



## **G-GI3002/IDII**

# **Dragados en el sistema portuario andaluz: método para la gestión y toma de decisiones**

Universidad de Granada, Universidad de  
Córdoba



### **TAREA 4:**

**Modelado de procesos**

**en la zona del puerto pesquero de Carboneras**



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA



Universidad de Granada

Unión Europea



Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional

16/07/2015



## INDICE:

<b>Capítulo 1</b>	<b>4</b>
<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 2</b>	<b>13</b>
<b>Caracterización de la Zona de estudio</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo 3</b>	<b>31</b>
<b>Metodología</b>	<b>31</b>
<b>Capítulo 4</b>	<b>39</b>
<b>Clima marítimo en la zona de estudio</b>	<b>39</b>
<b>Capítulo 5</b>	<b>72</b>
<b>Campaña de campo</b>	<b>72</b>
<b>Capítulo 6</b>	<b>86</b>
<b>Modelo numérico I: Aplicación, Calibración, Validación</b>	<b>86</b>
<b>Capítulo 7</b>	<b>101</b>
<b>Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones</b>	<b>101</b>
<b>Capítulo 8</b>	<b>115</b>
<b>Propuesta de alternativas</b>	<b>115</b>



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El presente proyecto se encuadra en una zona un tanto peculiar dentro de la geografía española. Nos encontramos en el Levante almeriense, en dicha zona conviven espacios naturales de alto valor ecológico y actividades industriales de elevado impacto económico comarcal y regional, de las cuales, las relacionadas con la actividad portuaria tienen un peso significativo.

Desde el punto de vista ambiental y socioeconómico cabe destacar las siguientes bases sobre las que se asienta la motivación de este informe técnico:

- La existencia de espacios naturales protegidos por figuras tanto comunitarias como nacionales y regionales. Estos ecosistemas presentan una elevada producción biológica, tanto primaria como secundaria.
- Diversas actuaciones antrópicas han podido modificar significativamente el esquema circulatorio y la dinámica litoral natural. Lo cual ha podido ser una afección ambiental y haber podido cambiar las condiciones que favorecen el desarrollo de la vida.
- La actividad portuaria representa uno de los pilares de la economía de la región.
- Busca de una gestión más económica y eficiente en el sistema de dragado actual.

### 1.2. Antecedentes

Este informe se encuadra dentro de la TAREA 4: “Modelado de procesos” como parte del proyecto “Dragados en el sistema portuario andaluz: método para la gestión y toma de decisiones”. Este proyecto permitirá contribuir al conocimiento de los procesos físicos para concebir y diseñar así estrategias de dragado compatibles con el entorno natural y que aprovechen favorablemente la contribución de los agentes naturales. El informe ha sido realizado por Ángela Tintoré Parra y Rafael Bergillos Meca, bajo la dirección del IP del proyecto Miguel Ortega Sánchez.

Con la realización de la TAREA 1, consistente en la recopilación de información, en la cual se consultaron más de 60 actuaciones de dragado llevadas a cabo en diferentes puertos de Andalucía, titularidad de la Agencia Pública de Puertos de Andalucía (a partir de ahora APPA), y su posterior tratamiento, se obtuvo como resultado una completa y actualizada base de datos.

A la luz de los datos obtenidos se llega a la conclusión de que una de las zonas prioritarias de estudio sea el puerto de Carboneras (Almería). En este gráfico se muestran las actuaciones llevadas a cabo en el puerto pesquero de Carboneras. Las fechas marcadas coinciden con la redacción del proyecto, no con la realización de las obras.

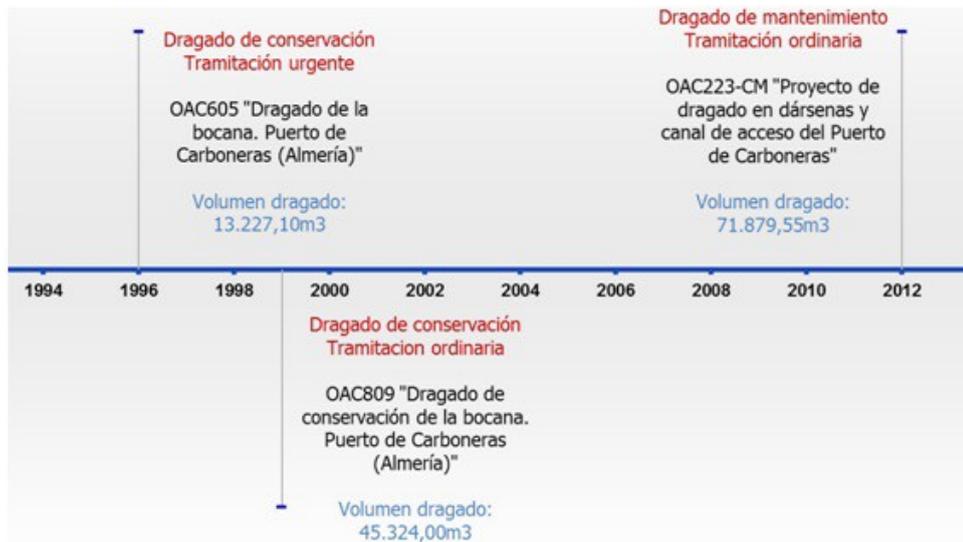


Figura 1.1: Eje cronológico de las actuaciones en el Pto. de Carboneras

A primera vista, se aprecia que el puerto de Carboneras, no requiere ser dragado periódicamente cada cierto tiempo.

En los 3 dragados realizados hasta el momento el volumen extraído ha sido el siguiente:

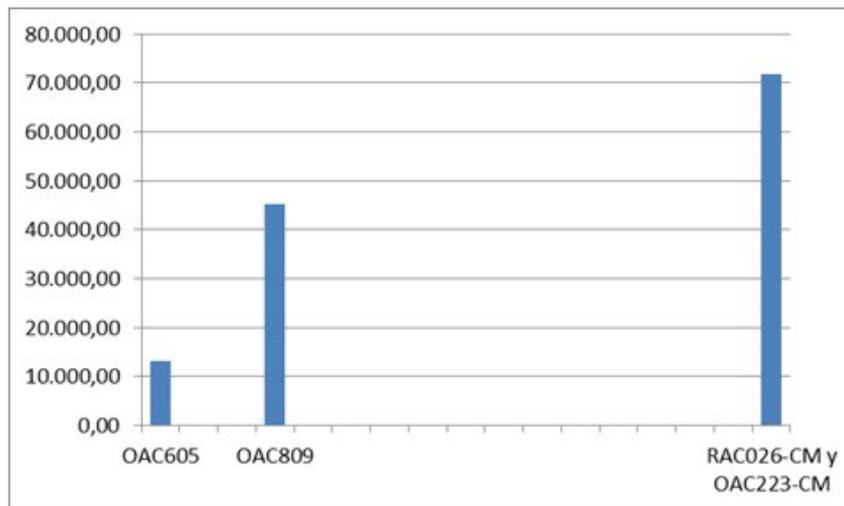


Figura 1.2: Volumen dragado en las actuaciones en el Pto. de Carboneras

Se ve claramente que el de mayor volumen dragado ha sido el último, el realizado en 2012. También cabe destacar que en la última actuación la cota máxima de dragado es de -6,00 B.M.V.E. frente a los -5,00 B.M.V.E. de las actuaciones anteriores y que el talud máximo es de 6:1 en la última actuación mientras que en las predecesoras fue de 2:1 y 4:1.

El presupuesto total destinado a actuaciones de dragado en el Puerto de Carboneras es de **1.298.222,07€** que se reparten por actuaciones del siguiente modo:

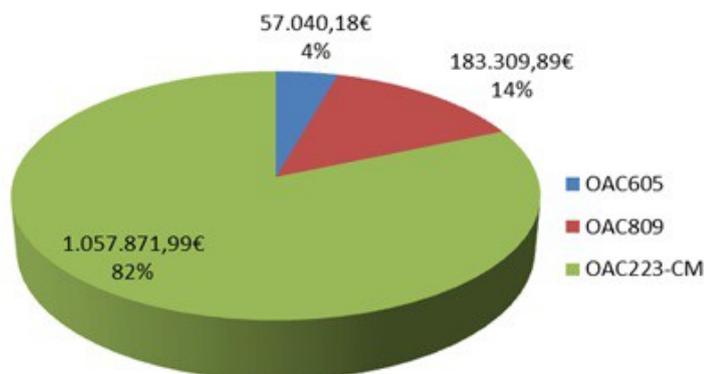


Figura 1.3: Presupuestos de liquidación de cada una de las actuaciones en el Puerto de Carboneras

Se observa también con facilidad que el mayor presupuesto se ha alcanzado en la actuación más reciente. Lo cual es fácilmente deducible si se analiza los precios medios de ejecución de  $1m^3$  de dragado según las diferentes actuaciones.

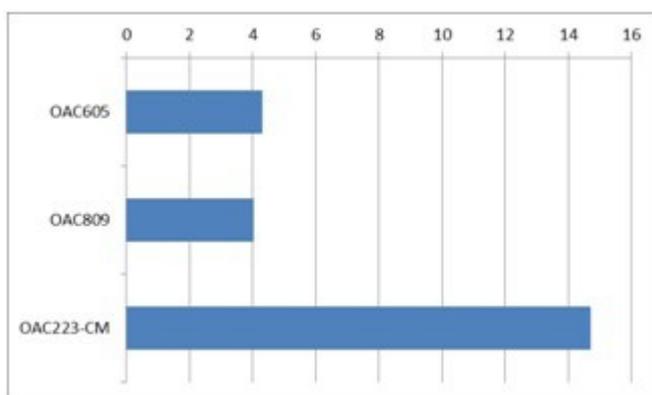


Figura 1.4: Precios medios de la ejecución de un metro cúbico en las actuaciones en el Pto. de Carboneras.

Vemos que en la última actuación se alcanza un precio medio de ejecución casi de **15e**, superior al alcanzado en las dos primeras actuaciones. El precio medio de la ejecución de  $1m^3$  de dragado en el Puerto de Carboneras es de **9,95e**.

Por último con respecto a los materiales que se han extraído y su utilización han sido por lado **arenas** y por otro lado **arenas con fangos**. El destino de estos materiales ha sido vertido a mar abierto o regeneración de playas para el primer caso y vertido en vertedero autorizado para el segundo caso. En la última actuación, también mencionar que el material dragado en el interior de la dársena del puerto, el cual son arenas fue destinado a la regeneración de una cantera en la localidad de Níjar.

### 1.3. Situación actual

Carboneras es un municipio de la provincia de Almería, Andalucía, situado en la comarca del Levante Almeriense, a una altitud de 10 msnm y a 63 km. de la capital de provincia, Almería.



Figura 1.5: Ubicación del puerto de Carboneras

Primeramente es conveniente mencionar que el pueblo de Carboneras tiene 3 puertos, 2 de ellos son comerciales, y el puerto pesquero, el cual está situado más al norte y el cual es objeto de nuestro proyecto.

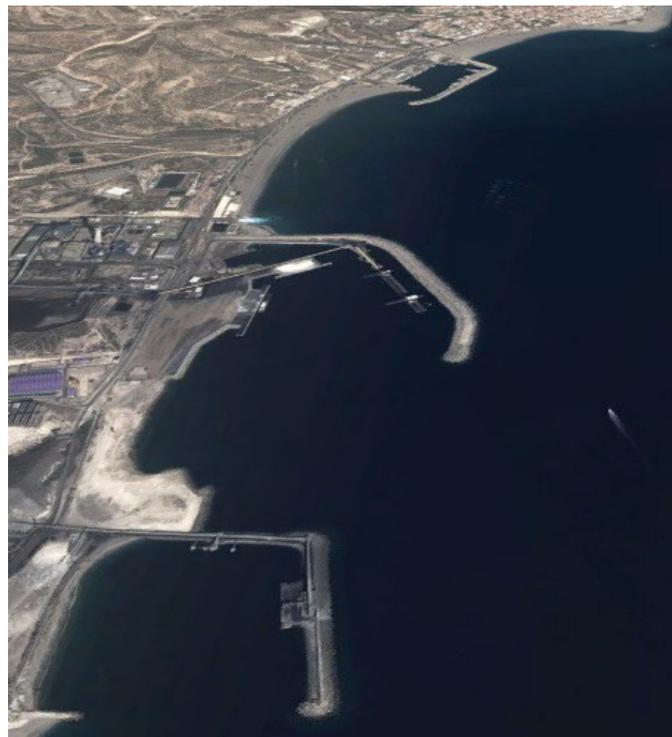


Figura 1.6: Vista aérea de los tres puertos de Carboneras

La pesca sigue teniendo una gran importancia en el “pueblocico”, como es conocido coloquialmente Carboneras, aun así, se desprende un ambiente pesimista (bien es cierto que esta situación ha sido más o menos general a lo largo del litoral andaluz), y varios buques están esperando el desguace. La modalidad pesquera predominante es el palangre de superficie, llevando a cabo importantes desplazamientos en busca de sus capturas. Esto influye bastante en la vida del pueblo, pues hay grandes temporadas en las que los marineros están lejos de sus casas. Y como no, también influye en la economía, ya que cuando los barcos están en puerto las actividades incrementan su dinamismo.

En total, aproximadamente, la flota de Carboneras está formada por 65 buques que desplazan 3.167,8 GT y tienen una potencia registrada de 9.624,8 CV. De este total, 37 buques se dedican al palangre de superficie, así, hablar de palangre de superficie en Andalucía es hacer alusión a Carboneras, que dispone de la flota más importante en esta modalidad. La siguiente modalidad más numerosa en el puerto carbonero son los artes menores, mientras que el rastro, el cerco, el arrastre de fondo y el palangre de fondo tienen mucho menos protagonismo.



Figura 1.7: Fotografía aérea del Pto. pesquero de Carboneras

La **geometría actual** del puerto se describe, a grandes rasgos, del siguiente modo:

1. Un primer dique que frena el tren de olas originados por los vientos del primer cuadrante (Norte-Noreste), generando así un espacio inicial de agua abrigada que aprovecha las condiciones de la ensenada. Dicho dique posee un morro circular cuyas coordenadas son:  
Latitud: 36° 59' 17,08" N Longitud: 1° 53' 53,31" O.
2. Un contradique que frena los temporales del sur.
3. Las instalaciones con las que cuenta el puerto son las siguientes: Lonja, la cual tiene una superficie total de 1.481,33  $m^2$  y dispone de una sala para la subasta de las capturas, cámaras frigoríficas y oficinas, cuartos de armadores, suministro combustibles (gasolina y gasoil) y varadero.

### 1.3.1. Problemática y principales peculiaridades

Como se ha comentado con anterioridad el puerto de Carboneras no es un puerto que necesite un dragado periódico. Pero es obvio que con el paso del tiempo va sufriendo pérdida de calado que complica la operatividad de los buques que en él operan.

El primer punto a destacar es que observando las ortofotos de años sucesivos del puerto y sus zonas adyacentes vemos que la playa creada gracias al contradique está creciendo cada vez más en la parte pegada al citado contradique. En la siguiente imagen podemos ver la variación en la línea de costa de esta playa desde 1956 cuando aún no existía el puerto hasta 2009.



Figura 1.8: Variación línea de playa creada por el contradique

Observando esta imagen se ve la situación mencionada. Una vez llegado al extremo del contradique el sedimento, por la propia dinámica litoral, puede entrar en el puerto arrastrado por las corrientes en esta dirección.

Este hecho presenta un punto muy peculiar también, que merece ser estudiado con detenimiento, ya que esta playa se encuentra abrigada entre el puerto pesquero y el puerto comercial de Purcusa, y por lo tanto la alimentación de esta playa tiene que ser debida a un proceso un tanto peculiar. Se tratará de conocer a fondo la zona con la ayuda del modelo numérico.

En el año 2001 vemos un retroceso en esta línea de playa. Esto puede ser debido a acción antrópica, consecuencia de la actuación de dragado efectuada en el año 1999.

Otro punto característico de la zona es la presencia de la **isla de San Andrés**, que está situada a apenas un kilómetro de la costa, a la altura del puerto pesquero de Carboneras. Esta isla puede representar un punto determinante en la dinámica litoral de la zona y como consecuencia de la creación o erosión de las playas adyacentes. Por este motivo también se analizará con detenimiento y se utilizará el modelo para ver cómo de significativa es la presencia de esta isla.



Figura 1.9: Localización isla de San Andrés

Además de estos factores, el Puerto de Carboneras posee una serie de **limitaciones en cuanto a la gestión y vertido del material dragado**. Vemos a continuación dichas limitaciones.

Como ya dijimos al comienzo una de las principales peculiaridades de este proyecto es que nos encontramos en una zona que tiene un gran valor ambiental y que está rodeada de espacios naturales protegidos.

Carboneras se encuentra rodeada del **Parque Natural de Cabo de Gata**, el cual ocupa ciertas zonas de su término municipal. Estos espacios pertenecen a la **Red Natura 2000**. Debido a la gran protección ambiental de estas áreas, cerca de estas hay que actuar con mucha cautela.

La red Natura 2000 una red ecológica europea de áreas de conservación de la biodiversidad. Es establecida con arreglo a la Directiva 92/43/CEE, sobre la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres, (conocida como Directiva Hábitats) de 1992. Consta de **Zonas Especiales de Conservación (ZEC)** establecidas de acuerdo con la Directiva Hábitat y de **Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA)** designadas en virtud de la Directiva 79/409/CEE (Directiva Aves) de 1979. También consta de **Lugares de Importancia Comunitaria (LIC)** que con el paso del tiempo pasan a ser Zonas Especiales de Conservación (ZEC).

Su finalidad es asegurar la supervivencia a largo plazo de las especies y los tipos de hábitat en Europa, contribuyendo a detener la pérdida de biodiversidad. Es el principal instrumento para la conservación de la naturaleza en la Unión Europea.

La trayectoria que ha seguido el Parque Natural de Cabo de Gata desde que fue nombrado Parque Natural hasta la actualidad ha sido la siguiente.

- 1987

La extensa zona de 26.000 hectáreas que comprende la costa y sierra de Cabo de Gata y una enorme franja costera de Níjar fueron declaradas Parque Natural el 23 de diciembre de 1987

- 1994

Se amplió el territorio del Parque Natural en 1994 con la inclusión de gran parte del término municipal de Carboneras. En la actualidad su extensión es de 38.000 hectáreas terrestres y 12.000 marinas. Aquí se ve que las zonas protegidas son tanto zonas emergidas como zonas sumergidas.

- 1997

El Parque fue declarado por la UNESCO “Reserva de la Biosfera”, obteniendo también las denominaciones de “Zona de Especial Protección para las Aves” (ZEPA), “Zona RAMSA”, “Lugar de Interés Comunitario” y, muy recientemente, “Zona de Especial Interés del Mediterráneo” (ZEPIM).

- 2006

La UE aprueba definitivamente los Lugares de Interés Comunitario que pasan a integrar la Red Natura 2000. El Parque de Cabo de Gata es uno de los LIC incluidos, contando con una extensión total de 49.547,10 hectáreas.

Se muestra un mapa donde aparecen delimitados todos los espacios protegidos de la Red Natura 2000 de nuestra zona, divididos en Zonas LIC, ZEC y ZEPA.

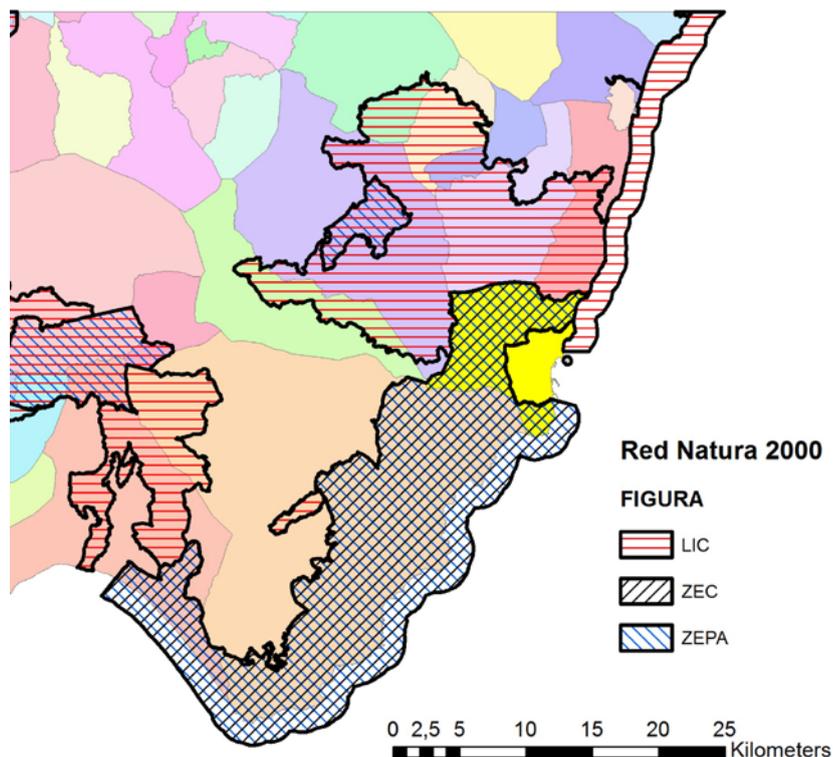


Figura 1.10: Mapa Zonas Red Natura 2000

Como se puede observar en la figura esto puede representar una gran limitación a la hora del vertido del material dragado, puesto que son zonas muy especiales y la actuación en ellas debe ser bien estudiada y analizada. Hay que analizar muy bien los valores ambientales que fueron tenidos en cuenta para su catalogación o hábitats o especies prioritarios localizados en sus programas de seguimiento y los objetivos de conservación de los mismos, así como hacer una estimación de la probabilidad de que el vertido o colocación les pudiera afectar atendiendo a la dispersión de los sedimentos en función del hidrodinamismo de la zona.

Se asegurará que las actuaciones de reubicación de los materiales resultan compatibles con los objetivos de conservación de estos espacios.

Las obras de mantenimiento que se realicen en el interior o las inmediaciones de un espacio Natura 2000 deben estar concebidas específicamente para cada zona costera.

A esta limitación se le suma la presencia de **tres grandes caladeros** próximos a la costa de Carboneras. Esta presencia también reduce libertad a la hora del vertido en el mar del material dragado.

Las especies que se pueden encontrar en estos caladeros son: sardina, boquerón, caballa, jurel, pez espada, marrajo, bonito, melva, atún, lecha, jibia, salmonete, breca y pulpo.

En la siguiente figura se muestra la localización de estos caladeros y su posición relativa con respecto a las zonas pertenecientes a la Red Natura 2000.

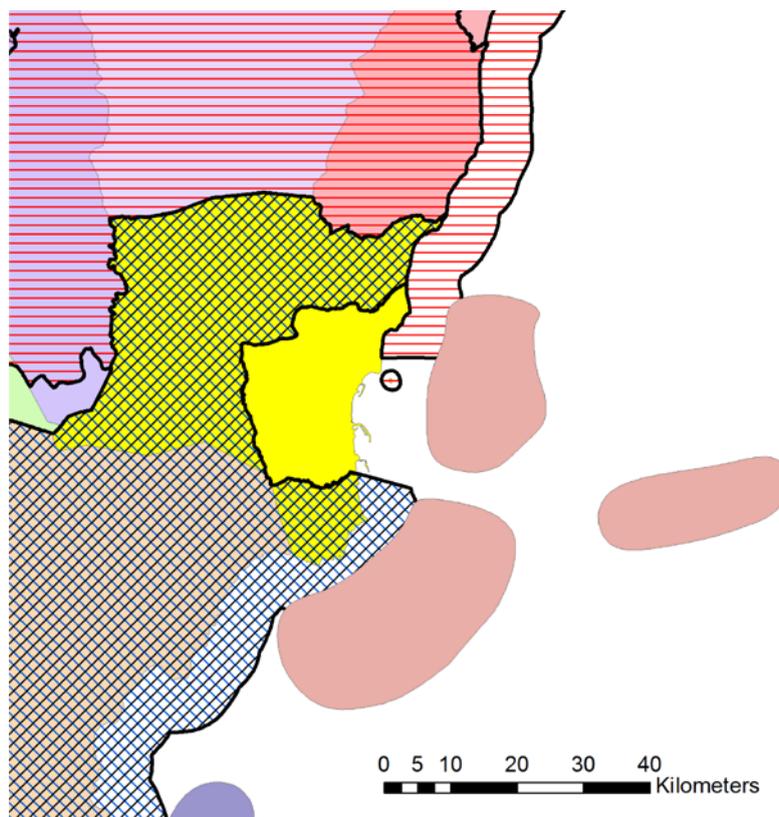


Figura 1.11: Caladeros de la zona junto a la red de espacios protegidos

Observando esta última figura se ve como el área que encierran todas las limitaciones hasta ahora citadas es algo reducida.

A todas estas áreas peculiares habría que añadir otra franja que correspondería con los primeros metros de costa, puesto que esta área está restringida al vertido de material dragado hasta una profundidad aproximada de 25 metros.

Entre las variables que van a jugar un papel predominante en la localización del punto de vertido del material se encuentra como es de esperar el tipo y categoría del material.

Siendo así, según el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas se definen a grandes rasgos 3 categorías de materiales:

▪ **Categoría I**

Pueden verterse libremente al mar, con la única consideración de los efectos de tipo mecánico. Se considera que los efectos sobre la flora y la fauna marinas son nulos o prácticamente insignificantes.

▪ **Categoría II**

Pueden verterse al mar de forma controlada, de acuerdo con el procedimiento que establecen las RGMD. Todos los materiales de Categoría I y II pueden dedicarse a usos productivos en el continente.

▪ **Categoría III**

Han de ser aislados de las aguas marinas o someterse a tratamientos adecuados.

Si con esta información consultamos la base de datos de la que disponemos para ver qué tipo y qué categoría tenían los materiales dragados anteriormente vemos que el 90 % son arenas de Categoría I por lo que se podrían verter al mar con las mencionadas limitaciones; pero una pequeña parte de la totalidad son arenas con fangos, que estos últimos y tratándose de la zona tan delicada en la que nos encontramos pueden resultar muchos más peligrosos que las arenas, sobretodo en las proximidades de caladeros, por ello resulta lógico trasladarlos un vertedero autorizado, fuera de las zonas protegidas, como se hizo en la última actuación.

<b>Material 1: caracterización</b>	<b>Material 1: Uso</b>	<b>Material 1: Destino</b>	<b>Material 2</b>	<b>Material 2: Uso</b>	<b>Material 2: Destino</b>
Arenas y fangos Categoría I	Vertido a mar abierto	A 4 millas dirección Este desde el Puerto			
Arenas Categoría I	Regeneración de playas	Playa al norte del Puerto de Carboneras y a una distancia no superior a 3 millas de éste.			
Arenas	Regeneración playas	Playa de las Escobetas Playa del Lancón	Arenas con fangos		Vertedero autorizado

Cuadro 1.1: Extracto base de datos facilitados por la APPA



Se observa mirando las 3 actuaciones que a pesar de que en la primera de ellas, la cual se produjo en el año 1996, se obtuvieron también arenas con fangos, todo el material dragado fue vertido al fondo marino. Esto pudo ser debido a una mayor flexibilidad en cuanto a la legislación en materia medioambiental, pasando ésta a ser más restrictiva con el paso de los años.

En general, en la corta historia de los dragados en el puerto de Carboneras, el material dragado se podría verter al mar, o bien, como ha ocurrido en las 2 últimas actuaciones, resultando mucho más productivo, se podría utilizar este material para la regeneración de playas cercanas, como también se ha hecho con anterioridad.

Como conclusión podemos decir que además del problema de aterramiento del puerto hay que prestar especial atención a la reubicación y gestión de los vertidos puesto que nos encontramos en un área rodeada de espacios protegidos y caladeros próximos, todo ello intentando darle un uso lo más productivo posible.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

El objetivo final de este proyecto es analizar en detalle la problemática con la que nos encontramos y proponer soluciones que mejoren ambiental y económicamente la gestión de los dragados en el Pto. pesquero de Carboneras. Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos que se describen a continuación:

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Análisis de la situación actual de la zona de estudio
- Estudio del clima marítimo de la zona de estudio
- Calibración y validación de un modelo numérico de propagación de oleaje e hidrodinámico
- Definición de unos escenarios correspondientes a diferentes situaciones e hipótesis, con los cuales podremos ver la diferencia entre las distintas posibles actuaciones.
- Simulación del régimen medio y de tormenta sobre dichos escenarios para analizar la influencia de estos sobre la hidrodinámica de la zona.
- Análisis de los resultados obtenidos al simular los escenarios con el modelo numérico calibrado
- Redacción de conclusiones y recomendaciones

# Capítulo 2

## Caracterización de la Zona de estudio

### 2.1. Descripción general de la Zona de Estudio

El pueblo pesquero de Carboneras se encuentra a orillas del mar Mediterráneo, en el litoral levantino almeriense, a pie de Sierra Cabrera. Cuenta con un paisaje formado por terrenos áridos, semidesérticos, volcánico, incluidos dentro del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, primer espacio protegido andaluz terrestre-marítimo que comprende espacios y paisajes únicos: las únicas montañas de origen volcánico de la península; la franja costera con sus dunas, playas y salinas se considera un verdadero espectáculo natural destacando la milla de mar protegida cuyos fondos son de una gran riqueza. En ese entorno se encuentra el pueblo, cuyo origen está en la construcción del Castillo de San Andrés para uso militar en el siglo XVI. Conjunto blanco y luminoso de casas agrupadas junto al mar azul cobalto; lugar ideal para el disfrute del sol y la playa, de la tranquilidad y de un clima excelente.



Figura 2.1: Fotografía emplazamiento pueblo de Carboneras

La localidad cuenta con 14,5 kilómetros de **playas**, destacando las urbanas de **El Ancón**, **Los Barquicos** y **Los Cocones**, pudiéndose divisar desde toda la playa de Carboneras, la Isla de San Andrés, una pequeña isla rocosa de 1,5 hectáreas cuya línea en el horizonte asemeja al de una ballena y que es Monumento Natural desde el año 2.003. En la desembocadura del río Alías se encuentran una serie de playas vírgenes como **la playa del Corral**, **la playa del Algarrobico** y **la Playa de los Muertos**, con formaciones rocosas de naturaleza volcánica modeladas por el viento y el mar.



Figura 2.2: Plano localización playas de Carboneras

Al sur del pueblo siguiendo la costa se encuentra el faro y la torre de Mesa Roldán, del siglo XVIII. Hacia el suroeste limita con las playas de Níjar y la pedanía nijareña de Agua Amarga.

Carboneras cuenta con una zona industrial en la que se sitúan una fábrica cementera, una central térmica, una de las mayores planta desaladoras de Europa (con capacidad para desalar 120.000 metros cúbicos de agua diarios) y una piscifactoría dedicada a la cría y engorde de Lubina y Dorada.

La existencia de la industria cementera era anterior a la creación del Parque Natural de Cabo de Gata en 1987, e incompatible con las restricciones a la industria que conlleva la concesión del título de parque natural.

Si nos vamos a una escala superior, puesto que las características siguen siendo similares, podemos decir que la costa almeriense la conforman un total de 232 km en los que se alternan acantilados y zonas más o menos abruptas con otras de suave morfología, playas, dunas, etc; es decir que cuenta con una morfología litoral muy variada.

### 2.1.1. **Ámbito y escala de la zona de estudio**

Puesto que nos encontramos con problemática en diferentes escalas espaciales, desde zonas casi puntuales hasta superficies extensas hay que mencionar que la caracterización de la zona de estudio va a depender de esta diferencia de escalas. Así pues, se hará una descripción algo más general de toda la amplia zona que tiene influencia en nuestro estudio, que podría corresponder con una amplia región del levante almeriense, y se hará una descripción más detallada de la zona del puerto y su entorno más cercano.

## 2.2. Caracterización zona de tierra

### 2.2.1. Geología y geomorfología

Primeramente se va a ver los rasgos geológicos que caracterizan esta región de la península y la evolución de los mismos. Hay que mencionar que la zona se caracteriza por encontrarse en una zona geológica inestable debido a la presencia de dos grandes fallas y la significativa actividad volcánica con la que cuenta. Qué mejor manera de comenzar que viendo los orígenes de lo que actualmente es la costa del levante almeriense.

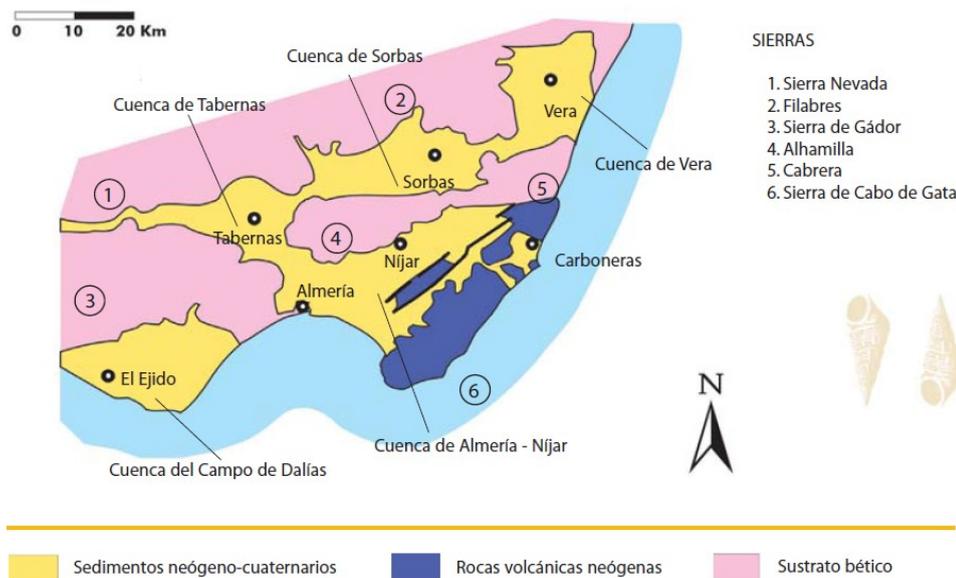


Figura 2.3: Situación geológica de las cuencas Almerienses

La Cuenca de Almería - Níjar ha constituido una cubeta sedimentaria marina desde hace 15 millones de años, momento en que se produce la emersión de los relieves que hoy constituyen el macizo de Sierra Nevada y la sierra de los Filabres, a cuyos pies se situaba la línea de costa.

En esta época, por tanto, la Cuenca de Almería no se encuentra individualizada de la de Tabernas o Sorbas. A esta cuenca marina abierta llegaban los sedimentos procedentes de la desmantelación de los relieves emergidos a través de grandes aparatos fluviales que generaban extensos abanicos submarinos sobre la plataforma marina, mientras que los volcanes de Cabo de Gata se encontraban en plena actividad, conformando probablemente un cálido archipiélago volcánico. Será algo más tarde, hace unos 7 millones de años, cuando el levantamiento de la Sierra de Gádor y de la de Alhamilla provocan la individualización de la Cuenca de Almería - Níjar, al sur de las mismas y entre los relieves volcánicos emergidos de Cabo de Gata.

Sierra Cabrera, emergida hace 5,5 millones de años, la separará definitivamente de las cuencas de Sorbas y Vera.

La Cuenca de Almería - Níjar abarca, por tanto, a las actuales tierras bajas comprendidas entre Sierra de Gádor, Sierra Alhamilla y Sierra Cabrera y la línea de costa, incluyendo los relieves volcánicos de la Sierra de Cabo de Gata.

Un territorio que ha constituido durante los 15 últimos millones de años un fondo marino sobre el que ha quedado un registro sedimentario, con unas inmejorables condiciones de observación, excepcional para comprender la evolución en este tiempo de la cuenca mediterránea y de sus cambios geográficos, climáticos y ecológicos.

Como se ha dicho, la actividad volcánica es determinante en la geología y geomorfología de la zona, tanto es así que el Complejo Volcánico de Cabo de Gata es el elemento de mayor tamaño de todas las manifestaciones volcánicas del sureste español. Se continúa ampliamente bajo el Mar de Alborán, y ha sido traído hasta su posición actual por el funcionamiento de la Falla de Carboneras - Serrata. La mayor parte del volcanismo de la Cuenca de Alborán está en la actualidad sumergido. Los edificios volcánicos de Cabo de Gata también presentan signos de haberse generado, en una buena parte al menos, bajo el mar. Algunos de los edificios volcánicos mayores pudieron crecer lo suficiente como para alcanzar la superficie, formando islas de origen volcánico rodeadas de plataformas sedimentarias marinas.



Figura 2.4: Fallas principales en la zona de estudio

La edad del Complejo Volcánico de Cabo de Gata se conoce a partir del estudio de los fósiles presentes en las rocas sedimentarias asociadas a los elementos volcánicos y a partir de la datación con isótopos (sobre todo potasio/argón) en las rocas volcánicas. La actividad volcánica se desarrolló en un amplio periodo que va desde unos 14 - 15 hasta unos 7,5 millones de años (es decir, Mioceno Medio y Superior). Durante ese intervalo la actividad volcánica ocurrió en varios ciclos. Los elementos volcánicos mejor conocidos y conservados son los más recientes, producidos entre hace unos 9 y 7,5 millones de años. La base del Complejo Volcánico aflora en algunos puntos (Serrata de Níjar y Carboneras) y está formada por rocas del basamento bético (rocas carbonatadas y filitas del Complejo Maláguide y Alpujárride) y algunos sedimentos marinos (margas) del Mioceno Inferior - Medio.

Tras los primeros episodios volcánicos y con posterioridad a los últimos, el mar invadía los relieves volcánicos generando un extenso archipiélago. En las cuencas marinas entre relieves volcánicos se produjo el depósito de sedimentos marinos. Pueden reconocerse cinco episodios sedimentarios:

1. En un primer episodio los sedimentos se depositan sobre las primeras rocas volcánicas. Su edad es Tortoniense inferior (entre 9 y 8,7 millones de años). Son sobre todo carbonatos bioclásticos.

2. En un segundo episodio los sedimentos se forman sobre las rocas del último evento volcánico. Su edad es Tortonense superior a Messiniense (entre hace 8,5 y 6,5 millones de años). Son también carbonatos bioclásticos, y margas, que se acumulan en zonas más profundas.
3. Sobre el episodio anterior se depositan un conjunto de unidades caracterizadas por la presencia de cuerpos arrecifales. Su edad es Messiniense (hace unos 6 millones de años).
4. Tras el depósito de los arrecifes tiene lugar un fenómeno conocido como la crisis de desecación del Mediterráneo. El Mediterráneo se secó hace 5,5 millones de años como consecuencia de su desconexión con el Atlántico. Durante este período los materiales de los bordes fueron erosionados parcialmente y en las áreas centrales de la Gran Cuenca Mediterránea y de sus pequeñas cuencas marginales se depositaron importantes espesores de yeso y de otras sales. Sobre ellos, o sobre la superficie erosiva, se depositaron sedimentos carbonatados típicos de mares cálidos: oolitos y estromatolitos.
5. Un último episodio marino da ya paso a la continentalización del medio (en el Plioceno, entre hace 5 y 2 millones de años).

A continuación se muestra un esquema de lo que conforma la estratigrafía de estos sedimentos.

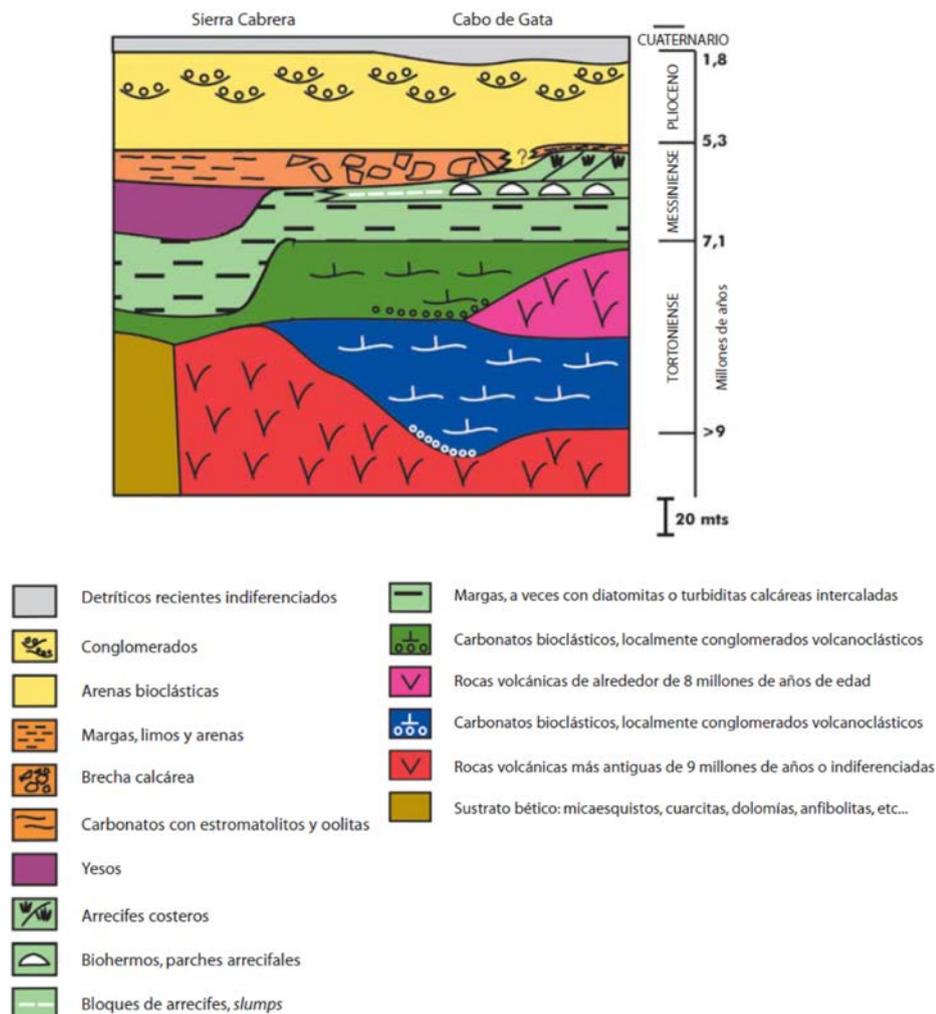


Figura 2.5: Esquema estratigráfico

Sabiendo ya la historia, la génesis y la evolución de nuestra zona, pasamos a la geología superficial resultante de todos estos cambios a lo largo de los años. Como ya se ha dicho el material volcánico va a tener una gran relevancia. Este va a estar complementado con los sedimentos también comentados párrafos arriba. Así pues en toda la zona costera va a ver alternancia de estas dos unidades, apareciendo en la zona más interior otras unidades distintas con características completamente diferentes como pueden ser por ejemplo el complejo alpujarride. De este modo el mapa geológico queda como aparece a continuación.

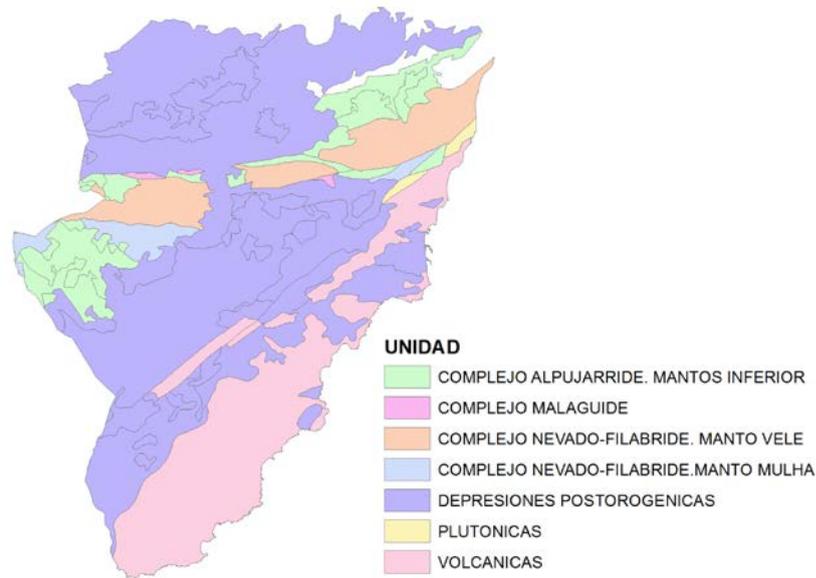


Figura 2.6: Mapa geológico del levante almeriense

El siguiente paso es hacer zoom para ver algo más de detalle en las inmediaciones de nuestro puerto. De este modo en el siguiente mapa se observa el mapa geológico en el término municipal de Carboneras en el que ya se especifica el tipo concreto de litología que nos encontramos.

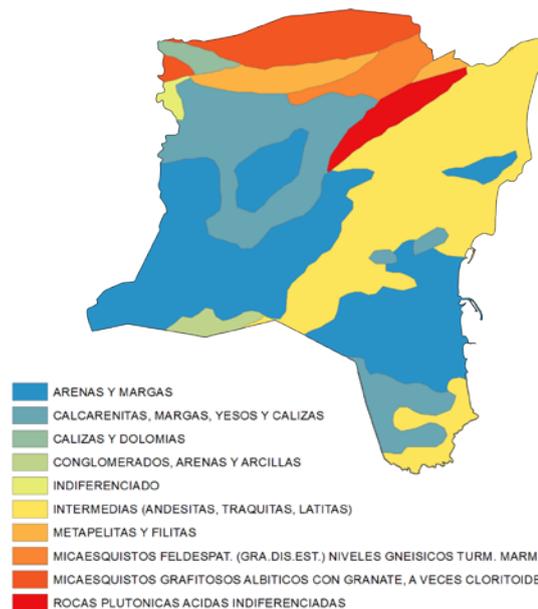


Figura 2.7: Distribución geológica en el término municipal de Carboneras

Se ve que a lo largo de la costa se dan tres tramos, los dos extremos pertenecen a rocas volcánicas intermedias como andesitas, tracitas y latitas mientras que el tramo central lo forman las arenas y las margas. Es de destacar que justo a la altura del puerto se da una de estas transiciones entre tramos, transición entre litologías distintas pero también como se podía observar en el mapa anterior entre unidades diferentes, entre las rocas volcánicas y las depresiones postorogénicas en las cuales se situaban los sedimentos.

### 1.4.3. Topografía

La topografía de la zona se ha estudiado gracias a modelos digitales de elevaciones, los cuales han sido obtenidos de las plataformas de descarga tanto del IECA (Infraestructura espacial de cartografía de Andalucía), como del IGN (Instituto Geográfico Nacional). El modelo digital de elevaciones en formato de imagen (.tiff) ha sido extraído del IECA, mientras que del Instituto Nacional se ha extraído el archivo que contiene la información espacial, en sus tres coordenadas, con una resolución de un punto cada 25 metros.

La inclusión de la topografía en el modelo es esencial para conseguir en una buena modelización en la línea de costa, puesto que el comportamiento va a ser diferente si nos encontramos con un acantilado o si nos encontramos con una playa. Por eso vamos a necesitar tanto terreno como incluya nuestra malla. Así, hemos necesitado 3 hojas del mapa del IGN para abarcar toda esta superficie; Las hojas utilizadas y que se pueden ubicar en el siguiente mapa son: **1031, 1032 y 1046**.



Figura 2.8: Mapa con la numeración de las hojas del MTN50

Para conocer los rasgos principales de la zona se representa una porción de toda la superficie. Gracias a MATLAB podemos hacer una representación en planta a través de curvas de nivel.

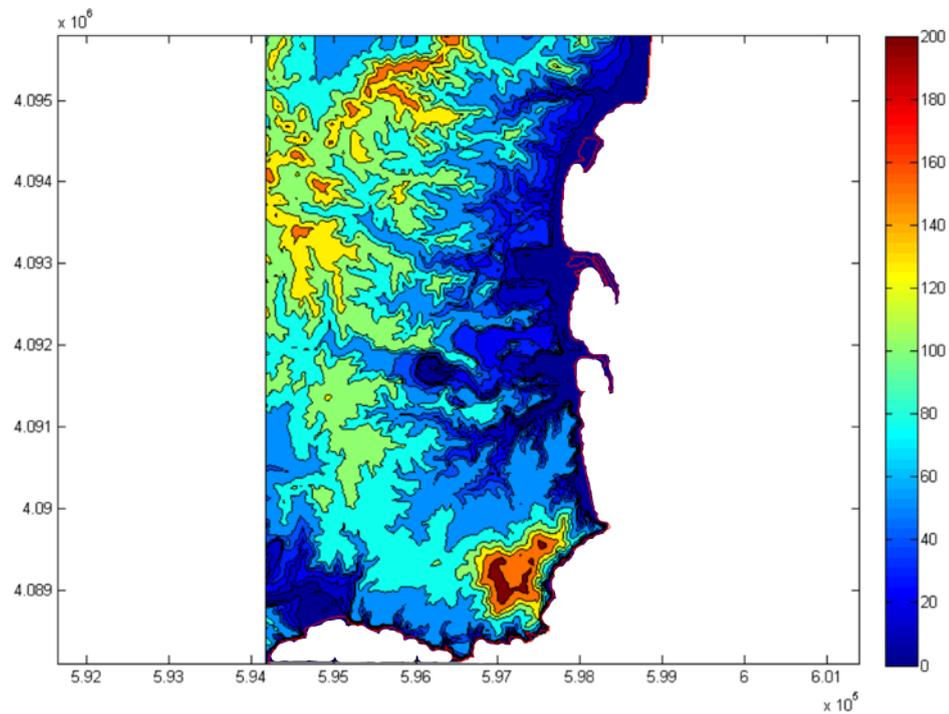


Figura 2.9: Topografía de la zona tras su tratamiento en MATLAB

Y gracias a ArcGis podemos obtener un modelo en 3D.



Figura 2.10: Modelo 3D costa de Carboneras

En lo que se refiere a los primeros metros de tierra, o línea de costa, se observa que en las inmediaciones del puerto se encuentran zonas llanas que corresponden con playas. Al sur de los tres puertos si se observa que la línea de costa la conforman zonas más abruptas en forma de acantilados.

Si nos adentramos un poco se ve que la altitud no tarda en subir, observándose una zona más irregular sobre la que se asientan una especie de ramblas, en todo caso en la superficie representada no se llega a alcanzar altitudes superiores a los 200 metros.

## 2.3. Caracterización zona sumergida

### 2.3.1. Geología marina

Para conocer los materiales que forman el fondo marino se ha recurrido a cartografía del DERA (Datos Espaciales de Referencia de Andalucía). Se muestra un mapa en el que aparecen las superficies que cubre cada material, diferenciando entre **arenas, gravas, fangos y rocas**, distinguiendo también el tipo de roca que nos encontramos.

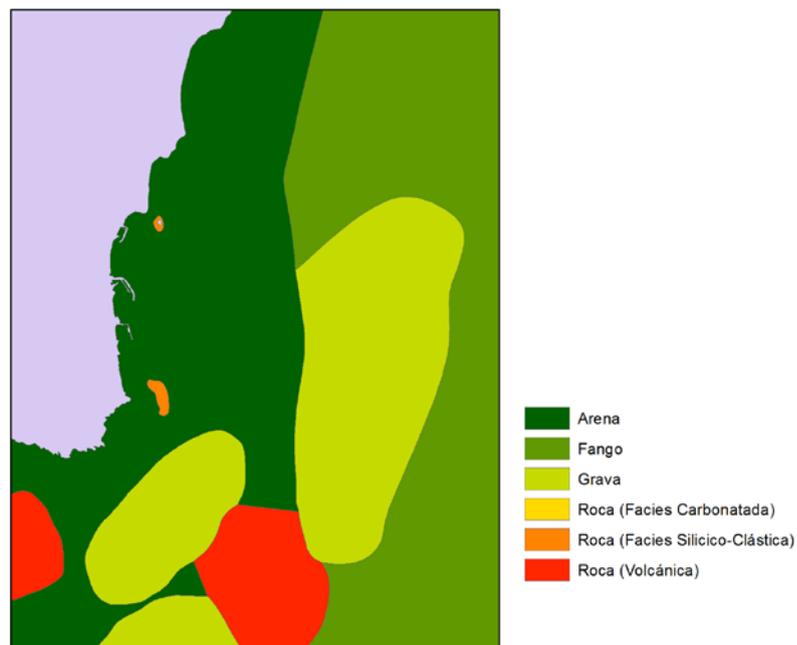


Figura 2.11: Mapa geología fondo marino

Se puede observar que una amplia franja desde la línea de costa está cubierta por arenas, salvo algunos puntos donde aparecen zonas rocosas como la zona de la isla de San Andrés, o zonas con gravas. Si nos vamos a aguas más profundas el fondo marino está cubierto casi en su totalidad por fangos marinos.

En este apartado puede parecer útil e interesante saber qué material exactamente cubre la zona más próxima al puerto, incluido el interior de éste. Se sabe de esta información gracias al Anejo 1 de Caracterización del material dragado que se realizó en el último proyecto ejecutado en el puerto. Uno de los trabajos previos a la ejecución del dragado fue la elección de 10 puntos de muestreo donde se recogieron muestras para caracterizar el material que allí se hallaba. La localización exacta de estos puntos es la que sigue:

<b>Punto</b>	Coordenada X	Coordenada Y	<b>Punto</b>	Coordenada X	Coordenada Y
1	598108.78	4094501.30	6	598117.64	4094291.59
2	598120.07	4094451.67	7	598089.77	4094223.32
3	598080.45	4094439.08	8	598053.23	4094242.80
4	598087.02	4094379.08	9	598027.61	4094208.83
5	598047.82	4094344.80	10	598002.36	4094132.23

Cuadro 2.1: Extracto base de datos facilitados por la APPA



Figura 2.12: Localización puntos recogida de muestras

Con los ensayos se logró caracterizar granulométricamente el material, obteniendo resultados como la curva granulométrica o parámetros característicos con el D50. Aquí se muestra a modo de ejemplo la información obtenida para el punto 1.

**MATERIAL A ENSAYAR**

<b>Muestra:</b>	Arena. Muestra entregada en laboratorio por personal de la empresa ITM, con fecha: 6 de Septiembre de 2010
<b>Procedencia:</b>	PUERTO DE CARBONERAS. CARACTERIZACIÓN MATERIAL PARA DRAGADO
<b>Referencia petionario:</b>	PUERTO DE CARBONERAS. PUNTO Nº 1

**ENSAYOS A REALIZAR**

ENSAYOS ACREDITADOS POR LA JUNTA DE ANDALUCÍA

TIPO DE ENSAYO	NORMA	SI	NO
Análisis Granulométrico	UNE-EN 933-1:1998	x	
Materia orgánica	UNE 103204:1993	x	

**RESULTADOS DE ENSAYOS :**

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (UNE-EN 933-1:1998)		
UNE (mm)	% RETENIDO INDIV.	% PASA
63	0	100
31.5	0	100
16	0	100
8	0	100
4	1	99
2	1	98
1	20	78
0.5	46	32
0.25	22	11
0.125	9	2
0.063	0.5	1.7

MORFOLOGÍA DEL GRANO	
D 50 (Mediana)	0.65 mm.
Gravas (D > 2 mm)	2 %
Arenas (2 > D > 0.063 mm)	96 %
Contenido en finos (D < 0.063 mm)	1.7 %

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS MATERIA ORGÁNICA (UNE 103204:1993)	
% Materia orgánica	0.14

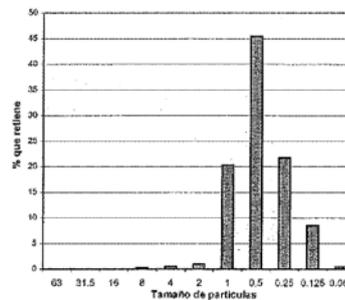
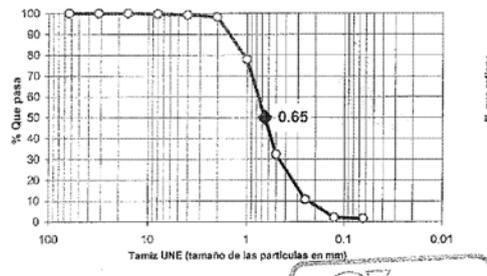


Figura 2.13: Ensayo granulométrico en el punto 1

Los resultados obtenidos para el resto de puntos son muy semejantes a los del punto 1, lo que es decir, que casi la totalidad del porcentaje de cada muestra obtenida lo ocupaban las arenas, apareciendo los finos y gravas en muy pequeña proporción. En lo que respecta al D50 en todas las muestras se obtuvo un D50 inferior a 0.7 mm.

Otro de los resultados que se obtuvo del análisis de cada muestra fue la categoría del material obtenido, perteneciendo cada una de las muestras a la Categoría I, corroborando esta misma información expuesta en secciones anteriores.

### 2.3.2. Batimetría

Estamos ante uno de los aspectos más importantes de la zona de estudio puesto que de la precisión de la batimetría va a depender la mayor o menor precisión del modelo. Cuando se habla de precisión se entiende mayor densidad de puntos con profundidad conocida. La batimetría se va a utilizar para dar un valor de profundidad a cada nodo de nuestra malla, así cuando más precisa sea nuestra batimetría más real será nuestro modelo.

Para conseguir esto ha sido necesario acudir a varias fuentes de información, puesto que cada una tenía información de un determinado ámbito y con precisiones distintas, así nuestras fuentes de datos han sido:

- Cartografía Junta de Andalucía (DERA)
- Ecocartografías
- Agencia Pública de Puertos de Andalucía (APPA)

Dicho esto vamos a ir viendo que hemos extraído de cada fuente en orden de más extensión y menos precisión al extremo opuesto.

De la cartografía del DERA hemos obtenido una batimetría poco precisa pero suficiente, ya que el oleaje a profundidades de más de 50 o 60 metros apenas siente el fondo, pero sí es necesaria para la propagación. De este modo, de la totalidad de los datos que pone a disposición la Junta de Andalucía se han cogido las líneas batimétricas entre 51 y 2000 metros de profundidad aproximadamente. El límite superior lo marca la extensión de nuestra malla más extensa, estando el punto más oriental de ésta a una distancia aproximada de la costa de 25 km.

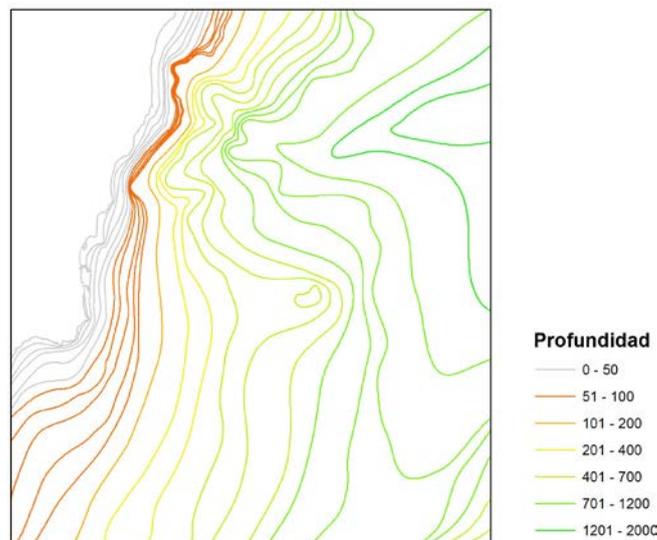


Figura 2.14: Batimetría

Gracias a los datos extraídos de la web de Ecartografías se han conseguido unos datos batimétricos bastante precisos de los primeros metros de costa hasta una profundidad aproximada de 50 metros. Por tanto el área que se va a barrer con estos datos va a ser los primeros metros de costa hasta la profundidad de 50 metros y en la dirección paralela a la línea de costa toda aquella franja que abarque la malla. Una parte de esta región centrada en nuestro puerto se muestra a continuación



Figura 2.15: Batimetría zona del puerto. Líneas cada metro

Si representamos esta zona en 3D se visualiza y se imagina mejor la batimetría de la zona.

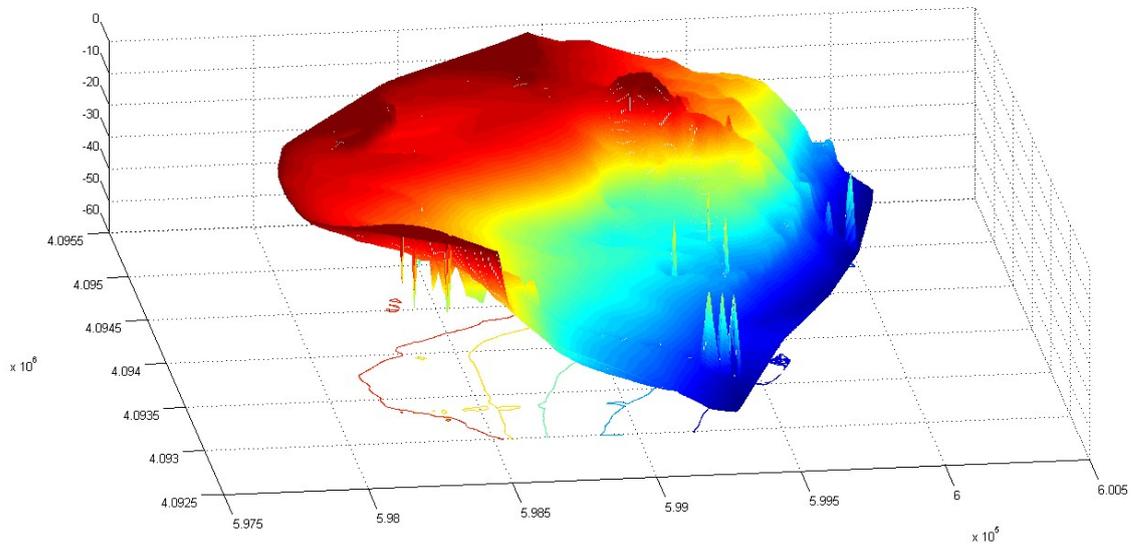


Figura 2.16: Esquema en 3D de la batimetría de la zona

La batimetría sacada de Ecocartografías no contiene datos del interior del puerto. Para conseguir una buena modelización del puerto se ha recurrido a una batimetría específica del Pto. de Carboneras, la cual como ya se ha dicho nos ha sido facilitada por la Agencia Pública de Puertos de Andalucía. El plano en planta se muestra en la siguiente figura.

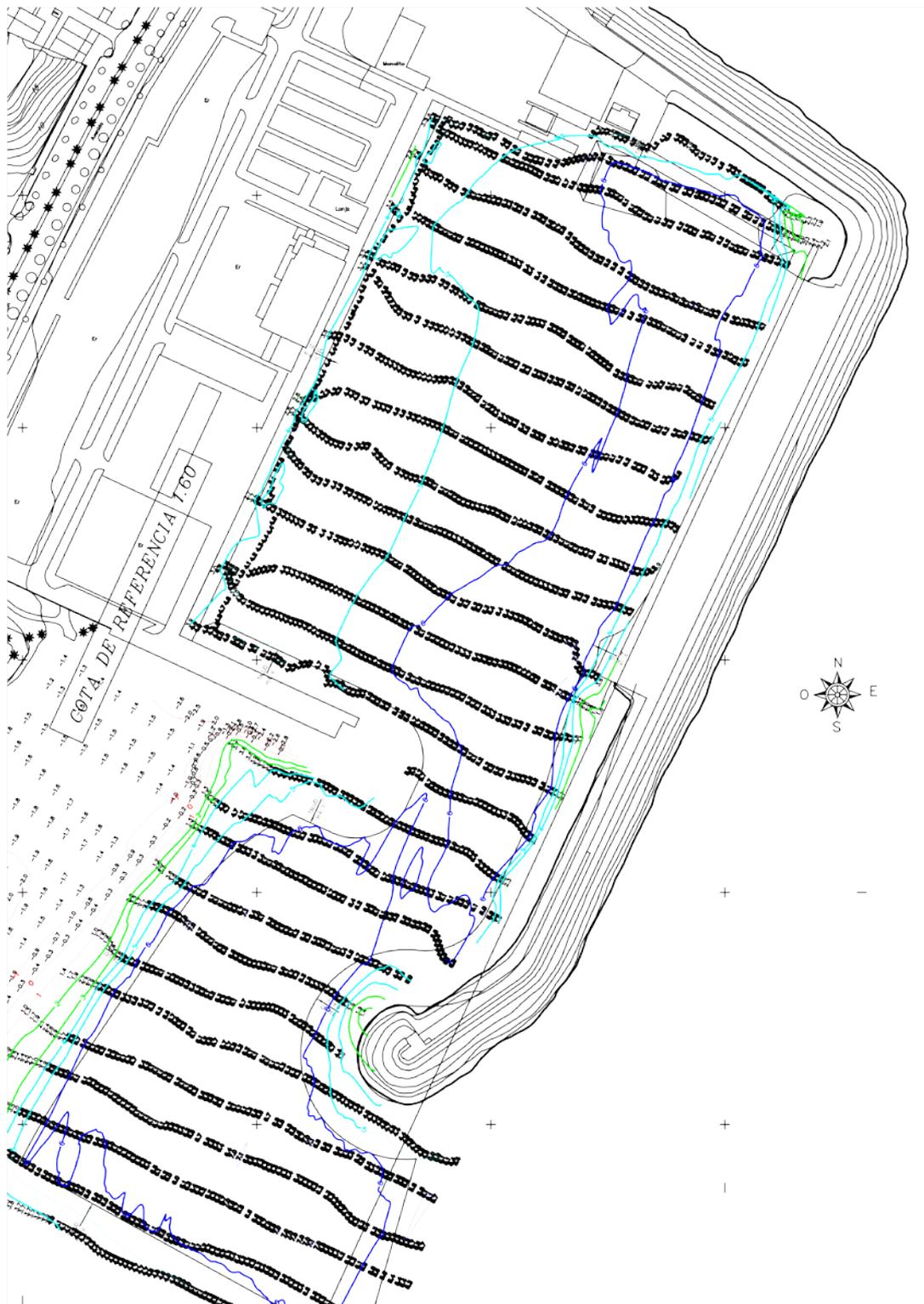


Figura 2.17: Plano batimetría Puerto de Carboneras

### 2.3.3. Perfiles transversales a la costa

Resultado directo de la batimetría son los perfiles transversales a la costa. Se han elegido puntos característicos en la línea de costa y se han hecho los perfiles del fondo del mar perpendiculares a ésta en estos puntos elegidos. Con estos resultados se visualizan mejor las diferencias entre las distintas zonas.

Los puntos elegidos han sido:

1. Perfil playa de las Martinicas
2. Perfil a la altura del dique principal del puerto
3. Perfil playa de los Barquicos
4. Perfil a la altura de la isla de San Andrés
5. Perfil playa del Lancón

La posición exacta de estos puntos, así como el perfil transversal a la costa en éstos sobre el modelo 3D son:

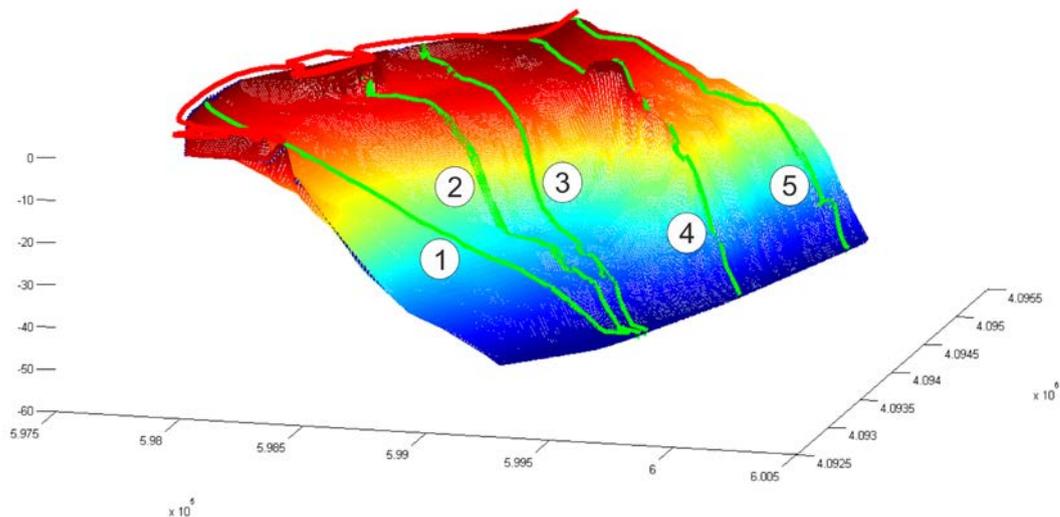


Figura 2.18: Perfiles transversales a la costa sobre modelo 3D

Si se dibuja cada uno sobre el plano vertical que los contiene se obtiene:

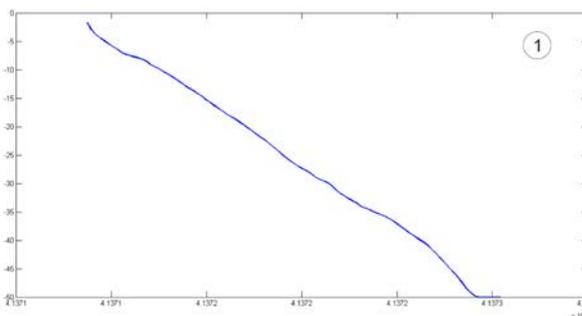


Figura 2.19: Perfil Playa de las Martinicas

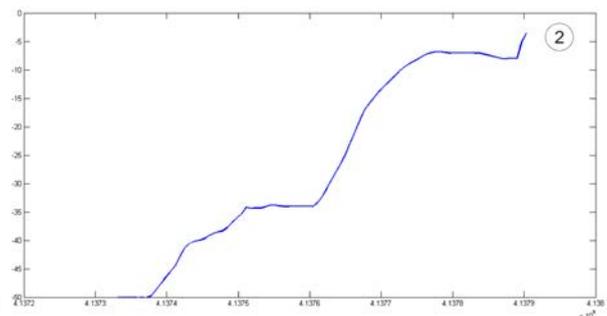


Figura 2.20: Perfil a la altura del dique del Pto.

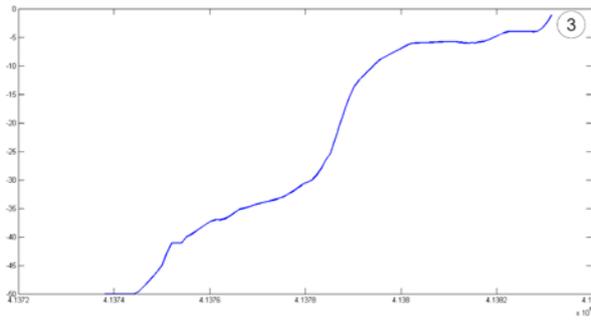


Figura 2.21: Perfil Playa Los Barquicos

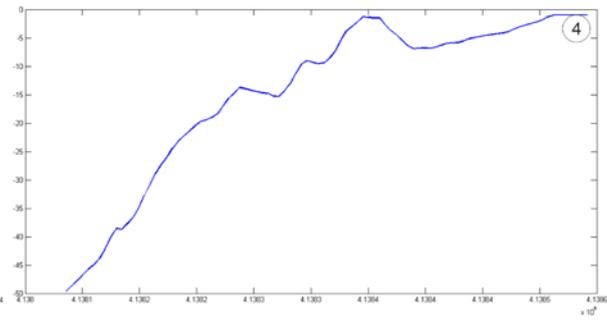


Figura 2.22: Perfil a la altura de la isla

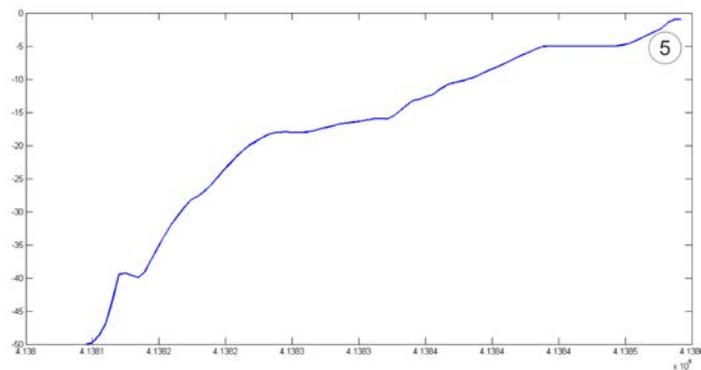


Figura 2.23: Perfil Playa El Lancón

Lo más característico que extraemos de observar los perfiles es que cuando pasamos el puerto pesquero hacia aguas arriba cambia significativamente el perfil del fondo marino. Mientras que la playa de las Martinicas tiene un perfil con una pendiente casi constante, en los perfiles situados aguas arriba esta característica no se conserva. Hacia aguas arriba de esta playa se observa una especie de plataforma casi horizontal en los primeros metros y luego cae la profundidad con una pendiente elevada. En el perfil número 2, el que está a la altura del puerto se observa incluso una disminución de profundidad, produciendo una pequeña sobre elevación, la cual podría corresponder con una barra de arena.

### 2.3.4. Evolución de la línea de costa

El último paso para caracterizar la zona de estudio se ha centrado en ver la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo y ver aquellas zonas donde ha habido erosión y aquellas en las que se han producido aportes. Esto ha sido posible gracias a la comparación de ortofotos de diferentes años. Estos años han sido **1956, 1998, 2001, 2004, 2007 y 2009**.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes figuras.



Figura 2.24: Evolución línea de costa zona del Puerto



Figura 2.25: Evolución línea de costa zona aguas arriba

Si primeramente nos fijamos en la figura de la izquierda a simple vista se observa que la variación de la línea de costa es muy pequeña. Esto significa que la línea de costa en la zona más próxima al puerto ha sido bastante estable en el periodo analizado. Esto puede explicarse por el hecho de tratarse de playas encajadas entre los puertos, resguardadas de oleajes oblicuos a la costa. No obstante hay que volver a remarcar la creación y crecimiento de las playas creadas gracias a la construcción del puerto.

Por otra parte si nos centramos ahora en la imagen derecha, la cual representa una zona situada aguas arriba del puerto, se observa que la línea de costa ha retrocedido notablemente con el paso del tiempo, lo que es decir, se ha producido una significativa erosión en esta parte. Hay que decir que esta tendencia erosiva se repite en la gran parte de la zona estudiada dentro de nuestra zona de estudio, produciéndose por tanto un balance sedimentario negativo.

La evolución de la línea de costa no depende sólo y exclusivamente de la dinámica litoral, no hay que olvidar que también puede haber aportaciones de la zona terrestre como puede ser el aporte de sedimentos de un río. Es más, esta zona del levante almeriense existen numerosas ramblas que alimentan a playas. Concretamente en nuestra zona existen 2 ramblas, la Rambla del Cinto y la Rambla del Pozo, aguas abajo y aguas arriba del puerto respectivamente, las cuales podrían alimentar las playas de las Martinicas y la de los Barquicos.

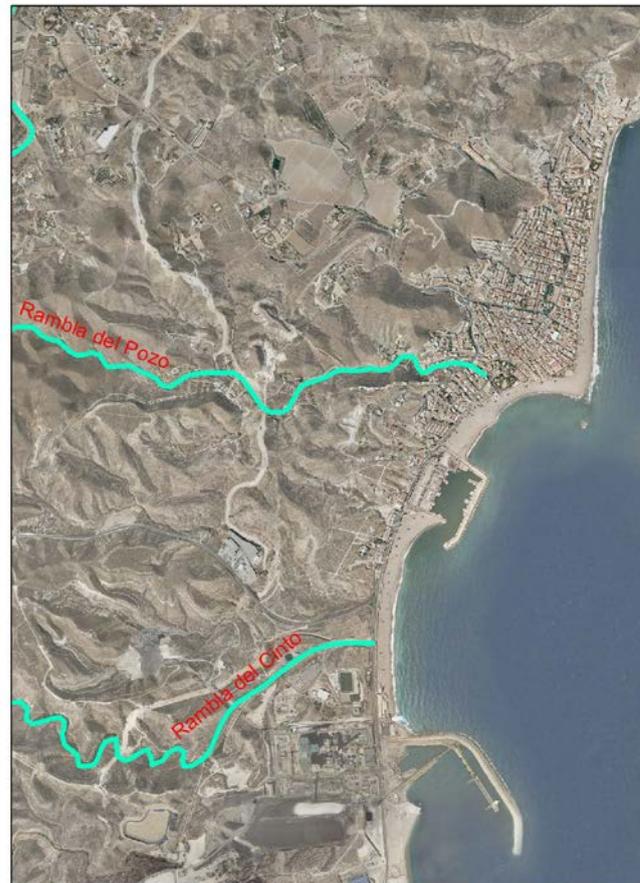


Figura 2.26: Localización de las ramblas

Como conclusión decir que la tendencia general de la costa es a la erosión, pero si nos vamos al puerto y sus proximidades se puede observar una cierta estabilidad en la línea de costa debido al encaje de las playas y su resguardo frente al oleaje. Además hay que puntualizar el crecimiento de las playas creadas por la infraestructura del puerto y no olvidar la posible fuente de aporte de sedimentos que pueden representar las ramblas.

# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se expone la metodología seguida en este proyecto fin de carrera para la consecución de los objetivos marcados.

### 3.1. Estudio y análisis del Clima Marítimo

#### 3.1.1. Datos de partida

La costa de Carboneras cuenta varios puntos SIMAR, resultado de los datos aportados por un modelos numérico, de los que se podrían obtener los datos de partida del oleaje para el estudio del clima marítimo de la zona, todos ellos pertenecientes a Puertos del Estado. También cuenta con un mareógrafo en los primeros metros de costa, el cual si aporta datos reales de nivel del mar en el punto de su localización.

- Puntos SIMAR: SIMAR 2062084, SIMAR 2063084, SIMAR 2064084, SIMAR 2066084, SIMAR 525022037
- Mareógrafo: MAREÓGRAFO de Carboneras

En el análisis del clima marítimo se han estudiado tanto para el oleaje como para el viento:

- Descripción General en profundidades indefinidas
- Régimen medio
- Régimen extremal

#### 3.1.2. Descripción general en profundidades indefinidas

Se han representado tanto un diagrama de la altura de ola con respecto al tiempo como de la velocidad del viento con respecto al tiempo desde la fecha en la que se empiezan a tener datos (1958).

Para el oleaje se obtienen los diagramas de dispersión que relacionan las variables de altura de ola significativa, periodo y dirección media de procedencia. Para el viento se relacionan las variables dirección del viento con velocidad del viento. Esto permite conocer cuales son los tipos de oleaje y de viento más frecuentes. Junto a cada diagrama de dispersión se incluye una tabla que describe dicho diagrama de forma numérica.

Finalmente dichas variables se representan también mediante histogramas y una rosa de oleaje y viento, lo que permite ver de forma rápida cuales son las alturas de ola, periodos, direcciones medias de procedencia, velocidades y direcciones de viento que predominan en la costa de Carboneras.

### 3.1.3. Régimen medio

Se analiza en primer lugar el régimen medio escalar, para todo el registro de datos. Posteriormente se consideran las dos direcciones de procedencia más frecuentes de oleaje y de viento y se analiza el régimen medio para dichas direcciones.

El análisis del régimen medio incluye:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull en papel probabilístico normal.

Con dichas funciones se pretende conocer la densidad de probabilidad de las alturas de ola y velocidades de viento, así como su probabilidad de no excedencia.

### 3.1.4. Régimen extremal

Para el análisis del régimen extremal es necesario extraer los datos que corresponden a periodos de tormenta, para ello se emplea el método de 'Picos Sobre Umbral (POT)', fijando una altura de ola umbral, correspondiente al valor que es superado menos del 1 % del tiempo en el año medio. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración entre temporales debe ser superior a 48 h.

Para los eventos extremos obtenidos se analiza:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad generalizada de valores extremos.
- Ajuste de los datos a una función de distribución generalizada de valores extremos.

Igual que en el régimen medio, se analiza en primer lugar el régimen extremal escalar para todos los datos extremales extraídos mediante el método POT y posteriormente se analiza para las dos direcciones más frecuentes.

### 3.1.5. Flujo medio de energía en el WANA elegido

Por último con respecto al clima marítimo, a través de un análisis de los datos del registro en Matlab y aplicando la fórmula correspondiente al flujo medio de energía, se obtendrá una resultante de flujo medio de energía con módulo y dirección aplicada en el punto SIMAR. Esta resultante tendrá unidades de N/s y se podrá obtener para todo el registro de datos, o discretizarla por años.

Se mostrarán también resultantes medias invernales de cada año analizado, las cuales se obtendrán sólo escogiendo datos de los meses invernales.

Para terminar con este apartado se hará una relación entre estas resultantes invernales y otros parámetros como pueden ser el número de temporales en cada año o la fecha de ejecución de los dragados.

### 3.2. Escenarios

Se definen escenarios batimétricos coincidentes con la situación actual y otros con variaciones con respecto a ésta, con la finalidad de simular las condiciones de forzamiento sobre ellos y analizar las posibles afecciones a la hidrodinámica de la zona.

- Escenario 1: Situación Actual
- Escenario 2: Eliminación de la Isla de San Andrés
- Otros escenarios: simulaciones bajo diferentes condiciones del oleaje.

#### 3.2.1. Escenario 1

Este escenario refleja la situación actual de la zona de estudio sin realizar actuación alguna. Para su definición se ha empleado la batimetría que se comentó en el apartado de batimetría dentro de la caracterización de la zona de estudio.

#### 3.2.2. Escenario 2

Con este escenario se pretende saber cómo de significativa resulta la presencia de isla en la hidrodinámica de la zona. Se compone de los mismos elementos que el escenario 1 salvo la zona de la isla dónde se han modificado las líneas batimétricas, rebajando la profundidad de esta zona hasta adaptarla al resto de la batimetría.

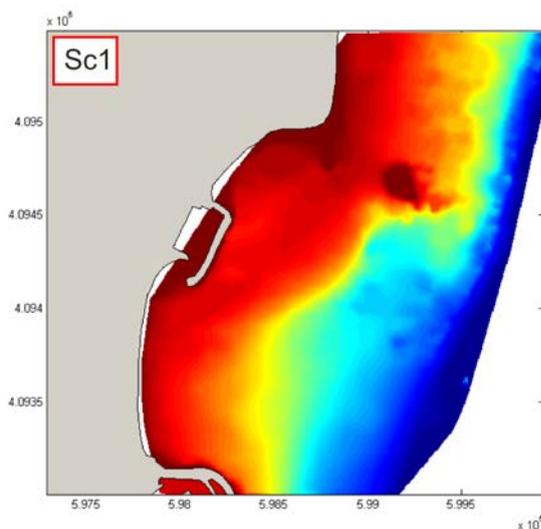


Figura 3.1: Esquema 2D Escenario 1

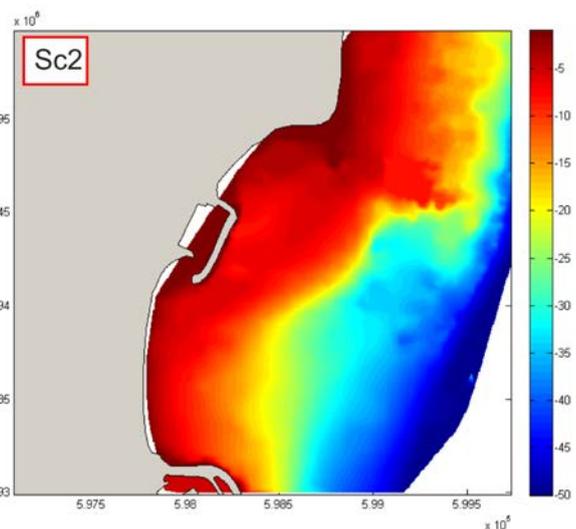


Figura 3.2: Esquema 2D Escenario 2

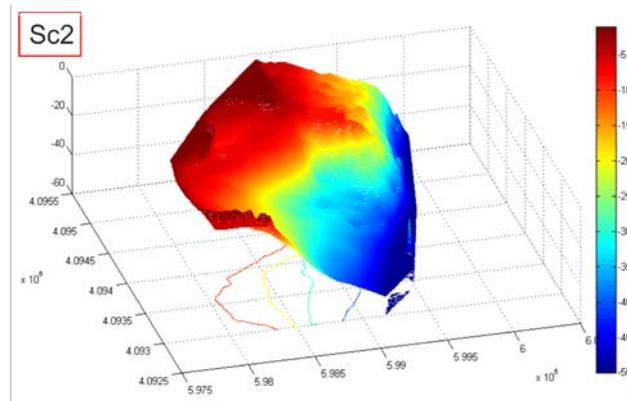


Figura 3.3: Esquema 3D Escenario 2

### 3.3. Modelo numérico

El modelo numérico empleado para la propagación de oleaje y análisis hidrodinámico es el Delft3D.

Se ha utilizado este modelo ya que es el que mejor se adapta a las necesidades exigidas, entre ellas: la necesidad de un código que trabaje tanto en agua profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa; que tenga en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y lo más importante, se trata de un software libre.

El modelo Delft3D fue desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (Países Bajos) para estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, . . . generados por vientos locales y corrientes ambientales.

Dicho programa engloba varios módulos, en este proyecto se utilizan de manera conjunta y sincronizada el módulo **WAVE** y **FLOW** lo que dota a las simulaciones de de una mayor precisión al estar considerando parámetros tanto del oleaje como hidrodinámicos.

#### 3.3.1. Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se emplean los datos medidos durante la campaña de campo.

Para lograr la calibración hay que seguir un proceso iterativo tal como el que se muestra en la siguiente figura.

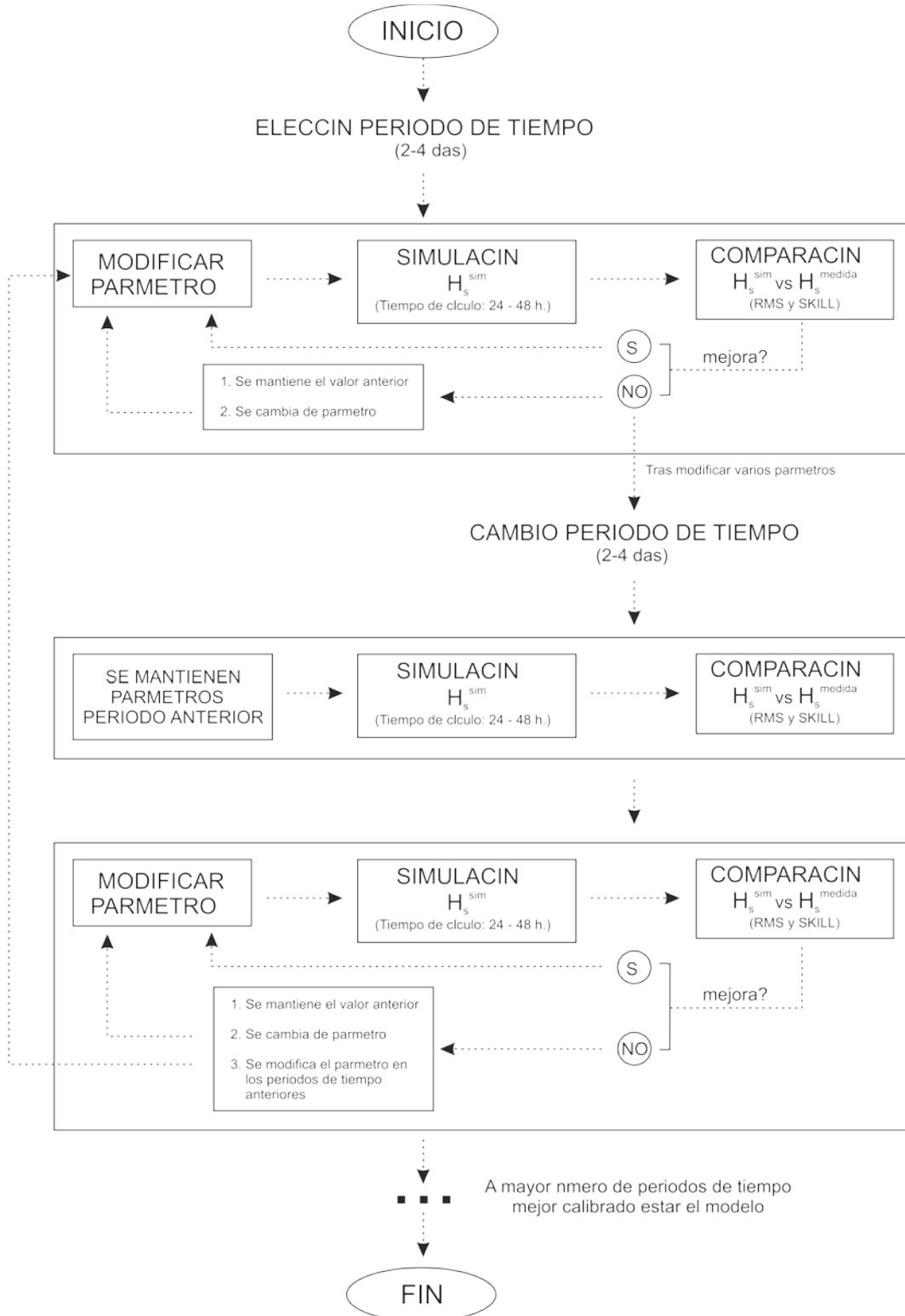


Figura 3.4: Esquema del procedimiento seguido para la calibración del modelo.

Se elige un periodo de tiempo para la simulación dentro del tiempo de duración de la campaña de campo. Posteriormente se modifica un parámetro dejando los demás con su valor por defecto. Se realiza la simulación obteniendo una altura de ola simulada en el punto de control dónde el instrumento midió durante la campaña. Resultado de dicha medición se obtiene una altura de ola medida. Se comparan dichas alturas de ola empleando dos coeficientes de correlación: el R y el Skill.

- **a) La simulación mejora respecto a la anterior:** En ese caso se vuelve a modificar el mismo parámetro para tratar de ajustarlo hasta que los resultados de la simulación no mejoren respecto de la simulación anterior.
- **b) La simulación no mejora respecto de la anterior:** En este caso se cambia de parámetro y se repite todo el proceso.

Repitiendo este proceso para cada uno de los parámetros del modelo y para diferentes periodos de tiempo se obtienen unos valores para cada parámetro que permiten propagar oleaje de forma precisa sean cuales sean las condiciones.

### 3.3.2. Validación del modelo

Una vez el modelo ha sido calibrado para varios periodos de tiempo, se elige otro periodo distinto de los anteriores dónde se simulan de nuevo el oleaje sin modificar ningún parámetro. Si el ajuste es bueno, el modelo se puede decir que está bien calibrado y validado.

### 3.3.3. Simulación de las condiciones de forzamiento en los escenarios

Sobre los escenarios presentados se analizarán:

- El régimen medio
- Dos temporales, uno de cada dirección predominante

### 3.3.4. Análisis del régimen medio

El objetivo principal de esta parte es obtener el régimen medio en cada uno de los puntos de control elegidos y para cada uno de los escenarios para así compararlos entre sí y analizar los efectos de cada escenario sobre la dinámica de la zona.

Para ello es necesario que todos los estados de mar que tenemos en el punto SIMAR sean propagados hasta los puntos de control. Esto supondría un coste computacional muy elevado, por lo que se opta por otro procedimiento más factible.

Así el procedimiento que se ha llevado a cabo ha sido el siguiente:

1. Del total de estados de mar que contiene nuestro punto SIMAR se hace una selección a ojo de los casos más representativos. Nos serán de ayuda las tablas dobles generadas en el capítulo del Clima Marítimo.

2. Los estados de mar seleccionados se dividen en dos grupos en función de la dirección de procedencia: E, SW para facilitar la propagación mediante Delft3D
3. Propagación de estos estados de mar separados en las dos direcciones de procedencia hasta los puntos de interés.
4. Se programa una rutina en Matlab para que interpole todos estos estados de mar con todos los del punto SIMAR. El mismo programa nos irá indicando aquellos valores que faltan en los casos representativos iniciales, de modo que éstos se irán completando de manera que un número acotado de datos represente al total. Tras la realización de varias interpolaciones se llega a un total de 307 casos representativos. Formados por 143 casos desde la dirección E y los 164 restantes desde la dirección SW.
5. Se programa otra pequeña rutina en Matlab que nos construya el SIMAR en cada punto de control.
6. Por último se realiza el régimen medio en cada punto y se calculan otros parámetros como la resultante media anual (RMA) o la tasa de Transporte de sedimentos.

Todos estos pasos se esquematizan en la siguiente figura:

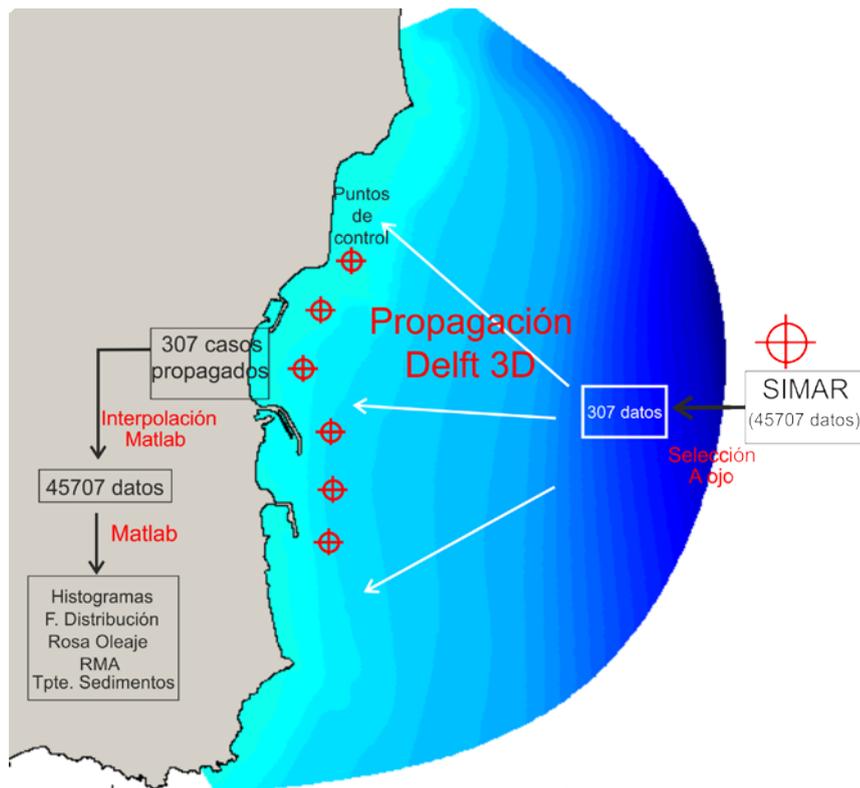


Figura 3.5: Esquema del procedimiento seguido para el análisis del régimen medio

### 3.3.5. Análisis de los temporales

Para el análisis de los temporales el proceso seguido es:

- Elección de dos temporales siguiendo los siguientes criterios programando un rutina en Matlab:
  - Que tengas alturas de ola mayores a la fijada como altura de ola umbral en el régimen extremal.
  - Que tengan una duración mayor o igual a 72 horas para tener un número suficiente de datos con los que realizar el análisis
  - Que coincidan con ciclos de marea viva para que situación sea la más desfavorable.
  - Que las direcciones de procedencia sean ENE y SW.
- Propagación de los temporales para cada escenario mediante el modelo numérico calibrado.
- Para cada caso analizar la variación del coeficiente de propagación en cada punto, definido como  $C_p = \frac{H_s}{H_{SIMAR}}$

# Capítulo 4

## Clima marítimo en la zona de estudio

### 4.1. Datos para el estudio del CLIMA MARÍTIMO de la zona de estudio

Para llevar a cabo el estudio y análisis del clima marítimo de la zona es imprescindible poseer una memoria histórica, lo más completa posible, de una serie de puntos, lo más cerca posible a la zona de estudio.

Esta memoria histórica la obtenemos a través de datos SIMAR. El conjunto de datos SIMAR está formada por series temporales de diferentes parámetros de viento y de oleaje, los cuales proceden de modelado numérico. Por tanto son datos sintéticos y no proceden de medidas directas de la naturaleza. Existen datos cada cierta frecuencia dependiendo del punto en el que nos encontremos. También dependiendo del punto, los registros de datos comienzan en tiempos diferentes. Cabe destacar que estos puntos hasta hace poco tiempo se denominaban puntos WANA. Han sufrido un cambio en la denominación, pero siguen siendo los mismos que anteriormente.

Las series SIMAR proceden del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado ha desarrollado en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). No obstante, los datos SIMAR no son datos de predicción, sino datos de diagnóstico o análisis. Esto supone que, para cada instante, el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelados y consistentes con las observaciones realizadas. Las series de viento y oleaje del conjunto SIMAR no son homogéneas, pues el modelo de vientos se modifica de modo periódico.

En el siguiente mapa se puede observar la localización exacta de los puntos SIMAR más próximos a nuestra zona de estudio:



Figura 4.1: Localización punto SIMAR

En la figura se pueden ver los puntos SIMAR más cercanos al puerto de Carboneras. Para elaborar el clima marítimo de la zona, hemos cogido el punto **SIMAR 2063084** (señalado en el mapa), ya que lo que vamos buscando es el clima marítimo general de la zona y no solamente del puerto. Por dicha razón escogemos este punto intermedio.

La localización exacta del punto es la siguiente:

Punto Simar	Latitud	Longitud
2063084	37.00 N	1.75 W

Cuadro 4.1: Coordenadas puntos SIMAR

#### 1.4.4. Características de los datos

- **Viento**

El modelo atmosférico utilizado para generar los campos de vientos es el HIRLAM. Este es un modelo atmosférico meso-escalar e hidrostático cuya resolución es de 5 grados en el Atlántico y 0.2 grados en el Mediterráneo. Los datos de viento facilitados son promedios horarios a 10 metros de altura sobre el nivel del mar.

Debido a la resolución con la que se ha integrado el modelo de Atmósfera, los datos de viento no reproducen ni efectos geográficos de escala inferior a 15 Km, ni procesos con escala temporal inferior a 6 horas. No obstante, el modelo reproduce correctamente los viento regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral, etc. Por otro lado, de modo general, será más fiable la reproducción de situaciones con vientos procedentes del mar.

## ▪ Oleaje

Para generar los campos de oleaje de los datos WANA se usa el modelo WAM. Se trata de un modelo espectral de tercera generación que resuelve la ecuación de balance de energía. Este modelo trabaja en el Atlántico con una resolución de 0.25 grados (30 Km), y en el Mediterráneo con una resolución de 0.125 grados (15Km).

Los datos contienen una descomposición de mar de viento y mar de fondo. Es importante tener en cuenta, que, con independencia de la coordenada asignada a un nodo WANA, los datos de oleaje deben considerarse, siempre, como datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas.

## ▪ Nivel del mar

El conjunto de datos REDMAR está formado por las medidas procedentes de la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado. Los mareógrafos de esta red se caracterizan por estar ubicados dentro de las instalaciones portuarias, en un muelle o un dique.

Se analiza para el oleaje y para el viento:

- Descripción general en profundidades indefinidas
- Régimen Medio
- Régimen extremal

## 4.2. Oleaje

### 4.2.1. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas

En primer lugar se realiza una descripción general de las características del oleaje en profundidades indefinidas en la zona de estudio, en el que se mostrará:

- Serie temporal de oleaje
- Tres gráficos de dispersión entre las variables  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ . El primero representa la altura de ola respecto a la dirección de procedencia; el segundo, periodo pico respecto a la dirección de procedencia y el tercero, la altura de ola respecto al periodo pico.
- Tres tablas que representan los diagramas de dispersión de forma numérica
- Tres histogramas, uno por cada variable
- Rosa de oleaje

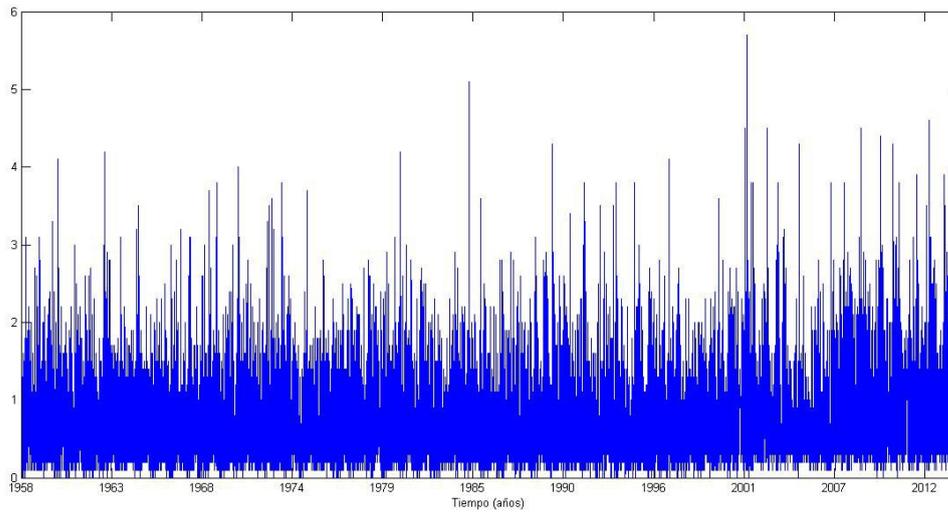


Figura 4.2: Serie temporal de altura de ola

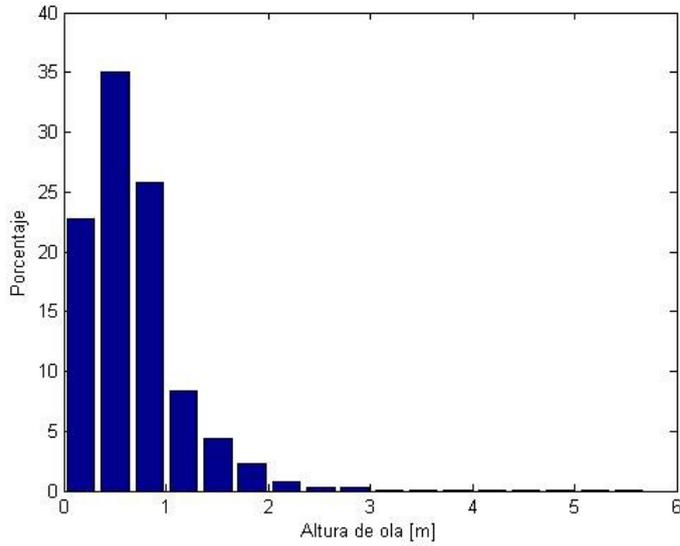


Figura 4.3: Histograma de altura de ola

Hs(m) [a,b)	Frecuencia (%)
0 - 0.33	22.773
0.33 - 0.66	34.975
0.66 - 1	25.785
1 - 1.33	8.321
1.33 - 1.66	4.339
1.66 - 2	2.329
2 - 2.33	0.711
2.33 - 2.66	0.342
2.66 - 3	0.245
3 - 3.33	0.072
3.33 - 3.66	0.050
3.66 - 4	0.037
4 - 4.33	0.012
4.33 - 4.66	0.006
4.66 - 5	0.002
5 - 5.33	0.001
5.33 - 5.66	0.001

Cuadro 4.2: Porcentaje de alturas de ola

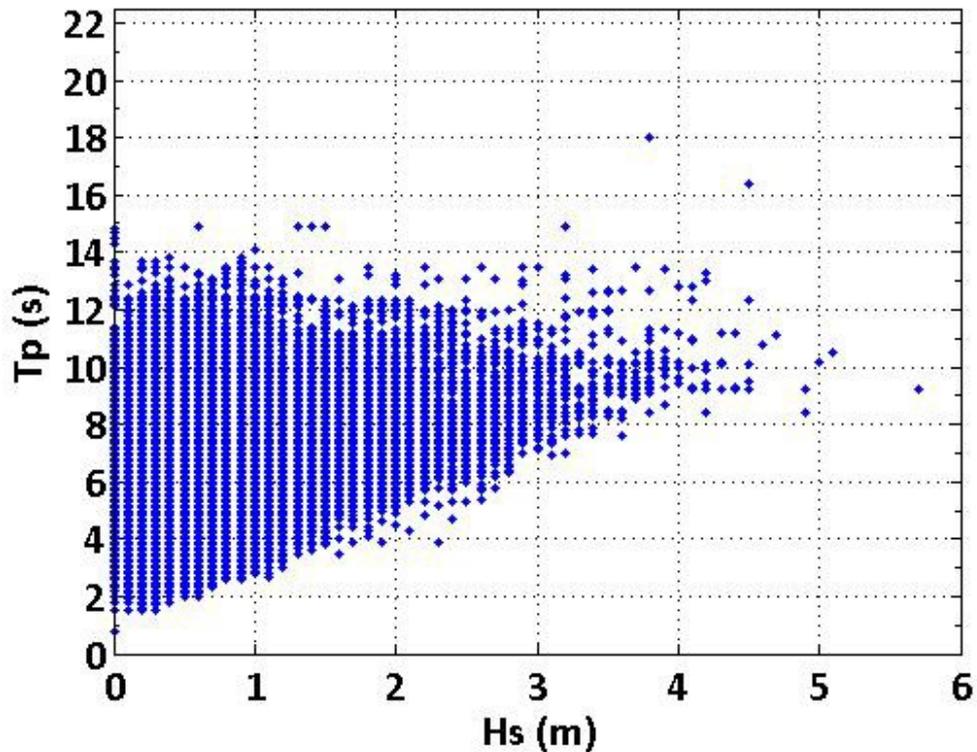
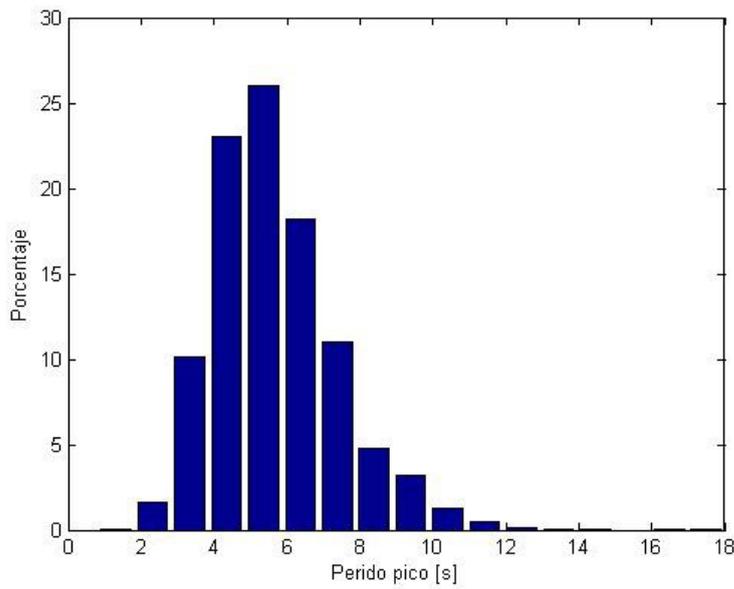


Figura 4.4: Gráfico de dispersión Hs-T

ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA-PERIDO PICO

Hm0(m)	<0,5	0,5-1,5	1,5-2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	4,5-5,5	5,5-6,5	6,5-7,5	7,5-8,5	8,5-9,5	9,5-10,5	10,5-11,5	11,5-12,5	12,5-13,5	13,5-14,5	14,5-15,5	15,5-16,5	16,5-17,5	17,5-18,5	18,5-19,5	TOTAL
	Tp(s)																				
<0,125	0	0,0112	0,2961	1,4011	1,1548	0,6078	0,4089	0,2754	0,2235	0,1425	0,0810	0,0447	0,0106	0,0039	0,0017	0,0011	0	0	0	0	4,6643
0,125-0,375	0	0,0067	0,3302	2,2928	6,7487	4,8308	1,9123	0,6710	0,5346	0,3615	0,2637	0,1134	0,0346	0,0073	0,0011	0	0	0	0	0	18,1086
0,375-0,625	0	0	0,1743	2,6721	7,7699	11,2493	7,7252	3,1777	1,0508	0,4682	0,3933	0,2056	0,0754	0,0117	0,0006	0,0006	0	0	0	0	34,9747
0,625-0,875	0	0	0,0034	0,2888	1,9710	4,7330	4,3308	2,0559	1,2062	0,3022	0,1436	0,0721	0,0313	0,0089	0	0	0	0	0	0	15,1471
0,875-1,125	0	0	0	0,0687	0,9475	3,1391	5,3498	2,1704	1,4380	0,6626	0,2318	0,0844	0,0318	0,0095	0,0028	0	0	0	0	0	14,1365
1,125-1,375	0	0	0	0,0061	0,0732	0,6603	1,7324	1,2676	0,5520	0,3352	0,1581	0,0229	0,0117	0,0022	0	0,0006	0	0	0	0	4,8224
1,375-1,625	0	0	0	0,0006	0,0268	0,2821	1,2570	1,4821	0,6648	0,3201	0,2196	0,0726	0,0112	0,0006	0	0,0017	0	0	0	0	4,3392
1,625-1,875	0	0	0	0	0,0039	0,0363	0,2581	0,5341	0,3492	0,1196	0,0765	0,0497	0,0084	0,0011	0	0	0	0	0	0	1,4369
1,875-2,125	0	0	0	0	0,0017	0,0128	0,1637	0,3581	0,3939	0,1179	0,0564	0,0436	0,0145	0,0039	0	0	0	0	0	0	1,1665
2,125-2,375	0	0	0	0	0,0006	0,0017	0,0268	0,1129	0,1899	0,0609	0,0173	0,0168	0,0073	0,0022	0	0	0	0	0	0	0,4363
2,375-2,625	0	0	0	0	0	0,0022	0,0173	0,0542	0,1486	0,0698	0,0274	0,0128	0,0084	0,0011	0	0	0	0	0	0	0,3419
2,625-2,875	0	0	0	0	0	0	0,0045	0,0235	0,0547	0,0397	0,0162	0,0067	0,0011	0,0006	0	0	0	0	0	0	0,1469
2,875-3,125	0	0	0	0	0	0	0	0,0101	0,0497	0,0402	0,0173	0,0112	0,0011	0,0028	0	0	0	0	0	0	0,1324
3,125-3,375	0	0	0	0	0	0	0	0,0006	0,0084	0,0140	0,0084	0,0011	0,0034	0,0011	0	0,0006	0	0	0	0	0,0374
3,375-3,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0089	0,0190	0,0134	0,0028	0,0028	0,0034	0	0	0	0	0	0	0,0503
3,625-3,875	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0017	0,0112	0,0101	0,0017	0	0,0011	0	0	0	0	0,0006	0	0,0263
3,875-4,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0028	0,0073	0,0028	0,0006	0,0017	0	0	0	0	0	0	0,0151
4,125-4,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0011	0,0028	0,0028	0,0006	0	0,0011	0	0	0	0	0	0	0,0084
4,375-4,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0028	0,0006	0,0011	0,0006	0	0	0,0006	0	0	0	0	0,0056
4,625-4,875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006
4,875-5,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006	0,0006	0,0011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0022
5,125-5,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,375-5,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,625-5,875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006
5,875-6,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,125-6,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,375-6,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,625-6,875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,875-7,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,125-7,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,375-7,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0	0,0179	0,8039	6,7302	18,6980	25,5556	23,1869	12,1934	6,8766	3,0939	1,7458	0,7670	0,2548	0,0642	0,0061	0,0045	0,0006	0	0,0006	0	100

Cuadro 4.3: Altura significativa de ola - Periodo pico



Tp(s) [a,b)	Frecuencia (%)
0 - 1	0.000
1 - 2	0.031
2 - 3	1.595
3 - 4	10.168
<b>4 - 5</b>	<b>23.025</b>
<b>5 - 6</b>	<b>26.019</b>
<b>6 - 7</b>	<b>18.205</b>
7 - 8	11.020
8 - 9	4.797
9 - 10	3.201
10 - 11	1.254
11 - 12	0.470
12 - 13	0.166
13 - 14	0.042
14 - 15	0.006
15 - 16	0.000
16 - 17	0.001
17 - 18	0.001

Figura 4.5: Histograma de periodos pico

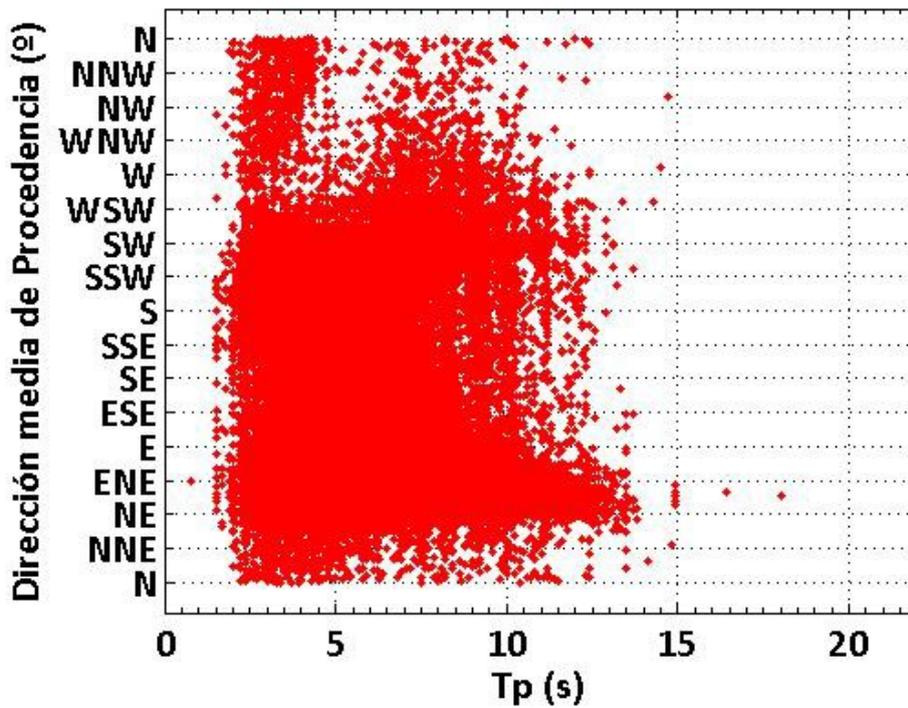
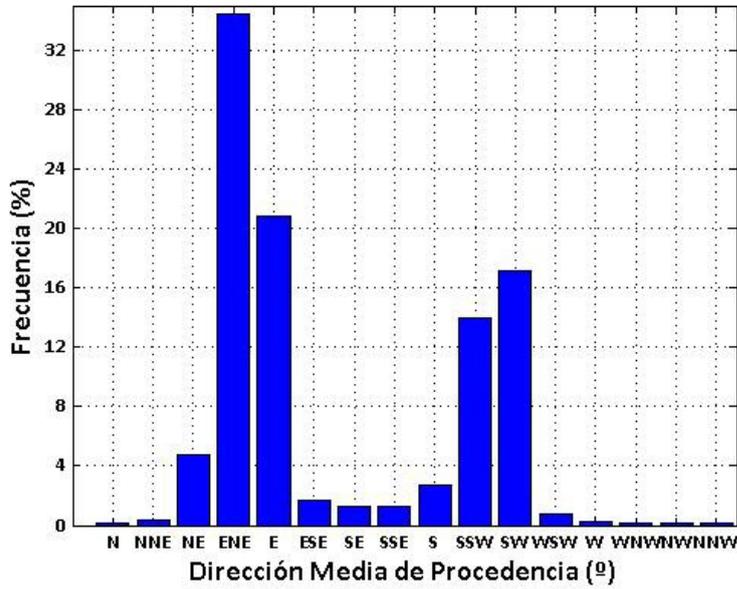


Figura 4.6: Gráfico de dispersión Tp-Dm

PERIODO PICO - DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA

Tp(s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	TOTAL
	DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA (°)																
<0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5-1,5	0	0	0,0017	0,0034	0,0017	0,0011	0,0006	0,0039	0,0017	0,0028	0	0,0006	0	0	0,0006	0	0,0179
1,5-2,5	0,0112	0,0123	0,0609	0,1006	0,0464	0,0251	0,0419	0,0508	0,0955	0,1793	0,1017	0,0413	0,0106	0,0106	0,0084	0,0073	0,8039
2,5-3,5	0,0469	0,0626	0,2832	0,9855	0,7564	0,2000	0,1464	0,2117	0,7240	2,2743	0,8000	0,0732	0,0251	0,0475	0,0503	0,0430	6,7302
3,5-4,5	0,0508	0,0877	0,7045	5,2682	5,0096	0,3961	0,2129	0,2101	0,6257	4,1369	1,8520	0,0542	0,0112	0,0140	0,0257	0,0385	18,6980
4,5-5,5	0,0128	0,0531	0,6732	9,4392	7,2414	0,3514	0,2816	0,2715	0,5134	3,9079	2,7252	0,0542	0,0145	0,0067	0,0034	0,0061	25,5556
5,5-6,5	0,0095	0,0330	0,5894	9,5403	4,9001	0,3039	0,2704	0,2609	0,3967	2,3587	4,3917	0,0827	0,0291	0,0095	0,0078	0,0034	23,1869
6,5-7,5	0,0073	0,0212	0,5542	4,6107	1,7961	0,1441	0,1179	0,1413	0,1525	0,6866	3,7408	0,1223	0,0447	0,0263	0,0151	0,0123	12,1934
7,5-8,5	0,0117	0,0201	0,6173	2,4671	0,7464	0,1168	0,0955	0,0788	0,0966	0,2285	2,1503	0,1480	0,0508	0,0268	0,0151	0,0067	6,8766
8,5-9,5	0,0084	0,0190	0,5129	1,0855	0,1721	0,0525	0,0430	0,0358	0,0536	0,0793	0,8637	0,0983	0,0369	0,0168	0,0089	0,0073	3,0939
9,5-10,5	0,0061	0,0162	0,4263	0,5620	0,0994	0,0279	0,0296	0,0296	0,0358	0,0402	0,3615	0,0710	0,0240	0,0078	0,0073	0,0011	1,7458
10,5-11,5	0,0084	0,0101	0,2397	0,2531	0,0318	0,0128	0,0112	0,0089	0,0123	0,0190	0,1095	0,0385	0,0095	0,0022	0	0	0,7670
11,5-12,5	0,0039	0,0028	0,0866	0,0793	0,0095	0,0073	0,0050	0,0050	0,0089	0,0095	0,0246	0,0084	0,0022	0,0006	0	0,0011	0,2548
12,5-13,5	0,0006	0,0011	0,0279	0,0240	0,0017	0,0022	0,0006	0,0006	0,0006	0,0011	0,0028	0,0011	0	0	0	0	0,0642
13,5-14,5	0	0,0006	0,0034	0	0	0,0006	0	0	0	0,0006	0	0,0006	0,0006	0	0	0	0,0061
14,5-15,5	0	0,0006	0,0011	0,0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006	0	0,0045
15,5-16,5	0	0	0	0,0006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006
16,5-17,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17,5-18,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,5-19,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19,5-20,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,5-21,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21,5-22,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22,5-23,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>0,177656</b>	<b>0,340227</b>	<b>4,782176</b>	<b>34,42161</b>	<b>20,81252</b>	<b>1,641918</b>	<b>1,256439</b>	<b>1,308953</b>	<b>2,717349</b>	<b>13,92474</b>	<b>17,12366</b>	<b>0,794422</b>	<b>0,259221</b>	<b>0,168717</b>	<b>0,143018</b>	<b>0,126817</b>	<b>100</b>

Cuadro 4.5: Periodo pico - Dirección media de procedencia



Dm	Frecuencia (%)
N	0.178
NNE	0.340
NE	4.782
<b>ENE</b>	<b>34.422</b>
E	20.813
ESE	1.642
SE	1.256
SSE	1.309
S	2.717
SSW	13.925
<b>SW</b>	<b>17.124</b>
WSW	0.794
W	0.259
WNW	0.169
NW	0.143
NNW	0.127

Figura 4.7: Histograma de direcciones medias de procedencia

Cuadro 4.6: Porcentaje de direcciones medias de procedencia

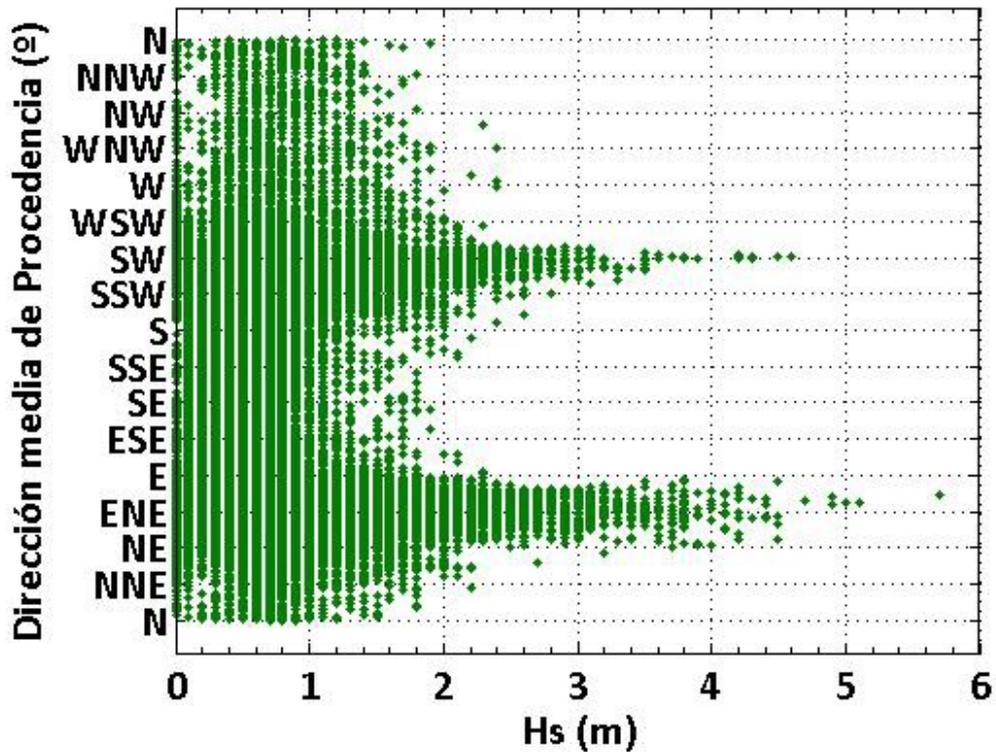


Figura 4.8: Gráfico de dispersión Hs-Dm

ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA-DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA

Hm0(m)	DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA (°)																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
<0,125	0,0134	0,0285	0,8508	1,1469	0,6307	0,1743	0,1419	0,1006	0,1592	0,4698	0,6553	0,2419	0,0285	0,0073	0,0084	0,0067	4,6643
0,125-0,375	0,0156	0,0190	1,0888	5,0414	4,3833	0,6050	0,3810	0,4067	0,8363	3,3676	1,8833	0,0408	0,0179	0,0073	0,0045	0,0101	18,1086
0,375-0,625	0,0520	0,1022	1,2307	11,1923	8,5727	0,6291	0,5190	0,5643	1,1643	5,4928	5,0716	0,1637	0,0710	0,0570	0,0553	0,0369	34,9747
0,625-0,875	0,0408	0,0698	0,5263	5,7727	2,8788	0,1296	0,1318	0,1318	0,3218	2,0145	2,8715	0,1218	0,0520	0,0374	0,0229	0,0235	15,1471
0,875-1,125	0,0380	0,0598	0,5324	5,4056	2,4956	0,0721	0,0603	0,0793	0,1710	1,6928	3,2732	0,1112	0,0475	0,0313	0,0363	0,0302	14,1365
1,125-1,375	0,0112	0,0179	0,1749	1,9520	0,7877	0,0173	0,0101	0,0128	0,0307	0,4419	1,2637	0,0514	0,0162	0,0134	0,0101	0,0112	4,8224
1,375-1,625	0,0045	0,0246	0,1855	1,9436	0,6151	0,0089	0,0061	0,0089	0,0151	0,3061	1,1425	0,0391	0,0190	0,0095	0,0039	0,0067	4,3392
1,625-1,875	0,0017	0,0112	0,0665	0,6441	0,2067	0,0039	0,0056	0,0022	0,0073	0,0682	0,3961	0,0128	0,0039	0,0039	0,0011	0,0017	1,4369
1,875-2,125	0,0006	0,0056	0,0620	0,5933	0,1447	0,0017	0,0006	0,0022	0,0095	0,0453	0,2877	0,0106	0,0017	0,0011	0	0	1,1665
2,125-2,375	0	0,0017	0,0201	0,2274	0,0441	0	0	0	0,0011	0,0101	0,1296	0,0011	0,0006	0	0,0006	0	0,4363
2,375-2,625	0	0	0,0134	0,2145	0,0229	0	0	0	0,0011	0,0123	0,0760	0	0,0011	0,0006	0	0	0,3419
2,625-2,875	0	0	0,0084	0,0916	0,0084	0	0	0	0	0,0011	0,0374	0	0	0	0	0	0,1469
2,875-3,125	0	0	0,0112	0,0933	0,0084	0	0	0	0	0,0017	0,0179	0	0	0	0	0	0,1324
3,125-3,375	0	0	0,0017	0,0268	0,0045	0	0	0	0	0,0006	0,0039	0	0	0	0	0	0,0374
3,375-3,625	0	0	0,0022	0,0397	0,0028	0	0	0	0	0	0,0056	0	0	0	0	0	0,0503
3,625-3,875	0	0	0,0022	0,0184	0,0028	0	0	0	0	0	0,0028	0	0	0	0	0	0,0263
3,875-4,125	0	0	0,0034	0,0084	0,0017	0	0	0	0	0	0,0017	0	0	0	0	0	0,0151
4,125-4,375	0	0	0,0011	0,0034	0,0011	0	0	0	0	0	0,0028	0	0	0	0	0	0,0084
4,375-4,625	0	0	0,0006	0,0034	0,0006	0	0	0	0	0	0,0011	0	0	0	0	0	0,0056
4,625-4,875	0	0	0	0,0006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006
4,875-5,125	0	0	0	0,0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0022
5,125-5,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,375-5,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,625-5,875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,875-6,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,125-6,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,375-6,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,625-6,875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,875-7,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,125-7,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,375-7,625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0,1777	0,3402	4,7822	34,4216	20,8125	1,6419	1,2564	1,3090	2,7173	13,9247	17,1237	0,7944	0,2592	0,1687	0,1430	0,1268	100

Cuadro 4.7: Altura significativa de ola - Dirección media de procedencia

Se representa a continuación la rosa de oleaje de los datos del punto SIMAR.

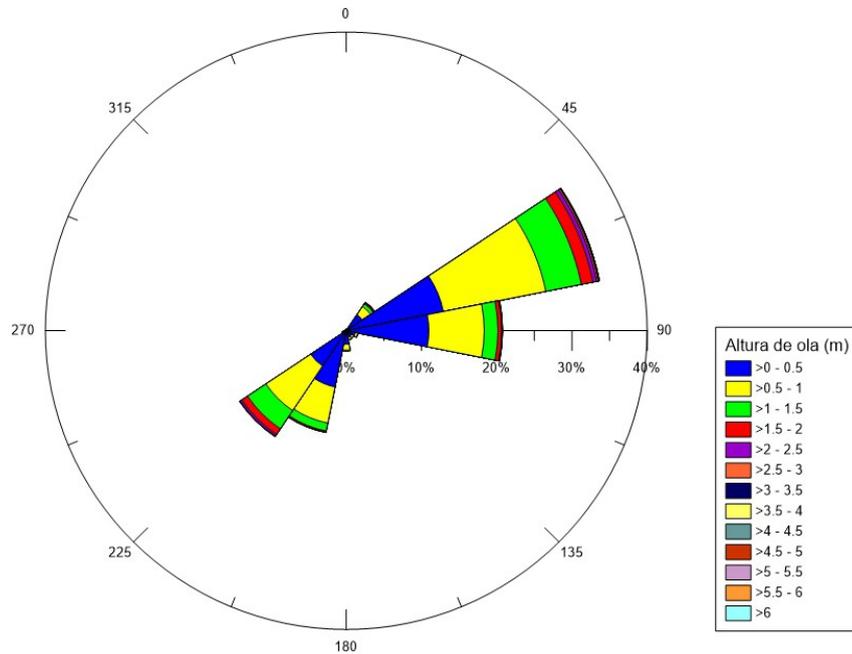


Figura 4.9: Rosa de oleaje

#### 4.2.1.1. Resumen de resultados parciales

Los resultados más reseñables de la descripción general del oleaje en profundidades indefinidas son:

- Las alturas de ola más frecuentes se encuentran en el intervalo de 0.5-1 m. El 35 % de las olas están en torno a 0.5 metros, siendo esta la altura ola más frecuente.
- Los periodos más frecuentes son los que están entre 4 y 6 segundos y los periodos menores a 2 segundos y mayores de 10 segundos apenas se dan.
- Las direcciones de procedencia del oleaje más frecuentes son **ENE** y **SW**

#### 4.2.2. Régimen medio anual de $H_s$ en profundidades indefinidas

Se obtiene el régimen medio anual del oleaje en profundidades indefinidas para la “Altura de ola significativa  $H_s$  (m)” considerando todas las direcciones. Después se calcula de nuevo el régimen medio pero únicamente para las dos direcciones predominantes del oleaje: **ENE** y **SW**.

Todos los regímenes medios de altura de ola significativa se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a, b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}I_{(0,\infty)}(x) \quad (4.1)$$

En la tabla 4.8 se muestran los parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar de altura de ola obtenidos según la distribución de Weibull.

	a	b
Escalar	0.7707342	1.63251448
ENE	0.85899682	1.63409307
SW	0.9066909	1.77744403

Cuadro 4.8: Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio

Las figuras siguientes se organizan en tres bloques, cada bloque corresponde con un régimen medio distinto: el escalar y los dos direccionales (ENE y SW). Dentro de cada bloque se pueden diferenciar tres figuras, en la primera se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull (datos empíricos), esta gráfica permite conocer la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola. En la segunda figura se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada altura de ola, es decir, la probabilidad de que dicha altura de ola no sea superada.

### 4.2.2.1. Régimen medio escalar

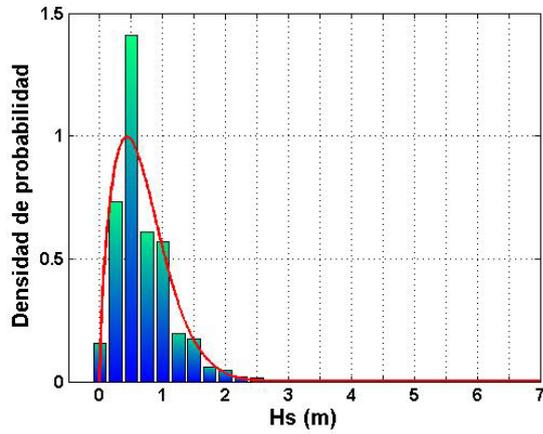


Figura 4.10: Función de densidad escalar

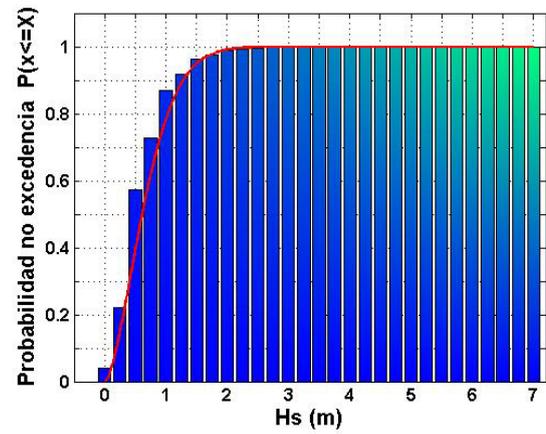


Figura 4.11: Función de distribución escalar

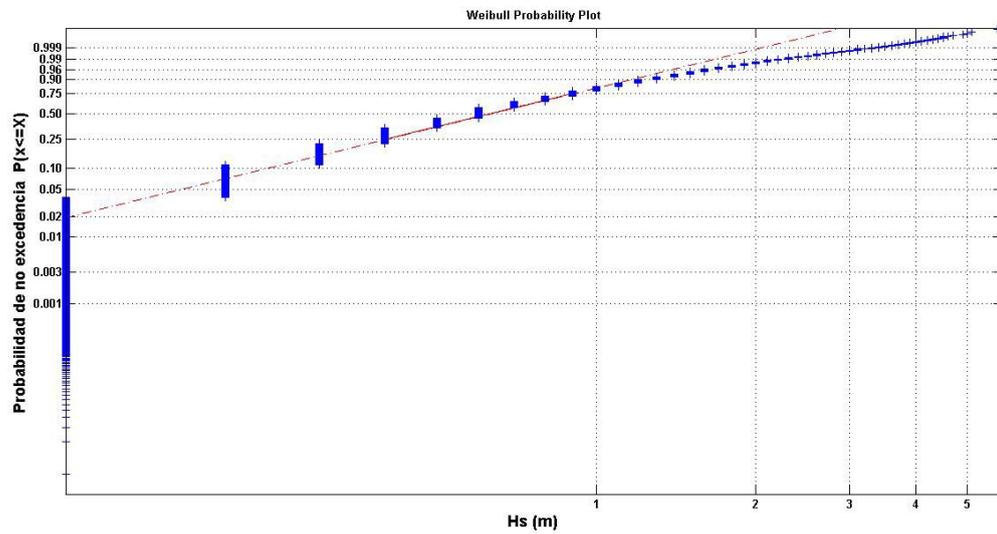


Figura 4.12: Función distribución escalar en papel probabilístico normal

#### 4.2.2.2. Régimen medio direccional ENE

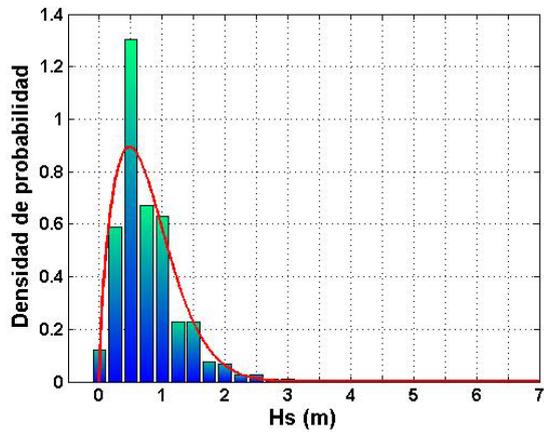


Figura 4.13: Función de densidad direccional: ENE

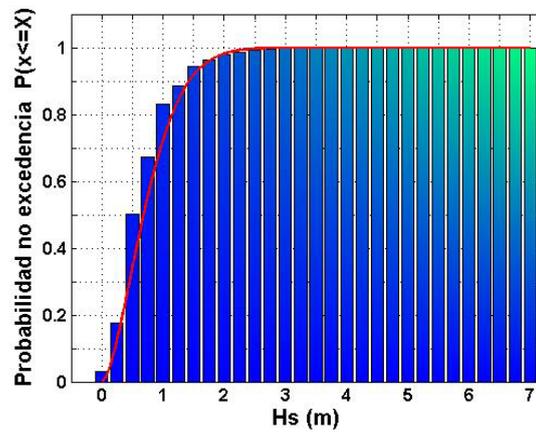


Figura 4.14: Función de distribución direccional: ENE

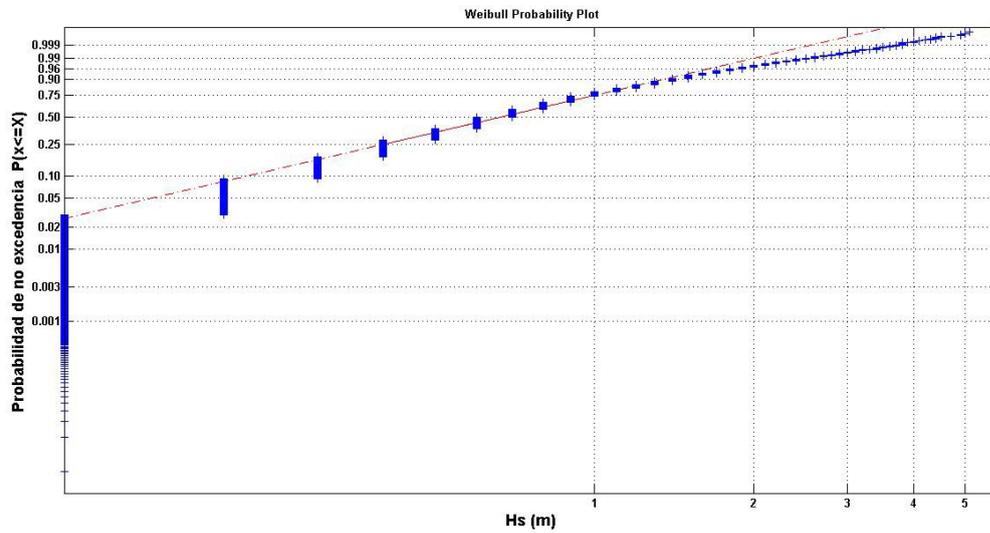


Figura 4.15: Función distribución direccional ENE en papel probabilístico normal

### 4.2.2.3. Régimen medio direccional SW

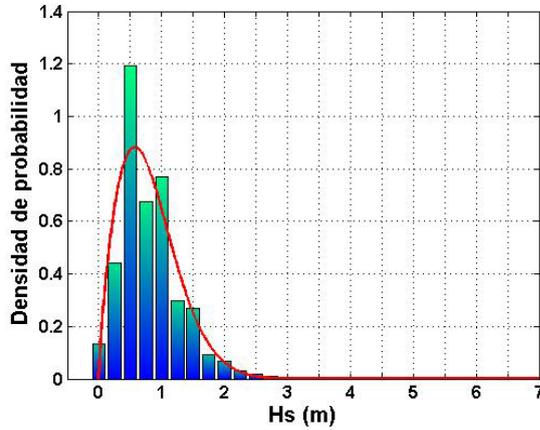


Figura 4.16: Función de densidad direccional: SW

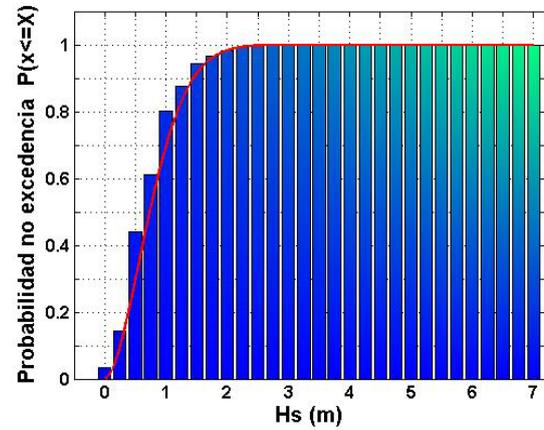


Figura 4.17: Función de distribución direccional: SW

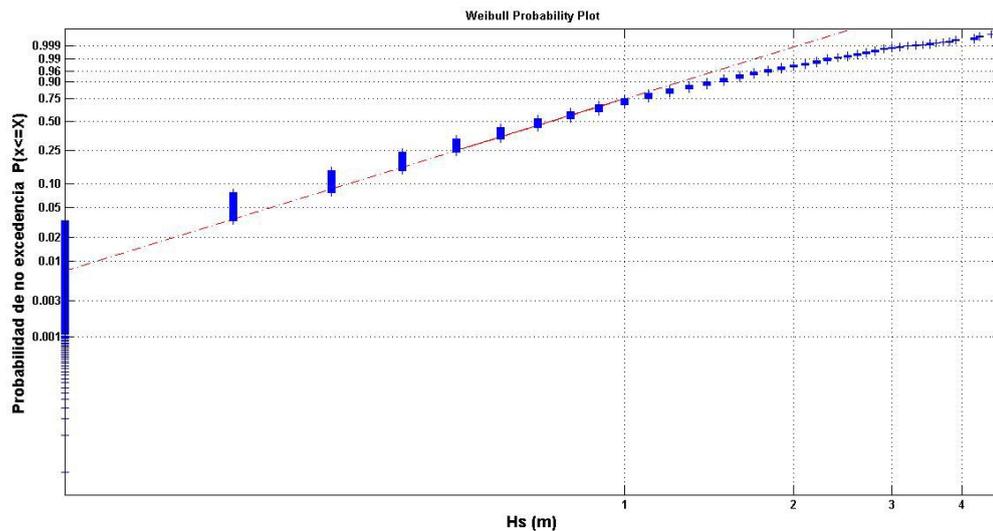


Figura 4.18: Función distribución direccional SW en papel probabilístico normal

### 4.2.2.4. Resumen de resultados parciales

Como resumen del régimen medio para la altura de ola se presenta la siguiente tabla:

REGIMEN MEDIO	ALTURA DE OLA $H_s$ (m)	
	Prob. No excedencia 50 %	Prob. No excedencia 85 %
ESCALAR	0.62	1.14
DIRECCIONAL ENE	0.69	1.27
DIRECCIONAL SW	0.74	1.3

Cuadro 4.9: Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola.

### 4.2.3. Régimen extremal de Hs en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la altura de ola umbral correspondiente a 2 m, correspondiente al valor que es superado en menos del 1%. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 48 horas. De esta manera se han obtenido 231 eventos extremales respectivamente, en los 18 años meteorológicos analizados. Hemos reducido la serie temporal en este análisis extremal puesto que era bastante regular en el tiempo y con la gran cantidad de datos no se aprecia con tanta precisión la representación.

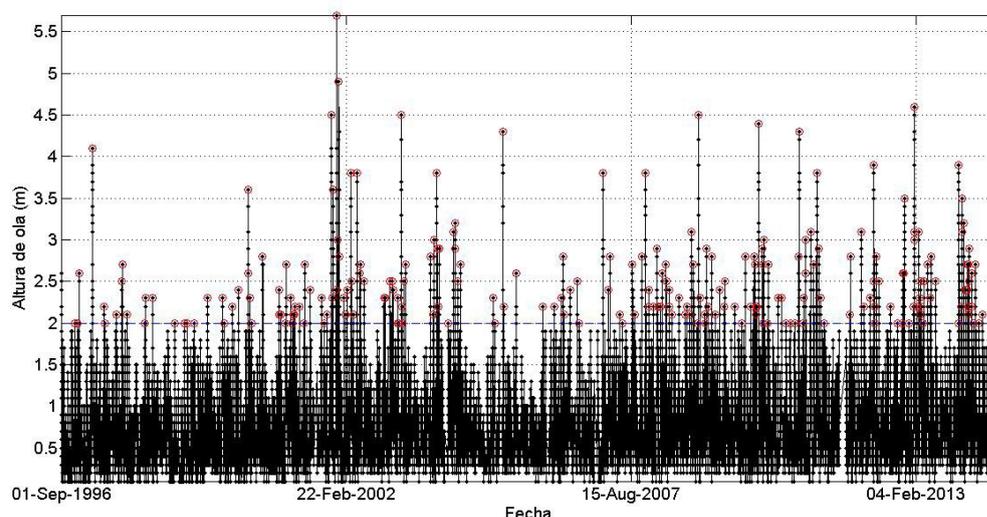


Figura 4.19: Picos de altura de ola sobre umbral con Hsu = 2 m

Para caracterizar al régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es:

(4.2)

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}}$$

La distribución generalizada de los Valores Extremos (GEV) une a las distribuciones de tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull) en una sola familia para permitir un rango continuo de posibles ajustes. Esta distribución posee unos parámetros de localización y escala, y un parámetro de forma, k. De esta manera, cuando  $k < 0$ , el GEV es equivalente al valor de tipo III (Weibull); cuando  $k > 0$ , es equivalente a la de tipo II (Frechet); y en el límite cuando  $k = 0$ , se convierte en el tipo I (Gumbel).

### 4.2.3.1. Régimen extremal escalar

Régimen extremal escalar	k	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Nº eventos
	0.7601	0.1852	2.1307	Frechet	231

Cuadro 4.10: Parámetros de ajuste para régimen extremal escalar.

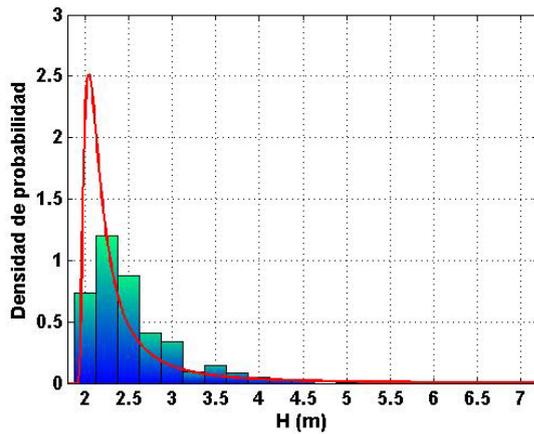


Figura 4.20: Función de densidad escalar

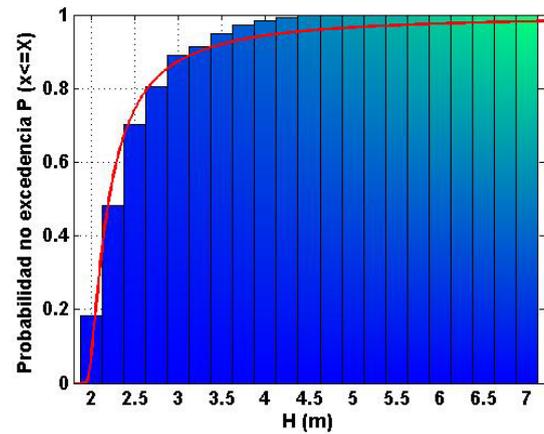


Figura 4.21: Función de distribución escalar

### 4.2.3.2. Régimen extremal direccional ENE

Régimen extremal direcc. ENE	k	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Nº eventos
	0.5667	0.2423	2.1912	Frechet	91

Cuadro 4.11: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: ENE

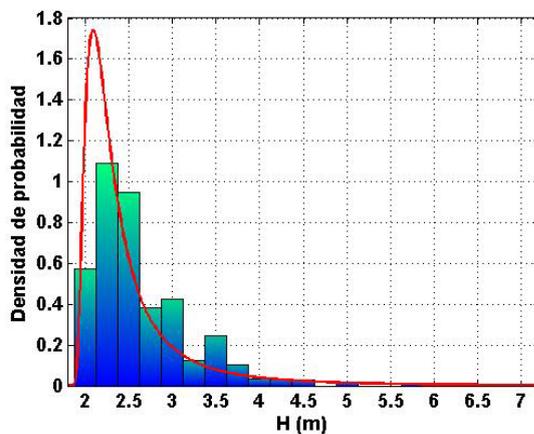


Figura 4.22: Función de densidad direccional:ENE

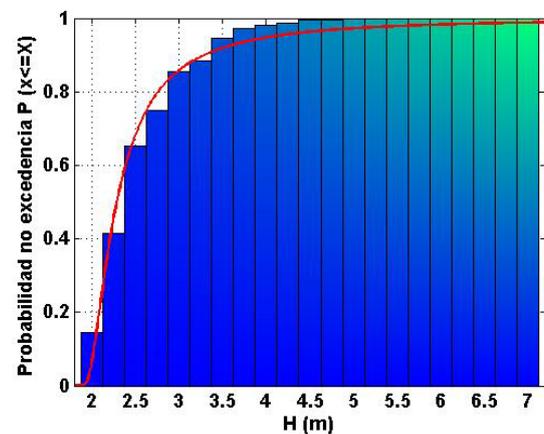


Figura 4.23: Función de distribución direccional:ENE

### 4.2.3.3. Régimen extremal direccional SW

Régimen extremal direcc. SW	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Nº eventos
	0.5887	0.1694	2.1285	Frechet	105

Cuadro 4.12: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: SW

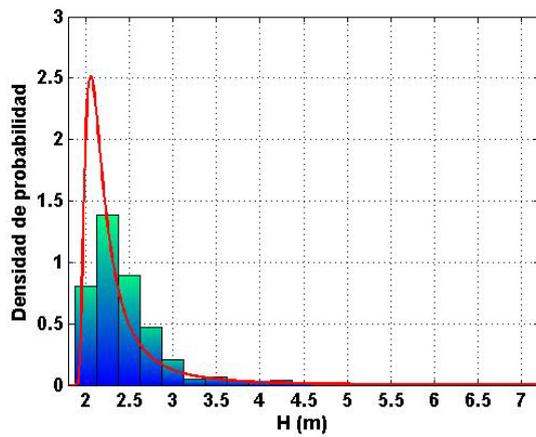


Figura 4.24: Función de densidad direccional:SW

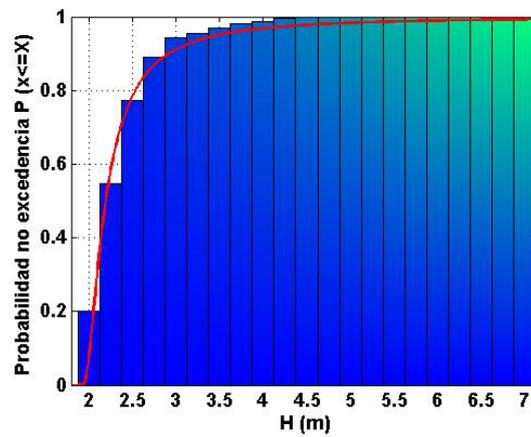


Figura 4.25: Función de distribución direccional:SW

## 4.3. Viento

### 4.3.1. Descripción general del viento en profundidades indefinidas

En primer lugar se realiza una descripción general de las características del viento en profundidades indefinidas en la zona de estudio, en el que se mostrará:

- Un gráfico de dispersión entre las variables  $V_v$  y  $\theta_v$ .
- Dos histogramas, uno por cada variable:  $V_v$  y  $\theta_v$ .
- Rosa de los vientos.

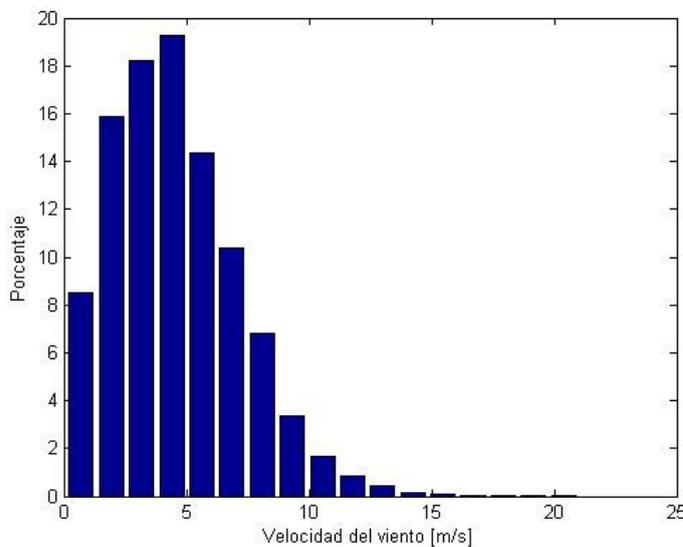


Figura 4.26: Histograma de altura de velocidades de viento

Vv(m/s) [a,b]	Frecuencia (%)
0 - 1.25	8.53
1.25 - 2.5	15.88
2.5 - 3.75	18.20
3.75 - 5	19.24
5 - 6.25	14.38
6.25 - 7.5	10.35
7.5 - 8.75	6.82
8.75 - 10	3.35
10 - 11.25	1.64
11.25 - 12.5	0.83
12.5 - 13.75	0.44
13.75 - 15	0.17
15 - 16.25	0.07
16.25 - 17.5	0.06
17.5 - 18.75	0.02
18.75 - 20	0.01
20 - 21.25	0.00

Cuadro 4.13: Porcentajes de velocidades de viento

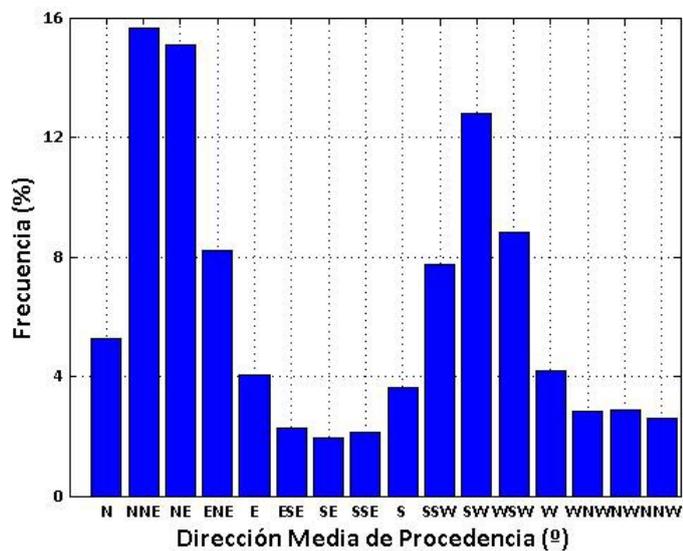


Figura 4.27: Histograma de direcciones medias de procedencia

Dm	Frecuencia (%)
N	5.25
NNE	15.66
NE	15.10
ENE	8.21
E	4.04
ESE	2.27
SE	1.93
SSE	2.13
S	3.63
SSW	7.73
SW	12.80
WSW	8.82
W	4.17
WNW	2.81
NW	2.86
NNW	2.58

Cuadro 4.14: Porcentajes de direcciones medias de procedencia

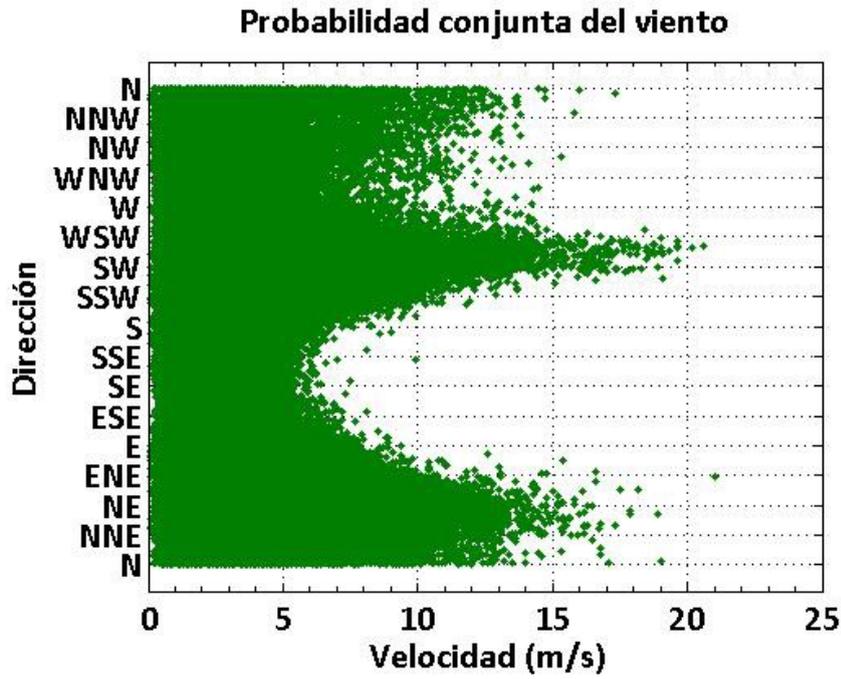


Figura 4.28: Gráfico de dispersión  $V_v - \theta_v$

Se representa a continuación la rosa de los vientos de los datos del punto SIMAR.

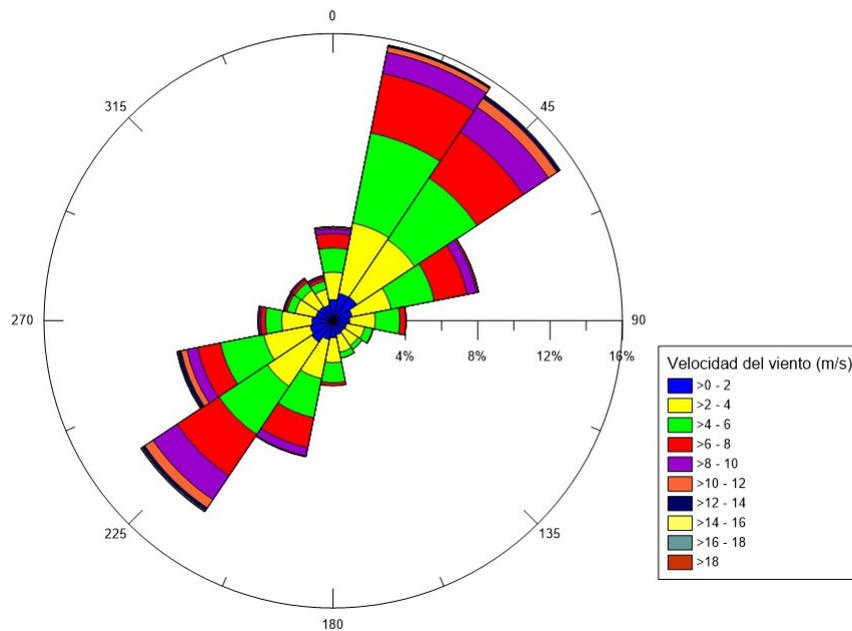


Figura 4.29: Rosa de viento



#### 4.3.1.1. Resumen de resultados parciales

Los resultados más reseñables de la descripción general del viento en profundidades indefinidas son:

- Rango de velocidades de viento entre 0 y 20 m/s
- Las velocidades de viento más frecuentes se centran en torno a 5 m/s
- Las direcciones de viento más frecuentes son: NNE y SW.

### 4.3.2. Régimen medio anual de $V_v$ en profundidades indefinidas.

Se obtiene el régimen medio anual de velocidades de viento en profundidades indefinidas considerando todas las direcciones. Después se calcula de nuevo el régimen medio, pero únicamente para las dos direcciones predominantes de procedencia del viento: NNE y SW.

Todos los regímenes medios de velocidad de viento se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a, b) = ba^{-b} x^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0, \infty)}(x) \quad (4.3)$$

En la tabla 4.15 se muestran los parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar de velocidades de viento obtenidos según la distribución de Weibull.

	a	b
Escalar	5.1378	1.8489
Dirección NNE	5.7027	2.2769
Dirección SW	6.2487	2.0052

Cuadro 4.15: Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio

Las figuras siguientes se organizan en tres bloques, cada bloque corresponde con un régimen medio distinto: el escalar y los dos direccionales (NNE y SW). Dentro de cada bloque se pueden diferenciar a su vez dos figuras, en la primera se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull (datos empíricos), esta gráfica permite saber la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad de viento. En la segunda figura se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada velocidad de viento, es decir, la probabilidad de que dicha velocidad de viento no sea superada.

### 4.3.2.1. Régimen medio escalar

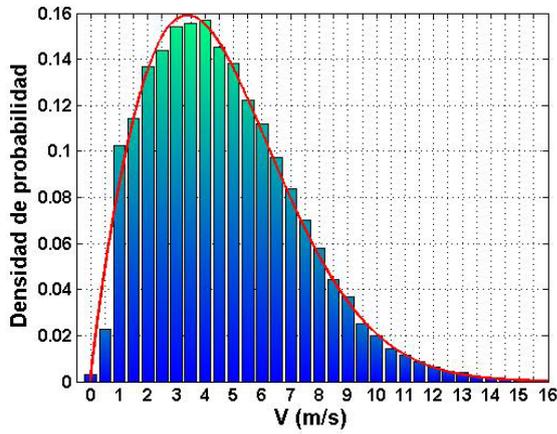


Figura 4.30: Función de densidad escalar. Vv

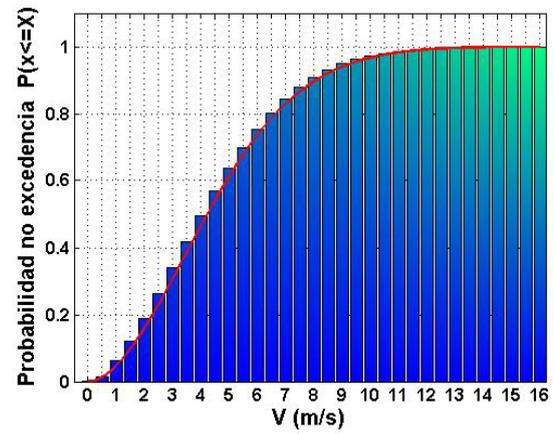


Figura 4.31: Función de distribución escalar. Vv

### 4.3.2.2. Régimen medio direccional NNE

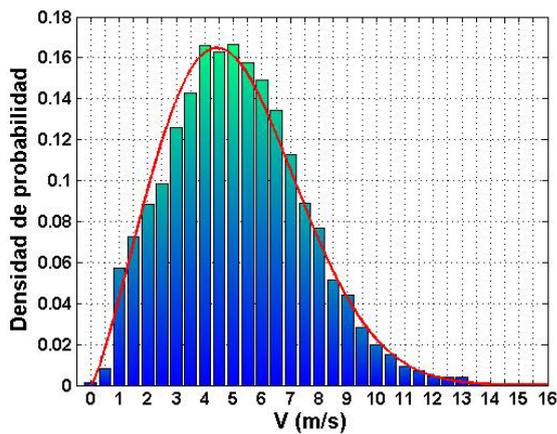


Figura 4.32: Función de densidad direccional NNE. Vv

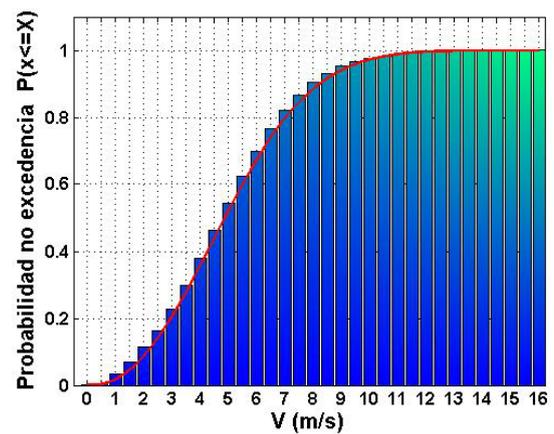


Figura 4.33: Función de distribución direccional NNE. Vv

### 4.3.2.3. Régimen medio direccional SW

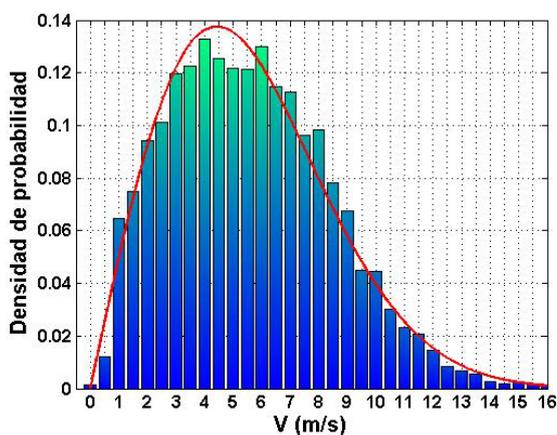


Figura 4.34: Función de densidad direccional SW. Vv

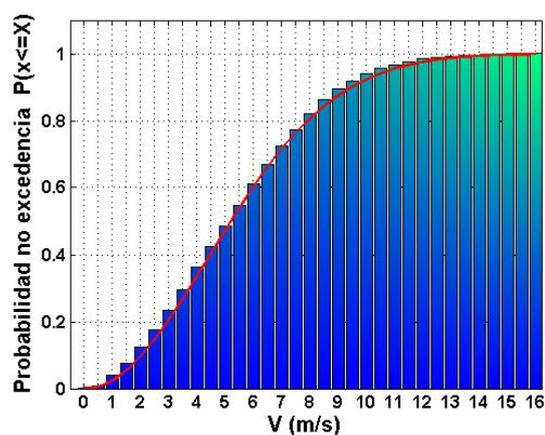


Figura 4.35: Función de distribución direccional SW. Vv

### 4.3.2.4. Resumen de resultados parciales

Como resumen del régimen medio para la velocidad del viento se presenta la siguiente tabla:

REGIMEN MEDIO	ALTURA DE OLA ,Hs(m)	
	Prob. No excedencia 50 %	Prob. No excedencia 85 %
ESCALAR	4.2	7.3
DIRECCIONAL NNE	4.9	7.6
DIRECCIONAL SW	5.2	8.6

Cuadro 4.16: Tabla resumen del régimen medio para la velocidad del viento.

### 4.3.3. Régimen extremal de Vv en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la velocidad de viento umbral correspondiente a 10,4 m/s, correspondiente al valor que es superado en menos del 5 %. De esta manera se han obtenido 428 eventos extremales respectivamente, en los 18 años meteorológicos analizados.

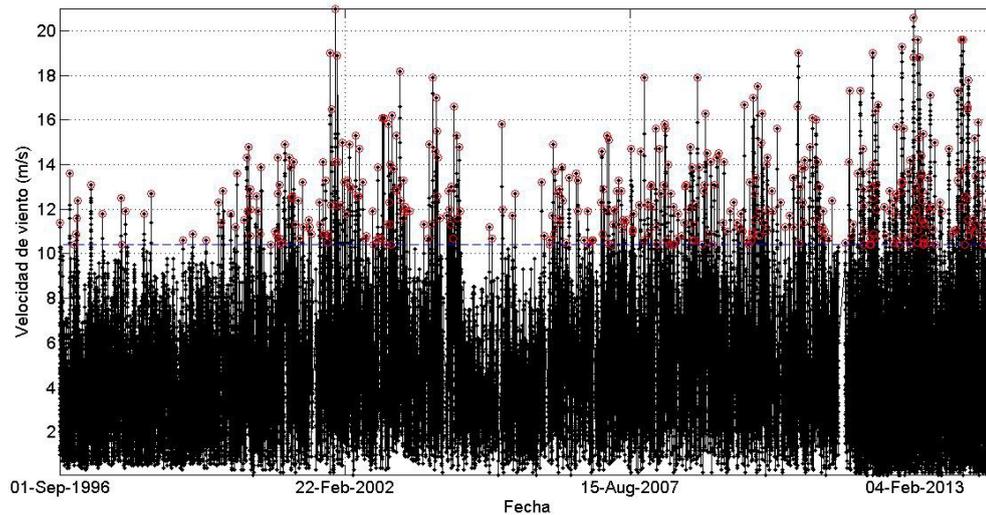


Figura 4.36: Picos de velocidad de viento sobre umbral con  $V_v = 10,4$  m/s

Para caracterizar al régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (4.4)$$

La distribución generalizada de los Valores Extremos (GEV) une a las distribuciones de tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull) en una sola familia para permitir un rango continuo de posibles ajustes. Esta distribución posee unos parámetros de localización y escala y un parámetro de forma,  $k$ . De esta manera, cuando  $k < 0$ , el GEV es equivalente al valor de tipo III (Weibull); cuando  $k > 0$ , es equivalente a la de tipo II (Frechet); y en el límite cuando  $k = 0$ , se convierte en el tipo I (Gumbel).

### 4.3.3.1. Régimen extremal escalar

Régimen extremal escalar	k	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Nº eventos
	0.3987	0.8854	11.2560	Frechet	428

Cuadro 4.17: Parámetros de ajuste para régimen extremal escalar.

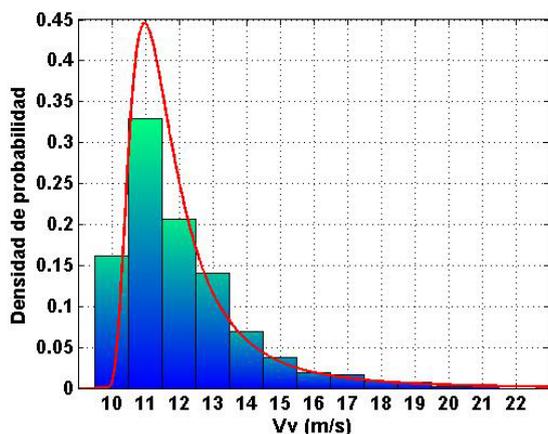


Figura 4.37: Función de densidad escalar

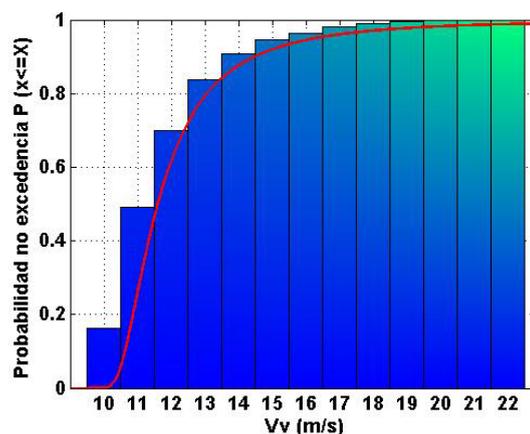


Figura 4.38: Función de distribución escalar

### 4.3.3.2. Régimen extremal direccional NNE

Régimen extremal direcc. NNE	k	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Nº eventos
	0.4557	0.7013	11.0439	Frechet	47

Cuadro 4.18: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional NNE

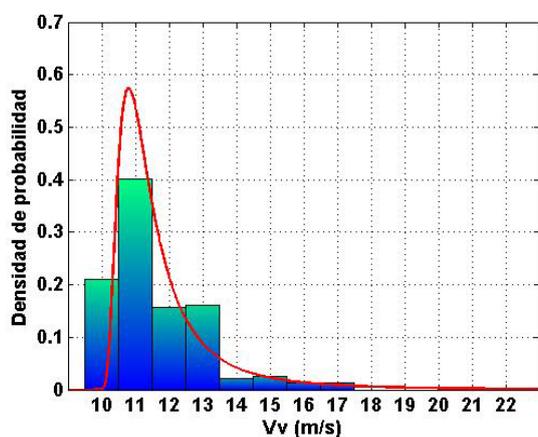


Figura 4.39: Función de densidad direcc. NNE

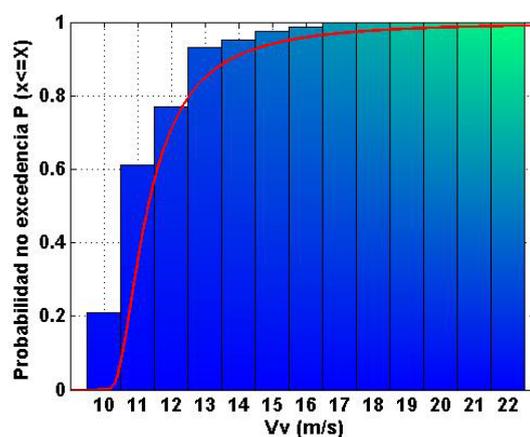


Figura 4.40: Función de distribución direcc. NNE

### 4.3.3.3. Régimen extremal direccional SW

Régimen extremal direcc. SW	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución equivalente	Nº eventos
	0.4005	1.0168	11.38159	Frechet	116

Cuadro 4.19: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional SW

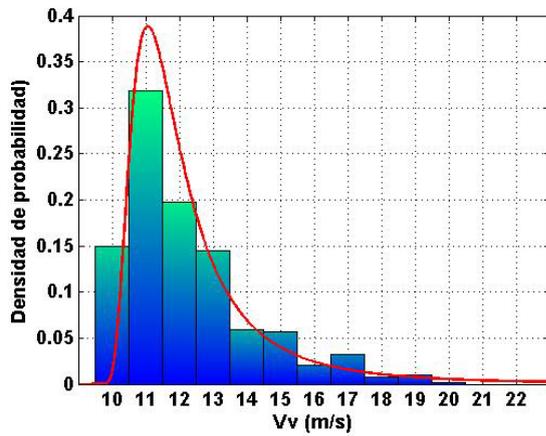


Figura 4.41: Función de densidad direcc. SW

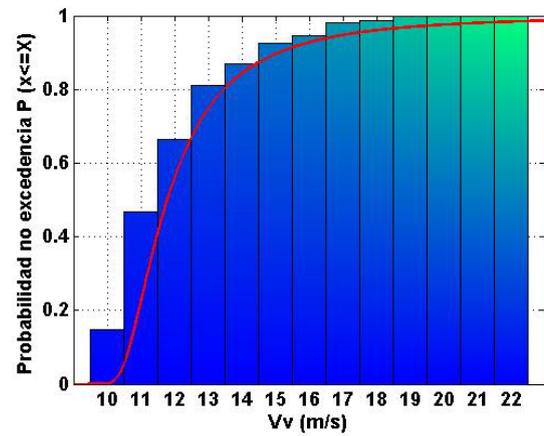


Figura 4.42: Función de distribución direcc. SW

## 4.4. Flujo medio de energía

El oleaje es el proceso dinámico más energético que afecta a la costa. La energía incidente alcanza la costa sufriendo éstos procesos de disipación y reflexión que van a tener una influencia distinta sobre la morfología de la línea de costa.

Se calcula el Flujo Medio de Energía del oleaje en profundidades indefinidas en el punto SIMAR 2063084. El módulo y dirección del FME proporcionará información sobre el comportamiento medio del oleaje y la deriva litoral en el tramo, es decir de la cantidad de energía que aporta el oleaje y en qué dirección se produce. El cálculo de la Resultante Media (RM) del Flujo de Energía en diferentes períodos de tiempo nos permitirá comparar su importancia. La unidad en que se mide es  $\frac{N}{m}$ .

En primer lugar se calcularán estos parámetros teniendo en cuenta el registro completo de estados de mar de cada año y posteriormente se calcularán utilizando sólo estados de mar pertenecientes a periodos invernales.

### 4.4.1. Formulación

El cálculo del flujo medio de energía viene dado por la siguiente expresión:

$$f = E * c_g = \left(\frac{1}{8}\right) * \rho * g * H^2 * \frac{g * T}{4 * \pi} = \frac{\rho * T * g^2 * H^2}{32 * \pi} \quad (4.5)$$

Donde:

- E: Energía total
- $C_g$ : celeridad de grupo
- $\rho$ : densidad del agua ( $1025 \frac{kg}{m^3}$ )
- g: gravedad ( $9,81 \frac{m}{s^2}$ )
- H: altura de ola significativa (m)
- T: periodo

Con esta fórmula queda definido el módulo, la dirección va a venir definida por la dirección del oleaje en cada estado de mar.

Si referimos cada vector al sistema de coordenadas cartesianas, cada vector va a estar formado por sus dos componentes:

$$f_x = f * \sin\left(\frac{\alpha * \pi}{180}\right)$$

$$f_y = f * \cos\left(\frac{\alpha * \pi}{180}\right)$$

Así el módulo vendrá dado por:

$$|F| = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

Y se define:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right)$$

Siendo  $\gamma$  el ángulo que marca la dirección del Flujo Medio de Energía medido desde el norte en sentido horario.

## 4.4.2. Resultados

### 4.4.2.1. Resultantes medias con la totalidad del registro en cada año

Como primer resultado se muestra una resultante media que se corresponde con la resultante obtenida del análisis del flujo medio de energía entre los años 1993 y 2014.

Los parámetros de esta resultante son:

$$\begin{aligned} |F| &= 853,68 \text{ N/s} \\ \gamma &= 140,54^\circ \end{aligned}$$

En la siguiente figura se representa esta resultante media junto a la rosa de oleaje en el punto SIMAR.

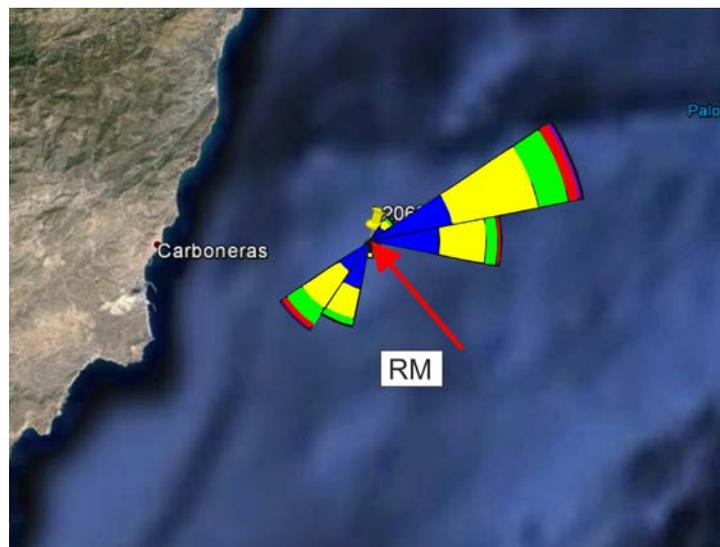


Figura 4.43: Resultante media en el punto SIMAR junto a rosa de oleaje

Si discretizamos los datos se puede obtener una resultante media de cada año analizado, ésta se conoce como Resultante media anual (RMA). Analizando esta resultante anual se perciben fácilmente las variaciones entre los distintos años, es decir, se van ver los años que han sido más energéticos y en qué dirección se ha producido este aporte medio de energía.

A continuación se muestran una tabla con el módulo y sentido de cada resultante así como la representación gráfica de estos. La longitud de la línea es proporcional al módulo que representa.

Año	Módulo (N/s)	Dirección náutica(°)	Año	Módulo (N/s)	Dirección náutica(°)
1993	2309.26	90.28	2004	1903.15	91.10
1994	1219.73	104.20	2005	1764.97	79.06
1995	2710.45	87.08	2006	1702.98	71.04
1996	1883.89	170.19	2007	2619.53	64.67
1997	2216.75	94.84	2008	1169.49	85.12
1998	1154.36	108.36	2009	1452.50	221.55
1999	1336.08	111.89	2010	1848.65	212.00
2000	768.57	141.16	2011	2165.48	79.76
2001	3272.36	75.62	2012	480.02	141.14
2002	2087.22	89.96	2013	3450.40	225.38
2003	2865.93	82.23	2014	2943.15	221.71

Cuadro 4.20: Módulo y dirección de la RMA

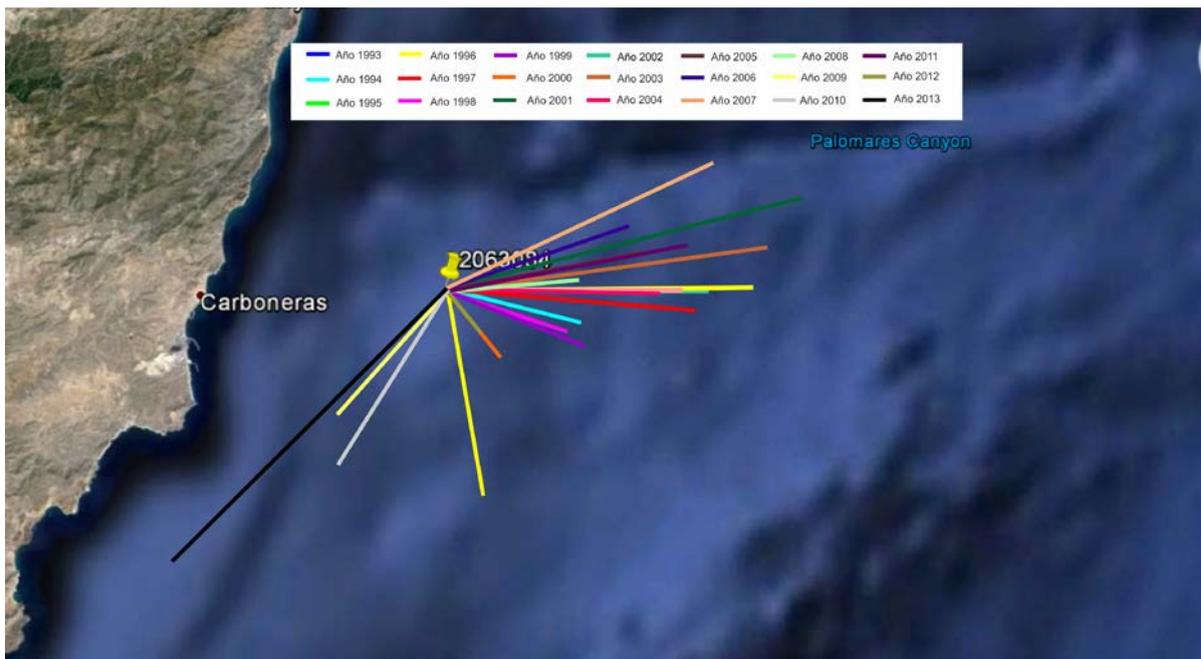


Figura 4.44: Resultantes medias anuales en los años analizados

Se ve que la forma que arroja este espectro de datos es similar a la forma de la rosa de oleaje en el punto SIMAR, lo cual es totalmente lógico. Predominan los años en los que hubo un mayor aporte energético en la dirección E, sin embargo en los últimos años parece haber una mayor predominancia de la dirección SW.

Los años más energéticos han sido 1995, 2001, 2003, 2007 y 2013.

#### 4.4.2.2. Resultantes medias invernales

Se realiza un análisis similar para los inviernos de cada año meteorológico, dado que es en los inviernos cuando más temporales se producen. Se ha considerado como invierno el período comprendido desde el **1 de septiembre** del año inicial hasta el **31 de mayo** de siguiente año. Los datos obtenidos siguiendo la misma metodología expuesta anteriormente se muestran en la siguiente tabla y en la siguiente figura:

Año	Módulo (N/s)	Dirección náutica(°)	Año	Módulo (N/s)	Dirección náutica(°)
1993/94	1259.10	114.52	2003/04	2087.30	96.6
1994/95	2487.20	83.38	2004/05	2263.00	72.44
1995/96	1998.70	191.48	2005/06	1069.8	77.52
1996/97	1702.90	126.12	2006/07	708.30	61.37
1997/98	998.95	148.32	2007/08	1765.70	72.89
1998/99	1133.90	105.18	2008/09	441.87	227.66
1999/00	1126.00	113.29	2009/10	1483.50	213.5
2000/01	1748.40	210.95	2010/11	1005.40	130.32
2001/02	6418.50	70.91	2011/12	1083.90	226.59
2002/03	2070.80	91.47	2012/13	5324.90	230.08

Cuadro 4.21: Módulo y dirección de la RMI

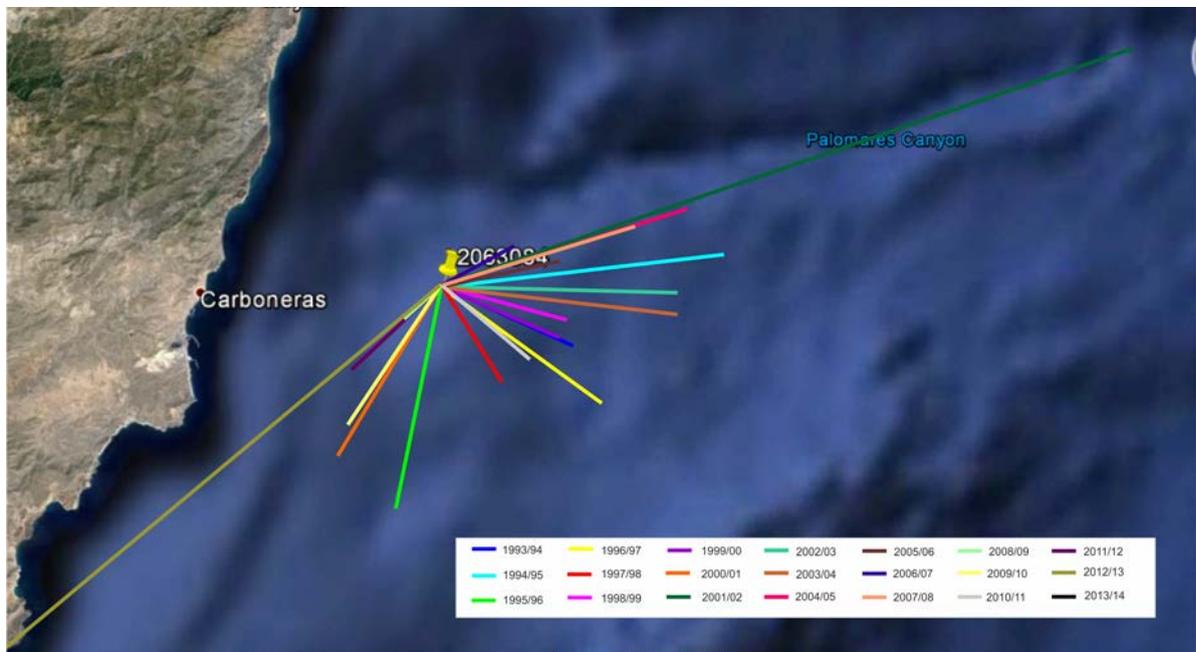


Figura 4.45: Resultantes medias invernales en los años analizados

Como se observa, el espectro de datos que arrojan estas resultantes invernales es muy parecido al anterior, predominando la dirección 'E' sobre la dirección SW con respecto al número de años. Destacan sobre los demás los módulos de las resultantes de los inviernos que transcurren entre 2000/01 y entre 2012/13, siendo la dirección de la resultante media invernal de estos 'NE' y 'SW' respectivamente.

A continuación se va a mostrar una relación de estas resultantes medias invernales con otros parámetros de interés como lo son el número de temporales en cada invierno o la fecha de realización de los dragados hasta el momento.

#### 1.4.5. Relación entre la RMI y el número de temporales

Es lógico que, al ser los temporales los agentes que aportan más energía, cuando mayor sea el número de temporales en la zona supuestamente mayor será la RMI. Se muestra a continuación un gráfico que relaciona estas dos variables.

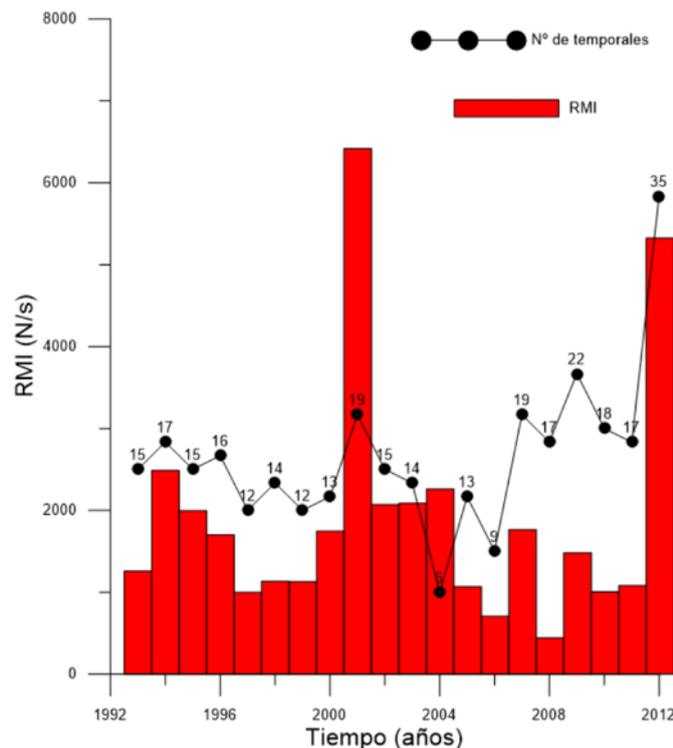


Figura 4.46: Relación RMI-Nº temporales

Se ve que hay cierta convergencia entre ambas variables pero también se aprecian algunas disparidades entre ambas. Y es también totalmente razonable, puesto que no se está teniendo en cuenta la magnitud de cada tormenta. Puede haber mayor número de temporales en un invierno pero pueden ser de menor duración, o que se alcancen menores periodos o alturas de ola, parámetros que si se tienen en cuenta en el cálculo de la RMI.

#### 1.4.6. Relación entre la RMI y los dragados realizados

Se muestra ahora un gráfico en el que se aprecia la relación entre el número de temporales que se han dado cada invierno y los años en que se han efectuado los dragados hasta el momento para conocer cómo de significantes han sido estos temporales.

Primeramente se exponen las fechas aproximadas del inicio de las obras en cada una de las 3 actuaciones, así como el motivo de las mismas:

Actuación	Fecha	Motivo
1	Nov/1996	Tramitación urgente
2	Dic/1999	Conservación
3	Abril/2013	Mantenimiento

Cuadro 4.22: Fecha y motivo de las actuaciones de dragado hasta el momento

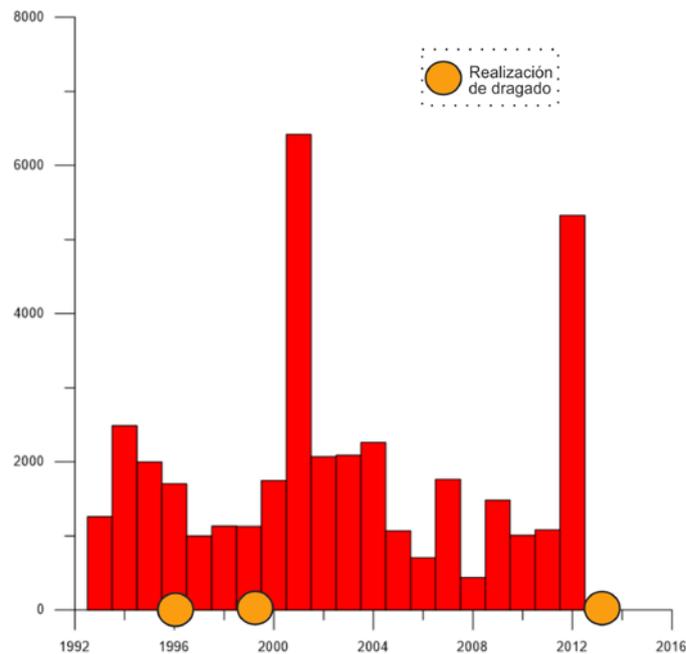


Figura 4.47: Relación RMI-Dragados realizados

Se observa que los dragados realizados en 1996 y 2013 sí fueron realizados tras campañas altamente energéticas. La actuación que resta, la de 1999, no cumple tan claramente esta condición.

Hasta el momento sólo se ha tenido en cuenta el módulo de esta RMI y no la dirección, por lo que también es necesario meterla en juego. Es lógico que para que entre material por la bocana del puerto la energía tiene que venir de una dirección concreta. En el caso de nuestro puerto y debido a su emplazamiento resulta razonable pensar que para que se arrastre material hacia su interior esta energía debe proceder de unas direcciones situadas en los cuadrantes que corresponden al sur. Así de esta manera, sin un detallado análisis, se podría decir que, en cuanto a la entrada de sedimento en el puerto, van a ser más perjudiciales aquellos oleajes procedentes de latitudes más bajas.

Así si analizamos las direcciones de estas RMI a lo largo de los años, se observa que los dragados realizados se han efectuado después de campañas en las que ha predominado esta dirección de procedencia. Esto podría explicar que no se realizara ningún dragado tras el fuerte invierno energético del año 2001, ya que la dirección de esta RMI era aproximadamente del NE. Del mismo modo este razonamiento podría dar respuesta al amplio periodo en el que no se ejecutó ningún dragado, puesto que en esos años la mayoría de las direcciones de las resultantes medias se situaban en el primer cuadrante, es decir, eran menores de 90°.

No obstante, este fenómeno se analizará con profundidad con la propagación de temporales en capítulos posteriores.

# Capítulo 5

## Campaña de campo

Para la calibración del modelo numérico es necesario disponer de datos de altura de ola, periodo y dirección medidos en determinados puntos de la zona para poder comparar con los resultados de las simulaciones realizadas. Se fondearon en puntos específicos de la costa, cerca del puerto, una serie de instrumentos que midieron el tiempo que duró la campaña de campo.

### 5.1. Diseño de la campaña de campo

#### 5.1.1. Fechas y duración de la campaña

La campaña tuvo una duración de 19 días. El fondeo de los instrumentos se realizó el **17 de abril de 2015**, se comenzó sobre las 10:30 y se finalizó a las 13:00 horas. El desfondeo de los mismos se ejecutó el **5 de mayo de 2015** en el mismo horario que el el fondeo.

#### 5.1.2. Instrumentación

Se colocaron un total de 2 trípodes sobre los que se apoyaban los siguientes instrumentos:

- **Perfilador de corriente (ADCP):** instrumento que mide las tres componentes de la velocidad del flujo en toda la columna de agua empleando para ello celdas de medida. Además, el instrumento incorpora sensores puntuales de presión y temperatura.
- **Perfilador de corriente con módulo de oleaje (AWAC):** instrumento que mide las tres componentes de la velocidad del flujo en toda la columna de agua empleando para ello celdas de medida. Incluye el módulo AST (Acoustic Surface Tracking) para el seguimiento de la superficie libre. Además, el instrumento incorpora sensores puntuales de presión y temperatura.
- **CT:** Grabador de presión y temperatura.



Figura 5.1: Tripodes con la instrumentación a colocar

### 5.1.3. Sistema de instalación y/o fondeo

Para la colocación de los instrumentos se contó con la asistencia de una empresa especializada con los recursos y equipos necesarios. Por ser una empresa que ha realizado trabajos previos con el Grupo se contacta con ALQUA-SUB S.L. que dio el soporte necesario para la realización de las maniobras de fondeo en los dos emplazamientos seleccionados. Como ya se ha comentado para la instalación de los instrumentos se plantea el fondeo mediante trípodes.

La empresa utilizó una pequeña embarcación de 5ª lista, como obliga la normativa, y los trípodes se transportaron flotando con ayuda de dos boyas desde el muelle del puerto hasta el punto de fondeo.



Figura 5.2: Desplazamiento de los trípodes



Figura 5.3: Trípode flotando

A bordo de la embarcación iban el patrón, 2 buzos y un acompañante. Los trípodes se desplazaban hasta los puntos fijados. Así con la ayuda de un GPS cada trípode se desplazaba flotando hasta las coordenadas exactas previamente fijadas. Una vez en este punto, se quitaban las boyas que permitían la flotación del trípode y se procedía al fondeo del mismo. Uno de los buzos acompañaba a los aparatos hasta el fondo y los colocaba minuciosamente lo más horizontalmente posible. También cuando estaba en el fondo, el buzo medía la profundidad exacta a la que se fondeaba el trípode.



Figura 5.4: Fotografía de un buzo colocando el trípode

#### 5.1.4. Ubicación

Teniendo en cuenta los objetivos que se persiguen en el proyecto, así como la instrumentación disponible, se propone la siguiente ubicación:

Uno de los trípodes es colocado cerca de la bocana y otro se coloca a mayor profundidad, a unos 200 metros de la alineación principal del puerto mar adentro. Las coordenadas exactas, así como la profundidad y un mapa de localización se muestran a continuación:

Punto	Nombre del equipo	Coordenadas (WGS84)	Profundidad(m)
A	ADCP-Aquapro 1MHz (AQP-0738) + SBE-SMP(9310)	N 36° 59' 11,2" W 1° 53' 55,5"	5.4
B	AWAC 1MHz (WAV-5313) + SBE37-SM (3930E11-1-10590)	N 36° 59' 14,7" W 1° 53' 37,6"	9.1

Cuadro 5.1: Ubicación de la instrumentación

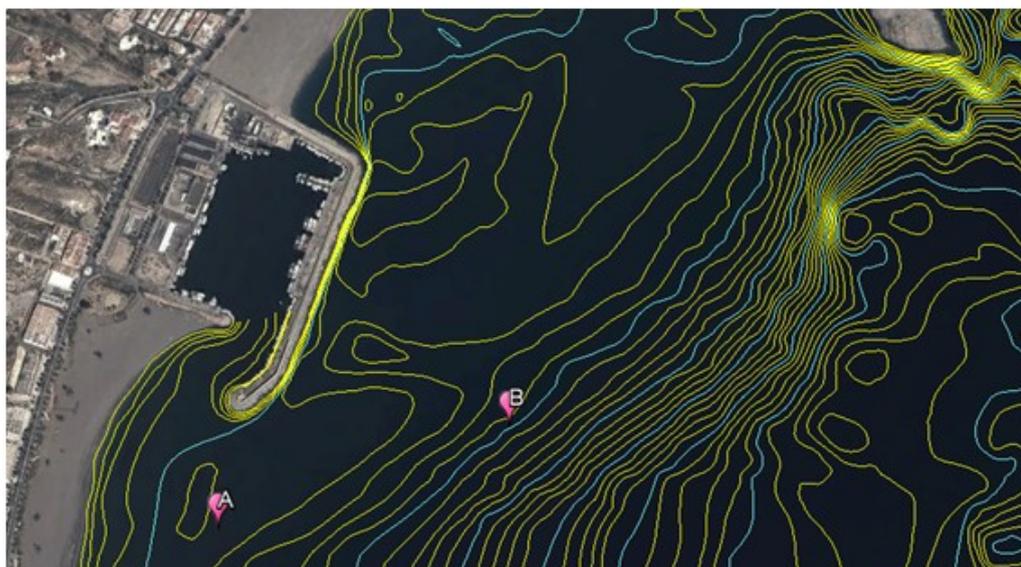


Figura 5.5: Ubicación de los instrumentos en las inmediaciones del Puerto del Carboneras

### 5.1.5. Descripción de los equipos

- **ADCP AquaPro 1MHz(AQP-0738):** Correntímetro Perfilador Nortek modelo Aquadopp Profiler (1MHz) apto para una profundidad total de 25m para medir columnas de agua de entre 4 y 20 m. Incluye 80MB de memoria y baterías de Litio, sensor de litio, sensor de temperatura, brújula y sensor de actitud de dos ejes, sensor de presión (0-200m), sensor de turbidez OBS, salida RS232 y sensor de mareas Valeport Midas Mod 740; y cable en Y para interconectar dos sensores con el instrumento Nortek. Software de configuración, control y postproceso Windows. Incluye juego de herramientas y repuesto básico y caja de transporte profesional.
- **SBE-SMP(3930E11-9310):** Grabador de conductividad y temperatura con interfase serie, memoria y bomba interna. Incluye: caja estanca de titanio con capacidad hasta 7000 metros de profundidad, soporte de montaje, memoria Flash de 8MB, software SEASOFT, interfase serie RD-232, baterías de litio (no peligrosas), cilindros antifouling, cable de datos/alimentación y documentación completa.
- **SBE37-SM(3930E11-1-10590):** Grabador de Conductividad, Presión y Temperatura. Incluye: caja estanca de Titanio con capacidad hasta 7000 m de profundidad, soporte de montaje, memoria Flash de 8MB software SEASOFT, interfase serie RS 232, 12 pilas AA de Litio (no peligrosas), cilindros anti-fouling, cable de datos I/O y documentación completa.
- **AWAC 1MHz(WAV-5313):** Correntímetro Perfilador Nortek modelo AWAC (1MHz) apto para perfilar un mínimo de 30m. Incluye 150MB de memoria, sensor de temperatura, brújula y sensor de actitud de dos ejes, sensor de presión (0-50m), sensor de turbidez OBS, cilindro portabaterías sencillo con baterías de litio, salida RS232 y Software de configuración y control bajo Windows AST capaz de medir oleaje a una profundidad de 40m. Incluye cardan, juego de herramientas y repuesto básico y caja de transporte profesional.

## 5.2. Resultados de la campaña de campo

En el análisis de los datos extraídos de la campaña, se pueden diferenciar:

- Análisis de datos de oleaje
- Análisis de datos de corrientes

### 5.2.1. Análisis de datos de oleaje

En lo referente al análisis de datos de oleaje se obtienen las siguientes gráficas:

- Series temporales de las principales variables de oleaje
- Histogramas de frecuencia de cada una de estas variables

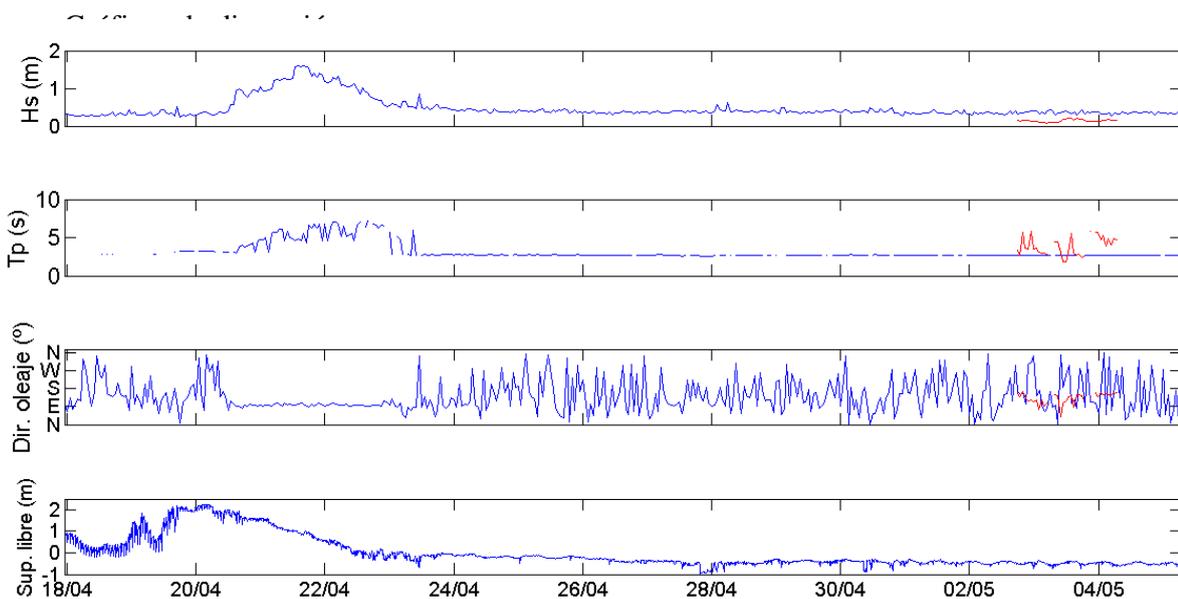


Figura 5.6: Panel 1

En color azul se muestran los datos que tomó el instrumento ADCP colocado en el punto A, mientras que en rojo se muestran aquellos que tomó el instrumento AWAC situado en el punto B. Con respecto a esto, hay que decir que ocurrió una incidencia en la medición de este aparato colocado en el punto B, puesto que como se aprecia en los gráficos sólo se tienen 2 días de registro de datos de este instrumento. Además estos datos no son coherentes, por tanto, se ha optado por no tenerlos en cuenta.

Así pues, todos los resultados que se muestren a continuación serán del instrumento colocado en el punto A.

Primeramente, si nos fijamos en la serie temporal de altura de ola, se aprecia un temporal que comienza el 20 de mayo sobre las 11:00 y termina alrededor del 22 a las 23:00 horas. Justo en el mismo periodo de tiempo se aprecia una subida en los valores de los periodos pico del oleaje.

Con respecto a la dirección media de procedencia del oleaje, esta abarca todo el rango 0-360° en condiciones normales, sin embargo, en el caso del temporal la dirección media de procedencia del oleaje se corresponde claramente con el Este.

Si nos fijamos en el último panel, en el que se representa la superficie libre, se observa que hay un claro aumento en el nivel del agua en el periodo del temporal, pero el resto del tiempo, es muy pequeña la variación de esta. Este hecho demuestra la poca importancia de las mareas en la zona de Carboneras, donde la carrera de marea es muy pequeña.

#### 1.4.8. Histogramas de frecuencia de ocurrencia

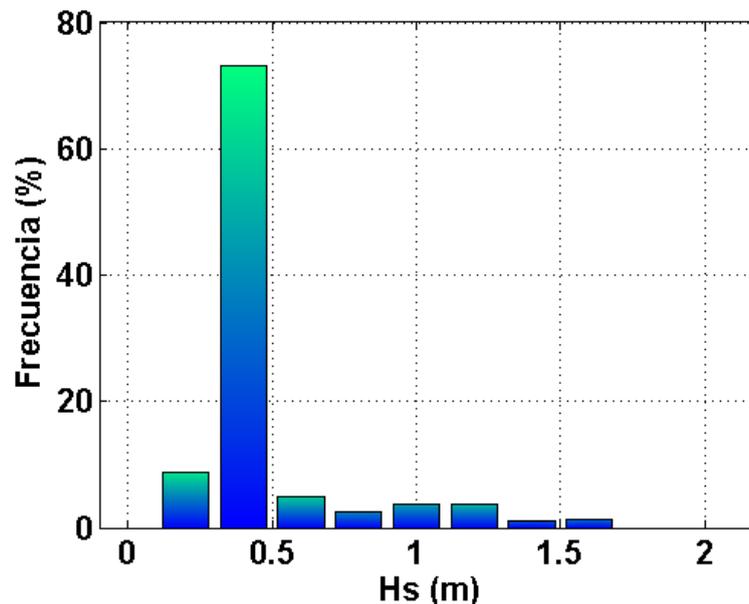


Figura 5.7: Histograma de frecuencia de altura de ola

Este histograma muestra claramente que la mayoría de las alturas de ola registradas se encuentran por debajo de 0,5 metros, siendo el resto poco significativo porcentualmente. El mayor valor registrado ha sido de **1,59 metros**.

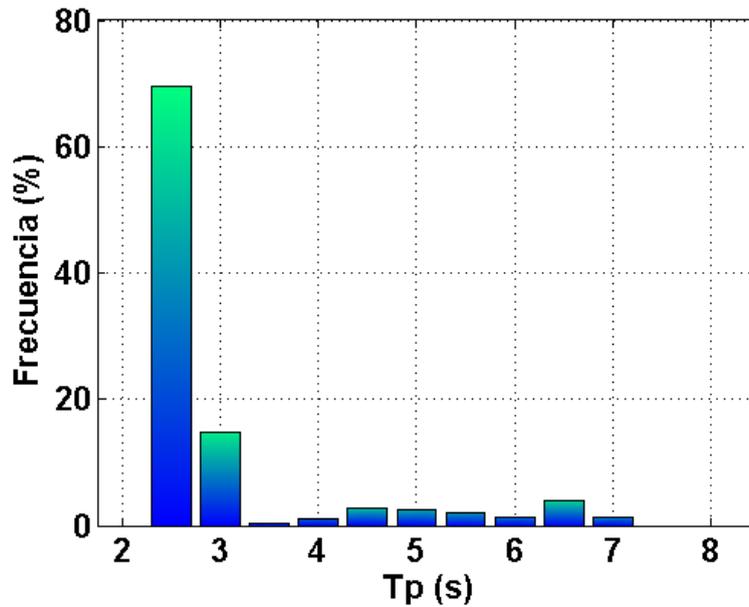
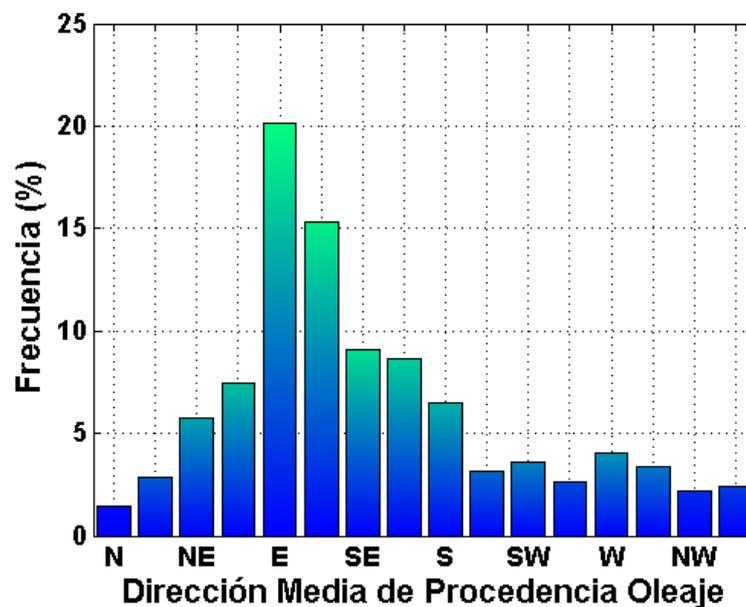


Figura 5.8: Histograma de frecuencia de periodo pico

Al igual que en el caso anterior, la gran mayoría de los datos se centra en un rango muy concreto, entre 2,5-3 segundos. Este dato se aprecia en el panel 2 de la Figura 5.6 de manera muy clara. Exceptuando el temporal, los valores de  $T_p$  son muy homogéneos.

Figura 5.9: Histograma de frecuencia de la dirección media de procedencia de oleaje



En condiciones normales se observa en la Figura 5.6 (panel 3) que la dirección de procedencia de oleaje es cambiante recorriendo todo el rango de valores. Tan sólo se ve una clara dirección en el momento del temporal que la dirección de procedencia es claramente del Este.

### 1.4.9. Gráficos de dispersión

Los siguientes gráficos muestran la simultaneidad de los datos por pares, representa la ocurrencia conjunta de los dos valores representados.

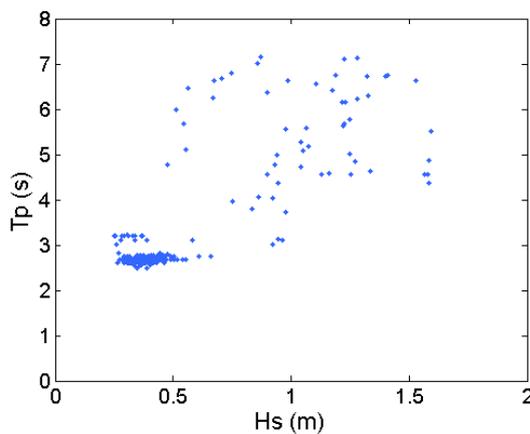


Figura 5.10: Gráfico de dispersión H (s) - Tp (s)

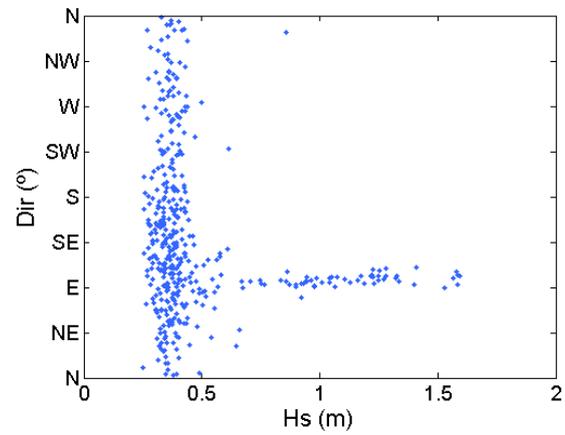


Figura 5.11: Gráfico de dispersión Hs (m) - Dirección media de procedencia del oleaje

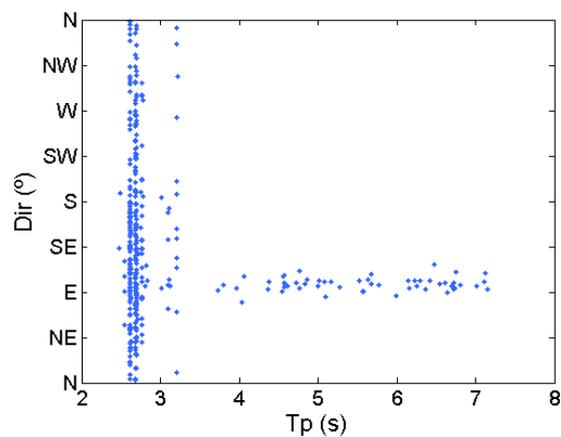


Figura 5.12: Gráfico de dispersión Tp (s) - Dirección media de procedencia del oleaje

### 1.4.10. Rosa de oleaje

Como resumen se presenta la rosa de oleaje.

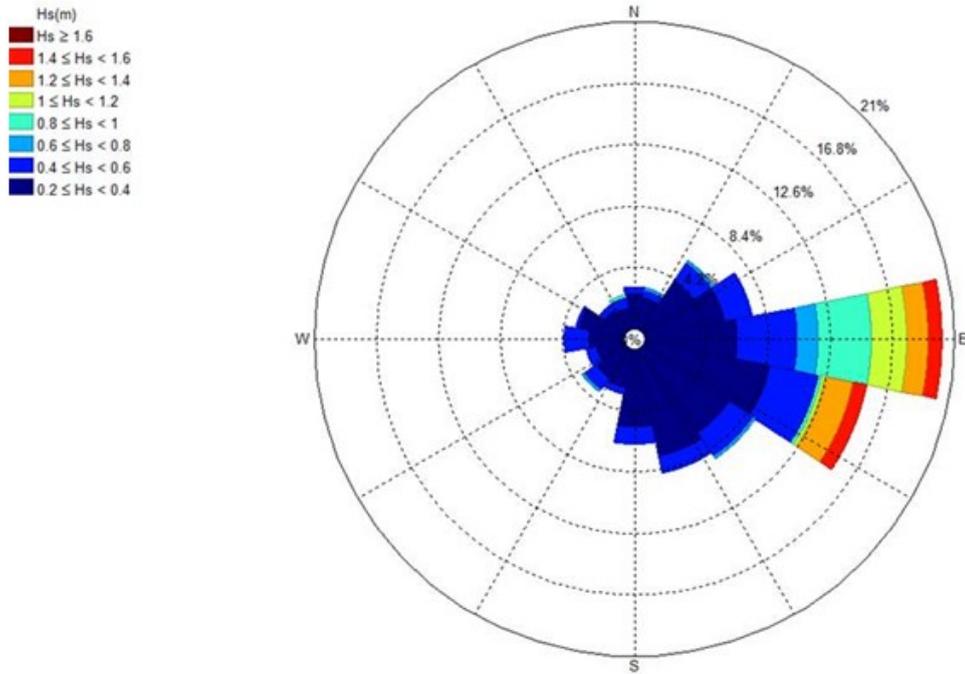


Figura 5.13: Rosa de oleaje

### 5.2.1.1. Resultados del análisis de datos de oleaje

Si a continuación representamos conjuntamente los datos de oleaje obtenidos en el punto SIMAR junto con los datos que se han medido gracias al instrumento ADCP AquaPro, se puede conseguir una idea de cómo ha sido la propagación del oleaje durante los días de la campaña.

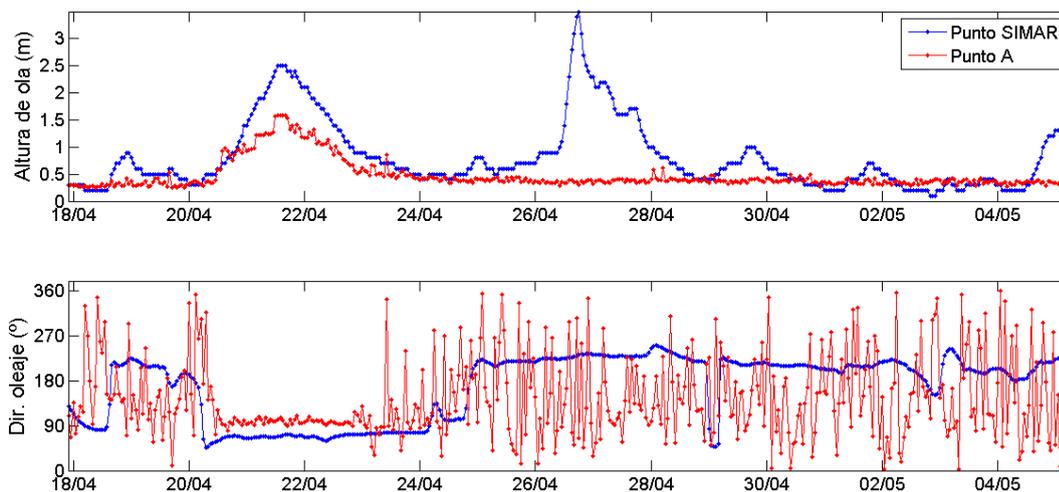


Figura 5.14: Panel 1

Observando y analizando estas gráficas se puede obtener:

1. Primeramente se aprecia que en el punto SIMAR se registraron 2 temporales, uno en dirección E y el otro en la dirección S-SW, sin embargo el instrumento sólo registró el temporal proveniente del E, comportándose indiferente ante el otro. Esto significa que gracias al emplazamiento del puerto no va a llegar al temporal a esta zona si este procede de poniente. El gran saliente que existe en la costa al sur del puerto hace que corte el fuerte oleaje de poniente evitando que este llegue a aquellas zonas que quedan a sombra de este accidente geográfico.
2. El oleaje sólo mantiene su dirección durante el temporal del E, el resto del tiempo en el que llega mucha menos energía a la costa, el instrumento registra un oleaje muy cambiante en dirección. Con respecto a esta variable, hay que decir que el instrumento mostró que la calidad de la señal de esta variable era mala, por esta razón no se va a tener muy en cuenta esta información. No obstante, la señal de altura de ola si de buena calidad, siendo esta la que vamos a utilizar para la calibración del modelo.

### 5.2.2. Análisis de datos de corrientes

Antes de comenzar con el análisis de las corrientes en el punto A, hay que mencionar algunos aspectos sobre la configuración del instrumento AQDP, que fue el colocado en este punto.

El instrumento se configuró con celdas de un metro, esto significa que se preparó para que midiera la velocidad de la corriente en las 3 direcciones del espacio cada metro de agua por encima de este. De este modo, cada instante de medida y por cada metro de profundidad de agua nos dará 3 datos correspondientes a cada dirección del espacio.

Así, se van a analizar las corrientes en el primer metro, es decir en el fondo, y en la celda más próxima a la superficie.

A continuación se muestran las rosas de corrientes en las dos profundidades comentadas.

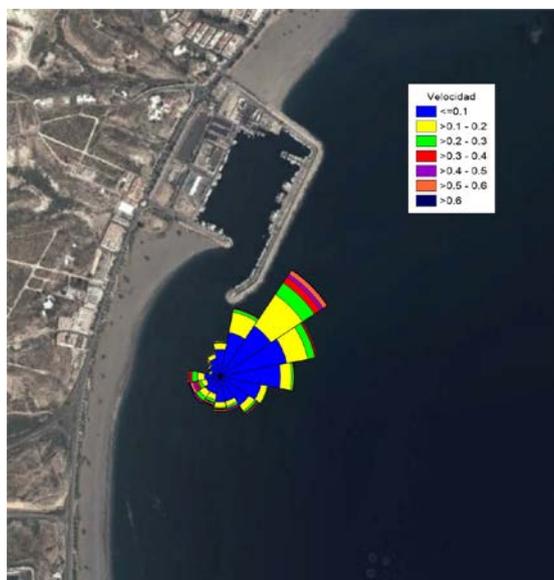


Figura 5.15: Rosa de corrientes en el fondo del punto A

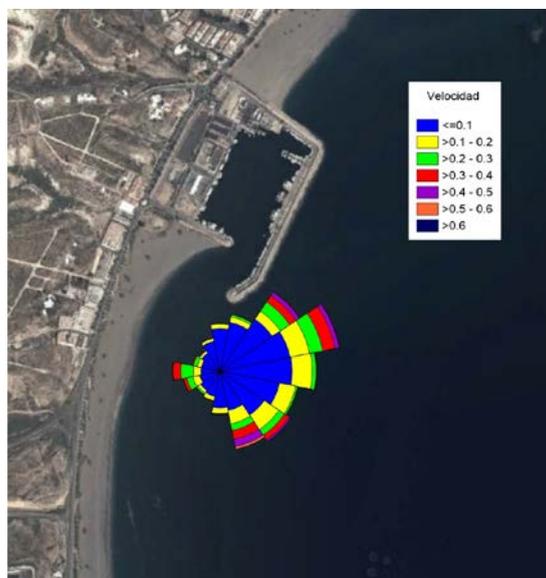


Figura 5.16: Rosa de corrientes en la celda más próxima a la superficie en el punto A

Se ve el claro predominio de la dirección este, coincidiendo con la dirección más predominante también en la rosa de oleaje. No obstante, como también ocurre en la rosa de oleaje se observan corrientes en todas las direcciones. Las corrientes que provienen desde la costa se deben a la reflexión del oleaje en esta. También puede tener cierta influencia las corrientes generadas por las mareas en la pleamar y en la bajamar.

En la siguiente figura se muestran las series temporales en dirección y en velocidad del espectro de datos recogidos. Se muestran junto a datos de oleaje para ver la relación entre ellos.

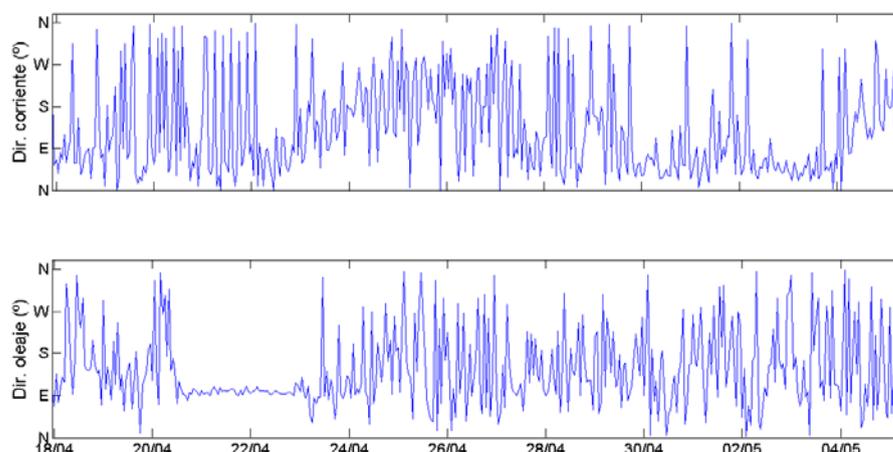


Figura 5.17: Series temporales de la dirección de las corrientes en el fondo del punto A junto con las direcciones del oleaje

### 5.2.3. Resultados del análisis de corrientes. Transporte de sedimentos

A través de los módulos de las velocidades de las corrientes en el plano xy se puede obtener fácilmente la tensión tangencial al fondo que estas producen. Si comparamos estas tensiones tangenciales con la tensión tangencial crítica a partir de la cual se empieza a producir arrastre, se puede obtener cuando se produce movilización de sedimento.

Primeramente vamos a calcular  $\tau_{cr}$ , para después comparar cada tensión que se produce con esta. Para ello nos ayudamos de la siguiente gráfica. Esta gráfica relaciona el diámetro medio de la partícula a movilizar con  $\tau_{cr}$ .

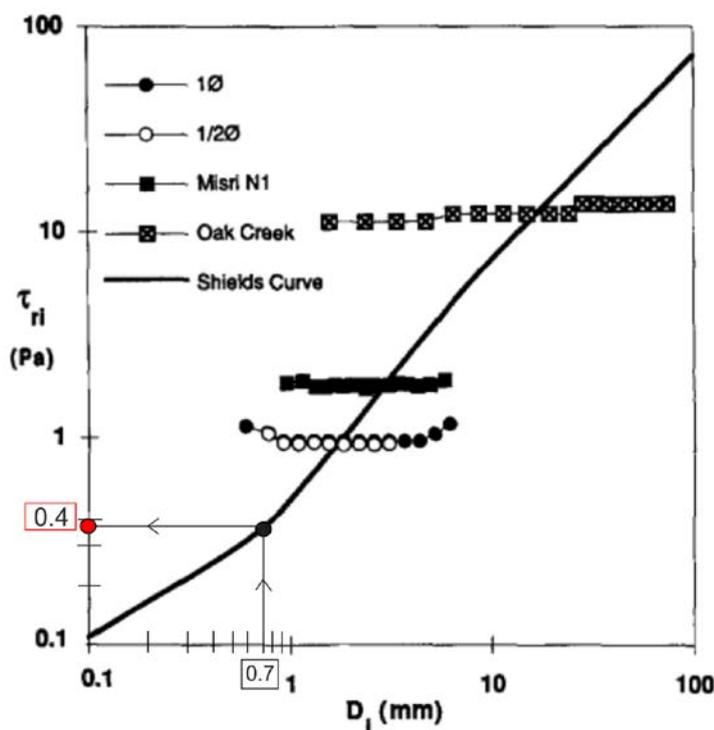


Figura 5.18: Gráfico Diámetro de las partículas -  $\tau_{cr}$

Se procede de la siguiente manera. Como se aprecia se entra con el diámetro medio de las partículas en el eje de abscisas. De los datos que se tienen de sedimentos se escoge un valor medio de 0.7mm de diámetro. Se traza la vertical desde esta abscisa hasta que esta corte a la curva y desde el punto obtenido, se traza la perpendicular hasta el eje de ordenadas. Este proceso genera un valor aproximado de 0.4 Pa, o lo que es lo mismo  $0,4N/mm^2$ .

Este valor se trata pues de la tensión tangencial crítica. Todas las tensiones generadas que superen dicho valor producirán movilización de material.

El siguiente paso se trata de calcular las tensiones que generan las corrientes observadas durante la campaña. Se elige la celda más profunda, puesto que es la más cercana al fondo. La fórmula utilizada para obtener dichas tensiones es:

$$\tau = \frac{1}{2} * \rho * f_b * v^2 \quad (5.1)$$

Se pueden obtener todas y cada una de las tensiones que generan cada dato de corriente, o haciendo uso de la misma fórmula se puede calcular directamente la velocidad crítica, y toda velocidad que supere este umbral provocará un transporte de sedimento.

Así:

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{\tau_{cr} * 2}{\rho * f_b}} = 0,23m/s \quad (5.2)$$

Para visualizar cuantas veces se supera este valor, se presenta una serie temporal de las velocidades observadas.

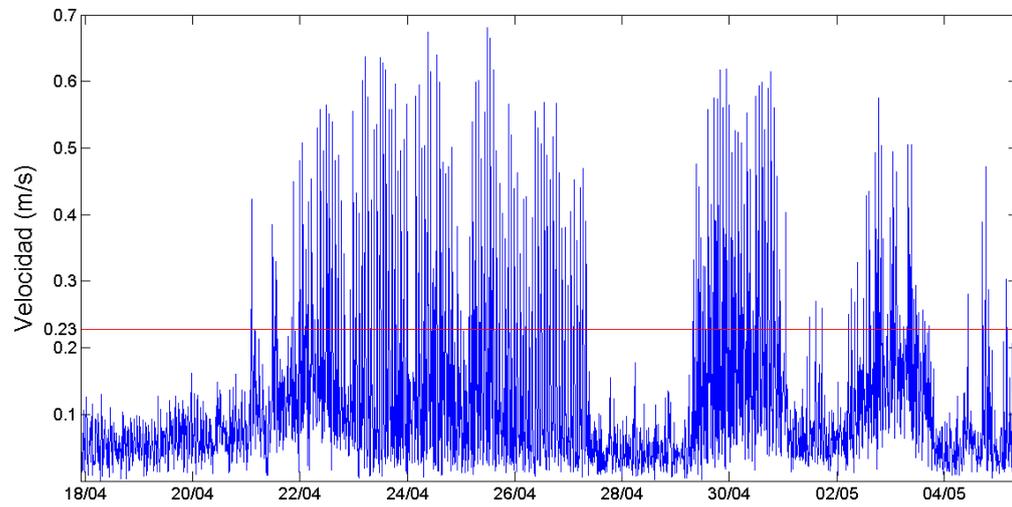


Figura 5.19: Serie temporal de velocidades de corrientes junto a umbral de velocidad crítica

# Capítulo 6

## Modelo numérico I: Aplicación, Calibración, Validación

### 6.1. Características del modelo

El modelo numérico que se utilizó para el análisis y estudio de la zona ha sido el Delft3D.

De todos los programas comerciales disponibles para las simulaciones de oleaje se ha utilizado el modelo Delft3D ya que es el que mejor se adapta a las necesidades exigidas, entre ellas: la necesidad de un código que trabaje tanto en agua profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa; que tenga en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y el hecho de que sea un software libre con multitud de manuales y guías disponibles hacen de este modelo el más idóneo.

El modelo Delft3D fue desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (Países Bajos) para estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, etc. generados por vientos locales y corrientes ambientales. Es una extensión de los modelos de tercera generación de aguas profundas para aguas someras.

Dicho programa engloba varios módulos, en este proyecto se utilizan de manera conjunta y sincronizada el módulo **WAVE** y **FLOW** lo que dota a las simulaciones de una mayor precisión al estar considerando parámetros tanto del oleaje como hidrodinámicos.

#### 6.1.1. Módulo WAVE

El módulo WAVE del Delft3D se basa en el modelo numérico SWAN (Simulation Waves Nearshore). En SWAN el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$ . Por tanto la evolución de la energía del oleaje es descrita por la ecuación espectral de balance de la acción,  $N(\sigma, \theta)$  a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría, siendo  $\theta$  la frecuencia y  $\sigma$  la dirección de propagación. Esto es debido a que en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no (Whitham, 1974).

La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa  $N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ .

En su forma general, esta ecuación de conservación de la acción se presenta:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (6.1)$$

(Hasselmann and T.P. Barnett, 1973)

El primer término de la parte izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de acción, el segundo y el tercer término representan la propagación de  $N(\sigma, \theta)$  en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $c_x$  y  $c_y$ ), el cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo  $c_\sigma$  la velocidad de propagación en el espacio  $\sigma$ ). El quinto término representa la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación  $c_\theta$  en el espacio  $\theta$ ).

El término de la derecha ( $S = S(\sigma, \theta)$ ) es el término fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (6.2)$$

- $S_{in}$ : Transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- $S_{nl}$ : Interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$ : Disipación de energía en aguas profundas debidas al White-capping.
- $S_{ds,br}$ : Término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$ : Disipación de energía por fricción con el fondo.

### 6.1.2. Módulo FLOW

El módulo Delft3D-FLOW proporciona la base hidrodinámica al resto de módulos del programa, en concreto al WAVE. Permite simular el flujo y el transporte en aguas someras resultado de las mareas y/o forzamiento meteorológico teniendo en cuenta los siguientes procesos físicos:

- Gradientes en la superficie libre debido a los efectos barotrópicos.
- Efecto coriolis por la rotación de la tierra.
- Agua con densidad variable.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable en el espacio y el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

El Delft3D-FLOW resuelve el sistema de ecuaciones formado por: La ecuación de la continuidad (conservación de masa), las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación del transporte y el problema de cierre turbulento.

## 6.2. Datos de entrada

### 6.2.1. Línea de costa

La línea de costa se crea mediante Autocad usando la herramienta polilínea y se exportan las coordenadas xyz de cada punto para importarlas en el Delf3D. El resultado se ve en la figura 6.1.

### 6.2.2. Malla

La malla es la discretización del dominio físico para la propagación del oleaje y modelado hidrodinámico. El diseño de la malla es un proceso que debe basarse en la experiencia y en el ensayo-error.

Los criterios que se han tenido en cuenta para la definición de estas han sido:

- Asegurar un buen anidamiento de las mallas, evitando que se inunden zonas de tierra seca.
- Evitar vértices que concentren mucha energía y que puedan impedir una buena propagación del oleaje.
- Orientar la malla correctamente para que abarque el oleaje predominante.

Finalmente se ha optado por definir 3 mallas, de tamaño mayor a menor. Las más pequeñas se han anidado en las más grandes, con esto se ha conseguido una mayor precisión en la zona más próxima al puerto.

En la figura 6.1 se observan las tres mallas anidadas junto con la línea de costa.

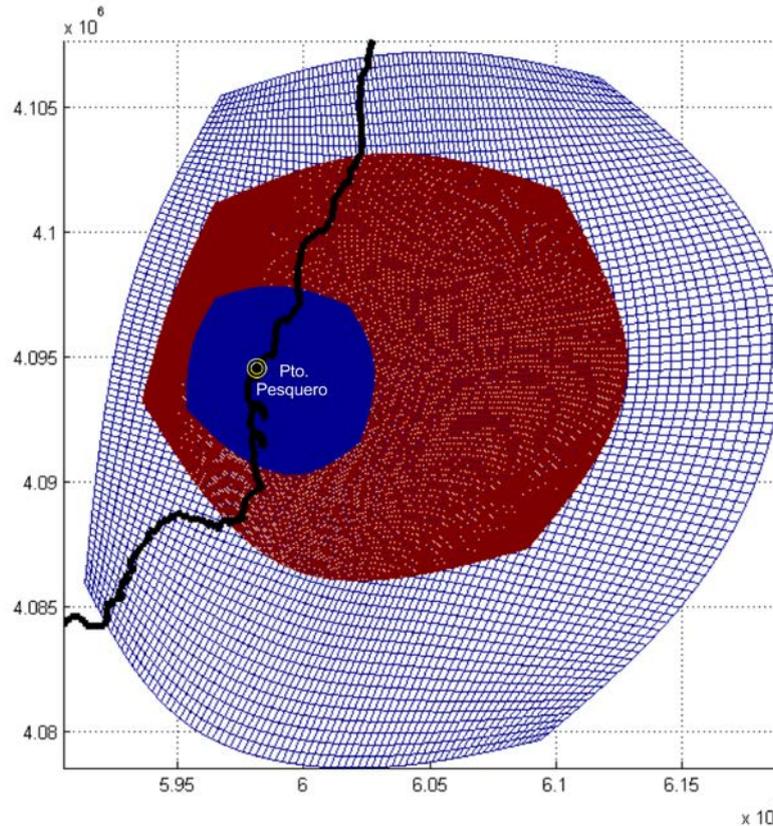


Figura 6.1: Definición de la línea de costa junto con las tres mallas anidadas

### 6.2.2.1. Malla exterior

Esta malla cubre la zona de profundidades reducidas como las zonas más profundas. Se compone de cuatro contornos, una de ellas se encuentra en la zona de tierra y las tres restantes abarcan todo el oleaje procedente de las direcciones de procedencia predominantes. El contorno inferior va a recoger todo el oleaje de la dirección S y SW, mientras que los otros dos van a recoger todo el oleaje procedente del NE y E.

La resolución de esta malla es muy pequeña, cada celda tiene unas dimensiones aproximadas de 200x200 metros.

### 6.2.2.2. Malla intermedia

En estas mallas interiores ya es menos importante la orientación de los contornos, aún así se han intentado hacerlos los más paralelos posibles a los de la malla más grande.

La resolución de esta malla intermedia es obviamente menor que la de su predecesora y sus celdas se encuentran en torno a 50x50 metros.

### 6.2.2.3. Malla más interior

Con esta malla ya se alcanza la resolución necesaria en la zona próxima al puerto, modelando la zona costera más próxima a este de forma bastante precisa y recogiendo gran cantidad de detalles.

Esta malla tiene un tamaño de celda aproximado de 15x15 metros.

### 6.2.3. Batimetría

Para asignarle a cada punto de la malla un valor de profundidad se ha usado la batimetría que se expuso en el apartado correspondiente en el Capítulo 2.

La batimetría se ha exportado de Autocad a un archivo de texto con las coordenadas X,Y y Z de cada punto para importarlo en el Delft3D y asignar a cada celda de la malla una profundidad.

En las siguientes figuras se muestra esta batimetría sobre la malla más pequeña y precisa así como algunos detalles de la zona del puerto y de la isla de San Andrés.

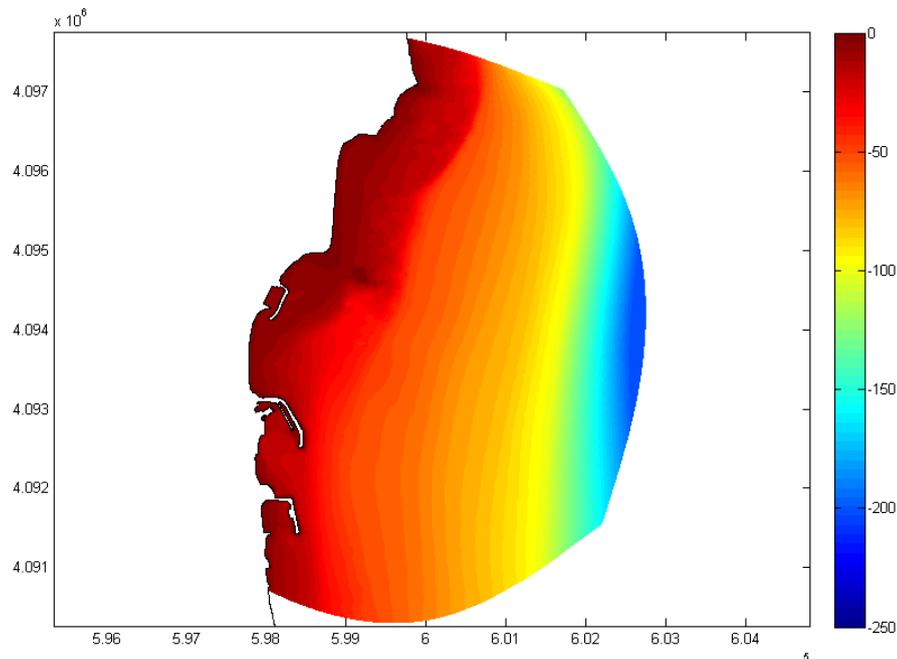


Figura 6.2: Implementación en Delft3D de la zona de estudio de Carboneras

#### 6.2.4. Archivo WAVECON

Este archivo contiene los datos a propagar. Consiste en un archivo de texto formado por ocho columnas: Tiempo, altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ), dirección de procedencia del oleaje ( $\theta$ ), dispersión ( $ms$ ), nivel de la superficie libre ( $wl$ ), velocidad del viento ( $V_v$ ), dirección de procedencia del viento ( $\theta_v$ ).

#### 6.2.5. Parámetros del modelo

El programa necesita un valor para cada uno de sus parámetros internos de los módulos WAVE y FLOW. La correcta definición de estos valores para la nuestra zona de estudio constituye el proceso de calibración del modelo numérico.

Para una descripción detallada de cada uno de los parámetros del modelo véase, Apéndice A: Parámetros del modelo numérico.

### 6.3. Calibración del modelo

Para la calibración del modelo numérico se eligen previamente unos periodos de tiempo de entre 48 y 96 h de duración en los que se realizan las simulaciones tratando de ajustar la altura de ola simulada con la medida por el instrumento en la posición A. (Véase Capítulo 5: Campaña de campo de larga duración.)

Debido a la corta duración de la campaña sólo se han escogido 3 periodos de tiempo de 72 horas cada uno. Estos son los siguientes:

- **Primer periodo:** 20/04/2015 a las 13h - 23/04/2015 a las 12h
- **Segundo periodo:** 25/04/2015 a las 13h - 28/04/2015 a las 12h
- **Tercer periodo:** 01/05/2015 a las 00h - 03/05/2015 a las 23h

Se han tomado periodos de tiempo coincidentes con picos de altura de ola altos, direcciones de procedencia del oleaje de componente NE y SW principalmente y ciclos de mareas vivas y mareas muertas tratando de que los valores calibrados para cada parámetro sean válidos para cualquier condición de forzamiento.

De los 3 periodos expuestos el tercero se ha empleado para validar el modelo una vez este haya sido calibrado.

Definidos los periodos de tiempo, se sigue de forma iterativa el proceso descrito en el Capítulo 3: Metodología para obtener cada uno de los parámetros del modelo hasta conseguir la calibración.

### 6.3.1. Resultados de la Calibración del modelo

Se recogen los resultados de las simulaciones que reducen al máximo el error para los tres periodos de tiempo elegidos. Estos resultados dan los parámetros de calibración del modelo que posteriormente se utilizan para simular las condiciones de forzamiento sobre los escenarios.

#### 6.3.1.1. Periodo 1

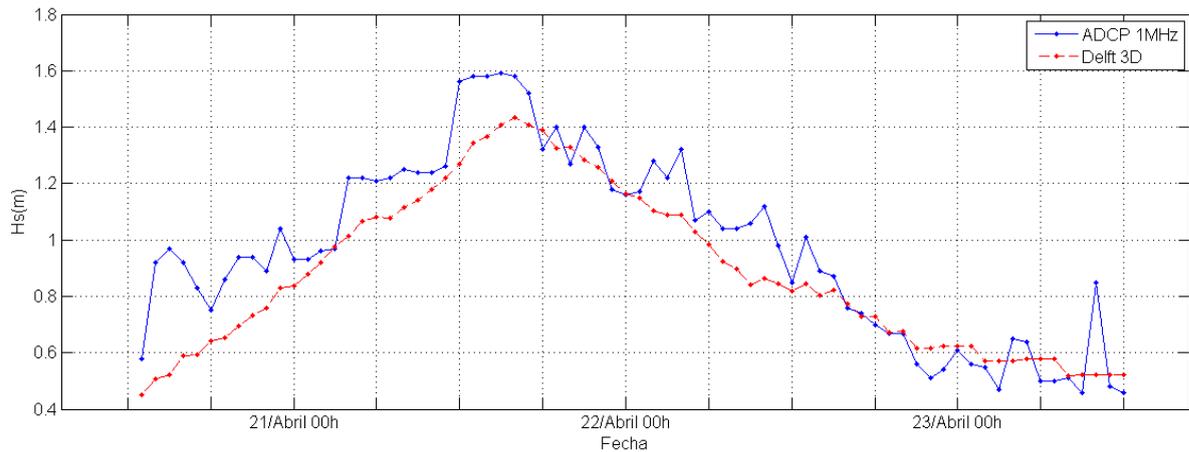


Figura 6.3: En azul, altura de ola medida por el ADCP fondeado en A. En rojo, la altura de ola obtenida con Delft 3D.

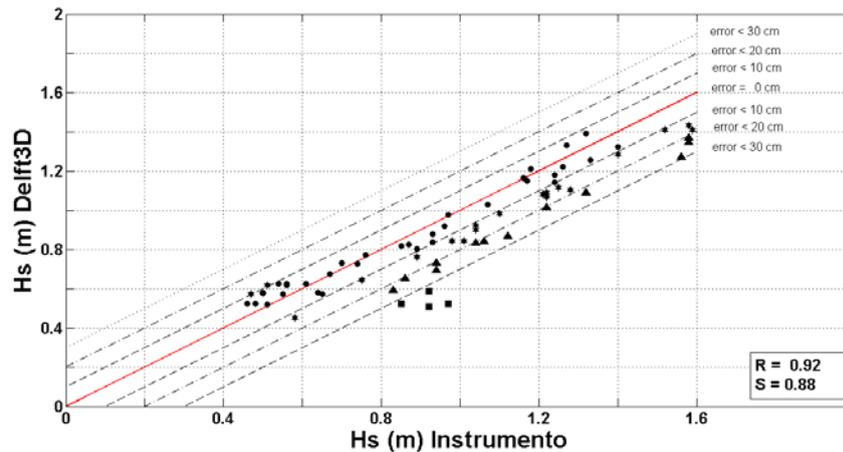


Figura 6.4: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{ADCP}$

$ Dif.deH $	%
< 10cm	50
< 20cm	78
< 30cm	95
> 30cm	5

Cuadro 6.1: Porcentaje

Este periodo corresponde con el temporal procedente del E, siendo este periodo el único de la totalidad de la campaña donde se recibió oleaje predominante de esta dirección. El resto de días predominó el oleaje de poniente.

En este primer periodo se consiguió un ajuste muy bueno, alcanzando:  $R=0.92$  y  $SKILL=0.88$ .

Se puede observar como el 50% de los valores tienen un error de menos de 10cm y que el error obtenido contabilizando casi el 80% de los mismos se encuentran por debajo de los 20 cm.

### 6.3.1.2. Periodo 2

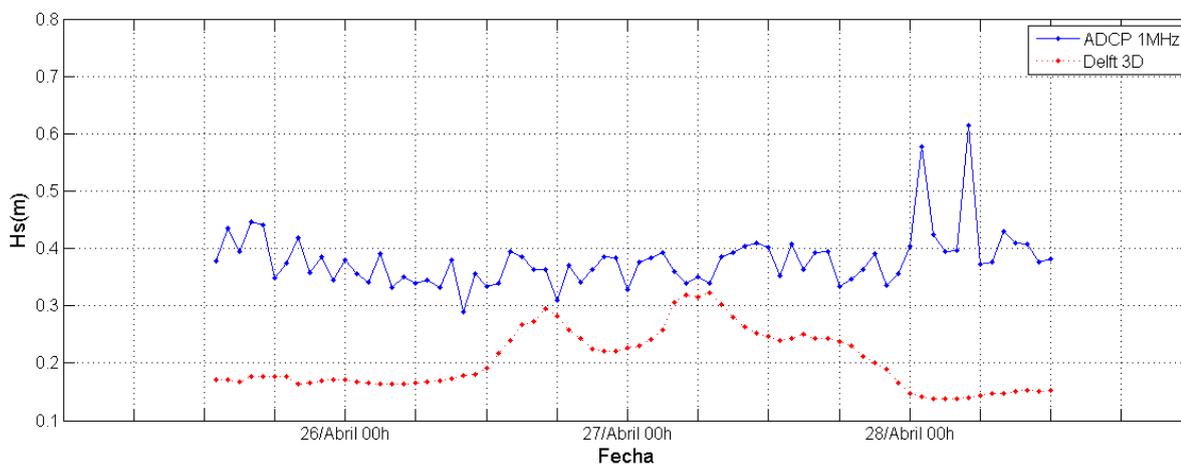
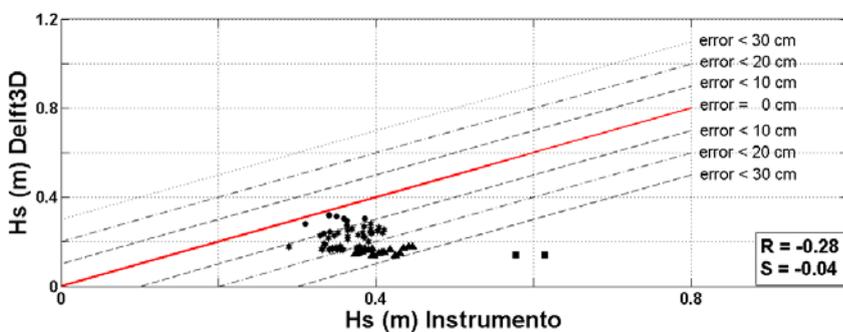


Figura 6.5: En azul, altura de ola medida por el ADCP fondeado en A. En rojo, la altura de ola obtenida con Delft 3D.



$\frac{ Dif.deH }{H}$	%
< 10cm	14
< 20cm	68
< 30cm	97
> 30cm	3

Figura 6.6: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{ADCP}$

Cuadro 6.2: Porcentaje

Este periodo corresponde con el temporal precedente del SW. Como se dijo con anterioridad la altura de ola que registró el instrumento durante el temporal fue muy pequeña, como consecuencia de la zona de sombra respecto a esta dirección en la que se encuentra el puerto.

Con respecto a los ajustes, se consiguieron unos valores muy malos:  $R=-0.28$  y  $SKILL=-0.04$ . A continuación, se explica a qué puede ser debido este hecho.

Aunque los parámetros de ajuste son malos, casi la totalidad de los datos poseen un error de menos de 25-30cm.



Como se comentó debido a la corta duración de la campaña no se han podido obtener condiciones muy distintas, por ello se ha calibrado con estos dos periodos, que corresponden con dos temporales uno de cada dirección principal, y se ha validará el modelo con un oleaje de condiciones normales procedente del SW.

Así con respecto al oleaje que llega a nuestro punto A, tenemos 2 condiciones principales. Una de ellas corresponde con el oleaje del E, el cual posee un coeficiente de propagación alto, mientras que la otra corresponde con el oleaje proveniente de poniente el cual debido a la posición del puerto es poco significativa en las proximidades del mismo.

Esto puede explicar la disparidad entre los ajustes de ambos periodos. Mientras que en el periodo 1 se consigue un ajuste bastante bueno, en el periodo 2 el ajuste es mucho peor. Cuando nos encontramos ante un oleaje del S-SW, el registro de altura de ola del instrumento además de caracterizarse por tener valores pequeños, se caracteriza por ser poco uniforme, tiene muchos picos, que el modelo es imposible de ajustar. Estos picos e irregularidades pueden ser debidos a la zona tan inestable en la que se encontraba fondeado el instrumento, puesto que este se encontraba justo en la bocana del puerto. Así, debido al tráfico marítimo al que estuvo expuesta la zona, no sólo de las embarcaciones y buques que operan en el Pto. pesquero sino también de las que operan en los pto. comerciales cercanos al pesquero, se pudieron producir estas irregularidades en la altura de ola.

La zona va a ser mucho más sensible a estas inestabilidades cuando el oleaje procedente de alta mar tiene poca energía, mientras que va a ser mucho más rígido y uniforme cuando las condiciones sean más desfavorables.

En conclusión, para los oleajes energéticos y más determinantes, que son los procedentes de levante, el modelo ajusta con bastante fiabilidad lo medido gracias al instrumento.

Este ajuste se ha conseguido a través de los siguientes parámetros de calibración tanto para el módulo WAVE como para el FLOW.

## WAVE

### 1.4.11. GRID

- Resolución espectral
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz;  $T_p$ : 33.33 s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz;  $T_p$ : 1 s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla intermedia**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz;  $T_p$ : 20 s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz;  $T_p$ : 1 s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz;  $T_p$ : 20 s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz;  $T_p$ : 1 s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24

### 1.4.12. FRONTERA

- Orientación
  - Tipo: Orientación
  - Orientación de la frontera: Según la dirección de procedencia del oleaje, NE-E o S-SW

### 1.4.13. PARÁMETROS FÍSICOS

- Rotura inducida por el fondo
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- Interacciones triádicas no lineales
  - Alpha: 0.1
  - Beta: 9



- Fricción del fondo:
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción:  $2e-06$
- Difracción
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- Decrestamiento: Komen et al.

#### 1.4.14. ARCHIVO \*.WAVECON

FLOW
------

#### 1.4.15. DOMINIO

- Parámetros del grid
  - Latitud: 36.99 grados decimales
  - Orientación: 0
  - N° de capas: 1

#### 1.4.16. PERIODO DE TIEMPO

- Periodo de tiempo
  - Fecha de referencia
  - Tiempo de inicio de la simulación
  - Tiempo de finalización de la simulación.

#### 1.4.17. PROCESOS

- Físicos
  - Viento: activada
  - Oleaje: activada
  - Online DELFT-3D WAVE: activada

#### 1.4.18. CONDICIONES INICIALES

- Nivel del agua: Primer valor de la columna de nivel de agua del archivo que contiene los estados de mar de entrada a propagar WAVECON

## 1.4.19. FRONTERA

### ■ Definición del contorno por coordenadas M y N

<b>Frontera</b>	<b>M1</b>	<b>N1</b>	<b>M2</b>	<b>N2</b>
1	35	83	82	83
2	83	82	83	2
3	82	1	9	1

Cuadro 6.3: Definición de las coordenadas del contorno del grid

### ■ Condiciones del Flow

- Tipo de frontera abierta: nivel del agua
- Reflexión del parámetro alfa: 0
- Tipo de forzamiento: Marea astronómica, cuyos armónicos obtenidos mediante el mareógrafo de Carboneras son los siguientes:

<b>Nombre</b>	<b>Amplitud (m)</b>	<b>Fase (°)</b>
Z0	0.139	0.00
SSA	0.065	7.97
MSM	0.020	316.30
MM	0.016	213.43
O1	0.022	111.91
P1	0.013	144.46
K1	0.037	157.90
N2	0.010	37.09
M2	0.058	55.51
S2	0.025	78.92

Cuadro 6.4: Armónicos de marea en Carboneras

## 1.4.20. PARÁMETROS FÍSICOS

### ■ Constantes

- Constantes hidrodinámicas
  - Gravedad:  $9,81 \frac{m}{s^2}$
  - Densidad del agua:  $1000 \frac{kg}{m^3}$
  - Densidad del aire:  $1 \frac{kg}{m^3}$
- Coeficiente de arrastre por viento: coeficiente/velocidad.
  - A: 0.00063 / 0
  - B: 0.00723 / 100
  - C: 0.00723 / 100

- Rugosidad
  - Fórmula: Chezy
  - Valores:  $U=80$ ,  $V=60$
  - Fórmula de las tensiones debido al forzamiento del oleaje: Bijker
- Viscosidad
  - Uniforme:  $25 \frac{m^2}{s}$
- Viento: se carga archivo de viento \*.wnd

#### 1.4.21. MONITORIZACIÓN

Se añaden los puntos de control/observación dónde se quieren obtener los resultados de la simulación.

#### 1.4.22. SALIDA

- Almacenamiento
  - Store maps
    - Fecha de inicio
    - Fecha de finalización
    - Intervalo: 60 minutos (este intervalo representa cada cuánto tiempo el programa saca los datos, se elige una hora puesto que el instrumento da un dato cada hora)
    - History interval: 60 minutos
  - Store communication file
    - Fecha de inicio
    - Fecha de finalización
    - Intervalo: 60 minutos (este intervalo representa cada cuánto tiempo se tiene un estado de mar de entrada al programa)
    - Restart interval: 60 minutos

## 6.4. Validación del modelo

Para la validación del modelo el periodo de tiempo empleado es:

### 1.4.23. 6.4.0.3. Periodo 3

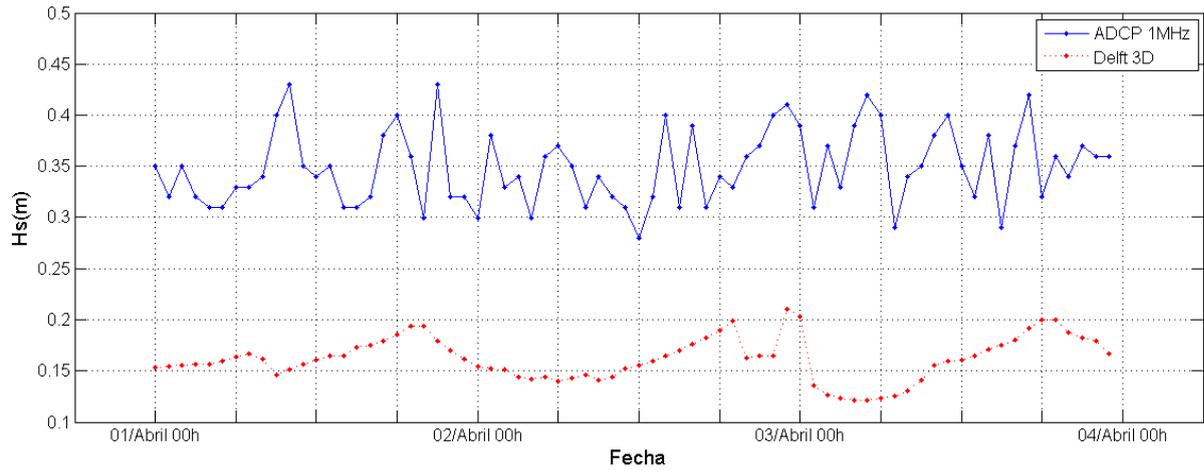


Figura 6.7: En azul, altura de ola medida por el ADCP fondeado en A. En rojo, la altura de ola obtenida con Delft 3D.

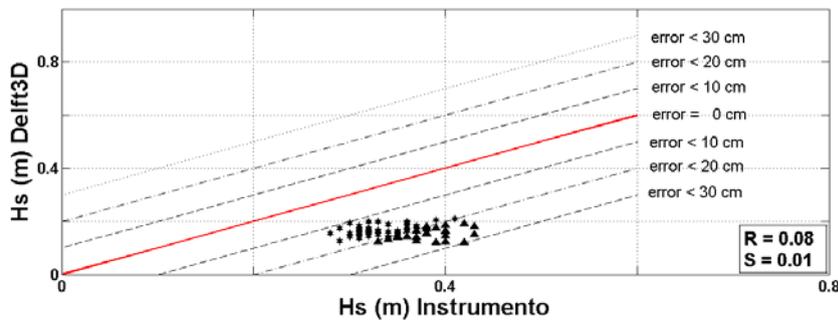


Figura 6.8: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{ADCP}$

$\frac{ Dif.deH }{H}$	%
< 10cm	0
< 20cm	68
< 30cm	100
> 30cm	0

Cuadro 6.5: Porcentaje

Al tratarse de otro periodo en el que la dirección de procedencia es la S-SW ocurre exactamente lo mismo que ocurría en el periodo.

Justificada esta ligera variación entre ambas alturas de ola, se da por calibrado y validado el modelo con los parámetros anteriormente expuestos.

## Capítulo 7

# Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones

### Análisis del régimen medio

Se ha analizado el régimen medio sobre cada escenario por separado y después se han comparado los escenarios. Dentro de cada uno se distinguen dos sectores: Sector Canal de navegación y Sector Puntos sobre línea batimétrica 7 m.

#### 7.1.1. Escenario 1: Situación actual

##### 7.1.1.1. Sector Canal de Navegación

Para este sector se han escogido una serie de puntos situados sobre el canal de navegación, es decir, sobre la trayectoria que siguen las embarcaciones para entrar al puerto y salir del mismo.



Figura 7.1: Puntos de control Canal de Navegación



Para los ocho puntos de control elegidos se calculará:

- Histogramas de altura de ola
- Rosas de oleaje
- Función de densidad de Weibull
- Resultante Media Anual (RMA)

## Histogramas de altura de ola

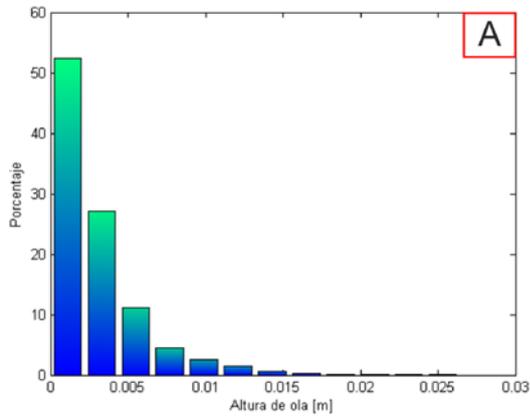


Figura 7.2: Histograma Punto A

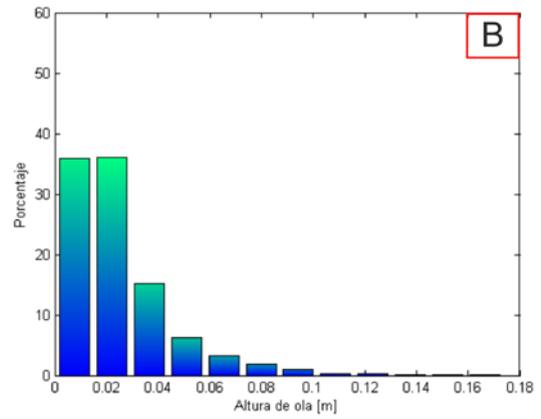


Figura 7.3: Histograma Punto B

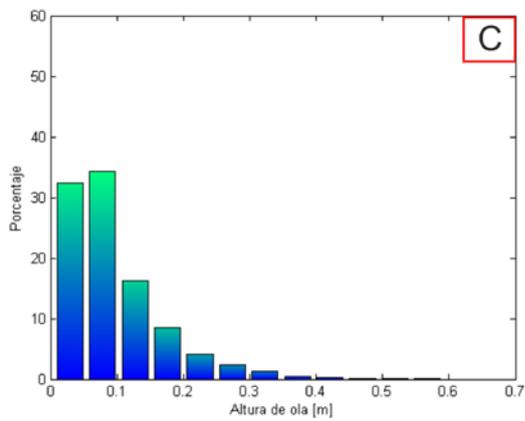


Figura 7.4: Histograma Punto C

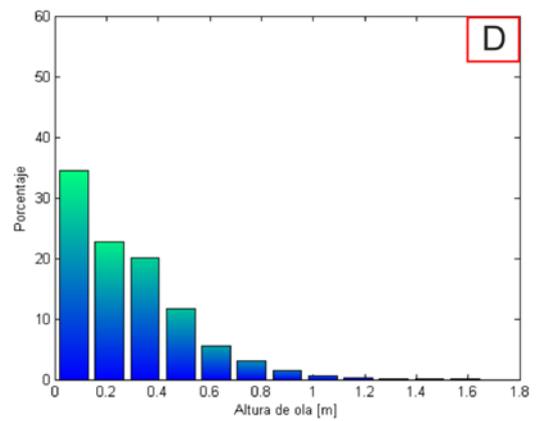


Figura 7.5: Histograma Punto D

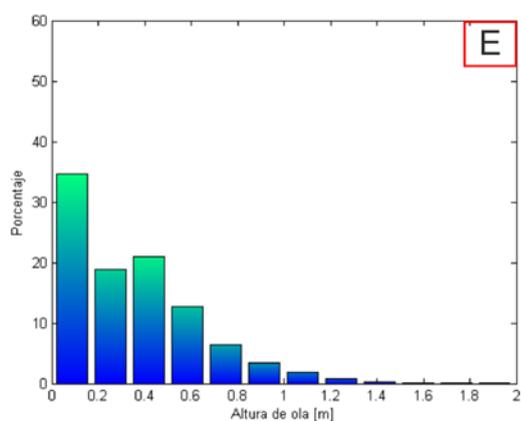


Figura 7.6: Histograma Punto E

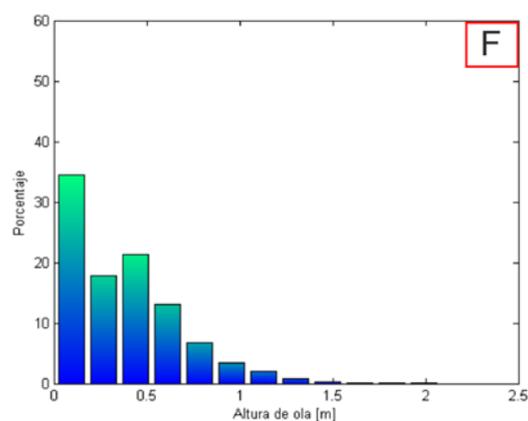


Figura 7.7: Histograma Punto F

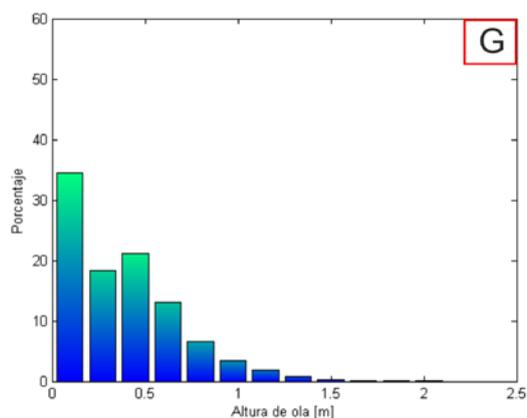


Figura 7.8: Histograma Punto G

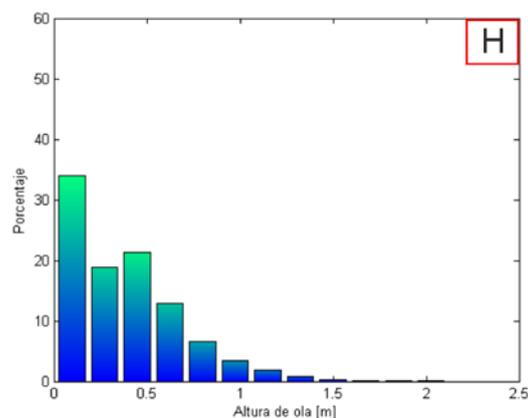


Figura 7.9: Histograma Punto H

Se observa cómo va aumentando la altura de ola a medida que se va saliendo de la zona de abrigo del puerto.

En el punto A, la altura de ola es insignificante, mientras que en los puntos más exteriores se alcanzan olas superiores a los 2 metros de altura. No obstante la mayoría de las olas se encuentran por debajo de los 20 cm.

## Rosas de oleaje

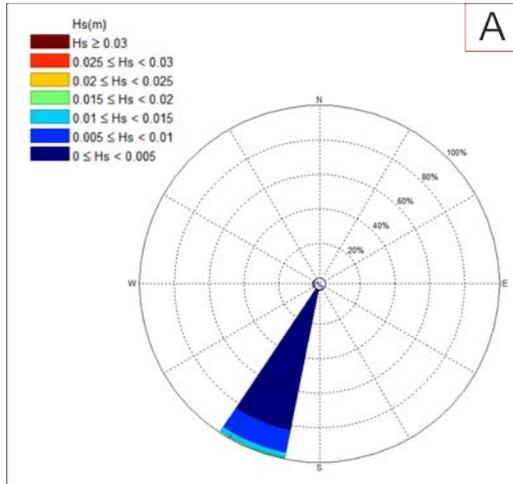


Figura 7.10: Rosa de oleaje Punto A

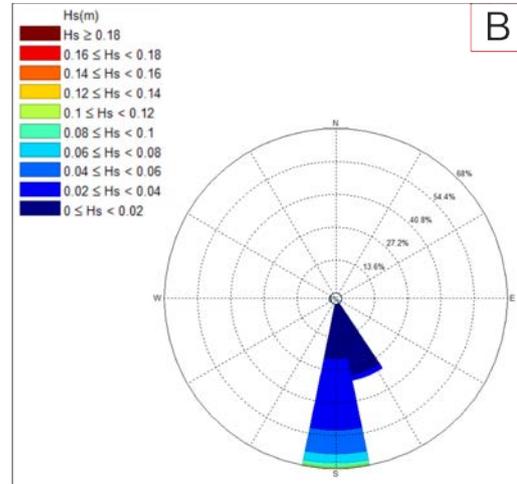


Figura 7.11: Rosa de oleaje Punto B

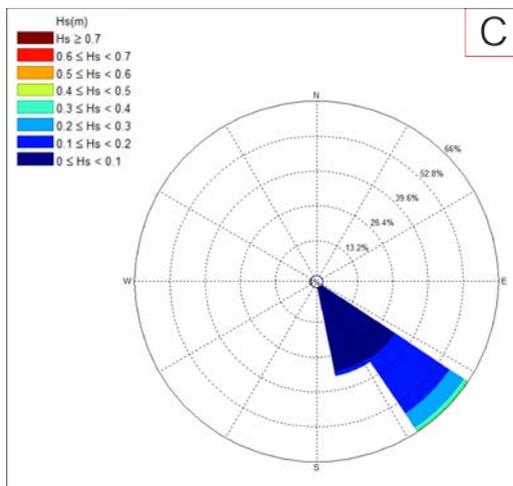


Figura 7.12: Rosa de oleaje Punto C

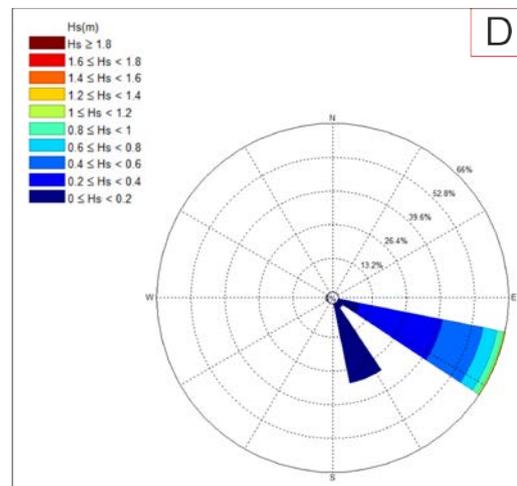


Figura 7.13: Rosa de oleaje Punto D

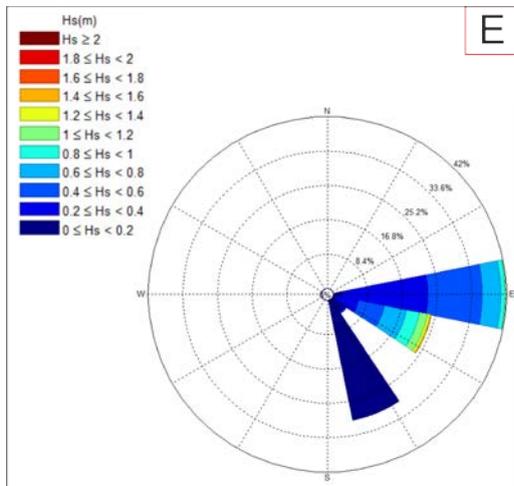


Figura 7.14: Rosa de oleaje Punto E

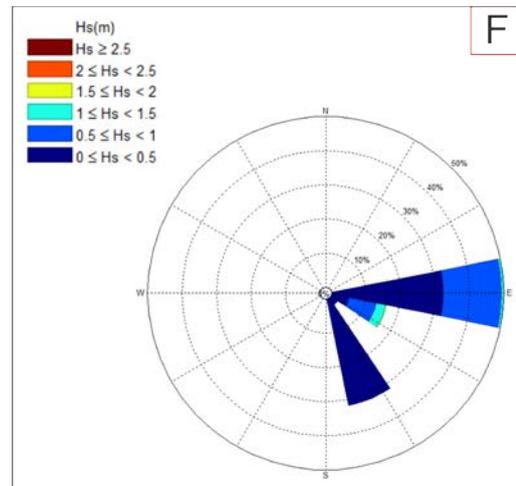


Figura 7.15: Rosa de oleaje Punto F

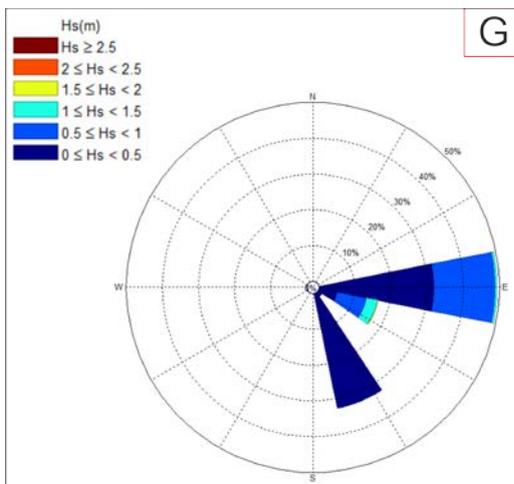


Figura 7.16: Rosa de oleaje Punto G

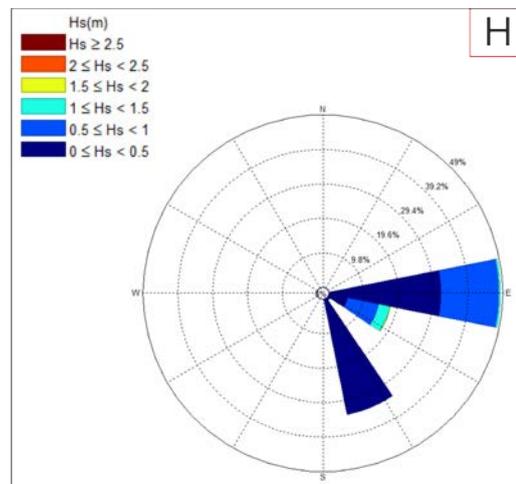


Figura 7.17: Rosa de oleaje Punto H

Observando estas rosas se puede ver como:

- Por una parte, en los puntos más exteriores donde aún no existe influencia de la presencia del puerto (E,F,G y H) estas rosas son muy similares, donde se ve un claro predominio de la dirección E. No obstante también tiene relevancia la dirección SE, pero se ve que el oleaje procedente de esta dirección nunca supera los 50 cm de altura, mientras que el oleaje del E si puede alcanzar alturas de ola superiores a 2m.

- Por otra parte, conforme avanzamos en la trayectoria en el canal de navegación, vemos cómo se va refractando el oleaje, girando este en sentido horario tratando de hacerse esta dirección tangente a la línea imaginaria que une los puntos de control. Obviamente, como ya se comentó en el apartado anterior, conforme nos acercamos al punto A, la altura de ola va disminuyendo en gran medida.

## Función de densidad de Weibull

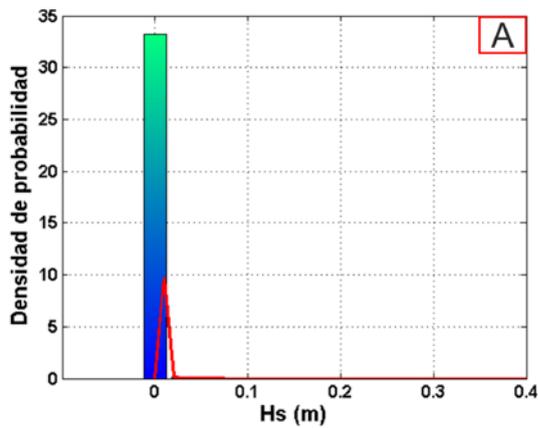


Figura 7.18: Función de densidad Punto A

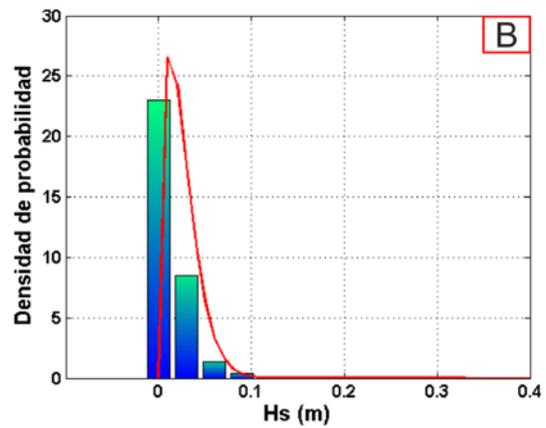


Figura 7.19: Función de densidad Punto B

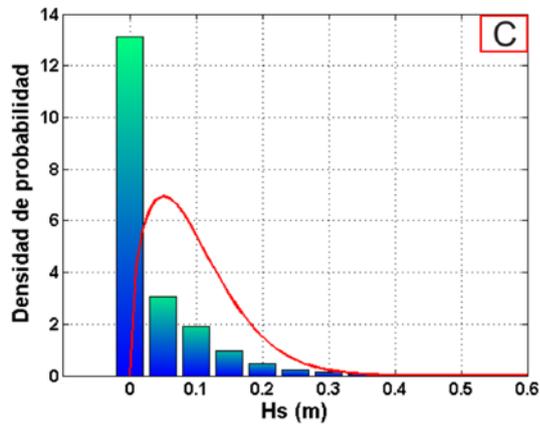


Figura 7.20: Función de densidad Punto C

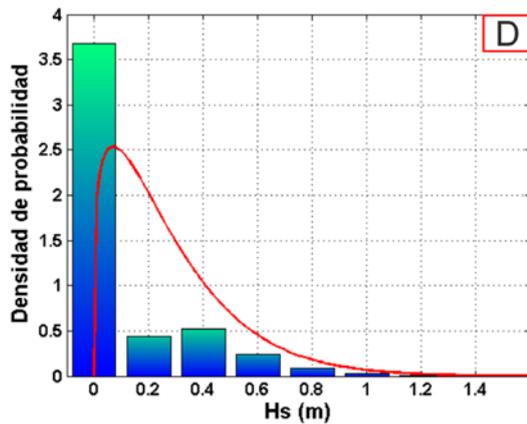


Figura 7.21: Función de densidad Punto D

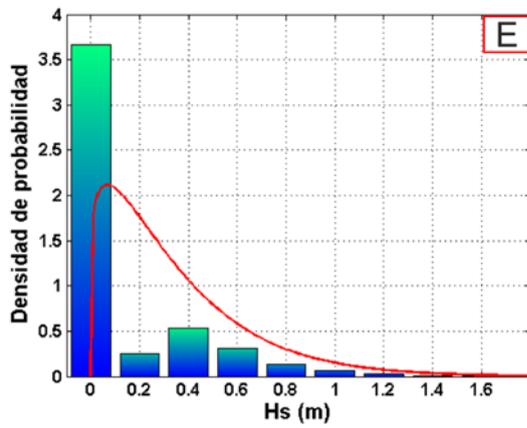


Figura 7.22: Función de densidad Punto E

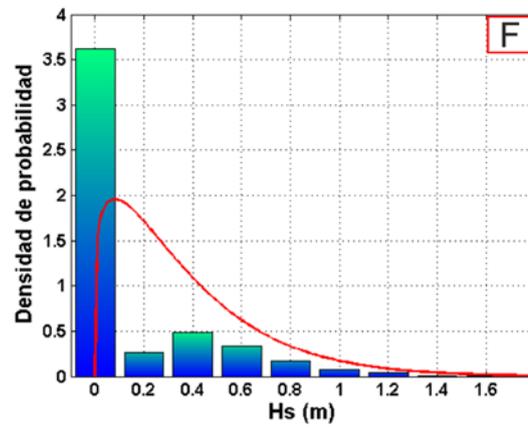


Figura 7.23: Función de densidad Punto F

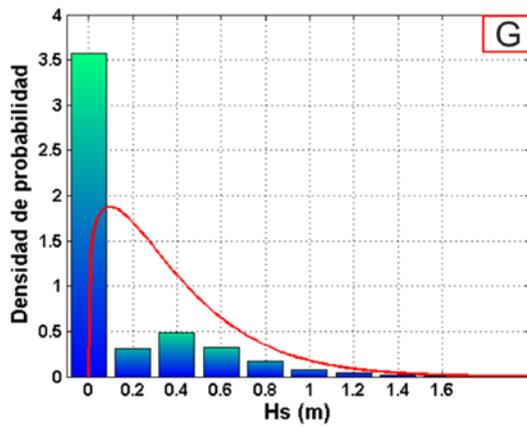


Figura 7.24: Función de densidad Punto G

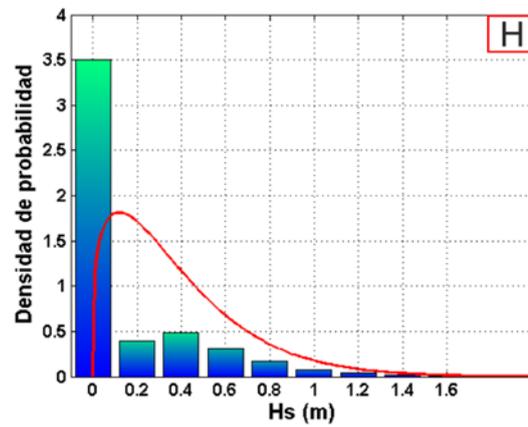


Figura 7.25: Función de densidad Punto H

Se observa el mismo fenómeno que ha sido observado en los histogramas.

## Resultante media anual

A continuación se muestra un esquema de las RMAs sobre los puntos de control así como una tabla con los valores exactos tanto en módulo como de ángulo de cada una de ellas.

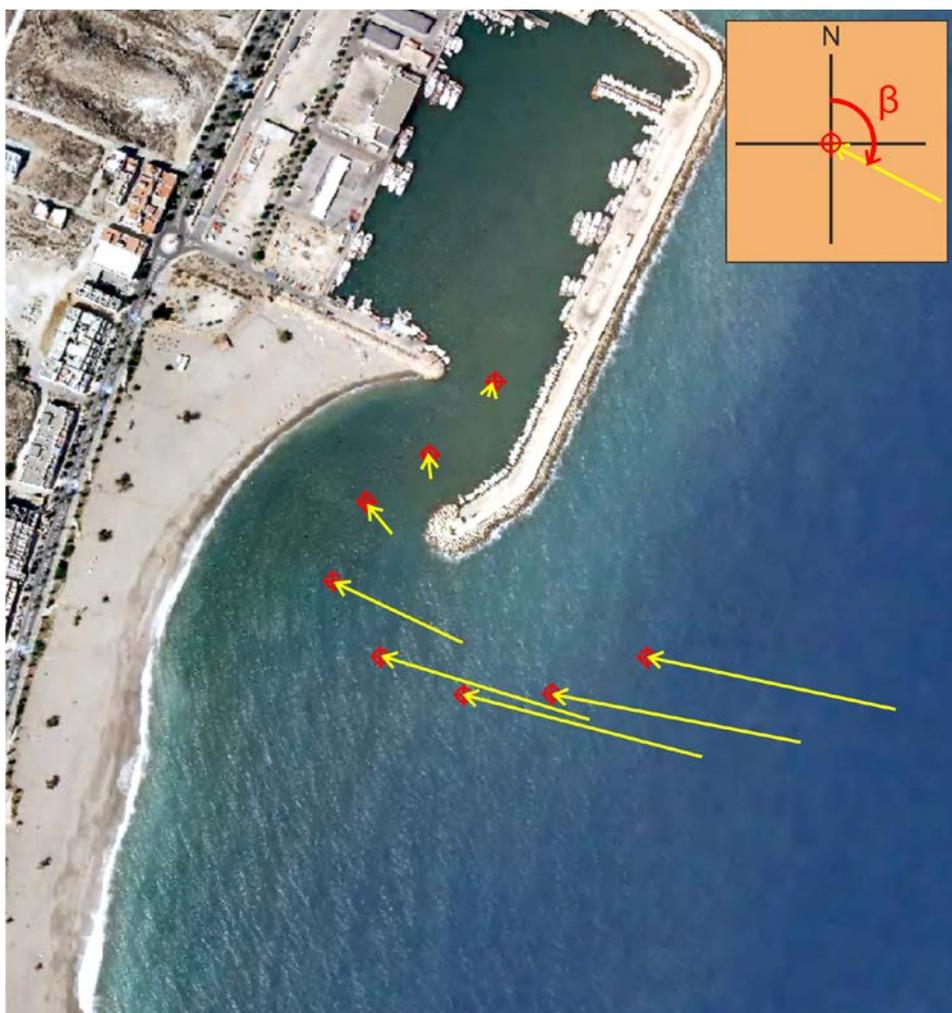


Figura 7.26: Resultante media Anual. Canal de navegación

Punto	Módulo (N/s)	Módulo (N/año)	$\beta$
A	0.6	1.89e07	205
B	6.5	2.05e08	174
C	89.6	2.83e09	140
D	784.7	2.47e10	115
E	1256.3	3.96e10	104
F	1339.4	4.22e10	103
G	1382.1	4.36e10	101
H	1385.6	4.37e10	103

Cuadro 7.1: Parámetros RMA

Analizando esta RMA volvemos a ver el efecto comentado anteriormente, puesto que la RMA viene definida por las características del oleaje. Así se observa cómo va girando la RMA a medida que nos adentramos en el puerto, así como que va perdiendo mucha magnitud hasta hacerse casi nula en el punto de control A.

### Sector línea batimétrica -7

Para este sector se han escogido una serie de puntos situados sobre la línea batimétrica -7, para ver cómo varían los parámetros del oleaje a lo largo de la costa en un entorno próximo al puerto.

En esta parte se analizará lo mismo que en el sector del canal de navegación más la cantidad y dirección de transporte de sedimentos en algunos puntos de este sector.

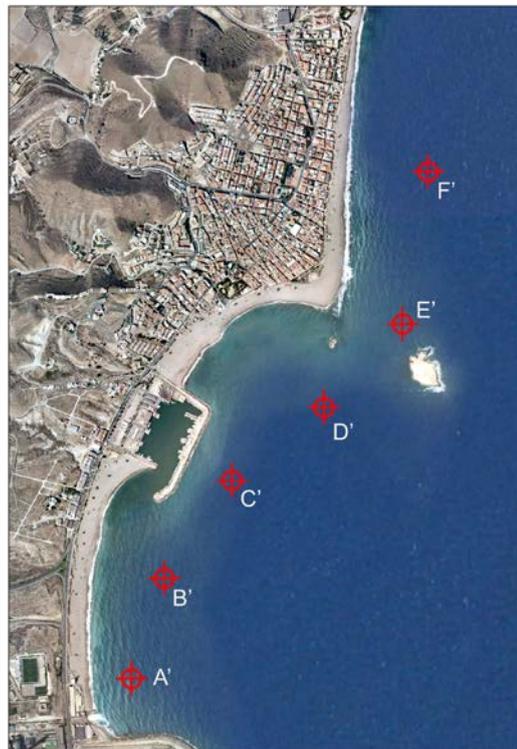


Figura 7.27: Puntos de control para la realización de los análisis

## Histogramas

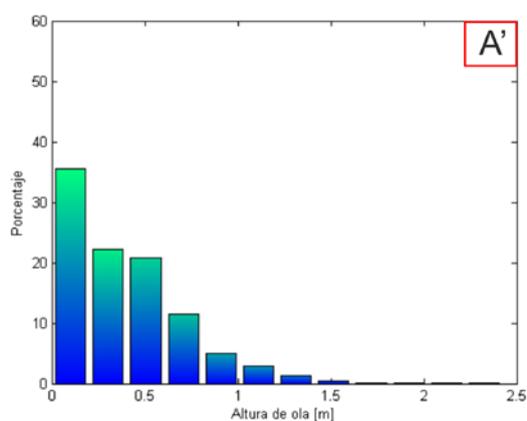


Figura 7.28: Histograma Punto A'

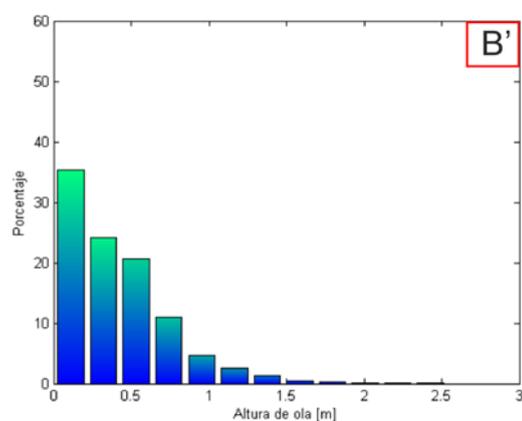


Figura 7.29: Histograma Punto B'

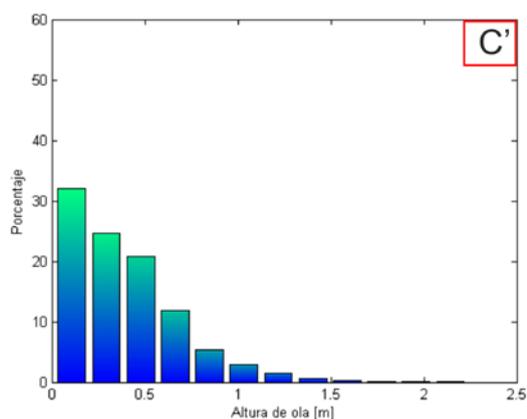


Figura 7.30: Histograma Punto C'

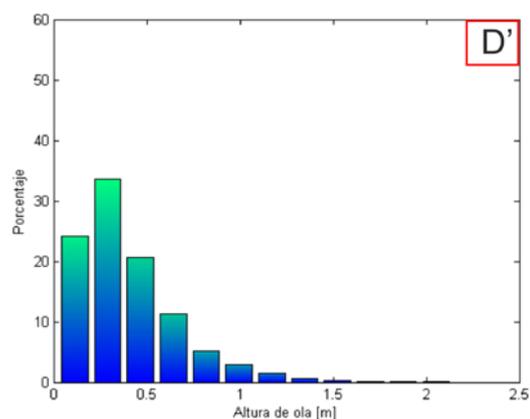


Figura 7.31: Histograma Punto D'

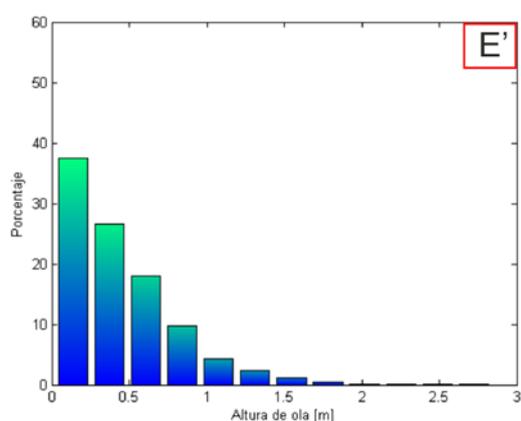


Figura 7.32: Histograma Punto E'

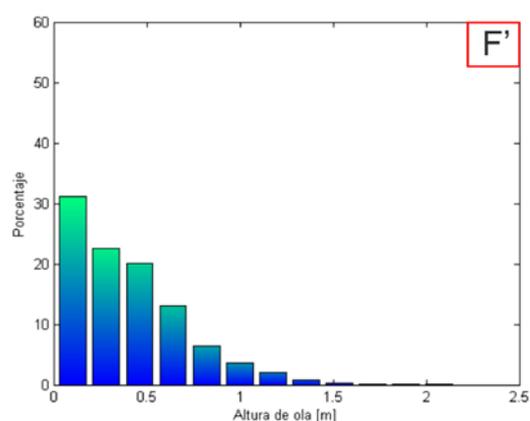


Figura 7.33: Histograma Punto F'

Se puede ver que los 6 histogramas tienen una apariencia muy parecida, predominan las alturas de ola menos de 0.5 metros y conforme esta va aumentando va bajando la frecuencia de ocurrencia de estas olas. En alguno de los puntos se alcanzan olas de hasta 2.6 metros de altura.

## Rosas de oleaje

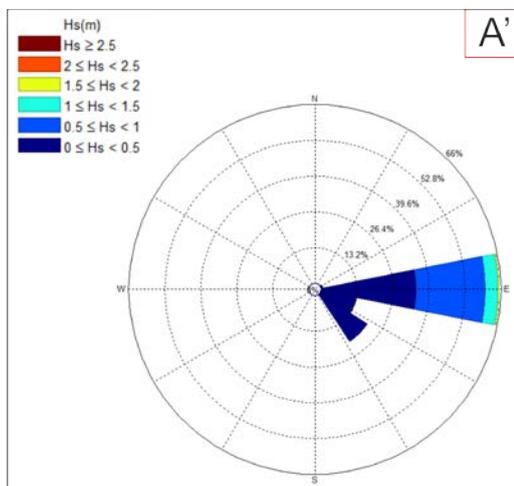


Figura 7.34: Rosa de oleaje Punto A'

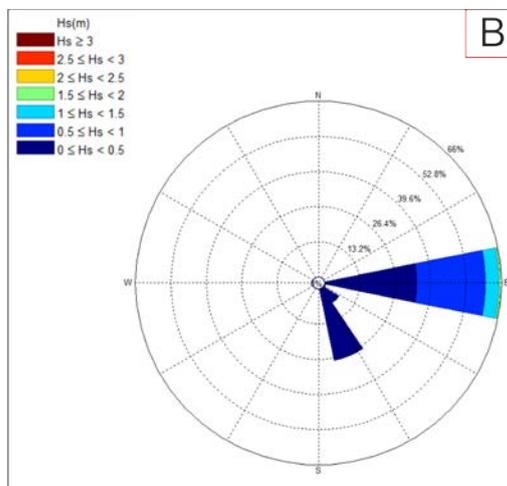


Figura 7.35: Rosa de oleaje Punto B'

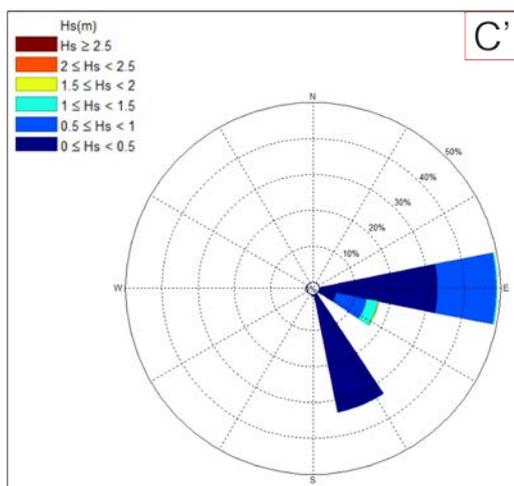


Figura 7.36: Rosa de oleaje Punto C'

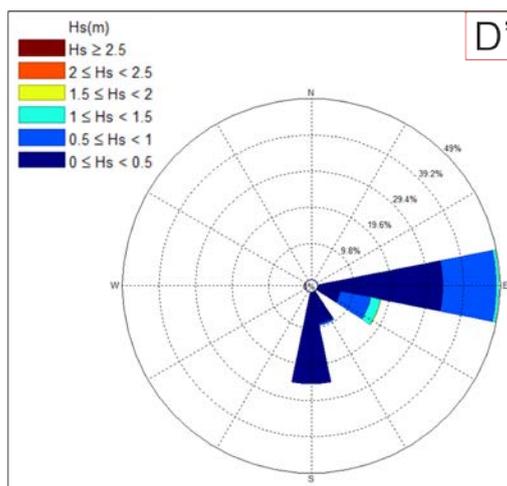


Figura 7.37: Rosa de oleaje Punto D'

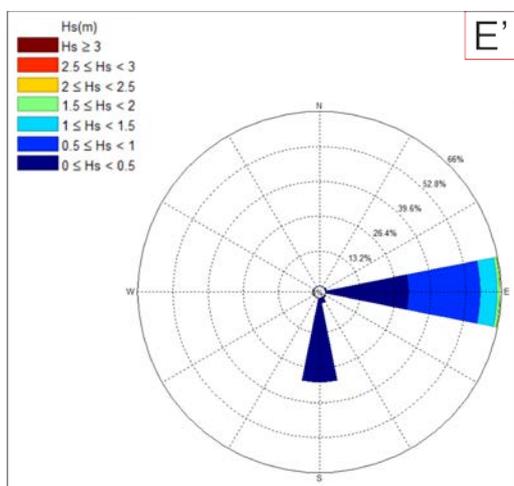


Figura 7.38: Rosa de oleaje Punto E'

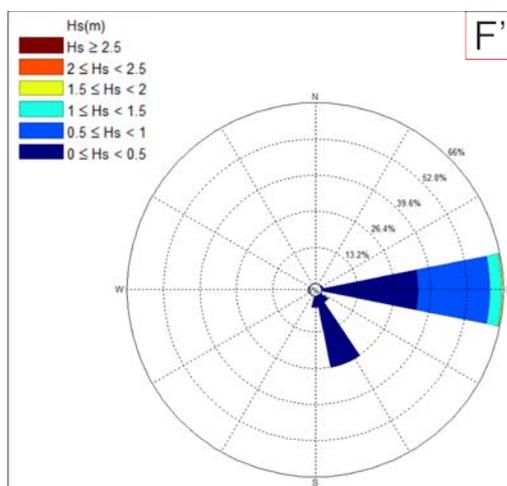


Figura 7.39: Rosa de oleaje Punto F'

De nuevo se vuelve a apreciar una gran similitud entre los puntos. En cada uno de ellos se distinguen 2 direcciones principales, en todos ellos la más predominante y la que tiene asociada mayor altura de ola es la dirección E, mientras que la otra dirección que se distingue varía ligeramente entre S y SE. Esta variación puede ser debida a la situación de los puntos y su mayor o menor proximidad a obstáculos como lo es la isla de San Andrés, donde ya entran en juego fenómenos como la difracción o refracción del oleaje.

### Función de densidad de Weibull

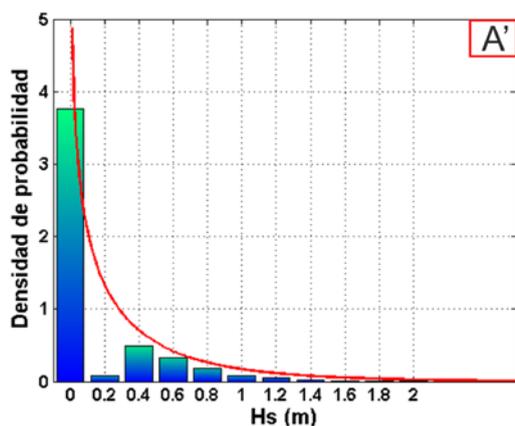


Figura 7.40: Función de densidad Punto A'

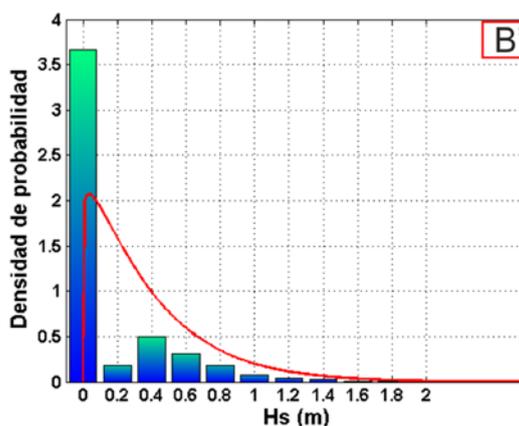


Figura 7.41: Función de densidad Punto B'

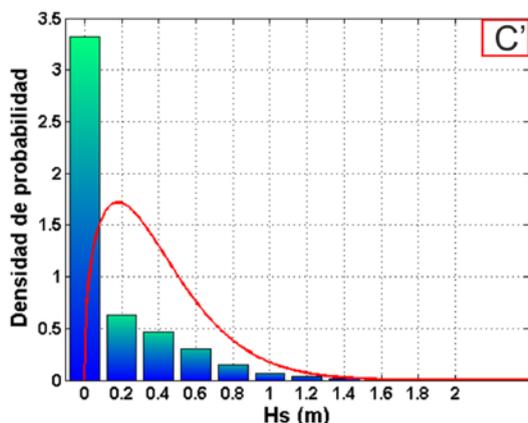


Figura 7.42: Función de densidad Punto C'

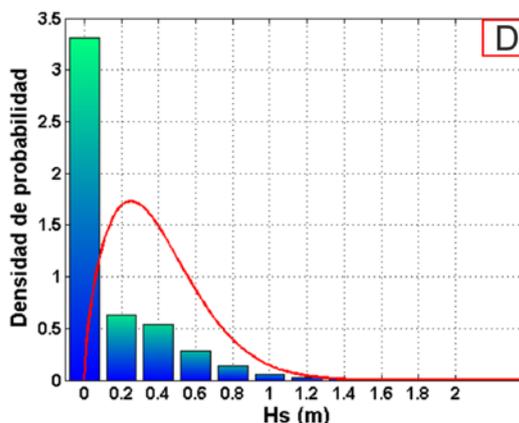


Figura 7.43: Función de densidad Punto D'

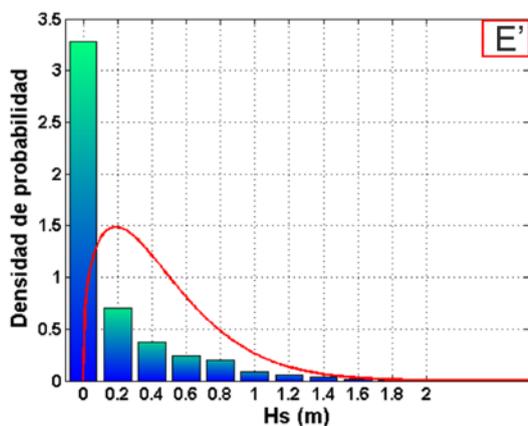


Figura 7.44: Función de densidad Punto E'

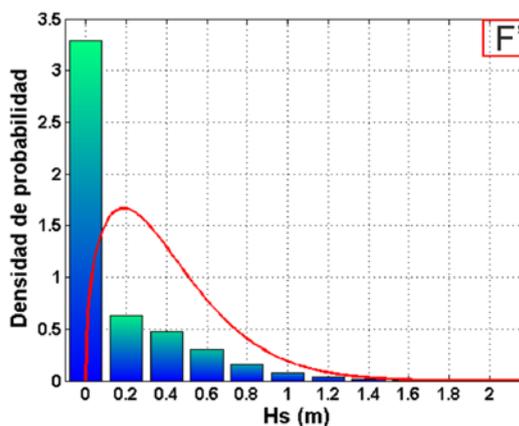


Figura 7.45: Función de densidad Punto F'

## Resultante Media Anual



Figura 7.46: Resultante media Anual en los puntos de control

Punto	Módulo (N/s)	Módulo (N/año)	$\beta$
A'	1518.3	4.78e10	84.4
B'	1630.1	5.14e10	95.6
C'	1370.0	4.32e10	103.7
D'	1311.4	4.14e10	105.2
E'	1942.5	6.13e10	88.1
F'	1468.2	4.63e10	91.2

Cuadro 7.2: Parámetros RMA



A simple vista podemos apreciar que el módulo de todas ellas está en el mismo orden de magnitud. En cuanto a la dirección se ve que tienden a ser perpendiculares a la línea de costa, variando todas ellas en un abanico de 20 grados. En los puntos A y E, se obtienen ángulos ligeramente inferiores a 90, que puede deberse a la situación de un obstáculo al sur de los mismos y que corte el oleaje procedente de S-SE. En estos puntos los obstáculos serían el puerto comercial situado al sur y la isla de San Andrés respectivamente.

### **Cálculo de transporte de sedimentos**

A continuación se va a proceder al cálculo del transporte de sedimentos en dos de los puntos de control. Se escogen sólo estos puntos de control porque este cálculo se realiza a nivel general, a nivel de tramo, no teniendo sentido calcular este transporte en puntos tan próximos.

Por ello los puntos elegidos han sido el punto B' y el punto F'.

Para realizar dicho cálculo se ha hecho uso de la fórmula del Cerc. Esta fórmula arroja unos valores que no siendo reales, como es lógico, se acercan a la realidad.

$$Q = K * \frac{\rho * \sqrt{g}}{16 * \sqrt{k} * (\rho_s - \rho) * (1 - n)} * H^{5/2} * \text{sen}(2\alpha)$$

(7.1)

Donde:

- $K = 1,4 * e^{-2,5 * d_{50}}$
- $d_{50} = 0,65 \text{ mm}$  (diámetro medio del sedimento)
- $k = 0,78$
- $n = 0,4$
- $\rho_s = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $\rho = 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- $H$ : altura de ola
- $\alpha$ : ángulo entre la dirección del oleaje y la perpendicular a la línea de costa en ese punto

Los parámetros del oleaje que entran en juego son la altura de ola y la dirección del oleaje.

La altura de ola, como es obvio, al ser mayor, mayor será la energía del oleaje y por tanto mayor será el transporte. En cuanto a la dirección, lo que considera esta fórmula es el ángulo que forma el oleaje con la perpendicular a la línea de costa, así cuando el oleaje sea totalmente perpendicular el transporte será nulo, y a medida que se vaya haciendo más oblicuo, este transporte irá creciendo.

A continuación se muestra un esquema de la situación:

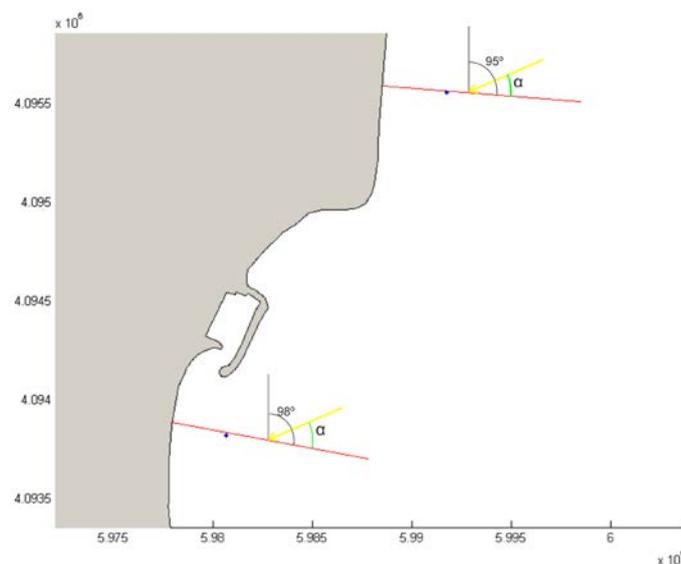


Figura 7.47: Esquema de puntos de control y ángulos

El ángulo alfa puede quedar por encima o por debajo de la perpendicular a la línea de costa, lo cual produce un transporte del norte hacia el sur o del sur hacia el norte respectivamente. Así, acto seguido se muestran los caudales obtenidos a través de la fórmula del CERC fraccionados según se produzcan del norte hacia el sur o viceversa para los dos puntos escogidos.

Punto	$Q_{N-S}(\frac{m^3}{seg})$	$Q_{S-N}(\frac{m^3}{seg})$
B'	49473	37598
F'	95853	32356

Cuadro 7.3: Valores de caudales del transporte de sedimentos

Se observa que en ambos puntos es mayor el transporte de N-S que el transporte de S-N, por lo que el balance neto es un transporte con dirección N-S. Con este resultado se pone de manifiesto la mayor importancia de los oleajes del E-NE frente a los procedentes de poniente, como se comentaba en el apartado de calibración del modelo.

En cuanto a la magnitud de este caudal, éste se encuentra dentro del rango de caudales que se han obtenido en estudios realizados en zonas próximas a nuestra zona de estudio.

## 7.1.2. Escenario 2: No existencia de la Isla de San Andres

### Sector Canal de navegación

En este sector al propagar los oleajes en el escenario sin isla se obtienen unos resultados prácticamente calcados a los obtenidos en el escenario 1, las diferencias son casi inapreciables en la totalidad de los puntos. Por ello podemos decir que esta zona del canal de navegación se ve poco afectada por la presencia o no de la isla.

Por dicha razón, pasamos directamente al segundo sector.

### Sector línea batimétrica -7

En los puntos situados en este sector ya si se aprecian diferencias significativas, por lo que se van a analizar las mismas salidas que en el primer escenario.

### Histogramas de altura de ola

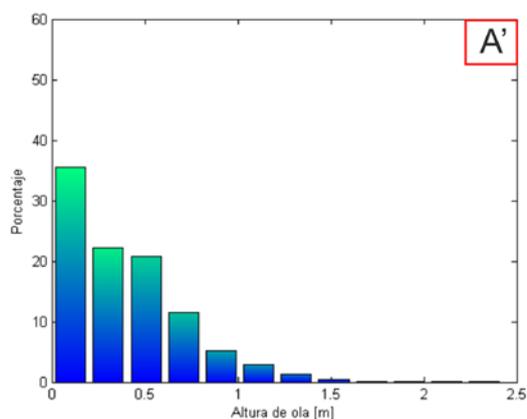


Figura 7.48: Histograma Punto A'

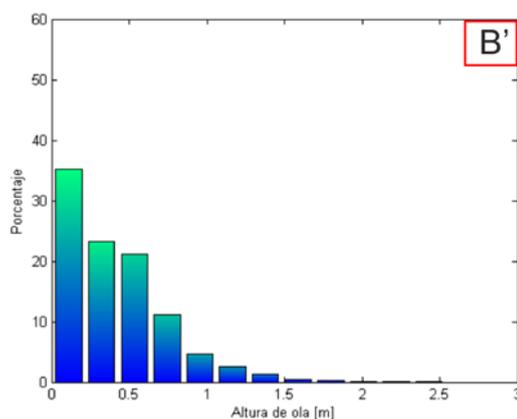


Figura 7.49: Histograma Punto B'

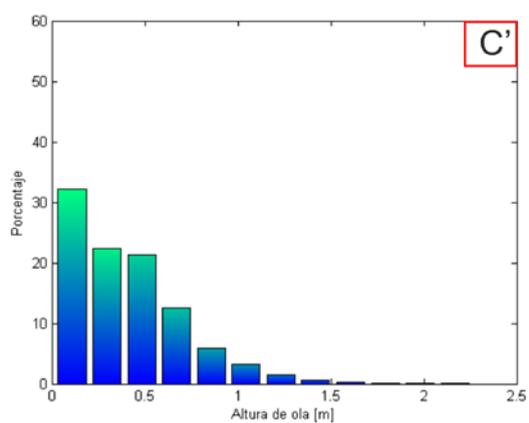


Figura 7.50: Histograma Punto C'

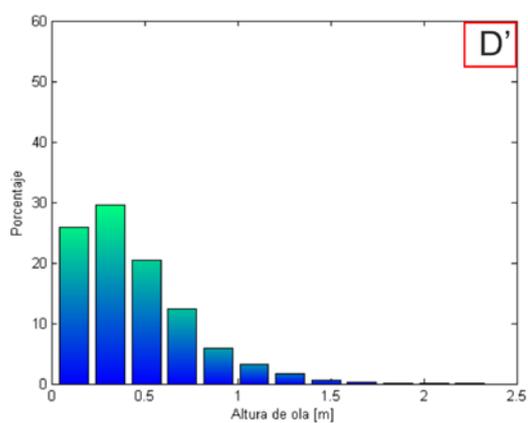


Figura 7.51: Histograma Punto D'

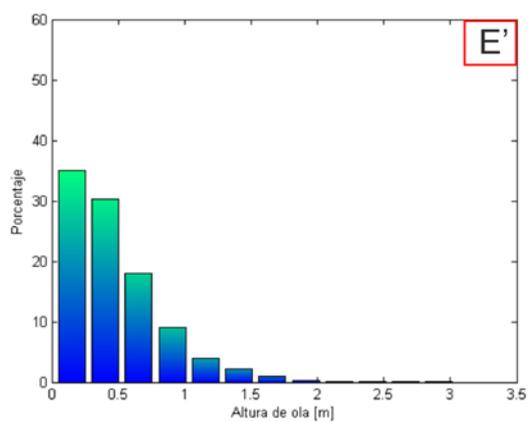


Figura 7.52: Histograma Punto E'

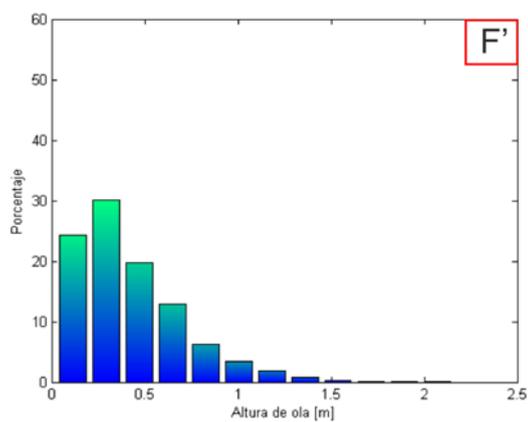


Figura 7.53: Histograma Punto F'

## Rosas de oleaje

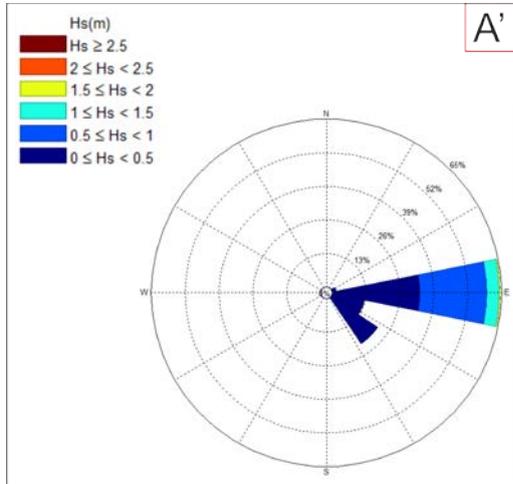


Figura 7.54: Rosa de oleaje Punto A'

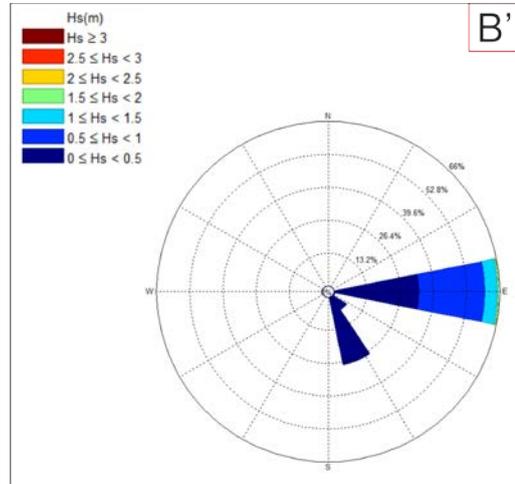


Figura 7.55: Rosa de oleaje Punto B'

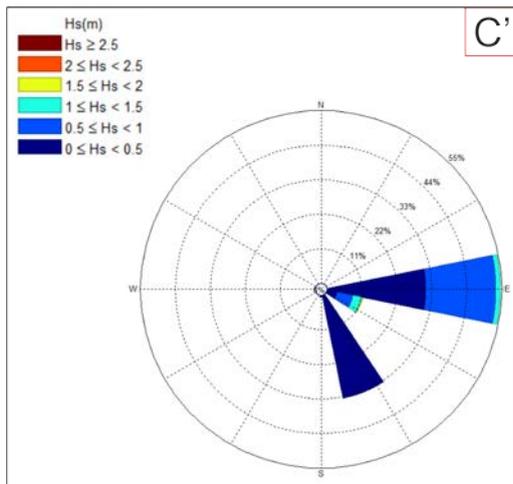


Figura 7.56: Rosa de oleaje Punto C'

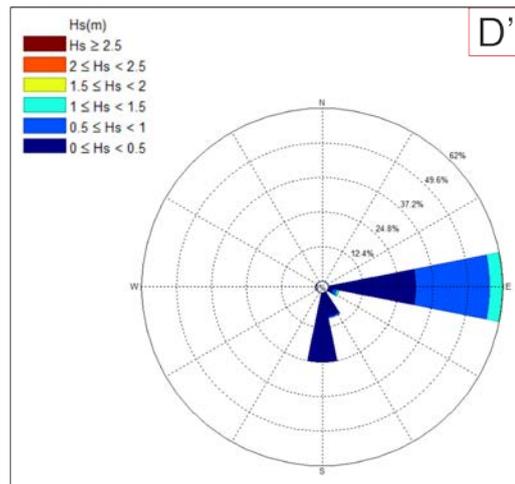


Figura 7.57: Rosa de oleaje Punto D'

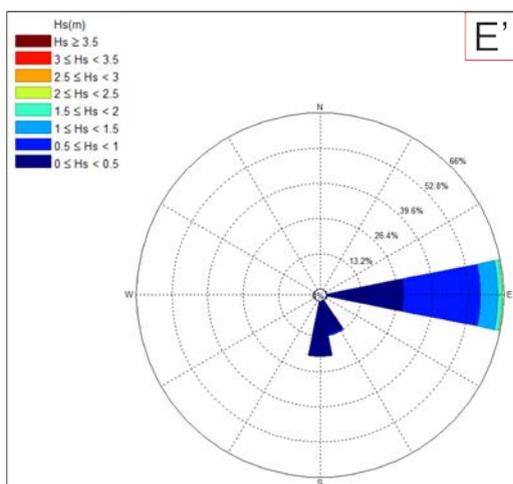


Figura 7.58: Rosa de oleaje Punto E'

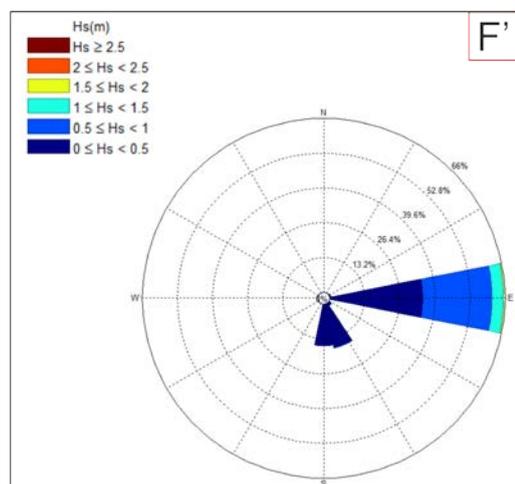


Figura 7.59: Rosa de oleaje Punto F'

## Función de densidad de Weibull

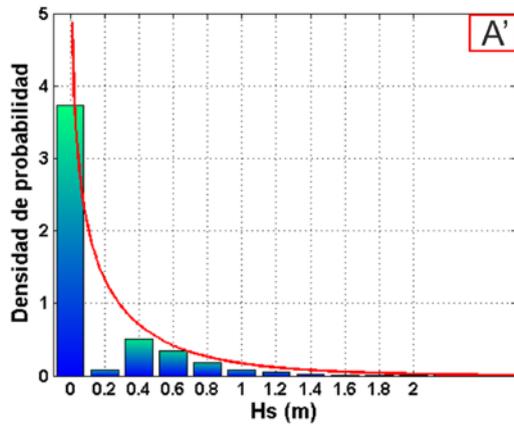


Figura 7.60: Función de densidad Punto A'

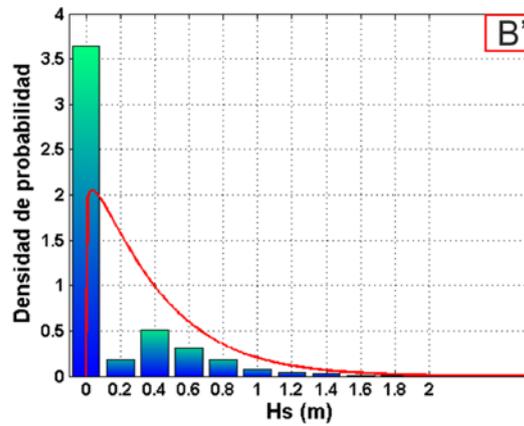


Figura 7.61: Función de densidad Punto B'

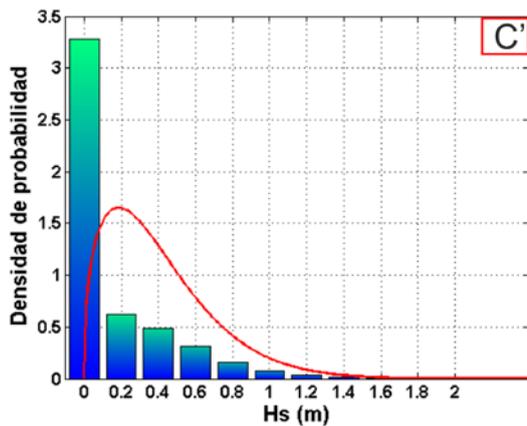


Figura 7.62: Función de densidad Punto C'

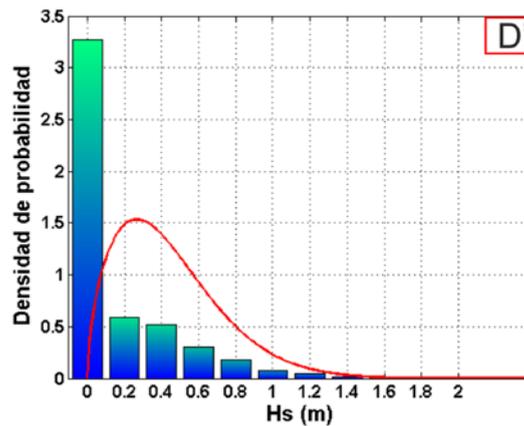


Figura 7.63: Función de densidad Punto D'

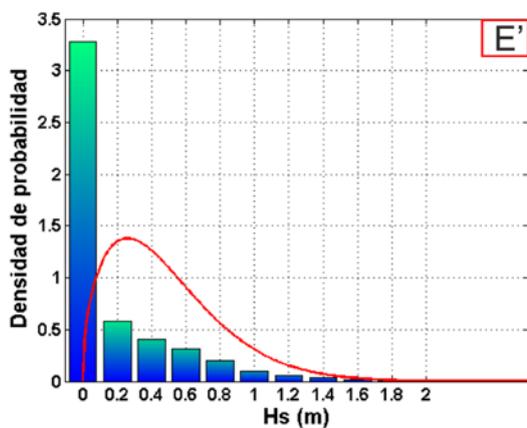


Figura 7.64: Función de densidad Punto E'

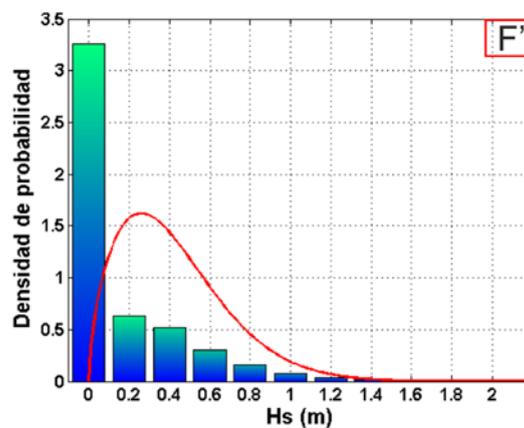


Figura 7.65: Función de densidad Punto F'

## Resultante Media Anual



Figura 7.66: Resultante media Anual. Canal de navegación

Punto	Módulo (N/s)	Módulo (N/año)	$\beta$
A'	1527.2	4.8e10	84.3
B'	1648.1	5.19e10	95.2
C'	1497.3	4.72e10	100.85
D'	1646.3	5.19e10	108.8
E'	2135.5	6.73e10	93.2
F'	1477.2	4.65e10	92.1

Cuadro 7.4: Parámetros RMA

En este apartado sólo se muestran los resultados de este escenario, en apartados posteriores se analizarán los resultados comparándolos con los obtenidos en el escenario 1.

## Cálculo de transporte de sedimentos

Por la misma razón que en el otro escenario, se hace el cálculo del transporte de sedimentos en los puntos B' y F'. El resultado, siguiendo el mismo criterio, es el siguiente:

Punto	$Q_{N-S}(\frac{m^3}{año})$	$Q_{S-N}(\frac{m^3}{año})$
B'	60081	36451
F'	95793	42671

Cuadro 7.5: Valores de caudales del transporte de sedimentos

Se mantiene la predominancia del transporte en dirección N-S, pero varía respecto al escenario 1 de la siguiente manera.

- En el punto B' asciende el caudal N-S y también asciende ligeramente el caudal S-N.
- En el punto F' el caudal N-S se mantiene prácticamente constante mientras que el S-N desciende.

# Capítulo 8

## Propuesta de alternativas

Conociendo la problemática con la que cuenta el puerto y tras el análisis y estudio tanto de la zona de estudio así como de las condiciones y forzamientos en los que este se encuentra, para mejorar la situación actual se proponen las siguientes alternativas:

### 8.1. Alternativa 1: Cambio en la geometría del dique

Como ya se dijo en el apartado correspondiente uno de los principales problemas con los que contaba el puerto es el crecimiento de la playa apoyada sobre el contradique.

Este crecimiento alcanza tal magnitud que la playa avanza hasta el extremo del contradique, lo que favorece la entrada de sedimento a la bocana del puerto.

Nos encontramos por tanto ante un problema de forma en planta de playas.

Como es lógico, la acumulación de sedimento en el contradique se desarrolla gracias al transporte de sedimentos S-N que se produce en esta área. No obstante, la forma que va a tomar esta playa encajada en su tramo final va a estar vinculada en gran medida con los fenómenos tanto de difracción como de refracción que se producen al encontrarse el oleaje con un obstáculo como lo es el dique de abrigo del puerto.

Cuando el oleaje se encuentra con el obstáculo se genera una zona de sombra o abrigo protegida de la acción del oleaje. El proceso de difracción puede provocar que parte de la energía del oleaje que no haya encontrado la interferencia se meta en la zona protegida. Las ondas que se forman tras el objeto como consecuencia de la cesión de energía son ondas difractadas. En la siguiente fotografía aérea se observa de manera clara este fenómeno.

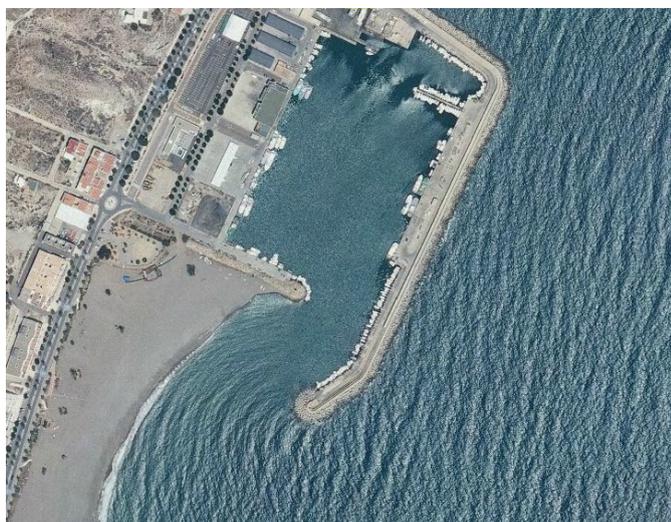


Figura 8.1: Fenómeno de difracción en la bocana del puerto

Se aprecia con facilidad cómo los frentes de onda tras encontrarse con el obstáculo pasan a ser curvos y también se aprecia como la línea de costa en esta zona tiende a ser paralela a estos frentes de onda. Con este hecho se explica cómo la forma en planta de la playa viene determinada en gran medida por los fenómenos de difracción y refracción.

Por todo ello se ha pensado que cambiando la geometría, del dique más concretamente, pueden cambiar los parámetros de la difracción y en consecuencia puede variar la línea de costa en esta playa problemática. Por ello la metodología a seguir, a grandes rasgos, será jugar con la geometría del morro del dique hasta lograr el efecto requerido, pero sin crear nuevos problemas.

Existen varios modelos o métodos para predecir la forma en planta de playas encajadas. En este proyecto se ha utilizado el modelo propuesto por **González y Medina (2001)**. Este método supone que la playa adquiere una forma de espiral logarítmica. A continuación se explica este método.

Para el cálculo de esta espiral son necesarios tanto parámetros del oleaje como de la geometría del escenario.

- Primeramente se debe imaginar cómo era la playa antes de la construcción de la infraestructura portuaria. Esta playa debe tender a ser perpendicular a la resultante media en la zona, lo cual se cumple.
- Identificación de un punto de control a partir del cual se produce la difracción.
- Definición del oleaje medio.
  - $H_{s,12}$ : altura de ola que sólo es superada 12 horas al año
  - $T_{s,12}$ : periodo asociado a la altura de ola anterior
  - $h_{pc}$ : profundidad del punto de control
- Con los parámetros anteriores y gracias a la ecuación de la dispersión se calcula la longitud de onda  $L_s$
- Cálculo de la distancia entre la alineación inicial de la costa y el punto de control.
- Cálculo del ángulo  $\alpha_{min}$  a través de la fórmula:

$$\alpha_{min} = \arctan \left[ \frac{\left( \frac{\beta_r^4}{16} = \frac{\beta_r^2}{2} \frac{Y}{L} \right)^{1/2}}{\frac{Y}{L}} \right]$$

Con  $\beta_r = 2,13$

- Cálculo de la distancia entre el punto de control y la intersección entre la línea de costa de equilibrio y la inicial  $R_0$
- Definición de semirectas que formen ángulos con  $R_0$ , tantas como puntos y precisión que-ramos en la espiral.
- Sobre estas rectas se lleva la distancia  $R$ , la cual viene de

$$R = R_0 \left( C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2 \right)$$

En este esquema se pueden visualizar los pasos comentados.

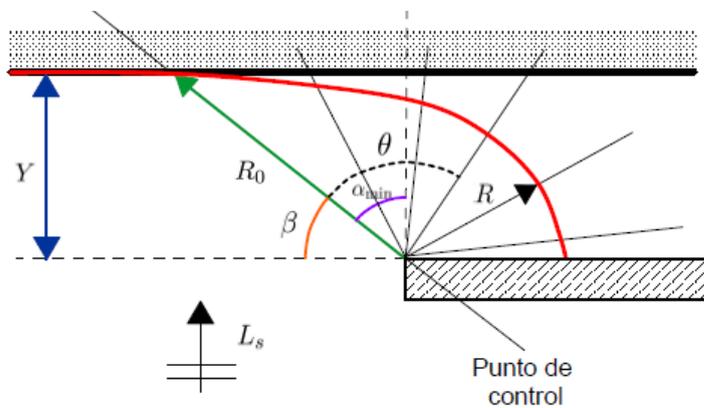


Figura 8.2: Esquema pasos para la formación de la espiral

Para observar la diferencia se ha calculado la espiral en la situación actual así como la que resultaría si se produjese un cambio en la geometría del morro del dique. Los parámetros anteriormente detallados para ambas situaciones se recogen en la siguiente tabla:

	$H_{s,12}(m)$	$T_{s,12}(s)$	$h_{pc}(m)$	$L_s(m)$	$Y(m)$	$\alpha_{min}(^\circ)$	$R_0(m)$
Escenario actual	1.63	7.5	4	44	200	56	300
Cambio en dique	1.63	7.5	4	44	240	54	400

Cuadro 8.1: Tabla de parámetros de cada espiral logarítmica

Las medidas que se han tomado para conseguir estos parámetros y por tanto nuestros objetivos han sido:

- Eliminar la alineación del dique en la que este cambia de dirección.
- Alargar el dique restante una distancia de 50 metros sin ningún cambio en la dirección.

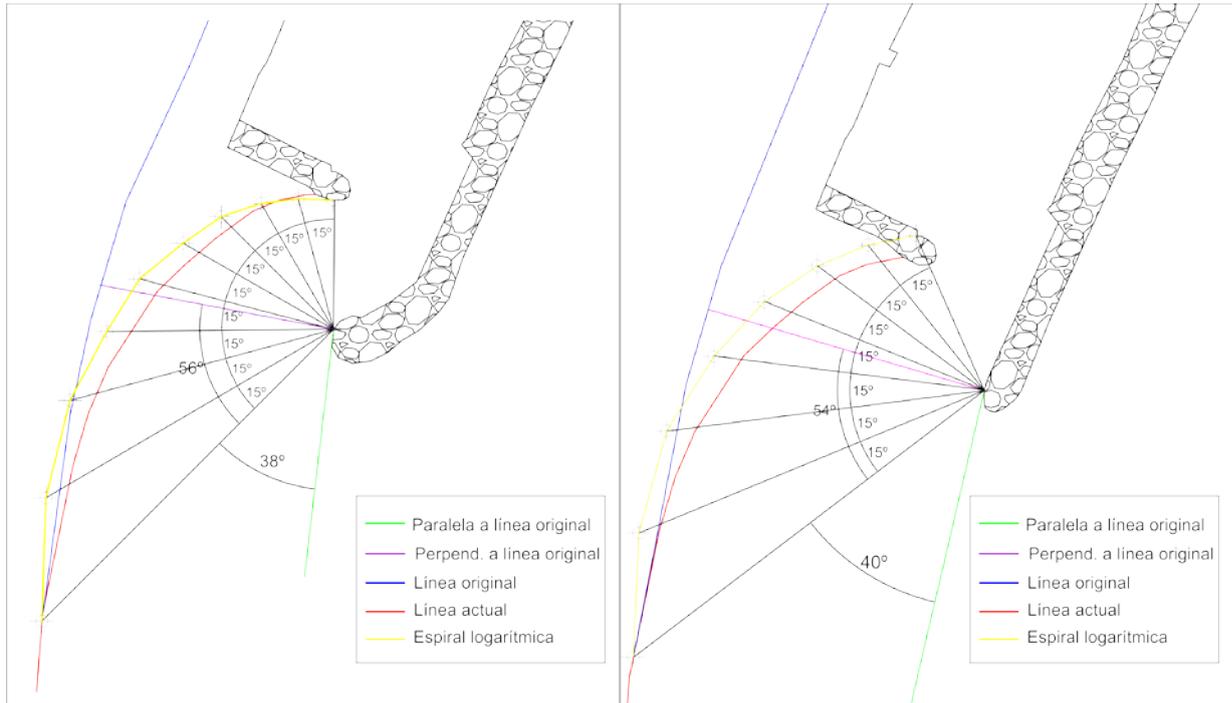


Figura 8.3: Espiral resultante en la situación actual

Figura 8.4: Espiral resultante con cambio en el dique

En las figuras superiores podemos ver las diferencias entre ambas espirales. Gracias al cambio en la geometría del morro del dique se ha conseguido aumentar la distancia Y así como acercar el punto de control al contradique.

En resumen, mientras que por una parte la espiral que se obtiene en la situación actual, muy similar a la realidad, corta al contradique prácticamente en el extremo del mismo, en la situación del nuevo dique proyectado vemos como se obtiene una espiral más abierta y que corta al citado contradique en un punto más interior. Este hecho provocaría que la entrada de sedimento al puerto fuera mucho menos factible de lo que resulta actualmente, puesto que la línea de playa retrocedería unas decenas de metros.

## 8.2. Alternativa 2: Dragado y suavizado de pendiente de la playa del contradique

Otro de los problemas con el que nos encontrábamos era la agitación que se producía en la bocana del puerto.

Tras es el análisis profundo de la zona de estudio, se ha observado que el motivo de esta agitación puede deberse tanto a la estrechez que gracias al crecimiento de la playa se ha producido, así como tanto a la fuerte pendiente que muestra su perfil.

Por una parte, cuanto más estrecha es esta zona, menos espacio para la disipación de energía del oleaje, y como se ha dicho gracias al fuerte crecimiento de la playa la anchura de esta zona ha quedado muy reducida. Por otra parte, si esta playa cuenta con una pendiente muy pronunciada, esto significa que se trata de una playa muy reflexiva, esto es, se disipa muy poca energía, reflejando gran parte del oleaje incidente.

Esta alternativa 2 tiene como objetivo paliar estas consecuencias.

La idea principal es conseguir una zona más amplia, así como obtener una playa que sea capaz de disipar mucha más energía, es decir una playa más disipativa.

Por todo lo anterior, lo que se propone en esta alternativa es dragar toda la playa que se ha formado como consecuencia de la existencia del contradique, y aprovechar todo este espacio, este retroceso significativo de la línea de costa, para proyectar una playa con un perfil más tendido que pueda disipar mayor cantidad de energía.

En la siguiente figura se muestra un plano en planta en el cual se indica qué zona se ha propuesto para ser dragada.



Figura 8.5: Nueva línea de costa propuesta

Una vez visto cómo sería el cambio en planta, se va a ver cómo sería en el alzado. Para ello se va a presentar cómo es la batimetría de la playa en la actualidad y cómo sería tras el cambio.

No está de más decir que con esta actuación además de reducir el problema de agitación también estamos paliando el problema de entrada de sedimento al puerto, puesto que estamos haciendo retroceder la línea de costa decenas de metros, espacio que será ocupado por agua.

### *Escenario actual*

Primeramente se presenta un gráfico 3D que representa la zona, y sobre este una serie de perfiles transversales.

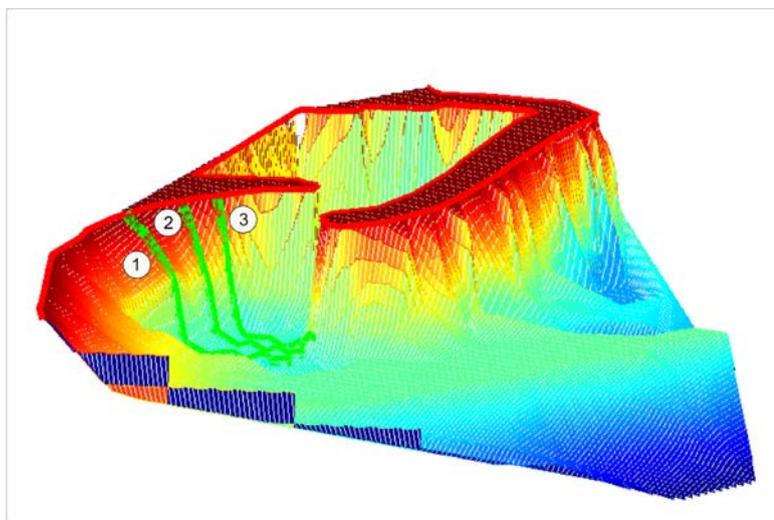


Figura 8.6: Gráfico 3D de la situación actual

Los perfiles que se muestran dibujados se detallan a continuación.

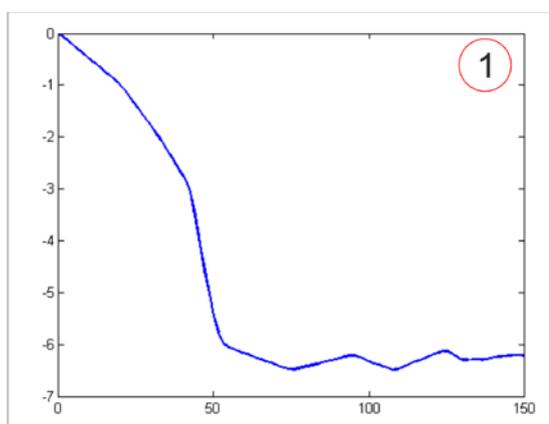


Figura 8.7: Perfil 1

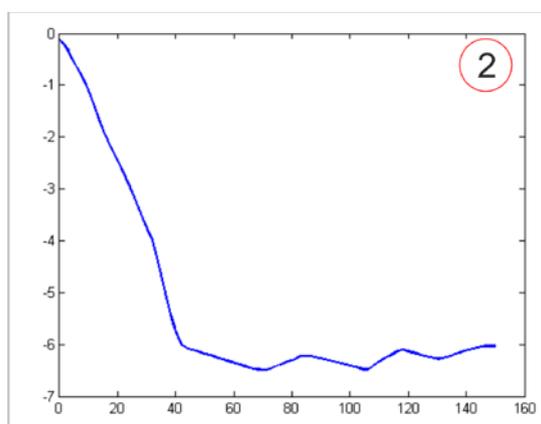


Figura 8.8: Perfil 2

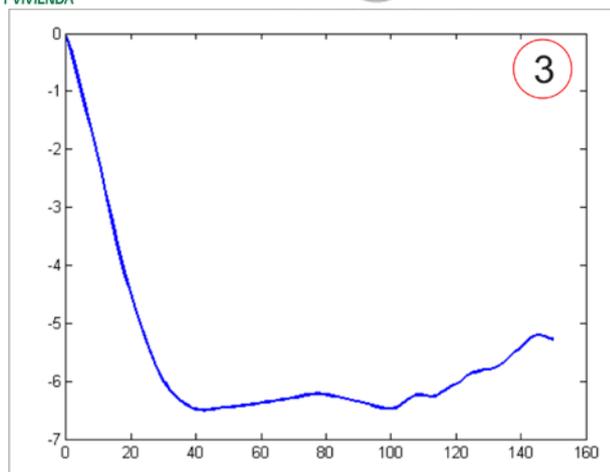


Figura 8.9: Perfil 3

### *Batimetría propuesta*

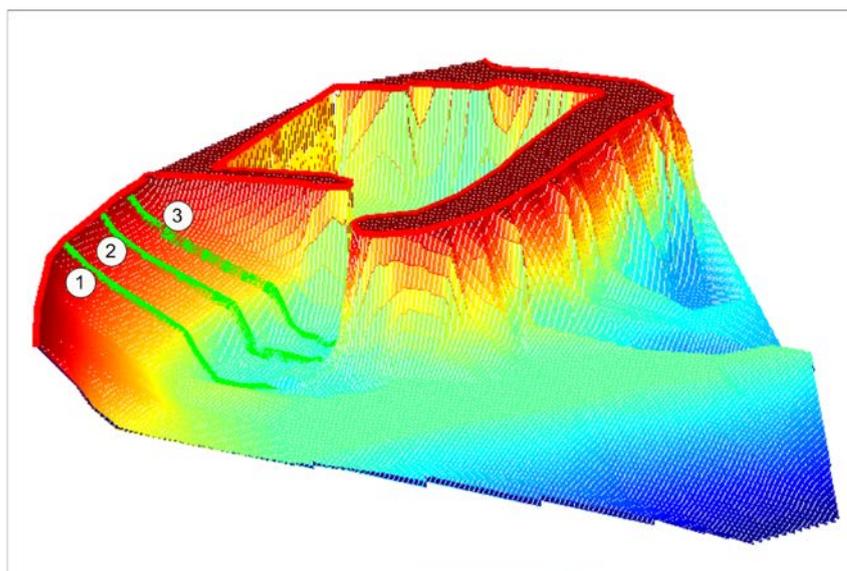


Figura 8.10: Gráfico 3D de la situación propuesta

Los perfiles que se muestran dibujados se detallan a continuación.

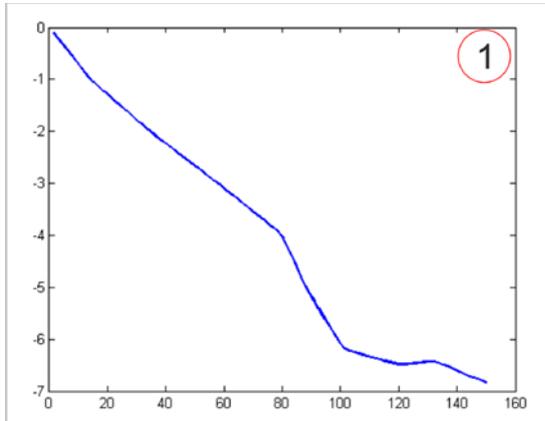


Figura 8.11: Perfil 1

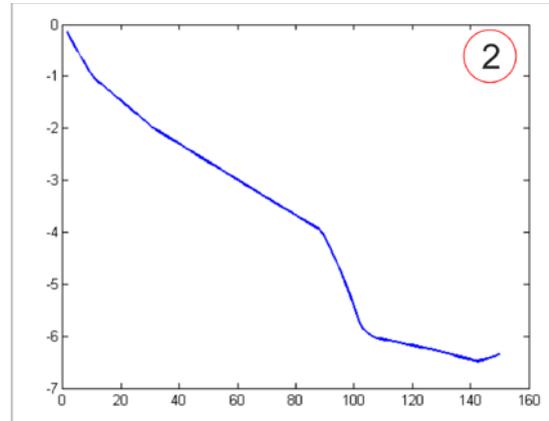


Figura 8.12: Perfil 2

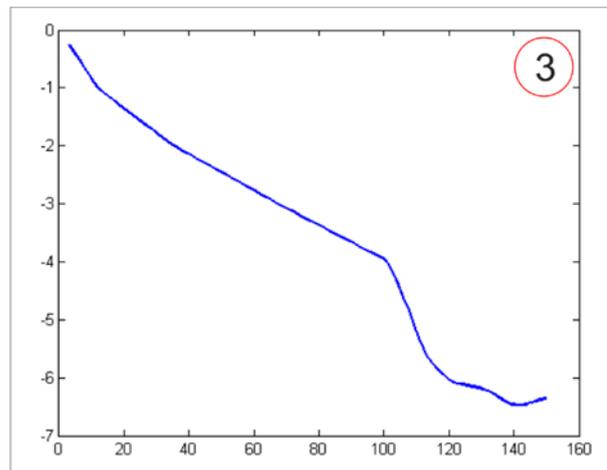


Figura 8.13: Perfil 3

A simple vista, se puede observar el gran cambio que se produce en la pendiente de la playa. Si nos fijamos en la situación actual, en promedio, con sólo avanzar 40 metros transversalmente a la línea de costa ya nos encontramos una profundidad de 6 metros. Mientras que si vemos ahora el cambio propuesto para alcanzar la profundidad de 4 metros es necesario distanciarse entre 90 y 100 metros de la orilla. Esto supone un cambio importante en la pendiente, reduciéndose ésta a más de la mitad.

En la situación actual encontramos una pendiente media del 15 %, mientras que en la solución que se propone no se alcanzan pendientes superiores al 5 %.

Número de Iribarren.

### 8.3. Alternativa 3: Construcción de espigón

En esta alternativa se propone una actuación diferente para hacer frente al problema del crecimiento de la playa del contradique y la consecuente entrada de sedimento en el puerto.

En esta ocasión se ha optado por la proyección de un pequeño espigón que frene el transporte longitudinal de sedimentos en sentido sur-norte. De este modo, los sedimentos quedarían acumulados en dicho espigón y no llegarían al punto de acumulación actual.

Los espigones son las estructuras más comunes para manejo de playas. Estos se construyen generalmente normales a la orilla para impedir el tránsito normal de la arena a lo largo de la playa. La mayoría de los espigones se construyen para estabilizar la playa contra la erosión producida por el movimiento de arena paralelamente a la orilla, sin embargo, en este caso el objetivo como anteriormente se ha comentado es diferente.

Para un buen diseño del espigón se van a incluir los siguientes parámetros: su localización en planta, definición de su longitud, espaciamiento, altura, perfil, tipo y materiales de construcción.

- Localización en planta
- Definición de longitud
- Altura
- Sección
- Tipo y materiales de construcción

#### *Definición de Longitud*

Los espigones trabajan interrumpiendo el transporte de arena a lo largo de la orilla. La mayor parte de este transporte ocurre en la zona de rompimiento de las olas. Por lo tanto, la longitud de los espigones debe establecerse basada en la zona esperada de rompimiento de olas.

Los espigones pueden clasificarse como cortos o largos dependiendo de hasta donde atraviesan la zona de rompimiento de oleaje. Si los espigones atraviesan la totalidad de la zona de rompimiento de las olas, se consideran largos, pero si solo se extienden parte de la zona de rompimiento, se consideran cortos.

Así pues, para determinar la zona de rompimiento del oleaje se ha programado una rutina en MATLAB, que basada en la teoría lineal permite obtener la zona aproximada donde rompe el oleaje para cada estado de mar.

Para ello se ha escogido un estado de mar de los más desfavorables y el resultado conseguido ha sido:



Figura 8.14: Punto de rotura de un oleaje de  $H=2.5m$  y  $T=8s$

Para un estado de mar de  $H = 2,5mT = 8sDir = 80^\circ$  la distancia aproximada de la rotura a la línea de playa es de 25 metros. Vemos que es una distancia pequeña, lo cual se debe a la fuerte pendiente con la que cuenta el perfil de la playa. Así esta no va a ser una distancia que condicione la longitud del espigón. De tal manera que teniendo en cuenta la zona en la que nos encontramos y la función del espigón se proyecta con una longitud de **90 metros**.

### *Localización en planta*

Para emplazar el espigón se han tenido en cuenta los conceptos básicos de dinámica litoral.

En cuanto a su disposición a lo largo de la línea de playa, se pretende colocarlo en torno al punto neutro de la playa. Este punto es en el cual la playa deja de ser estable y a partir del cual comienza la espiral logarítmica. Situados en este punto, la posición relativa de la obra marítima respecto a la línea de playa sería perpendicular.

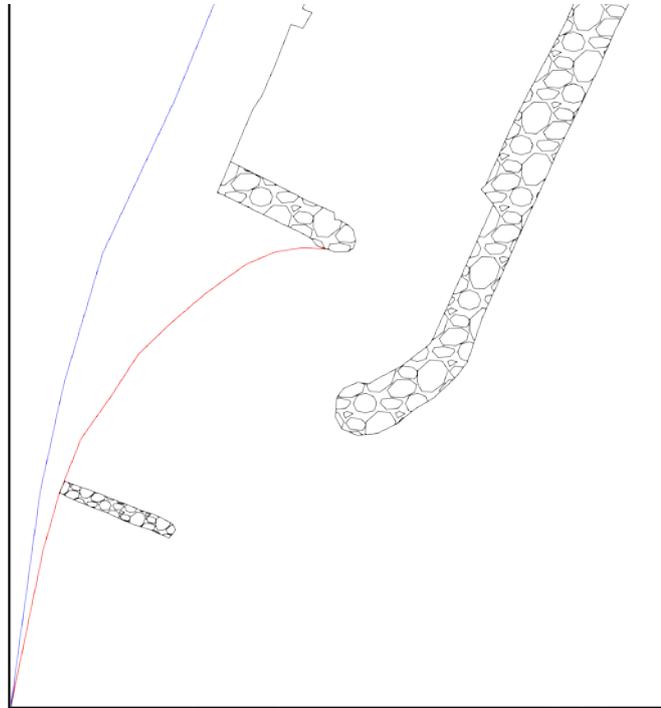


Figura 8.15: Situación en planta del espigón proyectado