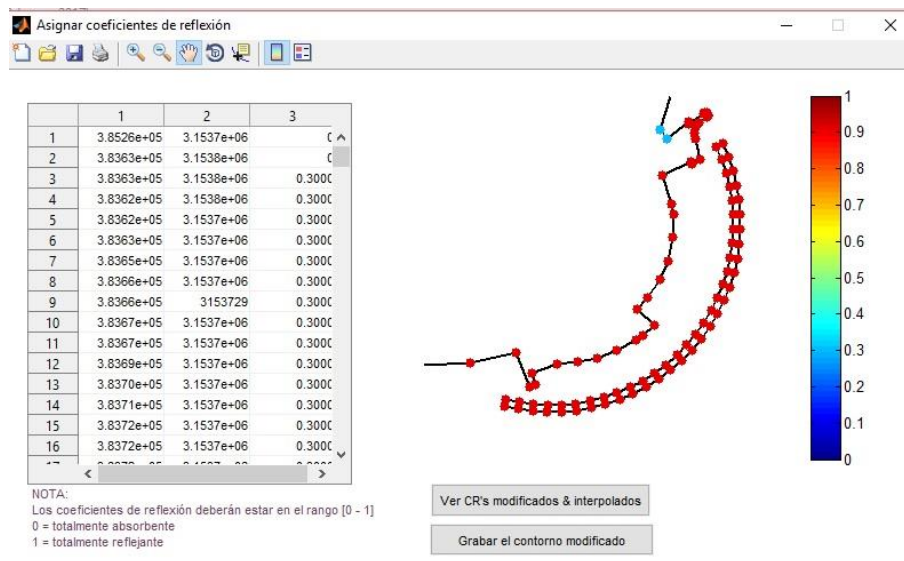


Ilustración 19. Coeficientes de reflexión en el dique exento vertical en forma de arco

#### 4.2.4 APLICACIÓN DEL PROGRAMA MSP: ESTADO ACTUAL

Se describe, junto con imágenes, los pasos seguidos por la autora, para ejecutar y propagar cada uno de los estados de mar planteados, utilizando el programa MSP.

El primer paso a realizar consiste en cargar la batimetría (xyz. dat) y abrir el contorno portuario xy.dat, el contorno estudiado (estado actual) cuenta con diques exentos y estos deberán ser representados como bloques separados por líneas "NaN NaN" (ver Ilustración 21), modificar los coeficientes de reflexión (ver apartado 4.2.3) y guardar el nuevo contorno ya modificado como paso previo al mallador.

Hay que tener en cuenta que debe ser un polígono abierto cuyos puntos iniciales y finales definirán la línea por donde entrará el oleaje, es decir, dichos puntos deberán de estar separados para permitir que el oleaje entre por dicha abertura.

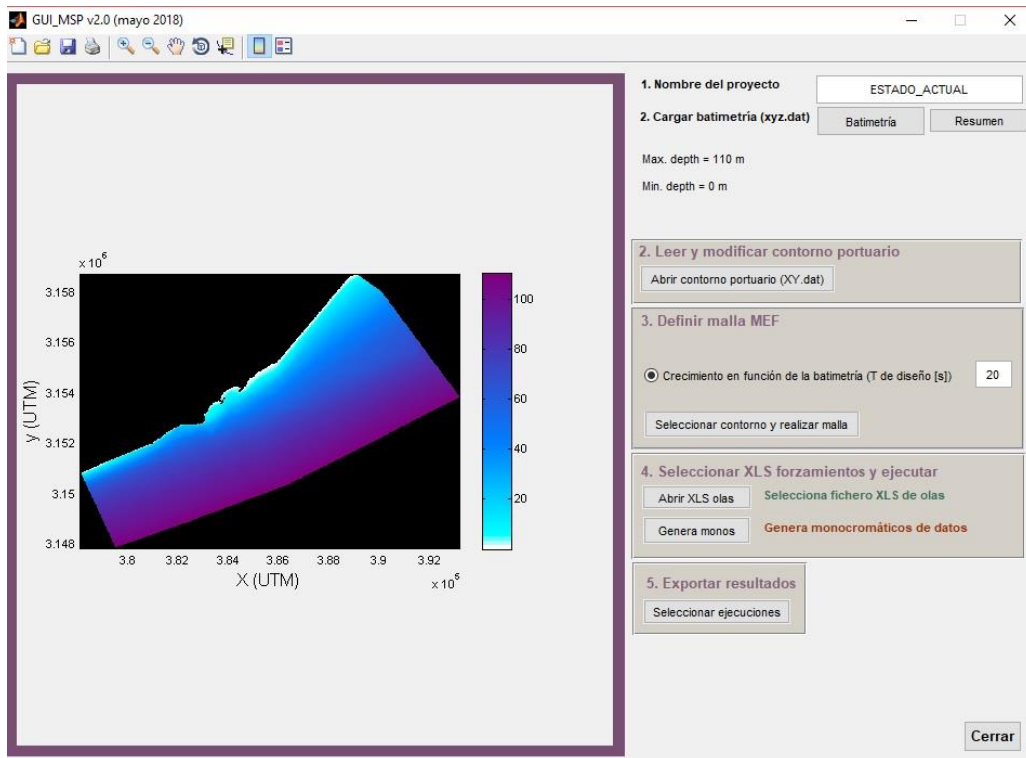


Ilustración 20. Ventana ejecutable del programa MSP

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
383241.4083	3152846.6482			
383214.3652	3152823.3428			
383199.5042	3152812.7102			
383153.5239	3152786.7138			
383107.3753	3152769.2402			
383061.1042	3152759.2584			
383011.0909	3152755.9762			
382950.3713	3152732.4277			
382959.8624	3152706.9401			
382944.7864	3152700.9792			
382913.9465	3152781.4850			
382803.8216	3152758.6378			
382654.3549	3152749.0192			
382454.6651	3152742.6823			
381805.2127	3151471.4874			
NaN	NaN			
382917.6818	3152647.2958			
382884.0899	3152654.7287			
382887.7086	3152671.0831			
382920.6616	3152663.7917			
382954.1820	3152659.0795			
382987.9679	3152656.9970			
383021.8133	3152657.5568			
383055.5118	3152660.7556			
383088.8580	3152666.5737			
383121.6487	3152674.9759			
383153.6838	3152685.9107			
383184.7683	3152699.3117			
383214.7124	3152715.0971			

Ilustración 21. Definición del contorno portuario



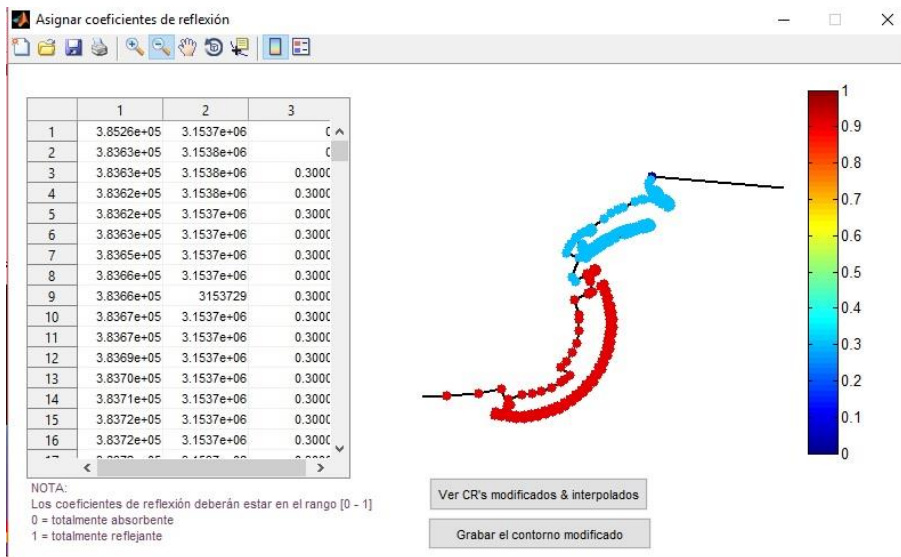


Ilustración 22. Coeficientes de reflexión

Una vez dibujado el contorno, se ha de definir la malla MEF, para mallar adecuadamente se deberá tener en cuenta el periodo T de diseño: cuanto más pequeño sea el periodo representativo del mallado T más nodos generará, mejor definida estará la malla pero más tardará en mallar y en ejecutar cada oleaje.

En el presente estudio se ha considerado para todos los casos un periodo de  $T = 5$  segundos y una profundidad mínima de 5 m.

```

C:\Users\HP\Desktop\TFM-ASCI\MSP_V2.0_2010b-64bits-11062018_SP.exe
estimating local geometry Feature size
quadtree decomposition
-> Adaptación al terreno = 25%
-> Adaptación al terreno = 60%
-> Adaptación al terreno = 50%
-> Adaptación al terreno = 90%
-> Adaptación al terreno = 88.5714%
-> Adaptación al terreno = 96.6667%
-> Adaptación al terreno = 98.2432%
-> Adaptación al terreno = 99.1852%
-> Adaptación al terreno = 99.6776%
-> Adaptación al terreno = 99.9046%
-> Adaptación al terreno = 99.9529%
-> Adaptación al terreno = 99.9785%
-> Adaptación al terreno = 100%
-> Adaptación al terreno = 100%
-> Adaptación al terreno = NaN%
forming element size function
triangulating quadrans
placing Boundary Nodes
smoothing Boundaries
initialising Mesh
iteration   Convergence (%)
1           2.0
2           0.0
3           4.4
4           6.4
5           32.4
6           30.6
7           55.4
8           50.9
9           95.7
10          100.0
Time: 1.084843750000000e+002
Triangles: 267178
Nodes: 135292
Mean_quality: 0.967408315995906
Min_quality: 0.686707893662610
-> Grabando el fichero "MEF_pack.mat"
Dibujando la malla MEF...
In mallado... empezando a interpolar...
Interpolando la batimetría...
  
```

Ilustración 23. Pantalla MS-DOS ejecutando malla MEF



Una vez que se haya ejecutado la malla MEF con sus respectivas gráficas, se ejecutan los N=300 estados de mar (lectura del oleaje previa), dicho paso supone un esfuerzo computacional.

Al ejecutar dicho estado de mar, se desencadena el proceso de ejecución del modelo MSP:

1. Muestra una imagen en el mapa del dominio numérico que representa los nodos por longitud de onda nXL.
2. Tras la simulación y después de mostrar el mapa nXL, en la Pantalla MS-DOS aparecerá la evolución de la ejecución del modelo MSP.

Una vez ejecutado todo, se crean 300 carpetas con sus respectivos gráficos, ficheros que definen contornos, coordenadas y elementos de malla MEF, y script en MATLAB que permite dibujar los mapas de resultados con base en ficheros MSP y coordenadas UTM.

	Por ejecutar	Ejecutado	ID	yy	mm	dd	HH	MM	SS	Hs(m)	Tp(s)	Dir(°N)	Marea(m)	C
282	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_7U	1948	2	12	17	0	0	0.3490	12.0200	109.5980	0	0
283	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_7V	1948	2	12	18	0	0	0.6290	14.6770	87.9890	0	0
284	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_7W	1948	2	12	19	0	0	1.0500	9.6540	195.6140	0	0
285	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_7X	1948	2	12	20	0	0	0.3960	12.7960	102.3310	0	0
286	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_7Y	1948	2	12	21	0	0	0.5660	8.8590	81.1410	0	0
287	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_7Z	1948	2	12	22	0	0	0.3780	6.1260	91.7500	0	0
288	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_80	1948	2	12	23	0	0	0.2910	5.5290	107.6670	0	0
289	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_81	1948	2	13	0	0	0	0.2090	7.5210	143.6020	0	0
290	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_82	1948	2	13	1	0	0	0.5180	7.3450	186.2410	0	0
291	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_83	1948	2	13	2	0	0	0.2970	13.2350	130.8430	0	0
292	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_84	1948	2	13	3	0	0	0.3950	4	192.1750	0	0
293	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_85	1948	2	13	4	0	0	0.8920	11.4770	90.8990	0	0
294	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_86	1948	2	13	5	0	0	2.0120	8.6310	92.3600	0	0
295	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_87	1948	2	13	6	0	0	0.5220	13.8730	67.4190	0	0
296	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_88	1948	2	13	7	0	0	1.4210	12.2290	148.0500	0	0
297	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_89	1948	2	13	8	0	0	0.2380	14.6790	120.7690	0	0
298	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_8A	1948	2	13	9	0	0	2.6310	6.6700	184.3430	0	0
299	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_8B	1948	2	13	10	0	0	1.9340	8.8450	98.9180	0	0
300	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	id_8C	1948	2	13	11	0	0	0.7620	16.9700	183.8140	0	0

Ilustración 24. Ejecución de los 300 estados de mar seleccionados

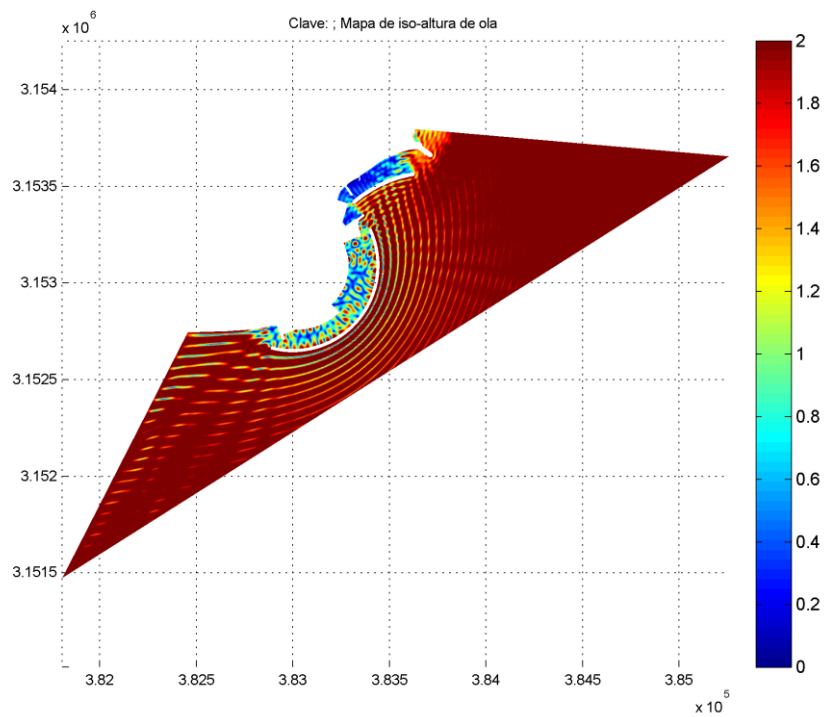


Ilustración 25. Ejemplo de mapa de altura de ola

Los resultados obtenidos, se exportan a los distintos puntos de control, seleccionados previamente en el archivo .dwg, para obtener el cuadro de interpolación.

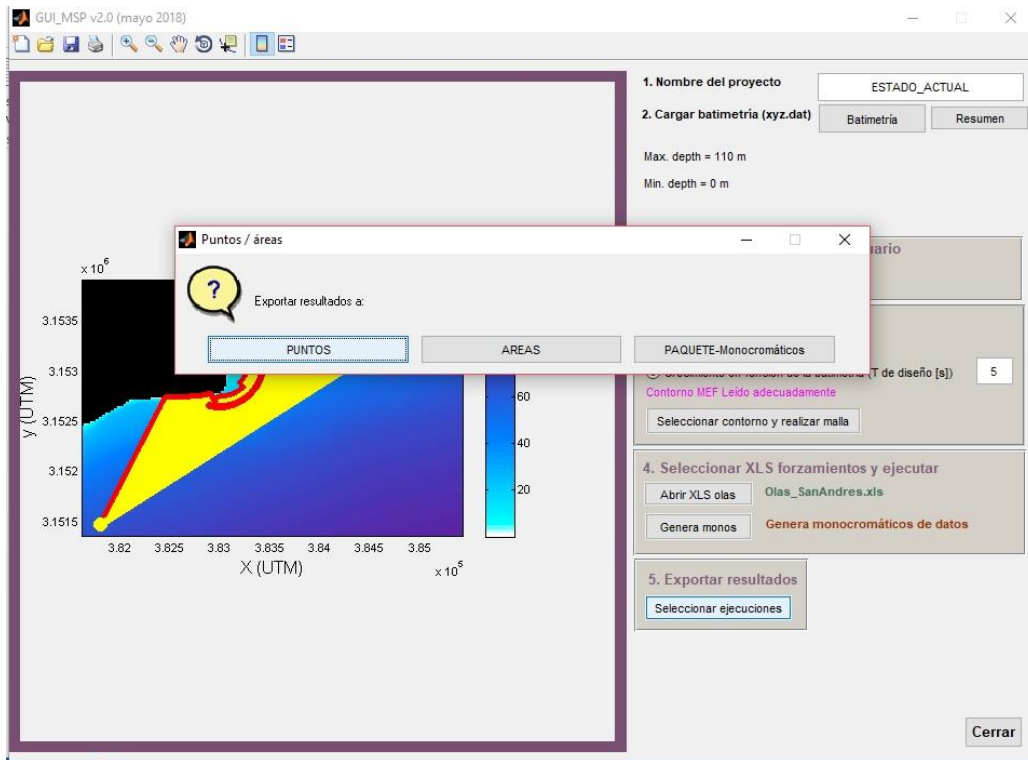


Ilustración 26. Ventana para exportar resultados a puntos de control

Por último, ejecutando script de MATLAB, se consigue propagar ese cuadro desde el exterior al interior del puerto, obteniéndose la serie construida en el interior del puerto (ver capítulo 8, script 2).

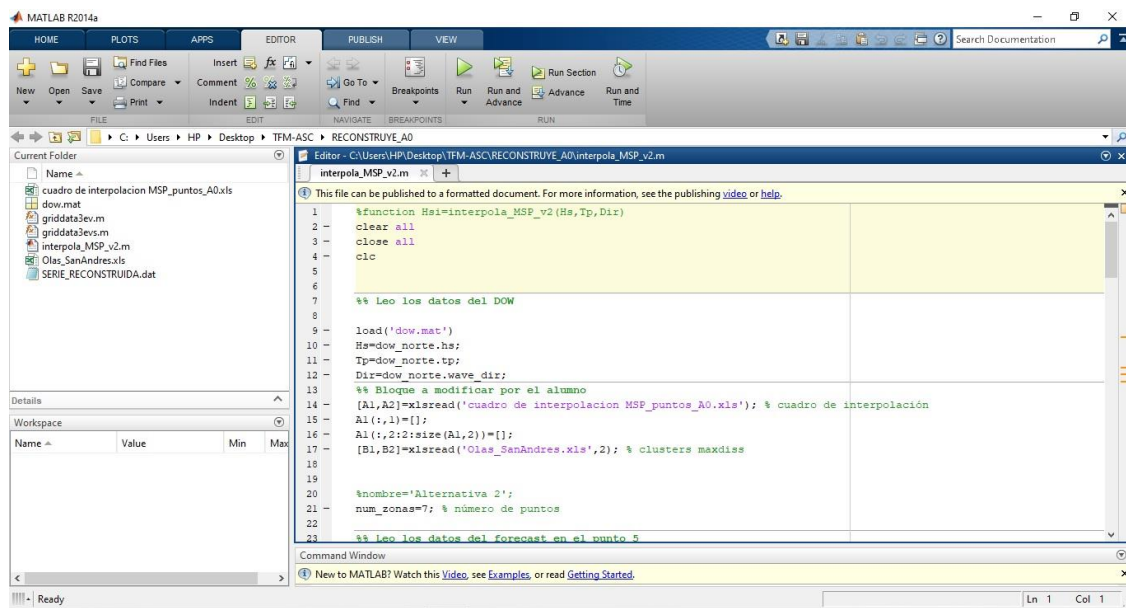


Ilustración 27. Script de MATLAB para obtener serie reconstruida en el interior del puerto

Cada uno de los pasos descritos anteriormente, se deben ejecutar para cada alternativa planteada y así analizar y comparar cada una de ellas.

#### 4.2.5 ANÁLISIS DE OPERATIVIDAD. GEOMETRÍA ACTUAL: ALTERNATIVA 0

En este apartado se muestra el estudio, realizado por la autora, de agitación de detalle considerando la situación actual, alternativa 0: configuración inicial del puerto deportivo de San Andrés con las obras de protección del frente litoral, consistentes en un dique exento paralelo al paseo marítimo, junto con un espigón perpendicular al mismo.

El objetivo de este primer análisis es comparar las horas de inoperatividad por agitación interior (siguiendo los límites de parada operativa de la ROM). De esta forma se lleva a cabo un diagnóstico sobre la influencia de las nuevas obras construidas en el frente marítimo de San Andrés y en el interior del futuro puerto.

#### ALTERNATIVA 0

Se trata de la configuración inicial del futuro puerto deportivo / pesquero de San Andrés, junto con las nuevas obras de protección del frente litoral, finalizadas recientemente, consistentes en un dique exento paralelo al paseo marítimo más un espigón perpendicular al mismo:



*Ilustración 28. Alternativa 0. Configuración inicial del puerto (color gris) y obras de protección frente a la costa de San Andrés (color naranja)*

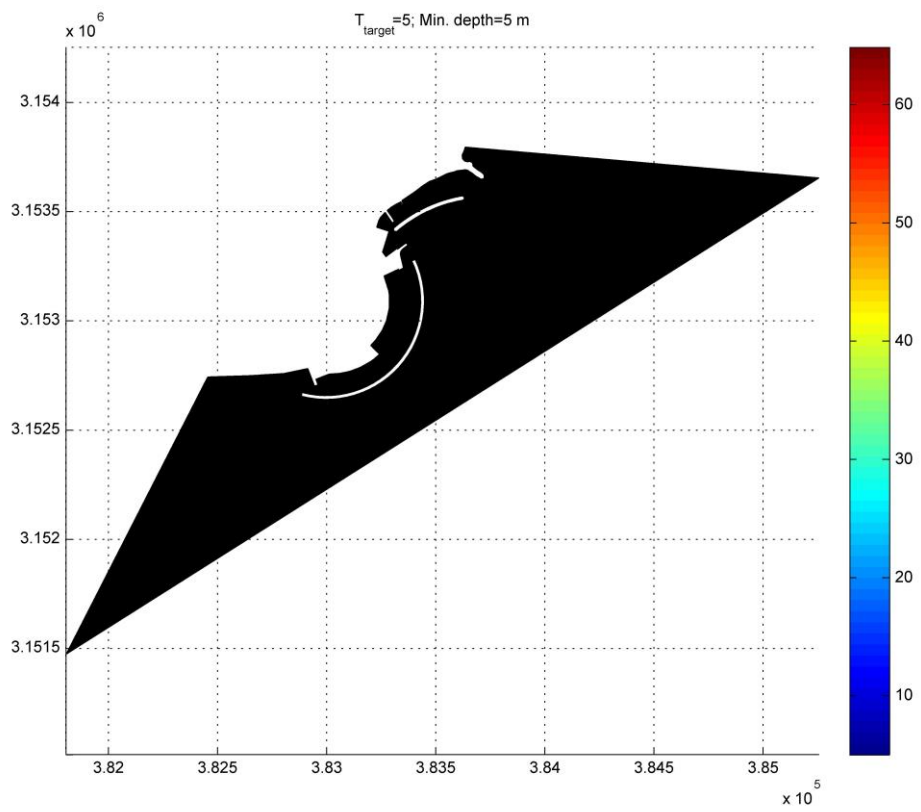


Ilustración 29. Estado actual, batimetría.

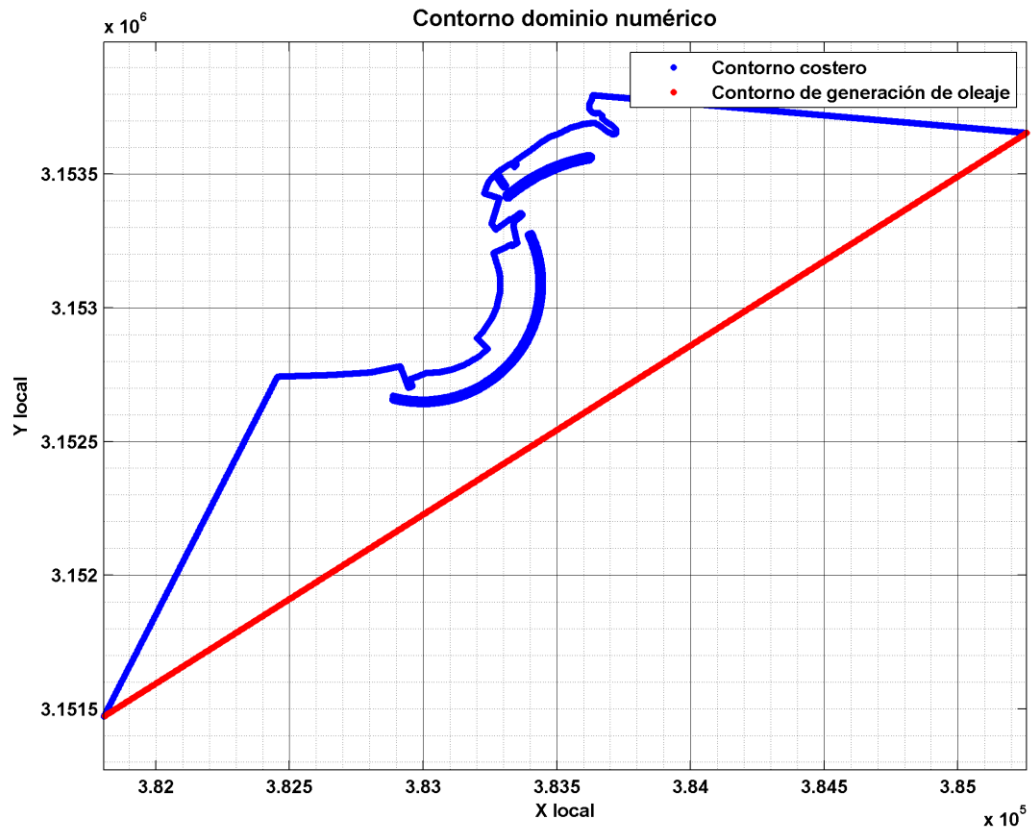


Ilustración 30. Contorno dominio numérico, estado actual

Tipologías de contorno . REFLEXIÓN.

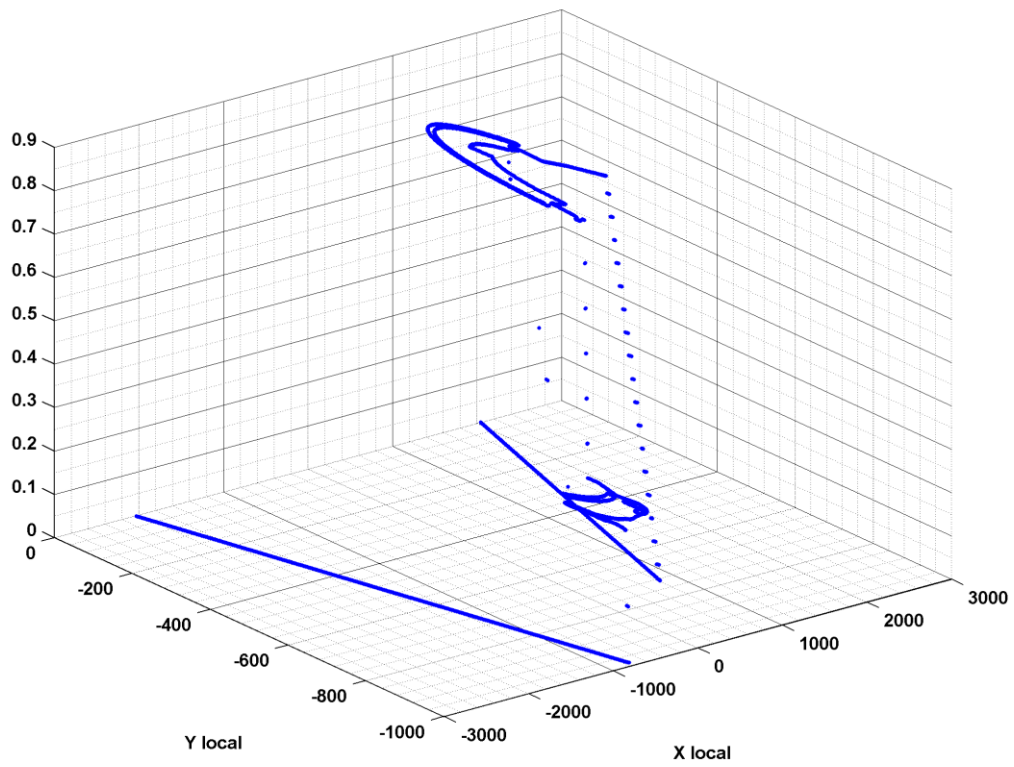


Ilustración 31. Contorno coeficientes de reflexión malla, estado actual



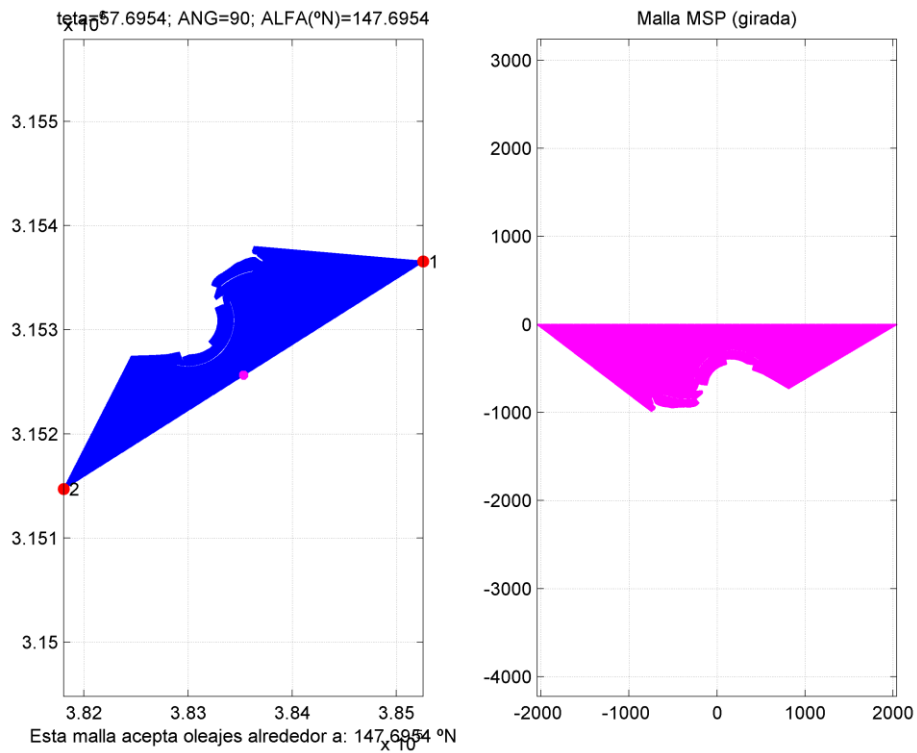


Ilustración 32. Malla Elementos Finitos, estado actual

### I. Definición de los puntos de control

Con el objetivo zonificar el tipo de uso/muelle/embarcación portuario y poder realizar un post-proceso de los resultados de agitación propagados numéricamente y reconstruidos estadísticamente, la autora ha optado por definir puntos de control según su uso portuario: deportivo o pesquero, teniendo en cuenta además el tamaño de la embarcación de cada zona de atraque.

Así, se han definido un total de siete puntos de control en el interior del puerto, para embarcaciones deportivas:



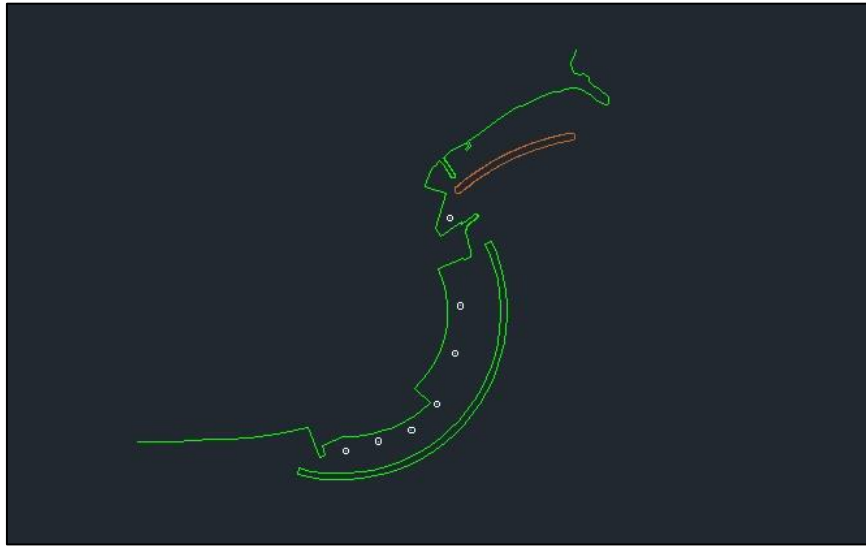


Ilustración 33. Puntos de control. Planta del puerto

Puntos de control	
Coordenadas X	Coordenadas Y
383013.5320	3152717.5627
383101.4392	3152743.9202
383191.2741	3152774.5878
383259.5298	3152843.8887
383308.5413	3152981.1219
383321.1751	3153107.6260
383293.8939	3153342.3441

Tabla 2. Puntos de control. Estado actual

## II. Criterios de operatividad definidos en la ROM 3.1-99

Con el fin de evaluar el comportamiento medio de cada alternativa analizada, y con base en los condicionantes funcionales que establece la ROM 3.1-99, se han obtenido los regímenes medios (funciones de distribución de probabilidad de altura de ola significativa  $H_s$ ), para lo que ha sido necesario llevar a cabo la reconstrucción de la serie de oleaje completa (66 años c/hora) en las distintas zonas de control pre-establecidas en el interior del puerto y para cada alternativa.

### Carácter operativo de la obra

La ROM 3.1-99 (“Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación”) establece los criterios de operatividad asociados a tiempos de inoperatividad en accesos, vías de navegación, canales, bocanas y áreas de maniobra.

Dicha ROM recoge, en su apartado 8.2, los tiempos medios aceptables de cierre de un área portuaria, en función de las características del área (acceso, atraques, etc.) y del tipo de puerto y terminal. Estos tiempos se recogen en la *tabla 3* adjunta.

Según la *tabla 3*, se considera un tiempo de inoperatividad de 20 horas/año para este tipo de embarcaciones.

TABLA 8.2. TIEMPOS MEDIOS ACEPTABLES DE CIERRE DE UN AREA POR PRESENTARSE CONDICIONES CLIMATICAS ADVERSAS (SUPERIORES A LAS ESTABLECIDAS COMO LIMITES DE OPERACION PARA LOS BUQUES DE PROYECTO)	
CARACTERISTICAS DEL AREA	Tiempos de inoperatividad en horas, por todos los conceptos <sup>(1) (2)</sup>
A. Areas de buques en tránsito (accesos, vías de navegación, canales, bocanas, áreas de maniobras, etc.)	
1. Puertos de interés general	
— Areas abiertas a todo tipo de barcos	200 h. año 20 h. mes
— Areas abiertas a Embarcaciones pesqueras y deportivas (3)	20 h. año 4 h. mes
2. Puertos de refugio	
— Areas abiertas a todo tipo de barcos	300 h. año 30 h. mes
— Areas abiertas a Embarcaciones pesqueras y deportivas (3)	20 h. año 4 h. mes
3. Otros puertos	
	400 h. año 40 h. mes
4. Terminales especializados	
— Pasajeros, Contenedores, Ferries y otros terminales que operen con líneas regulares	200 h. año 20 h. mes
— Graneles de cualquier tipo y otros terminales que no operen con líneas regulares	600 h. año 60 h. mes

Tabla 3. Tiempos medios de cierre (tabla 8.2 de la ROM 3.1-99).

### Condicionantes límites de operación

Con el objetivo de establecer los condicionantes límites de operación en el caso de embarcaciones tipo deportivo y pesquero, se ha utilizado asimismo la R.O.M. 3.1-99, *tabla 4* adjunta.

TABLA 8.1. CONDICIONES LIMITES DE OPERACION DE BUQUES EN MUELLES Y PANTALANES			
	Velocidad absoluta del viento $V_{10.1 \text{ min}}$	Velocidad absoluta de la corriente $V_{0.1 \text{ min}}$	Altura de ola $H_s$
<b>1. Atraque de buques</b>			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	17.0 m/s	1.0 m/s	2.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	10.0 m/s	0.1 m/s	1.5 m
<b>2. Paralización operaciones carga y descarga (para equipos convencionales)</b>			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle			
— Petroleros			
< 30.000 TPM	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m
30.000-200.000 TPM	22 m/s	1.5 m/s	2.0 m
> 200.000 TPM	22 m/s	1.5 m/s	2.5 m
— Graneleros			
Cargando	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m
Descargando	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m <sup>3</sup>	22 m/s	1.5 m/s	1.2 m/s
> 60.000 m <sup>3</sup>	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores			
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	1.5 m/s	0.6 m
• Acciones en sentido transversal al muelle			
— Petroleros			
< 30.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.0 m
30.000-200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.2 m
> 200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.5 m
— Graneleros			
Cargando	22 m/s	0.7 m/s	1.0 m
Descargando	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m <sup>3</sup>	16 m/s	0.5 m/s	0.8 m
> 60.000 m <sup>3</sup>	16 m/s	0.5 m/s	1.0 m
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores			
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	0.7 m/s	0.4 m
<b>3. Permanencia de buques en muelle</b>			
— Petroleros y Transportadores de Gases Licuados			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	30 m/s	2.0 m/s	3.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	25 m/s	1.0 m/s	2.0 m
— Transatlánticos y Cruceros (2)			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s	0.7 m/s	0.7 m
— Embarcaciones deportivas (2)			
• Acciones en sentido longitudinal al muelle	22 m/s	1.5 m/s	0.4 m
• Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s	0.7 m/s	0.2 m
— Otro tipo de buques	Limitaciones impuestas por las cargas de diseño de los muelles		

Tabla 4. Condiciones límites de operación de buques en muelles y pantalanes (tabla 8.1 de la R.O.M. 3.1-99).



La ROM, para el caso de dársena deportiva, establece dos límites:

- Acciones en sentido transversal al muelle-> Hs<sub>lim</sub>=0.2 metros
- Acciones en sentido longitudinal al muelle-> Hs<sub>lim</sub>=0.4 metros

Criterios de operatividad ROM 3.1-99	
Dársena deportiva	Hs límite ROM (m)
Acciones en sentido transversal	0.2
Acciones en sentido longitudinal	0.4

Tabla 5. Criterios de agitación máxima y operatividad establecidos por la ROM 3.1-99.

### III. Análisis de operatividad portuaria

Al estudiar el tanto por ciento de horas al año en el que se supera la altura de ola establecida por la ROM, se puede analizar la operatividad del puerto (ver capítulo 8, script 3).

Para el caso de puerto deportivo con una altura de ola significativa límite de 0.2 metros, se obtienen los siguientes resultados:

Puntos	% Horas año > Hs <sub>lim</sub>	No.- horas al año > Hs <sub>lim</sub>
Punto 1	51.74	4532.22
Punto 2	59.67	5227.44
Punto 3	55.98	4903.84
Punto 4	59.86	5244.13
Punto 5	53.26	4666.01
Punto 6	64.83	5678.67
Punto 7	44.20	3871.71

Tabla 6. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros

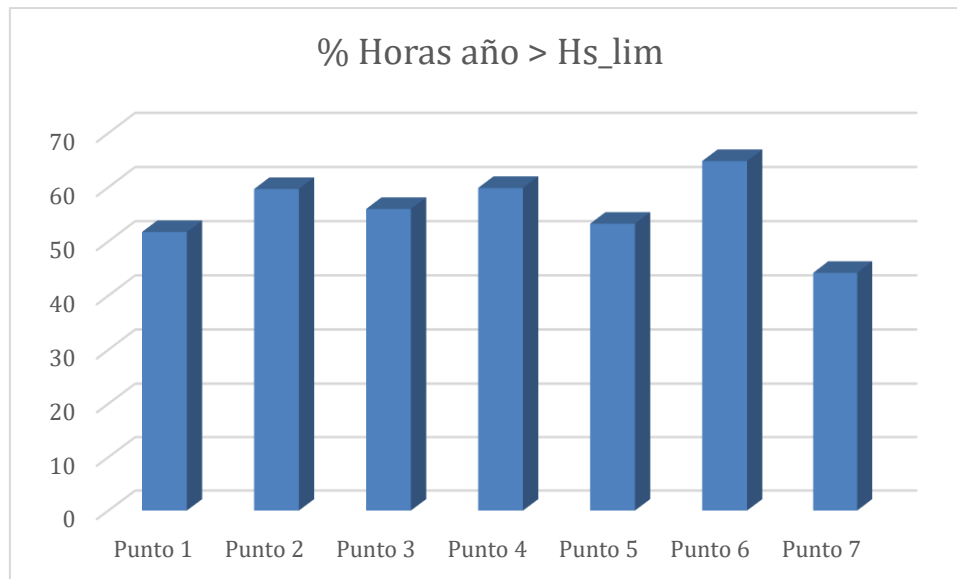


Tabla 7. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros

A la vista de las tablas anteriores y que la altura de ola es restrictiva se observa que el **estado actual del puerto es muy inoperativo**, alcanzándose porcentajes de 65% de las horas al año en las que se supera la altura de 0.2 metros.

Si se estudia para una altura de ola de 0.4 metros:

Puntos	% Horas año > Hs_lim	No.- horas al año > Hs_lim
Punto 1	16.83	1474.23
Punto 2	20.38	1784.87
Punto 3	19.52	1710.14
Punto 4	20.68	1811.80
Punto 5	20.77	1819.48
Punto 6	26.85	2351.69
Punto 7	12.35	1082.27

Tabla 8. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM: 0.4 metros

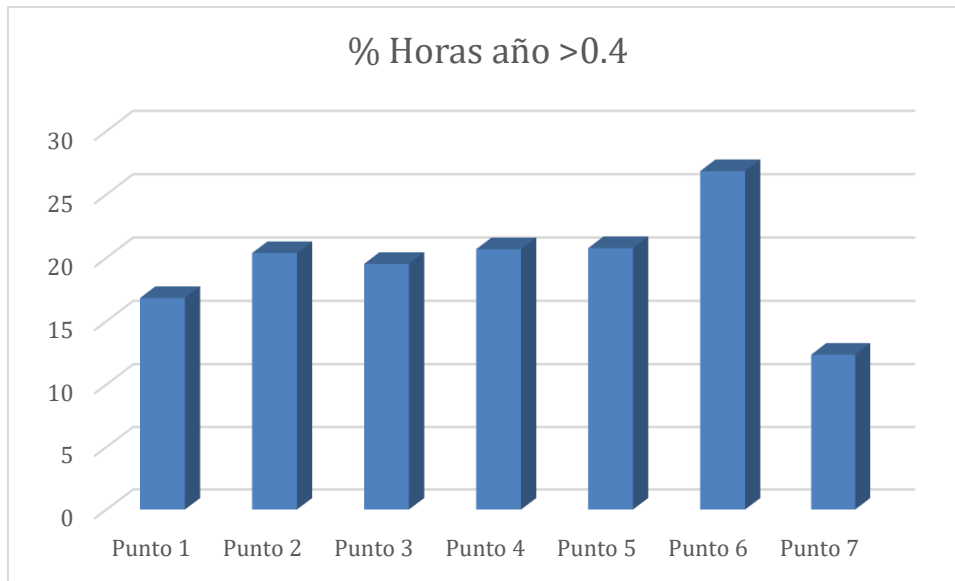


Tabla 9. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros

Al ser una altura de ola menos restrictiva que el caso anterior, el porcentaje de horas al año en las que se supera la altura de ola significativo limite se reduce considerablemente, llegando a valores menores al 15% en algunos puntos.

Si se comparan ambos porcentajes:

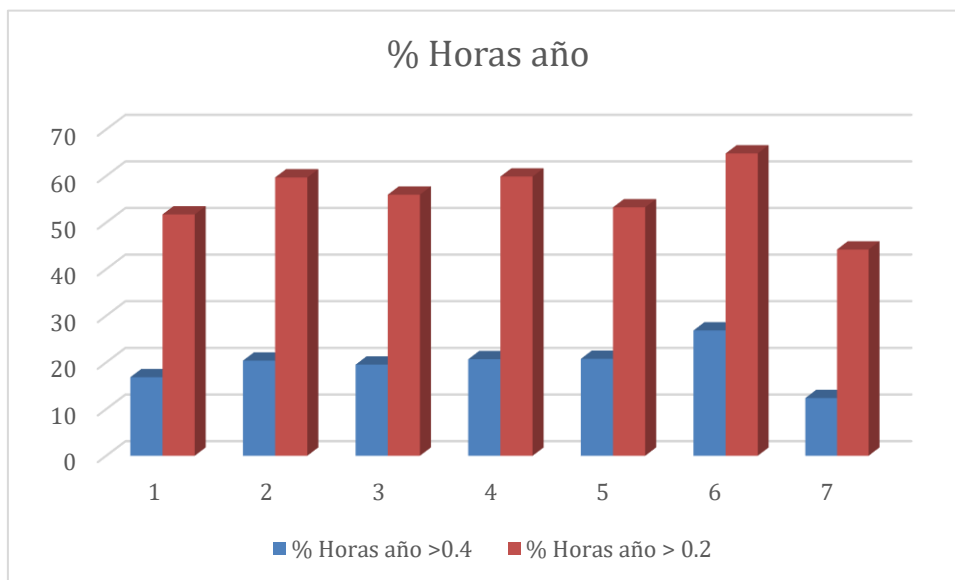


Tabla 10. Comparación de porcentajes que superan las alturas de ola limite



#### IV. Conclusiones

De este primer análisis comparativo, se puede concluir que:

- El estado actual del puerto es altamente inoperativo, tanto para los límites longitudinales como transversales de la ROM.
- Es posible que debido a la construcción de las obras de protección del frente litoral de San Andrés se produce un empeoramiento generalizado en las condiciones de agitación interior del puerto.
- Las agitaciones máximas se producen, sobre todo para los oleajes provenientes del E y ESE, con un aumento general del 30 y 15% respectivamente.
- Estos oleajes entran al puerto por difracción y reflexión con la infraestructura de la dársena, siendo muy difícil su disipación una vez dentro del puerto debido a la presencia de contornos reflejantes (cajones verticales).
- Para el resto de direcciones apenas hay diferencias en el comportamiento de agitación interior.
- Los puntos que más se ven afectados son los 4,5 y 6 más próximas a la bocana norte del puerto.





## 5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA AGITACIÓN

Una vez analizada la operatividad del puerto deportivo de San Andrés para la alternativa 0 (estado actual) de protección del frente litoral, la autora procede a plantear las actuaciones para minimizar los efectos negativos que se provocan sobre la agitación interior del puerto.

El objetivo de las nuevas alternativas es conseguir unas condiciones de agitación interior iguales o mejores que las existentes. Además, se pretende que la solución adoptada no empeore las condiciones que presenta actualmente el frente litoral de San Andrés frente a inundación por oleaje.

Para poder abordar de forma ágil este problema, se propone un estudio preliminar por alternativa en donde se propaga un número limitado de oleajes monocromáticos de altura unitaria, periodos de 4 a 15 s, y direcciones provenientes del E y ESE, oleajes más conflictivos para la agitación tras la construcción del dique.

Se trata de una primera aproximación en donde se proponen distintas alternativas de actuación con el objetivo de identificar de forma rápida el funcionamiento hidrodinámico y respuesta de dicha dársena ante la acción del oleaje. Esta visualización rápida de la respuesta del puerto ante las modificaciones geométricas planteadas permite identificar las alternativas más prometedoras, aquellas alternativas que presenten una reducción mayor del oleaje agitado con respecto a la alternativa 0.

Se conciben un total de tres alternativas nuevas (alternativa 1 a 3), construidas con base en la alternativa 0, que corresponde al sistema puerto-costa que existiría inmediatamente a la construcción del nuevo puerto en su geometría original.

Para cada una de las nuevas alternativas planteadas, se realiza una comparación directa con la alternativa 0, buscando siempre establecer la mejor estrategia geométrica para reducir las horas inoperativas e intentar igualar las condiciones operativas que se alcanzarían.

Las pautas de actuación a considerar son:

- Dragar y retirar parte del dique exento construido.
- Cambiar de ubicación el puerto pesquero y diseñar una defensa que aminore los efectos de agitación.
- Modificar la configuración del puerto pesquero para poder disminuir el efecto observado.

## 5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS

Se presentan las principales características de las nuevas geometrías de estudio.

Asimismo, siguiendo las mismas consideraciones que las expuestas en el capítulo anterior para el diseño de las mallas, se muestran las mallas empleadas para cada alternativa:

### 5.1.1 ALTERNATIVA 1

Consistente en reducir a la mitad el dique exento de San Andrés.

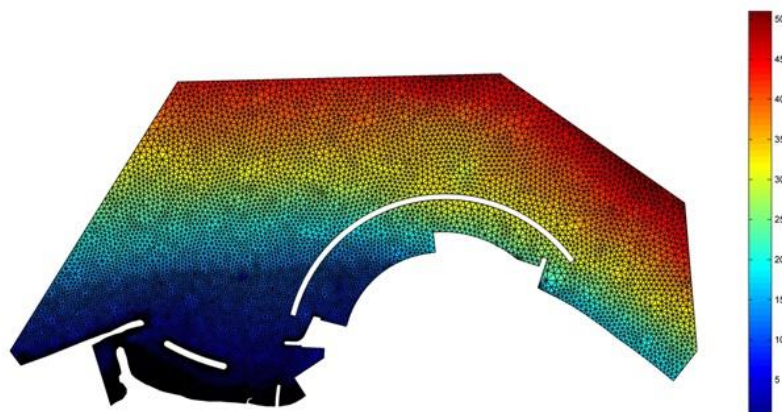
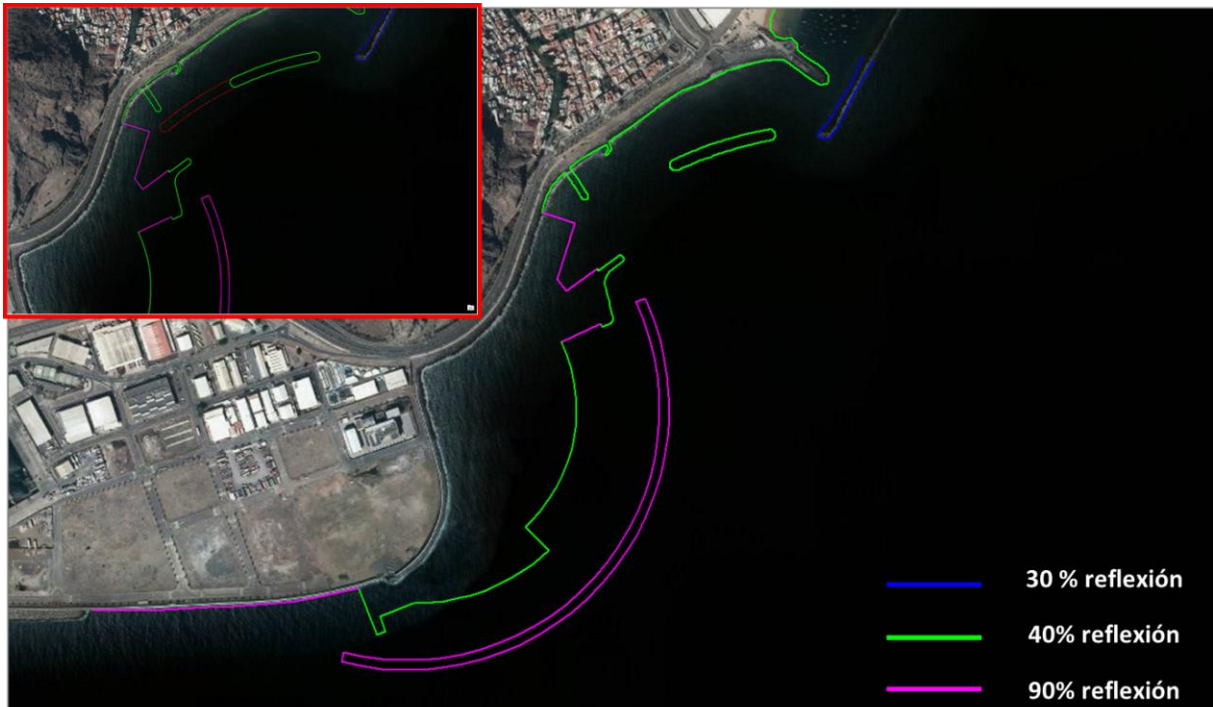


Ilustración 34. Coeficientes de reflexión, alternativa 1

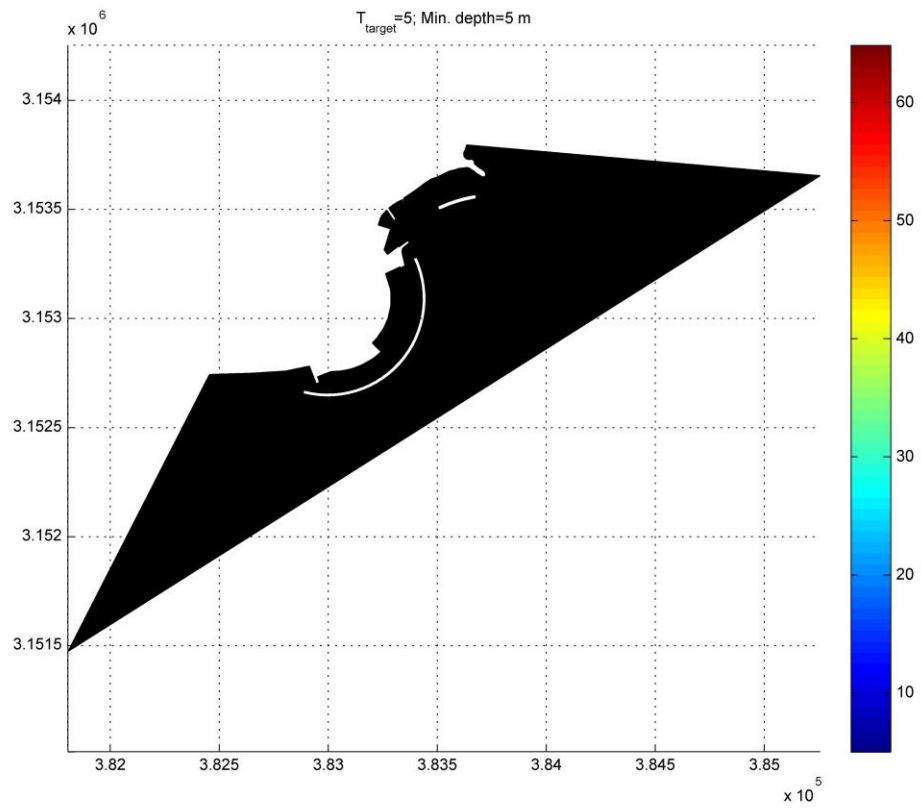


Ilustración 35. Batimetría, alternativa 1

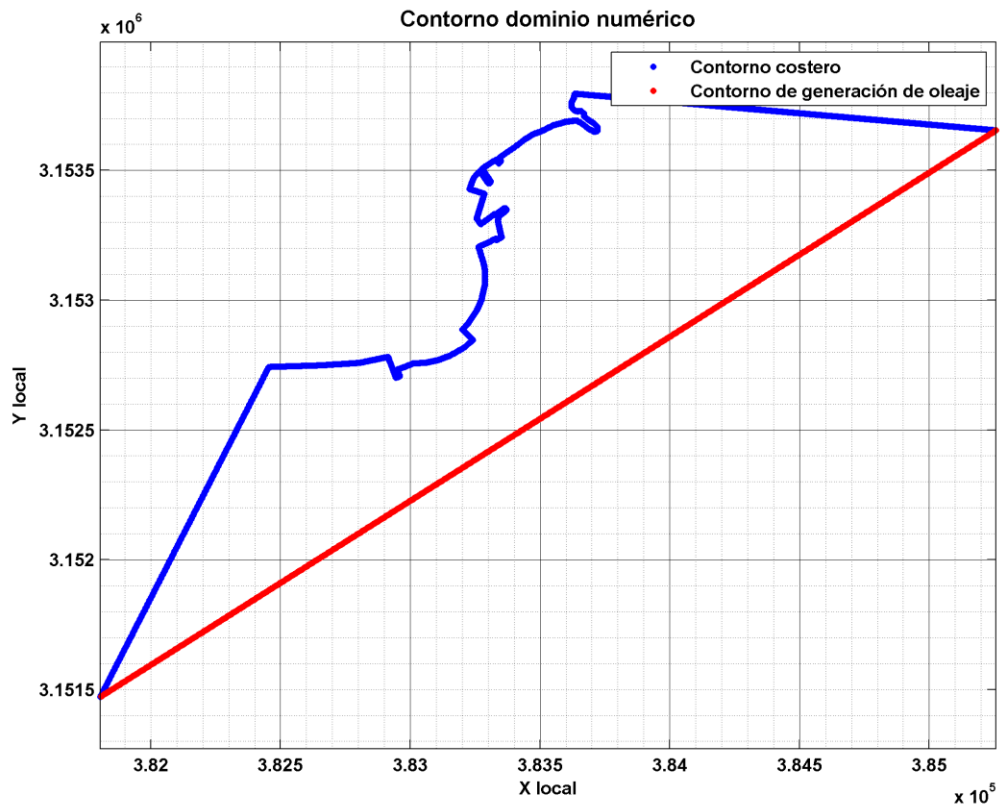


Ilustración 36. Contorno dominio numérico, alternativa 1



Tipologías de contorno . REFLEXIÓN.

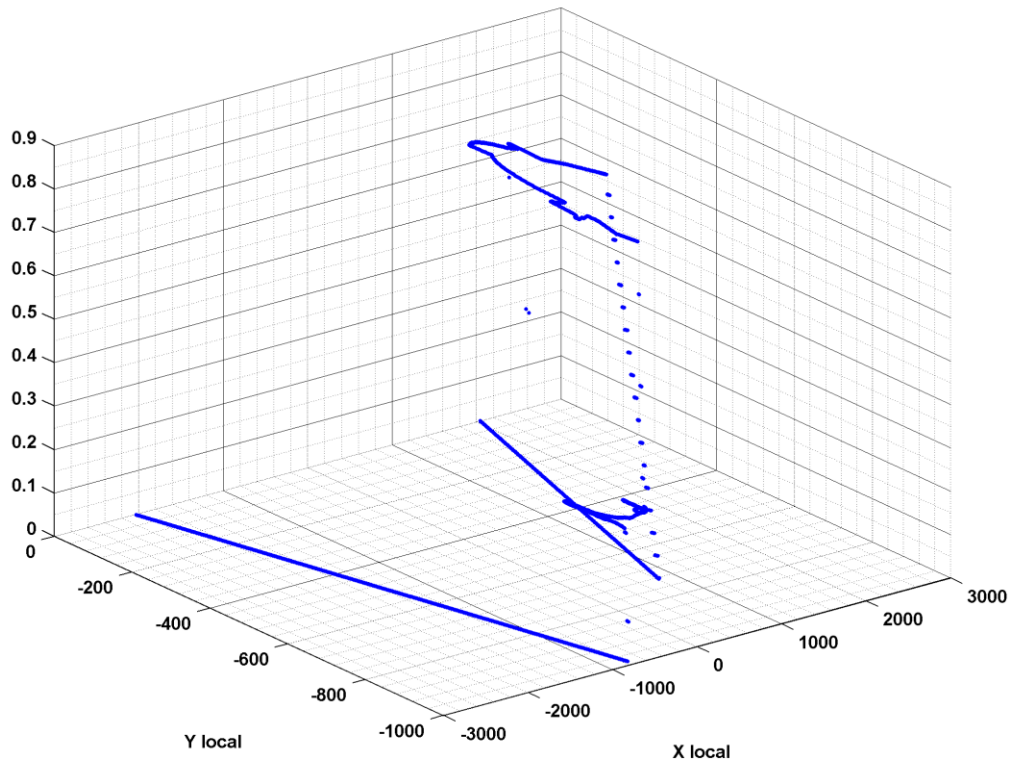


Ilustración 37. Contorno coeficientes de reflexión mallaado, alternativa 1

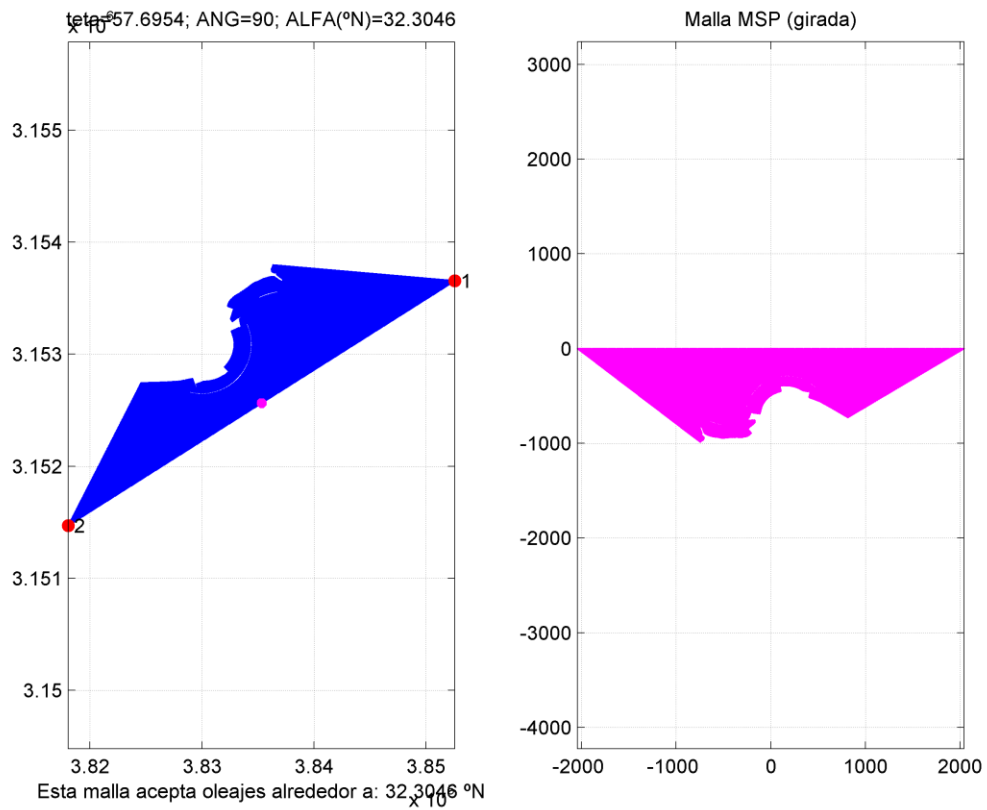


Ilustración 38. Malla Elementos Finitos, alternativa 1

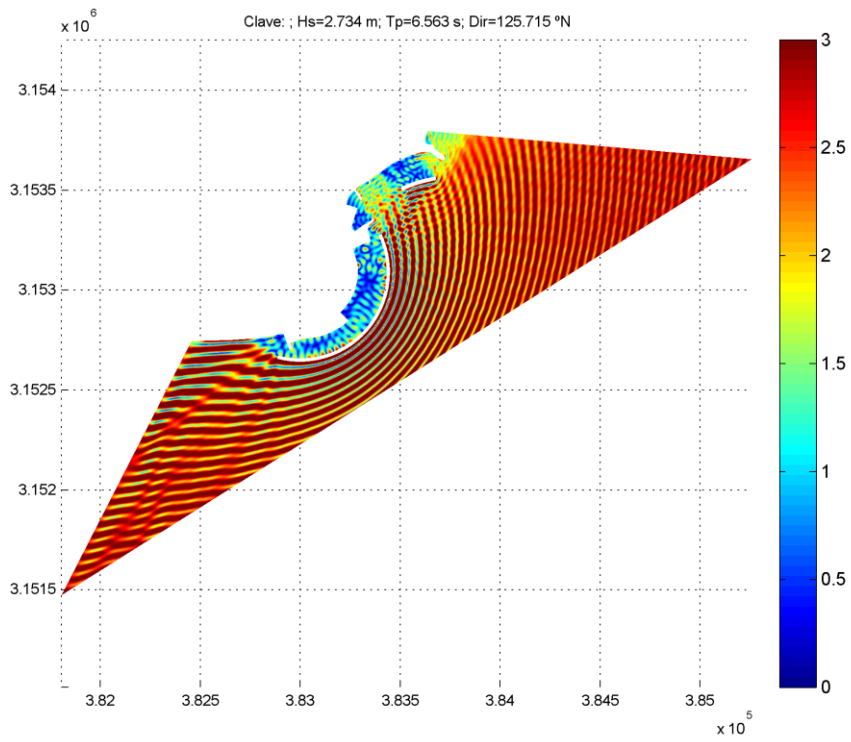


Ilustración 39. Propagación del oleaje, ejemplo de un caso de 300 ejecutados



### 5.1.2 ALTERNATIVA 2

En esta alternativa se modifica la configuración de la bocana norte, eliminando parcialmente el refugio pesquero diseñado inicialmente y dejando únicamente un contradique de escollera. Además, se alarga el dique de abrigo del puerto unos 36 m de longitud, para cumplir las recomendaciones de diseño de este tipo de infraestructuras (siguiendo la idea teórica que indica que la posición del contradique deberá localizarse aproximadamente a  $L/4$  del morro del dique de abrigo) y poder reducir así la entrada de energía de oleaje al puerto. Cabe destacar que para esta alternativa, se mantendría el punto 6 para el atraque de barcos pesqueros, no obstante, el punto 7 ya no sería operativo.

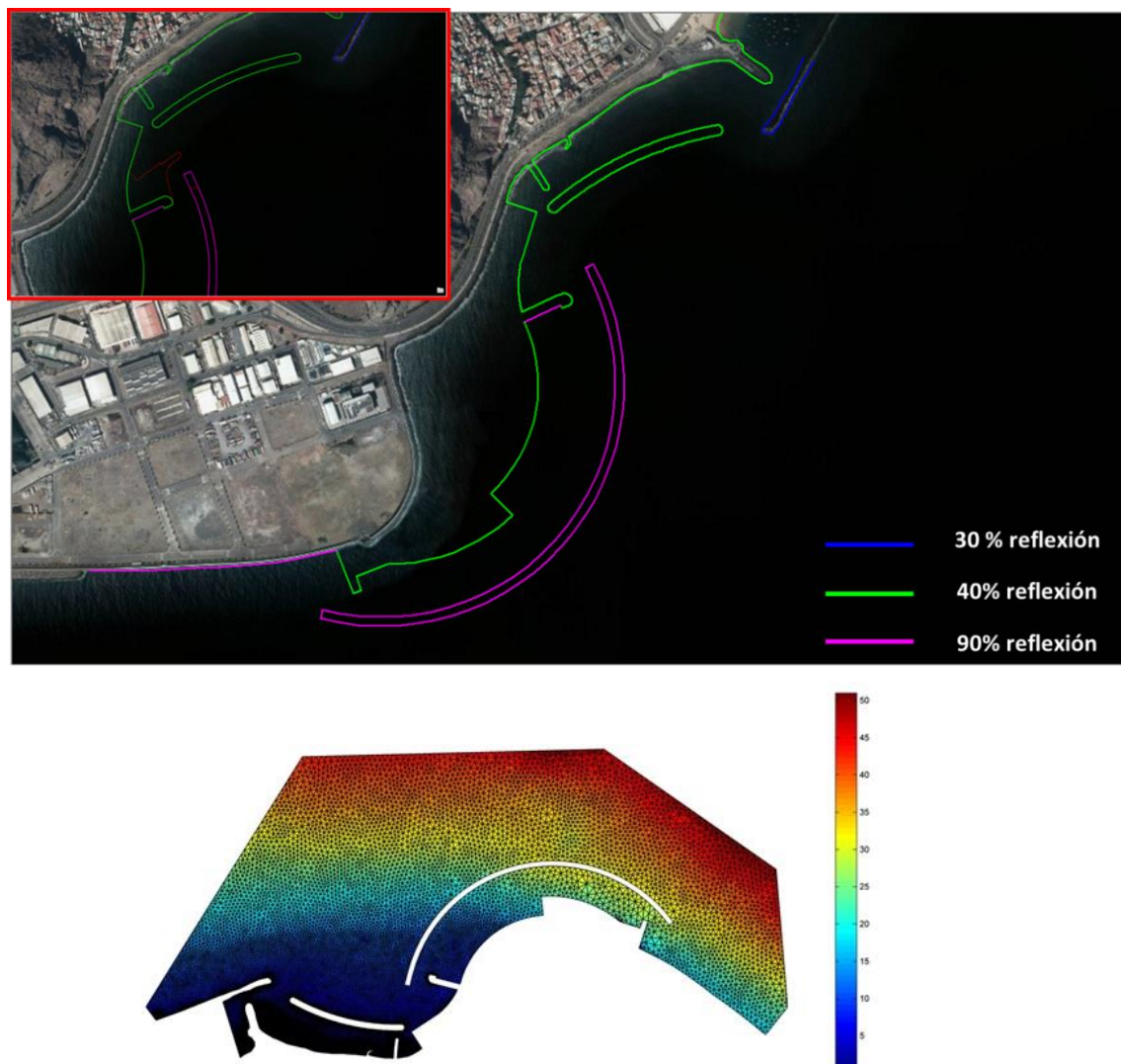


Ilustración 40. Coeficientes de reflexión, alternativa 2

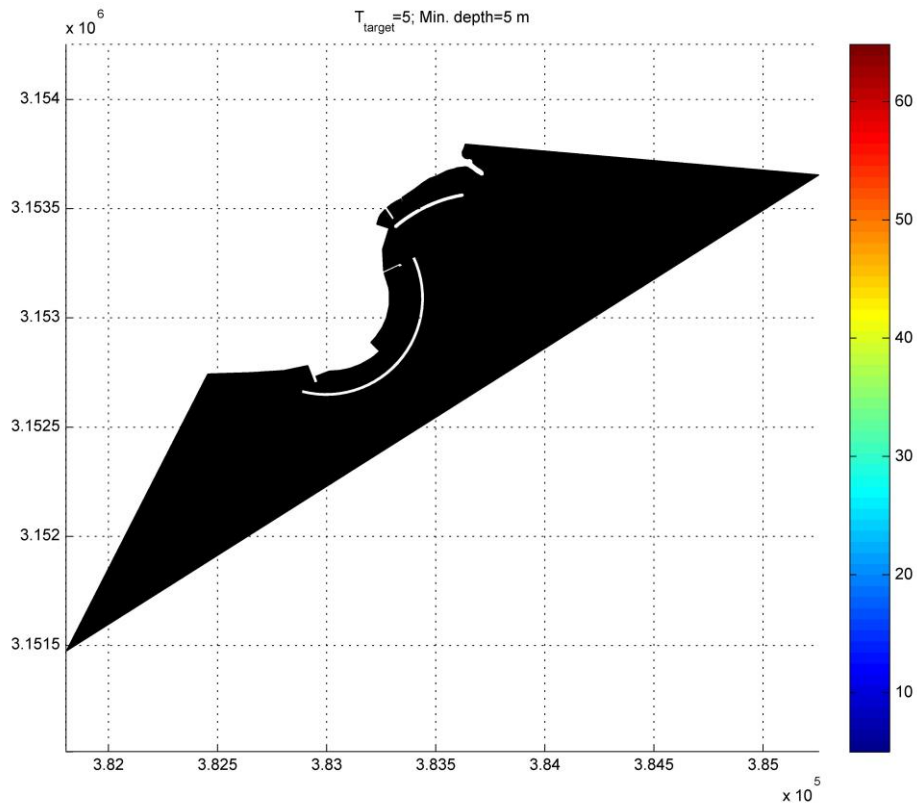


Ilustración 41. Batimetría, alternativa 2

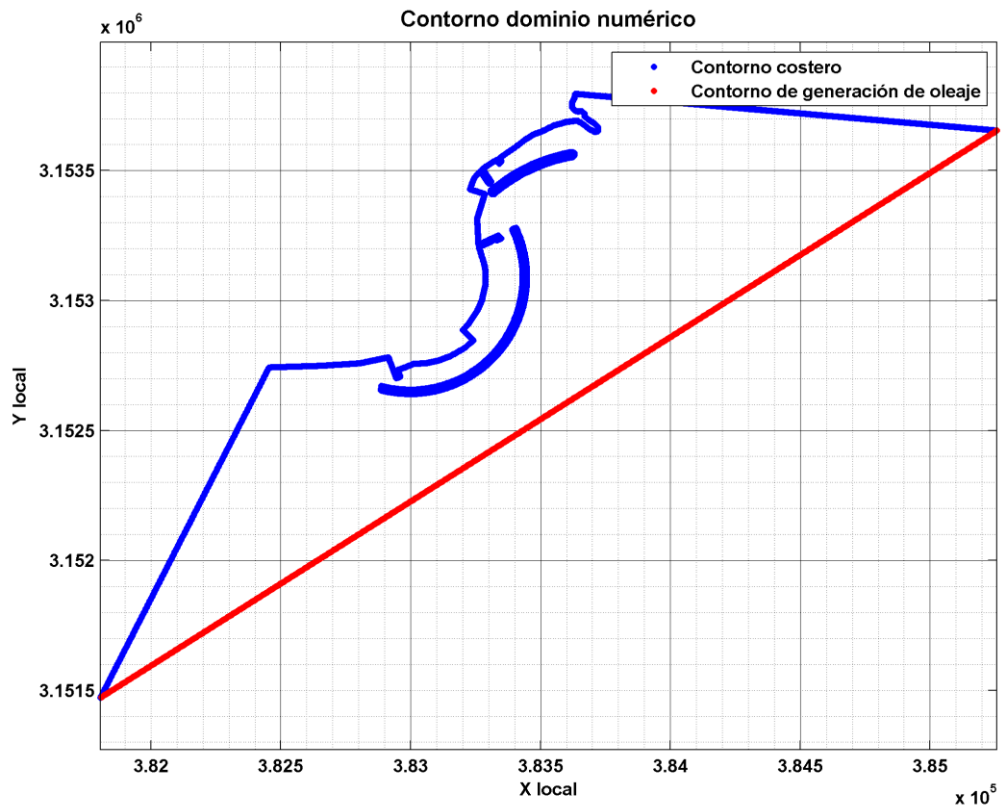


Ilustración 42. Contorno dominio numérico, alternativa 2

Tipologías de contorno . REFLEXIÓN.

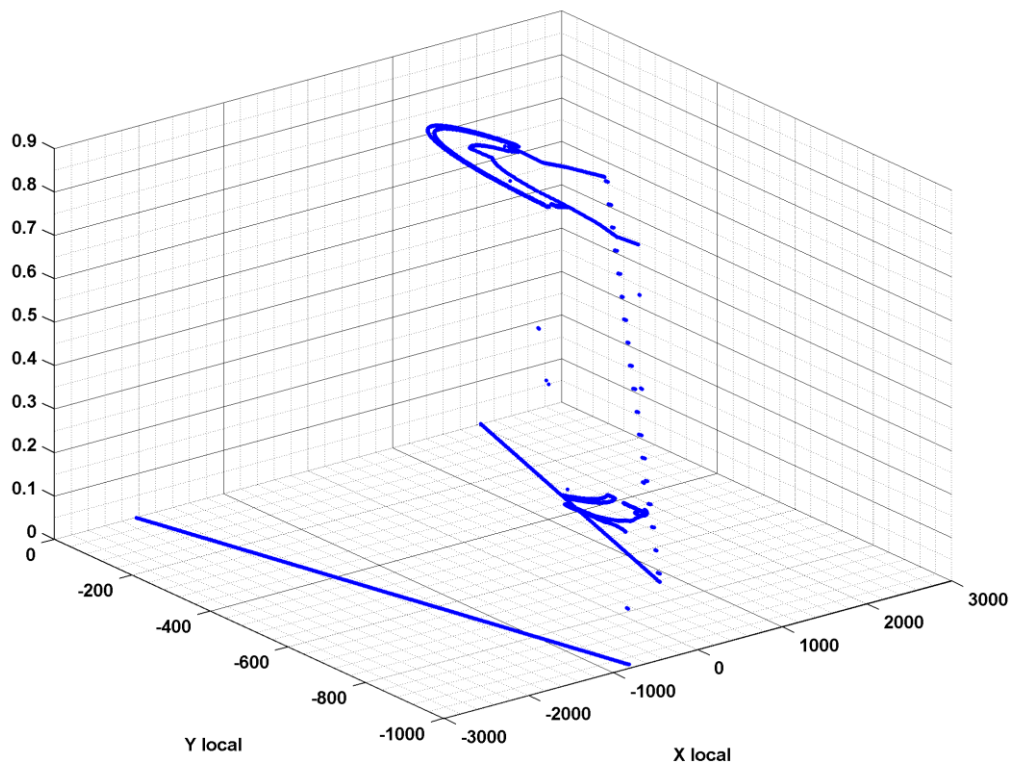


Ilustración 43. Contorno coeficientes de reflexión malla, alternativa 2

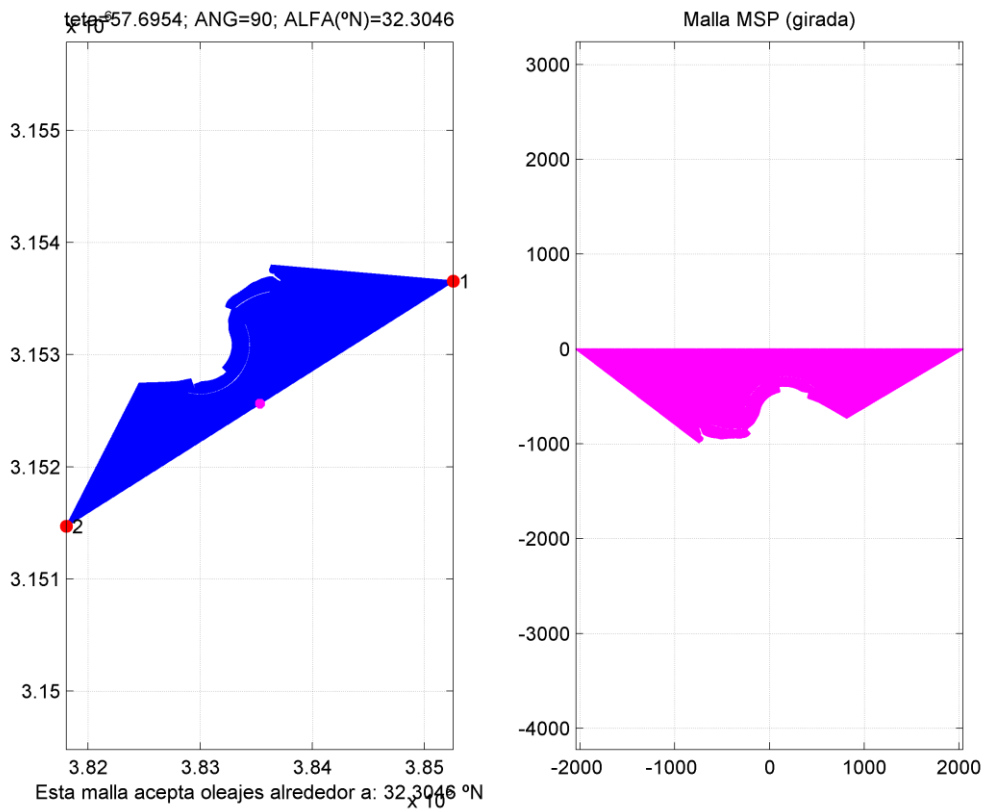


Ilustración 44. Malla Elementos Finitos, alternativa 2

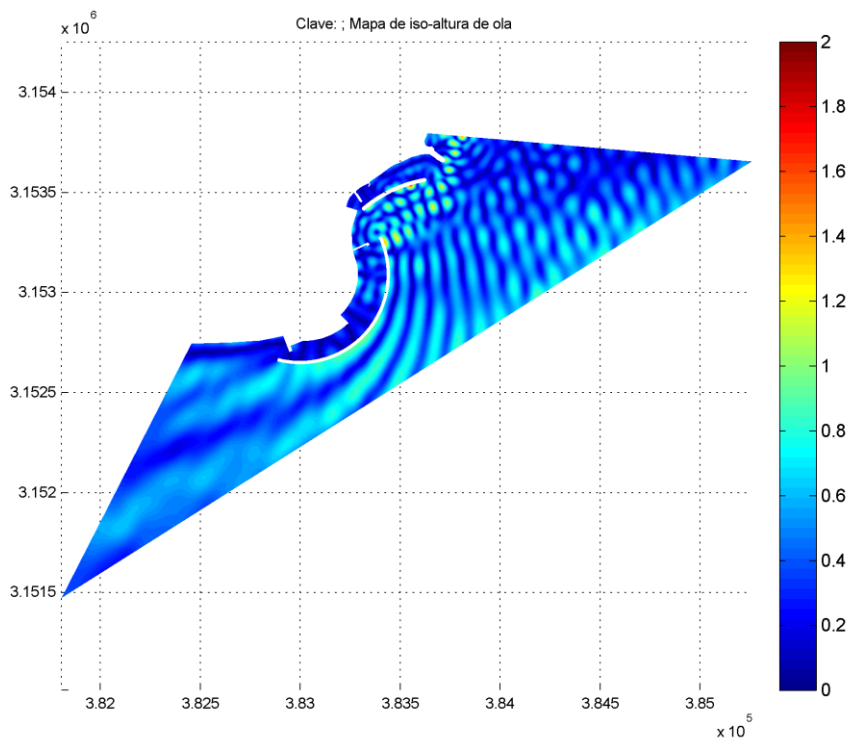


Ilustración 45. Propagación del oleaje, ejemplo de un caso de 300 ejecutados

### 5.1.3 ALTERNATIVA 3

Consiste en la construcción de un martillo, ortogonal al dique de abrigo del puerto y con una longitud aproximada de 45 m.

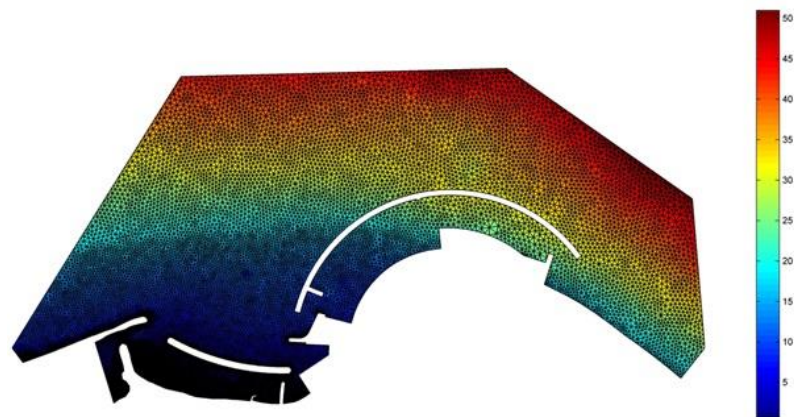
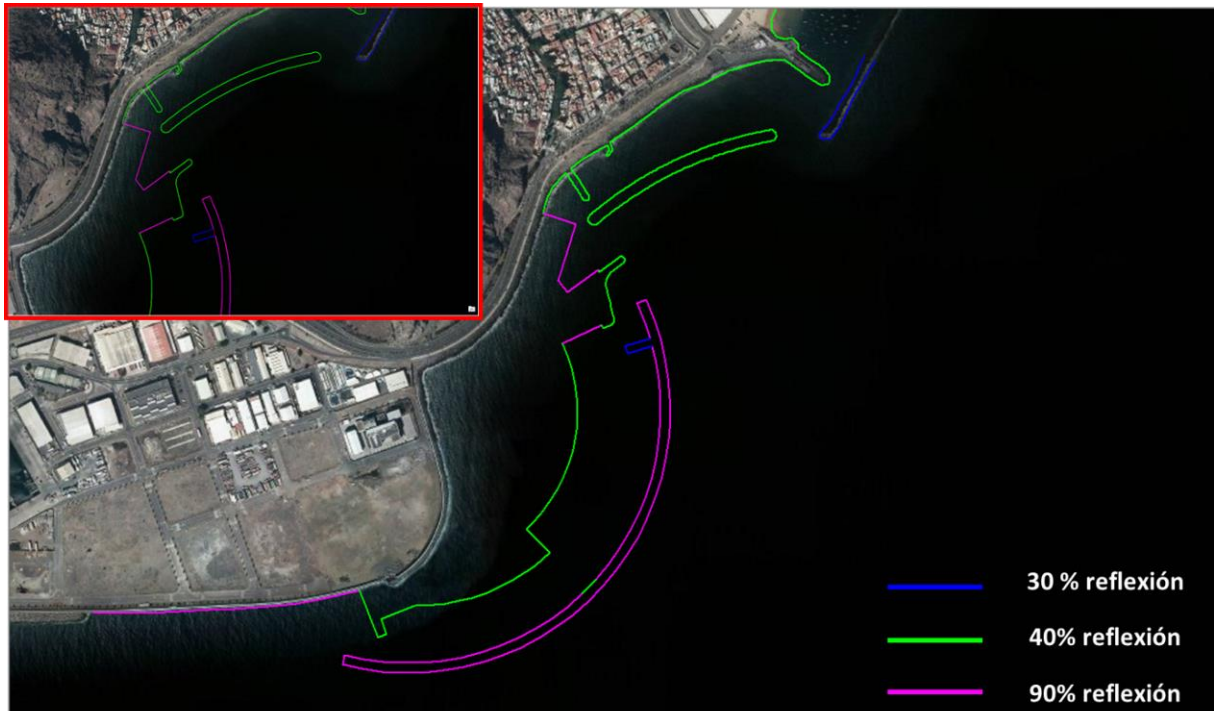


Ilustración 46. Coeficientes de reflexión alternativa 3



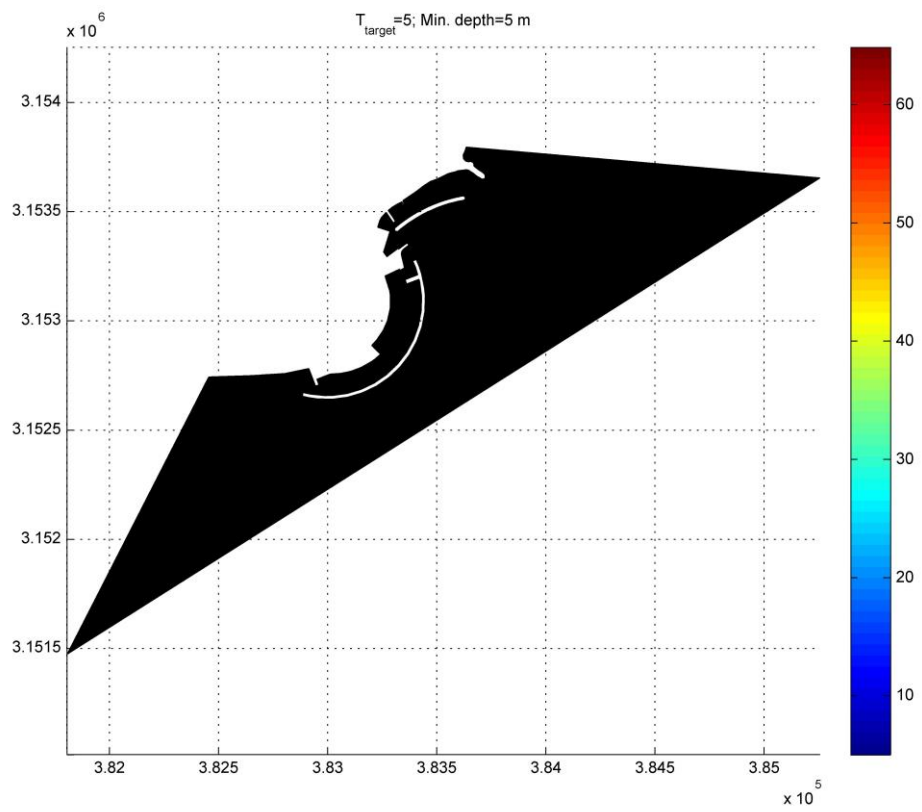


Ilustración 47. Batimetría, alternativa 3

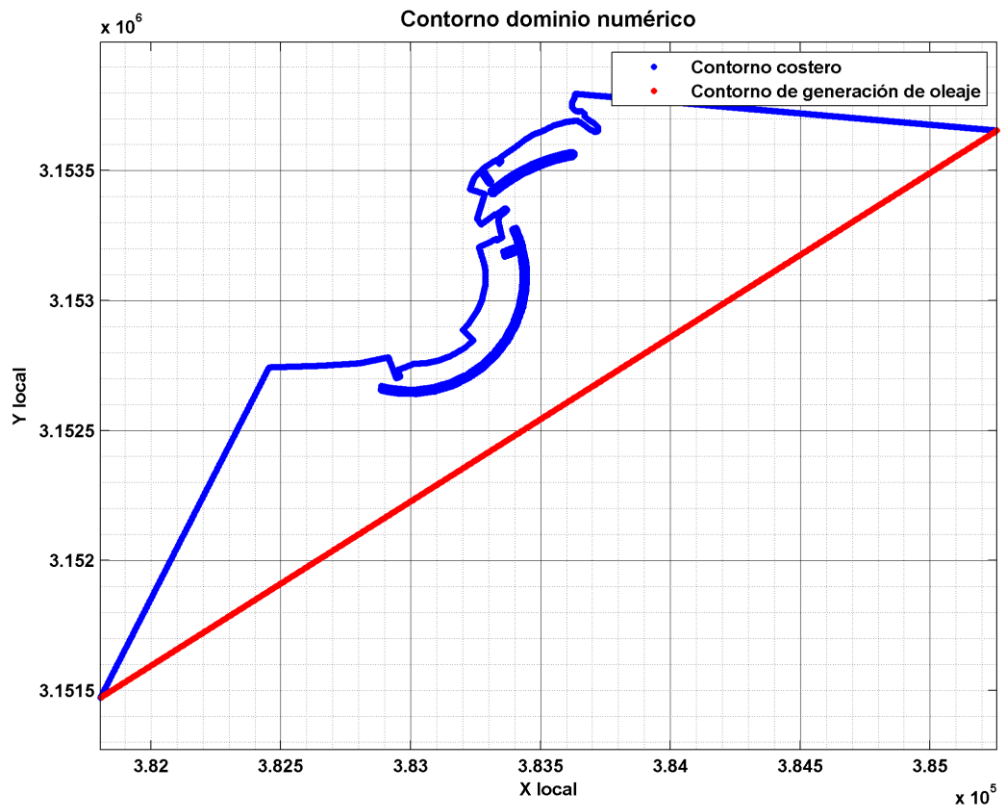


Ilustración 48. Contorno dominio numérico, alternativa 3

Tipologías de contorno . REFLEXIÓN.

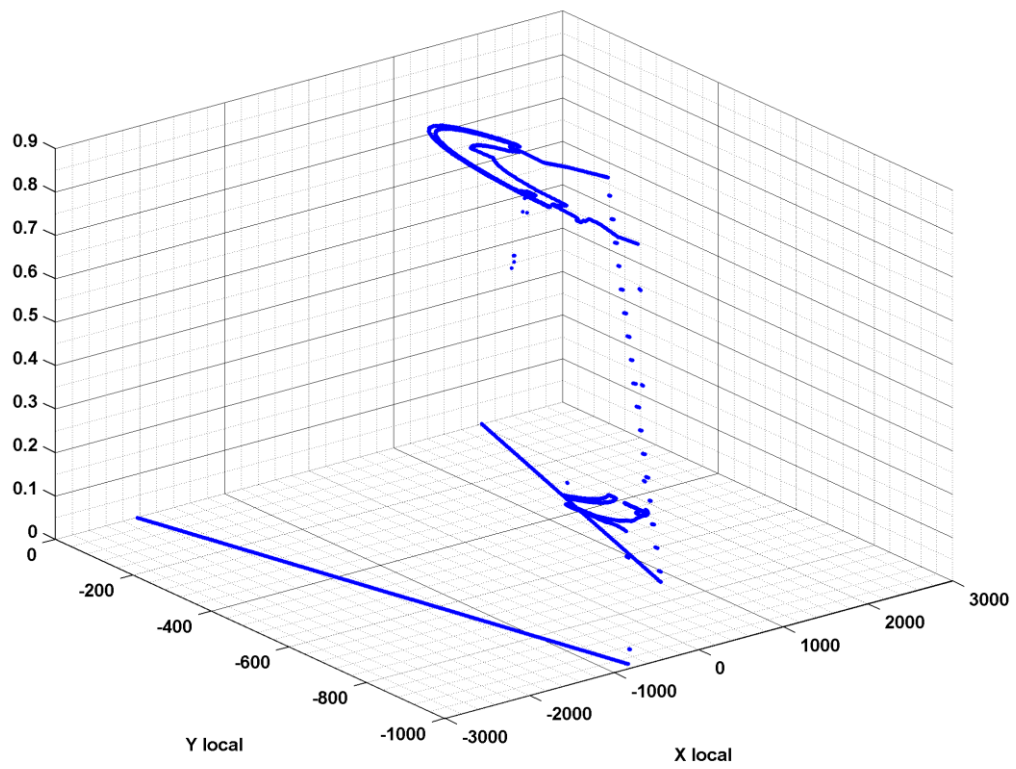


Ilustración 49. Contorno coeficientes de reflexión mallaado, alternativa 3

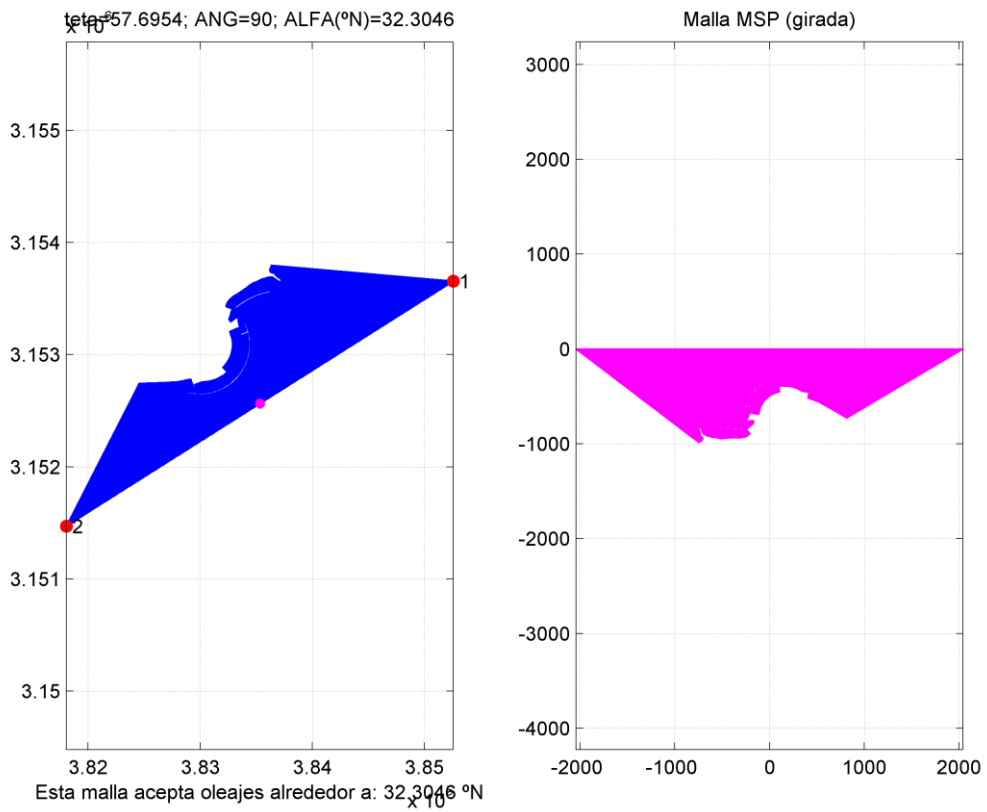


Ilustración 50. Malla Elementos Finitos, alternativa 3

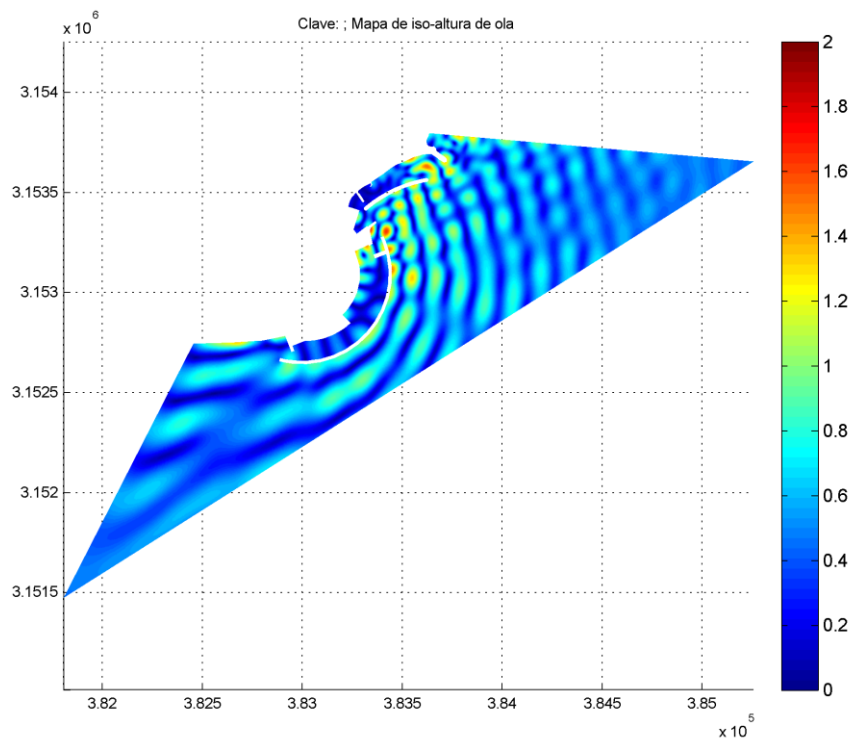


Ilustración 51. Propagación del oleaje, ejemplo de un caso de 300 ejecutados

## 5.2. REQUERIMIENTOS DE OPERATIVIDAD

Las repercusiones económicas y los impactos sociales y ambientales que se producen cuando una obra marítima deja de operar o reduce su nivel de operatividad se valoran por medio de su carácter operativo. Éste se evaluará seleccionando de entre todos los modos de parada operativa, aquél que proporcione el mínimo de servicio.

El carácter operativo de la obra se determina para cada tramo de obra a partir de los índices de Repercusión Económica Operativo (IREO) y de Repercusión Social y Ambiental Operativo (ISAO).

### Índice de Repercusión Económica Operativo (IREO)

Debido a la dificultad de valorar cuantitativamente los costes ocasionados por la parada operativa de una obra marítima, éstos se estiman cualitativamente a través del índice de repercusión económica operativo, IREO, teniendo en cuenta:

- (D): La simultaneidad del período de la demanda afectado por la obra y del período de severidad del agente que define el nivel de servicio: No simultáneos (0), Simultáneos (5). Se considerará Simultaneidad entre el periodo de demanda y el periodo de severidad del agente, D=4.



- (E): La intensidad de uso de la demanda en el período de tiempo considerado: Poco Intensivo (0), Intensivo (3), Muy Intensivo (5), se considerará poco intensivo, es decir, E=0.
- (F): La adaptabilidad de la demanda y del entorno económico al modo de parada operativa: Alta (0), Media (1), Baja (3), se considerará adaptabilidad baja, esto es, F=3.

El IREO según la ROM 0.0 se calcula según la siguiente expresión:

$$IREO = F * (D + E)$$

Sustituyendo se obtiene un IREO = 12, obra con repercusión económica operativa media.

### Índice Repercusión Social y Ambiental Operativo (ISAO)

Estima de manera cualitativa la repercusión social y ambiental esperable, en el caso de producirse un modo de parada operativa de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: (1) pérdidas de vidas humanas, (2) daños en el medio ambiente y el patrimonio histórico-artístico y (3) la alarma social generada.

La definición del siguiente índice es idéntica a la del ISA, considerando en este caso un modo de parada operativo en lugar de un modo de fallo. Como es de prever, al menos a priori, que dicha parada no tenga ningún tipo de afección del tipo de las consideradas en el ISAO será 0, es decir, obra sin repercusión social y ambiental significativa.

#### 5.2.1 OPERATIVIDAD MÍNIMA

Según la tabla 2.4 de la ROM 0.0 se tiene:

IREO	£ 5	6 - 20	> 20
Operatividad, $r_{f,ELO}$	0.85	0.95	0.99
$\frac{E}{ELO}$	1.04	1.65	2.32

Con un índice de repercusión económica operativo, IREO = 12, la **operatividad mínima será de 0.95**.

#### 5.2.2 NÚMERO MEDIO DE PARADAS

En el intervalo de tiempo que se especifique para aquellos casos en los cuales no haya sido especificado a priori, el número medio de ocurrencias será el siguiente:

ISAO	< 5	5 -19	20 -29	<sup>3</sup> 30
Número	10	5	2	0



Con un Índice de repercusión social y ambiental operativo, ISAO = 0 el número medio de paradas será de 10.

Para  $H_{slim} = 0.2$  m (altura de ola más restrictiva) se estudia la operatividad para cada una de las alternativas:

ALTERNATIVA 1		
Puntos	% Horas año > $H_{s\_lim}$	No.- horas al año > $H_{s\_lim}$
Punto 1	61.71	5405.53
Punto 2	67.22	5888.46
Punto 3	59.87	5244.80
Punto 4	57.07	4999.73
Punto 5	57.69	5053.65
Punto 6	67.09	5876.86
Punto 7	63.45	5558.12

Tabla 11. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros

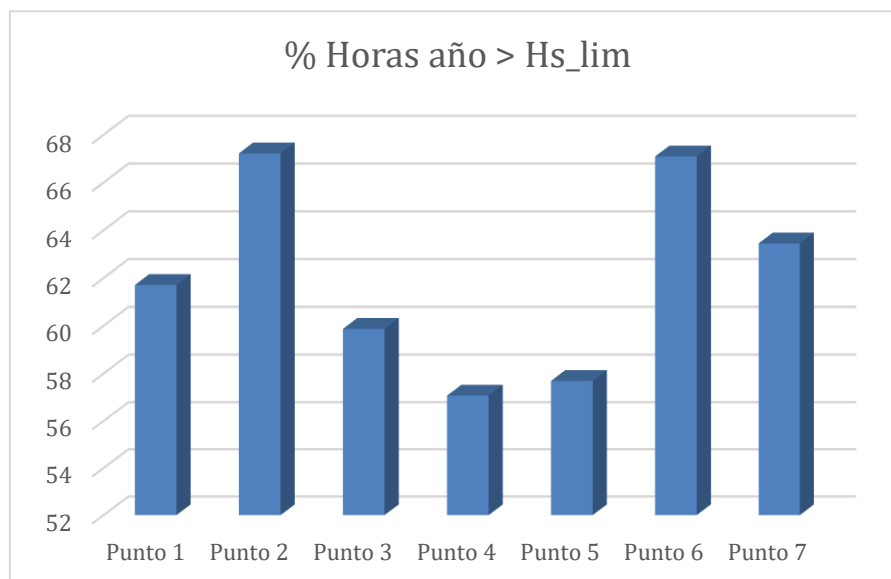


Tabla 12. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros

- La media % Horas año >  $H_{slim} = 62.01$
- La operatividad para la A1:  $100 - 62.01 = 37.99$
- Para la alternativa 1 se obtiene una operatividad del 38%

ALTERNATIVA 2		
Puntos	% Horas año > Hs_lim	No.- horas al año > Hs_lim
Punto 1	39.10	3425.48
Punto 2	44.85	3928.85
Punto 3	39.03	3418.69
Punto 4	41.48	3633.87
Punto 5	37.05	3245.71
Punto 6	51.11	4477.31

Tabla 13. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros

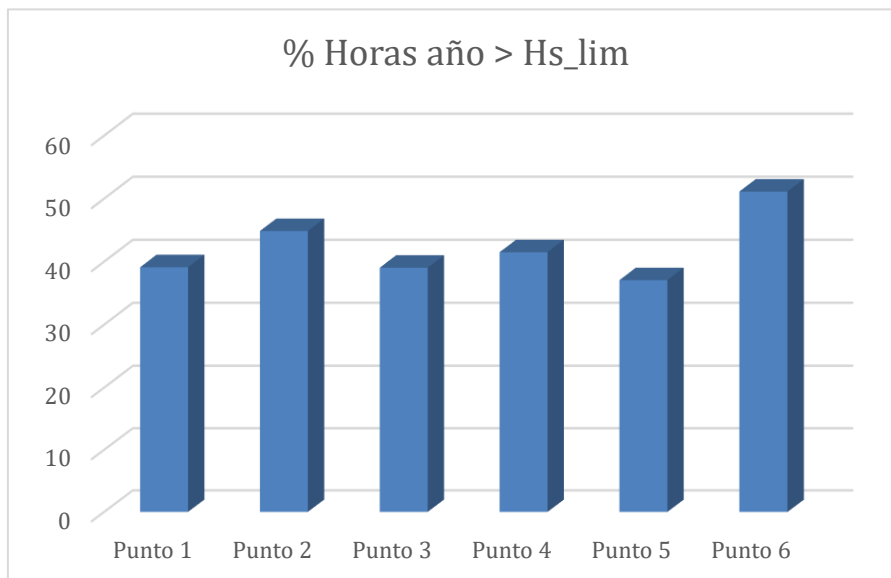


Tabla 14. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros

- La media % Horas año > H<sub>slim</sub> = 42.10
- La operatividad para la A2: 100-42.10= 57.90
- Para la alternativa 2 se obtiene una operatividad del 58%



ALTERNATIVA 3		
Puntos	% Horas año > Hs_lim	No.- horas al año > Hs_lim
Punto 1	34.99	3064.86
Punto 2	45.64	3997.76
Punto 3	42.70	3739.85
Punto 4	47.20	4134.42
Punto 5	41.84	3665.32
Punto 6	57.20	5010.34
Punto 7	48.51	4249.45

Tabla 15. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.2 metros

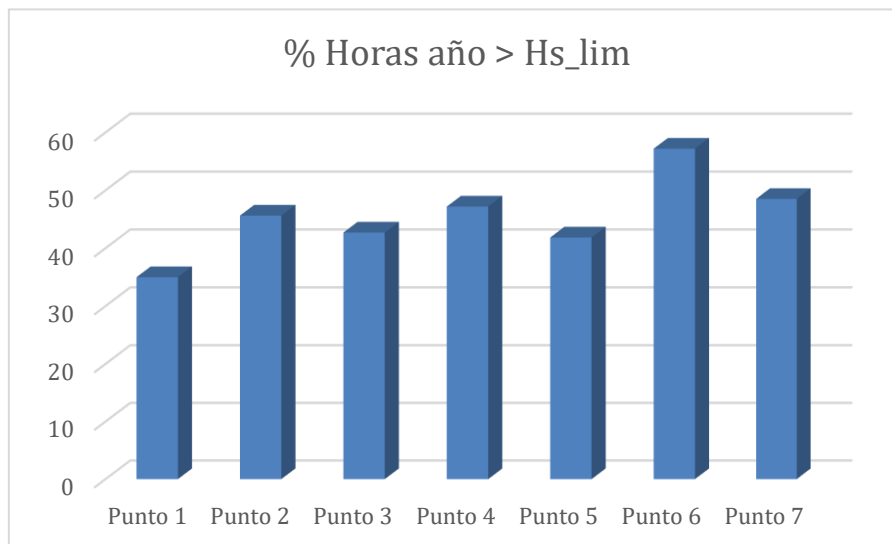


Tabla 16. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.2 metros

- La media % Horas año > H<sub>slim</sub> = 45.44
- La operatividad para la A3: 100-45.44= 54.56
- Para la alternativa 3 se obtiene una operatividad del 55%

Conseguir una operatividad del 95% limitando la altura a 0.2 m no ha sido posible, y se intuye que ello implicaría un excesivo dimensionamiento, se evidencia que el emplazamiento no es el adecuado para los índices de operatividad requeridos, se piden niveles mínimos de agitación con base de las características de las embarcaciones, en un entorno que tiende a agrupar el oleaje, dadas las operatividades mínimas exigidas.

Por todo ello, se decide tomar como **condición límite de operación una altura de ola de 0.4 metros**, acciones en sentido longitudinal al muelle que son menos restrictivas.

### 5.3. ANÁLISIS DE OPERATIVIDAD DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS

Una vez que se ha justificado que la altura de ola limite va a ser 0.4 metros, se procede a realizar el estudio de agitación de detalle considerando las tres alternativas para decir cuál es la más adecuada. Las características principales de todas ellas se muestran en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

ALTERNATIVA 1		
Puntos	% Horas año > Hs_lim	No.- horas al año > Hs_lim
Punto 1	18.57	1626.96
Punto 2	29.05	2544.47
Punto 3	20.74	1817.06
Punto 4	19.04	1667.59
Punto 5	23.98	2100.85
Punto 6	32.20	2820.75
Punto 7	30.24	2649.46

Tabla 17. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.4 metros

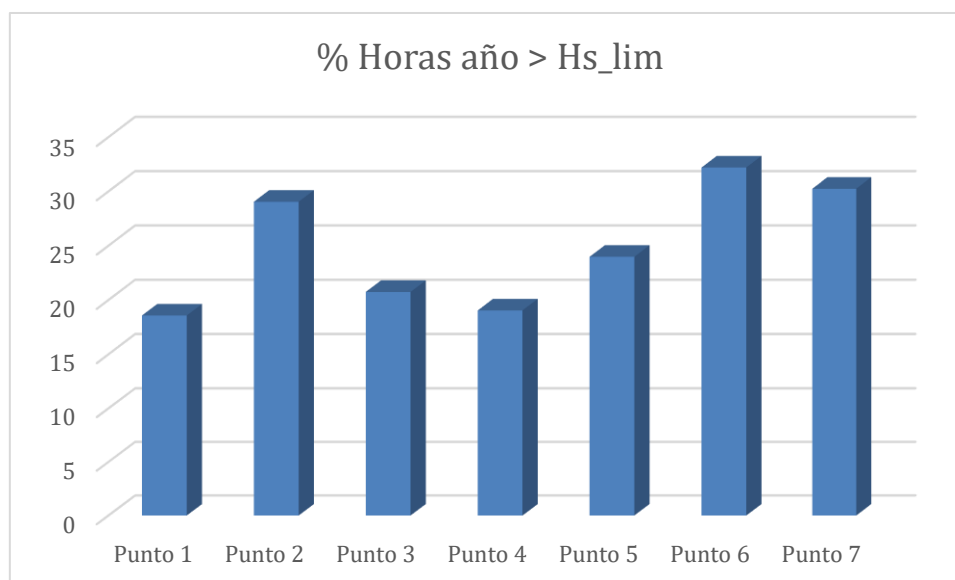


Tabla 18. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros



Operatividad media	Operatividad máxima	Operatividad mínima
0.25	0.19	0.32
0.75	0.81	0.68
	Punto 1	Punto 6

Tabla 19. Operatividades para la alternativa 1

- Operatividad media: 75%
- Operatividad máxima: 81%
- Operatividad mínima: 68%

ALTERNATIVA 2		
Puntos	% Horas año > Hs_lim	No.- horas al año > Hs_lim
Punto 1	13.49	1181.50
Punto 2	12.27	1074.95
Punto 3	9.13	799.72
Punto 4	11.59	1015.09
Punto 5	11.77	1030.71
Punto 6	17.76	1555.39

Tabla 20. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.4 metros

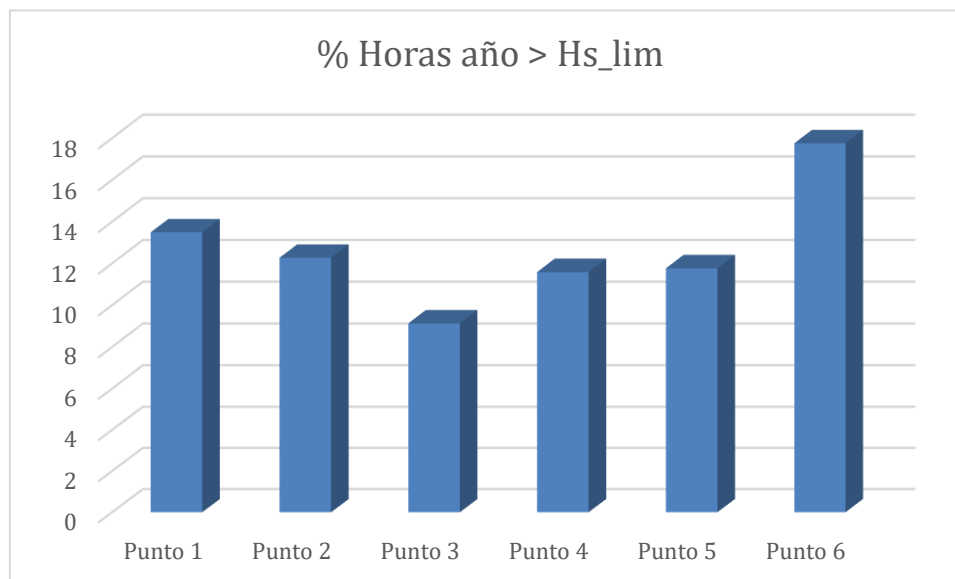


Tabla 21. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros

Operatividad media	Operatividad máxima	Operatividad mínima
0.13	0.09	0.18
0.87	0.91	0.82
	Punto 3	Punto 6

Tabla 22. Operatividades para la alternativa 2

- Operatividad media: 87%
- Operatividad máxima: 91%
- Operatividad mínima: 82%

ALTERNATIVA 3		
Puntos	% Horas año > Hs_lim	No.- horas al año > Hs_lim
Punto 1	11.10	972.67
Punto 2	15.42	1350.84
Punto 3	16.12	1412.08
Punto 4	13.60	1191.77
Punto 5	13.89	1216.98
Punto 6	19.95	1747.55
Punto 7	17.32	1517.55

Tabla 23. Porcentaje de alturas de olas que rebasan la altura de ola establecida por la ROM, 0.4 metros

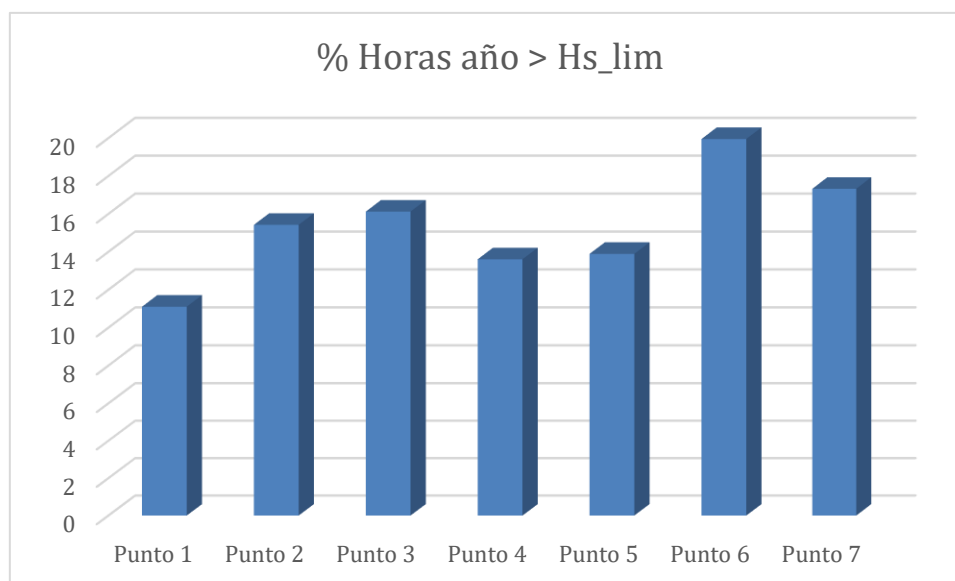


Tabla 24. Porcentaje de alturas de olas que superan 0.4 metros



Operatividad media	Operatividad máxima	Operatividad mínima
0.15	0.11	0.20
0.85	0.89	0.80
	Punto 1	Punto 6

Tabla 25. Operatividades para la alternativa 3

- Operatividad media: 85%
- Operatividad máxima: 89%
- Operatividad mínima: 80%

Analizando las operatividades de cada una de las alternativas:

	Operatividad media	Operatividad máxima	Operatividad mínima
A1	0,75	0,81	0,68
<b>A2</b>	<b>0,87</b>	<b>0,91</b>	<b>0,82</b>
A3	0,85	0,89	0,80

Tabla 26. Operatividades de las tres alternativas

A la vista del análisis realizado, se considera como mejor opción la alternativa 2, que consiste en eliminar parcialmente el refugio pesquero y dejar únicamente un contradique de escollera.

No obstante esta alternativa 2 no supone el cumplimiento de la ROM en ninguna de sus zonas y solo supone una primera aproximación a una posible alternativa definitiva.

### 5.3.1 DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO OPERATIVO PARA LA ALTERNATIVA ELEGIDA

Según el estudio realizado en el apartado anterior, la alternativa 2 presenta una operatividad media de 87% para una altura de ola de 0.4 metros, siendo el punto más desfavorable el 6 y el más favorable el 3 dentro del puerto.

A la vista de los resultados, con esta propuesta no se alcanza la operatividad del 95% que exige la ROM.



## 6. ESTRATEGIAS DE MEJORA A LA ALTERNATIVA ELEGIDA

Con base en la alternativa 2, en la que se elimina parcialmente el refugio pesquero y se deja únicamente un contradique de escollera, se proponen unas posibles estrategias de mejora, para un futuro, cuya finalidad sea aumentar la operatividad hasta alcanzar el valor del 95% exigido por la ROM.

Las futuras estrategias que deben plantearse deben ser del tipo de:

- Modificar el trazado en planta de la obra de protección para evitar la propagación del oleaje al interior del puerto.
- Diseñar un refugio pesquero al norte del puerto.
- Modificar la geometría del dique exento y a su vez del refugio pesquero, dejando solo un contradique, por ejemplo cerrando la bocana norte.
- Buscar tipologías de diques que disminuya la transmisión: banquetas menos permeables.

## 7. CONCLUSIONES GENERALES

El diseño de las nuevas obras portuarias fue realizado previo al diseño y construcción de las nuevas obras de protección del frente marítimo de San Andrés, así que el estudio original de operatividad, fue realizado sin tener en cuenta las nuevas obras de protección costera y por tanto, las condiciones de agitación originales cambian al considerar la presencia de un frente marino modificado.

Para la estudio de esas nuevas condiciones se ha desarrollado un modelo numérico MSP, basado en la propagación y agitación numérica del oleaje, que ha permitido a la autora del presente trabajo, analizar los datos en diferentes puntos del interior del puerto y la realización del estudio de alternativas.

Este modelo permite el estudio de todos los posibles estados de mar para ser aplicado en un punto de la costa. Una gran ventaja del modelo, es la posibilidad de manejar casi infinitos estados de mar, o al menos la totalidad de los estados de mar registrados en la actualidad.

Se ha definido un sistema simplificado para hacer los estudios. El coste de ordenador (medido en horas de cálculo) con esta nueva técnica propuesta es elevado, las ejecuciones de los casos más complejos son superiores a las 8 horas de cálculo.

Pero realmente es muy inferior a los cálculos actuales, que precisan ordenadores especializados en centros de investigación.

El modelo facilitado por el IHCantabria ha sido de aplicación por la autora en el presente trabajo en el puerto de San Andrés:

- Se trata de un caso real que ha sido estudiado por el IHCantabria, pero con el uso de la nueva tecnología simplificada permite comprobar que se llega prácticamente a las mismas conclusiones.
- Se han analizado nuevas alternativas, definiendo nuevos trazados geométricos para cada una de ellas.
- Se han comparado las cuatro alternativas: estado actual y las tres alternativas planteadas, definiendo los parámetros adecuados en el interior de la dársena:
  - Agitación
  - Altura de ola
  - Operatividad en el interior del puerto y de la bocana
- Por tratarse de una comprobación de la validez del modelo, se han considerado simplemente tres posibles alternativas; el rango de posibilidades se podría ampliar a decenas de alternativas hasta encontrar la definitiva.





- El presente trabajo trata de mostrar la aplicación de esta técnica y permitir la comparación entre diferentes casos, de forma que exista la posibilidad de elección de una solución con suficiente garantía de cumplimiento de lo marcado por las recomendaciones de la normativa (normas ROM).



## 8. ANEXO: CÓDIGOS DE MATLAB

## SCRIPT 1

Para la obtención y estudio del clima marítimo (*capítulo 3.1.1*) se ha empleado un Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (AMEVA), es un software que está formado por un conjunto de funciones desarrollada en MATLAB que integra las diversas metodologías de análisis estadístico implementadas por los investigadores del IHCantabria, con el objeto de estudiar y caracterizar variables medioambientales.

```

unction ameva (varargin)
%   AMEVA tool. Mathematical and Statistical Analysis of Environmental
Variables
%   AMEVA(ameva.m) opens a graphical user interface for displaying the
main program possibility.
%   Tested on Ubuntu trusty v.14.04.1(developed), Windows 7 and Mac Os X
v10.9.4 (MATLAB:R2013a)
%   To load test data, please click on: -Help, Load ameva test data-, to
send
%   data to MATLAB worksapce and work with this.
%   From this display you can execute:
%   aeva----->Statistical Analysis of Environmental
variables
%   gev----->Generalized Exreme Value tool
%   pot----->Peak Over Threshold tool
%   disfitanalysis----->Distribution Fit Analysis of Environmental
Variables
%   calibration----->CALIBRATION tool.
(CalibraSplineQuantile,CalibraSplineNLP)
%   classification----->CLASSIFICATION Algoritms SOM, MDA, KMA
%   durationtime----->Hours duration time vector for this
threshold and condition
%   heteroscedasticmodel----->Heteroscedastic Model
%   occurrencetable----->Occurrence Table
%   maximostemporales----->Temporary Maximum
%   worldfilter----->Outlier filter
%   ameवादatasetselection----->Ameva Data Save Selection
%   ameवaworkspace----->Windows to view, save the ws variables and
work with this variables
%   meshselection*----->FAST VECTORIAL CORRELATION SELECTION
%   ameवaihdata*----->ihAmeva - ihData
%   flowanalysis*----->Flow analysis
% Examples 1
%   ameva
%
% See also:
%   http://ihameva.ihcantabria.com
% -----
---
%   ameva (main program).
%   Environmental Hydraulics Institute (IH Cantabria)
%   Santander, Spain.
% -----
---
%   castello@unican.es
%   created with MATLAB Version: 8.1.0.604 (R2013a) on Ubuntu trusty
%   04-07-2011 - The first distribution version
%   17-12-2012 - Old distribution version
%   25-03-2013 - Old distribution version

```



```

% 09-05-2013 - Old distribution version
% 12-06-2013 - Old distribution version
% 20-08-2014 - Old distribution version
% 20-04-2015 - Old distribution version
% 04-12-2015 - Last distribution version

nmfctn = 'ameva';
namesoftware = ['AMEVA ' amevaclass.ihameva_checkUpdates];
awinc = amevaclass;%ameva windows commons methods
awinc.nmfctn = nmfctn;
% Copyright
rutasCopyright =
fullfile(fileparts(mfilename('fullpath')),'Copyright.txt');
LicEspStr = ...
    [' AMEVA is free software: you can redistribute it and/or modify it
under the terms of'
    ' the GNU General Public License as published by the Free Software
Foundation;'
    ' either version 3 of the License, or (at your option) any later
version.'
    '
    '
    ' AMEVA is distributed in the hope that it will be useful, but
WITHOUT ANY WARRANTY;'
    ' without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
FOR A PARTICULAR
    ' PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.
    '
    '
    ' You should have received a copy of the GNU General Public License
along with AMEVA.'
    ' If not, see http://www.gnu.org/licenses/.
    '
    '
'];
if exist(rutasCopyright,'file') == 2
    fid = fopen(rutasCopyright,'r','n','UTF-8'); % read text file lines
as cell array of strings
    LicEspStr = textscan(fid, '%s', 'Delimiter','\n'); LicEspStr =
LicEspStr{1};
    fclose(fid);
end
LicEngStr = LicEspStr;

%--name of all ih ameva windows to close only this windows OJO aumentar
nuevas
nameallsoftware = {'meshselection';'calibration';'worldfilter';...
    'aeva';'maximostemporales';'durationtime';'classification';...
    'occurrencetable';'occtable';'disfitanalysis';...
    'gev';'pot';'amevaworkspace';'heteroscedasticmodel';...

'ennera_clima';'characterized_data';'flowanalysis';'interpolation';'amev
ads';'amevaihdata'};
LabelMenu.WebSite = {'Ameva Web Site',1};
LabelMenu.UserManual = {'User Manual (PDF)',1};
LabelMenu.Idioma = {'Language',1};
LabelMenu.Esp = {'Spanish',1,'b'};
LabelMenu.Eng = {'English',1,'k'};
LabelMenu.About = {'About',1};

```



```

LabelMenu.LIC = {'License',1,LicEngStr};
LabelMenu.File = {'File',1};
LabelMenu.ImpData = {'Import Data',1};
LabelMenu.MeshDataSel = {'Mesh Data Selection',0};%conf file
LabelMenu.LoadTestData = {'Load ameva test data',1};
LabelMenu.Workspace = {'View Data (workspace)',1};
LabelMenu.Save = {'Save (.mat)',1};
LabelMenu.PWD = {'Set Work Directory',1};
LabelMenu.Quit = {'Quit',1};
LabelMenu.DataPrePro = {'Data Preprocessing',1};
LabelMenu.DataSel = {'Data Selection...',1};
LabelMenu.Maximum = {'Maximum,Threshold,POT...',1};
LabelMenu.Duration = {'Persistence/Durations Algorithms',1};
LabelMenu.Outlier = {'Outlier Filter Detection X vs Y',1};
LabelMenu.Tool = {'Tool',1};
LabelMenu.DStat = {'Descriptive Statistic',1};
LabelMenu.Occurrence = {'Occurrence Table',1};
LabelMenu.DisFit = {'Distribution Fit',1};
LabelMenu.ExtStat = {'Extreme Value Analysis',1};
LabelMenu.GEV = {'GEV Generalized Extreme Value Tool',1};
LabelMenu.POT = {'POT, Pareto-Poisson Tool.',1};
LabelMenu.Regression = {'Regression',1};
LabelMenu.HModel = {'Homocedastic/Heterocedastic Model',1};
LabelMenu.DataMining = {'Data Mining',1};
LabelMenu.Classification = {'Classification',1};
LabelMenu.Interpolation = {'Interpolation',0};%conf file
LabelMenu.Toolbox = {'Toolbox',1};
LabelMenu.Calibration = {'Calibration',1};
LabelMenu.ChaDat1 = {'Marine Climate. Ports',0};
LabelMenu.ChaDat2 = {'Wave Energy',0};
LabelMenu.Caudal = {'Flow analysis',0};%conf file
LabelMenu.EnneraClima = {'Ennera-Clima Tool',0};%conf file

error(nargchk(0,2,nargin));
idioma = 'eng'; OC = [];
if nargin==1
    idioma = varargin{1};
elseif nargin==2,
    idioma = varargin{1};
    OC = varargin{2};
end
if ~exist('idioma','var') || isempty(idioma) || ~ischar(idioma), idioma
= 'eng'; end;

ReadAmevaConf;%to set usertype

if strcmp(idioma,'esp'),
    LabelMenu.WebSite = {'Sitio web de AMEVA',1};
    LabelMenu.UserManual = {'Manual de usuario (PDF)',1};
    LabelMenu.Idioma = {'Idioma',1};
    LabelMenu.Esp = {'Espa',char(241),'ol'],1,'k'};
    LabelMenu.Eng = {'Ingl',char(233),'s'],1,'b'};
    LabelMenu.About{1} = 'Acerca de AMEVA';
    LabelMenu.LIC = {'Licencia',1,LicEspStr};
    LabelMenu.File{1} = 'Archivo';
    LabelMenu.ImpData{1} = 'Importar datos';
    LabelMenu.MeshDataSel{1} = ['Selecci',char(243),'n de datos de las
mallas'];
    LabelMenu.LoadTestData{1} = 'Cargar datos para testear AMEVA';
    LabelMenu.Workspace{1} = 'Ver Datos (workspace)';

```

```

LabelMenu.Save{1} = 'Guardar (.mat)';
LabelMenu.PWD = {'Configurar el directorio de trabajo',1};
LabelMenu.Quit{1} = 'Salir de AMEVA';
LabelMenu.DataPrePro{1} = 'Prep. datos';
LabelMenu.DataSel{1} = ['Selecci',char(243),'n de datos'];
LabelMenu.Maximum{1} = ['M',char(225),'ximo,UmbraL,POT...'];
LabelMenu.Duration{1} = 'Persistencias/Duraciones';
LabelMenu.Outlier{1} = ['Detecci',char(243),'n de Outlier X vs Y'];
LabelMenu.Tool{1} = 'Mod. independientes';
LabelMenu.DStat{1} = ['Estad',char(237),'stica descriptiva'];
LabelMenu.Occurrence{1} = 'Tabla de encuentros';
LabelMenu.DisFit{1} = 'Ajuste de distribuciones';
LabelMenu.ExtStat{1} = ['An',char(225),'lisis de valores
extremos'];%['Estad',char(237),'stica extrema'];
LabelMenu.GEV{1} = ['Herramienta GEV Funci',char(243),'n
generalizada de valores extremos'];
LabelMenu.POT{1} = 'Herramienta POT, Pareto-Poisson';
LabelMenu.Regression{1} = ['Regresi',char(243),'n'];
LabelMenu.HModel{1} = ['Modelo
homoced',char(225),'stico/heteroced',char(225),'stico'];
LabelMenu.DataMining{1} = ['Miner',char(237),'a de datos'];
LabelMenu.Classification{1} = ['Clasificaci',char(243),'n'];
LabelMenu.Interpolation{1} = ['Interpolaci',char(243),'n'];
LabelMenu.Toolbox{1} = ['Mod. metodol',char(243),'gicos'];
LabelMenu.Calibration{1} = ['Calibraci',char(243),'n'];
LabelMenu.ChaDat1{1} = ['Clima mar',char(237),'timo. Puertos'];
LabelMenu.ChaDat2{1} = ['Energ',char(237),'a del oleaje'];
LabelMenu.Caudal{1} = ['An',char(225),'lisis de caudales'];
LabelMenu.EnneraClima{1} = 'Herramienta Ennera-Clima';

end

%---LA PANTALLA---
screenSize = get(0,'ScreenSize');
figPos = [15 screenSize(4)-80 550 1];

if ~isempty(findobj('Tag',['Tag_' nmfctn]))
    figPos = get(findobj('Tag',['Tag_' nmfctn]),'Position');
    close(findobj('Tag',['Tag_' nmfctn]));
end

%Lista de las figuras que se van a usar en este programa
hf = [];%ventana principal
%Global variables

%---LA FIGURA-VENTANA PRINCIPAL-
hf =
figure('Name',namesoftware,'MenuBar','None','CloseRequestFcn',@AmevaClos
e,...

'NumberTitle','Off','DockControls','Off','Position',figPos,'Tag',['Tag_'
nmfctn],'NextPlot','new',...
'Resize','off');
if not(isdeployed) && usertype==0, awinc.loadamevaico(gcf,true);
end%Load ameva ico
amvcnf.idioma=idioma;amvcnf.usertype=usertype;

% AMEVA
mj = uimenu('Label','AMEVA');
uimenu(mj,'Label',LabelMenu.About{1},'Callback',@FigAbModeOn);
    
```



```

uimenu(mj, 'Label', LabelMenu.WebSite{1}, 'Callback', 'web(''http://ihameva.ihcantabria.com'', '-browser'')');
uimenu(mj, 'Label', LabelMenu.UserManual{1}, 'Callback', 'open(''muser_ameva.pdf'')', 'Separator', 'on');
mk=uimenu(mj, 'Label', LabelMenu.Idioma{1}, 'Separator', 'on');

uimenu(mk, 'Label', LabelMenu.Esp{1}, 'Callback', @AmevaIdioma, 'UserData', 'esp', 'ForegroundColor', LabelMenu.Esp{3});
uimenu(mk, 'Label', LabelMenu.Eng{1}, 'Callback', @AmevaIdioma, 'UserData', 'eng', 'ForegroundColor', LabelMenu.Eng{3});
uimenu(mj, 'Label', LabelMenu.PWD{1}, 'Callback', @AmevaPWD, 'Separator', 'on');
uimenu(mj, 'Label', LabelMenu.Quit{1}, 'Callback', @AmevaClose, 'Accelerator', 'Q', 'Separator', 'on');
srtcal='msgbox(''Working!'', 'W');%mensaje de ventana sin terminar
% FILE
me =uimenu('Label', LabelMenu.File{1});
ImpDatCall=['[auxFileName,auxPathName] = uigetfile(',...

' '*.dat;*.txt;*.mat'; '*.dat'; '*.txt'; '*.mat'; '*..*''), 'File Selector', 'MultiSelect', 'on');',...
    'if isempty(auxFileName), return; end;',...
    'if length(auxFileName)==1, clear auxFileName auxPathName; return; end;',...
    'h=waitbar(0.3, 'Please wait...');',...
    'auxs = whos(''-var'', 'auxFileName');',...
    'if auxs.class=='char'',...
    'load([auxPathName,auxFileName]);',...
    'elseif auxs.class=='cell'',...
    'for auxi=1:length(auxFileName),
load([auxPathName,auxFileName{auxi}]); end;',...
    'else,',...
    'disp(''NO DATA FILE!'');',...
    'end;', 'waitbar(1,h);', 'close(h);', 'clear auxFileName auxPathName aux h;'];
uimenu(me, 'Label', LabelMenu.ImpData{1}, 'Callback', ImpDatCall, 'Separator', 'on');
if LabelMenu.MeshDataSel{2} && exist(which('amevainfo'), 'file') == 2,
    mf=uimenu(me, 'Label', 'ihdata_toolbox');
    mg=uimenu(mf, 'Label', 'Viento');

uimenu(mg, 'Label', 'NCEP', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Viento', 'NCEP'}, amvcnf));

uimenu(mg, 'Label', 'SeaWind', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Viento', 'SW_NCEP'}, amvcnf));
    uimenu(mg, 'Label', 'SeaWind-HR', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Viento', 'HR_SW_NCEP'}, amvcnf));

uimenu(mg, 'Label', 'CFS', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Viento', 'CFS'}, amvcnf));
    mh=uimenu(mf, 'Label', 'Oleaje');

uimenu(mh, 'Label', 'GOW', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Oleaje', 'GOW'}, amvcnf));

uimenu(mh, 'Label', 'DOW', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Oleaje', 'DOW'}, amvcnf));
    mi=uimenu(mh, 'Label', 'Intrumental');

```





```

        uimenu(mi, 'Label', 'Instrumental
boyas', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Oleaje', 'Instrumental
boyas'}, amvcnf));
        uimenu(mi, 'Label', 'Instrumental
satelites', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Oleaje', 'Instrumental
satelites'}, amvcnf));
        mj=uimenu(mf, 'Label', 'Nivel del mar');

uimenu(mj, 'Label', 'GOS', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Nivel
del mar', 'GOS'}, amvcnf));

uimenu(mj, 'Label', 'GOT', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Nivel
del mar', 'GOT'}, amvcnf));

uimenu(mj, 'Label', 'MSL', 'Callback', @(source,event)amevaihdata({'Nivel
del mar', 'MSL'}, amvcnf));
        ee=uimenu(me, 'Label', LabelMenu.MeshDataSel{1});
        infor=amevainfo('ameva');
        MESHES=infor.MESHES;
        for i=1:length(MESHES),
            uimenu(ee, 'Label', [MESHES{i,1}, '
', MESHES{i,2}], 'Callback', @(source,event)meshselection(i, amvcnf));
        end
end
if usertype==0,
    uimenu(me, 'Label', 'ToolsMallas', 'Callback', 'ToolsMallas');
end
uimenu(me, 'Label', LabelMenu.LoadTestData{1}, 'Callback', 'load('ameva')'
, 'Separator', 'on');
uimenu(me, 'Label', LabelMenu.Workspace{1}, 'CallBack', @(source,event)ameva
workspace(amvcnf), 'Separator', 'on');
uimenu(me, 'Label', LabelMenu.Save{1}, 'Callback', 'uisave', 'Separator', 'on'
);
%% DATA PREPROCESSING
mg =uimenu('Label', LabelMenu.DataPrePro{1});
% eval(['MATLABpool local ' num2str(feature('numcores')-2)']);
% batch('gev.m', 'MATLABpool', 1)
% spmd
%   classification;
% end
% spmd
%   gev;
% end
% if MATLABpool('size'), MATLABpool close; end
uimenu(mg, 'Label', LabelMenu.DataSel{1}, 'Callback', @(source,event)amevada
taselection(amvcnf));
uimenu(mg, 'Label', LabelMenu.Maximum{1}, 'Callback', @(source,event)maximos
temporales(amvcnf));
uimenu(mg, 'Label', LabelMenu.Duration{1}, 'Callback', @(source,event)durati
ontime(amvcnf));
uimenu(mg, 'Label', LabelMenu.Outlier{1}, 'Callback', @(source,event)worldfi
lter(amvcnf));
%% TOOL - Modulos independientes
mh =uimenu('Label', LabelMenu.Tool{1});
fh=uimenu(mh, 'Label', LabelMenu.DStat{1});
uimenu(fh, 'Label', 'AEVA', 'Callback', @(source,event)aeva(amvcnf));
uimenu(fh, 'Label', LabelMenu.Occurrence{1}, 'Callback', @(source,event)occu
rrencetable(amvcnf));
uimenu(mh, 'Label', LabelMenu.DisFit{1}
, 'Callback', @(source,event)disfitanalysis(amvcnf));
ff=uimenu(mh, 'Label', LabelMenu.ExtStat{1});

```

```

uimenu(ff, 'Label', LabelMenu.GEV{1}, 'Callback', @(source, event) gev (amvcnf)
);
uimenu(ff, 'Label', LabelMenu.POT{1}, 'Callback', @(source, event) pot (amvcnf)
);
mf =uimenu(mh, 'Label', LabelMenu.Regression{1});
if LabelMenu.HModel{2},

uimenu(mf, 'Label', LabelMenu.HModel{1}, 'Callback', @(source, event) heterosc
edasticmodel (amvcnf));
end
if usertype==0,
    uimenu(mh, 'Label', '*Modelos Autoregresivos*', 'Callback', srtcal);
end
mj=uimenu(mh, 'Label', LabelMenu.DataMining{1});
uimenu(mj, 'Label', LabelMenu.Classification{1}, 'Callback', @(source, event)
classification (amvcnf));
if usertype==0,
    uimenu(mj, 'Label', '*PCA*', 'Callback', srtcal);
    uimenu(mj, 'Label', '*CCA*', 'Callback', srtcal);
    mk=uimenu(mh, 'Label', '*Interpolation*');
    uimenu(mk, 'Label', '*Analog*', 'Callback', srtcal);
    uimenu(mk, 'Label', '*RBF*', 'Callback', srtcal);

uimenu(mk, 'Label', 'propagation/interpolation', 'Callback', @(source, event)
interpolation (amvcnf));
end
%% TOOLBOX - Modulos metodologicos
mi =uimenu('Label', LabelMenu.Toolbox{1});
uimenu(mi, 'Label', LabelMenu.Calibration{1}, 'Callback', @(source, event) cal
ibration (amvcnf));
if LabelMenu.Caudal{2},

uimenu(mi, 'Label', LabelMenu.ChaDat1{1}, 'Callback', @(source, event) charact
erized_data (1, amvcnf));

uimenu(mi, 'Label', LabelMenu.ChaDat2{1}, 'Callback', @(source, event) charact
erized_data (2, amvcnf));
end
if usertype==0,
    uimenu(mi, 'Label', '*Marine Climate, Beach*', 'Callback', srtcal);
end
if LabelMenu.Caudal{2},

uimenu(mi, 'Label', LabelMenu.Caudal{1}, 'Callback', @(source, event) flowanal
ysis (amvcnf));
end
if LabelMenu.EnneraClima{2},

uimenu(mi, 'Label', LabelMenu.EnneraClima{1}, 'Callback', @(source, event) enn
era_clima (amvcnf));
end
if usertype==0,
    uimenu(mi, 'Label', '*Downscaling Estadistico*', 'Callback', srtcal);
end

%% Figure About Ameva
hi =
figure('Name', ['About', upper(nmfctn(1)), nmfctn(2:end)], 'MenuBar', 'None',
'NumberTitle', 'Off', 'Resize', 'Off', ...
'CloseRequestFcn', @FigAbMode, 'Resize', 'Off', 'Visible', 'Off');

```



```

if not(isdeployed) && usertype==0, awinc.loadamevaico(gcf,true);
end%Load ameva ico
rgb = imread(which('aboutameva.png'));
image(rgb);
set(gca,'Position',[0 0 1 1]);
axis off;           % Remove axis ticks and numbers
axis image;
uicontrol('Style','pushbutton','Units','normalized','Parent',hi,'Enable'
,'On','String',LabelMenu.LIC{1}, ...
'Position',[0.02 0.02 0.135 0.05],'Callback',@FigLicModeOn);
if not(isdeployed)

uicontrol('Style','pushbutton','Units','normalized','Parent',hi,'Enable'
,'On','String','Close', ...
'Position',[0.845 0.02 0.135 0.05],'Callback',@FigAbMode);
end
set(gca,'NextPlot','new');
set(hi,'NextPlot','new');

%% Figure Ameva License
hg =
figure('Name',['License',upper(nmfctn(1)),nmfctn(2:end)],'MenuBar','None'
,'Toolbar','none','NumberTitle','Off','Resize','Off',...
'CloseRequestFcn',@FigLicMode,'Resize','Off','Visible','Off');
set(hg,'DefaultTextInterpreter','tex')
if not(isdeployed) && usertype==0, awinc.loadamevaico(gcf,true);
end%Load ameva ico
hPan = uipanel(hg, 'Title','License', ...
'Units','normalized', 'Position',[0.05 0.075 0.9 0.9]);
uicontrol(hPan, 'Style','listbox', 'FontSize',9, ...
'Min',0, 'Max',2, 'HorizontalAlignment','left', ...
'Units','normalized', 'Position',[0 0 1 1], ...
'String',LabelMenu.LIC{3});%, 'Enable','On'
uicontrol('Style','pushbutton','Units','normalized','Parent',hg,'String'
,'Close', ...
'Position',[0.845 0.02 0.135 0.05],'Callback',@FigLicMode);
set(hg,'NextPlot','new');

%% Configuration Options
function ReadAmevaConf(source,event)
    % decidir las configuraciones de acuerdo al tipo de usuario
    usertype = 1; %student
    LabelMenu.MeshDataSel{2} = 0;
    LabelMenu.Caudal{2} = 0;
    LabelMenu.EnneraClima{2} = 0;
    LabelMenu.Interpolation{2} = 0;
    if exist(which('amevainfo'),'file') == 2,
        usertype = 2; %ih
        LabelMenu.MeshDataSel{2} = 1;
        LabelMenu.Caudal{2} = 1;
        if not(isempty(OC)) && strcmp(varargin{2},'rootoc'),
            usertype = 0; %OC
            LabelMenu.EnneraClima{2} = 1;
            LabelMenu.Interpolation{2} = 1;
        end
    end
end
function FigAbModeOn(source,event)
    set(hi,'Visible','on');
end
    
```

```

function FigAbMode (source,event)
    set (hi, 'Visible', 'off');
end
function FigLicModeOn (source,event)
    set (hg, 'Visible', 'on');
end
function FigLicMode (source,event)
    set (hg, 'Visible', 'off');
end
%% Set PWD
function AmevaPWD (source,event)
    workPath = uigetdir;
    if ~isempty(workPath) && length(workPath)>1 &&
~strcmp(workPath(end), filesep)
        cd(workPath);
    end
end
%% Set idioma
function AmevaIdioma (source,event)
    aux = get (source, 'UserData');
    if strcmp (aux, 'eng') && strcmp (idioma, 'esp'),
        aux_ = questdlg ('AMEVA will restart in english, you want to
continue?', 'Language Restart Window', 'Yes', 'No', 'Yes');
        if strcmp (aux_, 'Yes'), idioma = aux; ameva (idioma); end
    elseif strcmp (aux, 'esp') && strcmp (idioma, 'eng'),
        aux_ = questdlg (['AMEVA se va a reiniciar en
espa', char (241), 'ol, ', char (191), 'desea continuar?'], 'Idioma, Ventana de
reinicio', 'Si', 'No', 'Si');
        if strcmp (aux_, 'Si'), idioma = aux; ameva (idioma); end;
    end
end
%% Close only all Ameva windows
function AmevaClose (source,event)
    set (0, 'ShowHiddenHandles', 'on')
    try
        for j = 1:length (nameallsoftware)
            if ishandle (findobj ('Tag', ['Tag_'
char (nameallsoftware (j))])),
                close (findobj ('Tag', ['Tag_'
char (nameallsoftware (j))]));
            end
        end
    end
delete (findobj ('type', 'figure', 'Name', ['About', upper (nmfctn (1)), nmfctn (2
:end) ]));
    if ishandle (hi), delete (hi); end
    if ishandle (hf), delete (hf); end
    if ishandle (hg), delete (hg); end
catch ME
    delete (get (0, 'Children'));
    rethrow (ME);
end
end
end
end

```



## SCRIPT 2

Una vez ejecutado y obtenido el cuadro de interpolación (*capítulo 4.2.7*, modelo MSP) hay que obtener la serie reconstruida en el interior del puerto (aplicado en los *capítulos 4 y 5*), para ello se ha empleado el siguiente script de MATLAB.

Hay que tener en cuenta que para cada alternativa planteada se deberá ejecutar el script correspondiente.

```
%function Hsi=interpola_MSP_v2(Hs, Tp, Dir)
clear all
close all
clc

%% Leo los datos del DOW

load('dow.mat')
Hs=dow_norte.hs;
Tp=dow_norte.tp;
Dir=dow_norte.wave_dir;
%% Bloque a modificar por el alumno
[A1,A2]=xlsread('cuadro de interpolacion MSP_puntos_A0.xls'); % cuadro
de interpolación
A1(:,1)=[];
A1(:,2:2:size(A1,2))=[];
[B1,B2]=xlsread('Olas_SanAndres.xls',2); % clusters maxdiss

%nombre='Alternativa 2';
num_zonas=7; % número de puntos

%% Leo los datos del forecast en el punto 5
% yy=A(:,1);
% mm=A(:,2);
% dd=A(:,3);
% HH=A(:,4);
% Hs=A1(:,5);
% Tp=A1(:,7);
% Dir=A1(:,8);

% limito los ángulos y periodos ejecutados vs. los reales del forecast

% Tpmin=3;
% Dirmin=45;
% Dirmax=135;
%
% s=find(Dir<Dirmin);
% Dir(s)=Dirmin;
% s=find(Dir>Dirmax);
% Dir(s)=Dirmax;
% s=find(Tp<Tpmin);
% Tp(s)=Tpmin;
```



```

%% Leo los clusters de ejecución
Hs0=B1(:,7);
Tp0=B1(:,8);
Dir0=B1(:,9);
marea=[0]; % rangos de ejecución

%%

for punto=1:num_zonas;

    disp(['--> Interpolando Punto: ', num2str(punto)])

    Hsp=A1(:,punto);

    KHs=Hsp./Hs0;
    s=find(KHs<0.2);
    KHs(s)=0.2;

    KHsi=griddata3ev(Hs0,Tp0,Dir0,KHs,Hs,Tp,Dir);
    s=isnan(KHsi);
    KHsi=griddata3ev(Hs0,Tp0,Dir0,KHs,Hs,Tp,Dir,'nearest');
    %KHsi(s)=griddata3ev(Hs0,Tp0,Dir0,KHs,Hs(s),Tpa(s),Dir(s),'nearest');
    Hsi(:,punto)=Hs.*KHsi;

    %     figure(punto)
    %     plot(Hs,Hsi,'r.',Hs0,Hsp,'bo')
    %     xlabel('Hs fuera')
    %     ylabel('Hs en el punto')
    %     legend('reconstrucción','clusters')
    %     title(['Serie interpolada punto ', num2str(punto)]);
    %     print(gcf,'-dpng','-r300',['Hs pto ',num2str(punto)])
    %     %close all
    % escribo el fichro con todas las fechas

    s=isnan(Hsi(:,punto));
    disp(['número de NaNs: ', num2str(sum(s))])

end

RES=[dow_norte.time,Hsi];
save('SERIE_RECONSTRUIDA.dat','RES','-ascii')

%%
% RR=[A,Hsi];
%
% fid=fopen(['SERIE_reconstuida_',nombre,'.dat'],'w');
% fprintf(fid,'%s \n',[' yy mm dd HH Hs_out Tm_out Tp_out Dir_out
Hs_Zona1 Hs_Zona2 Hs_Zona3 Hs_Zona4 '])
% fprintf(fid,'%4i %2i %2i %2i %6.3f %6.3f %6.3f %6.3f %8.3f %8.3f %8.3f
%8.3f \n',RR);
% fclose all;
% %% Hago el gráfico final

```



```

%
t=datetime(A(:,1),A(:,2),A(:,3),A(:,4),zeros(length(A),1),zeros(length(A)
,1)));
% figure(5)
% subplot(5,1,1)
% plot(t,Hs)
% datetick('x',10)
% axis([min(t) max(t) 0 max(Hs)])
% grid on
% title('Hs fuera (m)')
% set(gca,'fontsize',8)
%
%
% for i=1:num_zonas
%     subplot(5,1,i+1)
%     plot(t,Hsi(:,i))
%     datetick('x',10)
%     axis([min(t) max(t) 0 max(Hs)])
%     grid on
%     set(gca,'fontsize',8)
%     title(['Hs zona ', num2str(i), ' (m)'])
% end
%
%
% print(gcf,'-dpng','-r300',['GRAFICO_SERIES_HS_',nombre])
    
```



### SCRIPT 3

Para obtener el promedio de horas medias anuales de superación (ver *capítulos 4.2.8 y 5*) se emplea el siguiente código. La idea de este script es comparar y obtener alturas de ola significantes superiores a la altura de ola establecida por la ROM (0.2 y 0.4 m para puerto deportivo).

Hay que tener en cuenta que para cada alternativa planteada se deberá ejecutar el script correspondiente.

```
a=load('SERIE_RECONSTRUIDA.dat');

Hs_lim=0.4;

%%
t=a(:,1);
% quito el tiempo de a
a(:,1)=[];

% hago el bucle para verificar el % de horas al año que supera el
Hs_lim
clear TT
for i=1:size(a,2)
    disp(i)
    s=find(a(:,i)>=Hs_lim);
    por(i,:)=100.*(length(s)./length(a(:,i)));
    no_horas_year(i,:)=(por(i,:)./100).*8760;
    TT{i+1,2}=por(i,:);
    TT{i+1,3}=no_horas_year(i,:);
    TT{i+1,1}=['Punto ',num2str(i)]
end

%% grabo los resultados en un EXCELL
TT{1,1}='Puntos';
TT{1,2}='% Horas año > Hs_lim';
TT{1,3}='No.- horas al año > Hs_lim';
xlswrite('Resultados_ROM.xls',TT)
```

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Manual de referencia MSP-V2.0-Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España.
- Archivos y datos facilitados por el IHCantabria:
  - Batimetría de detalle de la zona de estudio, proporcionada por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
  - Archivo CAD de la configuración de la geometría portuaria, proporcionado en formato AutoCAD<sup>®</sup> DWG por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
  - Serie de reanálisis de datos horarios de oleaje DOW 1.1 (Downscaling Ocean Waves), de más de 66 años de duración, frente al puerto de estudio. Serie perteneciente a IHCantabria.
- Puertos del Estado (España) (1999) Recomendaciones para obras marítimas - ROM 3.1-99 – “Proyecto de la configuración marítima de los puertos, canales de acceso y áreas de flotación”. - Parte 8: Requerimientos de planta.
- Puertos del Estado (España) (1999) Recomendaciones para obras marítimas - ROM 0.0 – “Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias”. - Parte 2.7: Carácter general y operativo.
- Berkhoff, J.C.W., Booij, N. & Radder, A.C. 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves, *Coastal Eng.* 6 (3), 255–279.
- Camus, P.; Méndez, F.J.; Medina, R.; Cofiño, A.S.; 2011a. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), pp 453-462. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003
- Franke, R.; 1982. Scattered data interpolation: test of some methods. *Math. Comp.*, 38, pp 181-200.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Jenne, R. and Joseph, D.; 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, 437-470.
- Menéndez, M., Tomás, A., Camús, P., García-Diez, M., Fita, L., Fernandez, J., Méndez, F.J., Losada, I.J.; 2011. A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources. *Oceans 2011. IEEE. Spain.* ISBN: 978-1-4577-0086-6
- Mínguez, R.; Espejo, A.; Tomás, A.; Méndez, F.J.; Losada, I.J.; 2011. Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.*



## RESUMEN

**Título del Trabajo Final de Máster:** Modelo numérico para el estudio de agitación en el puerto de San Andrés y análisis de alternativas.

**Autora:** Andrea Gema Serrano Campo

**Director:** Gabriel Díaz Hernández

**Convocatoria:** Junio 2018

**Palabras clave:** Puerto, propagación, clima marítimo, dique, ampliación, diseño, MSP, agitación, operatividad.

### **Planteamiento y desarrollo de estudio:**

En la costa de San Andrés, situada en la isla de Tenerife, el diseño de las obras portuarias fue realizado previo a la concepción y construcción de las nuevas obras de protección del frente marítimo de la costa. Estas obras de protección fueron construidas finalmente en el año 2016.

El estudio original de operatividad, fue realizado sin tener en cuenta estas obras de protección frente al paseo marítimo de San Andrés. Por lo tanto, las condiciones de agitación cambian al considerar la presencia de un frente marino modificado.

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster consiste en determinar, mediante un modelo numérico MSP (a través de script de MATLAB), la agitación en el interior del nuevo puerto de San Andrés para la situación inmediata tras su construcción y para distintas alternativas planteadas del sistema puerto-costa. El objetivo final es intentar alcanzar la operatividad exigida por la ROM en el interior del puerto.

Para poder conseguir este objetivo, se ha realizado un análisis del clima marítimo frente al futuro puerto a través de una serie de datos horarios de 66 años de duración. A continuación, se realizó la propagación y agitación numérica del oleaje, definiendo una librería de oleajes monocromáticos y seleccionando  $N=300$  oleajes representativos frente a la zona portuaria, empleando el algoritmo Max-Diss. El conjunto de los  $N$  oleajes se propagó mediante la herramienta MSP y así, se pudo evaluar la respuesta del puerto ante cada tipo de estado de mar.

Posteriormente se realizó una reconstrucción de la serie horaria de oleaje de 66 años en las  $M=7$  zonas de control situadas en el interior del puerto, siguiendo un algoritmo de interpolación lineal y por último se definió un análisis de operatividad.

Finalmente se plantearon distintas alternativas y se efectuaron los pasos anteriormente mencionados para poder realizar un análisis comparativo de la operatividad entre la alternativa 0 (estado actual) y las diferentes alternativas planteadas.



## Conclusiones:

El diseño de las nuevas obras portuarias fue realizado previo al diseño y construcción de las nuevas obras de protección del frente marítimo de San Andrés, así que el estudio original de operatividad, fue realizado sin tener en cuenta las nuevas obras de protección costera y por tanto, las condiciones de agitación originales cambian al considerar la presencia de un frente marino modificado.

Para la estudio de esas nuevas condiciones se ha desarrollado un modelo numérico MSP, basado en la propagación y agitación numérica de oleaje espectral, que ha permitido a la autora del presente trabajo, analizar los datos en diferentes puntos del interior del puerto y la realización del estudio de alternativas.

Este modelo permite el estudio de todos los posibles estados de mar para ser aplicado en un punto de la costa. Una gran ventaja del modelo, es la posibilidad de manejar casi infinitos estados de mar, o al menos la totalidad de los estados de mar registrados en la actualidad.

Se ha definido un sistema simplificado para hacer los estudios. El coste de ordenador (medido en horas de cálculo) con esta nueva técnica propuesta es elevado, las ejecuciones de los casos más complejos son superiores a las 8 horas de cálculo.

Pero realmente es muy inferior a los cálculos actuales, que precisan ordenadores especializados en centros de investigación.

El modelo facilitado por el IHCantabria ha sido de aplicación por la autora en el presente trabajo en el puerto de San Andrés:

- Se trata de un caso real que ha sido estudiado por el IHCantabria, pero con el uso de la nueva tecnología simplificada permite comprobar que se llega prácticamente a las mismas conclusiones.
- Se han analizado nuevas alternativas, definiendo nuevos trazados geométricos para cada una de ellas.
- Se han comparado las cuatro alternativas: estado actual y las tres alternativas planteadas, definiendo los parámetros adecuados en el interior de la dársena:
  - Agitación
  - Altura de ola
  - Operatividad en el interior del puerto y de la bocana
- Por tratarse de una comprobación de la validez del modelo, se han considerado simplemente tres posibles alternativas; el rango de posibilidades se podría ampliar a decenas de alternativas hasta encontrar la definitiva.

- El presente trabajo trata de mostrar la aplicación de esta técnica y permitir la comparación entre diferentes casos, de forma que exista la posibilidad de elección de una solución con suficiente garantía de cumplimiento de lo marcado por las recomendaciones de la normativa (normas ROM).

### Bibliografía:

- Manual de referencia MSP-V2.0-Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España.
- Archivos y datos facilitados por el IHCantabria:
  - Batimetría de detalle de la zona de estudio, proporcionada por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
  - Archivo CAD de la configuración de la geometría portuaria, proporcionado en formato AutoCAD® DWG por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
  - Serie de reanálisis de datos horarios de oleaje DOW 1.1 (Downscaling Ocean Waves), de más de 66 años de duración, frente al puerto de estudio. Serie perteneciente a IHCantabria.
- Puertos del Estado (España) (1999) Recomendaciones para obras marítimas - ROM 3.1-99 – “Proyecto de la configuración marítima de los puertos, canales de acceso y áreas de flotación”.- Parte 8: Requerimientos de planta.
- Puertos del Estado (España) (1999) Recomendaciones para obras marítimas - ROM 0.0 – “Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias”.- Parte 2.7: Carácter general y operativo.
- Berkhoff, J.C.W., Booij, N. & Radder, A.C. 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves, Coastal Eng. 6 (3), 255–279.
- Camus, P.; Méndez, F.J.; Medina, R.; Cofiño, A.S.; 2011a. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. Coastal Engineering, 58(6), pp 453-462. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003
- Franke, R.; 1982. Scattered data interpolation: test of some methods. Math. Comp., 38, pp 181-200.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Jenne, R. and Joseph, D.; 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc. 77, 437-470.
- Menéndez, M., Tomás, A., Camús, P., García-Diez, M., Fita, L., Fernandez, J., Méndez, F.J., Losada, I.J; 2011. A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources. Oceans 2011. IEEE. Spain. ISBN: 978-1-4577-0086-6



- Mínguez, R.; Espejo, A.; Tomás, A.; Méndez, F.J.; Losada, I.J.; 2011. Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.



## ABSTRACT

**Final Degree Project:** Numerical model for the study of agitation in the harbour of San Andrés and analysis of the alternatives

**Author:** Andrea Gema Serrano Campo

**Director:** Gabriel Díaz Hernández

**Announcement:** June 2018

**Keywords:** Harbour, propagation, maritime climate, dike, expansion, design, MSP, agitation, operability.

### **Approach and development of the study:**

On the coast of San Andrés, located on the island of Tenerife, the design of the harbour was carried out prior to the conception and construction of new protective works in the seafront of the coast. These protective works were finally built in 2016.

The original study of operability was carried out without taking into account these protective works in front of the San Andrés. Therefore, the conditions of agitation change when considering the presence of a modified marine front.

The main objective of this Master's Final Project is to determine, through a numerical model MSP (through the MATLAB script), the agitation inside the new harbour of San Andrés for the immediate situation after its construction and for different proposed alternatives of the harbour-coast system. The final goal is to achieve the operability required by the ROM inside the harbour.

In order to achieve this goal, an analysis of the maritime climate against the future harbour has been carried out through a series of 66-year time data. Then, the propagation and numerical agitation of the waves was carried out, defining a library of monochromatic waves and selecting  $N = 300$  representative waves against the harbour area, using the Max-Diss algorithm. The set of the waves was propagated through the MSP tool and thus, the response of the harbour to each type of sea state could be evaluated.

Subsequently, a reconstruction of the 66-hour wave series was carried out in the  $M = 7$  control zones located inside the harbour, following a linear interpolation algorithm and finally, an operational analysis was defined.

Finally, different alternatives were proposed and the aforementioned steps were carried out in order to perform a comparative analysis of the operation between alternative 0 (current state) and the different alternatives proposed.



## Conclusions:

The design of the new harbour works was carried out prior to the design and construction of the new works for the protection of the San Andrés sea front, so the original study of operability was carried out without taking into account the new coastal protection works and therefore, the original agitation conditions change when considering the presence of a modified marine front.

For the study of these new conditions, a numerical model MSP has been developed, based on the propagation and numerical agitation of spectral waves, which has allowed the author of the present work to analyze the data in different points of the interior of the harbour and the realization of the study of alternatives.

This model allows the study of all possible sea states to be applied at a point on the coast. A great advantage of the model is the possibility of managing almost infinite sea states, or at least the totality of the sea states registered at present.

A simplified system has been defined to do the studies. The computer cost (measured in calculation hours) with this proposed new technique is high, the executions of the most complex cases are greater than 8 hours of calculation.

But it really is very inferior to the current calculations, which require specialized computers in research centers.

The model facilitated by the IHCantabria has been applied by the author in the present work in the harbour of San Andrés:

- It is a real case that has been studied by the IHCantabria, but with the use of the new simplified technology it is possible to verify that the same conclusions are reached.
- New alternatives have been analyzed, defining new geometric paths for each of them.
- The four alternatives have been compared: current status and the three alternatives proposed, defining the appropriate parameters inside the dock:
  - Agitation
  - Wave height
  - Operability inside the port and the entrance
- Because it is a verification of the validity of the model, only three possible alternatives have been considered; The range of possibilities could be extended to dozens of alternatives until finding the definitive one.





- The present work tries to show the application of this technique and allow the comparison between different cases, so that there is the possibility of choosing a solution with sufficient guarantee of compliance with what is marked by the recommendations of the regulations (ROM standards).

### Bibliography:

- Manual de referencia MSP-V2.0-Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España.
- Archivos y datos facilitados por el IHCantabria:
  - Batimetría de detalle de la zona de estudio, proporcionada por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
  - Archivo CAD de la configuración de la geometría portuaria, proporcionado en formato AutoCAD<sup>®</sup> DWG por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife.
  - Serie de reanálisis de datos horarios de oleaje DOW 1.1 (Downscaling Ocean Waves), de más de 66 años de duración, frente al puerto de estudio. Serie perteneciente a IHCantabria.
- Puertos del Estado (España) (1999) Recomendaciones para obras marítimas - ROM 3.1-99 – “Proyecto de la configuración marítima de los puertos, canales de acceso y áreas de flotación”.- Parte 8: Requerimientos de planta.
- Puertos del Estado (España) (1999) Recomendaciones para obras marítimas - ROM 0.0 – “Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias”.- Parte 2.7: Carácter general y operativo.
- Berkhoff, J.C.W., Booij, N. & Radder, A.C. 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves, *Coastal Eng.* 6 (3), 255–279.
- Camus, P.; Méndez, F.J.; Medina, R.; Cofiño, A.S.; 2011a. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), pp 453-462. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003
- Franke, R.; 1982. Scattered data interpolation: test of some methods. *Math. Comp.*, 38, pp 181-200.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Jenne, R. and Joseph, D.; 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, 437-470.
- Menéndez, M., Tomás, A., Camús, P., García-Diez, M., Fita, L., Fernandez, J., Méndez, F.J., Losada, I.J; 2011. A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources. *Oceans 2011*. IEEE. Spain. ISBN: 978-1-4577-0086-6



- Mínguez, R.; Espejo, A.; Tomás, A.; Méndez, F.J.; Losada, I.J.; 2011. Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.