

**ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA REDACCIÓN DE ESTUDIO DE DINÁMICA LITORAL PARA EL DISEÑO Y PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BY-PASS DE ARENA N-S EN EL PUERTO DE GRANADILLA**



## ÍNDICE



## ÍNDICE

ANTECEDENTES .....	1
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivos del estudio .....	1
1.2. Descripción general de la zona de estudio y del nuevo puerto.....	1
1.3 Estudios e información existente .....	7
1.4 Organización del documento .....	9
Capítulo 2. METODOLOGÍA .....	1
2.1. Base de datos.....	3
2.1.1 Batimetría, geofísica y estudios biónómicos .....	3
2.1.2 Boyas .....	4
2.1.3 Datos de altímetro de satélite.....	5
2.1.4 Mareógrafos .....	7
2.1.5 Bases de datos numéricas .....	10
2.1.5.1 Reanálisis atmosférico .....	11
2.1.5.2 Reanálisis de oleaje.....	12
2.1.5.3 Base de datos de corrientes .....	18
2.1.6 Datos para la estimación del aporte sedimentario de los barrancos .....	22
2.2. Caracterización del clima marítimo .....	23
2.2.1 Calibración del oleaje .....	24
2.2.2 Transferencia del oleaje a aguas costeras .....	27
2.2.2.1 Selección de las mallas .....	28
2.2.2.2 Clasificación de los estados de mar.....	29
2.2.2.3 Propagación del oleaje a aguas someras .....	37
2.2.2.4 Reconstrucción de series temporales horarias de parámetros espectrales del oleaje .....	41
2.2.3 Validación del oleaje en aguas costeras .....	45

2.3 Caracterización de las corrientes .....	48
2.3.1 Obtención de las corrientes en aguas costeras .....	49
2.3.1.1 Validación de la aplicación de detalle .....	54
2.4 Estimación de aportes sólidos de origen fluvial .....	56
2.5 Cálculo del transporte sedimentario potencial.....	63
2.5.1 Formulación de transporte sólido litoral .....	65
 Capítulo 3. RESULTADOS.....	 1
3.1 Variación del clima marítimo.....	1
3.1.1 Variación del oleaje .....	1
3.2 Variación del régimen de corrientes .....	7
3.3 Variación del transporte potencial.....	12
3.4 Influencia de las variaciones estacionales del clima marítimo y del tamaño del sedimento sobre la dinámica sedimentaria .....	18
3.5 Modelo conceptual de funcionamiento del sistema sedimentario.....	23
3.6 Cálculo del transporte real.....	27
3.6.1 Aporte de los barrancos.....	28
3.6.2 Aportes de los fondos de Maërl .....	34
3.6.3 Estimación del transporte real en función de los aportes de sedimento .....	35
3.7 Conclusiones .....	39
 Capítulo 4. CONCLUSIONES .....	 1
 Capítulo 5. REFERENCIAS .....	 1





## **ANTECEDENTES**



## ANTECEDENTES

En Junio de 2011 la Autoridad Portuaria de Tenerife y el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria) firmaron un contrato de **“ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA REDACCIÓN DE ESTUDIO DE DINÁMICA LITORAL PARA EL DISEÑO Y PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BY-PASS DE ARENA N-S EN EL PUERTO DE GRANADILLA”**. En este documento se resumen los trabajos, metodologías y resultados obtenidos en el estudio de dinámica litoral y sedimentaria realizado en la zona de influencia de la obra proyectada.

Este informe ha sido desarrollado por los siguientes investigadores del Instituto de Hidráulica Ambiental “IH Cantabria”:

- Raúl Medina Santamaría, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Catedrático del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.
- Sonia Castanedo Bárcena, Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos, Profesora titular del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.
- Antonio Espejo Hermosa, Doctor por la Universidad de Cantabria, Investigador contratado de la Universidad de Cantabria
- Alba Cid Carrera, Licenciada en Ciencias del Mar, Investigadora predoctoral de la Universidad de Cantabria.
- Jorge Rojo Gómez, Ingeniero de Minas, Investigador predoctoral de la Universidad de Cantabria.

Santander, Enero de 2012

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
Investigador Principal



## Capítulo 1.

## INTRODUCCIÓN



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Objetivos del estudio

El objetivo general de este estudio es evaluar hasta qué punto el transporte litoral existente en la plataforma marina donde se ubicará el puerto de Granadilla, se verá afectado por la construcción del citado puerto.

Para alcanzar el objetivo planteado, en este documento se presenta el estudio de dinámica litoral y sedimentaria realizado en la zona de estudio, para dar respuesta a los siguientes aspectos planteados por la Autoridad Portuaria de Tenerife en su pliego de prescripciones técnicas:

- Volumen de arena que en la situación previa y tras la construcción del Puerto entra en la zec Seadales del Sur de Tenerife.
- Variación del volumen transportado atendiendo a las distintas condiciones de clima marítimo y estacionales de la zona.
- Zonas de acumulación de sedimentos tras la construcción del Puerto y velocidad con la que se depositan las arenas.

Para realizar este trabajo, en primer lugar, se han recopilado y analizado todos los estudios y la información generada hasta la fecha para la costa de Granadilla. A continuación, se ha implementado, en la zona de estudio, la metodología, los modelos numéricos y las bases de datos, desarrollados por el IH Cantabria.

## 1.2 Descripción general de la zona de estudio y del nuevo puerto

El puerto de Granadilla (que se ubicará a unos 10 km del núcleo de población del mismo nombre), se encuentra en la comarca Sur-Este de la isla de Tenerife (véase la figura 1.1), denominada Abona, que se extiende desde la ladera del valle de Güímar hasta el Barranco de Troya. En ella reside aproximadamente un 15% de la población insular y con 614 km<sup>2</sup> es la comarca con mayor superficie (30 % de la Isla), coexistiendo características físicas y socioeconómicas muy diferentes.

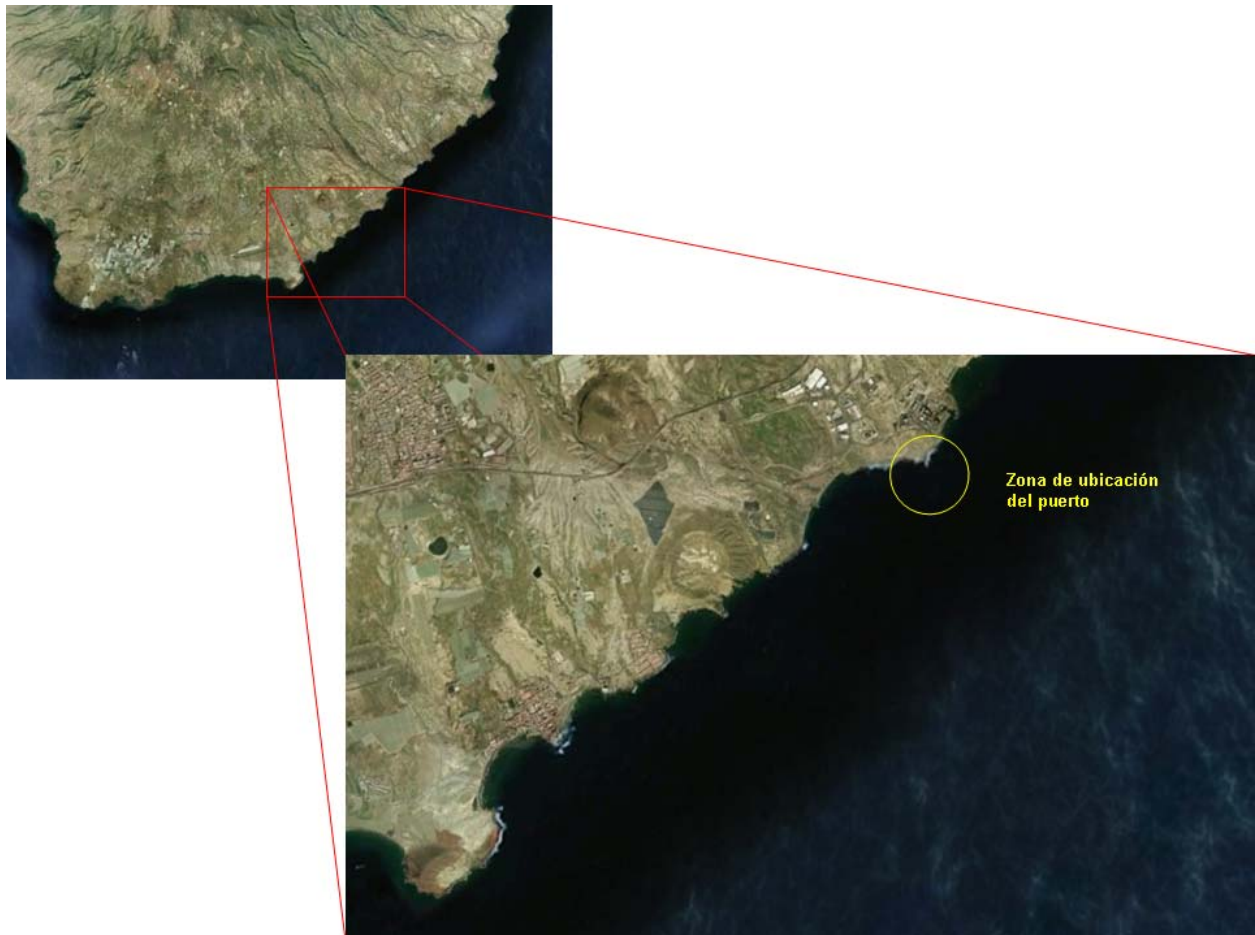


Figura 1.1. Zona de estudio.

Las Islas Canarias en general, están muy influenciadas por las altas presiones subtropicales. El predominio y frecuencia de los alisios, con una variación anual muy marcada, determinan el clima en todo el Archipiélago.

La zona de Granadilla en particular, presenta una costa alineada en dirección NE-SW, con una batimetría longitudinalmente discontinua debido a la presencia de numerosos cañones y sumideros submarinos (véase la figura 1.2).

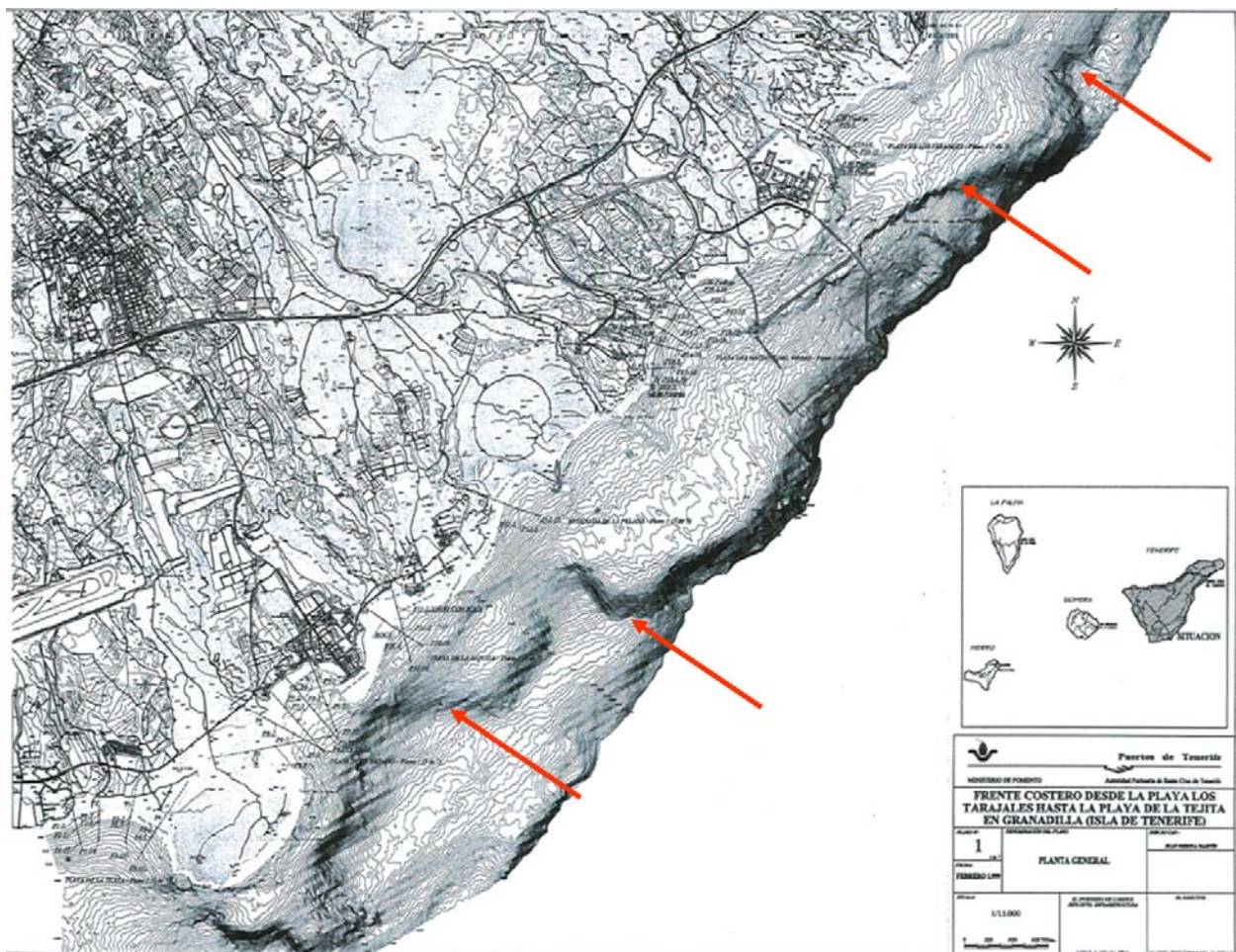


Figura 1.2. Batimetría en la costa de Granadilla. Las flechas rojas marcan discontinuidades en la batimetría.



Como se analizará más adelante, este hecho, unido a las características geomorfológicas presentes en los fondos de la zona de estudio (véase la figura 1.3), condicionarán en gran medida los resultados obtenidos en el presente trabajo.

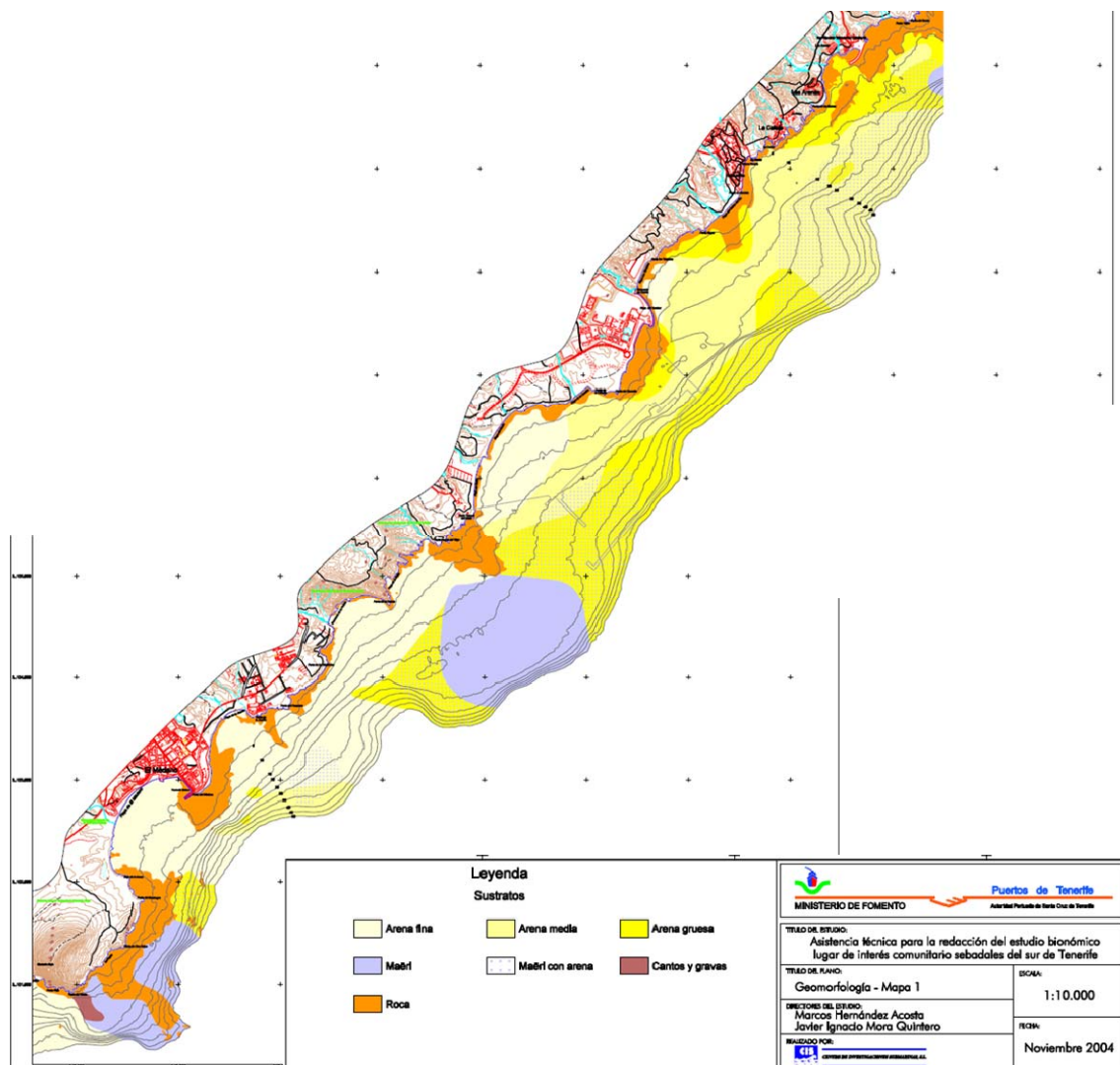


Figura 1.3. Geomorfología del fondo en la costa de Granadilla.

En la figura 1.4 se presenta un mapa de la zona de estudio con la nomenclatura que se utilizará en este informe.

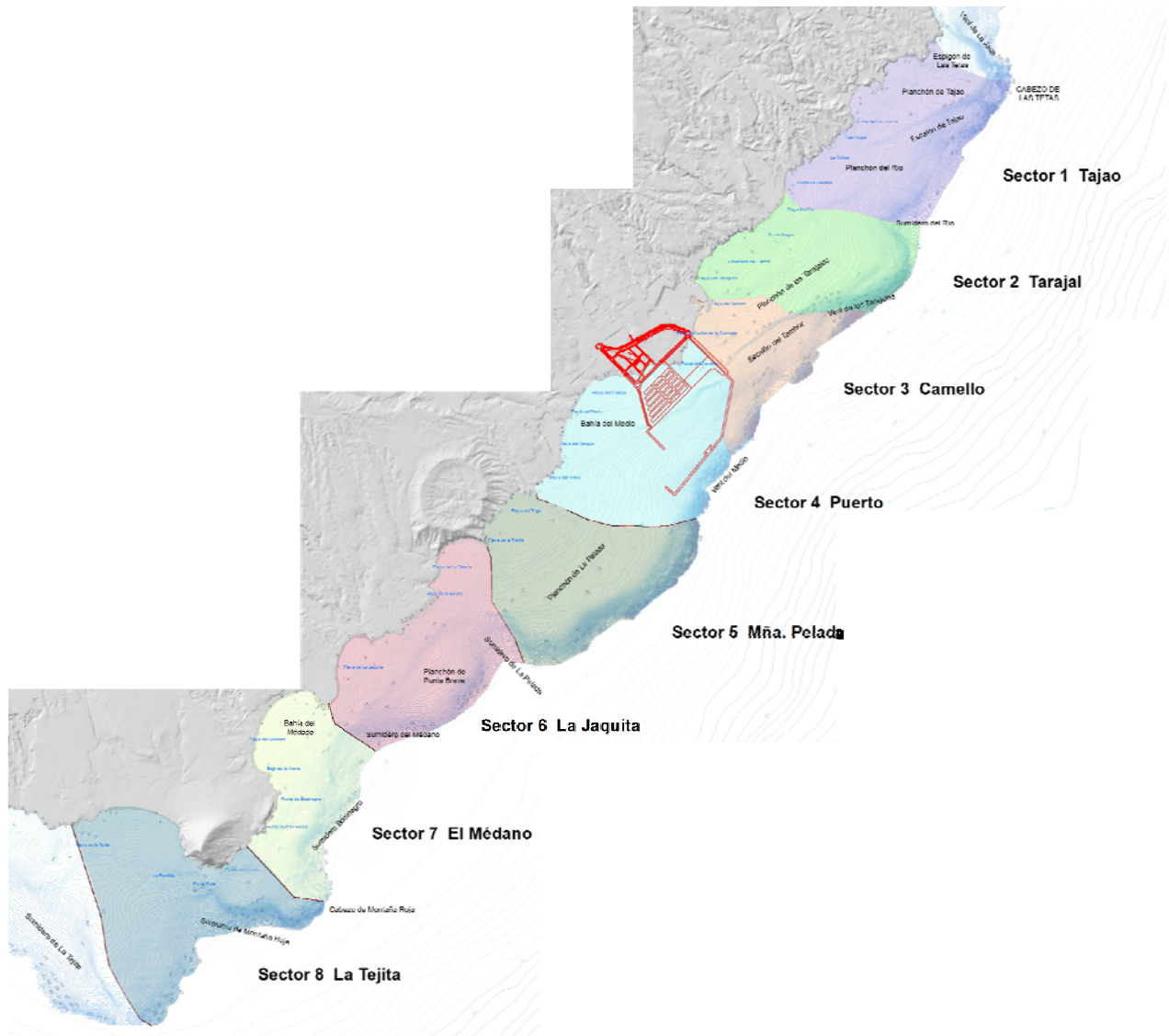


Figura 1.4 Nomenclatura que se utilizará en este estudio (fuente: OAG)





### 1.3 Estudios e información existente

Para la realización de este estudio se ha analizado la siguiente información suministrada por la Autoridad Portuaria de Tenerife:

- Batimetría del frente costero desde la Playa de los Tarajales hasta la Playa de la Tejita en Granadilla (Isla de Tenerife), realizada por Puertos de Tenerife en informada en Febrero de 1999
- Estudio batimétrico y geofísico e inventario gráfico de los fondos del puerto de Granadilla y su entorno. Realizado por Ecometría. Diciembre 2001
- Estudio batimétrico, clasificación de fondos, bionomía e inventario gráfico del área sur del Puerto de Granadilla, desde Montaña Pelada a la Playa de la Tejita. Realizado por Ecometría. Noviembre 2002
- Levantamiento batimétrico de las playas de Ensenada de La Pelada, La Jaquita, El Médano y La Tejita. AEMON. Octubre 2004
- Cuarta entrega de Levantamiento Batimétrico de Las Playas de Ensenada de La Pelada, La Jaquita, El Médano y La Tejita. AEMON. Febrero 2005
- Documento de 5ª campaña de: Levantamiento batimétrico de las playas de Ensenada de La Pelada, La Jaquita y El Médano. AEMON. Agosto 2007
- Inspección del estudio batimétrico del ámbito marino del proyecto del contradique del Puerto de Granadilla. PROMAR. Julio 2009
- Estudio batimétrico del dique de Granadilla (Puerto de Granadilla-Tenerife). PROMAR. Mayo 2011
- Asistencia Técnica para la Redacción del Estudio de Dinámica Litoral del Puerto de Granadilla. Trabajos de campo, febrero 1999. HIDTMA. Noviembre 1998
- Asistencia Técnica para la Redacción del Estudio de Dinámica Litoral del Puerto de Granadilla. Informe sedimentológico para valorar la incidencia en la costa del nuevo puerto de Granadilla. De La Nuez Pestaña, J. Noviembre 1998
- Asistencia Técnica para la Redacción del Estudio de Dinámica Litoral del Puerto de Granadilla. Realización de 50 sondeos por el método de vibración y 100 lanzas de agua en las islas de Tenerife (Puertos de Granadilla e Isora). Iberinsa. Noviembre 2008.

- Ensayos granulométricos de muestras en playas del litoral de Granadilla (Isla de Tenerife). Autoridad Portuaria de Tenerife. Febrero 1999
- Estudio de dinámica litoral en el Puerto de Granadilla: Modelizaciones hidrodinámicas y de dispersión. HIDTMA. Abril 1999
- Asistencia Técnica para la Redacción del Estudio de Dinámica Litoral del Puerto de Granadilla. Ensayos granulométricos de muestras en playas del litoral de Granadilla (Isla de Tenerife) realizada por Puertos de Tenerife e informada en marzo de 1999. ICINCO. Marzo 1999
- Granadilla Port. Coastal Impact Study. WL | delft hydraulics. Junio 1999
- Asistencia Técnica para la redacción del estudio bionómico lugar de interés comunitario sebadales del sur de Tenerife. CIS. Noviembre 2004
- Documento de estudio geotécnico del Puerto de Granadilla. Iberinsa. Marzo 2005
- Estudio de correlación de las granulometrías de Granadilla y El Médano. HIDTMA. Junio 2005
- Estudios petrográficos y ensayos de granulometría y contenido de finos de muestra de arenas de las playas de La Tejita, El Médano, La Jaquita y la Pelada de Granadilla de Abona. ICINCO. Octubre 2005
- Instalación de trampas de sedimento previo al inicio de las obras incluidas en el Proyecto del Puerto de Granadilla. Descripción del trabajo y equipos. PROMAR Investigaciones Marinas. Octubre 2007
- Revisión y Sustitución (I) (II) y (III) de trampas de sedimentos instaladas previo al inicio de las obras incluidas en el Proyecto del Puerto de Granadilla. Descripción del trabajo y equipos. PROMAR Investigaciones Marinas. Octubre 2008
- Cartografía bionómica del borde litoral de Tenerife. Cabildo de Tenerife. Noviembre 2006
- Estudio bionómico del lugar de interés comunitario (LIC) Sebadales del Sur de Tenerife. CIMA. Diciembre 2008
- Seguimiento ambiental del Puerto de Granadilla en fase de obras. Informe anual 2010. OAG. 2010

- Datos de corrientes medidos por la Boya de Granadilla. Observatorio Ambiental Granadilla. Octubre 2010 – Septiembre 2011

## 1.4 Organización del Documento

El documento está organizado de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se describe la metodología empleada para el estudio de la posible afección del puerto de Granadilla sobre la dinámica litoral y sedimentaria de la zona. En este capítulo se incluye la metodología para obtener el clima marítimo y las corrientes de la zona, así como el procedimiento seguido para evaluar las variaciones causadas por el nuevo puerto en el transporte litoral.

En el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos. Estos se presentan en forma de mapas para las diferentes variables analizadas atendiendo, primordialmente, a detectar diferencias entre las dos situaciones planteadas: (1) actual y (2) con puerto.

En el capítulo 4 se da respuesta a las cuestiones concretas planteadas por la Autoridad Portuaria de Tenerife, entre las que destacan: dar una estima del transporte real y de la arena que entra en la ZEC Seadales del Sur de Tenerife.

En el capítulo 5 se incluyen las referencias utilizadas en el trabajo.



## Capítulo 2.

## METODOLOGÍA



## 2. METODOLOGÍA

La zona objeto de estudio se localiza en la costa sureste de la isla de Tenerife. Concretamente, en este trabajo se analiza la dinámica litoral del tramo de costa susceptible de ser afectado por la construcción del puerto. La localización propuesta para la construcción del puerto es la Punta del Camello, donde actualmente existe una pequeña dársena que da servicio al Polígono Industrial de Granadilla. En la figura 2.1 se muestra la zona de estudio.

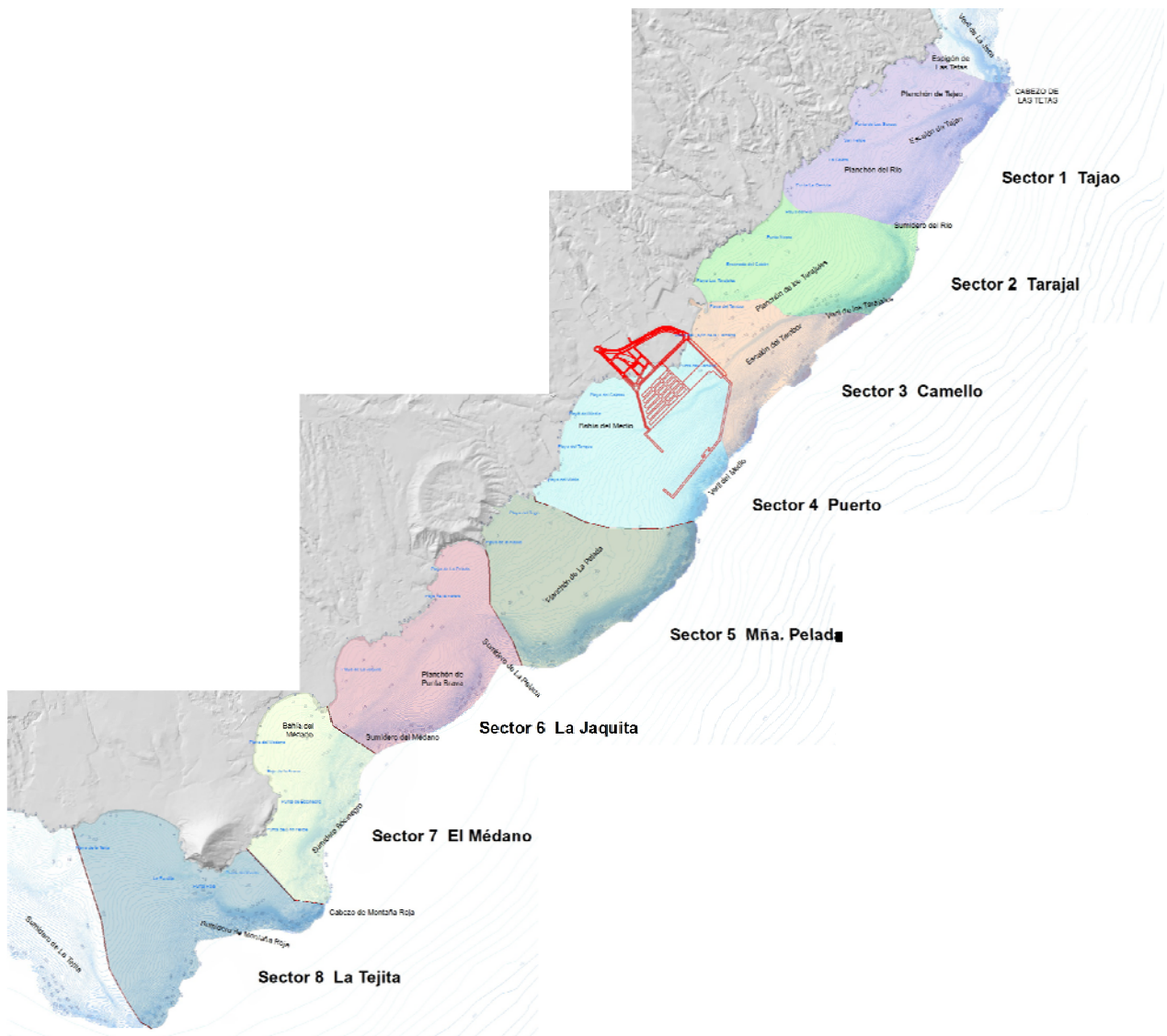


Figura 2.1 Localización de la zona de estudio (fuente: OAG)

Como se indica en el capítulo 1, el principal objetivo de este trabajo es el análisis de la afección del puerto proyectado a la dinámica litoral, en concreto, se estudiarán las modificaciones que se puedan producir en la actual dinámica de transporte de sedimentos.

Para alcanzar dicho objetivo, se necesita realizar un análisis detallado de los factores que afectan al movimiento de los sedimentos, esto es, el oleaje y las corrientes. El régimen de oleaje en la zona de estudio determinará la puesta en movimiento del material, mientras que las corrientes marcarán la dirección de transporte del mismo. Por tanto, a lo largo del presente capítulo se realizará una descripción exhaustiva de las bases de datos, modelos numéricos y procedimientos utilizados para obtener las características del clima marítimo y de las corrientes en la zona de estudio, puesto que, como se ha mencionado, son los factores que determinarán finalmente el transporte de sedimentos.

Los análisis se efectuarán tanto para la situación actual (sin puerto) como para la situación con puerto, evaluándose el potencial efecto del puerto sobre la dinámica litoral a través del cálculo de la diferencia entre ambas situaciones.

En la figura 2.2 se muestra un esquema con la metodología que se aplica en este trabajo y en los apartados siguientes se desarrolla cada uno de los aspectos más relevantes del proceso seguido.

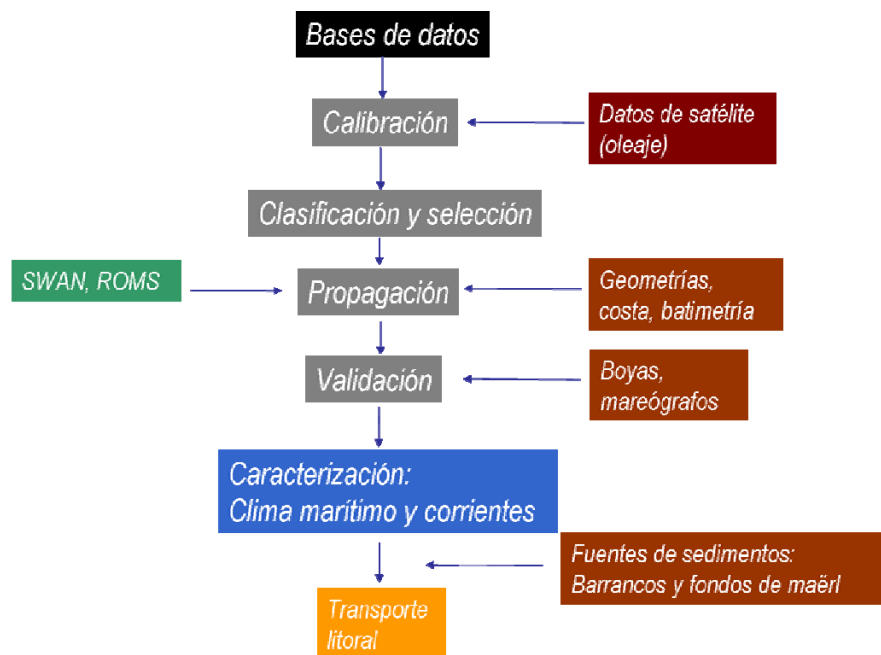


Figura 2.2. Metodología aplicada en este estudio



## 2.1 Bases de datos

### 2.1.1 Batimetría, geofísica y estudios bionómicos

La información sobre el fondo marino es clave en cualquier estudio de corrientes y de propagación del oleaje. En su viaje hacia la costa, el oleaje y las ondas largas (marea astronómica, marea meteorológica) están condicionados por los forzamientos a los que son sometidos (viento, presión y fuerzas gravitacionales del Sol y la Luna) y por las irregularidades del fondo marino y la costa. En profundidades indefinidas son importantes las irregularidades a gran escala, como cañones o grandes cabos. Sin embargo, en profundidades intermedias y reducidas la dinámica litoral queda fundamentalmente gobernada por las irregularidades de la batimetría a menor escala, así como por la presencia de corrientes fluviales, de marea o generadas por la acción del viento.

En este estudio se han utilizado varias bases de datos de batimetría. Por un lado, las batimetrías globales: ETOPO2 y "General Bathymetric Chart of the Oceans" (GEBCO) y por otro, las cartas náuticas del litoral español disponibles en la base de datos BACO (IH Cantabria) y batimetría de detalle proporcionada por la Autoridad Portuaria de Tenerife.

La base de datos ETOPO2 es un modelo global de la superficie terrestre de resolución 2 minutos que integra topografía terrestre y batimetría de los océanos. Los datos pertenecen al National Geophysical Data Center (NOAA) y ha sido construida a partir de diversas fuentes globales y regionales (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>). La batimetría GEBCO es una batimetría global con resolución de 1 minuto disponible en el British Oceanographic Data Centre (BDOC). Ésta, al igual que la anterior, ha sido construida a partir de la combinación de datos de calidad contrastada procedentes de sondas de barcos y satélite.

La batimetría proporcionada por las cartas náuticas y las de detalle son de gran utilidad puesto que añaden elementos meso y micro escalares importantes en la características locales de la dinámica litoral. El ensamblaje de ambas bases de datos se ha llevado a cabo tomando como referencia el 0 de la carta náutica correspondiente. En la figura 2.3 se muestra la batimetría utilizada en el Archipiélago Canario.



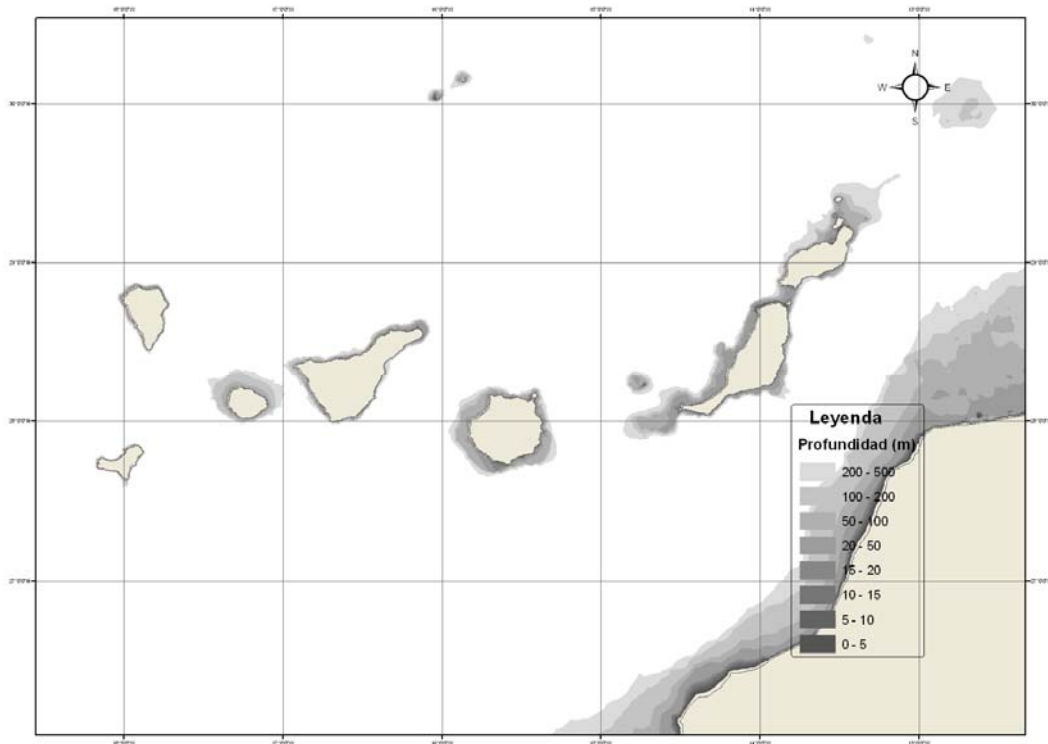


Figura 2.3. Batimetría del Archipiélago Canario

En las mallas de detalle se ha incluido la batimetría proporcionada por la Autoridad Portuaria de Tenerife (véase el apartado 1.3 del capítulo 1). Además, en la alternativa que considera la existencia del Puerto, se ha introducido la geometría de la obra.

Para el estudio de los fondos y para la estimación del aporte de sedimentos por el maërl, se han utilizado los estudios geofísicos y bionómicos realizados en los últimos años en la costa de Granadilla y proporcionados como información de partida por la Autoridad Portuaria de Tenerife (véase el apartado 1.3 del capítulo 1).

### **2.1.2 Boyas**

Las boyas son el instrumento de medida de oleaje in situ más extendido, pues proporcionan la información más completa y fiable en una posición fija.

El Organismo Público Puertos del Estado (OPPE) dispone de redes fijas de medida en aguas profundas (REDEXT) y aguas costeras (REDCOS) a lo largo del litoral español y almacena espectros frecuenciales  $S(\omega)$  y direccionales  $S(\omega, \theta)$  y parámetros estadísticos y espectrales de los estados de mar como la altura de ola significativa ( $H_s$ ), el periodo

medio ( $T_m$ ), el periodo de pico ( $T_p$ ), la dirección media del oleaje ( $\theta_m$ ), la velocidad del viento ( $W$ ), y la dirección media del viento ( $\beta_w$ ).

Las estaciones de la red de aguas profundas (REDEXT) que tienen medidas de corrientes son Bilbao-Vizcaya, Santander-IEO (AGL), Cabo de Peñas, Villano-Sisargas, Golfo de Cádiz, Cabo de Gata, Cabo de Palos, Valencia, Tarragona, Dragonera, Gran Canaria y Tenerife Sur.

Además, en este estudio, se dispone de una campaña de medida de oleaje en aguas someras localizada en las inmediaciones del futuro puerto. Esta campaña permite validar los resultados obtenidos al trasladar el oleaje desde profundidades indefinidas hasta la costa. La boya escalar tipo Datawell esta fondeada a una profundidad de 22 m, registrando el oleaje desde 2007 hasta la actualidad.

Así mismo, se dispone de los datos de corrientes de la Boya de Granadilla que gestiona el Observatorio Ambiental Granadilla (OAG). Los datos abarcan el periodo comprendido entre octubre de 2010 y octubre de 2011 y se utilizarán para validar los resultados obtenidos con el modelo numérico.

### **2.1.3 Datos de altímetro de satélite**

La única fuente de información instrumental que permite dar información global de oleaje es la procedente de los satélites, que de forma remota (con órbitas del orden de los 1000 km por encima de la superficie terrestre) consiguen determinar parámetros del oleaje como  $H_{m0}$  con errores similares a los de las boyas (Caires y Sterl, 2003). Los satélites pueden llevar distintos instrumentos, pero son los satélites con altímetros de radar (RA, Radar Altimeter) los que mejor determinan y más tiempo llevan usándose. En la figura 2.4 se presenta la distribución espacial de diversas bases de datos de satélites adquiridas por IH Cantabria a lo largo del Atlántico Norte y del Mediterráneo. Esta base de datos se utiliza para corregir los datos del reanálisis del oleaje.

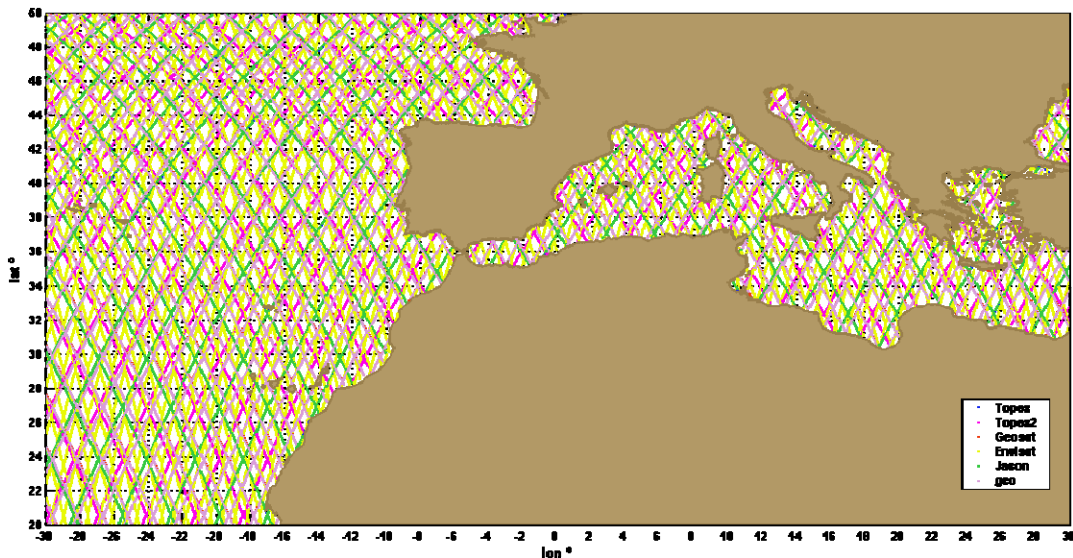


Figura 2.4. Distribución espacial de diversas bases de datos de satélites.

Los altímetros de los satélites son radares que transmiten cortos pulsos hacia la superficie terrestre. El tiempo de retorno de la señal así como la modificación de su frecuencia después de la reflexión del pulso en la superficie del mar, son valores que se pueden relacionar fácilmente con el nivel del mar o la rugosidad superficial. De esta manera es posible determinar variables oceanográficas de vital importancia como la marea meteorológica, la altura de ola o la velocidad del viento.

En contraposición a la multitud de ventajas y novedades que ofrece, la altimetría de los satélites presenta un inconveniente relacionado con la resolución de los datos medidos, tanto espacial como temporal. El satélite orbita alrededor de la tierra con una trayectoria fija, tardando entre 10 y 15 días en pasar dos veces por un mismo punto, por tanto, los datos de satélites son idóneos para estimar el régimen medio de oleaje en una zona, sin embargo, determinar el régimen extremal a partir de estos datos requiere el empleo de técnicas estadísticas complejas.

El uso principal que se suele hacer de estos datos es como complemento de los datos medidos por boyas, visuales o de reanálisis, siendo en este último caso de vital importancia, pues permite un calibrado espacial de los campos de oleaje obtenidos por los modelos numéricos.

### 2.1.4 Mareógrafos

En España existen varias instituciones que disponen de mareógrafos. Por ejemplo, el Instituto Español de Oceanografía (IEO), Puertos del Estado (Clima Marítimo) (PE (CM)), el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

En la figura 2.5 y en la tabla 2.1 se muestra, respectivamente, la red mareográfica española y la institución responsable de cada estación.

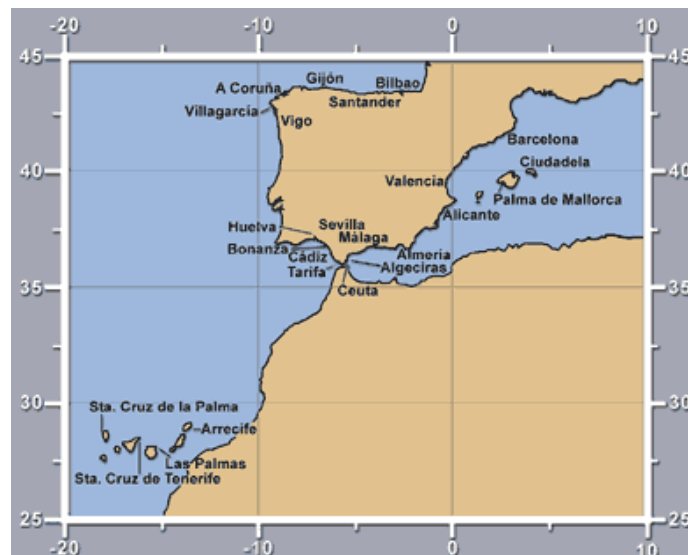


Figura 2.5. Red de mareógrafos

(Fuente: [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geodesia/rima/](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geodesia/rima/))

**Relación de estaciones y su institución**

ESTACIÓN	INSTITUCIÓN
Bilbao	PE (CM)
Santander	IEO / PE (CM)
Gijón	PE (CM)
Coruña	IGN / IEO / PE (CM)
Villagarcía	PE (CM)
Vigo	IEO / PE (CM)
Huelva	PE (CM)
Sevilla	PE (CM)
Bonanza	PE (CM)
Cádiz	IEO / IHM
Tarifa	IEO
Algeciras	IEO
Málaga	IEO / PE (CM)
Almería	IGN
Alicante	(I-II) IGN
Valencia	PE (CM)
Barcelona	PE (CM)
Ciudadela	IEO
Palma de Mallorca	IEO
Ceuta	IEO
Arrecife	IEO
Las Palmas	IEO / PE (CM)
Sta. Cruz de Tenerife	IGN / PE (CM)
Sta. Cruz de Palma	IEO

Tabla 2.1. Institución responsable de cada mareógrafo

(Fuente: [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geodesia/rima/](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geodesia/rima/))

El mareógrafo de Granadilla pertenece a la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado. Entró en funcionamiento en enero de 2004 y continúa midiendo en la actualidad. En la figura 2.6 se puede ver su ubicación y la información relativa al mismo.

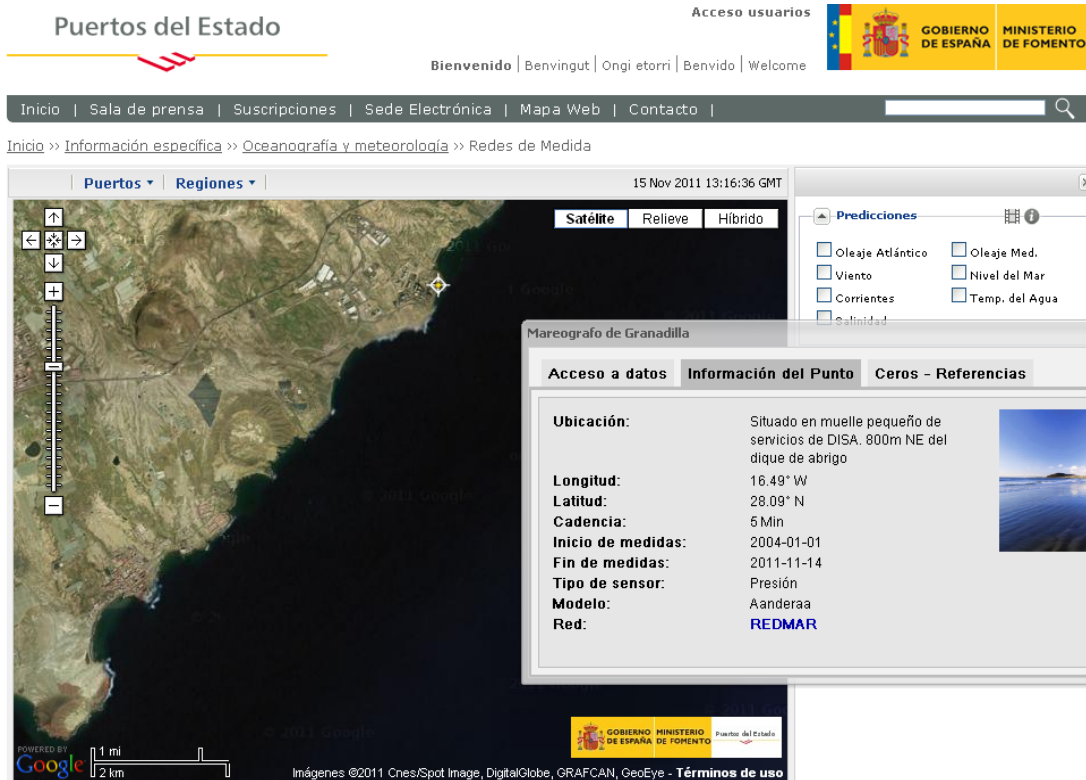


Figura 2.6. Información del mareógrafo de Granadilla

(Fuente: [http://www.puertos.es/oceanografia\\_y\\_meteorologia/redes\\_de\\_medida/index.html](http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html))

La Red de Mareógrafos de Puertos del Estado está en funcionamiento desde 1992. El objetivo es la monitorización del nivel del mar en tiempo real y la generación de series históricas para su posterior explotación. En la actualidad está constituida por 6 mareógrafos acústicos SONAR, 3 mareógrafos de presión Aanderaa y 33 sensores radar MIROS. Estos últimos además proporcionan datos de agitación.

Cada puerto define un nivel de referencia o cero conveniente para la realización de obras, dragados, etc.; que se conoce con el nombre de cero del puerto y que normalmente coincide con la mínima bajamar. En las propagaciones de oleaje en el Atlántico (Cantábrico, Canarias, Atlántico Sur) se han utilizado 3 niveles, referenciados al cero de cada puerto, a partir de los cuales se interpolan los demás. Estos niveles del mar han sido:

- Bajamar: nivel 0 m, coincidente con el Cero del Puerto (C.P.).
- Media marea: correspondiente al nivel medio del mar.
- Pleamar máxima viva equinoccial.

A partir de los datos de los distintos mareógrafos de la red de Puertos del Estado se realiza un análisis armónico de la marea que permite obtener las componentes más relevantes. Con la información de las componentes armónicas, se puede generar la serie temporal que abarca el mismo periodo de tiempo (1958 – 2008) que los datos de reanálisis de la base de datos de oleaje, GOW. De esta manera se puede asociar un nivel de mar (debido sólo a la marea astronómica) a cada estado de mar, y reconstruir la serie de oleaje propagada hasta aguas someras.

El nivel de la marea se calcula como la suma de las componentes armónicas a través de la ecuación:

$$\eta = a_0 + \sum_{i=1}^8 a_i \cos(\omega_i t - \phi_i)$$

donde:

$\eta$  es la cota del nivel del mar

$a_0$  es el nivel medio respecto al cero del puerto

$a_i$  es la amplitud de la  $i$ -ésima componente

$\omega_i$  es la frecuencia de la  $i$ -ésima componente

$t$  es el tiempo

$\phi_i$  es la fase de la  $i$ -ésima componente

### **2.1.5 Bases de datos numéricas**

Para caracterizar las condiciones oceanográficas en una zona, son necesarios datos históricos de las variables geofísicas de interés. Estos datos deben tener una gran calidad y presentar una amplia cobertura tanto espacial como temporal.

Los datos instrumentales hasta ahora descritos suelen mostrar una serie de carencias, entre ellas, no tener una resolución espacial o temporal adecuada, no tener una distribución homogénea o no tener series de registros con la suficiente duración.

Por todo ello, tras el desarrollo de modelos numéricos capaces de reproducir los procesos físicos que se dan en el medio marino, se ha empezado a utilizar dichos modelos numéricos para reproducir las situaciones climáticas y oceanográficas de los últimos 50-60 años. Estas bases de datos generadas numéricamente, y calibradas y validadas con datos



instrumentales y de satélite, se denominan datos de reanálisis (en inglés *hindcast*). Si éstos son de buena calidad, representan unos datos muy valiosos dada su gran cobertura espacial y temporal.

A continuación se describen los datos de reanálisis disponibles para la zona de estudio.

### **2.1.5.1 Reanálisis Atmosférico**

Es importante señalar que para poder realizar un reanálisis de oleaje es necesario disponer de datos de reanálisis atmosféricos, en concreto de vientos en superficie (a 10 m de altura). Las simulaciones de la circulación atmosférica a nivel global presentan una resolución espacial y temporal relativamente grosera (entre 1.125° y 2.5°, con resoluciones horarias entre 3 y 6 horas cubriendo periodos de tiempo de entre 20 y 60 años). Estas simulaciones numéricas se han llevado a cabo teniendo en cuenta la información disponible de datos instrumentales atmosféricos. De esta manera, las bases de datos procedentes de reanálisis numérico atmosférico constituyen una fuente de información valiosa en el campo de los estudios climáticos. Actualmente, los reanálisis globales más populares son: el ERA-40, desde 1957 hasta el 2002 y el ERA-Interim, desde 1989 hasta la actualidad, ambos realizados por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF); el JRA-25, desde 1979 hasta la actualidad, de la Japan Meteorological Agency (JMA); y el NCEP/NCAR Reanalysis Project, desde 1948 hasta la actualidad, realizado por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR). Este último es uno de los reanálisis globales que cubren un mayor periodo de tiempo, mientras que el ERA-Interim y el JRA-25 constituyen las fuentes de información con mejor incorporación de datos instrumentales mediante asimilación de información satelital.

Para la realización de la parte de clima marítimo, se han seleccionado los campos de vientos procedentes del reanálisis global NCEP/NCAR. Los campos de viento a 10 metros de altura seleccionados han sido utilizados como forzamientos para la generación del reanálisis de oleaje. El reanálisis global NCEP/NCAR ha sido ampliamente empleado como forzamiento de diferentes reanálisis de oleaje (regionales y globales). Es el reanálisis atmosférico de mayor duración (más de 60 años) y posee una resolución espacial que permite la correcta generación del oleaje en las zonas extratropicales (Swail, Val R., Andrew T. Cox, 2000).

Los campos de viento procedentes del reanálisis NCEP/NCAR 1 presentan una resolución temporal de seis horas en una rejilla gaussiana de estructura T62 (resolución horizontal de ~210 Km) y 28 niveles verticales (Kalnay et al., 1996; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>). Esta base de datos presenta la ventaja de cubrir el período 1948-2009 y de ser ampliamente utilizada por la comunidad científica.



Para obtener las corrientes en la zona de estudio, se ha realizado un downscaling partiendo de los datos del reanálisis global ERA-Interim (~80 Km de resolución horizontal). De esta forma se obtiene un nuevo reanálisis, de mayor resolución (~15Km), llamado Seawind-Interim. Esta base datos es la que se utilizará para introducir el forzamiento atmosférico (viento y presión) en el modelo numérico para la obtención de las corrientes.

### **2.1.5.2 Reanálisis de oleaje**

El reanálisis de oleaje utilizado en este trabajo es el GOW 1.0 (*Global Ocean Waves 1.0*) desarrollado por IH Cantabria. Es un reanálisis horario que cubre el periodo de 1948-2008 con una cobertura global y una resolución de  $1^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  y de  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  a lo largo del litoral de España. El forzamiento proviene del reanálisis NCEP/NCAR.

Se ha utilizado el modelo WaveWatch III (WW III) (Tolman 1999, 2002) desarrollado por la NOAA/NCEP, similar al modelo WAM (WAMDIG 1988, Komen et al 1994). WW III es la última versión del modelo inicial WW I elaborado por la Universidad de Delft (Tolman 1989), posteriormente refinado por la NASA en el WW II.

La versión WW III difiere de sus antecesores en muchos e importantes puntos que incluyen aspectos relacionados con: la estructura, método numérico de resolución y parametrizaciones físicas. WW III resuelve la ecuación de balance de densidad espectral, la hipótesis fundamental asumida en la resolución es que las propiedades del medio (corrientes y batimetría) así como las del campo de oleaje, varían, en el espacio y en el tiempo, en escalas mucho mayores que una longitud de onda. Una limitación del modelo, por tanto, es que no es capaz de simular los efectos de propagación del oleaje en profundidades reducidas tan eficazmente como otros modelos. Por este motivo, los resultados de las simulaciones realizadas con el WW III han sido utilizados como condiciones iniciales de las simulaciones con el modelo de propagación de oleaje SWAN (Simulating WAVes Nearshore; Booji, 1999). El modelo SWAN está también basado en la ecuación de conservación de acción de onda, pero ha demostrado resolver más eficazmente los fenómenos que afectan al oleaje en profundidades reducidas.

El alcance temporal del reanálisis GOW comienza en 1948 y alcanza hasta la actualidad, ya que se actualiza periódicamente. En primer lugar, se ha determinado el oleaje en una malla global (figura 2.7) que proporciona el oleaje en una rejilla de resolución espacial  $1.5^{\circ}$  en longitud y  $1^{\circ}$  en latitud.

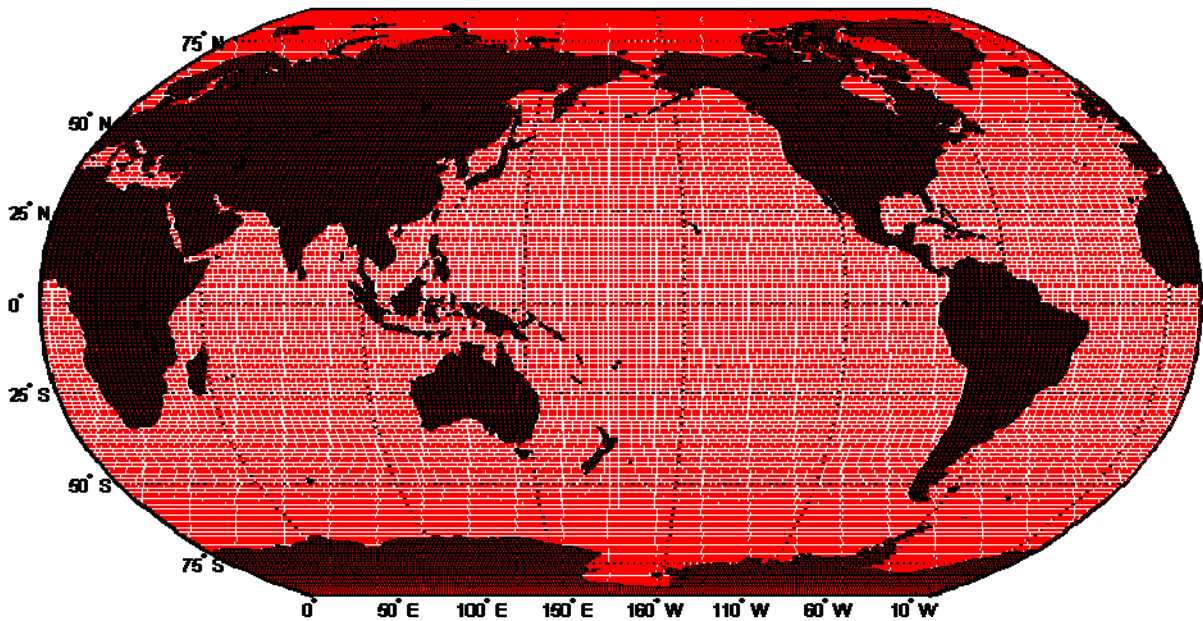


Figura 2.7. Malla global del reanálisis GOW 1.0 (representación de la figura en proyección Mercator).

En esta malla global, se han anidado una serie de mallas para el estudio de zonas de detalle con mayor grado de definición. Así, en el litoral español, se ha planteado una malla para las Islas Canarias con resolución  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , una malla para todo el Mar Mediterráneo con resolución de  $1/8^\circ$ , y otra para el litoral de la Península Ibérica con resolución  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . A su vez, la Península Ibérica se ha subdividido en tres mallas de alta definición, resolviéndose con detalle toda su costa a  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , para alcanzar el mismo grado de detalle que en las Islas Canarias (figura 2.8).

Los resultados obtenidos son parámetros de oleaje en todos los nodos de cálculo con resolución de una hora. Además, con el fin de definir más correctamente el oleaje cerca de la costa, se han obtenido espectros de oleaje con resolución horaria en 500 puntos a lo largo del litoral español, separados entre sí  $\sim 10$  km, con los cuales anidar modelos de propagación de escala local.

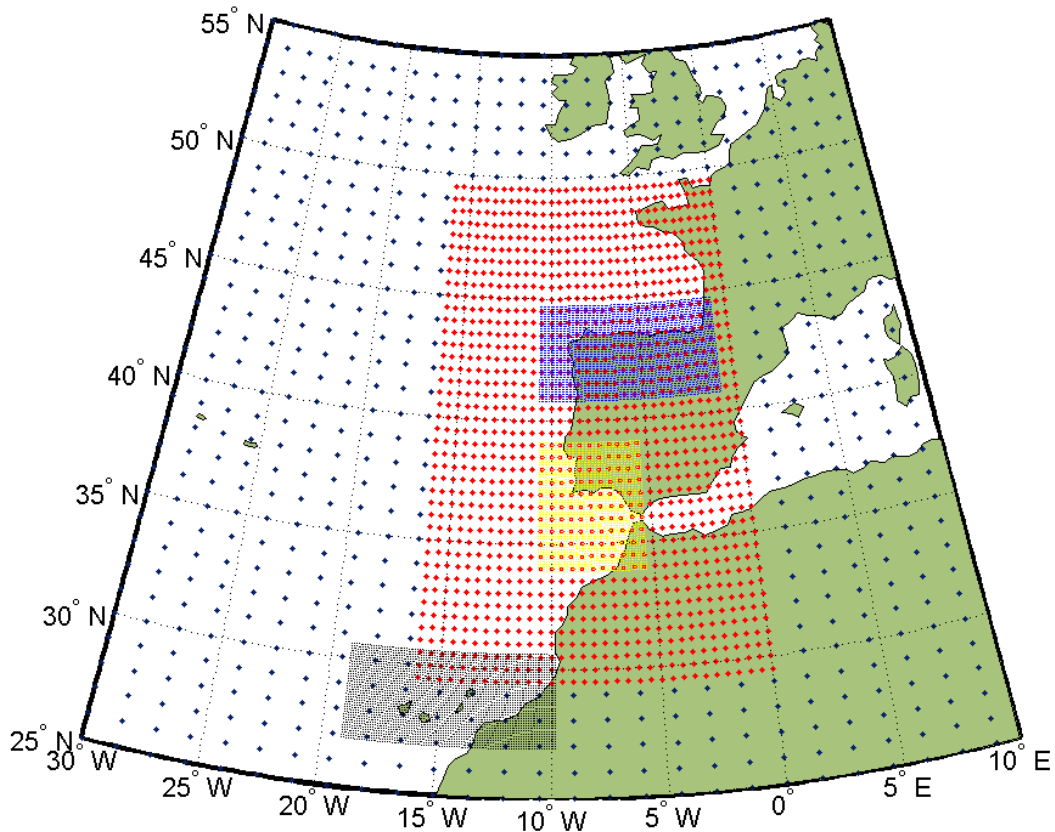


Figura 2.8. Rejillas del litoral español del reanálisis GOW 1.0 Malla. Malla Global 1.5°x1.0°, Malla Iberia 0.5° y Mallas Cantábrico, Cádiz y Canarias 0.1° (representación de la figura en proyección Mercator).

En el litoral español los resultados han sido validados con boyas de la red exterior de OPPE. En el resto del mundo, han sido empleadas boyas de la NOAA, así como datos de satélite. En la figura 2.9 se muestran las localizaciones en las que se ha validado el reanálisis a escala global.

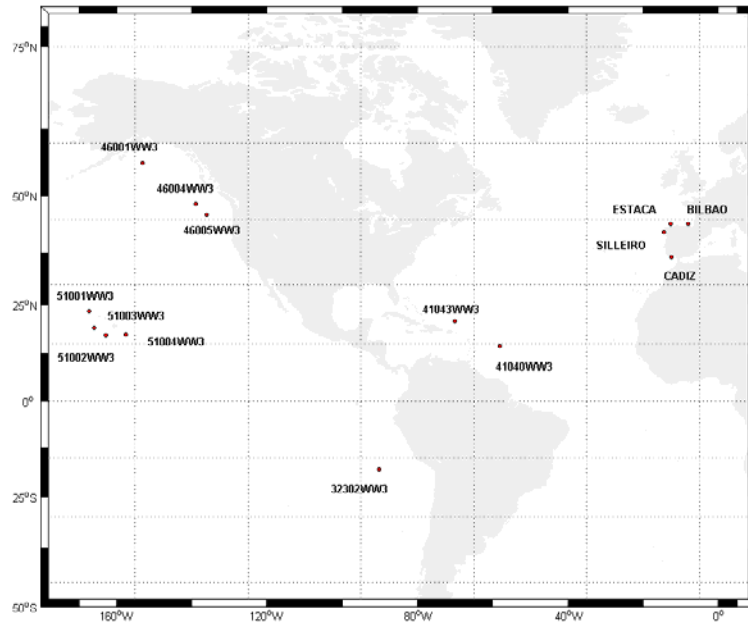


Figura 2.9. Boyas de oleaje utilizadas para la validación de la malla global del reanálisis GOW.

En las figuras 2.10 a 2.13 se presenta la validación realizada en algunas de las boyas utilizadas para comprobar los resultados de la malla global. Las series corresponden al año 2006, mientras que los parámetros de correlación han sido calculados con la totalidad del registro de cada boya. Como puede apreciarse, el reanálisis GOW 1.0 representa de manera satisfactoria la evolución horaria del parámetro altura de ola significativa. Además, la estructura de las series (boya y modelo) es prácticamente coincidente, confirmando que la base de datos GOW 1.0 simula los temporales históricos de forma adecuada.

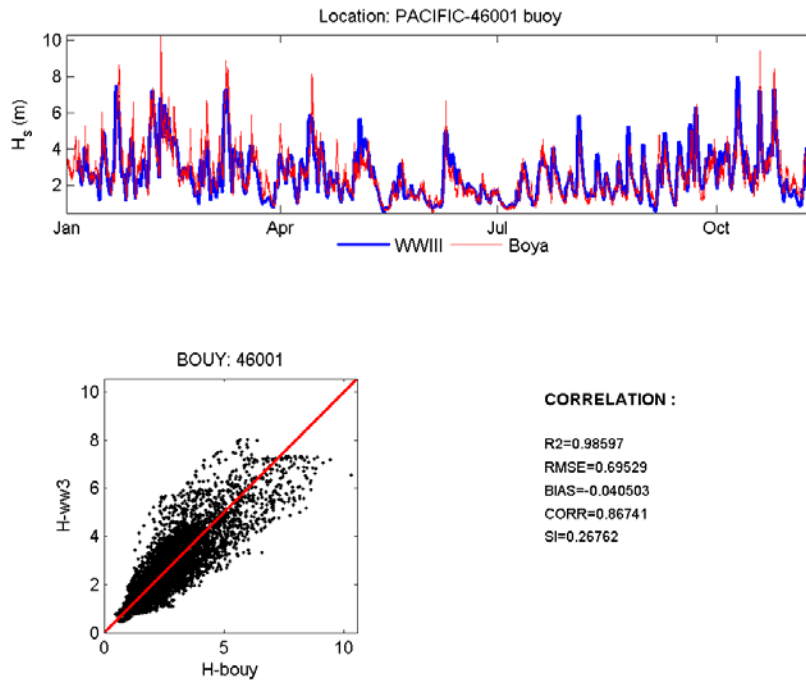


Figura 2.10. Validación en la boya NOAA 46001. Malla Global de GOW 1.0.

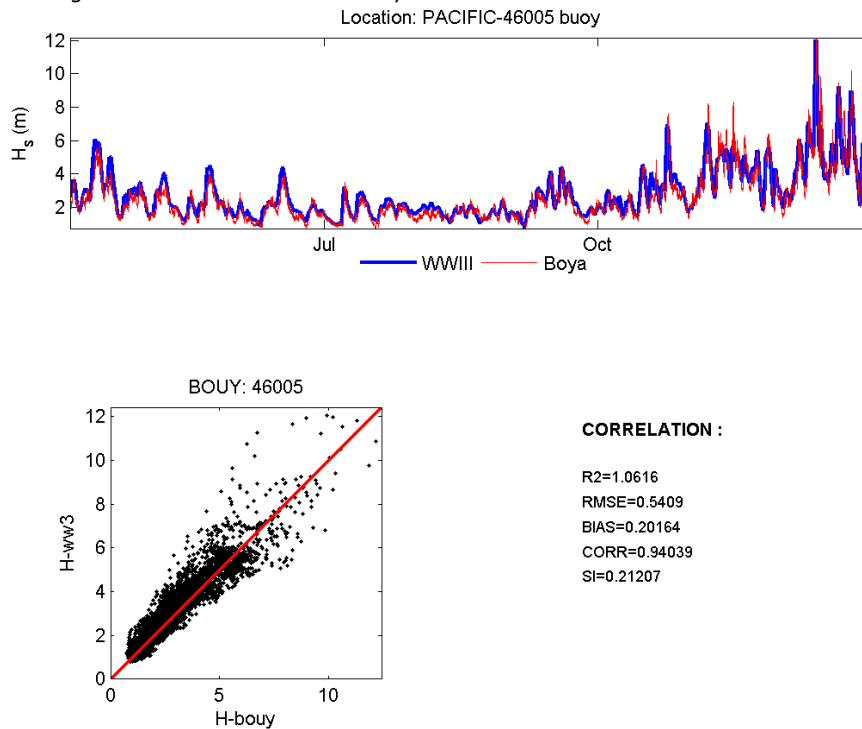


Figura 2.11. Validación en la boya NOAA 46005. Malla Global de GOW 1.0.

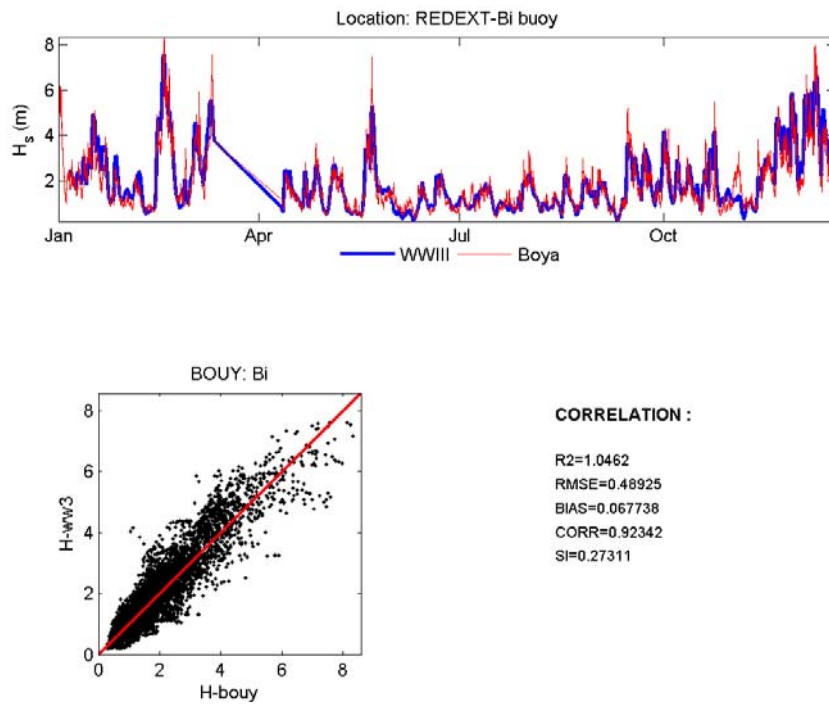


Figura 2.12. Validación en la boya de Bilbao indefinidas (OPPE). Malla Global de GOW 1.0.

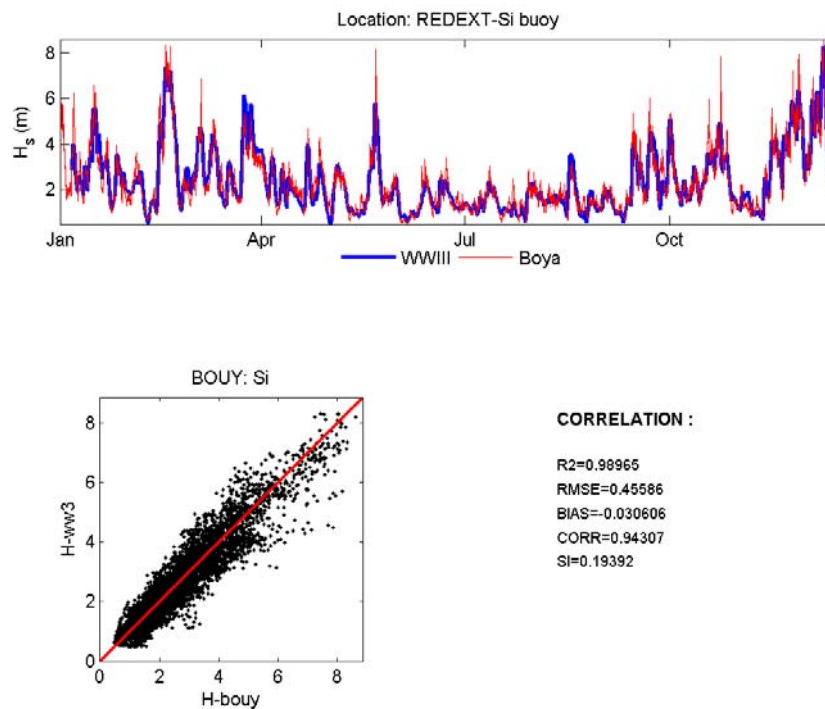


Figura 2.13. Validación en la boya de Silleiro indefinidas (OPPE). Malla Global de GOW 1.0.

Nótese que los resultados mostrados en las figuras 2.10 a 2.13 corresponden a la malla global. Para mostrar el efecto de incrementar la resolución espacial, se muestra a continuación los gráficos de dispersión y percentiles (figura 2.14) para los tres niveles de resolución espacial,  $1.5 \times 1^\circ$ ,  $0.5 \times 0.5^\circ$  y  $0.1 \times 0.1^\circ$ , en la posición de la boya de Cabo Silleiro (OPPE). Como se puede observar, los resultados son muy similares, ya que la boya se localiza en profundidades indefinidas y el forzamiento de viento (de resolución  $1.9^\circ \times 1.9^\circ$ ) es el mismo para las tres mallas.

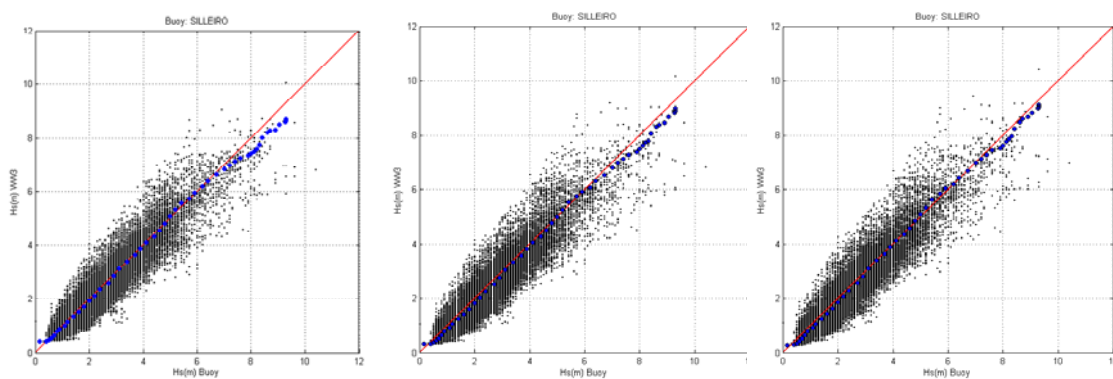


Figura 2.14. Validación en la boya de Silleiro en profundidades indefinidas (OPPE). GOW 1.0 (Malla Global, Iberia ( $0.5^\circ$ ) y Detalle ( $0.1^\circ$ )).

En conclusión, con el reanálisis GOW del IH-Cantabria se dispone de una base de datos de oleaje validada, actualizada, con resolución horaria y con resultados de detalle a lo largo del litoral español, cuyos resultados son tanto parámetros de oleaje agregados como espectros direccionales.

### 2.1.5.3 Base de datos de corrientes

El reanálisis de corrientes utilizado en este trabajo es el DOT (Downscaled Ocean Tides) desarrollado por IH Cantabria. Consiste en una base de datos horaria de alta resolución de nivel y corrientes de marea astronómica para un año representativo; se ha elegido para ello el año 2001, ya que, de la serie de datos instrumentales disponibles (necesarios para la validación), es aquel que presenta una menor variación nodal. Para las Islas Canarias, esta base de datos tiene una resolución espacial de 1 MN (milla náutica) y en vertical consta de 30 niveles. En la figura 2.15 se presenta el dominio de cálculo de DOT para el Archipiélago Canario.



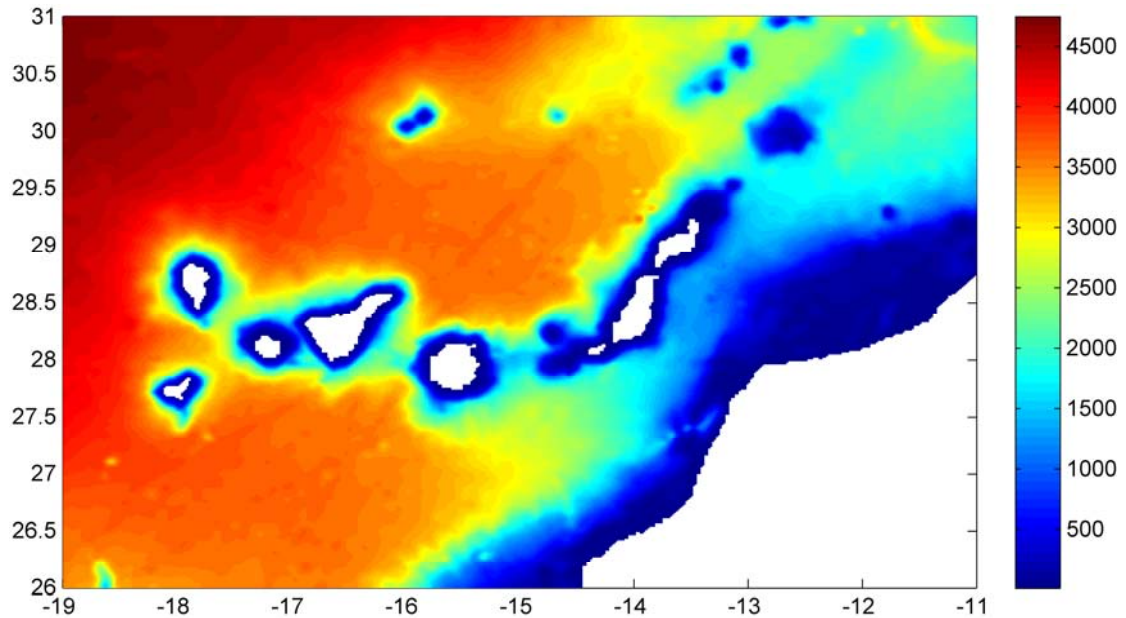


Figura 2.15. Malla del reanálisis DOT en el Archipiélago Canario (IH Cantabria)

El modelo utilizado en el reanálisis es el modelo tridimensional ROMS (Regional Ocean Modeling System) desarrollado por el Ocean Modeling Group de Rutgers (<http://marine.rutgers.edu/po/index.php?model=roms>). Este modelo resuelve de forma numérica las ecuaciones conocidas como ecuaciones primitivas asumiendo que la presión sigue una ley hidrostática. Dentro de las mismas se incluyen las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, la de conservación de la masa, la de transporte de distintas sustancias como la temperatura y la salinidad, y la ecuación de estado para el cómputo de la densidad del agua. Dentro de las cualidades del modelo cabe destacar su capacidad de resolver la elevación de la superficie libre, la utilización de la coordenada vertical  $S$  y de las coordenadas horizontales curvilíneas.

Como condiciones de contorno se han utilizado las componentes armónicas proporcionadas por el modelo TPXO que es un modelo inverso de mareas que asimila la información del nivel del mar derivada de las observaciones del sensor TOPEX/Poseidon. Actualmente, el modelo TPXO, que es uno de los modelos globales de marea más precisos, proporciona cuatro componentes armónicas semidiurnas ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ), cuatro componentes diurnas ( $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ) y dos de largo periodo ( $M_f$  y  $M_m$ ), en una malla con cobertura global de  $1440 \times 721$  puntos con  $0.25^\circ$  de resolución espacial.



Los resultados obtenidos han sido validados con los mareógrafos contenidos en la malla numérica. Como ejemplo, en las figuras 2.16 a 2.18 se muestra la validación realizada en los mareógrafos de Tenerife y Las Palmas, respectivamente. Como puede apreciarse, el sistema representa de manera satisfactoria la evolución horaria del nivel del mar.

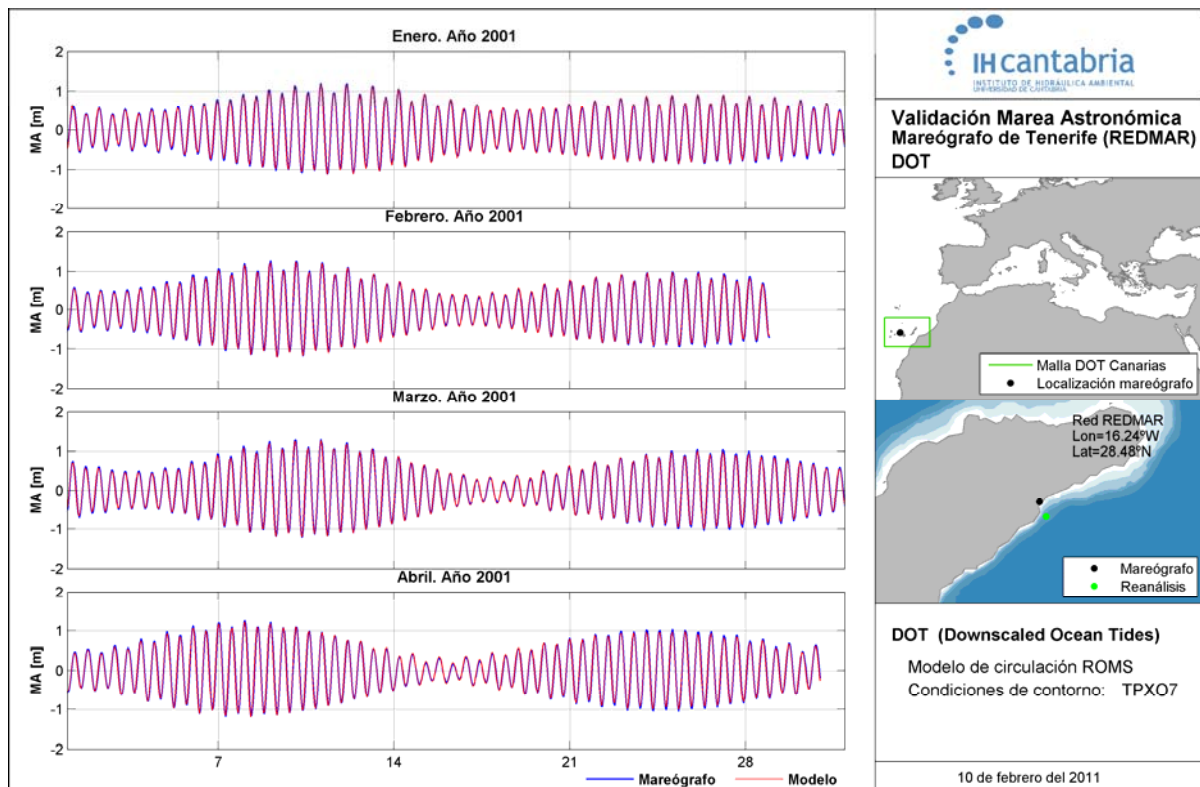


Figura 2.16. Validación en el mareógrafo de Tenerife (OPPE). Malla DOT Canarias. Comparación entre la serie temporal de superficie libre obtenida con el modelo ROMS (línea roja) y la serie grabada por el mareógrafo en el año 2001 (línea azul).

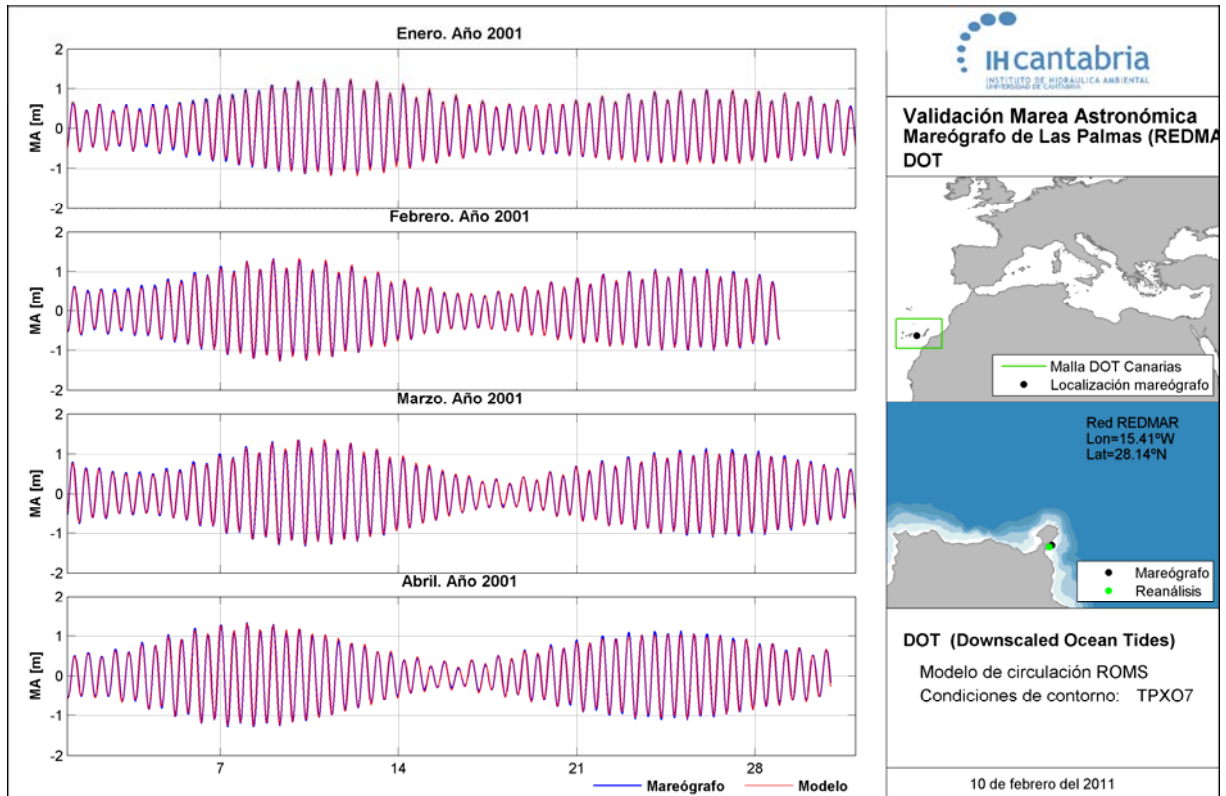


Figura 2.17. Validación en el mareógrafo de Las Palmas (OPPE). Malla DOT Canarias. Comparación entre la serie temporal de superficie libre obtenida con el modelo ROMS (línea roja) y la serie grabada por el mareógrafo en el año 2001 (línea azul).

+

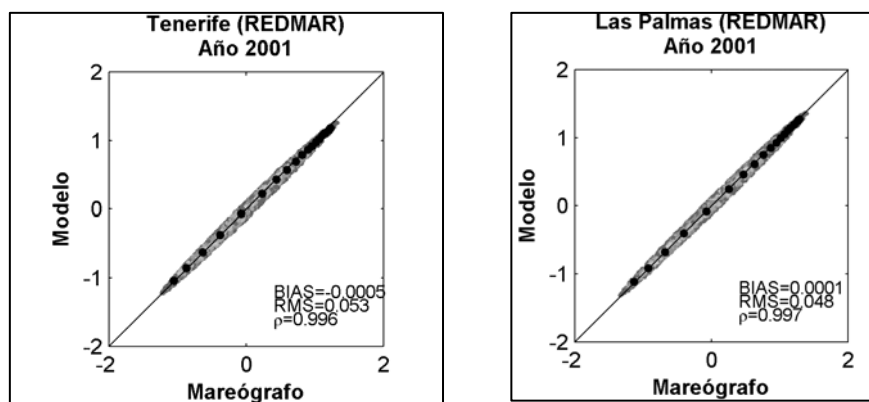


Figura 2.18. Validación de los mareógrafos de Tenerife y Las Palmas (OPPE). Gráfico de dispersión

Por lo tanto, para este estudio, se dispone de una base de datos de niveles y corrientes de marea astronómica, con resolución temporal horaria y espacial de 1' en horizontal y 30 niveles en vertical. Estos datos se utilizarán para anidar una malla local que tenga el suficiente detalle para estudiar la zona de influencia del puerto.

### **2.1.6 Datos para la estimación del aporte sedimentario de los barrancos**

Dentro de los estudios para la construcción de un nuevo puerto en el polígono industrial de Granadilla de Abona, para estimar el transporte real de sedimentos en la zona de estudio, es necesario calcular los aportes procedentes de los cauces (barrancos). Para ello, además de la información ya mencionada en el apartado 1.3, se ha recopilado y analizado la información disponible que se detalla a continuación:

- Mapas Topográficos históricos a escala 1/25000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).
  - <http://centrodedescargas.cnig.es/>
- Ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, (IGN).
  - <http://centrodedescargas.cnig.es/>
- Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2001-2012 (INES). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM)
  - <http://www.marm.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-nacional-de-erosion-de-suelos/default.aspx>
- Consejo Insular de Aguas de Tenerife:
  - Plan Hidrológico de Tenerife
    - <http://www.planhidrologicodetenerife.org/esp/portada.asp>
  - Datos sobre hidrometeorología
    - [http://www.aquastenerife.org/1\\_consejoinsular/index.html](http://www.aquastenerife.org/1_consejoinsular/index.html)
  - Datos pluviométricos medidos en estaciones del SE de Tenerife (1944 – 2008)
  - Plano de las cuencas existentes
- Planes Insulares (Cabildo de Tenerife):
  - Plan Insular de Ordenación de Tenerife (PIOT).
  - Plataforma Logística del Sur.
    - <http://www.tenerife.es/planes/index.htm>

- Resúmenes de las jornadas sobre hidrología de superficie en Tenerife. 2009. (Consejo Insular de Aguas de Tenerife)

## 2.2 Caracterización del clima marítimo

Para obtener las características del oleaje a la escala requerida en este estudio (alta resolución espacio-temporal) es necesario el empleo de una metodología que combine las mejores bases de datos disponibles (tanto instrumentales como numéricas), modelos numéricos de propagación de oleaje que sean capaces de reproducir los procesos de transformación del oleaje (asomeramiento, refracción, difracción, generación local por viento, disipación, etc.) y sofisticadas herramientas matemático-estadísticas que faciliten trabajar con series de datos tan extensas.

Como ya se ha mencionado, en España existen varias redes de observación de oleaje (Puertos del Estado, Euskalmet, XIOM, Red Vigía, etc.) pero a pesar de estar formada por un considerable número de boyas, esta red de observaciones está dispersa en el espacio, no cubriendo todas las áreas del litoral. Además, la duración de estas series es diferente en cada una de estas boyas, siendo pocas (en general las costeras) las que cuentan con registros superiores a los 15 años.

Por tanto, es necesario recurrir a las bases de datos de reanálisis del oleaje. En este trabajo se utilizan la base de datos del reanálisis GOW (Global Ocean Waves) del Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria" formada por 61 años de datos horarios de parámetros de oleaje, en todos los nodos de una malla de cálculo de alta definición de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  en las proximidades del litoral español. Esta base de datos presenta una serie de ventajas respecto a otras bases de datos de reanálisis. Además de una mayor cobertura espacial y temporal, se dispone de los espectros direccionales de oleaje en una serie de puntos a lo largo del litoral español cada  $0.1^\circ$ , lo cual permite definir más correctamente el oleaje cerca de la costa. Esta base de datos se describe con mayor detalle en el apartado 2.1 de este capítulo.

Por otro lado, aunque estas bases de datos representan una aproximación a la realidad, al estar generadas numéricamente, requieren de una calibración con datos instrumentales. Además, estos datos de reanálisis caracterizan generalmente el oleaje en aguas profundas, siendo necesaria la propagación del mismo hasta costa como se indica en el organigrama de la metodología (véase la figura 2.2). Para simplificar el trabajo de propagación de oleaje, es necesario aplicar algoritmos matemáticos que seleccionen un número reducido de estados de mar representativos del clima marítimo en profundidades indefinidas. Este clima marítimo en aguas profundas se define por una serie de nodos de reanálisis del oleaje y los campos de viento asociados, teniendo así en cuenta la variabilidad espacial del oleaje y la generación local por viento. Por tanto, cada situación del clima marítimo en aguas profundas queda descrita mediante un gran número de parámetros, lo que implica trabajar con espacios multidimensionales. Así, las técnicas

estadísticas de de selección de casos representativos deben ser adecuadas para trabajar con un gran número de variables (escalares y direccionales).

Posteriormente, los estados de mar seleccionados se propagan mediante modelos numéricos que permiten determinar las características del oleaje en puntos objetivo cercanos a la costa. A partir de los resultados de la propagación de estos casos seleccionados y mediante técnicas de interpolación adecuadas a la dimensionalidad de los datos y resultados, se reconstruyen las series temporales de los distintos parámetros del oleaje necesarios para la caracterización del clima marítimo.

### **2.2.1 Calibración del oleaje**

Para la calibración de la base de datos de reanálisis, se utiliza la información de datos instrumentales de diferentes misiones de satélites, siguiendo la metodología de calibración direccional descrita en Minguez et al. (2011).

La calibración se ha llevado a cabo para cada punto del contorno (puntos rojos del contorno de la malla G01 en la figura 2.22) en el cual se introduce el espectro de oleaje para la propagación. Antes de calibrar el punto es necesario decidir con qué datos instrumentales se va a llevar a cabo la corrección. Los datos de satélite elegidos para cada punto son los que se encuentran en un área delimitada alrededor del mismo. Esta área se basa en un criterio de rayos lanzados a partir del punto objeto de calibración de forma que elimina los datos de satélite que puedan estar apantallados por tierra. Para los puntos del Atlántico se ha elegido un área con radio de  $1.5^\circ$ . En la Figura 2.19 se muestra un ejemplo de los puntos de satélite escogidos para la calibración de uno de los puntos del contorno de la malla general de propagación.

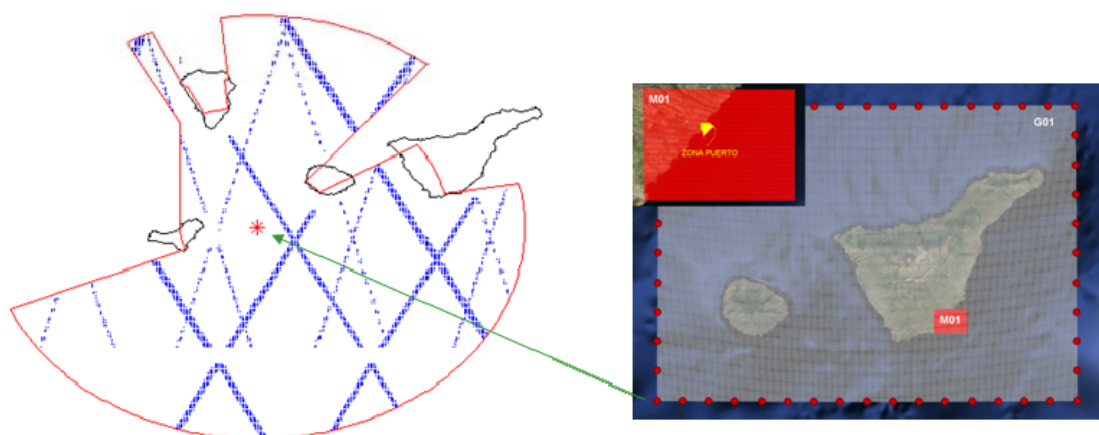


Figura 2.19 Datos de satélite utilizados para la calibración del contorno de la malla general de propagación (punto rojo)

Una vez seleccionada la zona de datos de satélite, el siguiente paso consiste en extraer de la base de datos GOW los parámetros  $(H_s, \theta_m)$  correspondientes a cada dato de satélite (definido por su posición e instante). De esta manera se obtiene un conjunto de N datos, definidos como  $\{H_{s,sat}(i), H_{s,GOW}(i), \theta_{m,GOW}(i)\}$ .

A partir de los pares de datos temporales GOW/satélite se lleva a cabo una calibración direccional de las alturas de ola. Una vez obtenidos los pares de datos de  $H_s$  junto con las direcciones, se han agrupado por direcciones según sectores direccionales de  $22.5^\circ$  de amplitud y para cada subconjunto de pares de datos se ha procedido a realizar un ajuste cuantil-cuantil en base a 20 cuantiles equiespaciados en la escala de Gumbel de máximos. La ecuación seleccionada para el ajuste es la siguiente:

$$H_{s,c} = \begin{cases} a(\theta) d(\theta)^{b(\theta)-1} H_s & \text{si } H_s \leq d(\theta) \\ a(\theta) H_s^{b(\theta)} & \text{si } H_s > d(\theta) \end{cases}$$

donde  $H_{s,c}$  es la altura de ola significativa corregida,  $H_s$  es la altura de ola significativa de reanálisis,  $a(\theta)$  y  $b(\theta)$  son los coeficientes que dependen de la dirección de procedencia del oleaje y  $d(\theta)$  es la altura de ola límite, por debajo de la cual la calibración es lineal. Nótese que la calibración es lineal para el régimen medio bajo, y potencial a partir del umbral definido por el parámetro  $d(\theta)$  existiendo una continuidad en la calibración. Esto otorga más flexibilidad al modelo para calibrar todas las ramas del régimen de altura de ola.

La selección de los cuantiles en sectores de  $22.5^\circ$  se hace desplazando éstos grado a grado, de forma que se obtiene una variación suave de los cuantiles a lo largo de la circunferencia. En la Figura 2.20 se puede observar la relación entre la altura de ola calibrada y sin calibrar, nótese como las mayores correcciones son aplicadas a las alturas de ola entre 0 y 1m para el sector SW y entre 0 y 2m para el sector E-SE.

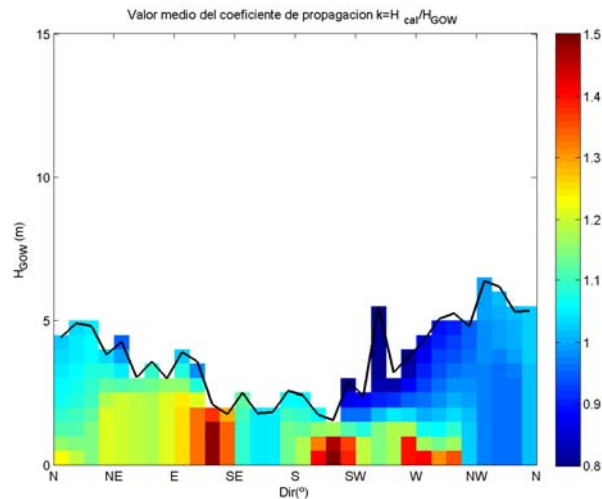


Figura 2.20 Corrección direccional de  $H_s$  en un punto del contorno de la malla general de propagación

Las variaciones en los valores que van adoptando los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $d$  a lo largo de la rosa de direcciones, se obtienen suponiendo que se produce una variación suave mediante un spline, de forma que una vez evaluados los coeficientes y alturas de ola límites del tramo lineal cada 22.5 grados, los valores correspondientes asociados a cualquier otra orientación se obtienen interpolando mediante una función cúbica. De esta forma se puede expresar cada coeficiente como:

$$a(\theta_i) = a_j + x_j^a(\theta_i - \theta_j) + y_j^a(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^a(\theta_i - \theta_j)^3$$

$$b(\theta_i) = b_j + x_j^b(\theta_i - \theta_j) + y_j^b(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^b(\theta_i - \theta_j)^3$$

$$d(\theta_i) = d_j + x_j^d(\theta_i - \theta_j) + y_j^d(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^d(\theta_i - \theta_j)^3$$

donde  $\theta_i$  es el ángulo de procedencia del oleaje  $0 \leq \theta_i \leq 360$ , y  $\theta_j$  es la dirección en la que se conocen los parámetros  $a_j$ ,  $b_j$  y  $d_j$  del spline, y los demás parámetros son los necesarios para que la variación sea suave a lo largo de toda la circunferencia. De este modo, conociendo la dirección media de propagación de un estado de mar resultan conocidos los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $d$  que hay que aplicar a  $H_{s,GOW}$  para obtener  $H_{s,C}$ .

En la figura 2.21 se muestran el gráfico cuantil-cuantil de altura de ola significativa de los datos de la serie GOW original y calibrada para el punto seleccionado. Como se puede



apreciar, las mejoras son evidentes ya que los puntos se encuentran más próximos a la bisectriz tras la calibración.

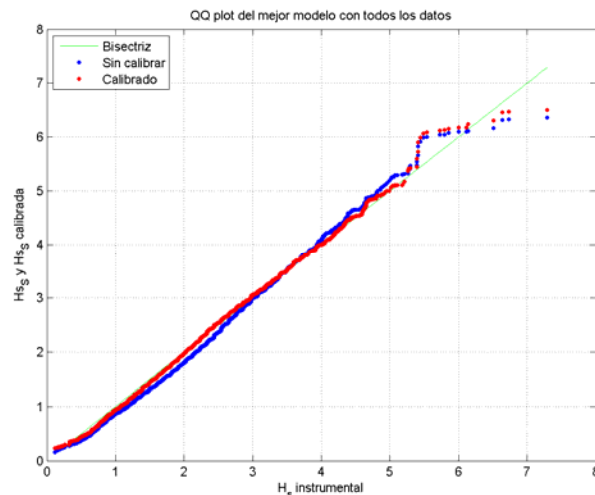


Figura 2.21 Diagramas QQplot con las alturas de ola instrumentales (satélite) versus GOW calibrado y sin calibrar

### **2.2.2 Transferencia del oleaje a aguas costeras**

Para la caracterización del oleaje en la zona de estudio es necesario propagar la base de datos de reanálisis del oleaje GOW calibrada. Estos datos generados numéricamente definen el oleaje en aguas profundas siendo necesaria la aplicación de una metodología para su transferencia hasta aguas someras. En el apartado 2.2 se ha descrito la metodología general empleada en este trabajo.

Con el objetivo de una mejor caracterización del clima marítimo en aguas someras, se dispone de los espectros direccionales de la energía del oleaje en una serie de puntos localizados en aguas profundas a lo largo del litoral español, obtenidos en la generación de base de datos GOW. Por tanto, se transfiere el oleaje hasta la costa partiendo de unas condiciones de contorno definidas por estos espectros direccionales y mediante el anidamiento de un modelo de propagación. La aplicación de un modelo de propagación requiere la definición de una malla de computación que se extiende desde la posición donde es conocido el oleaje en aguas profundas hasta la costa, en este caso en los puntos en los que se dispone de los espectros de la base de datos GOW. En este trabajo, debido a la complejidad del oleaje en la zona de estudio (espectros multimodales) se han considerado dos mallas de propagación, una general y otra de detalle. La metodología de propagación propuesta conlleva la calibración de los datos en aguas profundas, la selección de una serie de casos representativos, la propagación de estos casos y la

reconstrucción de la serie temporal para la obtención posterior de las variables de interés.

A continuación se describen las mallas establecidas para propagar el oleaje. Posteriormente, se exponen las etapas de clasificación, propagación y reconstrucción de las variables de interés. A partir de las series de oleaje reconstruidas en la posición de las boyas es posible validar la metodología empleada, como se presenta en el apartado 2.2.3.

### **2.2.2.1. Selección de las mallas**

La propagación del oleaje desde aguas profundas a aguas someras se realiza mediante el anidamiento sucesivo de distintas mallas de propagación que permitan considerar las distintas escalas en la transformación del oleaje. Así, a medida que se anidan sucesivamente las mallas, se va incrementando resolución espacial (mejora de resolución, regionalización o "downscaling").

Así, a partir de los datos del GOW generados con el modelo numérico WaveWatch III (ver apartado 2.1.5.2) de  $0.1^\circ$  de resolución ( $\sim 10$  km) se propaga el oleaje con el modelo numérico SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) desarrollado por *Delft University of Technology*. Cada una de las situaciones de oleaje a propagar está definida por unas condiciones de contorno, que vienen dadas por los datos espectrales de oleaje de la base de datos GOW, y forzadas por unos campos de viento procedentes de la base de datos de reanálisis atmosférico. Se han planteado dos mallas anidadas para las propagaciones del SWAN, una malla general (G01) con una resolución espacial de  $0.01^\circ \times 0.008^\circ$  (1.11 km x 0.89 km) y una malla más cercana a costa (M01) con una mayor resolución espacial de  $0.0003^\circ \times 0.0002^\circ$  ( $\approx 25$  m) (véase la figura 2.22).



Figura 2.22 Mallas SWAN utilizadas para la transferencia del oleaje desde profundidades indefinidas hasta la costa.

#### 2.2.2.2. Clasificación de los estados de mar

Esta segunda etapa de la metodología general de propagación del clima marítimo (véase la figura 2.2) consiste en la selección de una serie reducida de casos representativos del oleaje en el contorno de la malla de propagación y viento sobre una malla regular. La selección de los estados de mar a propagar se realiza mediante el algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss) que permite la identificación de aquel subconjunto  $M$  con la mayor diversidad posible del total de la base de  $N$  datos (Camus et al, 2011). Los estados de mar a clasificar están definidos por las series horarias de los parámetros espectrales en los alrededores en los que se dispone además de los espectros direccionales que, una vez corregidos sirven de inputs para el modelo SWAN. En la clasificación también es considerado el viento 10 metros de altura procedente del reanálisis atmosférico.

En el panel de la izquierda, en la figura 2.23, se muestra una condición horaria del clima marítimo en el área de propagación considerada para la caracterización del oleaje a lo largo de la malla G01. Se puede apreciar como la dirección del oleaje varía a lo largo del

contorno superior. En la gráfica de la derecha de la misma figura, se muestra la propagación de las condiciones del oleaje representadas en la gráfica de la izquierda. En este caso se puede observar también la diferencia en la magnitud del oleaje en el contorno superior de la malla de propagación. Además se puede comprobar la influencia de la variabilidad espacial del campo de oleaje en la propagación hasta aguas someras.

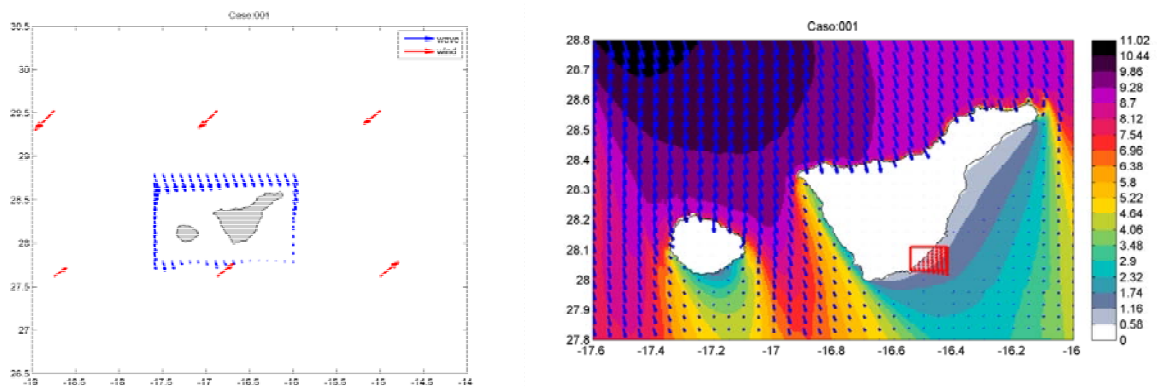


Figura 2.23. Condiciones de oleaje y viento en la malla de propagación G01 y su correspondiente propagación. Escala: altura de ola significativa (en m).

El algoritmo de máxima disimilitud comienza con la inicialización del subconjunto mediante la elección de un dato de la base origen (en este caso el de mayor altura de ola significativa). Una vez seleccionado el primer elemento del subconjunto, la selección del resto de elementos se realiza en dos fases. En primer lugar, para cada dato aún perteneciente a la base de datos de partida, se calcula la distancia o disimilitud con todos los elementos del subconjunto y se define una única distancia entre este dato y el subconjunto, según distintos criterios. En segundo lugar, una vez que se dispone de la distancia entre cada dato de la muestra de partida y el subconjunto, se elige aquel dato con el máximo valor de esta distancia.

Por ejemplo, si en el subconjunto ya existen  $R$  ( $R \leq M$ ) datos seleccionados, primero se calcula la disimilitud entre el dato  $i$  de la muestra de datos  $N-R$  y los  $j$  elementos pertenecientes al subconjunto  $R$ :

$$d_{ij} = \|x_i - v_j\|; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R$$

Posteriormente se calcula la disimilitud  $d_{i, \text{subconjunto}}$  entre el dato  $i$  y el subconjunto  $R$ , esta definición admite varios criterios (Willet et al., 1996). Después de diversas pruebas, el subconjunto de casos seleccionados más representativo de los datos de partida se consigue definiendo la distancia  $d_{i, \text{subconjunto}}$  como:

$$d_{i,\text{subconjunto}} = \min \left\{ \|x_i - v_j\| \right\}; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R$$

Una vez calculadas las  $N-R$  disimilitudes según el criterio elegido, el dato con la máxima disimilitud es seleccionado para ser incluido en el subconjunto.

A continuación se describe el proceso de selección de los casos representativos del clima marítimo multidimensional.

En primer lugar es necesario determinar el número de nodos de reanálisis que se van a considerar en la definición del clima marítimo en profundidades indefinidas. En el caso de la malla G01, se disponen los espectros en una serie de puntos en el contorno de la malla (se han marcado en azul en la figura 2.24). Para la definición de la variabilidad espacial del clima marítimo y la selección de un conjunto de casos representativos del clima en aguas profundas, se han considerado los puntos señalados en rojo en la figura 2.26. Se han utilizado los parámetros espectrales  $H_s$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$  de estos puntos. Por otro lado, para las definir las características del viento simultáneas al oleaje se han empleado los parámetros  $W_x$  y  $W_y$  de los seis puntos indicados verde, perteneciente a la malla de vientos NCEP.

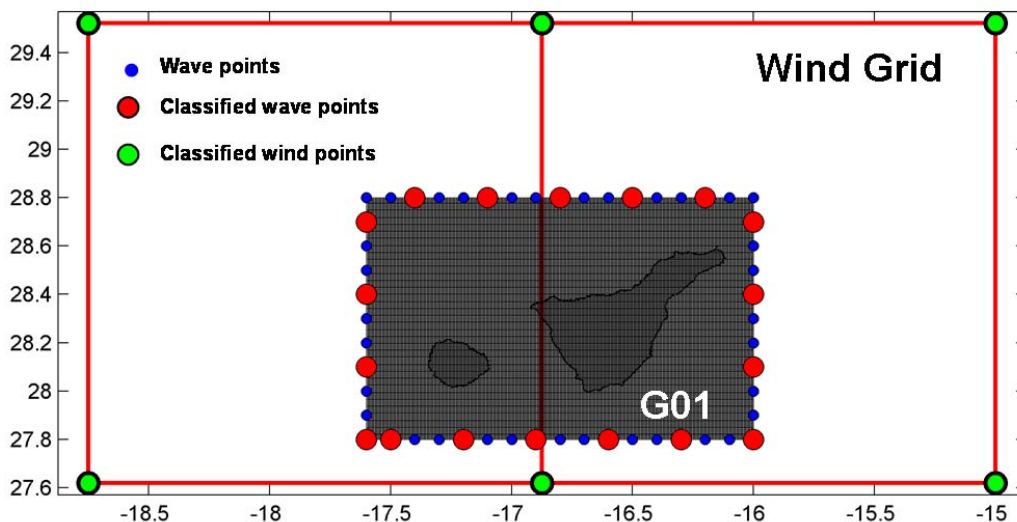


Figura 2.24. Puntos de oleaje y viento utilizados en la selección de los casos representativos del clima marítimo en profundidades indefinidas mediante MaxDiss para el caso de la malla G01.

Por tanto, los datos de oleaje en el contorno se definen como:

$$x_i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{m,1}, H_{m,2}, T_{m,2}, \theta_{m,2}, \dots, H_{m,18}, T_{m,18}, \theta_{m,18}, W_{x,1}, W_{y,1}, W_{x,2}, W_{y,2}, \dots, W_{x,6}, W_{y,6}\}_i \quad i = 1, \dots, N$$



donde  $N$  es el número total de datos,  $N=534.000$  en el caso de la base de datos GOW 1.0, y  $n$  la dimensión de los datos, en este caso  $n=66$ .

El nivel de marea correspondiente a cada situación de oleaje afecta a la propagación del oleaje. El efecto de la marea se considera importante en la propagación en aquellas zonas en las que la carrera de marea astronómica es significativa (valores superiores a 1.0 m). La zona correspondiente a la malla G01 está sometida a una carrera de marea media de unos 1.5 m, y por tanto, es necesario tener en cuenta el nivel asociado a cada estado de mar. Este fenómeno se incluye en la caracterización del clima marítimo en aguas someras mediante la propagación de los casos seleccionados en una serie de niveles representativos de todas las posibles situaciones (por ejemplo, la bajamar mínima viva equinoccial (BMVE), nivel medio del mar (NMM) y pleamar máxima viva equinoccial (PMVE)), y posterior reconstrucción de cada situación del clima marítimo en indefinidas interpolando al nivel correspondiente.

Generalmente, las distintas componentes de los espacios de alta dimensionalidad suelen estar correlacionadas, lo que supone que existe información redundante. La técnica del análisis de componentes principales permite reducir la dimensionalidad de una muestra de datos mediante la proyección en un nuevo espacio de menor dimensión y conservando el máximo de la varianza de los datos. En el caso del clima marítimo en profundidades indefinidas, la reducción de la dimensionalidad facilita la posterior aplicación de la técnica de selección MaxDiss.

Este método estadístico descompone una determinada variable numérica espacio-temporal  $R(x,t)$  en una combinación lineal de modos o funciones ortogonales numéricas (EOFs). Estos modos espaciales definen la nueva base de proyección y representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen la mayor varianza. Las proyecciones sobre esta nueva base son las componentes principales (PCs). Por tanto, una variable numérica espacio temporal se puede expresar como:

$$R(x,t) = \overline{R(x)} + \sum_{i=1}^n EOF_i(x) \cdot PC_i(t)$$

donde  $\overline{R(x)}$  es la media de la variable,  $EOF_i(x)$  son los modos espaciales o vectores de proyección,  $PC_i(t)$  son las componentes temporales y  $n$  es la dimensión espacial de los datos de partida. La proyección de los datos sobre cada modo temporal explica una determinada varianza de los mismos. Los EOFs están numerados de mayor a menor en función de la cantidad de varianza. Como el objetivo es proyectar los datos en un espacio de menor dimensión, se suele considerar un número  $d$  de EOFs, tal que  $d \ll n$ .

$$R(x,t) = \overline{R(x)} + \sum_{i=1}^d EOF_i(x) \cdot PC_i(t)$$

La aplicación de esta técnica requiere, en primer lugar, la descomposición de las direcciones del oleaje y del viento en sus componentes zonal y meridional ( $x$  e  $y$ ), y en segundo lugar, la estandarización de todas las variables para evitar problemas debido a la diferencia de escalas. De tal manera que los datos quedan definidos de la siguiente forma:

$$X_i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{m,1}, H_{m,2}, T_{m,2}, \theta_{m,2}, \dots, H_{m,18}, T_{m,18}, \theta_{m,18}, W_{x,1}, W_{y,1}, W_{x,2}, W_{y,2}, \dots, W_{x,6}, W_{y,6}\}_i \quad i = 1, \dots, N$$

y una vez estandarizados:

$$X^*_i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{m,1}, H_{m,2}, T_{m,2}, \theta_{m,2}, \dots, H_{m,18}, T_{m,18}, \theta_{m,18}, W_{x,1}, W_{y,1}, W_{x,2}, W_{y,2}, \dots, W_{x,6}, W_{y,6}\}_i \quad i = 1, \dots, N$$

Posteriormente, se aplica la técnica de componentes principales a los datos del clima marítimo estandarizados. La media temporal de cada variable es cero debido a la estandarización, por lo que:

$$X^*(x, t) = \sum_{i=1}^d EOF_{X^*_i}(x) \cdot PC_{X^*_i}(t)$$

A mayor número de EOFs considerados mayor es la varianza total explicada y mayor la aproximación a los datos espacio-temporales originales. En este estudio se ha considerado un número de componentes principales  $d=13$  que explican un 99.0% de la varianza total de los datos originales.

El primer caso seleccionado se corresponde con aquel dato que presenta la mayor altura de ola significativa en el contorno del área considerada. El subconjunto seleccionado con el algoritmo MaxDiss en el espacio de proyección de los EOFs no se reconstruye por medio de los  $d$  modos espaciales  $EOF_{X^*_j}$  considerados para volver al espacio original. Los casos seleccionados se buscan en la base de datos de partida, de esta forma se dispone de situaciones reales a propagar.

El subconjunto formado por  $M=500$  casos en el espacio de proyección de las EOFs se define como:

$$D_j^{EOF} = \{PC_{X^*_1}^D, \dots, PC_{X^*_d}^D\}_j \quad j = 1, \dots, M$$

que en el espacio original de los datos se define como:

$$D_j = \{H^D_{s,1}, T^D_{m,1}, \theta^D_{m,1}, H^D_{m,2}, T^D_{m,2}, \theta^D_{m,2}, \dots, H^D_{m,18}, T^D_{m,18}, \theta^D_{m,18}\}_j \quad j = 1, \dots, N$$



En la figura 2.25 se muestran la distribución de los casos seleccionados (en verde) sobre los datos de partida (en rojo) para los parámetros  $\{H_s, T_m, T_p, \theta_m\}$  del punto más cercano a la zona de estudio. En realidad cada uno de los casos seleccionados está definido según se muestra en la figura 2.26.

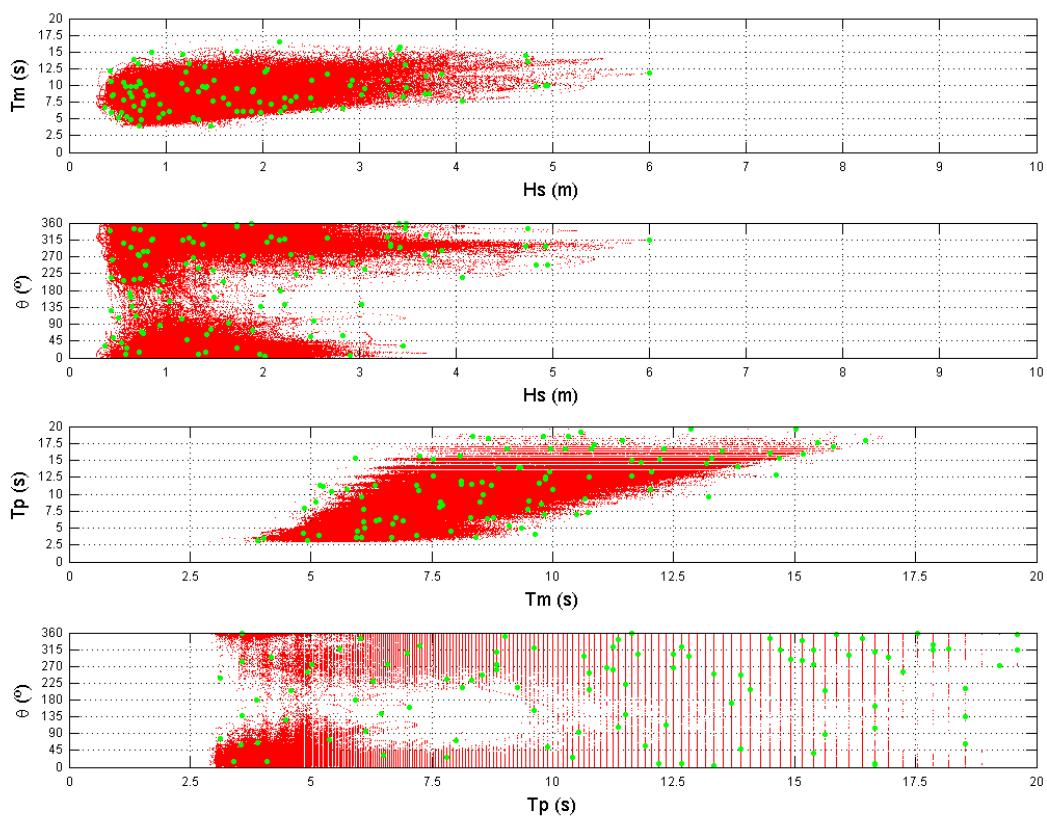


Figura 2.25. Distribución de los casos seleccionados correspondientes a los datos del punto del contorno más cercano a la zona de estudio.

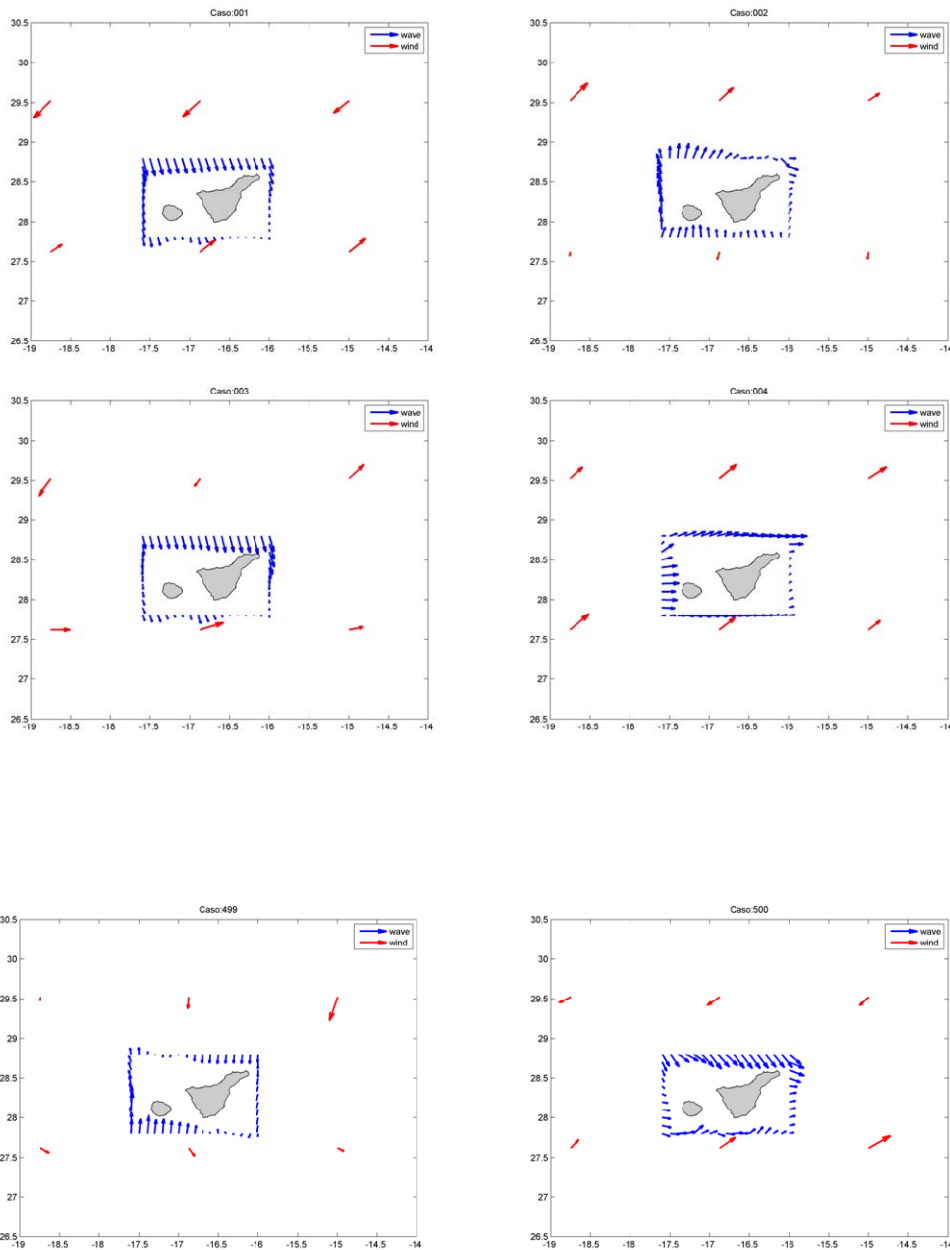


Figura 2.26. Casos seleccionados con el algoritmo MaxDiss en la malla G01.

En el esquema de la figura 2.27 se resumen los pasos necesarios para la selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en profundidades indefinidas.

- En primer lugar se eligen los  $n1$  puntos de reanálisis que definen las condiciones de contorno del oleaje y los  $n2$  puntos que definen los campos de vientos. Se transforman las variables direccionales en sus componentes  $x$  e  $y$ , y se estandarizan todas las variables.
- En segundo lugar, se aplica la técnica de las EOFs a los datos estandarizados obteniendo los  $d$  primeros modos que expliquen un determinado porcentaje de varianza (p.e. 99.0%).
- En tercer lugar se seleccionan los  $M = 500$  casos representativos de las componentes principales de los datos del clima marítimo en el espacio de proyección de las EOFs, y se identifican estos casos seleccionados en el espacio original de los mismos.

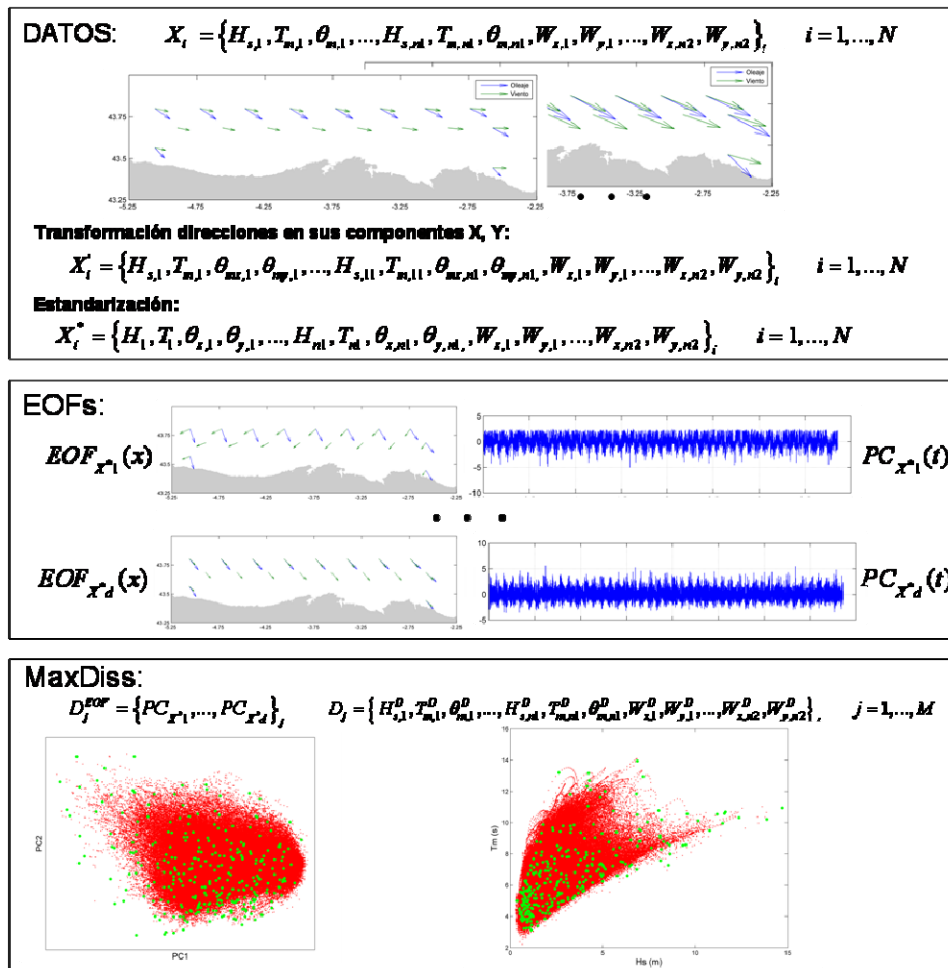


Figura 2.27. Esquema del proceso de selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en indefinidas.

### **2.2.2.3. Propagación del oleaje a aguas someras**

A medida que el oleaje se aproxima a la costa el efecto del fondo empieza a hacerse palpable. Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo, el oleaje se transforma. Estos procesos se traducen fundamentalmente en variaciones de la altura de ola y en la dirección de propagación.

Los fenómenos más importantes que sufre el oleaje cuando se acerca a la costa son: la refracción y el asomeramiento, debido a la batimetría y las corrientes, la difracción, como consecuencia de la presencia de cabos, diques o islas, la pérdida de energía debido a la disipación con el fondo. Además, parte de la energía incidente se refleja y vuelve a aguas profundas. En aguas más someras, la amplitud de olas aumenta mientras que la longitud de onda se reduce, generando un peraltamiento del perfil de las olas. A medida que se continúa reduciendo la profundidad, la celeridad de ola, proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad, disminuye. En el momento en el que la velocidad orbital de las partículas supera a la celeridad de la onda se produce un vuelco de la cresta sobre la base de la ola, produciéndose la rotura en la cual se genera una gran pérdida de energía en forma turbulenta.

El objetivo de la metodología de propagación consiste en aproximar el oleaje desde aguas profundas hasta la costa y poder evaluar las variables de interés en la zona de estudio. La batimetría de la zona de estudio y la orientación de la costa respecto a los oleajes incidentes condiciona los fenómenos más relevantes que sufre el oleaje para cada caso particular. Las características de la zona de estudio y los procesos de transformación del oleaje que se requieran resaltar imponen la elección de los modelos de propagación.

Los modelos numéricos de propagación de ondas intentan modelar la transformación que sufre el oleaje en su propagación hacia la costa. Los diferentes tipos de modelos numéricos existentes dependen de las ecuaciones que se utilicen para modelar el problema y del esquema numérico empleado, que implica una serie de limitaciones en los fenómenos que son capaces de simular.

Actualmente, los modelos de propagación del oleaje pueden dividirse en dos grandes grupos: modelos que resuelven la fase, basados en las ecuaciones de conservación de masa y de momentum, dependientes del tiempo e integrados en vertical; y los modelos de fase promediada, que se basan en la ecuación de balance de energía espectral. Los modelos que resuelven la fase se limitan a áreas pequeñas, del orden de 0 – 10 km, ya que requieren de 10-100 pasos de tiempo por periodo del oleaje. Por otro lado, los modelos que promedian la fase se pueden emplear en áreas más extensas porque no necesitan tanta resolución espacial. En este estudio se emplea la versión 40.85 del modelo SWAN que presenta ciertas mejoras respecto a versiones anteriores en la resolución de la transmisión-reflexión (Goda et al., 1967; Seelig, 1979; d'Angremond et al., 1996) y la difracción (Holthuijsen et al., 2003). Estas mejoras han permitido un

ahorro en coste computacional pudiendo resolver los principales procesos que gobiernan el oleaje empleando un solo modelo. A pesar de que el módulo de difracción contenido en SWAN presenta ciertas deficiencias, los errores cometidos son despreciables a una o dos longitudes de onda del punto de difracción. En el caso de Granadilla, el morro del dique exterior se encuentra a más de 1000 m de la playa más cercana, lo cual supone más de 10 longitudes de onda.

### Modelo SWAN

El modelo de propagación energético SWAN, desarrollado por *Delft University of Technology*, está basado en la ecuación de acción de onda, promedia la fase y no reconstruye la superficie del mar en el espacio y el tiempo (Booij et al., 1999).

Esta base teórica genera uno de los principales atractivos de este modelo, que es la posibilidad de propagar oleaje en todas las direcciones. Además es posible la aplicación de este tipo de modelos a extensas superficies, ya que no requiere un número mínimo de puntos de cálculo por longitud de onda. Por otro lado, las últimas versiones de este modelo (tercera generación) han incorporado fenómenos exclusivos de profundidades someras, como son la rotura del oleaje y las interacciones no lineales (triadas), que han permitido ampliar el rango de aplicación de estos modelos. Al ser un modelo energético se consigue simular la generación de oleaje por viento.

La ecuación que resuelve el modelo de propagación SWAN es la siguiente:

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

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Se trata de una ecuación de transporte de energía, en el que las variaciones locales de la energía espectral en el tiempo y las variaciones del flujo de energía en el espacio se compensan con las salidas y entradas de energía al sistema. En este caso el espacio presenta cuatro dimensiones, dos correspondientes al espacio geográfico  $x$  e  $y$ , las otras al espacio espectral, siendo la frecuencia y la dirección sus componentes.

Se considera la densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar de la densidad de energía espectral  $E(\sigma, \theta)$  porque en presencia de corrientes se conserva la densidad de acción y no la densidad de energía. Las variables independientes son  $\sigma$  (frecuencia relativa, en el caso de corrientes), y  $\theta$  (dirección de incidencia del oleaje).

En la ecuación presentada el primer término en la parte izquierda de la ecuación, representa la variación local de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y el tercer término representan la propagación de la acción en el espacio geográfico (siendo  $C_x$  y  $C_y$  la velocidad de propagación de la energía del oleaje en la dirección  $x$  e  $y$ , respectivamente). El cuarto término representa el cambio en la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y en las corrientes ( $C_\sigma$  representa la velocidad de propagación en el espacio frecuencial). El quinto término representa la refracción inducida por la profundidad o las corrientes (siendo  $C_\theta$ , la velocidad de propagación en el espacio direccional).

El término localizado en la parte derecha de la ecuación, representa las fuentes y sumideros de la energía espectral. Este término contempla: la generación de oleaje por viento, la disipación de energía por whitecapping, por fricción con el fondo y por rotura del oleaje, así como las interacciones no lineales del oleaje (triadas y cuádruplas).

Las expresiones de las velocidades de propagación de la densidad de energía en las diferentes dimensiones están tomadas de la teoría lineal, presentado las expresiones siguientes (Rogers et al., 1999):

$$C_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x$$

$$C_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s}$$

$$C_\theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right]$$

donde,

$\bar{k} = (k_x, k_y)$  es el número de onda de magnitud  $k$  (relacionado con  $\sigma$  a través de la ecuación de la dispersión de teoría lineal).

$d$ : profundidad o calado

$\bar{U} = (U_x, U_y)$ : velocidad de la corriente

$s$ : coordenada espacial en la dirección de propagación  $\theta$

$m$ : coordenada espacial en la dirección perpendicular a  $s$ .

En la figura 2.28 se muestra la propagación del caso 500 de la selección MaxDiss ( $H_s \sim 1.15$  m,  $T_p=7.46$  s y  $\theta_m=324^\circ$  para el contorno norte de la malla G01) correspondiente a las mallas general (G01) y de detalle (M01), representándose los resultados de la altura de ola significativa y dirección media del oleaje en las situaciones con y sin puerto.



Nótese como la resolución empleada en la malla de detalle resuelve la disminución de  $H_s$  en el interior del puerto causada por el abrigo de los diques.

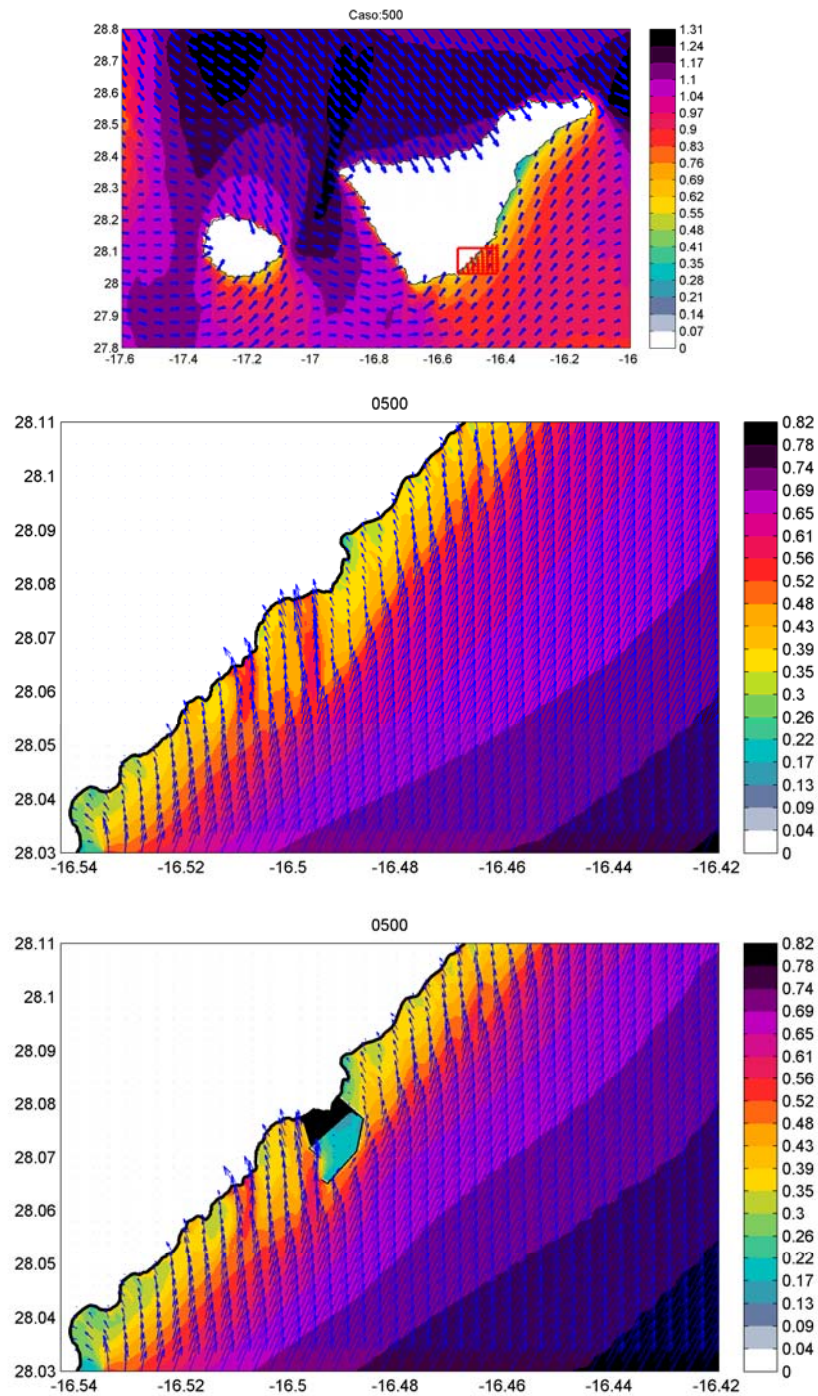


Figura 2.28. Propagación del Caso 500 de la selección MaxDiss de las mallas G01 y M01 (dos alternativas). Resultados de la altura de ola significativa (m) y dirección media del oleaje.



#### **2.2.2.4. Reconstrucción de series temporales horarias de parámetros espectrales del oleaje**

La reconstrucción del clima marítimo en aguas someras se realiza mediante una interpolación a partir de la serie de casos seleccionados y propagados desde profundidades indefinidas. Se ha considerado la técnica de interpolación basada en funciones de base radial (*radial basis functions*), muy adecuada para datos con una alta dimensionalidad y no distribuidos uniformemente (Franke, 1982). Se dispone de una serie de valores de la función real  $f(x_j)$   $j=1, \dots, M$  en los puntos  $\{x_1, \dots, x_M\}$ . La técnica de interpolación RBF considera que la función de aproximación *RBF* está formada por una combinación lineal de funciones radiales simétricas centradas en los puntos dados (véase la figura 2.29). La función objetivo presenta la siguiente expresión:

$$RBF(x) = p(x) + \sum_{j=1}^M a_j \Phi(\|x - x_j\|)$$

e interpola los valores dados de tal manera que:

$$RBF(x_j) = f_j \quad j = 1, \dots, M$$

Donde:

*RBF* es la función de interpolación

$p(x)$  es el polinomio lineal en todas las variables involucradas en el problema

$a_j$  son los coeficientes de ajuste RBF

$\Phi$  es la función radial básica, donde  $\|\cdot\|$  es la norma euclidiana.

$x_j$  son los centros de la interpolación RBF

El polinomio  $p(x)$  de la expresión de la función de interpolación *RBF* se define como una base de monomios  $\{p_0, p_1, \dots, p_d\}$ , formada por una cantidad de monomios de grado uno igual a la dimensionalidad de los datos (en este caso igual al número de componentes principales  $d$  considerado) y un monomio de grado cero, siendo  $b = \{b_0, b_1, \dots, b_d\}$  los coeficientes de estos monomios.

Las funciones de base radial pueden presentar diferentes expresiones. Algunas de estas funciones radiales contienen un parámetro de forma que juega un papel muy importante en la precisión de la técnica. En la metodología de propagación del clima marítimo se han considerado funciones radiales gaussianas que dependen de un parámetro de forma. El valor óptimo de este parámetro se obtiene a partir del algoritmo de propuesto por Rippa (1999).

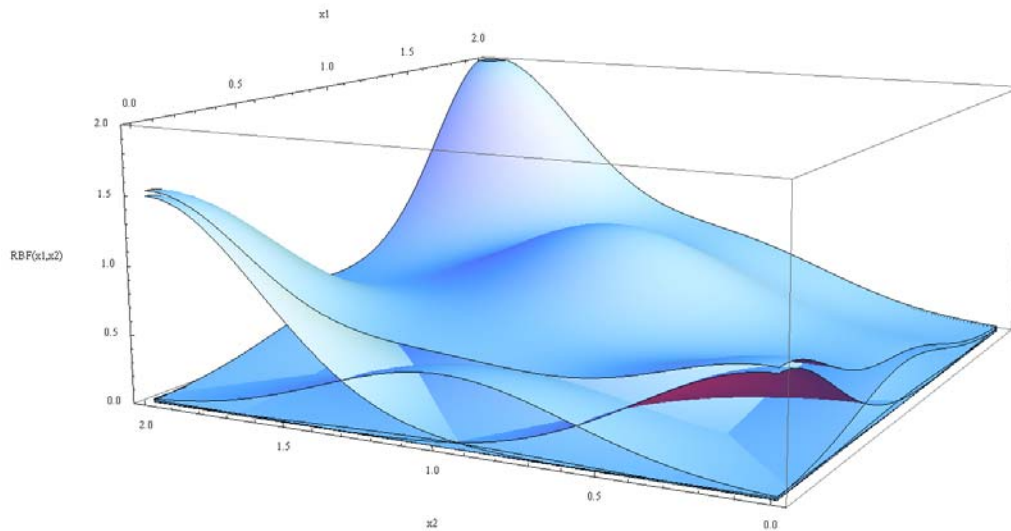


Figura 2.29. Interpolación RBF definida como una combinación de funciones radiales.

En la implementación de la técnica de interpolación RBF en la reconstrucción del clima marítimo multidimensional, se dispone de  $M$  puntos  $d$ -dimensionales  $D_j^{EOF} = \{PC_{x^*_1}^D, \dots, PC_{x^*_d}^D\}; j=1, \dots, M$ , que se corresponden con los casos del clima marítimo multidimensional en profundidades indefinidas, seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss en el espacio de proyección de las EOFs, donde  $d$  es igual al número de componentes principales consideradas. El valor exacto de la función en esos puntos  $f_j(x)$  es igual a los parámetros espectrales obtenidos como resultado de la propagación en un punto objetivo: la altura de ola significativa propagada  $\{H_{sp,j}^D\}$ , el periodo de pico  $\{T_{pp,j}^D\}$  y las componentes  $x$  e  $y$  de la dirección media propagada  $\{\theta_{mp,j}^D, \theta_{yp,j}^D\}$  (la dirección media se recompone a partir de las componentes  $x$  e  $y$ ).

Por tanto, el objetivo de la aplicación de esta técnica de interpolación en la reconstrucción del clima marítimo es el cálculo de una función de interpolación  $RBF_H$  de la altura de ola propagada  $H_{sp}$ , una función de interpolación  $RBF_T$  del periodo de pico propagado  $T_{pp}$ , una función de interpolación  $RBF_{\theta_x}$  de la componente  $x$  de dirección media propagada  $\theta_{x_{mp}}$  y una función de interpolación  $RBF_{\theta_y}$  de la componente  $y$  de dirección media propagada  $\theta_{y_{mp}}$ . Estas funciones RBF permiten inferir los valores de los parámetros propagados en cualquier otro punto del espacio, es decir, cualquier otra situación de clima marítimo en indefinidas proyectada en el espacio de las EOFs:

$$X_i^{EOF} = \{PC_{x^*_1}^D, \dots, PC_{x^*_d}^D\}; i=1, \dots, N.$$

Por tanto, en primer lugar es necesario determinar estas funciones de interpolación. Las componentes principales que definen a cada situación del clima marítimo en indefinidas se normalizan mediante una transformación lineal que escala los valores entre 0 y 1, y se definen como  $X_i^{EOF, norm} = \{PC_{x^*1}^{norm}, \dots, PC_{x^*d}^{norm}\}_i$ . Cada caso seleccionado en el que se dispone del valor de los parámetros propagados se expresa como  $D_j^{EOF, norm} = \{PC_{x^*1}^{D, norm}, \dots, PC_{x^*d}^{D, norm}\}_j$

La función de interpolación *RBF* se calcula mediante la siguiente expresión:

$$RBF(X^{EOF, norm}) = p(X^{EOF, norm}) + \sum_{j=1}^M a_j \Phi(\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|)$$

donde

$$p(X^{EOF, norm}) = b_0 + b_1 PC_{x^*1}^{norm} + b_2 PC_{x^*2}^{norm} + \dots + b_d PC_{x^*d}^{norm}$$

y  $\Phi$  representa la función gaussiana con un parámetro de forma,  $c$ :

$$\Phi(\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|) = \exp\left(-\frac{\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|^2}{2c^2}\right)$$

El parámetro de forma  $c$  más adecuado se estima mediante el algoritmo de Ripppa basado en el método *leave-one-out-cross validation* (LOOCV). Los coeficientes  $b_i = [b_0, b_1, \dots, b_d]^T$  de los polinomios y  $a_j = [a_1, \dots, a_M]^T$  de las funciones radiales se determinan a partir de las condiciones de interpolación:

$$RBF(D_j^{EOF, norm}) = f_j(D_j^{EOF, norm}) = D_{p,j}; \quad j = 1, \dots, M$$

donde el vector de datos  $f_j$  está definido por los parámetros espectrales propagados  $\{H_{sp}\}_j$ ,  $\{T_{pp}\}_j$ ,  $\{\theta x_{mp}\}_j$  ó  $\{\theta y_{mp}\}_j$  correspondientes a los estados de mar  $D_j$  seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss.

Por tanto, las funciones *RBF* de cada uno de los parámetros espectrales propagados en el punto objetivo permiten transferir el clima marítimo multidimensional definido por  $X^{EOF, norm} = \{PC_{x^*1}^{norm}, \dots, PC_{x^*d}^{norm}\}$  desde aguas profundas hasta aguas someras. Estas funciones *RBF* se definen como:

$$\begin{aligned}
 H_{sp,i} &= RBF_H \left( \left\{ D_j^{EOF, norm}, H_{sp,j} (j=1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF, norm} \right); i=1, \dots, N \\
 T_{pp,i} &= RBF_H \left( \left\{ D_j^{EOF, norm}, T_{pp,j} (j=1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF, norm} \right); i=1, \dots, N \\
 \theta x_{mp,i} &= RBF_{\theta_x} \left( \left\{ D_j^{EOF, norm}, \theta x_{mp,j} (j=1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF, norm} \right); i=1, \dots, N \\
 \theta y_{mp,i} &= RBF_{\theta_y} \left( \left\{ D_j^{EOF, norm}, \theta y_{mp,j} (j=1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF, norm} \right); i=1, \dots, N
 \end{aligned}$$

La función de transferencia general de cada estado de mar en indefinidas proyectado en el espacio de las EOFs,  $X_i^{EOF, norm}; i=1, \dots, N$  se expresa como:

$$X_{p,i} = RBF \left( \left\{ D_j^{EOF, norm}, D_{p,j}^* (j=1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF, norm} \right); \quad i=1, \dots, N$$

El resultado final es la serie de reanálisis transferida a aguas someras:

$$X_{p,i} = \{ H_{sp,i}, T_{mp,i}, \theta_{mp,i} \} (i=1, \dots, N)$$

Como en nuestra zona de estudio la amplitud de la onda de marea astronómica es significativa, es necesario propagar los casos seleccionados en  $Q$  diferentes niveles ( $z_q; q=1, \dots, Q$ ) :  $D_{p,j}(z_q) = \{ H_{sp,j}^D, T_{mp,j}^D, \theta_{mp,j}^D, P_{wp,j}^D, \theta_{pp,j}^D, z_q \}$  ( $j=1, \dots, M; q=1, \dots, Q$ ), calculando una función  $RBF$  para cada parámetro propagado de interés y para cada nivel de propagación. La transferencia de una condición de clima marítimo con variabilidad espacial desde aguas profundas al punto objetivo se obtiene a partir de las correspondientes funciones  $RBF$  para los  $q$  niveles y posteriormente, se realiza una interpolación lineal al nivel correspondiente a la situación climática en indefinidas  $z_i$ . La función de transferencia generalizada para un nivel del mar determinado  $z_i$  se expresa como:

$$X_{p,i}^*(z_i) = INTERP \left[ RBF \left( \left\{ D_j^{EOF, norm}, D_{p,j}^*(z_q), (j=1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF, norm}, z_i \{ q=1, \dots, Q \} \right) \right] \quad i=1, \dots, N$$

Para la reconstrucción del oleaje en los puntos de interés se han considerado los resultados obtenidos en la malla de detalle (M01) del modelo de propagación SWAN.

### **2.2.3 Validación del oleaje en aguas costeras**

La transferencia del oleaje hasta la costa se ha validado mediante la reconstrucción de la serie de reanálisis GOW en la posición de las distintas boyas localizadas a lo largo del litoral español. Las series temporales reconstruidas de los parámetros altura de ola significativa ( $H_s$ ), el periodo de pico ( $T_p$ ), la dirección media del oleaje ( $\theta_m$ ) y la potencia media ( $P_w$ ) se han comparado con los registros instrumentales de la boya correspondiente.

En la figura 2.30 se muestran la serie temporal de la base de datos GOW (rojo), reconstruida en la posición de la boya de Granadilla (OPPE), a partir de la metodología propuesta, y la serie temporal registrada por dicha boya (azul) correspondiente al año 2008. Se puede observar como la metodología de propagación es capaz de reproducir la estructura de la serie temporal de la altura de ola significativa y periodo de pico. En la parte derecha de la figura se muestra la información asociada a la validación: localización de la boya y la correspondiente malla de computación de la que se extraen los resultados, en este caso del SWAN; las características de la boya (red a la que pertenece, posición geográfica, profundidad y localización en la batimetría de la zona); resumen de las características de los datos GOW empleados (versión 1.0 y mallas de computación del WaveWatch, junto con su resolución), de la calibración aplicada (datos y metodología) y de la metodología de transferencia del oleaje hasta la costa (versión datos propagados (DOW 1.0), malla de computación y su resolución, versión del modelo de propagación SWAN, número de casos seleccionados, MaxDiss, y algoritmo de interpolación, RBF).

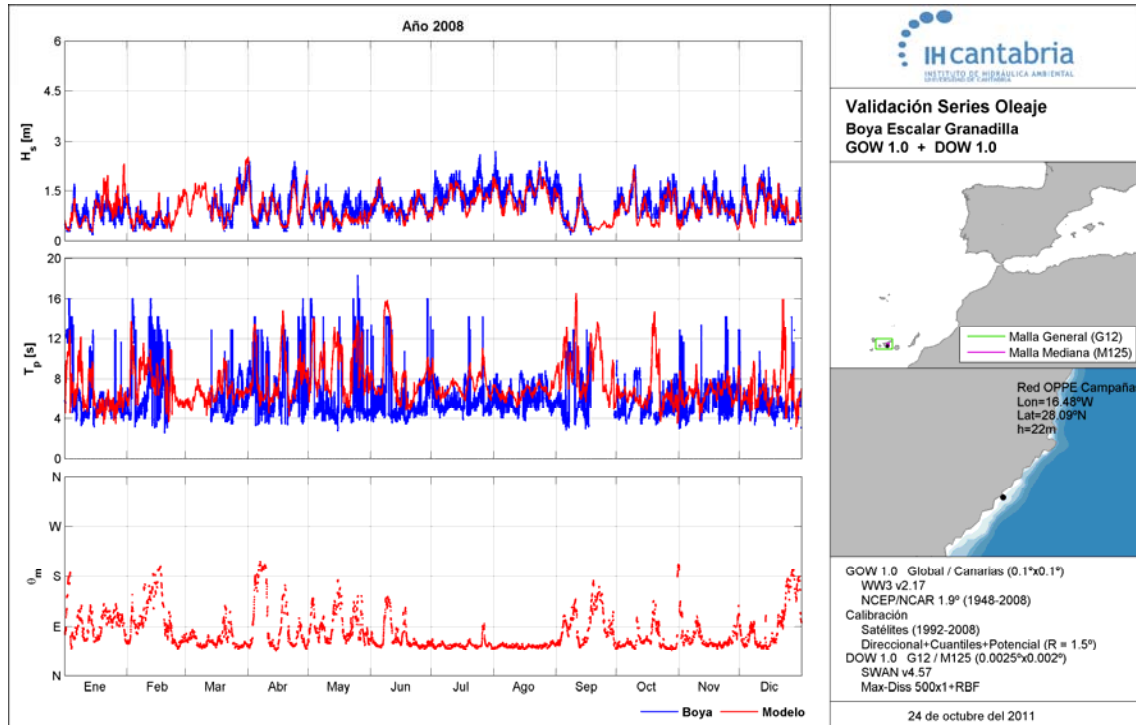


Figura 2.30. Validación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $\theta_m$  y  $P_w$  en la posición de la boya de Granadilla correspondientes al año 2008. Serie reanálisis reconstruida (rojo) y registro boya (azul).

En la figura 2.31 se muestra un análisis descriptivo del oleaje en la posición de la boya de Granadilla a partir de los pares de datos coincidentes boya-modelo de 6 años (2003-2008). El panel superior de la figura muestra, de izquierda a derecha: gráfico de dispersión de  $H_s$  modelada frente a la registrada por la boya, rosa de direcciones de los datos de la boya (color azul) y rosa de direcciones de los datos modelados (color rojo). Mediante estos gráficos se puede comprobar que tanto los pares de datos como los cuantiles (puntos negros) se distribuyen en torno a la bisectriz, lo cual indica una distribución estadística de ambas familias muy parecida. Del mismo modo, las rosas de direcciones muestran como los datos modelados y medidos se distribuyen uniformemente a lo largo del abanico de direcciones posibles. En los paneles centrales se muestra los resultados obtenidos para  $T_p$ , en este caso se puede observar una mayor dispersión de los valores que toma esta variable, la cual es frecuentemente sobreestimada por el modelo debido a la alta sensibilidad que la posición del pico de energía espectral presenta ante la acción de los vientos locales. Aun así, las distribuciones conjuntas de  $H_s$ - $T_p$  muestran formas muy similares. Por último, en la parte inferior de la figura se muestra el mapa de la SOM obtenido al analizar las variables  $H_s$ ,  $T_p$ , y  $\theta_m$  durante los 60 años, junto con las probabilidades de ocurrencia calculadas en base a los datos de la boya y del modelo. Esta representación resulta muy útil, ya que mediante un gráfico bidimensional se puede obtener una visión muy

completa del clima marítimo en la zona de estudio. En este caso, los vectores muestran la dirección media, la escala de colores [blanco-amarillo-rojo] muestra el valor de  $H_s$  y la escala [blanco-verde] muestra el valor del  $T_p$ , la intensidad de los colores azules en el gráfico central muestra la probabilidad de ocurrencia en los datos instrumentales y los rojos (derecha) la probabilidad de ocurrencia en los datos modelados. En el panel inferior se puede comprobar como los oleajes del este y este-noreste son los más frecuentes, con alturas de ola en torno al metro y periodos en torno a los 8 segundos. Las probabilidades de ocurrencia en la boya y en el modelo son muy parecidas, lo cual sustenta la validez de la metodología empleada.

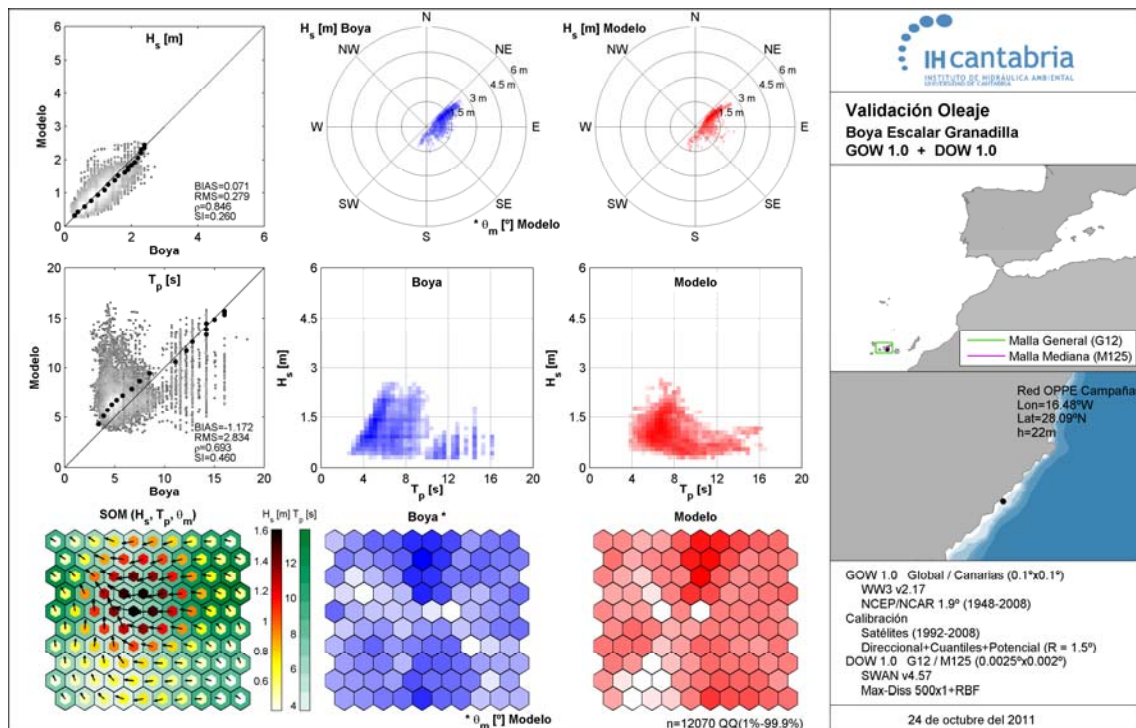


Figura 2.31. Análisis descriptivo del oleaje en la posición de la boya de Granadilla.



## 2.3 Caracterización de las corrientes

Para obtener las características de las corrientes a la escala requerida por este estudio (local) es necesario aplicar una metodología que, análogamente a la planteada para analizar el clima marítimo, utilice las mejores bases de datos disponibles, tanto instrumentales como numéricas, y modelos numéricos que sean capaces de reproducir las corrientes generadas por las dinámicas relevantes en la zona de estudio: marea astronómica y marea meteorológica (viento y presión).

En cuanto a datos instrumentales, se ha mencionado anteriormente que en España existen varias boyas que miden corrientes. Sin embargo, la cobertura espacial y temporal de estas boyas es escasa. En concreto, en la zona de estudio se encuentra la Boya de Granadilla (véase figura 2.32), que se utilizará para validar las corrientes obtenidas del modelado numérico.

### Boya de Granadilla

[Información de estación](#) [Últimos datos](#) [Gráficos](#) [Tablas](#) [Localización](#) [Descargas](#) [Ayuda](#)

Posición actual de la estación de muestreo Granadilla001

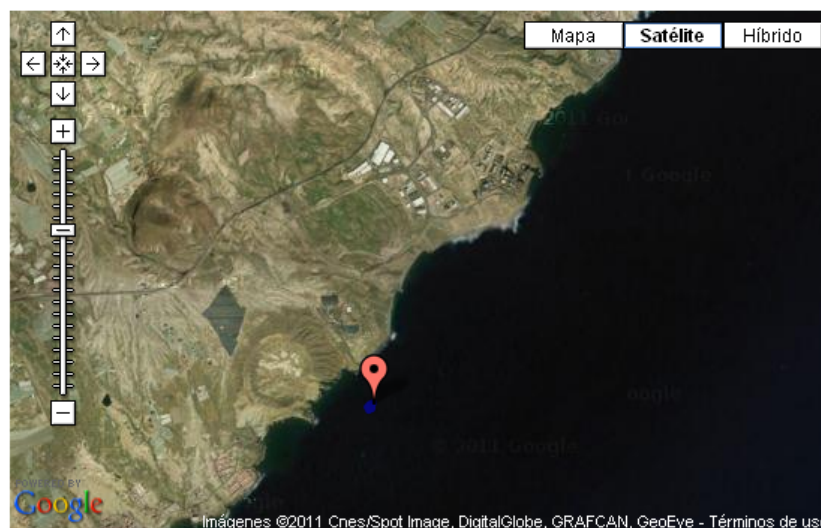


Figura 2.32. Boya de Granadilla (fuente: [http://www.oag-fundacion.org/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=204/](http://www.oag-fundacion.org/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=204/))

En lo que respecta a bases de datos de reanálisis de corrientes, hoy en día no hay disponible una base de datos equivalente a las que hay para oleaje.

Por lo tanto, la metodología que se propone en este trabajo se basa en la utilización de las corrientes de marea astronómica obtenidas del reanálisis DOT para introducir como condición de contorno en la malla de detalle. Este reanálisis proporciona para la zona de Canarias (con resolución de 1'), datos horarios de niveles y corrientes de marea astronómica, utilizando los datos de TPX07 como condiciones de contorno. En el apartado 2.1.5.3 de este capítulo se ha descrito con mayor detalle esta base de datos.

### **2.3.1 Obtención de las corrientes en aguas costeras**

Para obtener las corrientes en la zona de estudio a una escala adecuada, se ha aplicado una técnica denominada anidamiento de mallas o downscaling, que consiste en ir aumentando la resolución de los resultados utilizando sucesivas mallas numéricas que se van pasando información unas a otras. Este proceso es necesario debido a que las corrientes son muy dependientes de la batimetría y de los contornos de la costa, aspectos estos que se van mejorando a medida que se aumenta la resolución (disminuye tamaño de celda) de las mallas numéricas.

Por otro lado, el aumento de resolución tiene que buscar un equilibrio entre la calidad de los resultados deseada y un esfuerzo computacional realista. En este caso, como malla de detalle se ha utilizado una malla con tamaño de celda igual a 200 metros, anidada a la malla general de DOT Canarias. En la figura 2.33 se muestra un esquema del anidamiento realizado y la batimetría y cobertura espacial de la malla de detalle. Como se indica en la figura 2.34, en la malla de detalle se ha introducido también la situación con puerto.

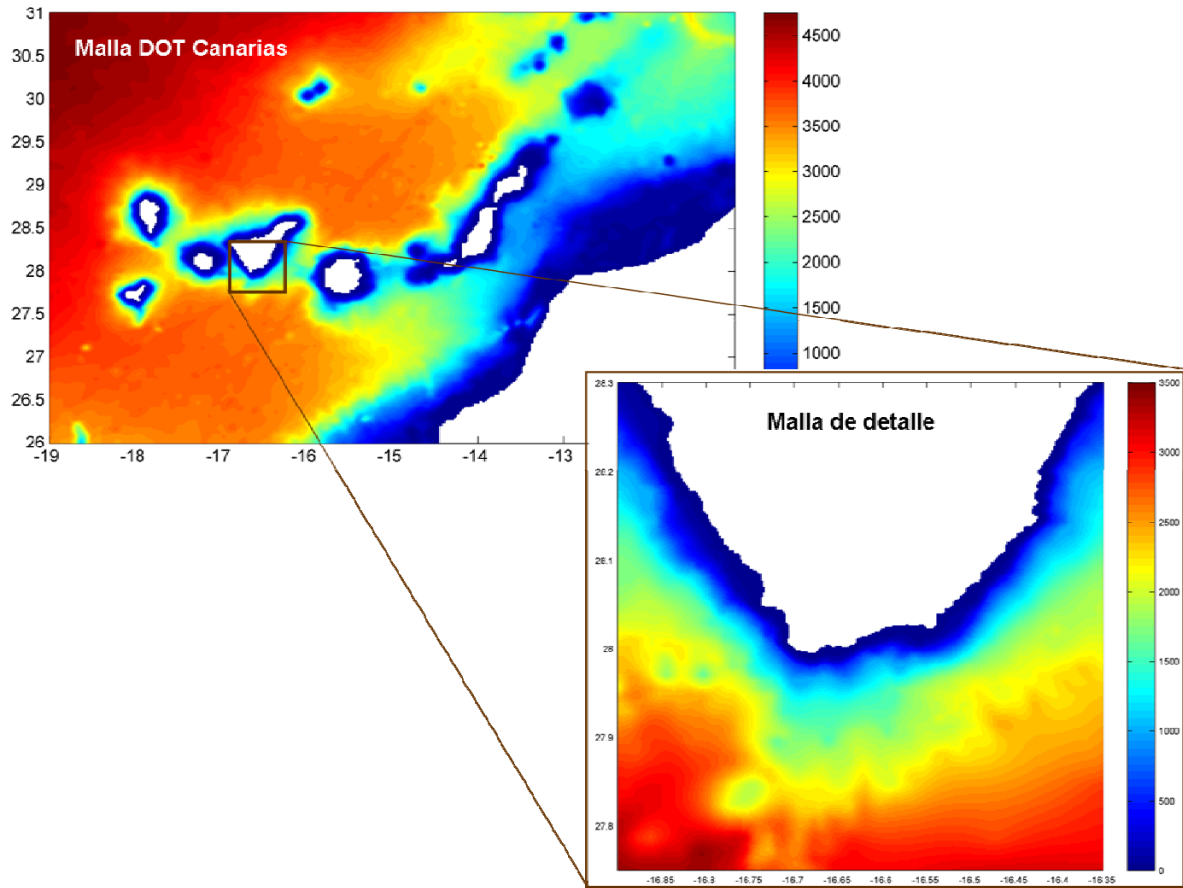


Figura 2.33. Anidamiento de mallas para calcular corrientes en la zona de estudio

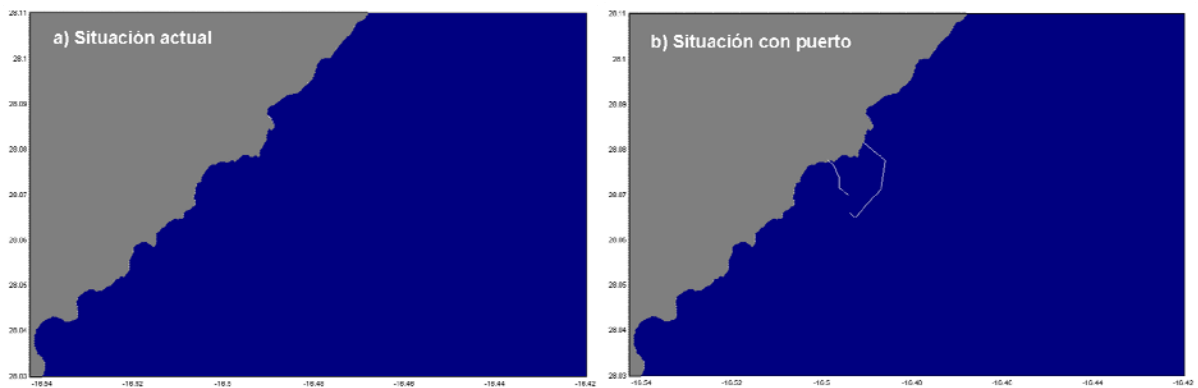


Figura 2.34. Zoom de la malla de detalle con: a) Situación actual; b) Situación con puerto

El modelo hidrodinámico utilizado para resolver las corrientes en la malla de detalle, es el modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) desarrollado por el Ocean Modeling Group de Rutgers (<http://www.myroms.org>). Se trata de un modelo de circulación tridimensional que resuelve de forma numérica las ecuaciones primitivas asumiendo presión hidrostática.

Considerando un sistema de coordenadas cartesianas y asumiendo la aproximación de Boussinesq (las variaciones de densidad son despreciadas en todos los términos excepto en la fuerza gravitacional) y que la ley de presiones es hidrostática, estas ecuaciones se expresan de la siguiente forma:

Componentes horizontales de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} + 2f\vec{k} \times \vec{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p - \frac{g\rho}{\rho_0} \vec{k} + \vec{F}$$

Componente vertical de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Ecuación de conservación de la masa:

$$\nabla \cdot \vec{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ecuación de transporte de la temperatura:

$$\frac{DT}{Dt} = D_T$$

Ecuación de transporte de la salinidad:

$$\frac{DS}{Dt} = D_s$$

Ecuación de estado:

$$\rho = R(T, S, p)$$

Donde:

$(x, y, z)$  = Coordenadas horizontales y verticales.

$(\vec{u}, w)$  = Componentes horizontales y verticales de la velocidad.

$D/Dt$  = Derivada total.

$\rho$  = Densidad.

$\rho_0$  = Densidad media.

$p$  = Presión.

$\vec{k}$  = Vector unidad vertical.

$g$  = Aceleración gravitacional.

$T$  = Temperatura potencial.

$S$  = Salinidad.

$R$  = Ecuación de estado oceánico.

$\vec{F}, D$  = Modelos de cierre para los efectos no- conservativos derivados de los procesos turbulentos y de pequeña escala no resueltos por el modelo.

Con objeto de minimizar el tiempo de computación, las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento son resueltas utilizando un esquema conocido por el nombre *split-explicit time-stepping*, que consiste en resolver de forma separada (pero no independiente) el modo 2D (ecuaciones integradas en vertical) y el modo 3D (ecuaciones tridimensionales). El esquema numérico utilizado para la discretización temporal de las ecuaciones es altamente estable, ya que corresponde al esquema predictor (Leap- Frog) - corrector (Adams-Molton) de tercer orden, permitiendo mayores incrementos de tiempo y minimizando el tiempo de computación.

Para obtener las corrientes asociadas a la marea astronómica y meteorológica en la malla de detalle, se ha utilizado como condición inicial y como condiciones de contorno, los datos del reanálisis DOT. Los forzamientos atmosféricos (viento y presión) se obtienen del reanálisis Seawind-Interim, interpolados a la malla de detalle (explicación más detallada en los apartados 2.1.5.1 y 2.1.5.3).

Como resultado, se ha obtenido la serie horaria de nivel del mar y corrientes con una resolución espacial de 200 metros en horizontal y 10 capas verticales en el dominio que abarca la malla de detalle mostrada en la figura 2.33, tanto para la situación actual (sin puerto) como para la situación con puerto. Como ejemplo, en las figuras 2.35 y 2.36 se presenta un mapa de niveles y de corrientes, respectivamente, para una fecha y hora determinada, para cada una de las simulaciones. Téngase en cuenta que, aunque las figuras se han extraído para determinados instantes de marea, las corrientes son debidas al viento y a la presión además de a la marea astronómica.

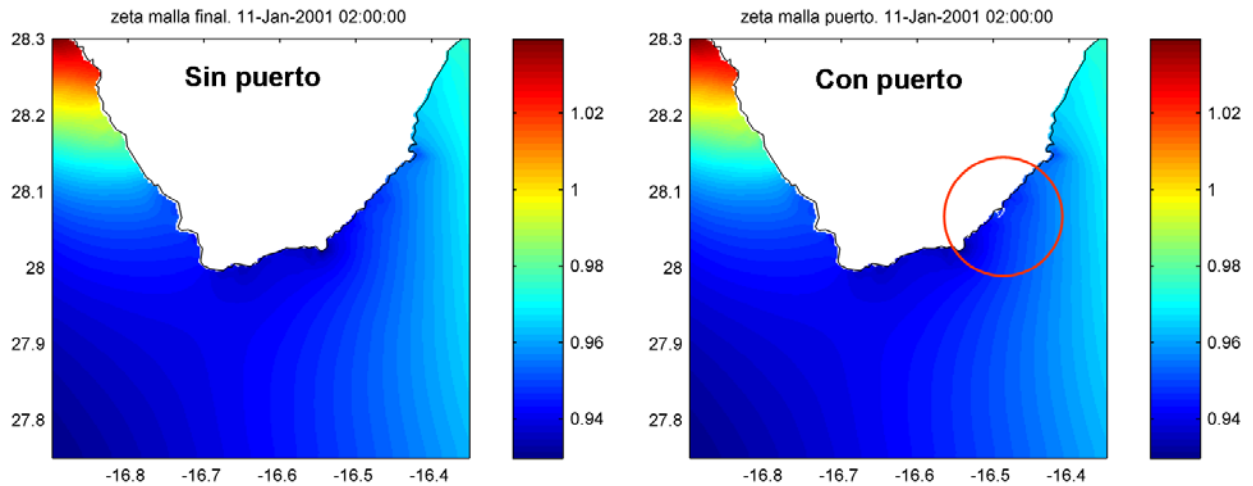


Figura 2.35. Ejemplo de resultados de superficie libre en la malla de detalle para la situación actual y la situación con puerto. Instante de pleamar. Resolución horizontal de 200 m.

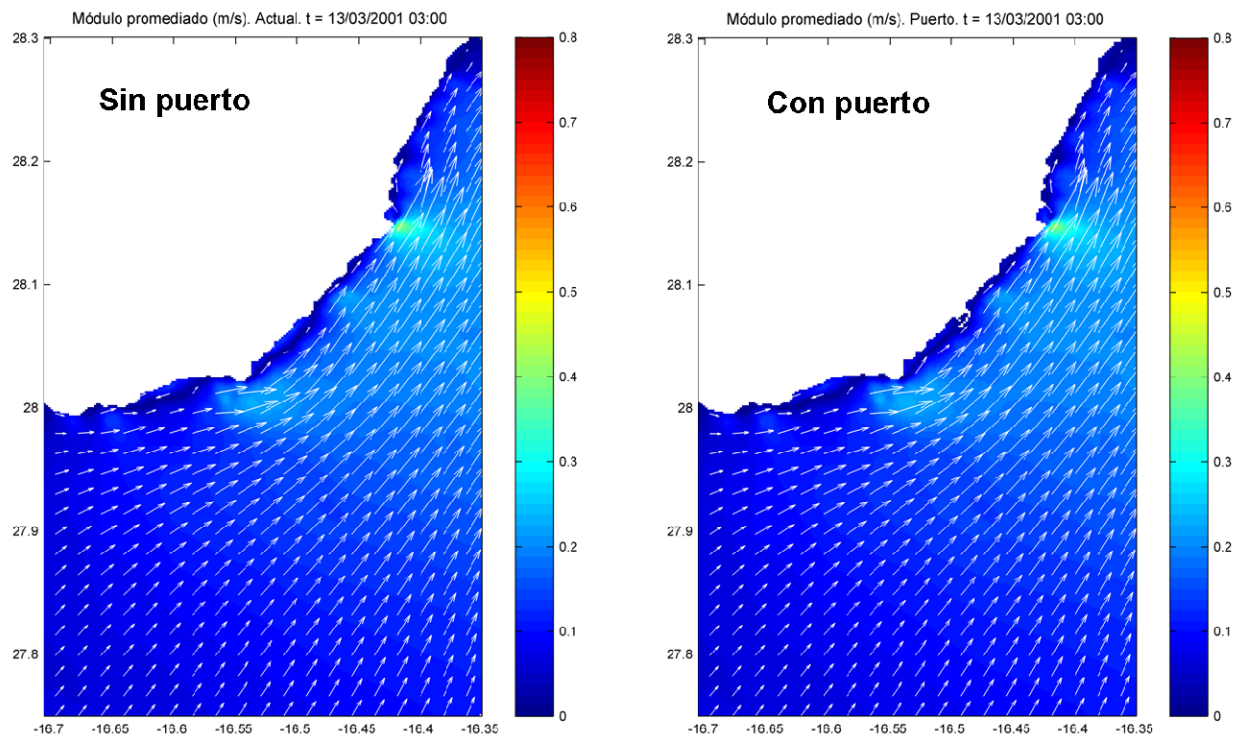


Figura 2.36. Ejemplo de resultados de corrientes promediadas en vertical obtenidas en la malla de detalle para la situación actual y la situación con puerto. Instante de pleamar. Resolución horizontal de 200 m.

### **2.3.1.1 Validación de la aplicación de detalle**

Como ya se ha comentado, cuando se aborda un estudio de este tipo, surge el problema de la escasa disponibilidad de datos medidos de corrientes con la suficiente cobertura espacial y temporal. Este problema se soluciona parcialmente con modelado numérico, estrategia seguida en este trabajo. Sin embargo, para obtener resultados fiables, es necesario llevar a cabo la validación de los mismos.

En este estudio, la malla de detalle utiliza los resultados del reanálisis DOT, cuyos resultados han sido validados, como se ha mostrado en apartados anteriores. Además, se han validado los resultados calculados en la malla de detalle utilizando las medidas de nivel y corrientes del mareógrafo y la boya de Granadilla, respectivamente.

En la figura 2.37 se presentan los resultados obtenidos. En el apartado a) se muestra la serie temporal de superficie libre para el año simulado, comparando los resultados proporcionados por el modelo numérico, con la reconstrucción, para las 10 componentes de marea astronómica, de la serie medida por el mareógrafo. En el apartado b) se muestra en detalle esta comparación para el mes de Mayo. Nótese como, en la malla de detalle, se reproduce de manera satisfactoria la evolución horaria del nivel del mar. Por último, en el apartado c) se presenta el gráfico de dispersión de la superficie libre.



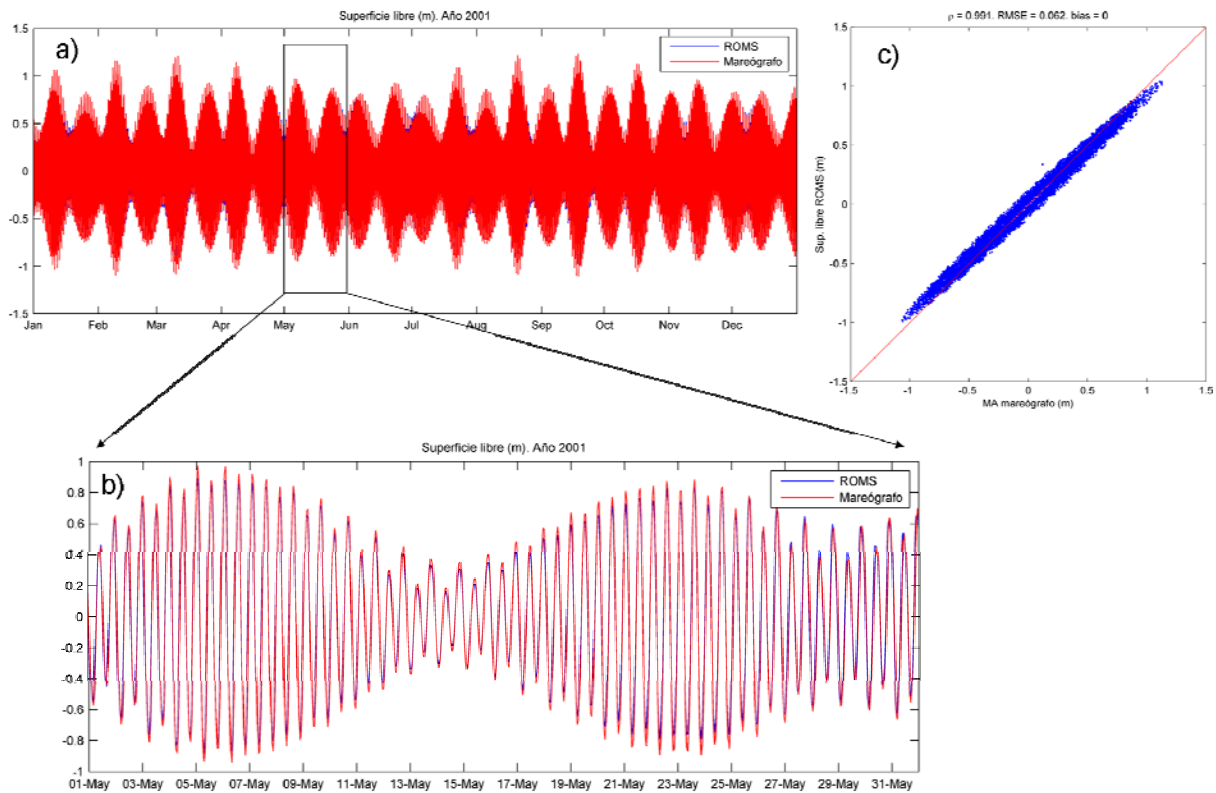


Figura 2.37. Validación en el mareógrafo de Granadilla. Malla de detalle. a) Comparación entre la serie temporal de superficie libre obtenida con el modelo numérico ROMS (línea azul) y las 10 componentes de marea astronómica del mareógrafo, para el año 2001 (línea roja); b) detalle de la comparación entre las series temporales de superficie libre; c) gráfico de dispersión.

Con respecto a la magnitud de las corrientes, se presenta en la figura 2.38 una comparación entre los resultados obtenidos por el modelo numérico y los datos registrados por la boya de Granadilla. En los apartados a) y b) se muestra la función de distribución del módulo de la corriente horaria para los resultados del modelo y de la boya, respectivamente. Se observa como, las magnitudes obtenidas son sensiblemente menores en el modelo que en la boya. Del mismo modo, en los apartados c) y d) se muestra la rosa de direcciones de la corriente para el modelo y la boya. Se observa que, el modelo numérico está sobreestimando las corrientes en dirección SW y que no recoge todo el abanico de direcciones presente en la boya. Sin embargo, sí reflejan claramente las dos direcciones principales de la corriente, NE y SW, que determinarán la dirección del transporte de sedimentos.

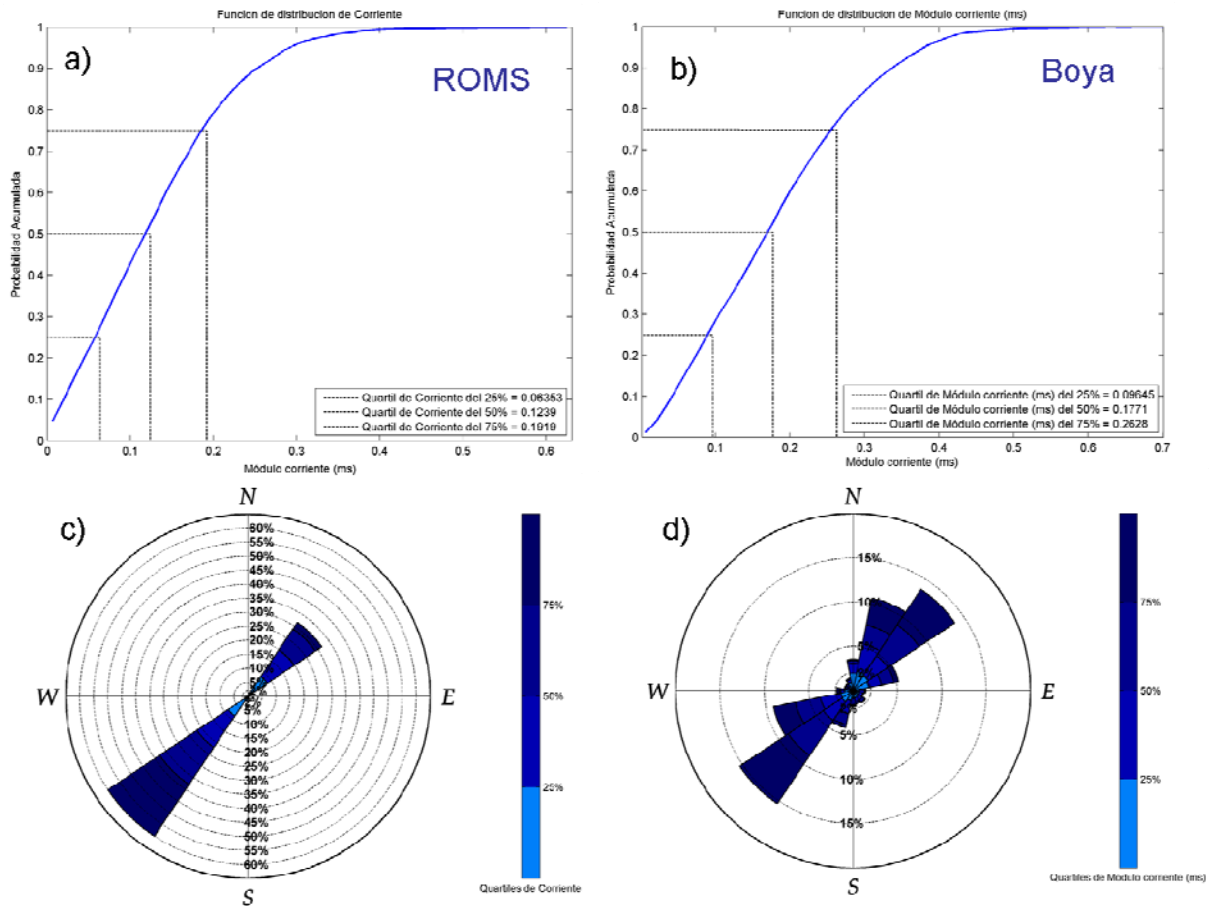


Figura 2.38. Validación en la boya de Granadilla. a) Función de distribución de la corriente (ROMS); b) Función de distribución de la corriente (boya); c) Rosa de direcciones de la corriente (ROMS); d) Rosa de direcciones de la corriente (boya).

## 2.4 Estimación de aportes sólidos de origen fluvial

El primer paso para la estimación de los aportes de sedimentos procedentes de los barrancos, es la identificación de las cuencas de aportación.

El puerto de Granadilla se ubicará en la comarca de Abona. La red de cauces en esta comarca de Abona se encuentra muy desarrollada y cuenta con un elevado nivel de ramificación de afluentes.

En el entorno del puerto de Granadilla existe una red de barrancos muy desarrollada, con tamaños de cuenca variables, siendo los de mayor longitud el barranco de El Río y el

barranco de El Helecho (o de las Vegas), que recorren más de 15 km y desembocan al noreste del puerto de Granadilla (figuras 2.39 y 2.40).

El presente análisis se centrará en los aportes de las cuencas de los barrancos cuyas características principales se muestran en la tabla 2.2.

	Longitud cauce (Km)	Superficie Cuenca (Km <sup>2</sup> )	Pendiente media (%)
Barranco de El Río	17.11	28.78	12.65
Barranco de El Helecho	16.48	20.63	13.94
Barranco de El Cobón	6.44	2.38	6.21
Barranco de Tagoro	9.51	13.82	9.86
Barranco de Charcón	14.26	32.79	10.22
Barranco de La Barca	5.31	7.50	10.35
Barranco de Los Calderones	3.72	1.93	5.10
Barranco de Los Valos	9.23	8.96	7.60

Tabla 2.2. Características de los principales barrancos

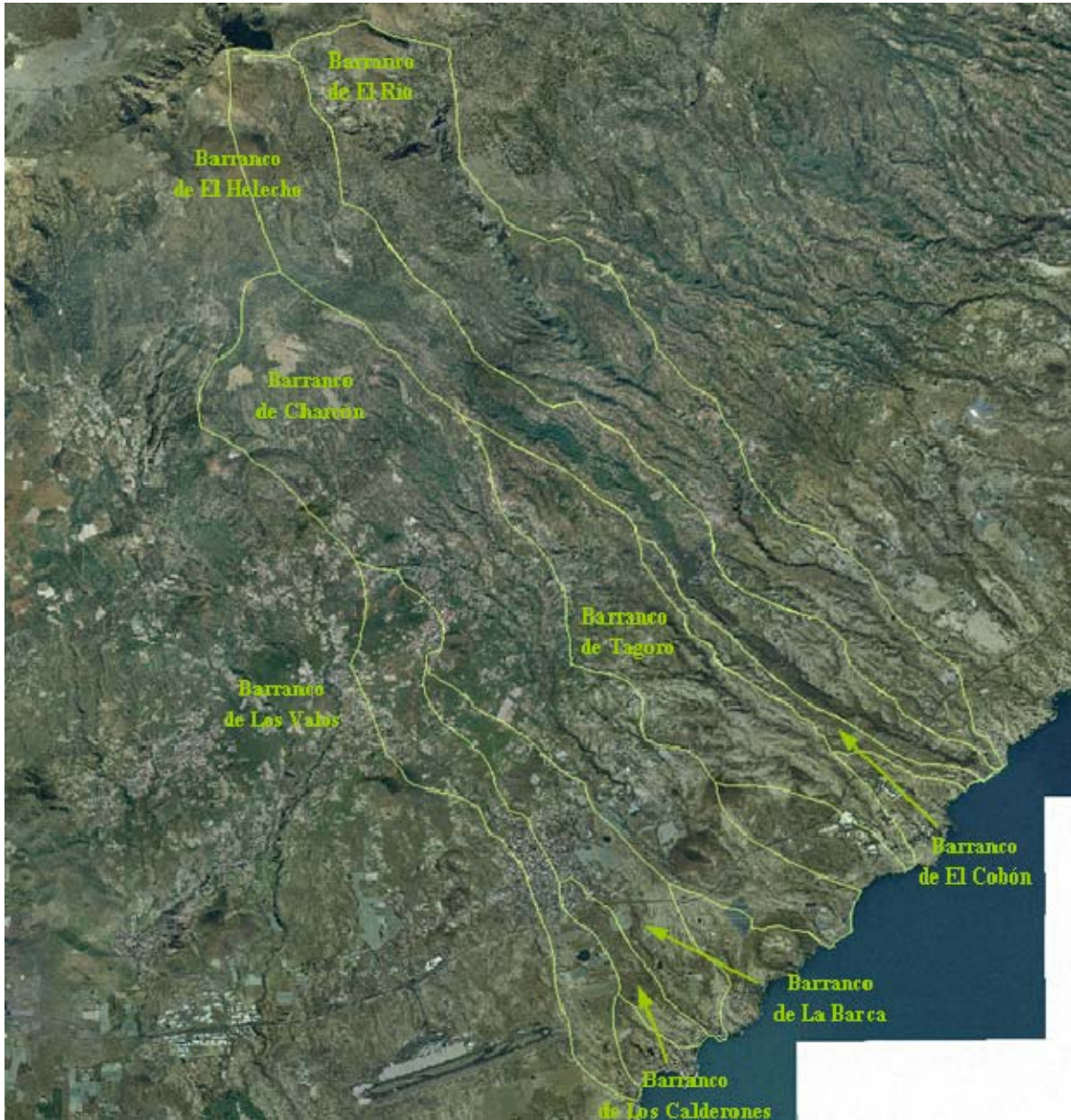


Figura 2.39. Barrancos en la zona de estudio



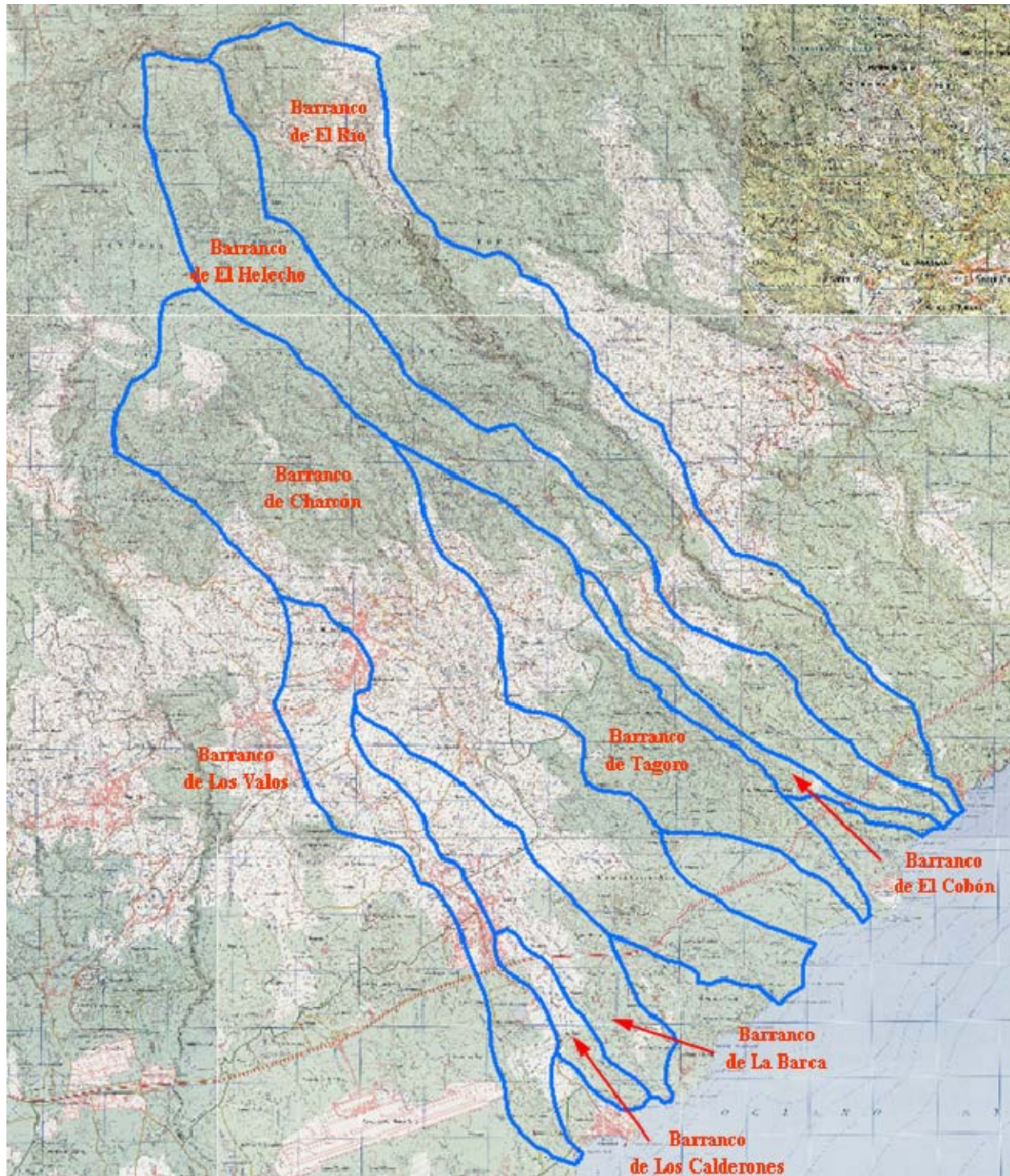


Figura 2.40. Cuencas de los barrancos

Una vez definidas las cuencas, es necesario conocer la mineralogía de la zona. Los datos disponibles de mineralogía de los barrancos en la comarca ("Estudio de dinámica litoral del puerto de Granadilla"), muestran que en todos ellos más del 80% son fragmentos de roca de las series volcánicas por las que discurren. El barranco del Río, de mayor recorrido que el resto, presenta unos fragmentos de roca más variados (40% de pómez, 30% de basaltos, 30% de fonolitas), que permiten estimar una densidad media de los mismos en torno a  $1.95 \text{ Tm/m}^3$ .

En lo referente a las precipitaciones, de forma general puede indicarse que las precipitaciones en la isla de Tenerife son escasas (figura 2.41). En el caso concreto de la región de Tenerife Sur, los registros históricos recogen una precipitación media anual de 223 mm, con 33 días de lluvia por año.

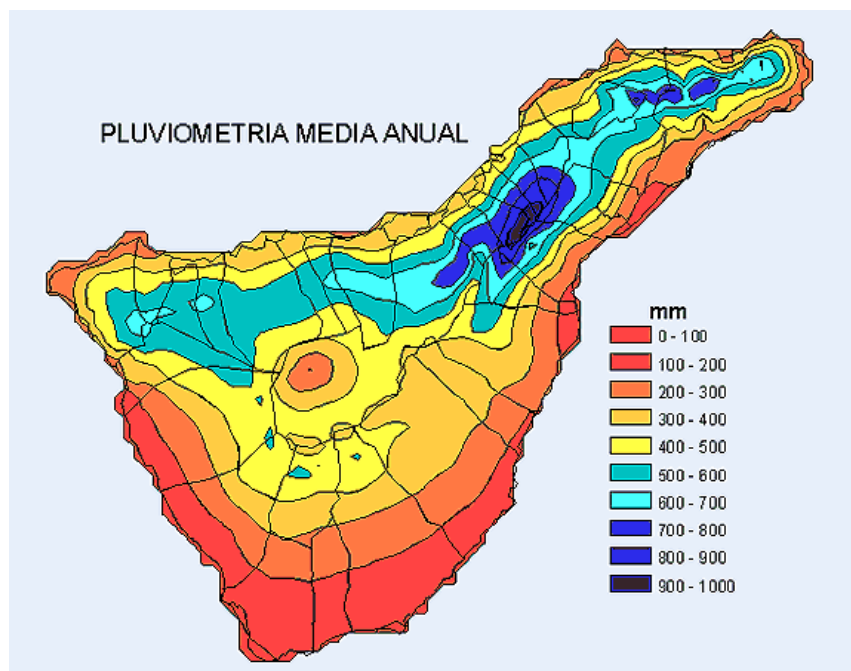


Figura 2.41. Mapa de isoyetas: Pluviometría media del periodo 1986/87 -1992/93. Fuente: [www.aguastenerife.org](http://www.aguastenerife.org)

En cuanto a su distribución cabe señalar que, para la región de Abona, la gran irregularidad de las mismas y la escasa cuenca tributaria de cada uno de los cauces, combinados con una geología que favorece extraordinariamente la infiltración, determinan un régimen habitual en donde, excepto con ocasión de grandes lluvias torrenciales, los cauces llevan más agua en las cabeceras que en los tramos cercanos a la desembocadura, de tal manera que éstos están secos prácticamente durante casi todo el año.



Actualmente el MARM está desarrollando el Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES), que tiene como objetivos detectar, cuantificar y reflejar cartográficamente los principales procesos de erosión en el territorio nacional y determinar su evolución en el tiempo. Supone la actualización de anteriores Mapas de Estados Erosivos (ICONA, 1992). El primer ciclo se ha iniciado en 2001 y se prevé su finalización en 2012.

En las tablas 2.3 a 2.5 se presentan los principales datos de interés disponibles para Tenerife:

<b>TENERIFE</b>		Superficie geográfica		Pérdidas de suelo		Pérdidas medias
Nivel erosivo (t·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )		ha	%	t·año <sup>-1</sup>	%	(t·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )
1	0-5	56.942,41	27,99	159.494,67	6,61	2,80
2	5-10	50.700,97	24,92	370.792,11	15,36	7,31
3	10-25	59.742,34	29,37	925.669,72	38,34	15,49
4	25-50	15.005,26	7,38	500.016,69	20,71	33,32
5	50-100	4.645,37	2,28	317.983,05	13,17	68,45
6	100-200	951,94	0,47	115.493,73	4,78	121,32
7	>200	90,27	0,04	24.909,29	1,03	275,94
<b>SUPERFICIE EROSIONABLE</b>		<b>188.078,56</b>	<b>92,45</b>	<b>2.414.359,26</b>	<b>100,00</b>	<b>12,84</b>
8	Láminas de agua superficiales y humedales	82,33	0,04			
9	Superficies artificiales	15.275,54	7,51			
<b>TOTAL</b>		<b>203.436,43</b>	<b>100,00</b>			

Tabla 2.3. Pérdidas de suelo y superficie según niveles erosivos. Fuente: INES

<b>TENERIFE</b>		Capacidad climática de recuperación de la vegetación						Superficie geográfica	
Nivel erosivo (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Baja		Media		Alta		ha	%	
	ha	%	ha	%	ha	%			
0-5	421,24	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	421,24	0,21	
5-10	565,03	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	565,03	0,28	
10-25	3.818,43	1,88	0,00	0,00	0,00	0,00	3.818,43	1,88	
25-50	11.482,31	5,64	0,13	~ 0,00	0,00	0,00	11.482,44	5,64	
50-100	24.054,99	11,82	4,00	~ 0,00	0,00	0,00	24.058,99	11,82	
100-200	44.248,96	21,75	54,70	0,03	0,00	0,00	44.303,66	21,78	
>200	103.082,49	50,67	346,28	0,17	0,00	0,00	103.428,77	50,84	
<b>SUPERFICIE EROSIONABLE</b>	<b>187.673,45</b>	<b>92,25</b>	<b>405,11</b>	<b>0,20</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>188.078,56</b>	<b>92,45</b>	
Láminas de agua superficiales y humedales	82,33	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	82,33	0,04	
Superficies artificiales	15.275,54	7,51	0,00	0,00	0,00	0,00	15.275,54	7,51	
<b>TOTAL</b>	<b>203.031,32</b>	<b>99,80</b>	<b>405,11</b>	<b>0,20</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>203.436,43</b>	<b>100,00</b>	

Tabla 2.4. Erosión potencial laminar y en regueros. Fuente: INES.



<b>TENERIFE</b>		
Cualificación de la erosión	Superficie geográfica	
	ha	%
Muy leve	27.514,64	13,52
Leve	54.240,32	26,66
Moderada-grave	50.686,72	24,92
Grave	8.213,35	4,04
Muy grave	47.423,53	23,31
<b>SUPERFICIE EROSIONABLE</b>	<b>188.078,56</b>	<b>92,45</b>
Láminas de agua superficiales y humedales	82,33	0,04
Superficie artificial	15.275,54	7,51
<b>TOTAL</b>	<b>203.436,43</b>	<b>100,00</b>

Tabla 2.5. Superficies según cualificación de la erosión. Fuente: INES.

Esta información está disponible en formato gráfico (figura 2.42) a través del visor: <http://www.marm.es/ide/metadatos/geoportal/Visor.html>

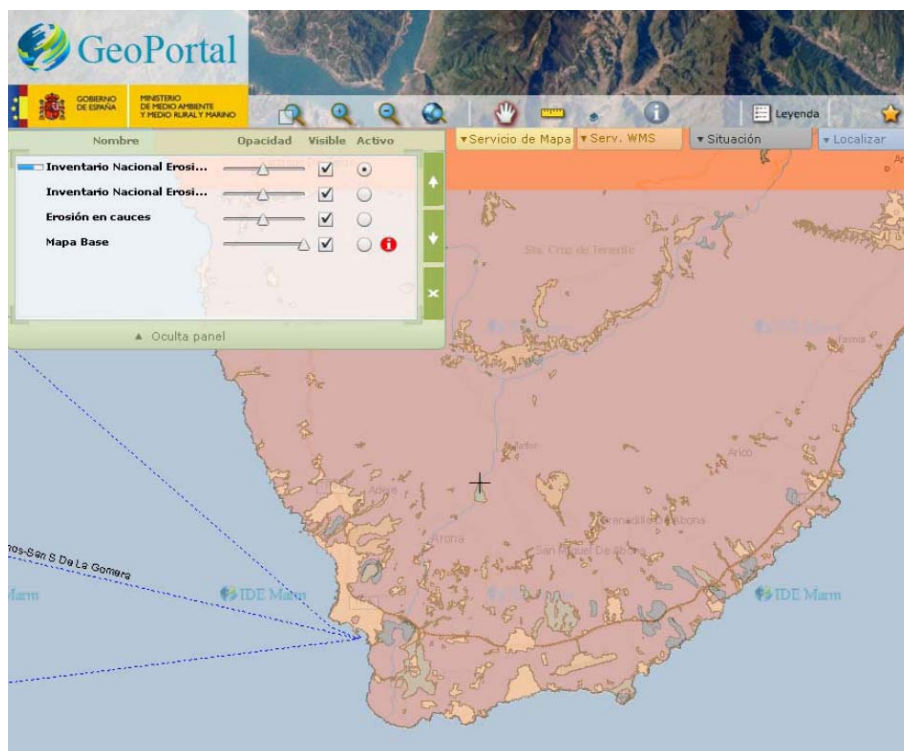


Figura 2.42. Clasificación de niveles erosivos en el INES.

Por otro lado, existen diversas formulaciones para evaluar la tasa de erosión de un suelo, pero de todas ellas la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) y sus actualizaciones son las más empleadas.

La USLE fue creada por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EEUU y posteriormente desarrollada por Wischmeier (1978), como una metodología para la estimación de la erosión laminar en parcelas pequeñas. Tras varias modificaciones la ecuación se presenta como una metodología de gran utilidad en la planificación de obras de conservación de suelos.

Aunque la aplicación de la USLE en terrenos de fuerte pendiente, como en el presente caso presenta ciertas limitaciones, este método puede ser empleado a nivel estimativo (Farrish et al., 1993). El modelo resulta indicado para calcular el promedio de suelo removido por erosión laminar o en regueros de un territorio o de una cuenca.

La ecuación es la siguiente:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde:

**A** es la pérdida de suelo por unidad de superficie, medida en toneladas métricas por unidad de superficie (t/ha).

**R** es el factor erosividad de la lluvia (MJ/ha.año) (mm/h)/10

**K** es el factor erosionabilidad del suelo (Mg/J).

**L** (adimensional) es el factor longitud de la pendiente.

**S** (adimensional) es el factor gradiente de la pendiente.

**C** (adimensional) es el uso y gestión de suelos.

**P** (adimensional) es el factor de prácticas de conservación del suelo.

## 2.5 Cálculo del transporte sedimentario potencial

El cálculo del transporte sólido longitudinal en la costa, puede ser obtenido a partir de diversos medios: (1) midiendo el transporte de sedimento en el campo; (2) evidencias morfológicas de la costa; (3) evolución de la línea de costa; y (4) cálculo teórico.

Respecto a la medición in situ del transporte sólido litoral, cabe señalar que se trata de un tema bastante complejo debido a la variabilidad espacial y temporal del mismo. Para la realización de medidas in situ de transporte de sedimentos se pueden utilizar distintos métodos con más o menos fiabilidad. Un método es la integración espacial y temporal mediante trazadores de arena fluorescentes distribuidos en la playa, método bastante

complejo y que según Kraus et al (1982), pueden llegar a dar errores hasta del 400% en el transporte. Otro método es mediante la medición instrumental del transporte de arena, mediante trampas instantáneas, Kana, (1977) o sensores ópticos OBS Sternberg et al. (1984). El problema de este tipo de mediciones, es que normalmente miden sólo el transporte en suspensión, sin incluir el transporte por fondo, lo cual da resultados que subestiman el transporte litoral total. En general, es muy difícil realizar mediciones fiables del transporte litoral en campo, lo cual ha generado problemas para la validación de las actuales formulaciones teóricas, que en algunos casos, han tenido que hacerse con datos medidos en laboratorio, los cuales involucran efectos de escala que afectan a los resultados.

En el caso de estudio, para medir cuantitativamente la sedimentación en la zona del futuro puerto de Granadilla, PROMAR Investigaciones Marinas instaló en el mismo punto (punto trampa sedimento número uno) del tren de fondeo de la boya oceanográfica, 6 trampas de sedimentos ubicadas por parejas a -3 m. de la superficie, a 3 m del fondo y en la mitad entre ambos puntos, en un fondo de 18 metros de profundidad. Además, se instalaron cinco trampas de sedimentos fondeadas en los puntos indicados en la figura 2.43. El periodo de medida fue: octubre 2007-febrero 2009.

Las conclusiones del estudio se pueden consultar en el informe, "Revisión y sustitución (III) de trampas de sedimentos instaladas previo al inicio de las obras incluidas en el proyecto del puerto de Granadilla. Descripción del trabajo y equipos" (PROMAR Investigaciones Marinas). Como resumen se puede decir que se observó que la cantidad de sedimentos depositados en la trampa número 5, situada más al norte del futuro Puerto de Granadilla que las anteriores, es aproximadamente 10 veces mayor que en el resto de los puntos. Por otra parte, el punto 3 mantiene una constante de sedimentación, no así los puntos 1 y 4, que tiene acumulaciones de sedimento muy dispares a lo largo de los muestreos realizados. No se pudo realizar comparaciones con el punto 2, ya que aún no se había obtenido datos de esa trampa de sedimento.

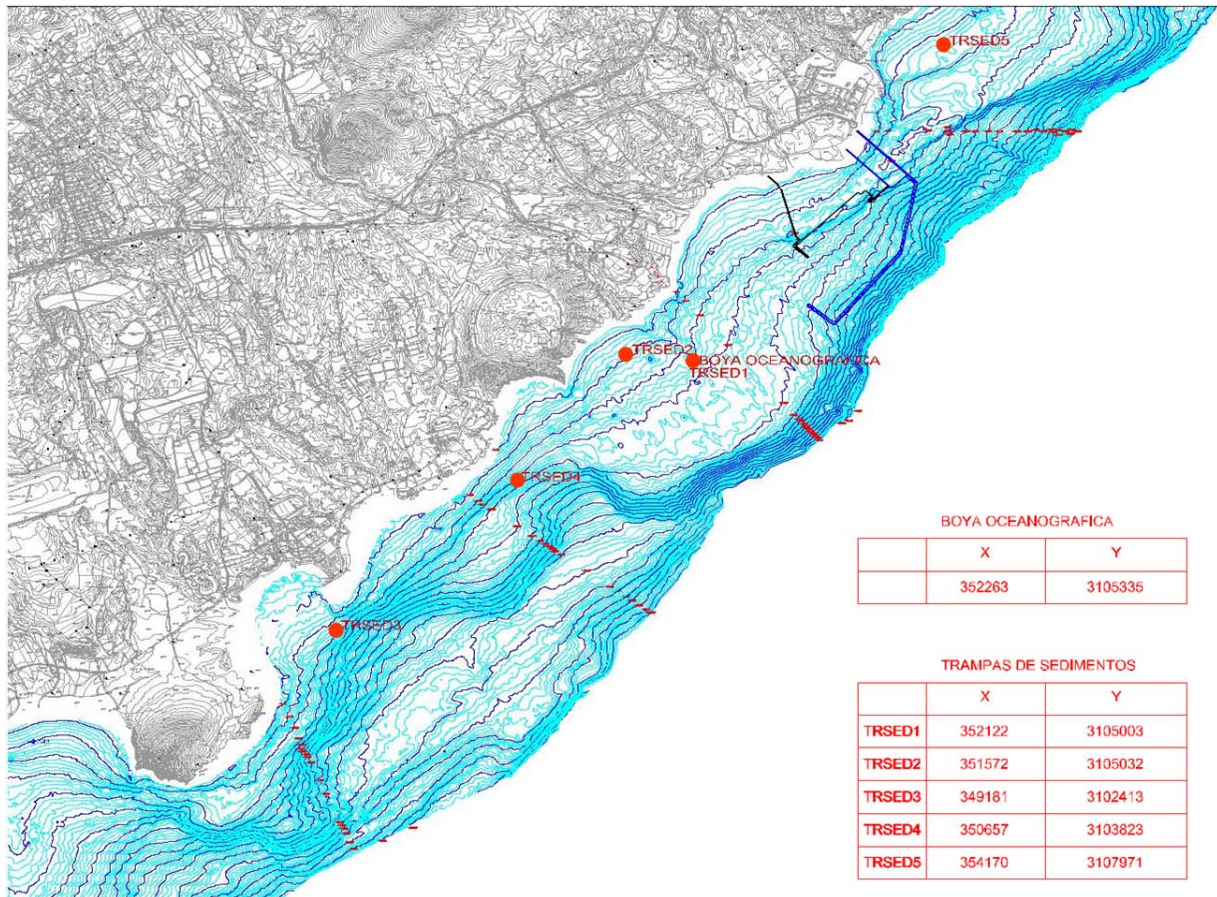


Figura 2.43. Ubicación de las trampas de sedimentos. (Fuente: "Instalación de trampas de sedimentos previo al inicio de las obras incluidas en el proyecto del puerto de Granadilla. Descripción del trabajo y equipos", PROMAR Investigaciones Marinas, 2007).

De dichos estudios se concluyó que se necesitaba continuar con el seguimiento ya que los resultados podrían variar significativamente dependiendo del periodo de muestreo.

Otra forma de obtener el transporte litoral, es mediante evidencias morfológicas de la costa. La construcción de estructuras en el litoral, como diques de Puertos, espigones etc., normalmente genera una acumulación de la arena costa arriba, cuyo volumen se puede obtener mediante la resta de campañas batimétricas llevadas a cabo en diferentes instantes de tiempo. Estos métodos son bastante fiables, dado que integran eventos que ocurren en distintas escalas de tiempo, proporcionando así una tasa media de transporte sólido. Dentro de las limitaciones de este método, está el error que se puede llegar a cometer en áreas muy extensas, porque un error en vertical de centímetros, puede resultar en un volumen importante de arena (Dean et al. 1987).



Finalmente, están las formulaciones teóricas del transporte sólido potencial, las cuales dan muy buenos resultados cuando se combinan con alguno de los métodos anteriores, que permitan calibrarlas y/o validarlas. Este tipo de formulaciones han sido propuestas por sus autores a partir de una serie de validaciones en campo y laboratorio.

Para el cálculo del transporte litoral en la zona de estudio se van a combinar diferentes métodos de los mencionados. Por un lado, para estimar el transporte potencial, se va a utilizar una formulación teórica (método 4) cuya aplicación se describe en el siguiente apartado. Por otro lado, para estimar el transporte real, se va a utilizar la información disponible de estudios previos junto con estimaciones realizadas en este trabajo sobre los aportes sólidos de los barrancos y los aportes de origen orgánico (maërl o rodolitos).

### **2.5.1 Formulación de transporte sólido litoral**

En este trabajo para calcular el transporte potencial de sedimentos se utiliza la formulación de Soulsby - van Rijn (Soulsby, 1997) que tiene en cuenta tanto el oleaje como las corrientes:

$$q_t = A_s \bar{U} \left[ \left( \bar{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2.4}$$

Donde:

$A_s$  es un parámetro que depende de la profundidad, la gravedad, el tamaño de grano y la densidad relativa del sedimento.

$\bar{U}$  es la velocidad promediada en vertical debida a las corrientes.

$C_D$  es un coeficiente de fricción debido a la corriente que depende de la profundidad y de la rugosidad del fondo.

$U_{rms}$  es la velocidad orbital cuadrática media (oleaje).

$\bar{U}_{cr}$  es la velocidad crítica de inicio de movimiento, que depende del tamaño de sedimento ( $D_{50}$  y  $D_{90}$ ) y de la profundidad.

Aplicando esta formulación a los resultados de oleaje y de corrientes se obtiene un transporte potencial, por metro lineal ( $m^3/s/m$ ), que contiene la componente de transporte por fondo y la componente de transporte en suspensión.



## Capítulo 3.

### RESULTADOS



### 3. RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de este trabajo es evaluar la afección del nuevo puerto de Granadilla al transporte litoral. Para ello, en el capítulo 2 se han descrito y analizado las variables que determinan el transporte de sedimentos (oleaje y corrientes fundamentalmente), así como los datos, los modelos numéricos y la metodología utilizados para obtener las características del clima marítimo, de las corrientes en la zona de estudio y del transporte de sedimentos.

A continuación, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos, tanto para la situación actual como para la situación con puerto, en cuanto a:

- Variación del clima marítimo.
- Variación del régimen de corrientes.
- Variación en el transporte potencial.
- Variación en el transporte real (teniendo en cuenta los aportes y las pérdidas de sedimento).

#### 3.1 Variación del clima marítimo

El nuevo puerto exterior de Granadilla modifica el clima marítimo en la zona de estudio. De hecho, el dique exterior se diseña para crear una dársena interior protegida de los oleajes. Sin embargo, no solo se reduce el oleaje en el interior de la dársena, sino también en las zonas cercanas y tras la estructura exterior, pues se produce una cesión lateral de energía (difracción) del oleaje más energético hacia la zona directamente protegida del oleaje por el dique exterior.

Por otro lado, un segundo efecto de un dique exterior vertical (reflejante) es la reflexión del oleaje incidente hacia mar abierto, por lo que es esperable un aumento de la altura de ola en las zonas expuestas de los diques más reflejantes.

El objetivo de este estudio es acotar en magnitud y espacialmente los efectos esperables en el oleaje. A continuación se presentan los resultados obtenidos comparando la situación futura (con puerto) respecto de la situación actual.

##### 3.1.1 Variación del oleaje

Como se explica en el Capítulo 2, para transferir el oleaje hasta la costa se emplea una completa metodología que combina modelos numéricos y sofisticadas técnicas estadísticas que permiten obtener la evolución histórica (1948-2008) de los campos de oleaje en la zona de estudio. Cabe señalar que dicha metodología para transferir los



estados de mar de 61 años de datos horarios hasta la zona de estudio, se ha repetido 2 veces: situación actual y situación con puerto.

A continuación se presentan dos figuras (3.1 y 3.2). En ambas figuras se presenta la propagación de la altura de ola incidente y reflejada en la zona de estudio, para las dos situaciones.

El oleaje propagado de la figura 3.1 corresponde al máximo temporal de los últimos 61 años (caso 1 de la selección MaxDiss; fecha: 03/11/1957 3:00), que en el contorno norte de la malla general (G01) alcanzó valores de  $H_s$  en torno a 11 m,  $T_p=14.4$  s y  $\theta_m=330.2^\circ$ . El panel superior de la figura 3.1 muestra la propagación en la malla general donde puede apreciarse el efecto sombra generado por la isla de Tenerife frente a los oleajes del NNW. El panel intermedio izquierdo muestra la propagación de este temporal en la malla de detalle con la situación actual. El panel intermedio derecho muestra la propagación en la situación con puerto donde se aprecia la disminución de  $H_s$  al abrigo de los diques. Por último, en el panel inferior se muestran las diferencias porcentuales en el campo de oleaje instantáneo originado por el puerto proyectado. Nótese como el puerto genera una disminución de  $H_s$  de más del 50% que se extiende hacia el sur hasta Punta Pelada, mientras que en las inmediaciones del dique exterior NE se aprecia un aumento del 25 % que se suaviza rápidamente aguas afuera. Los valores de los diferentes parámetros espectrales y viento corresponden a los registrados en la esquina inferior derecha de la malla de detalle.

El oleaje propagado en la figura 3.2 corresponde a un temporal de periodicidad anual del WSW, que en el contorno oeste de la malla general presenta un oleaje incidente de  $H_s=3.46$  m,  $T_p=8.15$  s y  $\theta_m=256.4^\circ$ . Puede comprobarse como el patrón de propagación de este oleaje es diferente al caso 001 de la figura 3.1 siendo el efecto sombra mucho menos intenso en este último caso. Asimismo, el panel inferior donde se indican las diferencias porcentuales, muestra una disminución de  $H_s$  hacia el norte más localizada, siendo el efecto significativo hasta la playa de la Horca y un incremento de hasta un 25% en el dique SE del puerto.

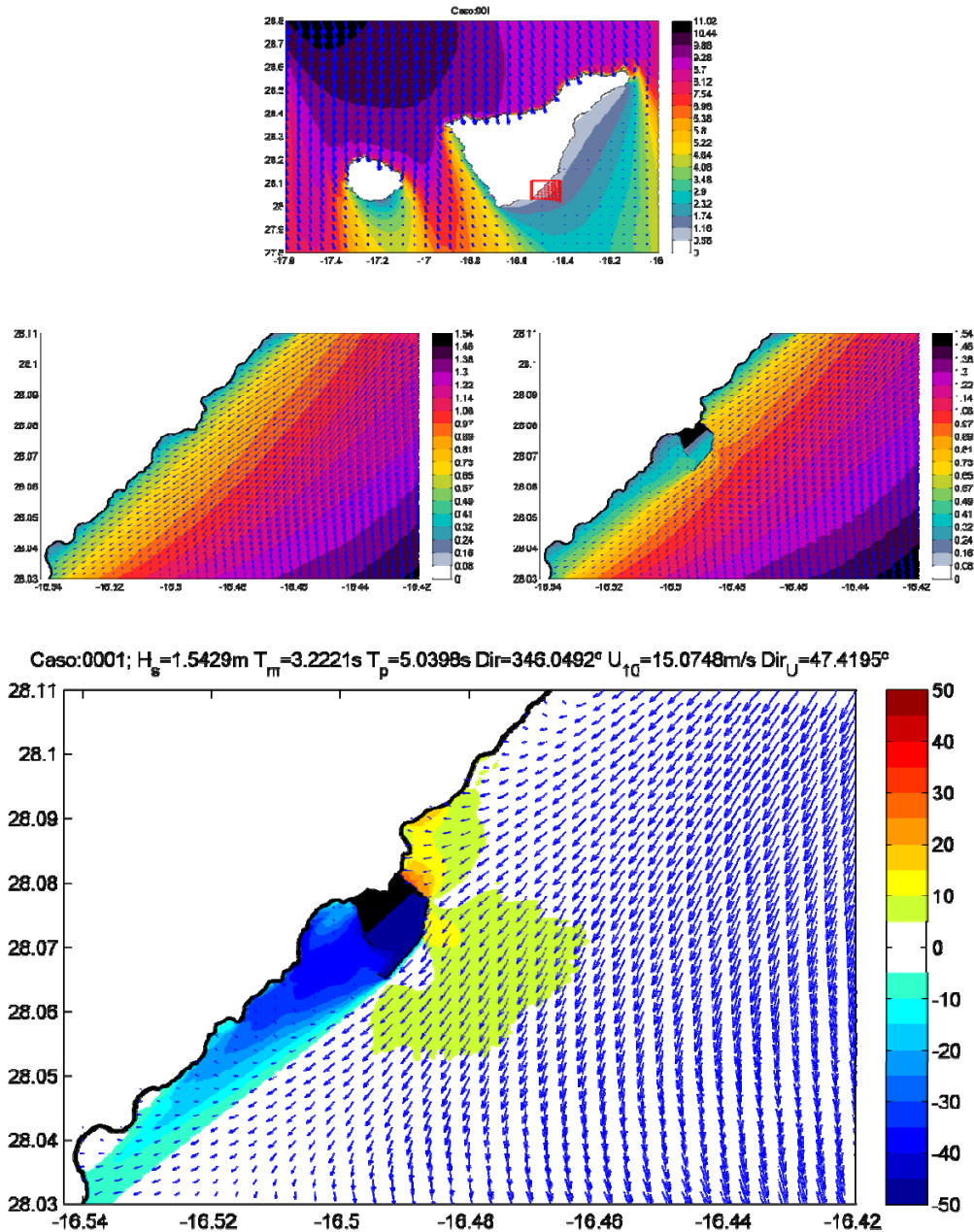


Figura 3.1. Propagación del máximo temporal ocurrido en los últimos 61 años (caso 1 de la selección MaxDiss) para las situaciones con y sin puerto (paneles centrales). Propagación malla general (arriba) y diferencias porcentuales (abajo). Fecha: 03/11/1957 3:00.  $H_s \sim 11$  m,  $T_p \sim 14.4$  s y  $\theta_m \sim 330.2^\circ$

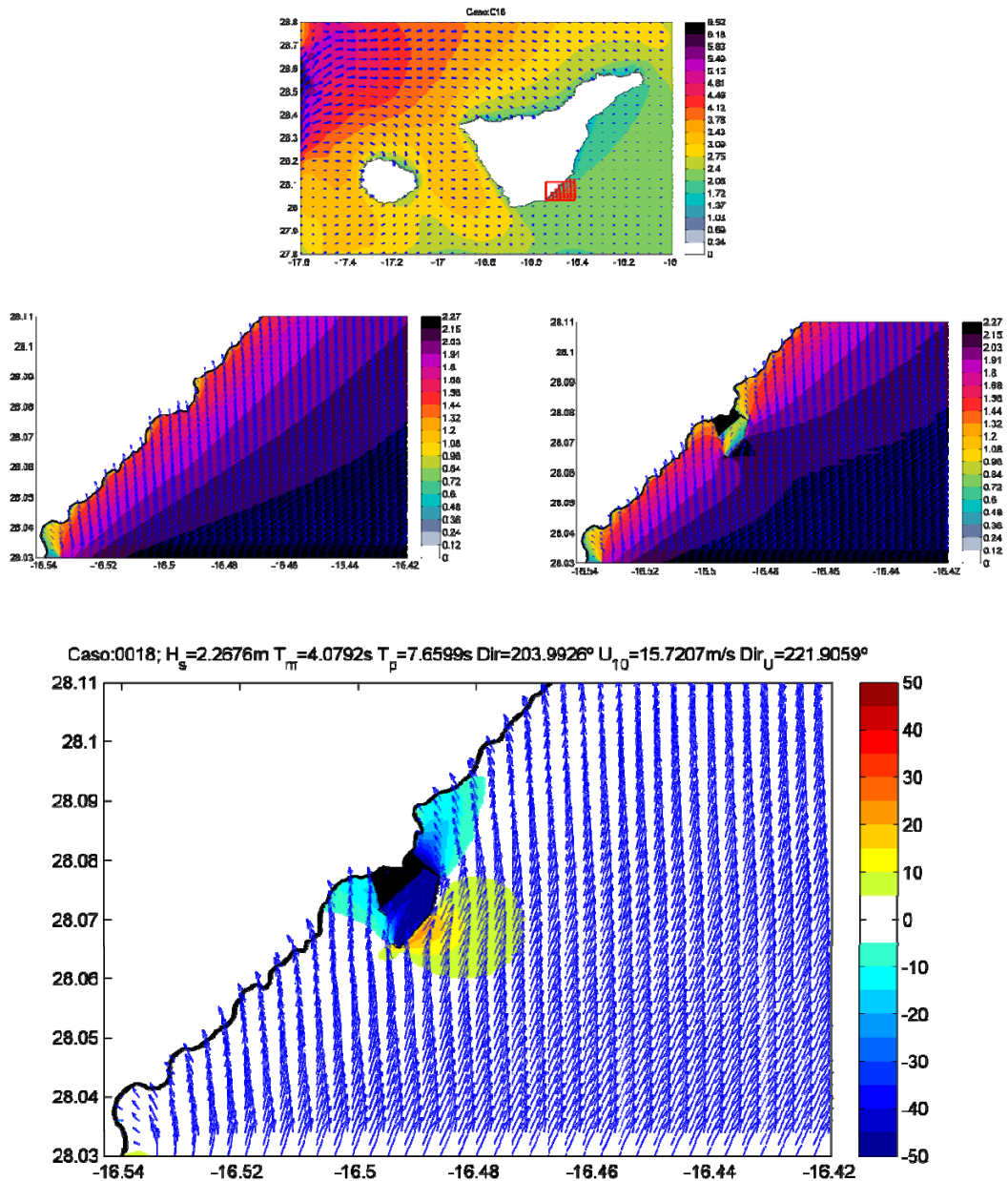


Figura 3.2. Propagación de un temporal de probabilidad de ocurrencia anual (caso 18 de la selección MaxDiss) para las situaciones con y sin puerto (paneles centrales). Propagación malla general (arriba) y diferencias porcentuales (abajo).  $H_s \sim 3.46$  m,  $T_p \sim 8.15$  s y  $\theta_m \sim 256.4^\circ$ .

Para calcular la variación del oleaje respecto de la situación actual, se calcula la media de los campos de oleaje horarios de los 61 años en la zona de estudio, para la situación actual y la alternativa propuesta. Posteriormente se hace la diferencia relativa, en cada posición, de la media de esta alternativa respecto a la media de la alternativa de no actuación. En la figura 3.3 se representan estas diferencias relativas en %.

Se observa en la figura 3.3, que frente a los diques exteriores expuestos a los oleajes de NE el aumento del oleaje (colores amarillos y rojos) llega hasta el 25 % y va disminuyendo a medida que nos alejamos de estas estructuras. La distancia medida en la zona en la que el aumento del oleaje varía entre 5% y 25% es de 6 Km. El efecto suave que se aprecia en el dique exterior (dique S) es debido a que los oleajes de sur son muy poco probables.

Las zona azul de la figura 3.3 representan zonas donde se produce disminución del oleaje por efecto del abrigo de los dique. De hecho, en el interior de las dársenas la reducción es muy superior al 80% pues se obtienen oleajes medios inferiores a los 10 cm. Esta zona de disminución del oleaje se extiende hacia el SW, siendo su efecto especialmente intenso (>20%) hasta Punta Pelada. La gran extensión que alcanza la zona donde disminuye la  $H_s$  es debido al elevado ángulo de incidencia del oleaje medio respecto a la normal a la costa que alcanza valores cercanos a los 90°.

Por último, en la figura 3.4 se muestra la climatología del oleaje mes a mes en la malla de detalle. Como puede apreciarse no hay cambios estacionales significativos en la altura de ola media mensual, siendo los meses más energéticos Julio y Agosto debido a la intensificación de los Alisios con  $H_s$  en torno a 1.5 m. Es durante estos meses en los que la disminución de la  $H_s$  es más acusada y extensa. En invierno, la altura de ola es más pequeña ( $H_s=1.2$  m) pues dominan los oleajes del W-NW, muy bloqueados por la presencia de las islas. El efecto del puerto ante estos oleajes es más moderado (menor reducción de  $H_s$  en el interior y proximidades) aun así, la  $H_s$  media mensual nunca supera los 10 cm en el interior de la dársena.

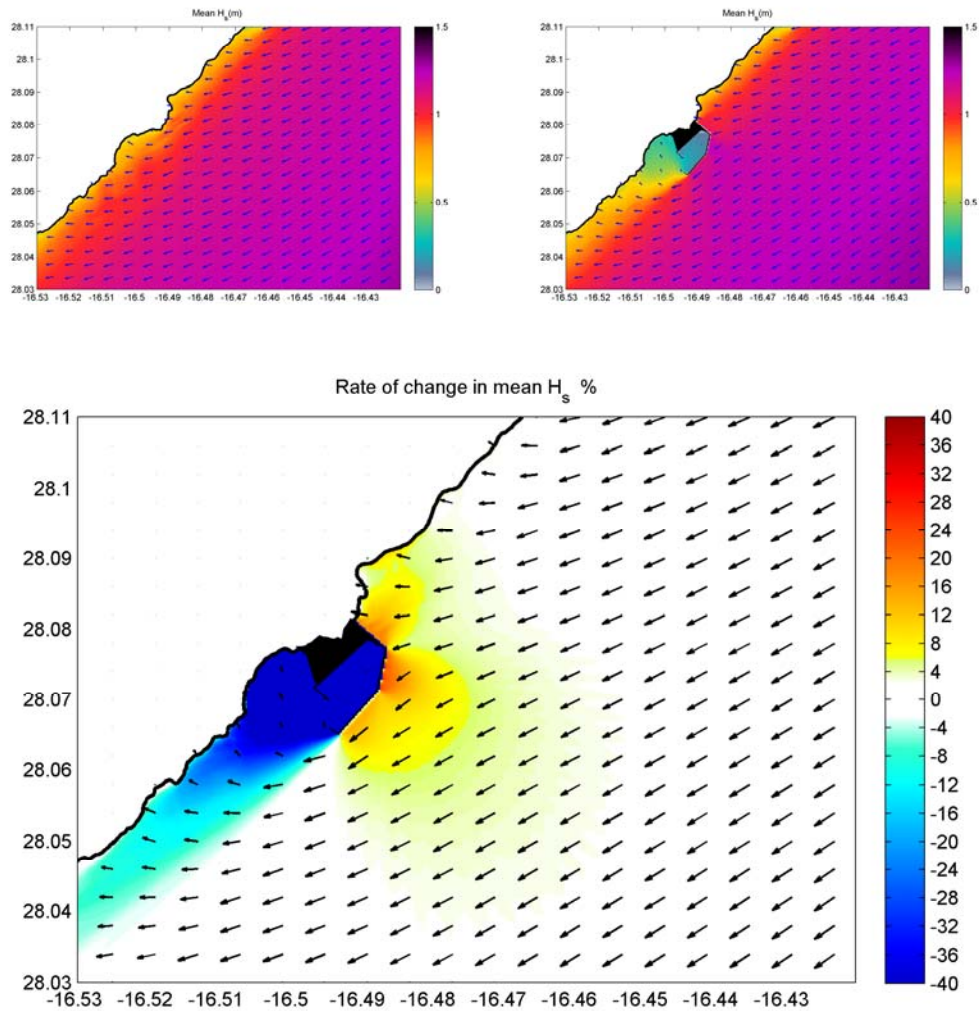


Figura 3.3.  $H_s$  media anual en la situación con y sin puerto (paneles superiores). Diferencia media anual en % (panel inferior).



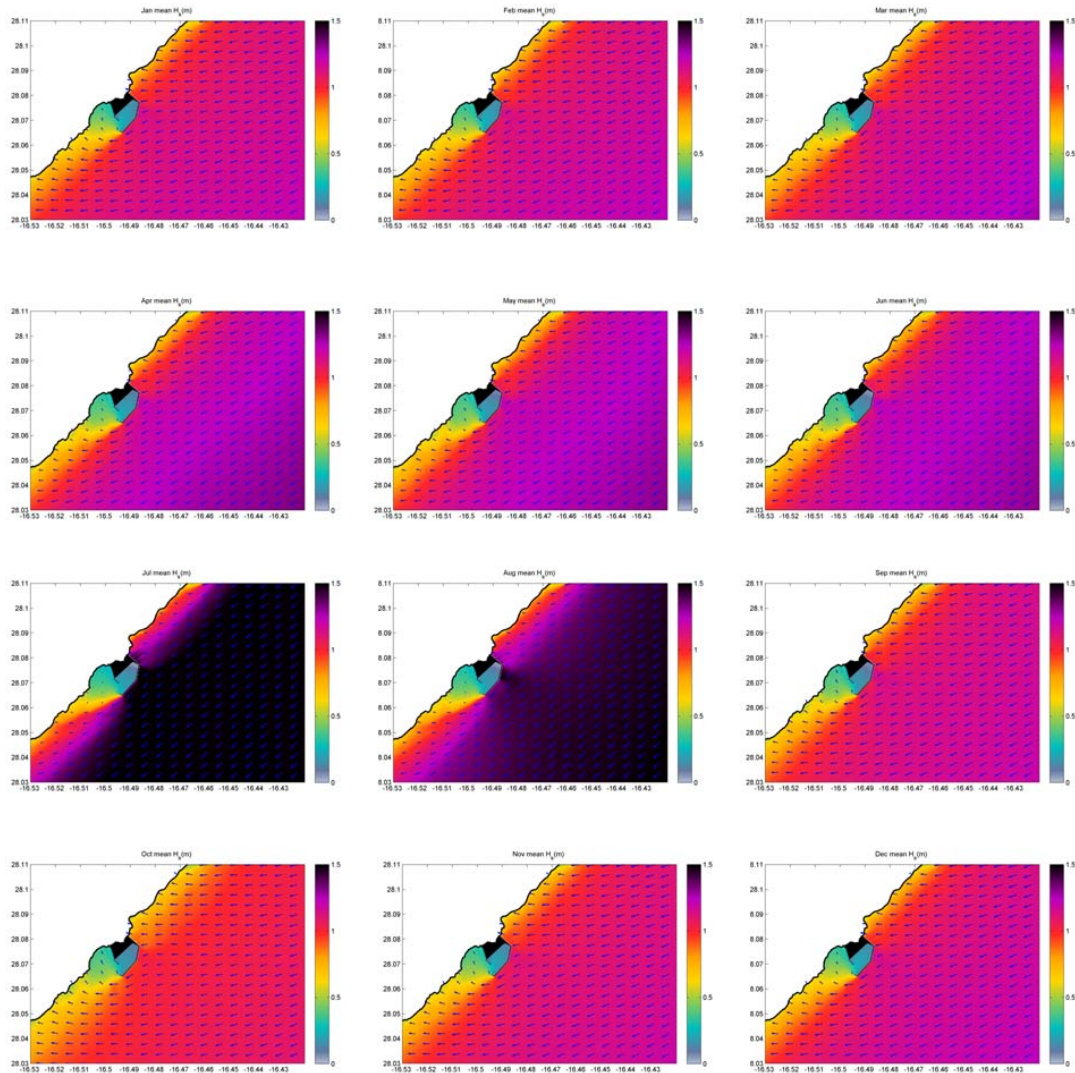


Figura 3.4. Climatología de  $H_s$  media mensual en la malla de detalle.

### 3.2 Variación del régimen de corrientes

Debido a la gran influencia que tiene la batimetría y la geometría de la costa en las corrientes, éstas son una propiedad de punto. Es decir, tienen mucha variabilidad espacial. Por lo tanto, el obstáculo que supone el nuevo puerto causará una variación del patrón de corrientes que, como es lógico, será notable en la zona donde va a estar ubicada la infraestructura portuaria.

Una vez calculadas las corrientes para las dos situaciones planteadas, es posible evaluar si el nuevo puerto producirá una variación del régimen de corrientes mediante la comparación de los patrones de circulación.

Dado que el interés fundamental es evaluar el transporte litoral y que éste depende sobre todo de las corrientes máximas, las comparaciones se han basado, principalmente, en las corrientes máximas diarias. Sin embargo, como se mostrará más adelante, los cálculos del transporte de sedimentos se han realizado hora a hora, teniendo en cuenta las condiciones de oleaje y corrientes del momento concreto.

En la figura 3.5 se muestra la media anual de la corriente máxima diaria para las dos situaciones. A simple vista, ambos escenarios son muy similares, con zonas de mayor corriente en el entorno de Montaña Roja y Punta de Abona (en torno a 40 cm/s) y zonas de corriente en torno a 15 – 25 cm/s en la franja costera comprendida entre ambos salientes. Se observa también en ambos casos, una corriente residual en dirección SW.

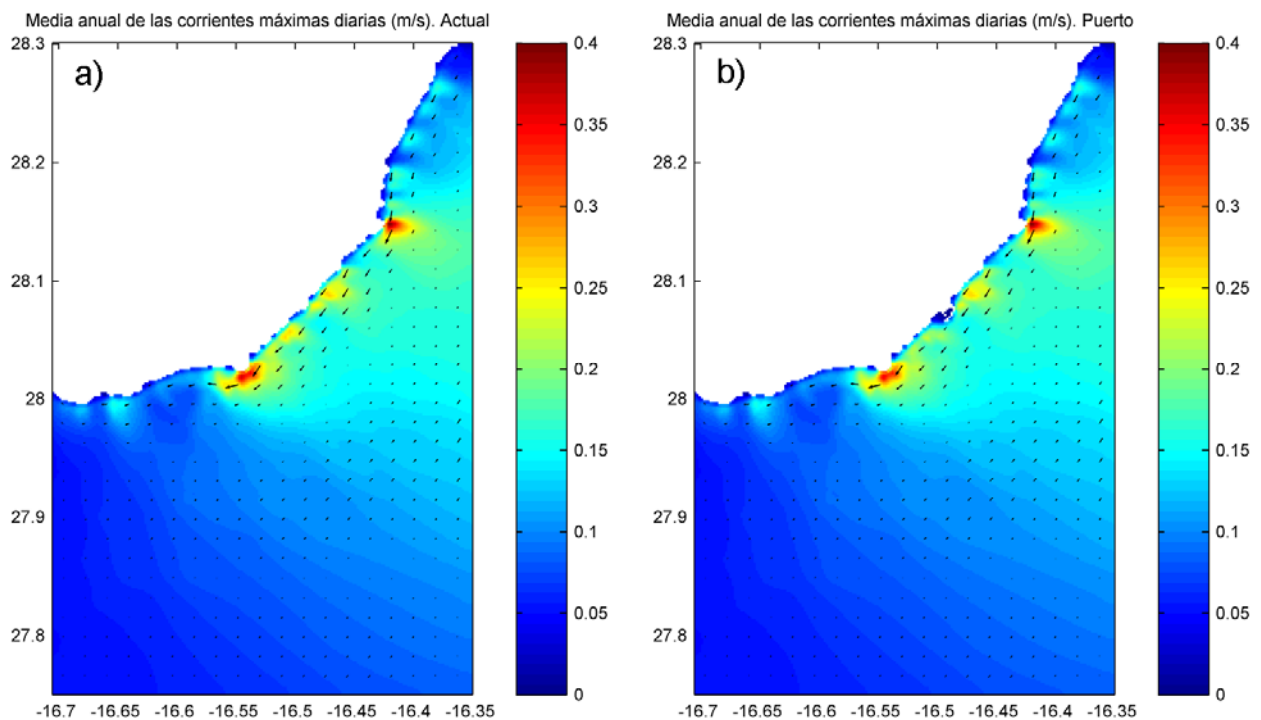


Figura 3.5. Media anual de la corriente máxima diaria promediada en vertical. a) Situación actual; b) Situación con puerto.



Para poder apreciar la variación entre ambas situaciones, en la figura 3.6 se muestra la diferencia en las corrientes.

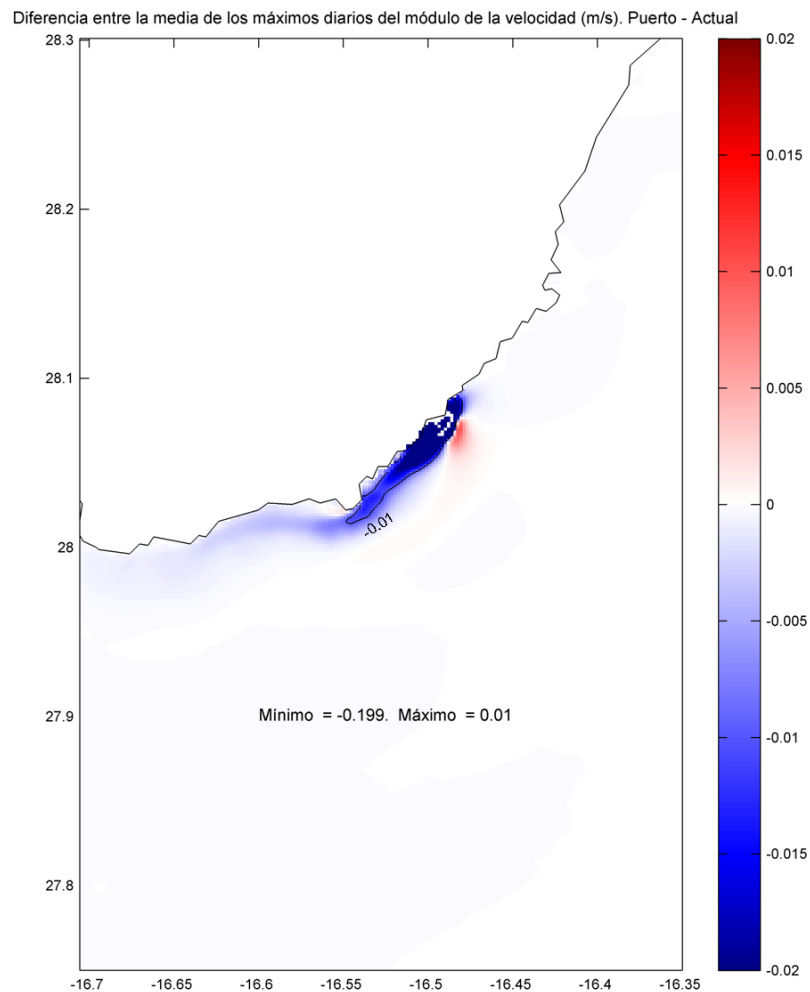


Figura 3.6. Diferencia entre la media anual de la corriente máxima diaria en la zona de estudio. Malla de detalle. Situación con puerto - Situación actual

En la figura 3.6 los tonos azules (valores negativos) muestran las zonas donde la velocidad de la corriente disminuirá al construir el puerto. Por el contrario, el color rojo representa zonas donde se producirá un aumento de la corriente. Los resultados muestran un aumento máximo de aproximadamente 1 cm/s y una disminución máxima de 20 cm/s. Se observa que, como es lógico, las zonas donde las variaciones son más acusadas son las del entorno de la nueva dársena. La zona donde las corrientes disminuyen (azul) es mucho más extensa que la zona de aumento de corrientes (roja).

La influencia del puerto llega, por el Suroeste, hasta Montaña Roja y por el Noreste, hasta Barranco del Río. La zona donde se prevé que aumenten las corrientes está localizada en el exterior del dique del nuevo puerto. Así mismo, se marca la línea de contorno para diferencias de velocidad inferiores a 1 cm/s ya que este es el orden de magnitud del error del modelo numérico de corrientes. Para comprobar qué error supone asumir este umbral de velocidad, se ha realizado un análisis estadístico de las corrientes en la zona. En la figura 3.8 se presentan los histogramas de datos horarios en cuatro puntos representativos en la zona de estudio (véase la figura 3.7). Nótese como las velocidades horarias alcanzan valores máximos de aproximadamente 50 cm/s y medios de alrededor de 20 cm/s. Se han obtenido, también, las distribuciones empíricas de las velocidades máximas diarias (véase la figura 3.9) y se han calculado los percentiles del 1% (7 - 12 cm/s) y el 5% (8 - 15 cm/s). Como se ve, en todos los casos, las velocidades máximas diarias correspondientes a estos percentiles son superiores a 1 cm/s. Por lo tanto, despreciando diferencias menores de 1 cm/s se está cometiendo un error de menos de un 1%.

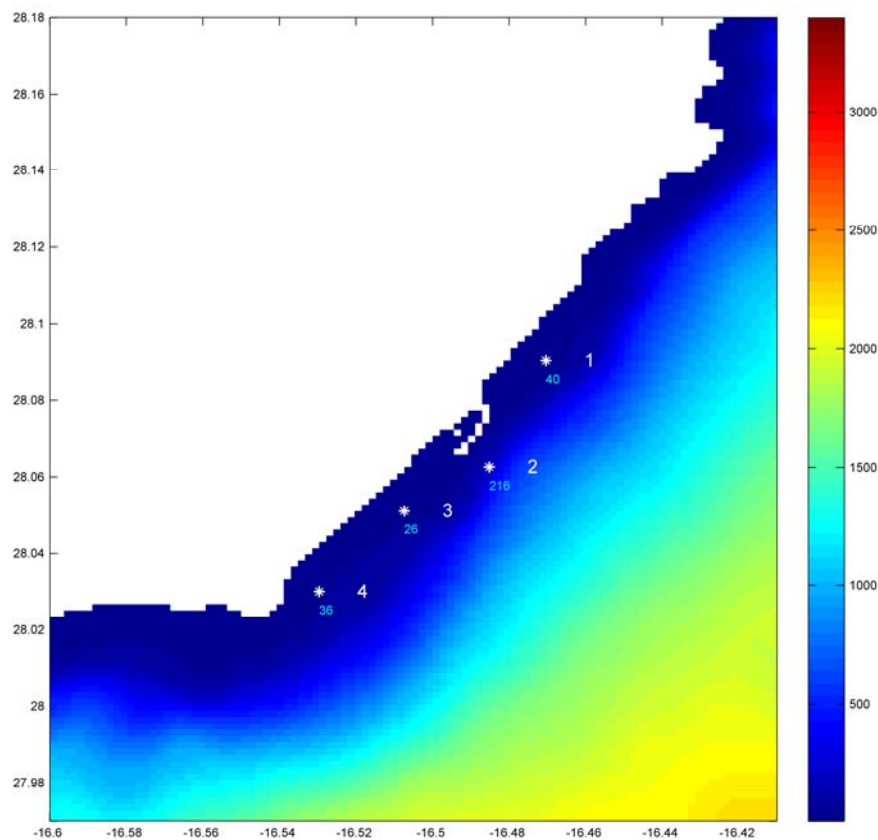


Figura 3.7. Localización de los puntos

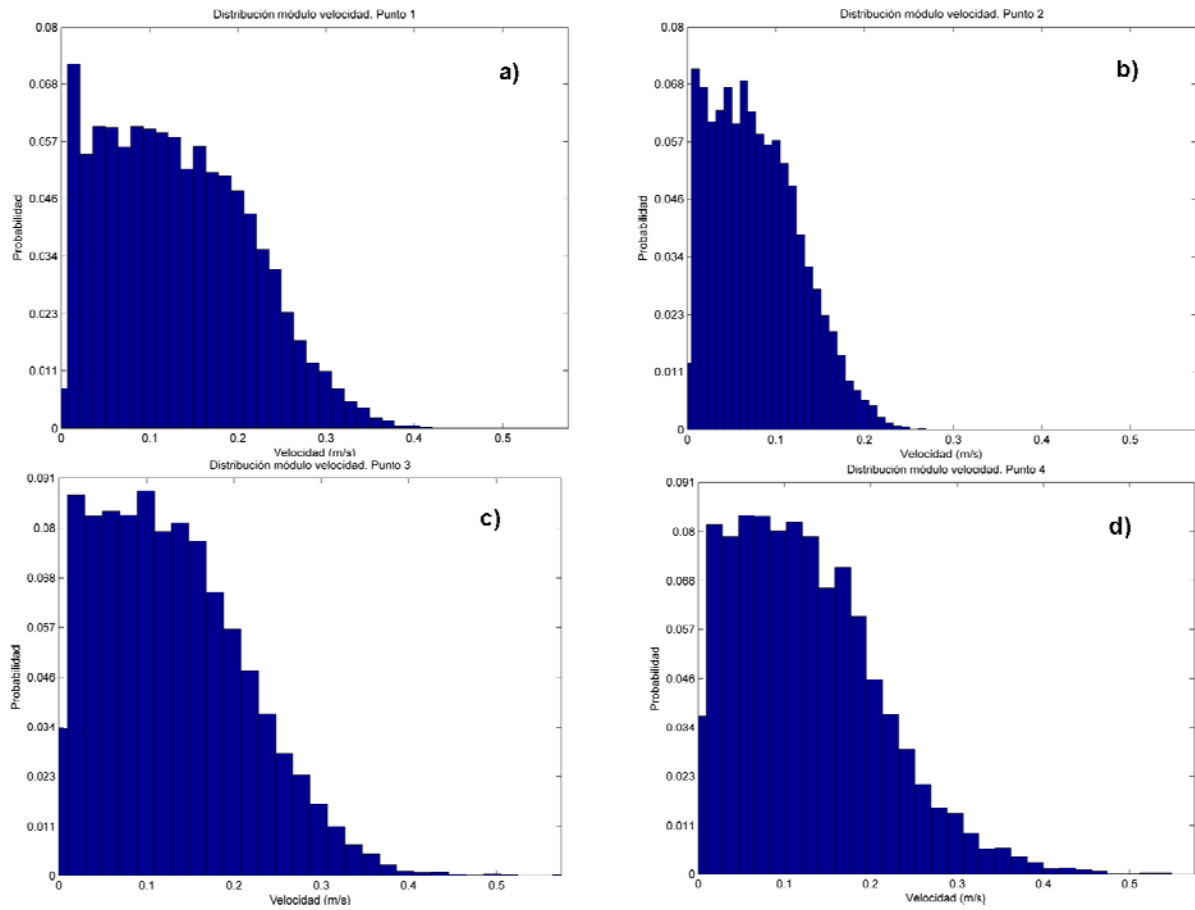


Figura 3.8. Histogramas de velocidades horarias en 4 puntos representativos de la zona de estudio. a) Punto 1; b) Punto 2; c) Punto 3; d) Punto 4;

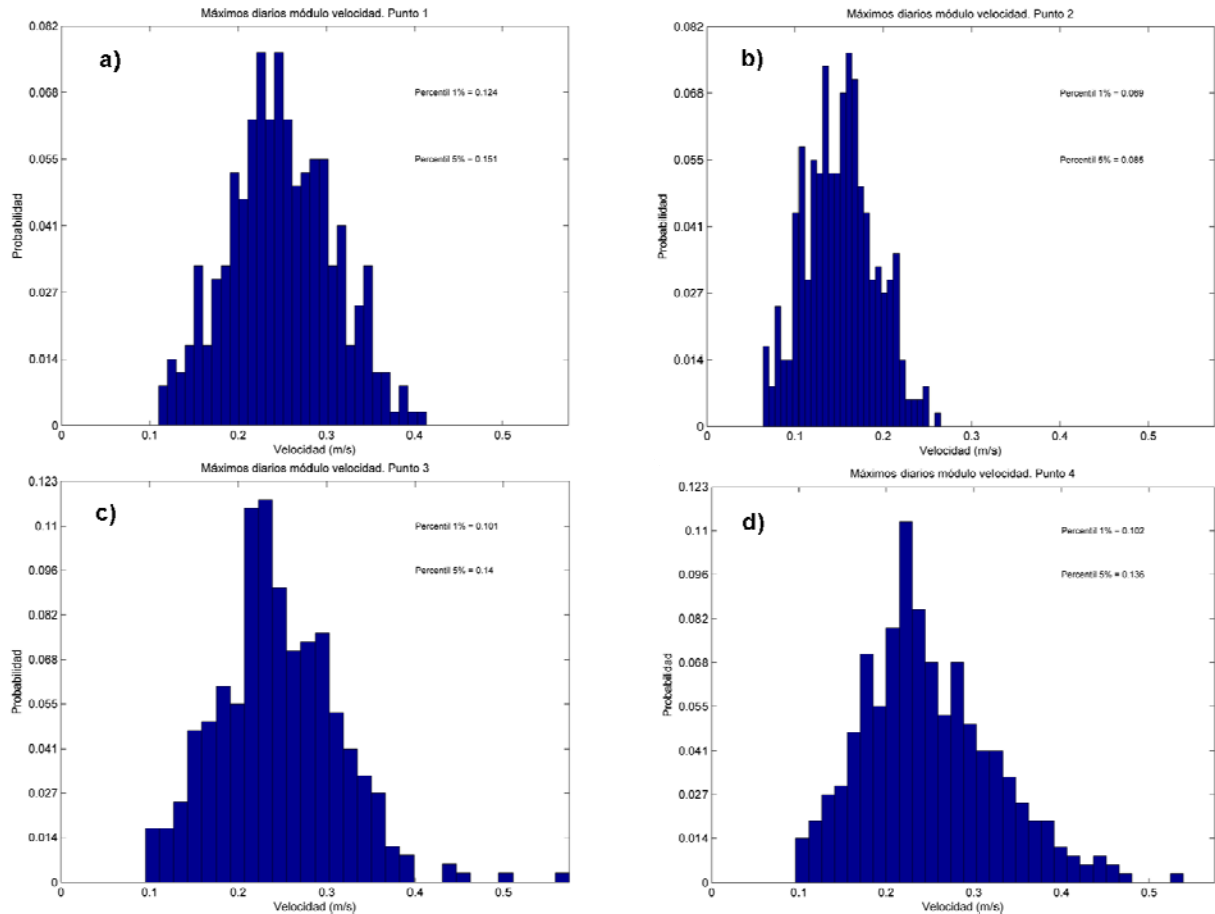


Figura 3.9. Histogramas de velocidades máximas diarias. a) Punto 1; b) Punto 2; c) Punto 3; d) Punto 4.

### 3.3 Variación del transporte potencial

Como se explica en el Capítulo 2 de este informe, el transporte litoral potencial ha sido estimado mediante la formulación de Soulsby - van Rijn (Soulsby, 1997) que tiene en cuenta tanto el oleaje como las corrientes.

Esta formulación se ha aplicado a la serie de datos horarios tanto de oleaje como de corrientes y se ha obtenido un transporte por metro lineal ( $m^3/s/m$ ) en la zona de estudio, tanto para la situación actual como para la situación con puerto (véase la figura 3.10).

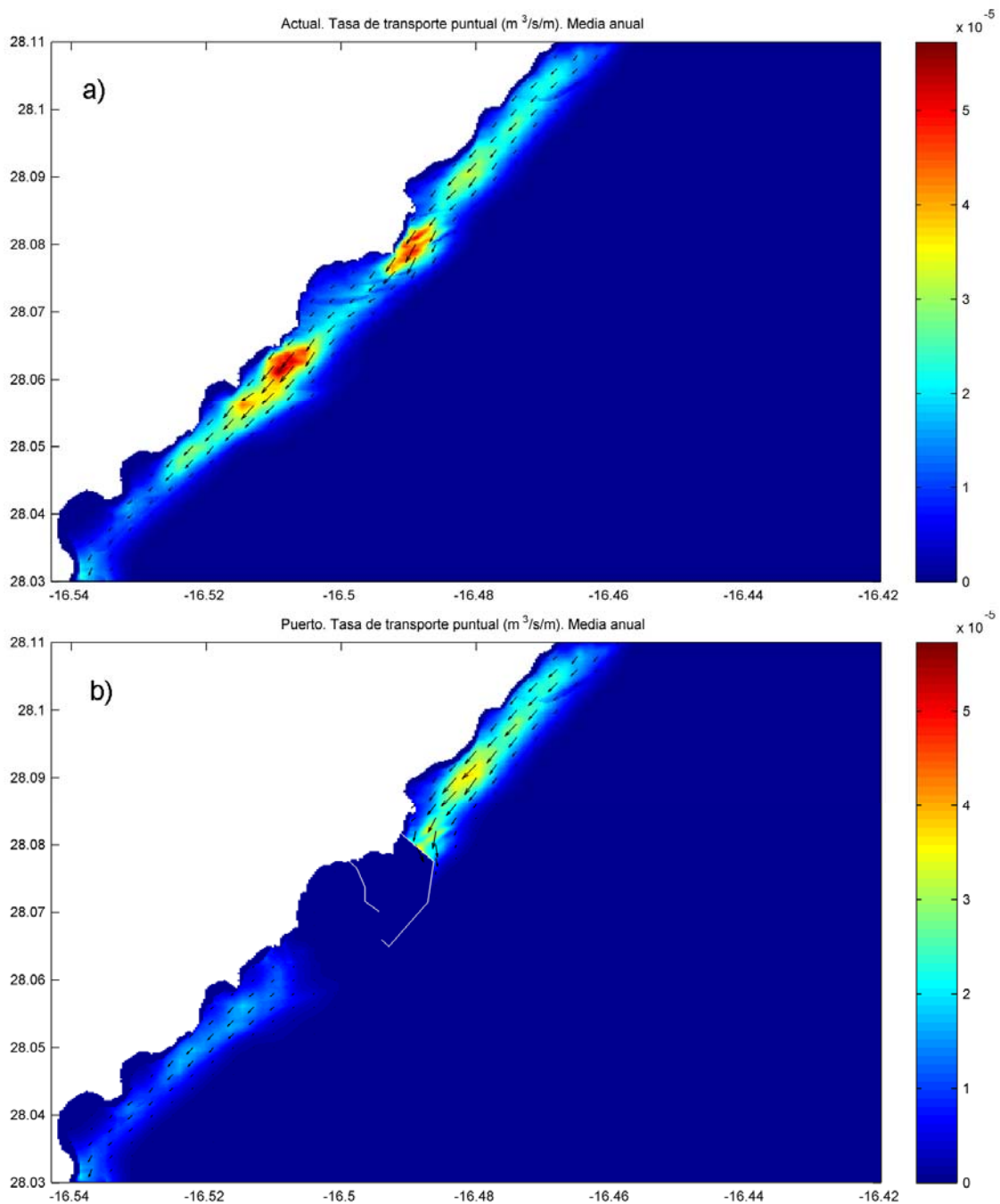


Figura 3.10. Media anual de la tasa de transporte media diaria ( $m^3/s/m$ ). a) Situación actual; b) Situación con puerto.

En la figura 3.10 se observa una reducción considerable del transporte potencial aguas abajo del puerto, debido a la disminución de los dos fenómenos que afectan al transporte: la corriente (figura 3.6) y el oleaje (figura 3.3).

Por otro lado, aguas arriba del puerto se observa un incremento del transporte potencial con respecto a la situación actual, debido al aumento en la altura de ola por la reflexión del dique del nuevo puerto.

Sin embargo, en frente del dique exterior del puerto, donde se produce un aumento tanto de la corriente como del oleaje, no se observa un aumento del transporte potencial de sedimentos, debido a la gran profundidad que existe en esa zona (80-90 m).

Nótese que, al igual que para la corriente, se observa una dirección media del transporte potencial hacia el SW.

Para apreciar con mayor claridad la variación entre los dos escenarios, se muestra también la diferencia entre ambas situaciones (figura 3.11). Como se ve en la figura, se obtiene una disminución máxima del transporte medio anual de  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  que son unos  $1500 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$ . La distribución espacial de esa disminución se representa en color azul. En cuanto a la zona en la que se produce aumento de la tasa media anual de transporte, se encuentra localizada al NE del puerto y alcanza valores máximos de  $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ( $300 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$ ).

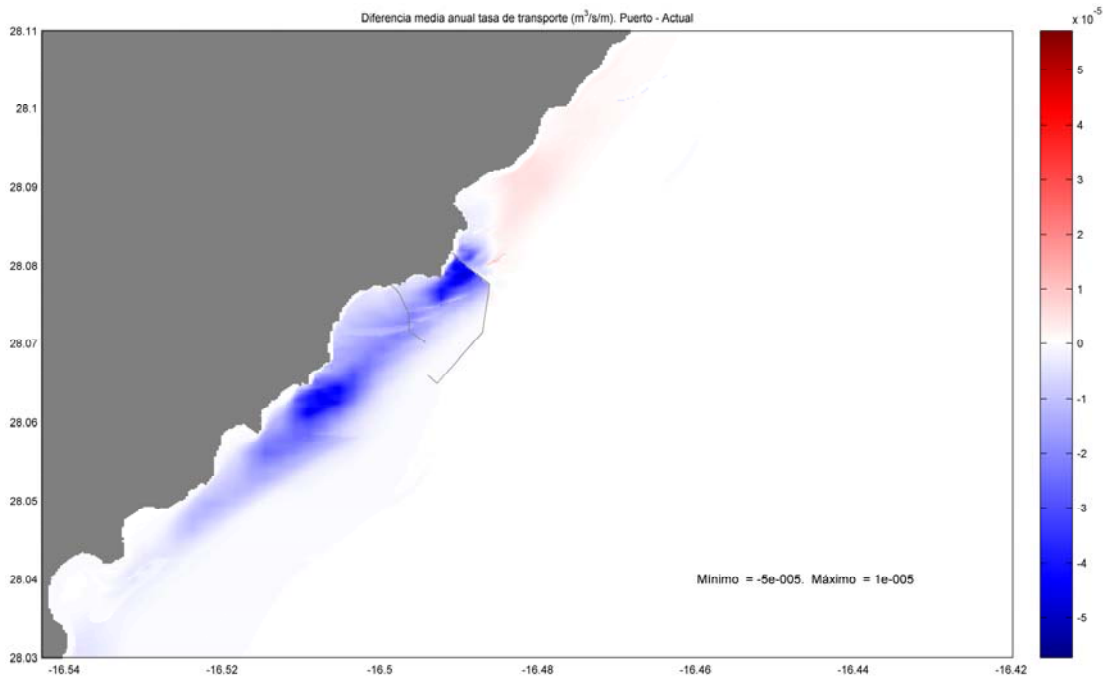


Figura 3.11. Diferencia entre la tasa media anual de transporte potencial en la zona de estudio. Malla de detalle. Situación con puerto - Situación actual.

Como se ve en la figura 3.11, los resultados reflejan los cambios en el transporte sedimentario, que están asociados a la disminución de corriente que produce el puerto en la zona abrigada por éste y al aumento de oleaje producido por la reflexión del dique. Los primeros (disminución de corriente), se traducen en una zona de disminución del transporte potencial respecto de la situación actual (zona azul) y por tanto en una zona de potencial sedimentación. Por otro lado, la zona de aumento de transporte potencial (zona roja) asociada al aumento del oleaje debido a la reflexión del dique, es una zona de potencial erosión.

Una vez presentados los resultados obtenidos, se van a comparar éstos con los mapas disponibles de geomorfología de fondos y de biocenosis general. De esta forma se comprobará si los resultados del modelo numérico están en concordancia con las evidencias físicas y biológicas presentes en la zona.

En la figura 3.12 se muestra conjuntamente, la media anual de la tasa de transporte potencial obtenida para la situación actual, junto con la geomorfología de los fondos. Se observa como, las zonas con alta tasa de transporte (zona de Punta del Camello y zona de Playa del Trigo) se corresponden con fondos rocosos (zonas de color naranja). Esto efectivamente, apoya los resultados obtenidos con el modelo numérico, ya que al ser zonas con tasas de transporte elevadas, no existe arena susceptible de ser transportada.



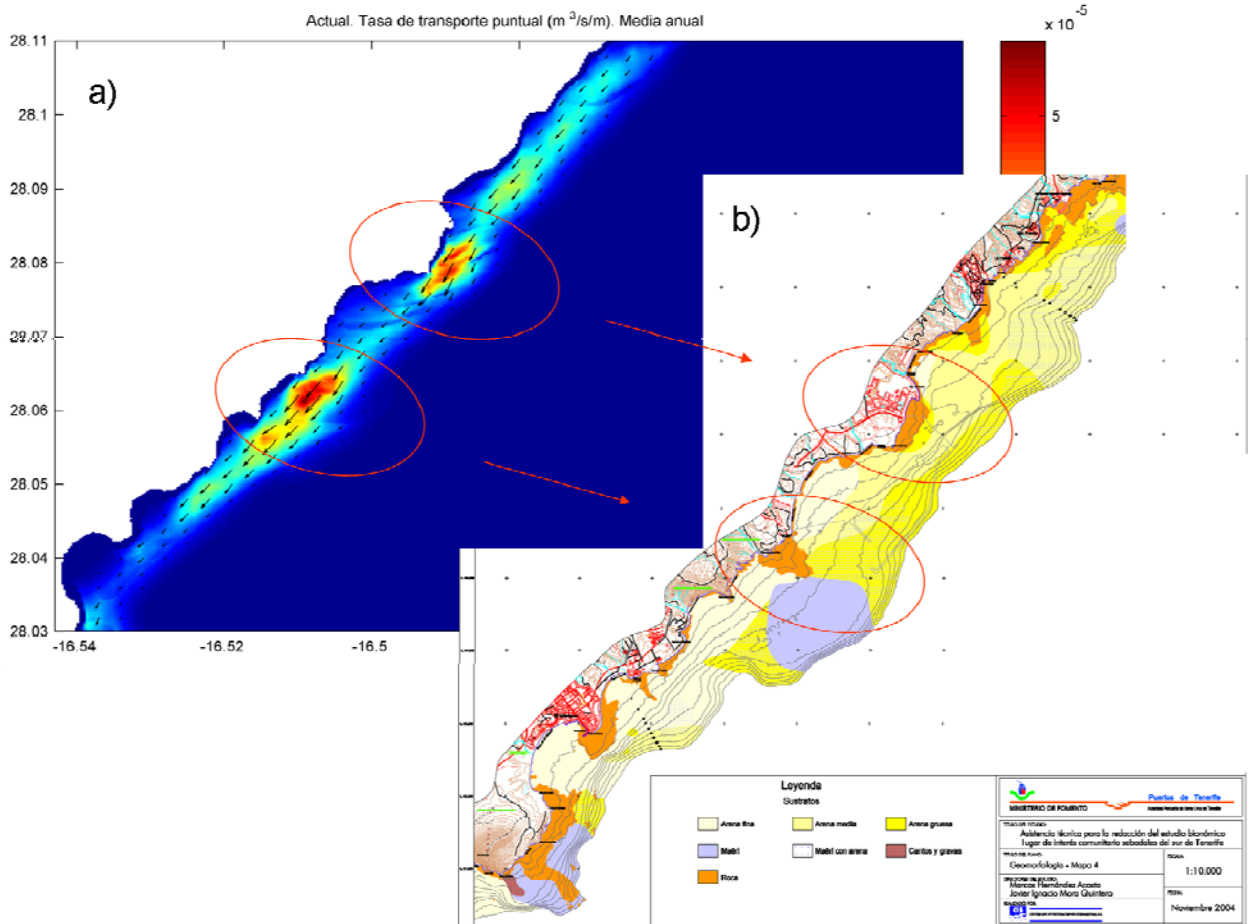


Figura 3.12. Relación entre la tasa de transporte puntual (a) y la geomorfología de los fondos (b). (Fuente: Asistencia Técnica para la redacción del estudio bionómico lugar de interés comunitario Sebadales del Sur de Tenerife. CIS. Noviembre 2004)

Así mismo, en la figura 3.13 se muestra la biocenosis general del fondo. Se observa cómo, en el área con alta tasa de transporte (zona de Punta del Camello) no hay presencia de sebadales. Esto también apoya los resultados obtenidos con el modelo numérico, ya que sólo se encuentran sebadales en zonas donde el modelo concluye que las condiciones energéticas son de menor intensidad.

De la misma manera, la forma alargada del área ocupada por maërl - *Sargassum*, corrobora que las corrientes más importantes en la zona son las de la marea astronómica, y por tanto, a partir de la zona donde se concentra el maërl, se produce una redistribución del mismo siguiendo la dirección de las corrientes de marea (hacia el

NE en marea llenante y hacia el SW en marea vaciante), para dar lugar a esa forma final alargada del área ocupada por maërl - *Sargassum*.

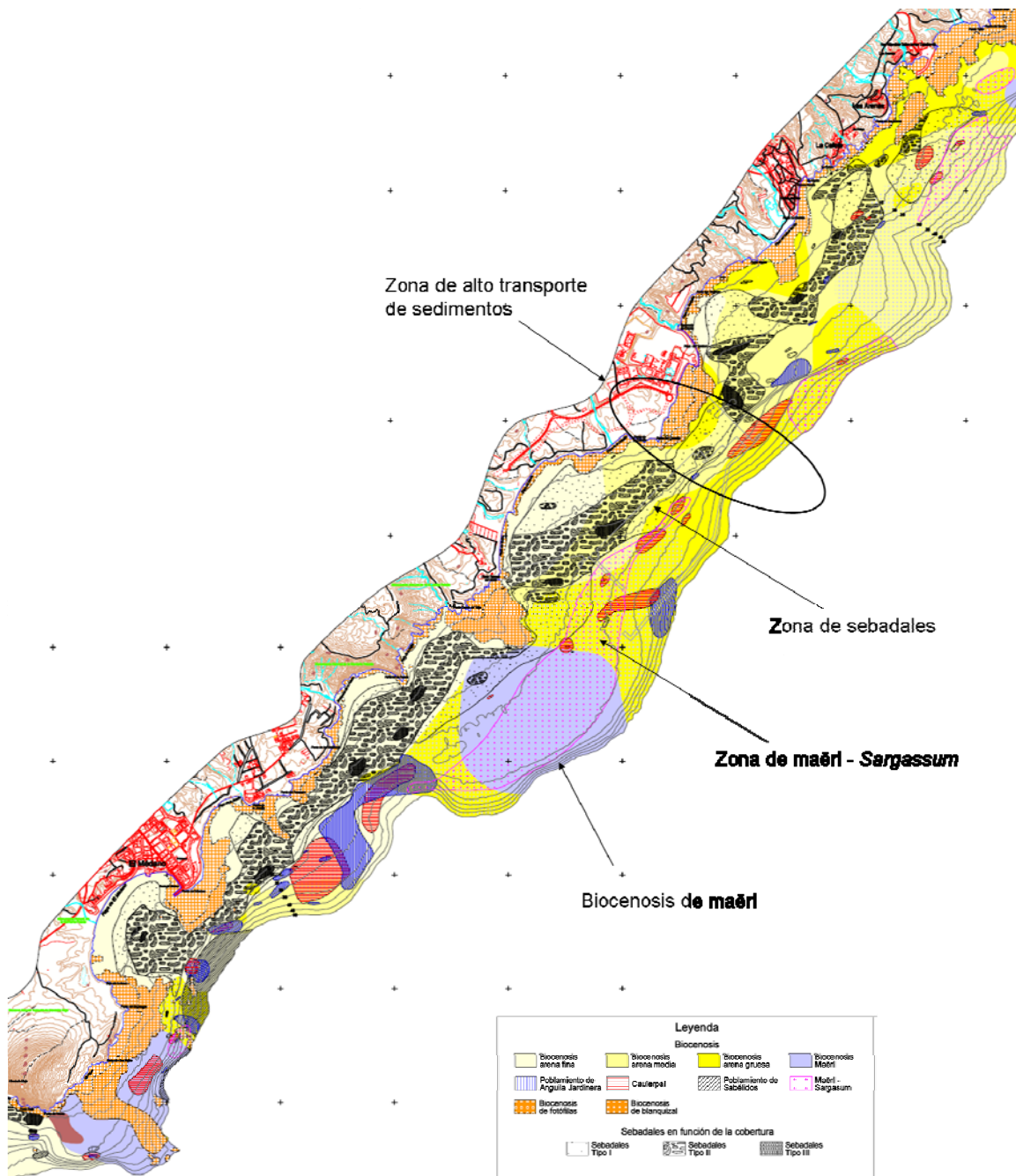


Figura 3.13. Biocenosis general. (fuente: Asistencia Técnica para la redacción del estudio bionómico lugar de interés comunitario Sebadales del Sur de Tenerife. CIS. Noviembre 2004)

### **3.4 Influencia de las variaciones estacionales del clima marítimo y del tamaño del sedimento sobre la dinámica sedimentaria**

Una de las cuestiones planteadas en el pliego de prescripciones técnicas, hace referencia a la influencia de la variación estacional sobre el volumen de sedimento transportado. En este apartado, se ha calculado el transporte de sedimentos atendiendo a las distintas condiciones estacionales del clima marítimo de la zona. Por lo tanto, se calculará el transporte de sedimentos para los escenarios de invierno y verano.

En la figura 3.14 se muestran para la situación actual, los resultados obtenidos en los periodos considerados como verano (de abril a septiembre) e invierno (de octubre a marzo). Se observa que los transportes son mayores en verano que en invierno, debido a que los vientos alisios soplan insistentemente durante el verano, generando una gran cantidad de oleajes locales del primer cuadrante.

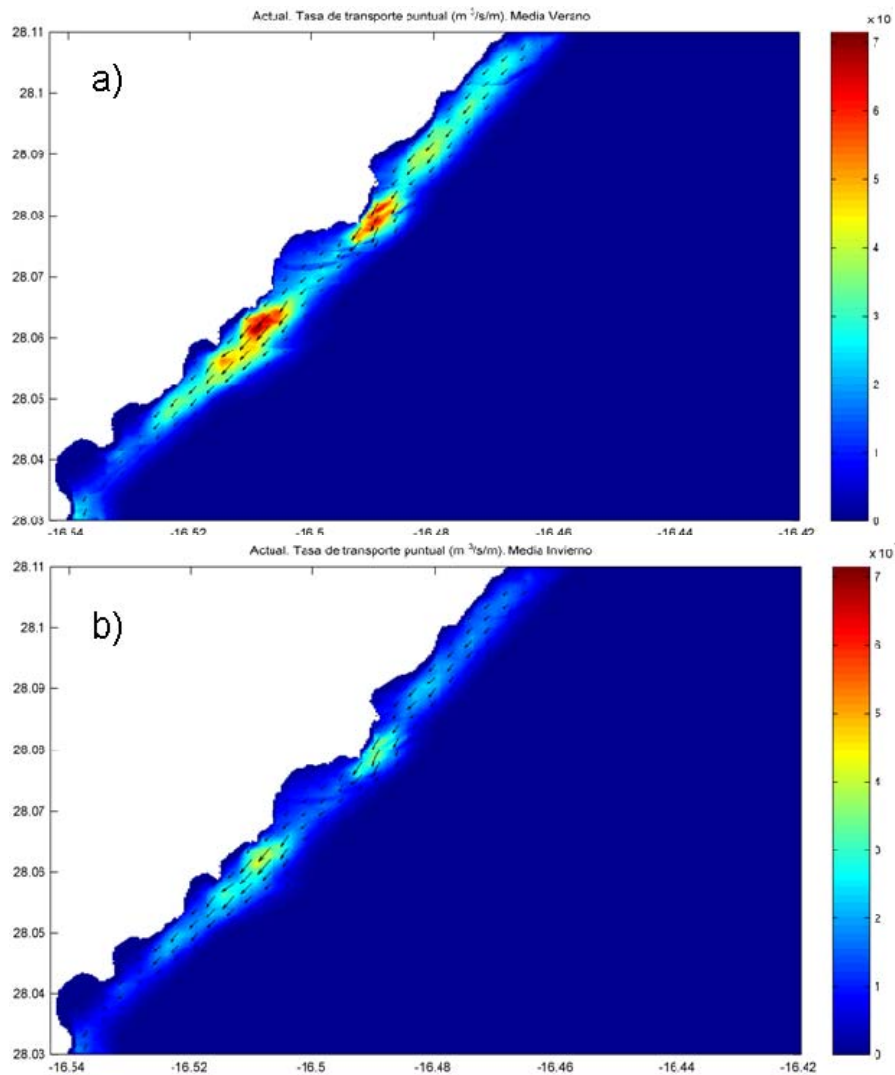


Figura 3.14 Tasa de transporte para la situación actual ( $m^3/s/m$ ). a) Periodo de verano (de abril a septiembre); b) Periodo de invierno (de octubre a marzo).

En la figura 3.15 se muestran los resultados obtenidos para la situación con puerto. Se observa que los patrones de transporte, al igual que en la situación actual (figura 3.14), son los mismos para la situación de verano (a) y de invierno (b). La diferencia estriba en la magnitud de la tasa de transporte.

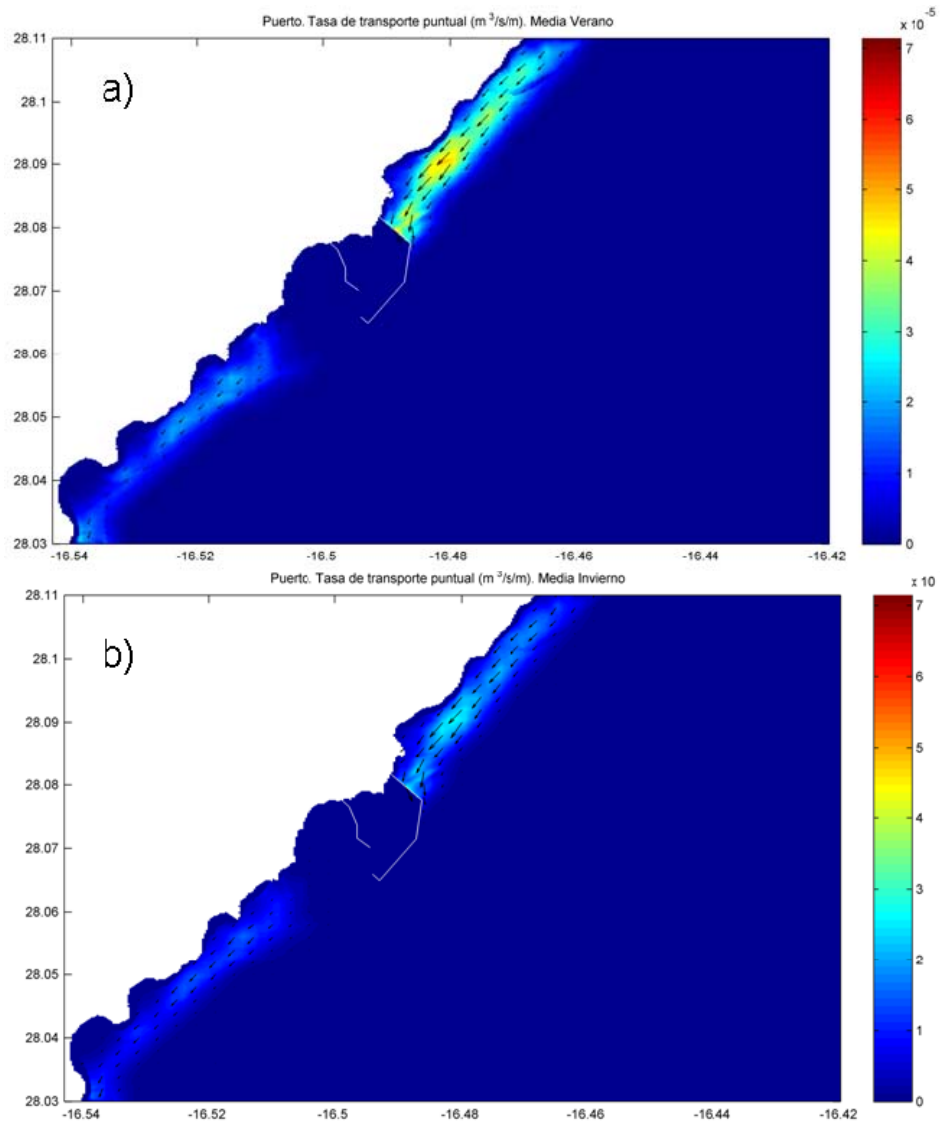


Figura 3.15 Tasa de transporte para la situación con puerto ( $m^3/s/m$ ). a) Periodo de verano (de abril a septiembre); b) Periodo de invierno (de octubre a marzo).

Para finalizar este análisis, en la figura 3.16 se muestra la influencia del tamaño de grano en el número de días al año en los que hay capacidad de transporte potencial de sedimentos. Se muestran 3 gráficos para 3 tamaños de grano diferentes: a) arena fina ( $D_{50} = 0.2$  mm), b) arena media-gruesa ( $D_{50} = 0.5$  mm), c) arena gruesa ( $D_{50} = 0.8$  mm).

Se observa que entre los dos primeros casos (paneles a y b), no existen apenas diferencias. Para profundidades inferiores a 10 m, la práctica totalidad de los días poseen capacidad de transporte potencial. Entre los 10 y los 30 m, la capacidad disminuye rápidamente hasta aproximadamente 100 días al año y, a partir de los 30 m de profundidad, el número de días con capacidad para el transporte de sedimentos es prácticamente inexistente. Para el tercer caso (panel c) se observa que el número de días con transporte potencial para profundidades mayores de 10 m, es similar a los dos casos anteriores. Sin embargo, cerca de la costa sí se aprecia que al aumentar el tamaño de grano se produce una disminución en el número de días con capacidad de transporte.



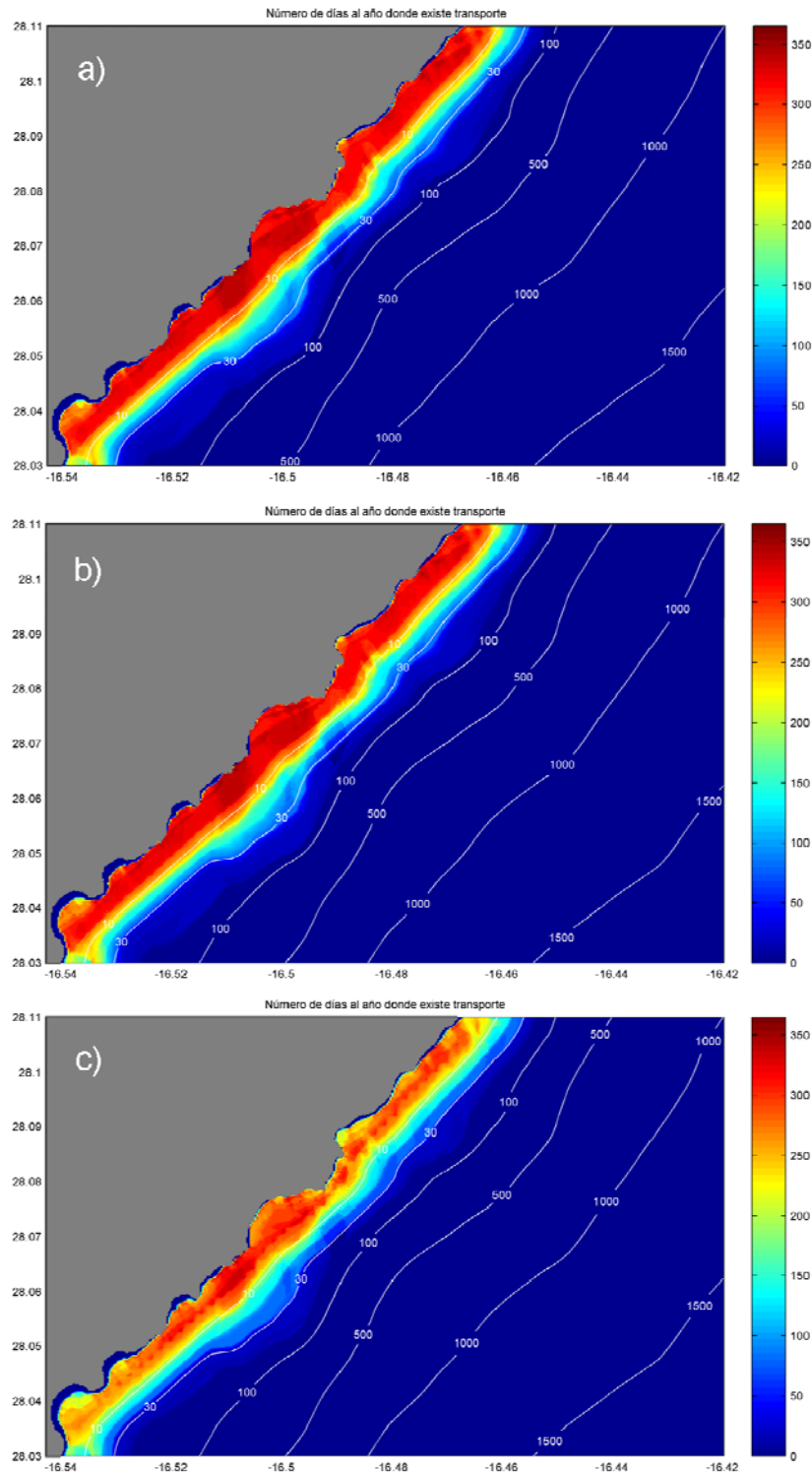


Figura 3.16. Número de días al año en los que se produce transporte de sedimentos. a)  $D_{50}=0.2\text{mm}$ ; b)  $D_{50}=0.5\text{mm}$ ; c)  $D_{50}=0.8\text{mm}$ ;

### 3.5 Modelo conceptual de funcionamiento del sistema sedimentario

Para plantear el funcionamiento del transporte litoral en la zona de estudio, se ha utilizado la información disponible sobre batimetría, geofísica, bionomía y granulometría, junto con los resultados obtenidos en este trabajo de clima marítimo e hidrodinámica de la costa de Granadilla.

Como se ha visto en los apartados anteriores, en esta zona de la costa, el transporte potencial de sedimentos tiene una componente neta hacia el suroeste. Este hecho, conocido ampliamente por todo observador conocedor de la zona, ha hecho pensar, y así aparece escrito en alguno de los informes previos, que el esquema de funcionamiento podría ser análogo al que se da en la costa Mediterránea española, donde existe un importante transporte litoral en esa dirección y donde los puertos, normalmente, constituyen barreras a ese flujo, provocando la acumulación de arena aguas arriba de la estructura y produciendo problemas de erosión aguas abajo (véase un esquema en la figura 3.17). Sin embargo, ni los procesos, ni el tamaño de grano, ni la batimetría son iguales en ambas localizaciones. En zonas donde el transporte de sedimentos es longitudinal a lo largo de la costa, y consecuencia de la corriente de rotura del oleaje, la presencia de puertos o estructuras provoca una interrupción en el transporte de material, que ocasiona zonas de parada en el transporte aguas arriba del puerto (zonas de sedimentación), y zonas de erosión aguas abajo. Sin embargo, en la zona de estudio el transporte es de plataforma. Es un transporte por fondo, que se ve incrementado aguas arriba del puerto debido a la reflexión ocasionada por el mismo, y que se ve disminuido aguas abajo como consecuencia de la disminución del oleaje y de las corrientes (véase la figura 3.11). Este hecho está fuertemente ligado a la batimetría presente en la zona. Mientras en áreas con claro transporte longitudinal, la batimetría que se observa es también continua longitudinalmente, en la costa de Granadilla (véase la figura 3.20), además de una fuerte pendiente, existen grandes discontinuidades debido a la presencia de sumideros y cañones submarinos.

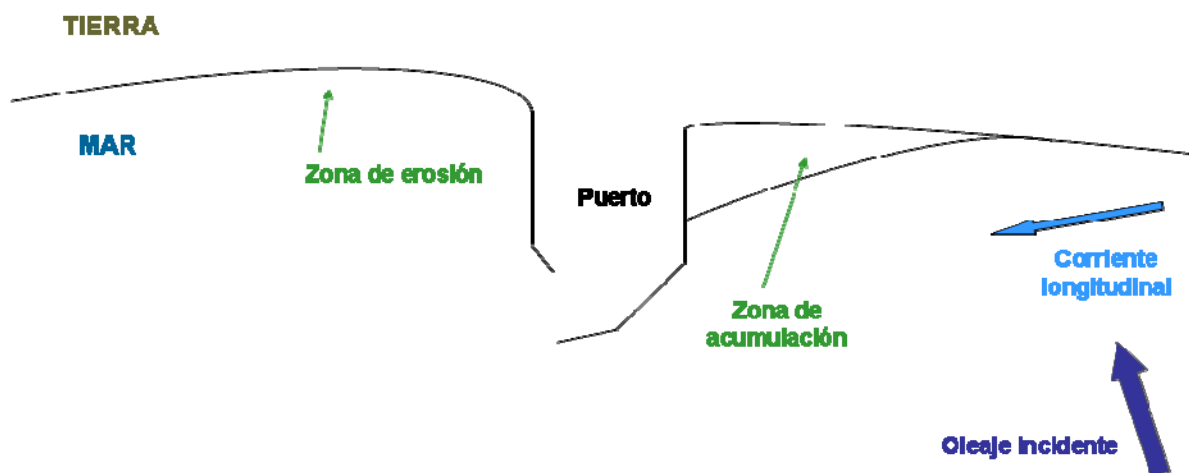


Figura 3.17. Esquema de una barrera al flujo de sedimentos producida por un puerto en zonas con transporte longitudinal (por rotura del oleaje).

En la figura 3.18 se pueden ver las curvas batimétricas aguas arriba y aguas abajo de la futura ubicación del puerto (circulo rojo) y en la figura 3.19 se presenta una ampliación de ambos tramos. En la figura 3.19 se han marcado con elipses azules las tres zonas (veril de La Jaca, sumidero de El Médano y sumidero de La Pelada) donde la batimetría presenta gran pendiente muy cerca de la costa. Esta configuración es determinante para el funcionamiento del transporte litoral ya que actúan como sumideros para el flujo de sedimento longitudinal existente en este tramo de costa (véase la figura 3.20), haciendo que se pueda plantear un modelo conceptual basado en células con muy poco o inexistente intercambio de sedimento entre ellas. De hecho, dada la configuración del veril de La Jaca, se puede considerar despreciable el flujo de sedimento que pueda pasar de las zonas al norte de La Jaca.

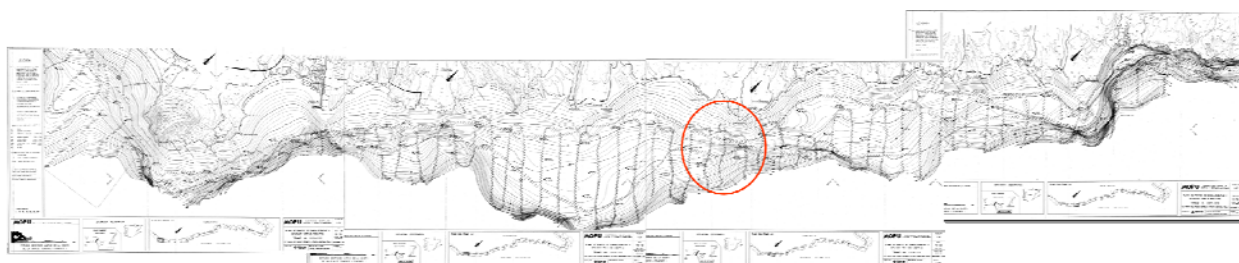


Figura 3.18. Batimetría de la zona de estudio (Fuente: "Estudio geofísico marino de la costa de la isla de Tenerife (Tenerife)", MOPU (1990)). El círculo rojo señala la ubicación del futuro puerto.

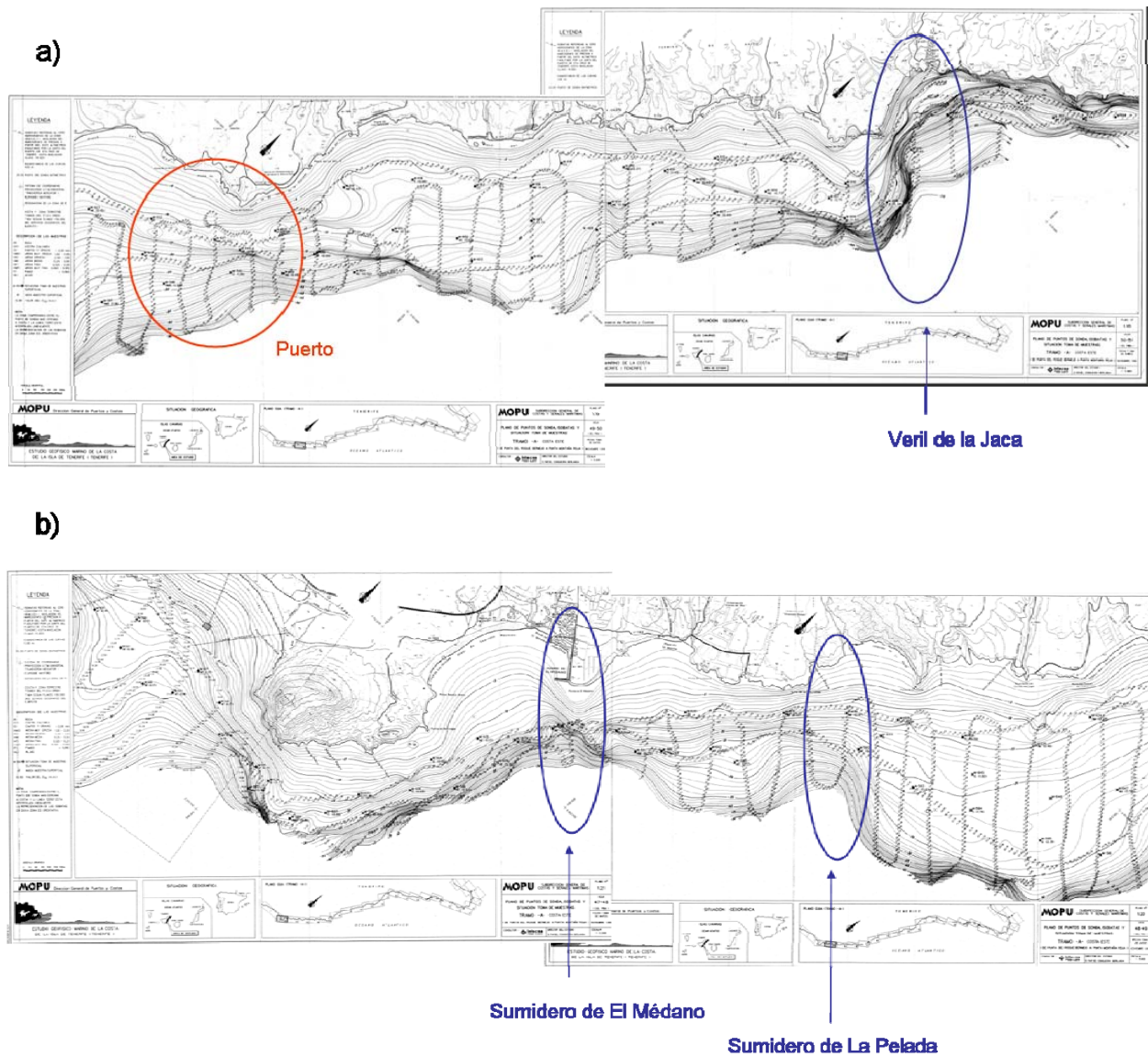


Figura 3.19. Batimetría de la zona de estudio (Fuente: "Estudio geofísico marino de la costa de la isla de Tenerife (Tenerife)", MOPU (1990)). a) zona aguas arriba del futuro puerto; b) zona aguas abajo.





Figura 3.20. Zonas de la batimetría que actúan como sumideros de sedimento

Sintetizando lo expuesto hasta ahora, la figura 3.21 presenta el modelo conceptual propuesto, donde se incluyen las fuentes y los sumideros de sedimento en la zona de estudio (desde Punta de los Gomereros, después del veril de La Jaca, hasta punta de El Médano, en el sumidero de El Médano). Este tramo de costa recibe aportes de sedimentos de origen volcánico de los barrancos y de origen biológico (bioclastos) de los fondos de maërl. La flecha azul indica el transporte longitudinal del sedimento que existe en este tramo de costa que, considerando que el veril de La Jaca actúa como una barrera, provendrá, principalmente, de los barrancos (barrancos de El Río y de El Helecho) y del maërl. Las flechas rojas indican la pérdida de sedimento en los sumideros de El Médano y La Pelada, aguas abajo del puerto.

Con base en este modelo de funcionamiento, en el apartado siguiente se calculará el transporte real en la zona de influencia del puerto.

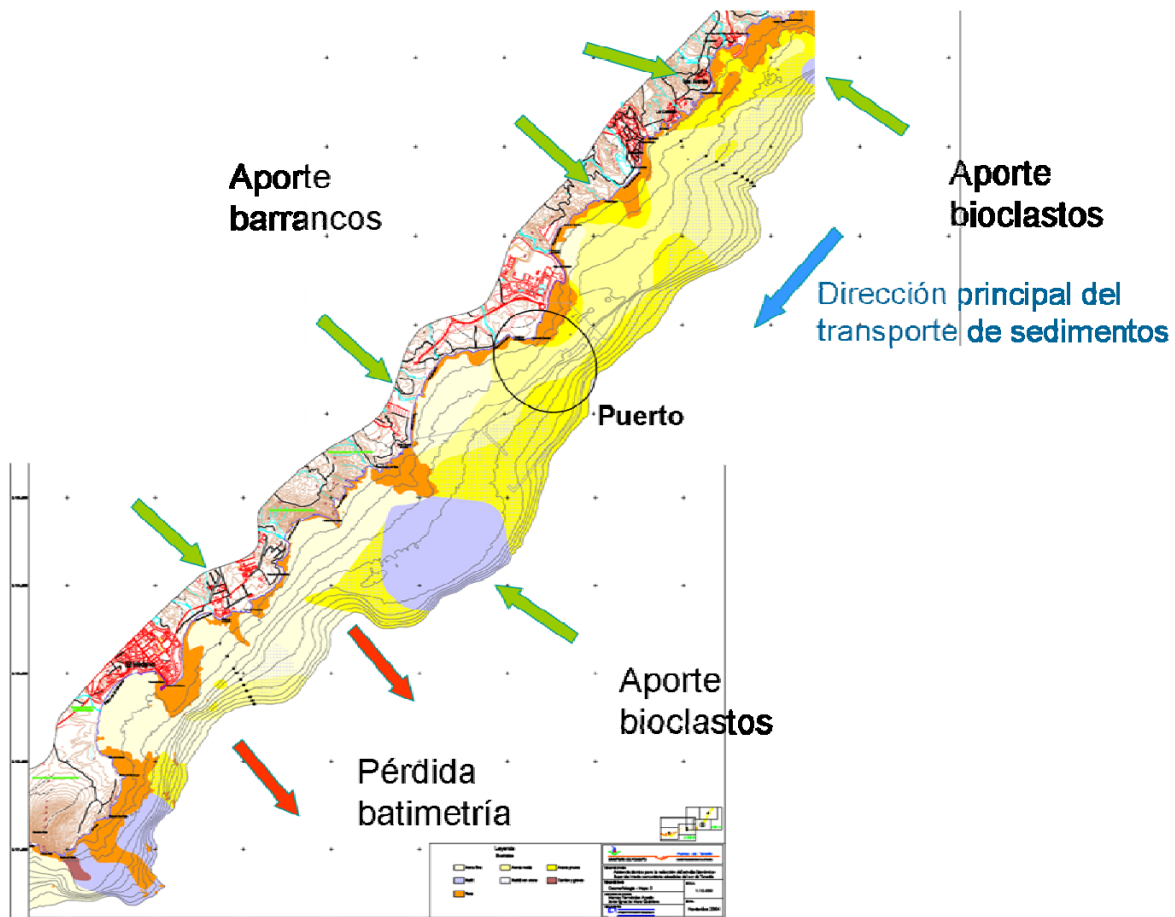


Figura 3.21. Modelo conceptual sedimentario

### 3.6 Cálculo del transporte real

Para estimar el transporte real existente aguas arriba del futuro puerto, aceptando que el veril de La Jaca constituye una barrera al transporte litoral, es necesario calcular los aportes de sedimento de los barrancos y de los fondos de maërl del tramo de costa comprendido entre el espigón de Las Tetas y la ubicación del puerto.

De la misma forma, se estimará el transporte real existente aguas abajo del futuro puerto para conocer el volumen total de sedimentos que actualmente entra en la ZEC Sebadales del Sur de Tenerife.



### 3.6.1. Aporte de los barrancos

El primer paso para estimar el aporte de los barrancos es la evaluación de los niveles erosivos en las cuencas de los barrancos de la zona. Utilizando los datos presentados en el capítulo anterior (apartado 2.4) se obtendría que la calificación de la erosión es Moderada-Grave, con un nivel de erosión media entre 50-100 t/ha·año.

Por otro lado, estudios sobre desertificación (Proyecto INTERREG III B Azores-Madeira-Canarias (BIONATURA)), indican un Índice de sensibilidad a la desertificación (ISD) con un nivel "Alto" (1.808) para gran parte de la cuenca del Barranco del Río en Arico.

Una vez hecho esto, es necesario evaluar la tasa de erosión del suelo. Como se vio en el capítulo anterior, la formulación que se va a utilizar es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). A continuación se obtendrán los parámetros necesarios:

**El factor R** depende de la intensidad de lluvia y de la lluvia total. Es el producto acumulado para el período de interés (normalmente un año), con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50% o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias

Para obtener el valor del factor "R", tal y como lo define la fórmula original, se necesitaría contar con una estación climatológica en el área de estudio, así como disponer de un registro de intensidades y tiempos de las lluvias durante varios años o al menos de los eventos de lluvia del año para el que se hace el estudio.

Los datos proporcionados por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife incluyen registros de precipitaciones medias (mensuales y anuales) obtenidos con el modelo hidrológico de superficie desarrollado por el CIATF. Estos registros parecen obtenidos a partir de isoyetas de precipitación (no se dispone de los datos brutos ni de la localización de los puntos de registro). De esta forma, en los barrancos más extensos (El Río o Charcón) aparecen valores anuales (se supone que en puntos de cabecera) en torno a 315 mm; en barrancos de recorrido medio como Tagoro 242 mm; y en los barrancos pequeños en la costa alrededor de 170 mm.

En este estudio, como se ha realizado un único análisis por cuenca, para estimar el factor "R" se ha tomando el valor medio anual para el sur de Tenerife de 223 mm (fuente: [http://www.aguastenerife.org/4\\_tfeyelagua/4\\_1\\_hidrometeorologia/4\\_1\\_1.html](http://www.aguastenerife.org/4_tfeyelagua/4_1_hidrometeorologia/4_1_1.html)). Finalmente, aplicando el método recomendado por la Food and Agriculture Organization, FAO (1979), que utiliza el índice de Fournier, se obtiene el valor de R de la forma siguiente:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P_t}$$

donde:

R = índice de Fournier,

$P_i$  = precipitación promedio mensual.

$P_t$  = precipitación promedio anual.

Con los datos disponibles para la distribución mensual de la precipitación media anual en el sur de Tenerife se obtiene un valor de  $R=33.41$ .

**El factor de erosionabilidad K** es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor erosividad de la lluvia (Mg/J), cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de una pendiente del 9% de gradiente y 22.1 m de longitud. Se calcula en función de los porcentajes de limo+arena muy fina (0.1-0.002 mm), porcentaje de arena, porcentaje de materia orgánica, índice de permeabilidad e índice de textura.

Se ha estimado el valor de K mediante el nomograma de la figura 3.22 obteniéndose un valor de  $K=0.38$ .

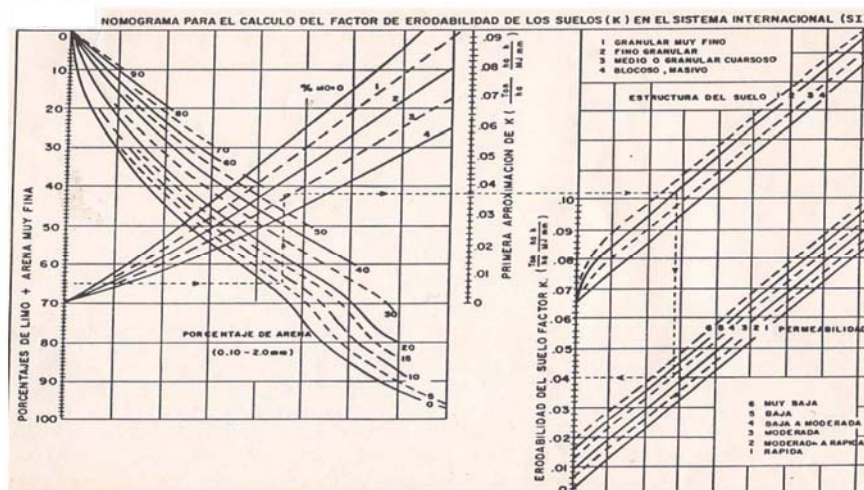


Figura 3.22. Nomograma para el cálculo del factor de erosionabilidad de los suelos (K) en el sistema internacional.

Los factores **L** y **S** se pueden combinar en un **factor topográfico** que combina el efecto de la pendiente, **S**, con la longitud de flujo **L** y que se calcula mediante la ecuación:

$$LS = (l/22.13)^m (65.41 \text{ sen}^2 \alpha + 4.45 \text{ sen } \alpha + 0.065)$$

donde:

**l** = longitud de la pendiente en metros

$\alpha$  = ángulo de la pendiente

**m** = 0.5 para pendientes iguales o mayores de 5%; 0.4 para pendientes entre 3.5 y 4.5 %; 0.3 para pendientes entre 1.0 y 3.0; 0.2 para pendientes uniformes menores de 1%

El factor topográfico se ha determinado estableciendo una zona promedio de erosión para las cuencas de los barrancos de mayor tamaño (Charcón, El Río y El Helecho), obteniendo un valor de **LS=32.06**.

Para los barrancos de tamaño intermedio (Tagoro, La Barca y Los Valos) la estimación de una zona de erosión promedio resulta en un valor de **LS=26.46**.

Finalmente, para los barrancos de cuencas más reducidas (Cobón y Los Calderones), se ha estimado **LS=23.14**.

**El factor C** de cultivo es un índice del grado de cobertura y protección que presenta la vegetación. Es el factor más variable y sujeto a cambios, siendo constante para cultivos permanentes y variable para cultivos anuales.

Para su estimación se han empleado las tablas publicadas por Wischmeier que indican los valores de **C** para los tipos más comunes de cultivos, así como de las áreas forestales. El valor adoptado es de **C=0.23**.

**El factor P**, refleja el efecto de las prácticas de conservación de suelos que tienden a modificar la topografía, tales como terrazas o cultivos en franjas y curvas de nivel. Como en este caso no se observan de forma generalizada estas prácticas de conservación, se adopta un valor de **P=1**.

Con la aplicación de los valores estimados para los diferentes factores a la **USLE** se obtienen las siguientes pérdidas de suelo anuales:

Barrancos de El Río, El Helecho y Charcón:

$$A = 93.62 \text{ t/ha}$$

Barrancos de Tagoro, La Barca y Los Valos:

$$A = 77.26 \text{ t/ha}$$

Barrancos de Los Calderones y Cobón:

$$A = 67.57 \text{ t/ha}$$

Estos valores no resultan en principio discordantes con el rango indicado en el INES para esta zona de Tenerife (50-100 t/ha·año). No obstante hay que indicar que el ajuste de los factores de la ecuación (especialmente del factor topográfico, en el que se han evaluado unos valores promedio de pendiente y longitud) puede generar una alta dispersión de los resultados, siendo habitual que la aplicación de la USLE sobrestime la capacidad de transporte.

Teniendo en cuenta los datos de mineralogía disponibles para las cuencas de los barrancos de El Río, Los Valos y Los Calderones (véase la figura 3.23), se puede establecer para los diferentes tamaños de cuencas de los barrancos, la composición de fragmentos de rocas en las mismas (95% para las mayores, 90% para los barrancos intermedios y 85% para los de menor recorrido y cuenca).

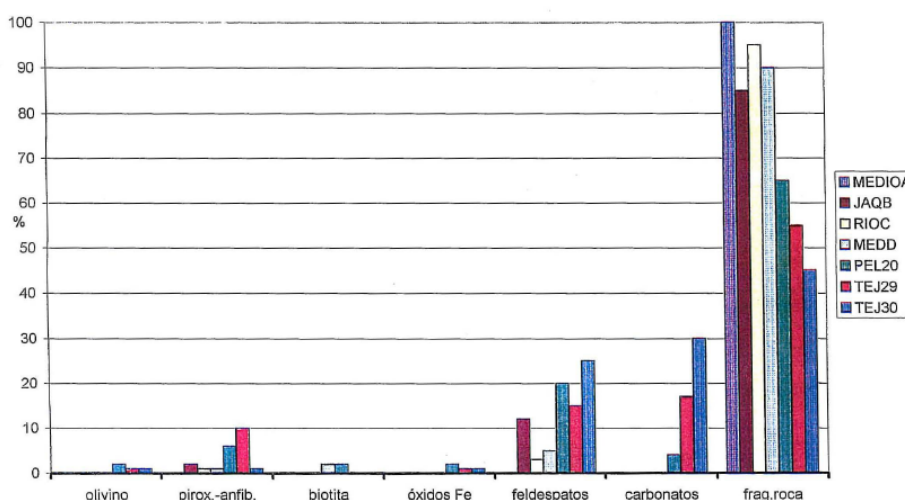


Figura 3.23. Mineralogía de Barrancos y dunas. (Barranco de El Río: RIOC. Barranco de Los Calderones: JAQB. Barranco de Los Valos: MEDD). (fuente: Informe sedimentológico para valorar la incidencia en la costa del nuevo puerto de Granadilla. J Nuez. Noviembre 1998)

A partir de este dato se puede considerar de manera aproximada que el valor de erosión potencial obtenido afectaría a la parte de superficie de las cuencas que no está conformada por fragmentos de roca, ya que la USLE se aplica considerando la capacidad de erosión de la energía de las gotas de agua precipitadas sobre suelos de granulometría fina susceptibles de arrastre por esa energía.

La extrapolación de este resultado a esas fracciones (5, 10 y 15%) de las cuencas de los barrancos analizados supondría las aportaciones de sedimentos que se indican en la tabla 3.1

Barranco	Aportación (t/año)
Barranco de El Río	13472
Barranco de El Helecho	9656
Barranco de El Cobón	2412
Barranco de Tagoro	10677
Barranco de Charcón	15349
Barranco de La Barca	5795
Barranco de Los Calderones	1956
Barranco de Los Valos	6922

Tabla 3.1. Aportación de sedimentos de los barrancos.

Por lo tanto, las cuencas conjuntas de los barrancos de El Río y de El Helecho, situados al noreste del puerto de Granadilla, tendrían una aportación de **23128 t/año** y, considerando una densidad media para el material erosionado de  $2.25 \text{ t/m}^3$ , resultaría un volumen de **10280 m<sup>3</sup>/año**.

Por otra parte, utilizando las curvas granulométricas disponibles, se ha estimado que la fracción arena comprenderá un 10-30% del volumen total, lo que resulta en un volumen de arena en torno a **1000-3000 m<sup>3</sup>/año** de material procedente de los barrancos de El Río y de El Helecho.

Aguas abajo del puerto, antes de entrar en la ZEC, vierten los barrancos de Charcón y Tagoro, con una aportación anual de 15349 y 10677 m<sup>3</sup>, respectivamente. El volumen de arena, estimado en un 10-30%, será por tanto de **1500-4600 m<sup>3</sup>/año** para el barranco de Charcón y de **1000-3200 m<sup>3</sup>/año** para el barranco de Tagoro.



Cabe destacar que estos aportes se han calculado bajo el supuesto de que el cauce de los barrancos se encuentra en un estado natural, sin alteraciones antrópicas que modifiquen el cauce original. Sin embargo, tal y como se observa en la figura 3.24, existen un conjunto de obstáculos a lo largo de los cauces que podrían suponer un impedimento al transporte de sedimentos, no siendo objeto del presente estudio cuantificar el volumen de sedimentos que queda retenido.

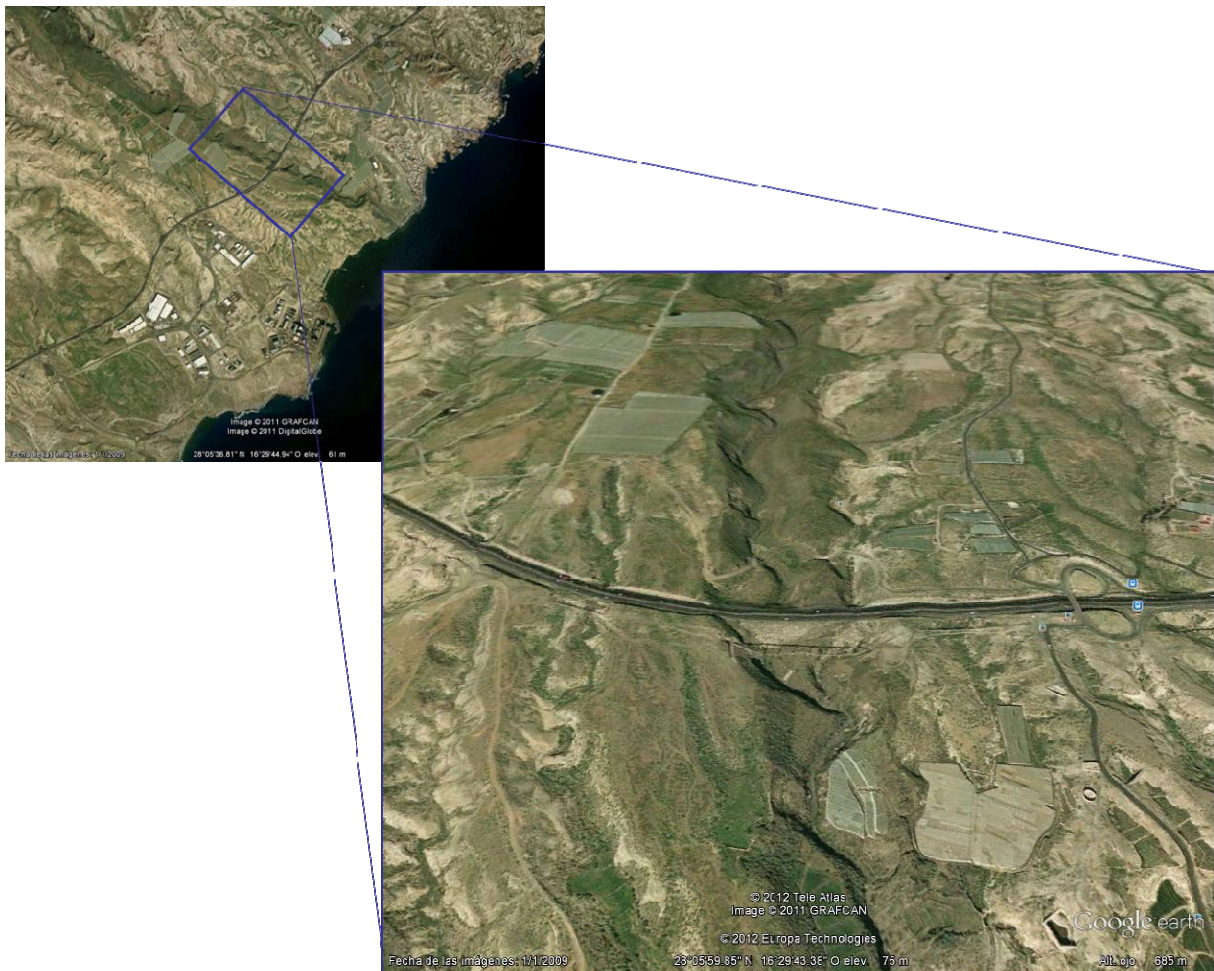


Figura 3.24. Ejemplo de obstáculo (carretera) sobre el Barranco de El Helecho.



### 3.6.2. Aporte de los fondos de maërl

Los campos de algas rojas coralíneas (rodolitos o maërl) son capaces de generar un sedimento rico en carbonato cálcico. La tasa de crecimiento de los rodolitos está fuertemente relacionada con la temperatura del agua y con la cantidad de luz recibida, y una forma de expresar esta tasa de crecimiento es mediante la cantidad de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) fijado anualmente.

Los fondos de maërl en Canarias están formados principalmente por el alga calcárea *Lithothamnion corallioides*. Martín et al. (2006), basándose en medidas realizadas en Brest, han estimado la fijación media anual de las poblaciones de *L. corallioides*, para aguas costeras templadas, entre 300 y 3000 g de  $\text{CaCO}_3/\text{m}^2$ .

Teniendo en cuenta que en la zona de estudio las condiciones de temperatura del agua son muy estables (17°C en Marzo, 24°C en Octubre), que existe una alta insolación y que las aguas oceánicas son muy claras y permiten una gran penetración luz, se estima que el valor para Canarias podría estar en torno a 2000 g de  $\text{CaCO}_3 \text{ m}^{-2}\text{año}^{-1}$  con una desviación de +/- 500 g  $\text{CaCO}_3 \text{ m}^{-2}\text{año}^{-1}$ .

En la figura 3.25 se muestra, sobre el mapa de geomorfología de los fondos, la zona que actualmente ocupan los fondos de maërl. Se observa como al sur del puerto, existe una zona bien delimitada, que ocupa una extensión de aproximadamente 2 Km<sup>2</sup>. Aguas arriba se aprecia otra zona de fondos de rodolitos pero el mapa disponible no permite estimar su dimensión. Se va a suponer sin embargo, que debe ser una zona de extensión considerable debido a la elevada proporción de carbonatos presente la playa de La Jaca (Informe sedimentológico para valorar la incidencia en la costa del nuevo puerto de Granadilla. De La Nuez Pestaña, J. Noviembre 1998) y a la presencia de arena gruesa en los alrededores.

Teniendo en cuenta que la densidad de carbonato cálcico es de 2700 Kg/m<sup>3</sup>, se obtiene que, aguas abajo del puerto, el aporte anual de sedimentos de origen orgánico estará entre **1000 y 2000 m<sup>3</sup>/año**, aproximadamente.

Asumiendo que las dimensiones de la zona ocupada por maërl aguas arriba del puerto son similares al área que ocupa el maërl aguas abajo, se estima que, al SW del puerto, el aporte anual de sedimentos de origen orgánico estará también entre **1000 y 2000 m<sup>3</sup>/año**. Este valor debe tomarse como un valor máximo de carácter orientativo, que debería ser contrastado cuando se disponga de un mapa de biocenosis más amplio.

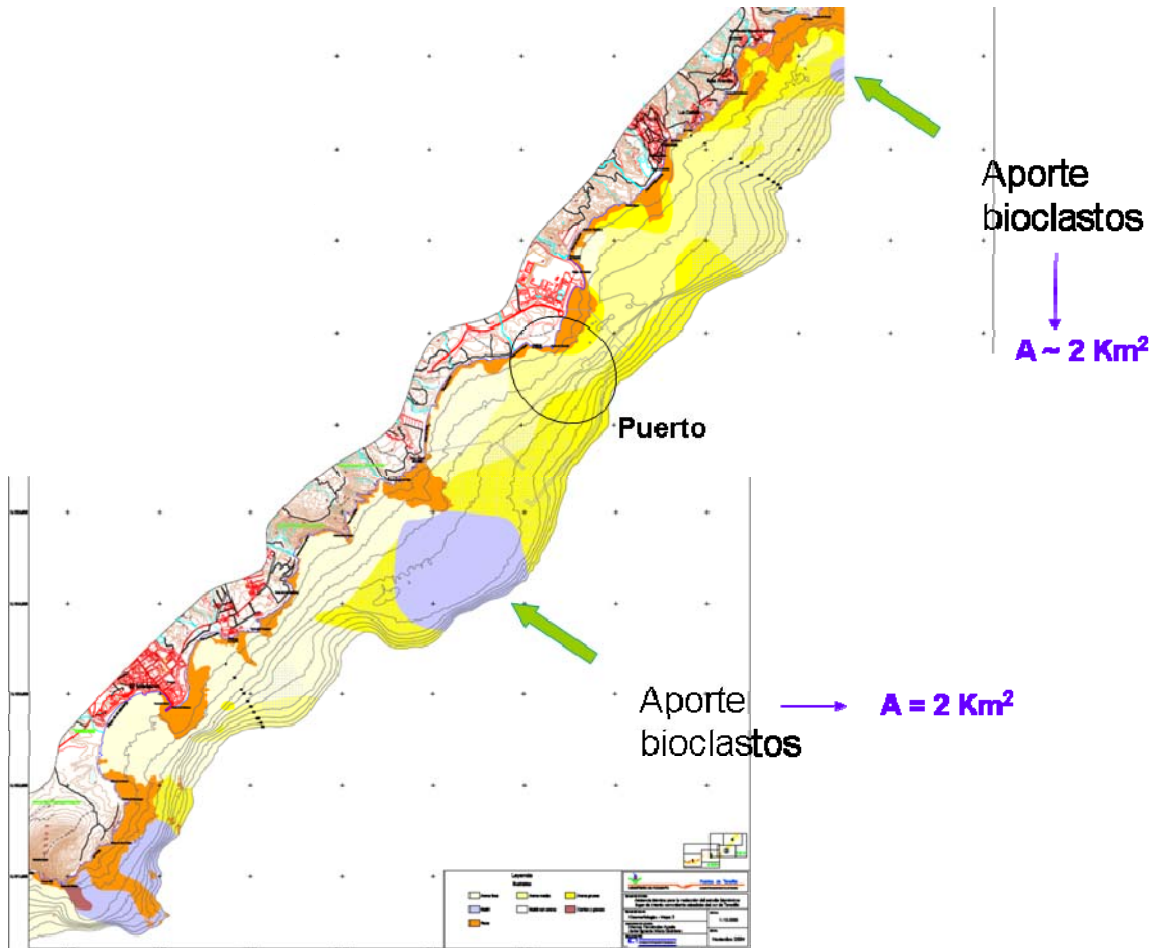


Figura 3.25. Delimitación de los fondos de maërl

### 3.6.3. Estimación del transporte real en función de los aportes de sedimento

En apartados anteriores se ha calculado el aporte de sedimentos de los barrancos y de los fondos de maërl en la zona comprendida entre el veril de La Jaca y la ubicación del nuevo puerto. En principio, este es el material disponible para ser transportado. Sin embargo, como se ha indicado en el modelo conceptual propuesto (apartado 3.5), debido a la configuración de la batimetría en esta zona, no todo este material aportado llega realmente aguas abajo del puerto.

Del vertido total de sedimentos aportado por los barrancos, solamente aquel que queda contenido entre la costa y la batimétrica de 10 m es el sedimento disponible para ser

transportado aguas abajo del puerto, ya que debido a la configuración de la batimetría, todo el sedimento depositado a mayor profundidad no llegará a atravesar dicha zona. Esto es así ya que, dada la dinámica del transporte evaluada en este capítulo, el material depositado más allá de esta cota, a medida que se va transportando es conducido a profundidades mayores y, finalmente, se pierde por alguno de los barrancos submarinos (véase la figura 3.26).

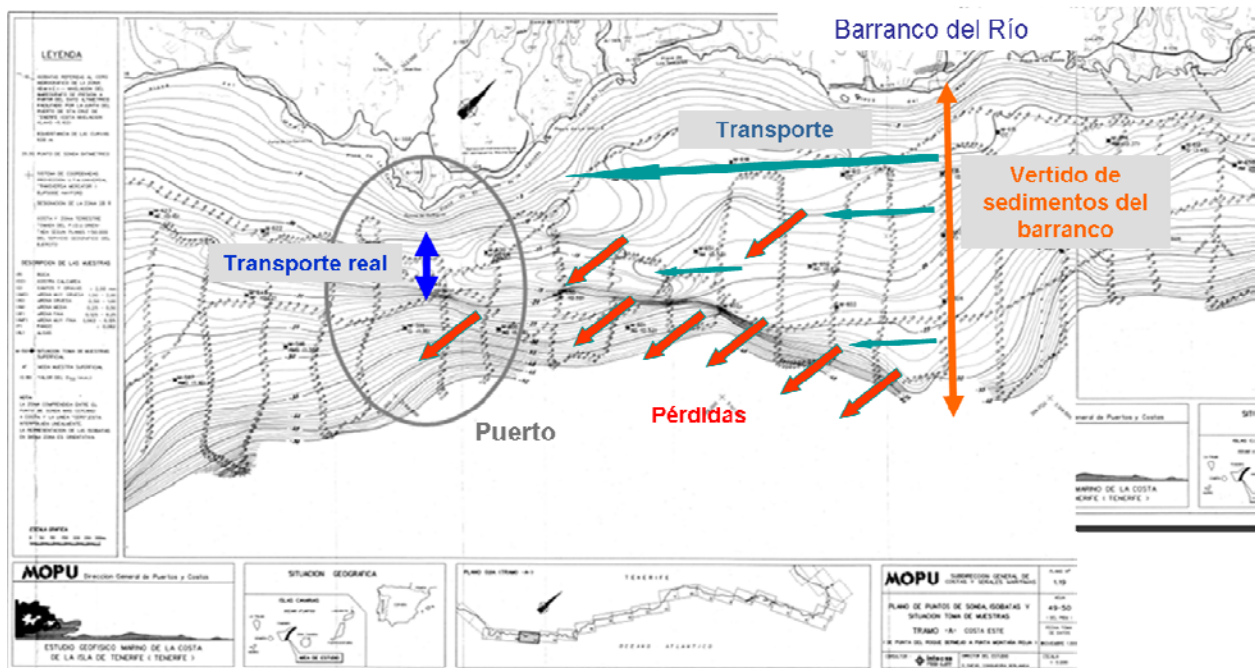


Figura 3.26. Esquema del vertido y transporte del sedimento procedente de los barrancos

Para estimar el transporte real que se producirá a partir de este aporte de los barrancos, se asumirá que el vertido de sedimentos se distribuirá entre la costa y la batimetría de 30 m, disminuyendo linealmente de forma que la máxima concentración de sedimentos estará en la costa y la mínima en la batimetría de 30 (concentración = 0). De esta forma, se ha calculado que el flujo de sedimentos que será interceptado por el nuevo puerto es aproximadamente un 40% del aporte total de los barrancos (véase la figura 3.27), esto es, entre **400 y 1200 m<sup>3</sup>/año** aproximadamente.

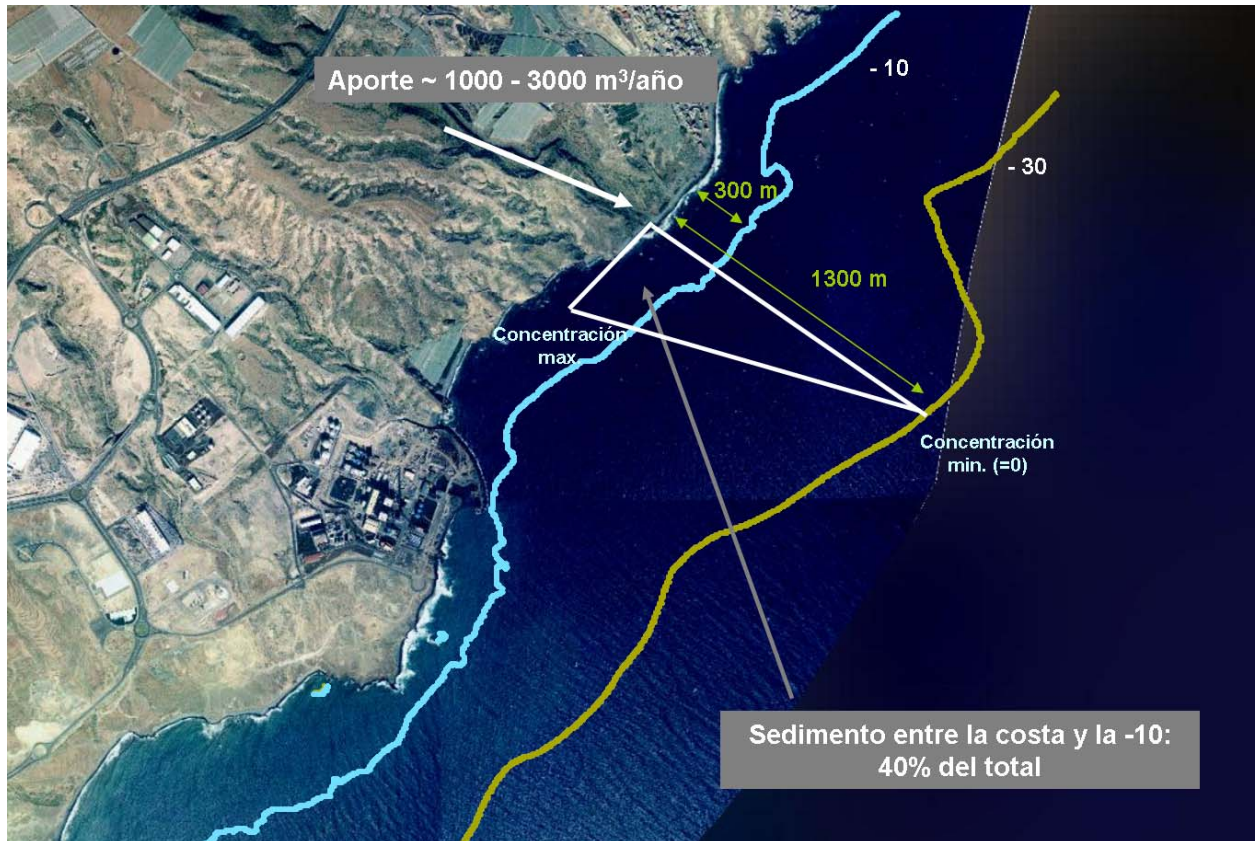


Figura 3.27. Estimación del transporte real del sedimento procedente de los barrancos de El Río y El Helecho (aguas arriba del puerto).

Al SW del puerto, los aportes provienen de los barrancos de Charcón y Tagoro. La fracción arena aportada conjuntamente por ambos barrancos asciende a 2500-7800 m<sup>3</sup>/año (véase la tabla 3.1). Como esta zona de aporte de sedimentos se encuentra muy próxima a la ZEC y no existen cambios abruptos en la batimetría, se ha considerado que todo el material aportado es susceptible de ser transportado al interior de la misma (véase la figura 3.28).





Figura 3.28. Flujo de material procedente de los barrancos de Charcón y Tagoro (aguas abajo del puerto).

Con respecto al transporte real proveniente del aporte de los fondos de maërl, en la 3.29 se observa que el material orgánico situado aguas arriba del puerto se localiza a mayor distancia que el vertido ocasionado por los barrancos de El Río y El Helecho. Por tanto, el sedimento de origen orgánico susceptible de ser transportado a través de la zona donde se ubicará el puerto, tendrá que salvar más obstáculos batimétricos (sumidero de El Río y veril de Los Tarajales) que aquel procedente de los barrancos. Por tanto, cabría esperar que la proporción de sedimento capaz de llegar a la zona será inferior que en el caso del sedimento procedente de los barrancos.

Asumiendo que la proporción de sedimento máxima que llegará a la zona es la misma que en el caso de los barrancos (40%), el sedimento procedente de los fondos de maërl que se verá retenido por la presencia del puerto oscila entre **400-800 m<sup>3</sup>/año**.

Aguas abajo del puerto, debido a la cercanía de los fondos de maërl a la ZEC, se ha considerado que todo el material aportado es susceptible de ser transportado al interior de la misma.

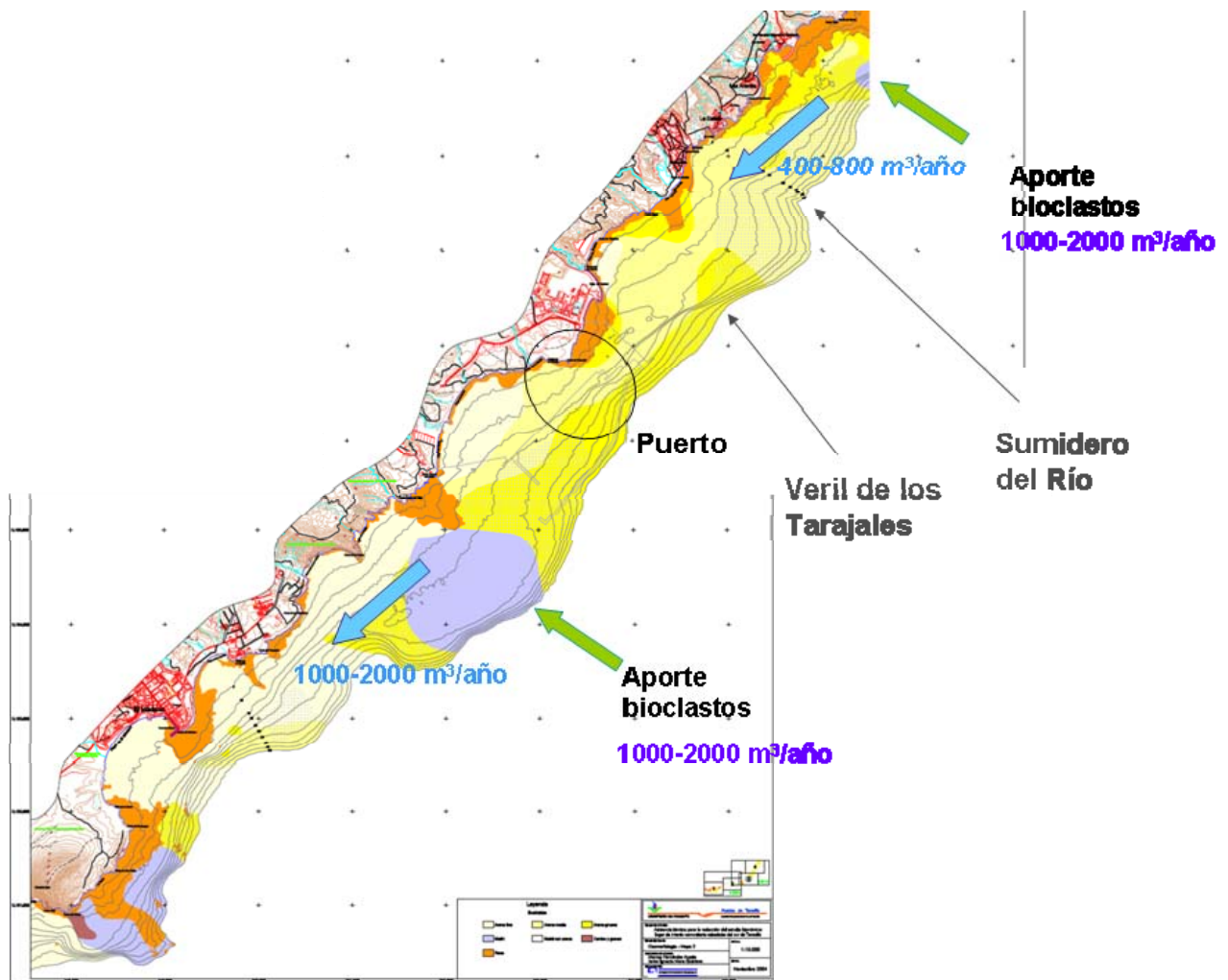


Figura 3.29. Estimación del transporte real del sedimento de origen orgánico.

### 3.7 Conclusiones

En el siguiente capítulo (Capítulo 4) se recogen las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados mostrados en este capítulo, centrandó éstas en dar respuesta a los aspectos concretos planteados por la Autoridad Portuaria de Tenerife.





## Capítulo 4.

## CONCLUSIONES



## 4. CONCLUSIONES

Tal y como se ha comentado en el Capítulo 1, el presente informe se ha desarrollado con el objetivo de tener la información suficiente para dar respuesta a las cuestiones concernientes al transporte sedimentario, planteadas por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife, concretamente:

1. Volúmenes de arena que en la situación previa y tras la construcción del Puerto entran en la ZEC Sebadales del Sur de Tenerife.
2. Variación del volumen transportado atendiendo a las distintas condiciones de clima marítimo y estacionales de la zona.
3. Zonas de acumulación de sedimentos tras la construcción del Puerto y velocidad con la que se depositan las arenas.

Dado que las cuestiones 1 y 2 están muy relacionadas, se responderán conjuntamente a continuación. Para ello, se presentan los resultados obtenidos de transporte sedimentario, tanto para la situación actual como para la situación futura (tras la construcción del puerto).

### **Situación actual**

Tal y como se ha analizado en el capítulo 3 (apartado 3.4), el transporte potencial en la zona de estudio es alto. Sin embargo, el transporte real es significativamente menor debido a que la cantidad de sedimento disponible es escasa y a que no existe continuidad longitudinal en la batimetría, pues la presencia de cañones y barrancos submarinos la divide en unidades sin apenas intercambio de material entre ellas.

Como se ha visto en la descripción del modelo conceptual de transporte de sedimentos (apartado 3.5), el veril de La Jaca supone una barrera al flujo de material que se produce en dirección SW; por tanto, para estimar el volumen de sedimento susceptible de ser transportado hasta la ZEC basta con estudiar los aportes que se producen al sistema en la zona comprendida entre ésta y el veril de La Jaca. Por otro lado, para tener en cuenta las modificaciones que la construcción del puerto producirá en el transporte sedimentario, se ha dividido esta zona (veril de La Jaca - ZEC) en dos partes: aguas arriba y aguas abajo del puerto (véase la figura 4.1).

Aguas arriba del puerto los aportes de material son de dos tipos: aportes fluviales a través de los barrancos (barranco de El Río y barranco de El Helecho) y aportes de origen orgánico de los fondos de maërl. En el apartado 3.6 se ha obtenido una estimación de estos aportes, que asciende a unos 1000-3000 m<sup>3</sup>/año en el caso de los barrancos y a unos 1000-2000 m<sup>3</sup>/año en el caso del maërl, lo que hace un total de 2000-5000 m<sup>3</sup>/año. Sin embargo, debido a la configuración de la batimetría (sumidero de El Río y escalón de El Tambor),

parte de estos aportes se pierden antes de llegar a la ZEC. Por lo tanto, el siguiente paso para conocer el flujo real de arena que actualmente entra en la ZEC proveniente de la zona aguas arriba del puerto, ha sido estimar estas pérdidas.



Figura 4.1 Zona de aporte de sedimentos aguas arriba y aguas abajo del puerto y ubicación de la ZEC

Tal y como se ha explicado en el apartado 3.6 al hablar del transporte real, del total de sedimentos aportados por los barrancos al NE del puerto, sólo aquellos que se depositen entre la costa y la cota de -10 serán susceptibles de ser transportados por las corrientes

existentes en la zona. En el apartado 3.6 se estimó que este volumen es de aproximadamente  $400-1200 \text{ m}^3/\text{año}$ . Si a esto se añade el volumen de sedimentos aportado por los fondos de maërl ( $400-800 \text{ m}^3/\text{año}$ ), el resultado es un total de  **$800-2000 \text{ m}^3/\text{año}$** . Por lo tanto, este es el volumen estimado de arena proveniente del NE que, actualmente, atraviesa la zona donde se construirá el puerto, (véase la figura 4.2).

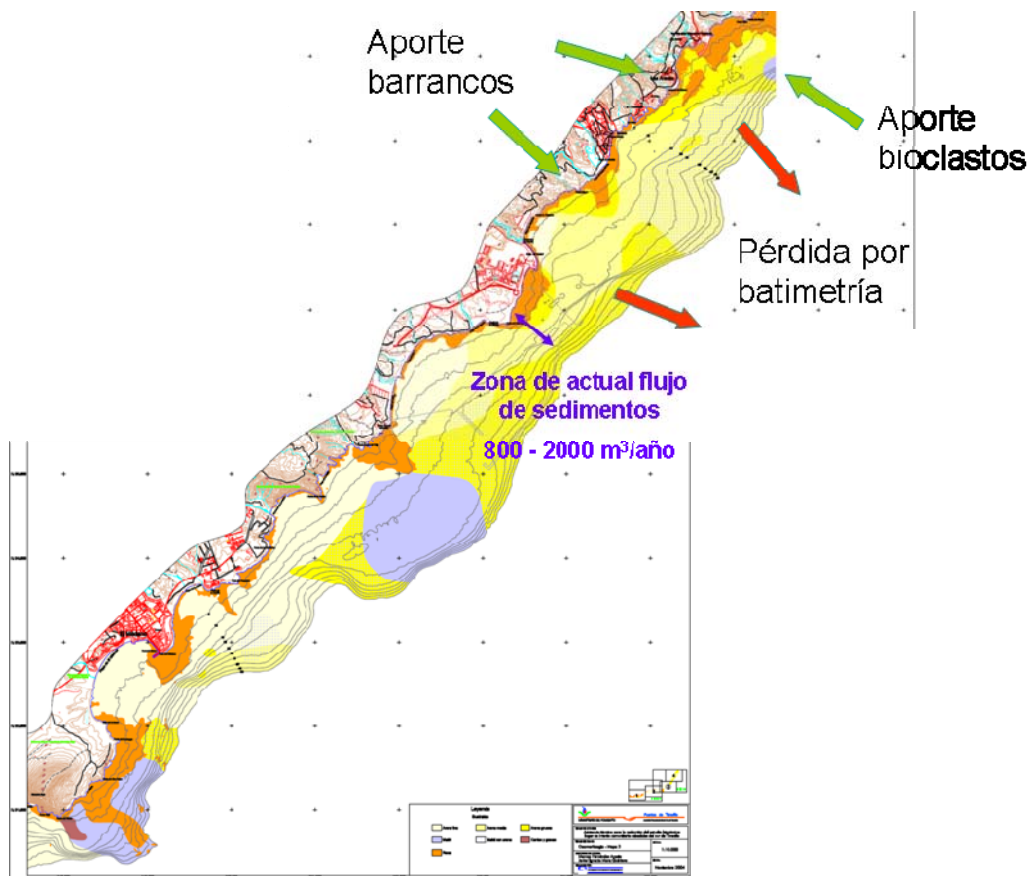


Figura 4.2 Zona donde se produce el actual transporte de sedimentos aguas arriba del puerto.

Aguas abajo del puerto, los aportes de sedimento provienen, a su vez, de dos barrancos (Tagoro y Charcón) y de los fondos de maërl. En el apartado 3.6 se ha estimado que, debido a la cercanía de estas fuentes de sedimento, todo el material aportado por estos barrancos, así como el material aportado por los fondos de maërl, es susceptible de ser transportado al interior de la ZEC (véase la figura 4.3). De esta forma, se obtiene un flujo de sedimentos de  $3500-9800 \text{ m}^3/\text{año}$ , generado aguas abajo del puerto.



Por lo tanto, sumando los valores obtenidos para las dos zonas (aguas abajo y aguas arriba), se estima que en la situación actual (sin puerto) el flujo de sedimentos que llega a la ZEC es de 4300-11800 m<sup>3</sup>/año.

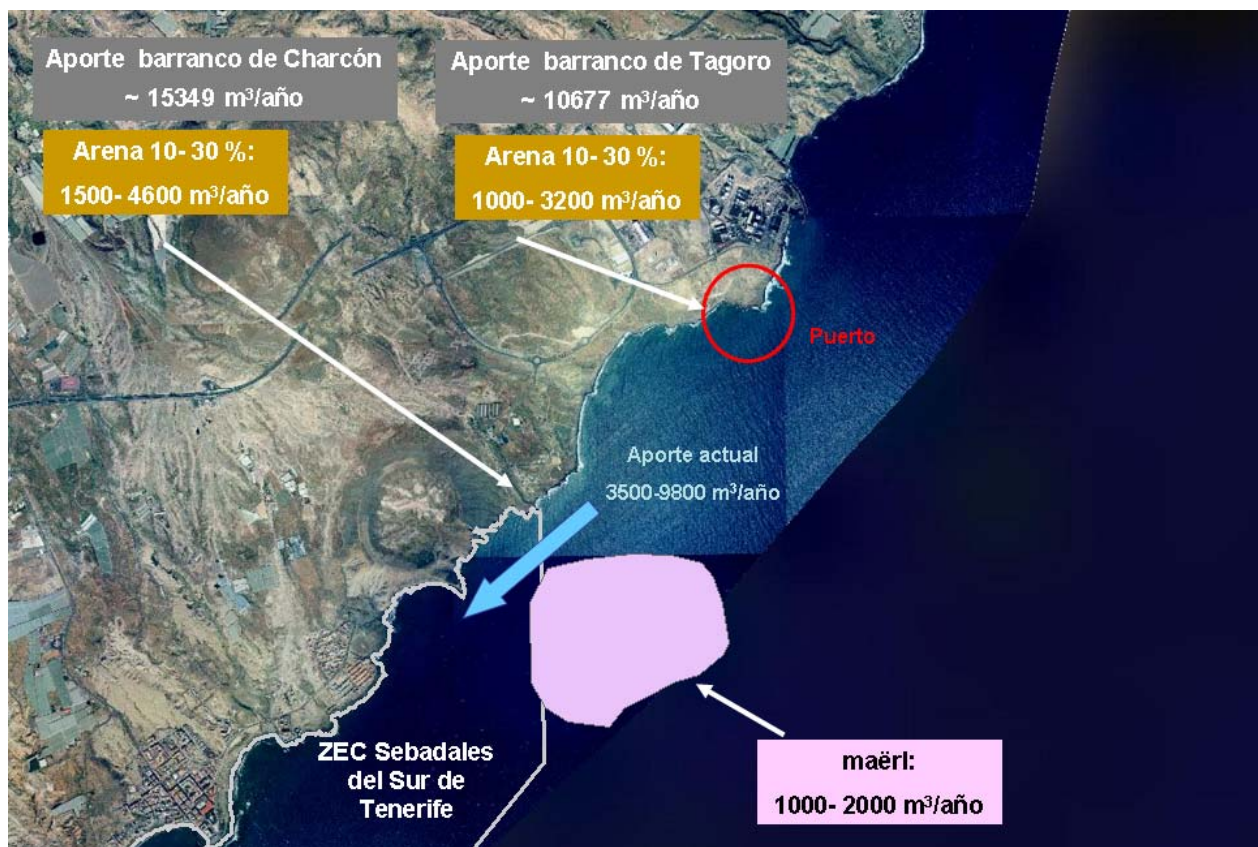


Figura 4.3. Flujo de sedimentos aguas abajo del puerto.

### Situación futura

La construcción del puerto producirá dos efectos en el transporte sedimentario litoral. El primero se produce aguas arriba del puerto y consistirá en una barrera al flujo sedimentario y el segundo efecto será una disminución del transporte potencial aguas abajo del puerto (véase el capítulo 3).

En cuanto al primer efecto, el material proveniente de la zona aguas arriba (800-2000 m<sup>3</sup>/año) se acumulará en la cara NE del puerto y, en consecuencia, dejará de entrar en la ZEC Sebadales del Sur de Tenerife.

Con respecto a la modificación del transporte potencial, en las figuras 3.10 y 3.11 del capítulo 3, se puede ver que la tasa de transporte potencial disminuye significativamente al SW del nuevo puerto. Sin embargo, dado que en esta zona el transporte potencial es de mucha mayor magnitud que el real, esta disminución no se traduce en una reducción del transporte real, puesto que el factor limitante aquí es la disponibilidad de material y no la capacidad de transporte. Es decir, a pesar de que el transporte potencial se reduzca de máximos en torno a  $4\text{-}5\cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s/m para la situación actual, a máximos en torno  $1\text{-}2\cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s/m para la situación con puerto, esta capacidad de transporte sigue siendo muy superior al flujo de sedimentos real obtenido a partir de los aportes en la zona. Por tanto, el transporte real aguas abajo (3500-9800 m<sup>3</sup>/año) no se verá mermado por este motivo.

Concluyendo, teniendo en cuenta estos datos, se ha estimado que el flujo de material que quedará interceptado por la construcción del nuevo puerto será de 800-2000 m<sup>3</sup>/año. Esta cantidad supone, aproximadamente, un 18% del flujo total de sedimentos que actualmente entra en la ZEC (4300-11800 m<sup>3</sup>/año).

### Nota

Recuérdese que estos resultados, se han obtenido a partir de los mejores datos disponibles en este momento. Sin embargo, se han asumido ciertas hipótesis en el cálculo las cuales, se resumen a continuación:

- Aporte de los barrancos obtenido con la formulación de la USLE (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo).
- La fracción arena de los barrancos se ha estimado en un 10-30% del aporte total.
- La pluma de vertido de los barrancos se distribuye entre la costa y la batimétrica de -30 m, disminuyendo linealmente. El sedimento depositado entre la línea de costa y la batimétrica de -10 (40% del total), es el sedimento que se transporta a través de la zona donde se ubicará el puerto.
- Para el cálculo del aporte de material de los barrancos se ha supuesto que los cauces de los mismos se encuentran en un estado natural, sin modificaciones antrópicas.
- La zona ocupada por el maërl aguas arriba del puerto se ha supuesto de igual dimensión que la zona ocupada por el maërl aguas abajo.
- Con base en bibliografía existente, se ha estimado que para Canarias, la tasa de fijación de carbonato cálcico estará en torno a 2000 g de CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup>/año con una desviación de +/- 500 g CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup>/año.
- El porcentaje del aporte total de los fondos de maërl, susceptible de ser transportado aguas abajo del puerto, se ha estimado en un 40% como máximo.

Todas estas hipótesis quedan suficientemente argumentadas en el texto recogido en el apartado 3.6 del capítulo 3.



En cuanto a la tercera cuestión planteada: “Zonas de acumulación de sedimentos tras la construcción del Puerto y velocidad con la que se depositan las arenas”, tras la construcción del puerto, se producirá una acumulación de sedimentos en la zona donde se produce una disminución en la tasa de transporte potencial (véase la figura 4.4), aguas arriba del puerto. La velocidad con la que se acumulará, se corresponderá con la tasa de transporte real que existe hoy en día, es decir, 800-2000 m<sup>3</sup>/año.

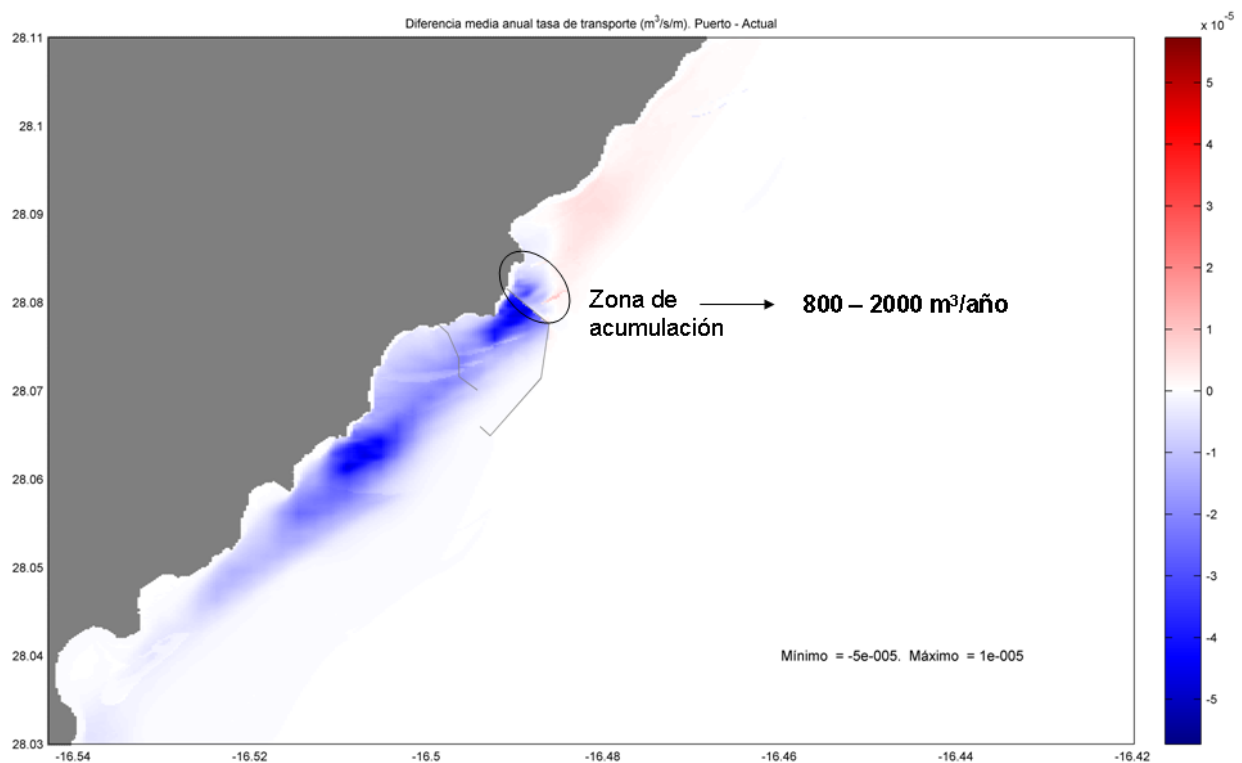


Figura 4.4 Zona de acumulación de sedimentos.



## Capítulo 5.

### REFERENCIAS



## 5. REFERENCIAS

- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4). pp 7649-7666. doi: 10.1029/98JC026222.
- Caires, S., Sterl, A., (2003). Validation of ocean wind and wave data using triple collocation. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3), pp 3098. doi: 10.1029/2002JC001491.
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, Vol 58, Issue 9, pp 851-862, doi: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.007.
- D'Angremond, K.; Van der Meer, J.W., and De Jong, R.J., 1996. Wave transmission at low-crested structures. *Proceedings of the 22th International Conference on Coastal Engineering (Orlando, FL, USA)*, pp. 2418-2426.
- Dean, R.G., E.P. Berek, K.R. Bodge, and C.G. Gable (1987) NSTS measurements of total longshore transport: *Coastal Sediments '87*, ASCE, p. 652-667.
- Farrish, K.W.; Adams, J. C.; Thompson, C. V. (1993). Soil conservation practices on clearcut forestlands in Louisiana. *J. Soil and Water Cons.* 48.
- Franke, R., (1982). Scattered data interpolation: test of some methods. *Mathematical Comparative* 38, pp 181–200
- Goda, Y., H. Takeda and Y. Moriya, 1967: Laboratory investigation of wave transmission over breakwaters, Report No. 13, Port and Harbour Research Institute, 38 p.
- Holthuijsen, L.H., Herman, A. and Booij, N., 2003: Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models, *Coastal Engineering*, 49, 291-305
- Kalnay et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470, 1996.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. A. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen, Eds., (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, 532 pp.

Martin S, Castets MD, Clavier J. 2006. Primary production, respiration and calcification of the temperate free-living coralline alga *Lithothamnion corallioides*. *Aquat. Bot.* 85: 121–128

Mínguez, R., Espejo, A., Tomás, A., Méndez, F.J., Losada, I.J., (2011). Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. doi: 10.1175/JTECH-D-11-00008.1

Rippa, S. (1999). An algorithm for selecting a good value for the parameter  $c$  in radial basis function interpolation. *Adv. Comput. Math.* 11, pp 193-210.

Rogers, W.E., J.M. Kaihatu, N. Booij, L.H. Holthuijsen (1999). Improving the numerics of a third generation wave action model. *Naval Res. Lab. Rep. NRL/FR/7320-99-9695*

Seelig, W.N., 1979, Effects of breakwaters on waves: laboratory tests of wave transmission by overtopping, *Proc. Conf. Coastal Structures*, 79, 2, 941-961

Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands*. Ed. Thomas Telford.

Swail, Val R., Andrew T. Cox, 2000: On the Use of NCEP–NCAR Reanalysis Surface Marine Wind Fields for a Long-Term North Atlantic Wave Hindcast. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 532–545.

Tolman, H.L., (1999). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.

Tolman, H.L., (2002) User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 139 pp. (disponible en [http://polar.wwb.noaa.gov/mmab/papers/tn222/MMAB\\_222.pdf](http://polar.wwb.noaa.gov/mmab/papers/tn222/MMAB_222.pdf))

WAMDI Group: Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V.C., Greenwood, J.A., Reistad, M., Zambresky, L., Ewing, J.A, (1988) The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, Vol 18. pp 1775-1810.

Willet, P. (1996). Molecular diversity techniques for chemical databases. *Information Research*, Vol.2, No. 3.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook*, nº 537. Washington D.C